

5

FUNDAMENTOS DA TÉCNICA DA RADIOGRAFIA COM NÊUTRONS

Reynaldo Pugliesi

Marcos L G Andrade

Marco A S Pereira

Fabio Pugliesi

Introdução

A radiografia com nêutrons é uma técnica de ensaios não destrutivos comumente empregada para a inspeção de materiais. Para se obter uma imagem, o material é posicionado em um feixe uniforme de nêutrons e o padrão de intensidade transmitido é convertido em imagem mediante uma tela conversora e um meio para o registro da imagem. Dentre as suas principais aplicações destaca-se a inspeção de materiais ricos em hidrogênio como óleo, borracha, graxa, água, sangue, plásticos, explosivos, adesivos, mesmo se envoltos por espessas camadas de alguns metais e, a inspeção de materiais radioativos. Desta forma as informações fornecidas pela técnica da radiografia com nêutrons complementam aquelas fornecidas pelas convencionais que empregam raios-X ou radiação gama. A radiografia com nêutrons encontra seus maiores usuários nas indústrias aeroespacial, automobilística, nuclear, na aviação civil e, em medicina [1,2,3]

Alem disto o desenvolvimento de sistemas operacionais para radiografias com nêutrons em tempo-real, permite a inspeção de processos dinâmicos de movimento de líquidos, como por exemplo de lubrificação, difusão, etc [4].

Como regra geral, a qualidade de uma imagem radiográfica é tanto melhor quanto maior for a intensidade da radiação penetrante empregada. Assim, preferencialmente os equipamentos para radiografia com nêutrons são normalmente instalados junto a fontes capazes de fornecer feixes intensos, tais como os reatores nucleares

e aceleradores de partículas do tipo "spallation sources". Entretanto as pesquisas nesta área voltadas ao desenvolvimento de telas conversoras com maiores faixas dinâmicas e linearidade, câmeras de vídeo de alta sensibilidade à luz, intensificadores de luz de alto desempenho, e softwares para o processamento de imagens, têm propiciado a obtenção de imagens com qualidade aceitável mesmo para os equipamentos instalados em fontes de menor intensidade como em aceleradores ciclotrons e em fontes radioisotópicas [4,5].

O Centro do Reator de Pesquisas CRPq do IPEN-CNEN/SP dispõe de um equipamento para radiografia com nêutrons que foi inteiramente projetado e construído pelo grupo de trabalho, o qual está operacional e instalado no canal de irradiação 08 do reator nuclear IEA-R1. O grupo de radiografia com nêutrons do IPEN tem, desde 1988, realizado inspeções em vários materiais dentre os quais destacam-se diversos tipos componentes pirotécnicos dos veículos lançadores de satélites do Centro Técnico Aeroespacial - CTA e, num prototipo de coração artificial do Instituto do Coração - INCOR [6].

No estágio atual de desenvolvimento desta técnica, o equipamento radiográfico do IPEN é capaz de propiciar radiografias em filmes, com qualidade comparável às obtidas em centros renomados, como o da Aerotest, General Electric, Paul Scherrer Institut, e outros [7]. O grupo de trabalho dispõe também de um sistema para radiografias com nêutrons em tempo - real, de última geração, que permite o estudo de processos dinâmicos de líquidos, mesmo que estejam envoltos em cavidades metálicas. Em termos de pesquisa, o IPEN está atualmente trabalhando com o aprimoramento de novas técnicas de geração de imagens radiográficas para a análise de amostras com espessuras da ordem de micra e, no desenvolvimento de sistemas digitais para a inspeção de imagens registradas em detectores de traços nucleares.

Nêutrons e a Matéria [8,9]

A probabilidade de ocorrência para a interação nêutron - núcleo é caracterizada por meio da secção de choque total microscópica - (σ_T), interpretada como uma área efetiva que o núcleo alvo apresenta ao nêutron para a ocorrência da interação. Teoricamente a transmissão de nêutrons pela matéria é governada por uma lei exponencial do tipo:

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-N\sigma_T(v)x} \quad (1)$$

sendo:

ϕ_0 = fluxo de nêutrons incidente no material;

$\phi(x)$ = fluxo de nêutrons que não sofreu interação após atravessar o material de espessura “x”;

N = densidade atômica do material (cm^{-3}).

O produto $N \cdot \sigma_T(v)$ é denominado secção de choque total macroscópica e representa a probabilidade do nêutron, com velocidade “v”, sofrer qualquer tipo de interação por unidade de caminho percorrido neste material, ou seja:

$$\Sigma_T(v) = N\sigma_T(v) \quad (2)$$

Caso o feixe de nêutrons incidente possua uma distribuição de velocidades $n(v)$, a secção de choque total a ser considerada é a efetiva para este espectro, ou seja:

$$\Sigma_T = N \frac{\int n(v)v\sigma_T(v) dv}{\int n(v)v dv} \quad (3)$$

Experimentalmente a expressão (1) é verificada se a medida de transmissão for realizada na condição de boa geometria, mediante colimação dos feixes de nêutrons, incidente e transmitido pelo material, de modo a se minimizar a detecção dos nêutrons que sofreram espalhamento ao atravessá-lo. Caso a medida de transmissão seja realizada na condição de má geometria, esta expressão deverá conter o termo adicional “ ϕ_s ” que leve em conta a fração dos nêutrons espalhados pelo material, e que foram detectados.

Para materiais tipicamente espalhadores é importante salientar que a expressão (1) continua sendo válida se a transmissão “T” de nêutrons pelo material em estudo estiver compreendida entre $1/e^2 < T < 1/e$, satisfazendo a condição de que, em média, somente ocorra uma interação entre o nêutron e o alvo, minimizando o efeito do espalhamento múltiplo.

CLASSES	FAIXA DE ENERGIA (eV)
Lentos	$0 < E < 10^{-3}$
Frios	$E < 0,01$
Térmicos	$0,01 < E < 0,5$
Epitérmicos	$0,5 < E < 10^4$
Ressonância	$1 < E < 100$
Rápidos	$10^3 < E < 20 \times 10^6$
Ultra-rápidos	$E > 20 \times 10^6$

Tabela 1 Classificação dos nêutrons de acordo com sua energia cinética.

Devido à especificidade das interações, os nêutrons são classificados em classes, de acordo com a sua energia cinética. Uma classificação usual é apresentada na Tabela 1.

A Técnica da Radiografia com Nêutrons

Histórico [10]

As pesquisas iniciais sobre a técnica da radiografia com nêutrons foram realizadas por Kallmann e Kuhn na Alemanha em 1935 utilizando um acelerador para produção de nêutrons. Em seguida Peter iniciou, também na Alemanha, trabalhos referentes à esta técnica, porém utilizava um acelerador mais potente, o que permitiu obter radiografias com melhor qualidade. No ano de 1956, Thewlis e Derbyshire em Harwell na Inglaterra publicam o primeiro trabalho referente a esta técnica, utilizando um reator nuclear. Neste caso o emprego de uma fonte mais intensa de nêutrons permitiu a obtenção de um feixe bem colimado e, assim radiografias de melhor qualidade. A partir deste trabalho, Thewlis apontou o caminho para as possíveis aplicações práticas desta técnica radiográfica.

Com o advento do emprego dos reatores nucleares houve a crescente necessidade de se ter disponível uma técnica radiográfica capaz de realizar inspeções nos seus elementos combustíveis e, na década de 60, a técnica da radiografia com nêutrons foi capaz de propiciar as primeiras imagens destes componentes altamente radioativos. No início dos anos 70 existiam cerca de 40 instalações capazes de prestar serviços de radiografias com nêutrons e, atualmente, este número ultrapassa 100.

Conceitos básicos

Pelo fato da interação nêutron - matéria ocorrer mediante forças nucleares, a dependência dos coeficientes de atenuação em função do número atômico - Z do elemento alvo, não pode ser representada por uma função monotônica, como por exemplo no caso dos raios-X. A figura 1 [11] mostra um gráfico comparativo destes valores, referentes a nêutrons térmicos e raios-X de 125 keV, no qual pode-se verificar que para alguns elementos de baixo número atômico estes coeficientes exibem valores elevados em relação aos raios-X, enquanto que para a maioria dos elementos pesados ocorre o inverso. Estas diferenças significativas de atenuação, também são observadas para alguns elementos com números atômicos próximos bem como para alguns isótopos e, atribuem a esta técnica radiográfica características únicas o que torna possível, como mencionado anteriormente, a inspeção de materiais hidrogenados, mesmo quando envoltos por espessas camadas de alguns metais.

O procedimento básico para a obtenção de uma radiografia com nêutrons é semelhante ao das técnicas convencionais de radiografia. O objeto a ser inspecionado é colocado em um feixe colimado e homogêneo e a intensidade modulada transmitida é então registrada. Pelo fato de o nêutron não ser uma radiação ionizante, torna-se necessário o emprego de uma tela ou placa conversora cuja finalidade é transformar a intensidade transmitida em um feixe de radiação ionizante, capaz de sensibilizar o meio de registro da imagem podendo ser filmes convencionais para raios-X, detectores de traços nucleares, cintiladores, etc.[3].

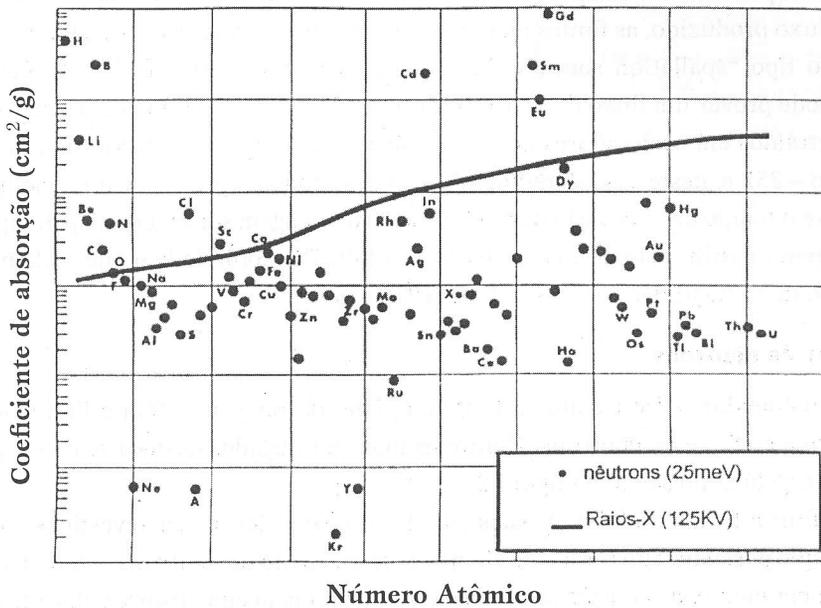


Figura 1 Coeficientes de atenuação para nêutrons térmicos e raios-X em função do número atômico dos elementos.

Basicamente um equipamento para radiografia com nêutrons típico apresenta quatro partes: Fonte de nêutrons; Colimador de nêutrons; Filtros contra radiação gama; Sistema para o registro da imagem.

Fonte de nêutrons [2]

Os feixes de nêutrons para fins radiográficos podem ser oriundos de um acelerador, de um radioisótopo, ou de um reator nuclear. Nestes casos eles são removidos do

núcleo por um processo de transmutação e emergem com energias correspondentes às dos nêutrons rápidos.

De uma forma geral, a faixa de energia de maior interesse para fins radiográficos é aquela dos nêutrons térmicos, uma vez que os coeficientes de atenuação dos elementos exibem grandes diferenças entre os seus valores e, porque as telas conversoras apresentam os maiores valores para a secção de choque de absorção, ou seja são mais eficientes para a conversão do nêutron em radiação ionizante. Desta maneira as fontes devem ser munidas de um meio moderador que, mediante reações de espalhamento elástico, reduz a sua energia cinética inicial. Por causa do elevado fluxo produzido, as fontes mais comumente empregadas são os aceleradores [11,12] do tipo "spallation sources" bem como os reatores nucleares. Um reator nuclear pode prover um fluxo de nêutrons entre 100 e 10.000 vezes mais intenso do que os extraídos em aceleradores do tipo ciclotrons e em fontes radioisotópicas de Califórnio - 252 e, neste caso as radiografias obtidas podem apresentar uma melhor resolução e o tempo de exposição para a formação da imagem ser menor. A principal desvantagem na utilização destas fontes é a sua falta de mobilidade o que restringe a obtenção de radiografias ao seu local de instalação.

Colimador de nêutrons

Os tubos colimadores "conectam" a fonte ao plano da imagem e têm a finalidade de dar forma ao feixe de nêutrons. Dentre os mais empregados destaca-se o do tipo cônico divergente, mostrado na figura 2.

Para definir a forma do feixe, as suas paredes internas devem ser revestidas com materiais que possuam alta secção de choque para absorção de nêutrons. Além disso e, preferencialmente, a radiação secundária produzida pela sua absorção deve ficar retida nestas paredes [1].

A razão entre o seu comprimento- L e o seu diâmetro- D de entrada do feixe, é usualmente conhecida como razão de colimação e tipicamente varia entre $100 <$

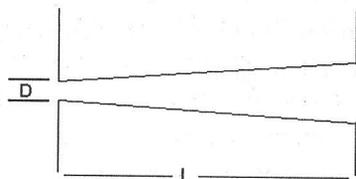


Figura 2 Esquema de um colimador do tipo cônico divergente

$L/D < 500$. Quanto maior a razão L/D menores serão as distorções (penumbra) na imagem radiográfica, como mostrado esquematicamente na figura 3. Esta distorção é denominada “resolução geométrica” – U_g e vem dada por [12]:

$$U_g = \frac{x}{L/D} \quad (4)$$

onde “ x ” é a distância do objeto ao plano da imagem

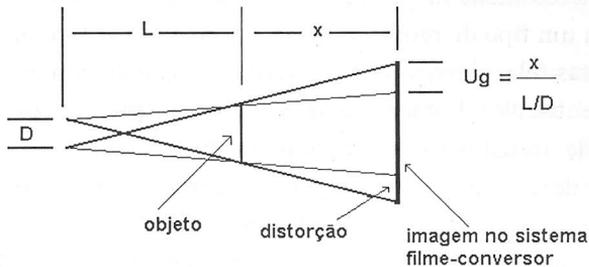


Figura 3 Resolução geométrica, para um colimador tipo cônico divergente, mostrando o efeito da penumbra na imagem.

O fluxo “ ϕ ” de nêutrons na saída deste tubo colimador é aproximadamente dado por:

$$\phi = \frac{1}{16} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \phi_i \quad (5)$$

onde: $\phi_i \equiv$ fluxo de nêutrons na entrada do colimador [$n/s \cdot cm^2$];

Filtros contra a radiação gama

Estes componentes têm a finalidade de reduzir a intensidade da radiação- γ presente no feixe de nêutrons, sem no entanto atenuar demasiadamente o último. Isto é necessário pois alguns dos meios utilizados para o registro da imagem apresentam elevada sensibilidade à radiação- γ . Assim, acima de certos valores de intensidade, ter-se-á uma gamagrafia de fundo sobreposta a uma radiografia com nêutrons. A experiência mostra que se o meio empregado for um filme de emulsão de prata (comum para raios-X), o valor ideal para a razão entre o fluxo de nêutrons ($n/s \cdot cm^2$) e a dose de radiação- γ (mRem/s) na amostra deve ser $n/\gamma > 5 \times 10^5 n/cm^2 \cdot mRem$ [1].

Usualmente estes filtros são confeccionados de materiais que possuem elevado número atômico e, uma baixa secção de choque total para a atenuação de nêutrons, tais como o chumbo e o bismuto [13].

Sistema para o registro da imagem

Como já mencionado anteriormente, pelo fato de o nêutron ser uma radiação não ionizante ele normalmente não é capaz de sensibilizar o meio de registro da imagem. Desta forma, para que um feixe de nêutrons possa ser empregado para esta finalidade, há a necessidade de utilização de uma tela conversora cuja finalidade é transformá-lo em um tipo de radiação capaz de sensibilizar este meio. Os materiais que compõem estas telas devem possuir elevada secção de choque para a absorção de nêutrons e, dentre eles destacam-se o gadolínio, disprósio, boro e o lítio. Como estes processos de transformação ocorrem mediante reações nucleares, as suas características de decaimento, darão origem a dois diferentes métodos radiográficos conhecidos como, direto e indireto [1]. A tabela 2 apresenta as características de alguns materiais conversores usados em radiografia com nêutrons [12].

Método	Material	Abund. Isotópica (%)	Reação	σ_{abs} (barn)	Meia vida	Partícula
Direto	Boro	19,8	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	3770	-	α
Direto	Lítio	95	$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	1200	-	α
Direto	Cádmio	12,3	$^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$	20.000	-	$\gamma(e)$
Direto	Gadolínio	14,7	$^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$	61.000	-	e
		15,7	$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)^{158}\text{Gd}$	240.000	-	e
Indireto	Disprósio	28,1	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$	2.000	2,3h	β
			$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165m}\text{Dy}$	500	1,25 m	
Indireto	Índio	95,7	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$	45	13 s	β
			$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$	155	54,1 m	β
Indireto	Ouro	100	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	96	2,7d	β

Tabela 2 Características de alguns materiais conversores.

Devido à sua importância para o atual estudo, fixaremos nossa atenção em alguns tipos muito comuns compostos por filmes convencionais para raios-X ou

detetores de traços nucleares e por conversores metálicos, doravante denominados de sistemas filme-conversor.

Método direto [1]

Neste método são utilizadas as telas conversoras cujas reações nucleares são prontas e a amostra a ser inspecionada e o sistema filme-conversor são irradiados concomitantemente. As telas usualmente empregadas são aquelas confeccionadas à base de gadolínio natural, no formato de placas metálicas retangulares com espessuras de até 100 μm e dimensões variadas.

Um outro tipo de tela conversora muito empregado neste método direto é a cintiladora, composta à base de gadolínio, ou de uma mistura de ^6Li e sulfeto de zinco. Nestes casos os tempos de irradiação podem ser até 100 vezes menores, quando comparados com o anterior. Este tipo de conversor, empregado juntamente com intensificadores de luz, câmeras de vídeo de alta sensibilidade, propiciou a partir da década de 70, o desenvolvimento de equipamentos operacionais para radiografia com nêutrons em tempo-real.

Uma outra possibilidade é a utilização de telas à base de boro ou de lítio combinadas com os detetores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD). Muito embora os SSNTD exibam imagens com pouco contraste ótico, a elevada resolução obtida na imagem e a sua insensibilidade às radiações dos tipos β e γ , bem como à luz visível, tornam este sistema desejável, por exemplo, para a inspeção de materiais altamente radioativos.

Método indireto [1]

O método indireto, ou de transferência, faz uso da radioatividade induzida na tela conversora, causada pela absorção dos nêutrons. Neste método, a amostra a ser inspecionada é irradiada juntamente com a tela formando-se nesta, uma imagem radioativa. Em seguida a tela é removida do feixe e colocada em contato com um filme (convencional para raios-X) em um ambiente protegido de luz (câmara escura), permitindo que o seu decaimento impressione-o ou sensibilize-o.

A atividade induzida na tela conversora, cresce exponencialmente segundo a expressão:

$$S = \phi \sigma_{\text{abs}} N (1 - e^{-\lambda t}) \quad (6)$$

onde:

$\phi \equiv$ fluxo de nêutrons [$\text{n/s} \cdot \text{cm}^2$];

σ_{abs} \equiv secção de choque microscópica de absorção do conversor [cm^2];

N \equiv número de átomos no conversor que serão ativados;

$$\lambda \equiv 0,69/\tau;$$

τ \equiv meia-vida [s];

t \equiv tempo de irradiação [s];

No instante em que a tela conversora é retirada do feixe e colocada em contato com o filme, a atividade S_t transferida obedece à seguinte expressão:

$$S_T = S(1 - e^{-\lambda T}) \quad (7)$$

onde T é o tempo de transferência da imagem.

A experiência mostra que este método é inviável para fluxos de nêutrons menores do que $10^4 \text{n/s} \cdot \text{cm}^2$, pois a atividade de saturação atingida não é suficiente para produzir uma imagem com qualidade aceitável no filme.

Pelo fato de serem necessárias duas exposições, uma da tela e do material em estudo ao feixe de nêutrons e outra da tela ao filme, este método é usualmente mais lento do que o direto.

A sua principal vantagem é a insensibilidade apresentada para as outras radiações, o que possibilita o seu uso em amostras ou feixes com elevada intensidade de radiações β , γ , ou X .

Para este método, o mais recomendável é o uso de telas com meia-vida curta, permitindo tempos de exposição e transferência em torno de poucas horas. Uma das mais utilizadas é a de disprósio que possui meia-vida de 2,3 horas.

Levando em conta o que foi descrito nos itens acima, um equipamento típico para radiografia com nêutrons deve possuir [11]:

- a) fluxo de nêutrons na amostra em torno de $10^6 \text{n/s} \cdot \text{cm}^2$;
- b) energia cinética do feixe de nêutrons, na região de $\sim \text{meV}$;
- c) razão de colimação entre $100 < L/D < 500$;
- d) razão $n/\gamma > 5 \times 10^5 \text{n/cm}^2 \cdot \text{mRem}$;
- e) variação máxima do sinal no sistema de registro da imagem $\sim 5\%$ em toda a região do feixe de nêutrons.

Caracterização de Sistemas Filme-Convertor

Esta caracterização consiste basicamente em avaliar a resposta destes sistemas, em relação ao feixe de nêutrons extraído do equipamento radiográfico. Normalmente esta avaliação é realizada através do estudo de suas curvas características, sensibilidade para discernir variações de espessuras e, da sua resolução espacial.

Curva característica [11]

Uma curva característica típica para um sistema filme - conversor é mostrada na figura 4. Ela descreve o comportamento da transmissão de luz pela imagem radiográfica em função da exposição "E" ao feixe de nêutrons. A transmissão de luz pode ser medida em unidades de densidade ótica "D_{op}" sendo:

$$D_{op} = \log \left(\frac{I_o}{I} \right) \quad (8)$$

e "I_o" e "I" as intensidades de luz incidente e transmitida pela imagem, e

$$E = \phi t \quad (9)$$

sendo "φ" o fluxo de nêutrons e "t" o tempo de irradiação.

Basicamente este comportamento é regido pelas dimensões dos grãos do filme e do tipo da radiação ionizante gerada no conversor.

Por meio desta curva determina-se o intervalo de exposição ótimo para a obtenção de uma radiografia, ou seja, para o qual o contraste ótico "G" na imagem, definido por $G = dD_{op}/d(\log E)$, é máximo [12], bem como o correspondente intervalo de densidade ótica, denominado de faixa dinâmica. Certamente filmes com faixas dinâmicas maiores são preferíveis, pois propiciam imagens com uma melhor visualização de detalhes.

Mesmo quando se tem um feixe de nêutrons com fluxo conhecido e se tomam os devidos cuidados para reprodução das condições de irradiação e de processamento dos filmes, não se deve esperar reprodutibilidades nos valores de densidade ótica melhores do que 75 %, [14,15]. Isto se deve às imperfeições na sua confecção, às variações na resposta das telas conversoras, causadas pela não constância do espectro de energia de nêutrons nela incidentes, e a não homogeneidade do próprio feixe de nêutrons.

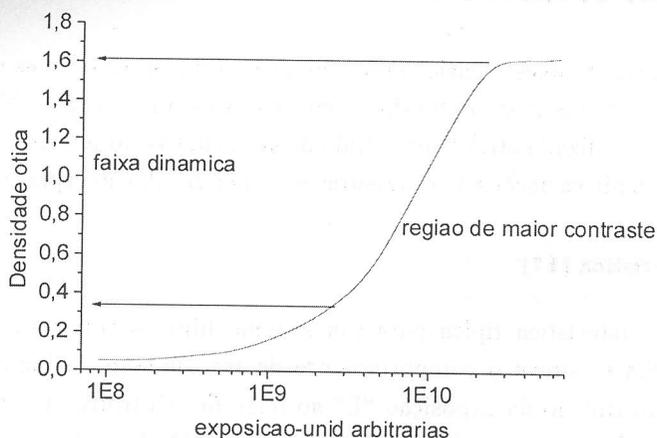


Figura 4 Curva característica típica para um sistema filme-conversor

Sensibilidade [12]

A sensibilidade de um sistema filme-conversor, para um equipamento radiográfico, é geralmente avaliada pela sua capacidade para discernir variações de espessuras dos materiais em inspeção e pode ser deduzida como mostrado abaixo.

Teoricamente a transmissão de nêutrons pela matéria obedece à seguinte lei exponencial [8]:

$$\phi(x) = \phi_0 \exp(-\Sigma_T x) \quad (10)$$

onde ϕ_0 e $\phi(x)$ são os fluxos incidente e transmitido pela amostra de espessura “x” e secção de choque macroscópica total “ Σ_T ”.

Desde que a densidade ótica seja proporcional ao logaritmo da exposição, $D_{op} = G \log(E)$ [12], o comportamento da densidade ótica em função da espessura das amostras, vem dado por (fig 5):

$$D_{op}(x) = D_o - (G \Sigma_T 0,43) x \quad (11)$$

A espessura mínima discernível é obtida mediante a diferenciação desta equação (11) e vem dada por:

$$\Delta x = - \frac{\Delta D_{op}}{(G \Sigma_T 0,43)} \quad (12)$$

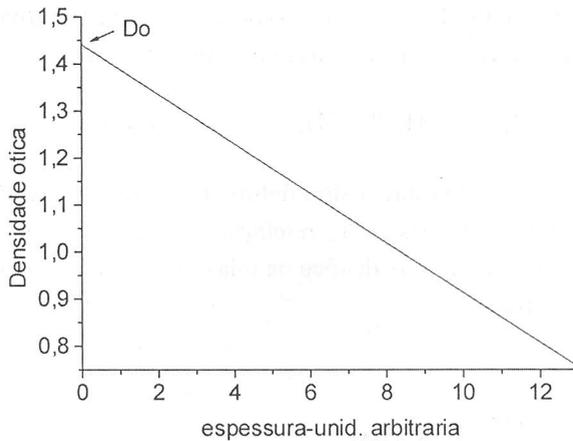


Figura 5 Comportamento da densidade ótica em função da espessura das amostras

Resolução

A resolução de um sistema é definida como a menor distância distinguível entre dois objetos [16]. Geralmente é determinada mediante a varredura da distribuição de densidade ótica existente na interface entre duas imagens: a de uma placa opaca a nêutrons e a do feixe direto de nêutrons. Normalmente esta varredura é realizada por meio de um microfotômetro ótico utilizando um feixe de luz com largura de alguns micra. Idealmente, esta distribuição possui a forma de uma função delta. Entretanto o alcance das radiações ionizantes no próprio conversor e no filme, bem como a divergência angular do feixe de nêutrons, distorcem esta forma ideal, para uma com o aspecto de um “S” estendido, como mostrado na figura 6. À esta distribuição é ajustada a ESF(Edge Spread Function) uma função do tipo [17]:

$$D_{op} = P_1 - P_2 \arctan[P_3(X - P_4)] \quad (13)$$

onde P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são parâmetros livres e “X” é a coordenada de varredura.

A resolução é usualmente determinada em termos do parâmetro denominado “resolução total - U_t ” que é a largura total à meia altura da diferencial da ESF, denominada LSF (Line Spread Function) que é uma distribuição de Lorentz, e é calculada pela expressão:

$$U_t = \frac{2}{P_3} \quad (14)$$

A “*resolução total*” resulta do efeito combinado da “*resolução intrínseca*” – U_i (do sistema filme-conversor) e da “*resolução geométrica*” – U_g (da divergência angular do feixe de nêutrons) e estão relacionadas pela equação (15):

$$(U_t)^n = (U_i)^n + (U_g)^n \quad \text{com } 1 < n < 3 \quad (15)$$

A “*resolução geométrica*” já havia sido definida anteriormente. A magnitude das distorções na imagem causadas pela “*resolução intrínseca*” dependem do tipo da radiação ionizante gerada, do seu alcance na tela conversora e no filme empregados, bem como de suas espessuras.

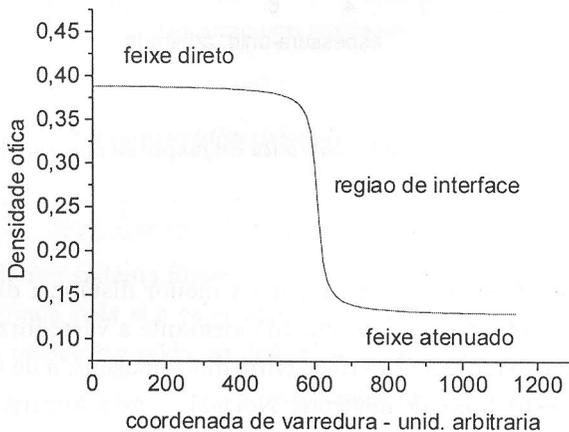


Figura 6 Distribuição da densidade ótica na região de interface de um objeto opaco a nêutrons.

O Equipamento Radiográfico do IPEN-CNEN/SP [14,15,18]

As atividades de radiografia com nêutrons na divisão de Física Nuclear do IPEN, iniciaram-se em 1987 utilizando como fonte de nêutrons o Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1. Nesta época o reator operava à potência de 2 MW fornecendo um fluxo de nêutrons térmicos de aproximadamente 10^{13} n/s · cm², junto ao seu núcleo. Os primeiros testes de viabilidade desta técnica foram realizados utilizando o feixe de nêutrons de um espectrômetro tipo filtro de berílio - tempo de vôo, instalado no canal de irradiação 03 deste reator. No início de 1988 foram realizados outros testes utilizando o feixe de nêutrons de um outro espectrômetro, tipo três - eixos, instalado no canal de irradiação 10 deste mesmo reator. Nestes testes foram

empregados conversores de gadolínio, disprósio e, à base de boro, combinados com filmes convencionais para raios-X e com detectores de traços nucleares de estado sólido. As características destes feixes estão apresentadas na tabela (3) abaixo.

Fluxo n/s · cm ²	Filtro	Razão L/D	Razão Cd(Au)	Razão - n/γ (N/cm ² · mRem)	Energia meV	Diâmetro cm	Canal
1 · 10 ⁵	Pb/Be	20	2000	4x10 ⁵	5,2	20	03
1 · 10 ⁶	Pb	40	200	4x10 ⁵	5	10	10

Tabela 3 Características dos feixes de nêutrons extraídos dos canais de irradiação 03 e 10 do reator IEA-R1.

Devido aos bons resultados obtidos, em 1988 surgiu o grupo de radiografia com nêutrons tendo como principal objetivo, projetar e construir um equipamento para esta finalidade. Este equipamento tornou-se operacional em 1992 e foi instalado no canal radial de irradiação 08 deste reator. As características do feixe extraído estão apresentadas na tabela (4).

Fluxo de nêutrons térmicos	3 · 10 ⁶ n/s · cm ²
Razão de térmico/epitérmico	5,7
Razão nêutron/gama (n/γ)	5 · 10 ⁵ n/cm ² · mRem
Razão de colimação (L/D)	55
Diâmetro útil do feixe	20 cm

Tabela 4 Características do feixe de nêutrons extraído do primeiro equipamento radiográfico, instalado no canal de irradiação 08 do reator IEA-R1.

Este equipamento possuía uma blindagem, de forma geométrica cúbica, instalada junto à blindagem principal do reator, com 1,5 m de aresta, composta basicamente por parafina borada, cádmio e chumbo a qual mantinha em seu exterior as doses de radiação-γ e de nêutrons abaixo dos limites de 2,5 mRem/h. As irradiações eram realizadas mediante o emprego de um porta-amostras que deslizava em trilhos de alumínio inseridos em seu interior.

Atualmente o equipamento radiográfico continua instalado no mesmo canal 08 e, foi otimizado, tanto no que concerne ao colimador quanto à sua blindagem. Estas otimizações tiveram por finalidade minimizar o espalhamento de nêutrons na posição de irradiação das amostras, aumentar o espaço interno da blindagem, aumentar o diâmetro útil do feixe, elevar a sua razão de colimação L/D e propiciar diversas posições de irradiação. As características do feixe de nêutrons extraído deste equipamento estão apresentadas na tabela 5.

Posição de irradiação	Fluxo mínimo	Fluxo máximo
Fluxo de nêutrons térmicos	$1,69 \cdot 10^5 \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$	$1,05 \cdot 10^6 \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$
Razão de térmicos/epitérmicos	1.7	3.1
Razão nêutron/gama (n/γ)	$2,0 \cdot 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{mRem}$	$4,4 \cdot 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{mRem}$
Razão de colimação (L/D)	110	70
Diâmetro útil do feixe	40 cm	22 cm

Tabela 5 Características do feixe de nêutrons extraído do presente equipamento radiográfico, instalado no canal de irradiação 08 do reator IEA-R1.

As tabelas 6, 7 e, 8 abaixo exibem um resumo das características do presente equipamento radiográfico do IPEN para três sistemas filme-conversor.

Filme-conversor	Contraste óptico médio	Intervalo de exposição (n/cm^2)	Faixa dinâmica	Tempo de irradiação
Kodak-AA/Gd evap	3,5(2)	$4,1 \cdot 10^7 - 1,2 \cdot 10^8$	1,5-3,5	12min
Kodak-AA/Gd met	4,1(2)	$4,1 \cdot 10^7 - 1,2 \cdot 10^8$	1,5-3,5	12min
Min-R/GdS ₂ O ₄	1,98(7)	$7,6 \cdot 10^6 - 5,1 \cdot 10^7$	1-2,7	300 s

Tabela 6 Características do presente equipamento radiográfico do IPEN para três sistemas filme-conversor estudados.

Filme-conversor	$\Delta x(\text{cm})$		
	Ferro	Lucite	Chumbo
Kodak-AA/Gd eva	0,037(1)	0,024(5)	0,11(1)
Kodak-AA/Gd met	0,033(1)	0,021(4)	0,12(1)
Min-R/GdS ₂ O ₄	0,060(3)	0,037(1)	0,29(2)

Tabela 7 Valores das espessuras mínimas discerníveis para os materiais ferro, lucite, chumbo, para três sistemas filme-conversor.

Filme-conversor	Resolução intrínseca-Ui (μm)
Kodak-AA/Gd evaporado	22(2)
Kodak-AA/Gd metálico	40(2)
Min-R/GdS ₂ O ₄	61(2)

Tabela 8 Valores da resolução intrínseca para três sistemas filme-conversor

As figuras 7, 8 e 9 abaixo exibem exemplos obtidos pela técnica da radiografia com nêutrons no IPEN, com o sistema filme-conversor Kodak AA-Gd evaporado.

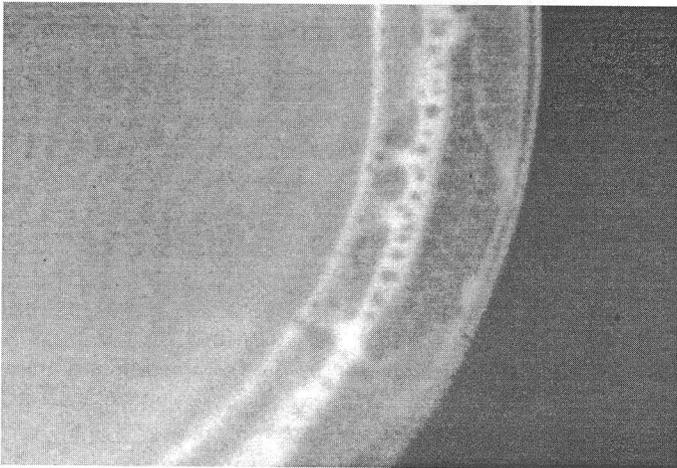


Figura 7 Seção do protótipo de coração artificial mostrando danos em sua membrana plástica interna, causados por excesso de calor.

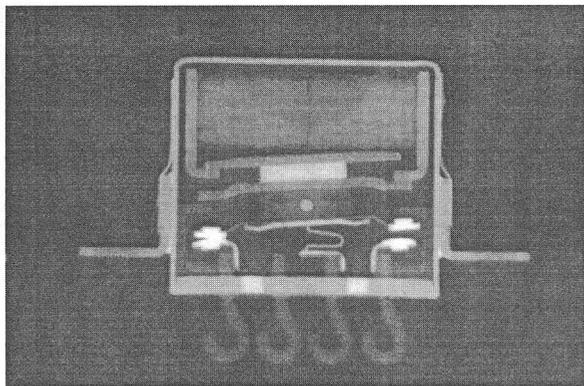


Figura 8 Relé de satélite mostrando detalhes de sua estrutura interna e seus contatos elétricos: um aberto e outro fechado

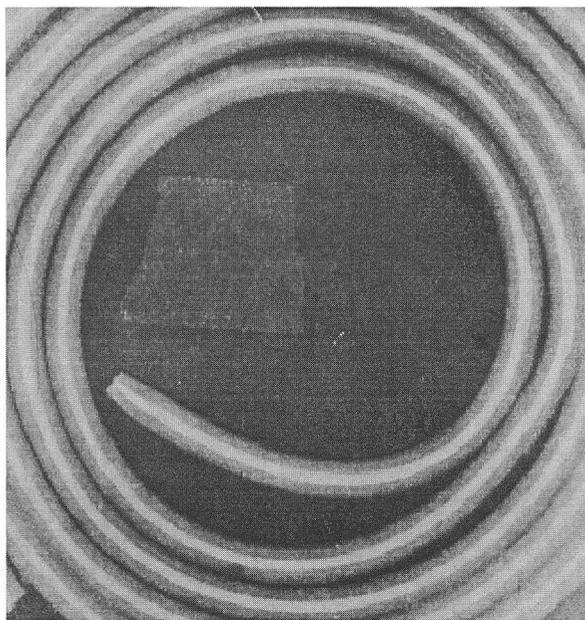


Figura 9 Componente pirotécnico mostrando o explosivo (branco) depositado no interior de uma cinta metálica de chumbo.

Paralelamente o grupo de radiografia com nêutrons desenvolveu três sistemas para o processamento de imagens digitais. O primeiro dedicado ao estudo dos parâmetros que caracterizam imagens obtidas em detectores de traços nucleares,

o segundo dedicado a imagens obtidas em filmes convencionais para raios-X e o terceiro a imagens em tempo – real. De uma forma geral estes sistemas têm propiciado a exploração de novos tipos de dados bem como uma elevação significativa na qualidade dos resultados tanto referentes à sensibilidade quanto à resolução das imagens obtidas.

Referências

- [1] BERGER, H. *Neutron radiography, methods, capabilities and applications*. New York, N.Y., Elsevier, 1965.
- [2] BERGER, H. *Neutron radiography – A state of art report*. NTIAC–SR–98–01. NASA (Center for Aerospace Information), Aug 1998.
- [3] HAWKESWORTH, M. R. *Neutron radiography: equipments and methods*. *Atom. Energy Rev.*, 152: pp 169–220, 1977.
- [4] LINDSAY, J.T. *Development and characterization of a real – time neutron radiography facility*. PhD thesis, University of Missouri, may 1983.
- [5] THOMS, M. *Neutron detection with imaging plates part II. Detectors characteristics*. In E. Lehmann, H. Pleinert, S. Korner, editors, *Proceedings of the Third International Topical Meeting on Neutron Radiography*, volume 424 of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, pp 34–39, 1998.
- [6] PUGLIESI R.; GERALDO L.P.; DE MENEZES M.O.; ANDRADE M.L.G.; PEREIRA M.A.S.; MAIZATO M.S.. *Inspection of an artificial heart by the neutron radiography technique*. 3rd International Topical Meeting on NR. Lucerne, Switzerland, March 16–19, 1998.
- [7] LEHMANN, E.; PLEINERT, H.; WILLIAMS T. and PRALONG, C. *Applications of new radiation detection techniques at the Paul Scherrer Institut, especially at the spallation neutron source*. In E. Lehmann, H. Pleinert, S. Korner, editors, *Proceedings of the Third International Topical Meeting on Neutron Radiography*, volume 424 of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, pp 158–164, 1998.
- [8] CURTISS L.F. *Introduction to neutron physics*. Inc., Princenton, New Jersey: D. van Nostrand Co., 1959.
- [9] GUREVICH, I.I. & TARASOV, L.V. *Low-energy neutron physics*. Amsterdam, North Holland, 1968.
- [10] FISHER C.O. *The history of the first radiographs in Berlin*. *Proceedings of the Fourth World Conference on Neutron Radiography*, pp 3–10. San Francisco, California, USA, May 10–16, 1992. Edit by John P. Barton. Gordon and Breach Science Publishers.
- [11] BRYANT, L.E; MCENTIRE, P. 2nd ed. *Radiography and radiation testing*. American Society for Nondestructive Testing (Nondestructive Testing Handbook); 1985.
- [12] HARDT P. VON DER; ROETTGER H. *Neutron radiography handbook: nuclear science and technology*, Dordrecht, D. Reidel, 1981.

- [13] HUGHES D.J; HARVEY J.A. *Neutron cross sections*, New York, N.Y., McGRAW- Hill, 1955 (BNL-325).
- [14] Pereira, M.A.S. *Emprego dos policarbonatos makrofol-DE e CR-39 em radiografia com neutrons*. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2000.
- [15] ASSUNÇÃO M.P.M; PUGLIESI R; MENEZES M.O. *Study of the neutron radiography characteristics for the solid state nuclear track detector makrofol-E*. International Journal of Applied Radiations and Instrumentation, vol. 45, n° 8, pp 851-855, 1994.
- [16] HARMS A.A.; ZELLINGER A. *A new formulation of total unsharpness in radiography*. Phys. Med. Biol., vol 22, n° 1, pp 70-80; 1977.
- [17] WROBEL, M & GREIM, L. *Resolution functions and unsharpness in neutron radiography*. Geesthacht, German, GKSS, (GKSS 88/e/12), 1988.
- [18] MENEZES DE M.O. *Desenvolvimento e aplicação da técnica da radiografia com neutrons pelos métodos direto e indireto*. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 1994.