

RADIOGRAFIA COM NEUTRONS**Professor responsável****Reynaldo PUGLIESI****Participantes****Antonio C. de Freitas, Arnaldo Gammal, Mara R. Rizzatti e Paula Vercelli**

Este relatório refere-se às atividades que foram desenvolvidas pelo grupo de radiografia com neutrons na IV Escola de verão em Física Experimental realizada de 05 a 16 de Fevereiro de 1990 no IPEN-CNEN/SP.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a viabilidade da técnica de radiografia com neutrons, a qual vem sendo desenvolvida na Área de Física Nuclear do IPEN-CNEN/SP. Suas aplicações abrangem os mais variados ramos da tecnologia, destacando-se a inspeção de materiais hidrogenados e de materiais radioativos.

O método de conversão empregado neste trabalho foi o indireto com tela de Disprósio e o equipamento

utilizado foi um colimador próprio para neutrongrafia instalado na piscina do Reator Nuclear IEA-R1. Foram irradiadas várias amostras num fluxo de neutrons de $\sim 10^7$ n/s.cm² por um intervalo de tempo de 10 min. Os resultados obtidos confirmaram as principais características dessa técnica, bem como sua viabilidade.

ABSTRACT

The objective was to demonstrate the main characteristics of the neutron radiography technique, which has been developed in the Nuclear Physics Department of the IPEN-CNEN/SP. Its employment, in technology varies enormously and includes among others, the inspection of the hydrogen-rich substances, highly radioactive materials, etc.

The indirect conversion method with Dysprosium screen was employed. The experimental arrangement used was a neutron collimator installed in the bottom of the IEA-R1 Nuclear Research Reactor pool. Several samples were analysed which were exposed in a neutron flux $\sim 10^7$ n/s.cm² during 10 minutes. The obtained results confirm the main characteristics of this technique as well as its viability to be developed in this reactor.

INTRODUÇÃO

A radiografia com neutrons é uma técnica não destrutiva de análise de materiais, que com suas características, complementa as técnicas convencionais de radiografias que empregam raios-x e raios- γ . Essa técnica vem sendo estudada desde os primeiros anos após a descoberta do neutron em 1932 por Chadwick e, a partir dos anos 60, o interesse em radiografia com neutrons começou a ter um crescimento significativo, causado principalmente pelo advento dos reatores nucleares⁽¹⁾.

A técnica de radiografia com neutrons (neutronografia) não substitui essas técnicas de radiografia convencionais. Pode-se dizer que as três técnicas são complementares, sendo igualmente importantes, tendo seu uso condicionado ao tipo de material a ser analisado.

Uma das características principais da neutronografia pode ser verificada na figura 1. Os processos de interação neutron-matéria não seguem o comportamento racional com o número atômico dos elementos (como é o caso dos raios-x e raios- γ). A figura 1 mostra o comportamento do coeficiente de atenuação de massa para raios-x e neutrons em função do número atômico dos elementos, do qual pode-se notar que materiais que contenham hidrogênio são facilmente visíveis por neutrons, enquanto que podem penetrar facilmente

espessas camadas de ferro, chumbo, urânio, etc⁽²⁾⁽⁸⁾

Outras características importantes da técnica são a possibilidade de se poder inspecionar materiais altamente radioativos como, por exemplo, elementos combustíveis de reatores nucleares e distinguir isótopos de certos elementos como ^{235}U de ^{238}U .

As principais fontes de neutrons são:

- Reatores nucleares:

Os neutrons, ao interagirem com certos materiais, provocam a instabilidade de seus núcleos atômicos, levando-os à fissão. A consequente liberação de novos neutrons estabelecerá uma reação em cadeia aumentando o número de núcleos fissionados.

- Fissão espontânea:

Poucos materiais apresentam fissão espontânea. Uma fonte eficaz de neutrons para radiografia é o ^{252}Cf .

- Bombardeamento iônico:

Neutrons também podem ser obtidos pela ação de ions energéticos tais como prótons e alfas sobre materiais leves como D, Be, B ou Li.

- Fotoneutrons:

Energia para emissão de neutrons também pode ser fornecida ao núcleo por fótons energéticos. Materiais-alvo para produção de fotoneutrons são ^9Be e ^2H para fótons de baixa energia (1.6 a 9 MeV) e U para fótons de alta energia ($E > 9 \text{ MeV}$).

Os neutrons quanto à energia são classificados em:

Frios	$E < 0.01 \text{ eV}$
Térmicos	$0.01 < E < 0.3 \text{ eV}$
Epitérmicos	$0.3 < E < 10^4 \text{ eV}$

Rápidos	$10 \text{ keV} < E < 20 \text{ MeV}$
Relativísticos	$E > 20 \text{ MeV}$

As radiografias com neutrons são realizadas, em grande parte, empregando neutrons térmicos uma vez que nessa região de energia se obtém bons contrastes na imagem para diferentes materiais. Essas radiografias são realizadas mediante o emprego de telas conversoras, cuja função é dar origem por intermédio de neutrons, a radiações ionizantes capazes de sensibilizar filmes. Existem dois métodos de conversão: Direto e indireto. No primeiro, a tela conversora e o filme são irradiados juntos enquanto que no segundo somente a tela é irradiada ocorrendo em seguida, a transferência ao filme, da imagem radioativa formada nessa tela. Exemplos típicos de conversores são:

- 1 - Gadolínio - método direto;
- 2 - Boro ou lítio - método direto;
- 3 - Disprósio - método indireto.

As características principais desses conversores estão apresentadas na tabela I.

No primeiro caso, o neutron provoca uma reação pronta do tipo (n,γ) e o elétron de conversão de energia 70 keV emitido sensibiliza o filme, onde a imagem fica gravada. Telas com espessuras de 25 μm são comumente empregadas. Esse método tem a desvantagem de apresentar sensibilidade às radiações- γ normalmente presentes nos feixes de neutrons. Por esse motivo torna-se necessário o emprego de filtros para a

radiação- γ de modo a não se ter uma gamagrafia sobreposta à uma neutrografia.

Esses filtros devem então apresentar, além de um número atômico elevado, uma seção de choque para absorção de neutrons pequena. Os materiais comumente empregados para essa finalidade são o chumbo e o bismuto. Valores da razão neutron/gama superiores a 10^5 neutrons/cm².mR são recomendáveis para neutrografias por esse método de conversão.

No segundo caso, o neutron provoca uma reação pronta do tipo (n, α). A partícula α emitida pelo conversor causa um dano no detector de traços de estado sólido cujo aglomerado após a revelação se torna visível. Esse método possui a vantagem de ser insensível à radiação- γ e apresenta alta resolução. Sua principal desvantagem é o contraste ótico baixo obtido nos filmes.

Para o caso de conversores à base de lítio, empregam-se além dos SSNTD, telas fluorescentes compostas tipicamente por sulfeto de zinco. A luz gerada nessas telas pode ser captada por um filme convencional de raios-x ou então por um sistema ótico-eletrônico composto basicamente por uma câmara de video e por um processador de imagens, formando um sistema de radiografia em tempo-real.

No terceiro caso, o neutron ativa a tela de disprósio de espessura típica 100 μ m e o seu decaimento- β , cujo espectro apresenta energia máxima de 1.3 MeV, será o responsável pela impressão da imagem no filme, após o término da irradiação. Sendo assim, a vantagem desse método é a sua insensibilidade quanto a qualquer radiação- γ presente no feixe ou oriunda do

material em inspeção.

A resolução de qualquer uma dessas técnicas é normalmente avaliada pela relação

$$u_t = (u_i^2 + u_g^2)^{1/2}$$

onde: u_t - resolução total da técnica
 u_i - resolução intrínseca filme-conversor
 u_g - relação geométrica do colimador

com:

$$u_g = (D/L).x$$

sendo: x - espessura da amostra
 D - diâmetro de abertura frontal do colimador de neutrons
 L - comprimento do colimador

A razão D/L deve ter um valor menor que $1/30$ para que efeitos de divergência do feixe não comprometam a qualidade da imagem.

A resolução intrínseca (u_i) considera efeitos como o alcance das partículas, geradas pelo conversor no filme, geometria do sistema filme-conversor, etc.

Exemplos:

- método direto por: SSNTD, $u_i \sim 5 \mu\text{m}$
 Gd, $u_i \sim 50 \mu\text{m}$
- método indireto por Dy , $400 < u_i < 800 \mu\text{m}$

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em um equipamento neutrongráfico instalado na piscina do reator nuclear de pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP e o método de conversão empregado foi o indireto com tela conversora de disprósio.

O arranjo experimental consiste de um colimador de neutrons do tipo cônico divergente com razão de colimação $D/L = 1/250$. Seu diagrama esquemático está representado na figura 2.

Primeiramente, as peças a serem radiografadas são colocadas em um porta amostra, confeccionado em alumínio, e vedado contra a penetração de água e é inserido em um local próprio no equipamento.

Em seguida, dois filmes são colocados em um "cassete" apropriado na forma de um sanduiche, aguardando a tela conversora ativada, também inserida em seu "cassete".

O conjunto porta-amostra e chapa-conversora foi exposto por um intervalo de tempo de 10 minutos à um fluxo de neutrons térmicos de $\sim 10^7$ n/s.cm². Após a irradiação a tela conversora foi colocada em contato com os dois filmes já citados. O tempo de transferência da imagem foi de 1 hora e 10 minutos o que corresponde a aproximadamente à metade da meia vida desse conversor ($T_{1/2} = 2.38$ h) e o filme empregado foi o Kodak AA-5. A densidade ótica $D = \log(I_0/I_1)$ (enegrecimento do

filme) obtida para o feixe direto foi de 2.5, sendo:

I_0 = intensidade da luz incidente e;

I_t = intensidade da luz transmitida pelo filme.

Após a transferência, os filmes foram revelados e as radiografias obtidas, analisadas.

As amostras neutronografadas foram:

- Válvula de alumínio com diafragma de borracha
- escada de chumbo e ferro com tira de cádmio em toda a sua extensão (espessura máxima de 40 mm e mínima de 2 mm)
- escada de lucite (mesma espessura das anteriores)
- Peça para simulação de estudo de corrosão em alumínio

As imagens obtidas permitem algumas observações importantes além da excelente qualidade das imagens:

- Na válvula de alumínio foi possível a visualização de seu diafragma de borracha com muita facilidade e clareza.
- A tira de cádmio foi observada mesmo atrás de 40 mm de chumbo e de ferro.
- Através da escada de lucite e da peça simuladora de corrosão verificou-se a sensibilidade da técnica para materiais hidrogenados.

Pôde-se constatar por meio desses negativos e de outros mais, incluindo a radiografia de um elemento combustível do Reator Nuclear IEA-R1, que se trata de uma técnica eficaz de radiografia e que realmente complementa as técnicas convencionais, principalmente no que diz respeito à inspeção de materiais hidrogenados e aos altamente radioativos. Essa técnica vem sendo amplamente empregada em muitos países para a

análise não destrutiva de materiais. Pelo que foi demonstrado e pelo crescente desenvolvimento dos setores industriais e tecnológicos, deverá ser brevemente utilizada em nosso país.

**Tabela I - Características de conversores para
neutronografia.**

Material	coeficiente de absorção de neutrons térmicos	Reação nuclear predominante	meia-vida
${}^6_3\text{Li}$	0.90	(n, α)	0
${}^{10}_5\text{B}$	44.8	(n, α)	0
${}^{nat}_{64}\text{Gd}$	140.3	(n, γ)	0
${}^{nat}_{66}\text{Dy}$	3.01	(n, γ)	2.36 h

Tipo e energia da radiação ionizante	Composição típica do conversor	Filme
α 2.05 ; T 2.74 MeV	${}^6\text{LiF} + \text{ZnS} - 250 \mu\text{m}$	raios-x
α 1.47 ; Li 0.84 MeV	${}^{10}\text{B}_4\text{C} - 5 \mu\text{m}$	SSNTD
G.I. e^- ; 70 keV	folha metálica 25 μm	raios-x
β^- 1.3 MeV	folha metálica 100 μm	raios-x

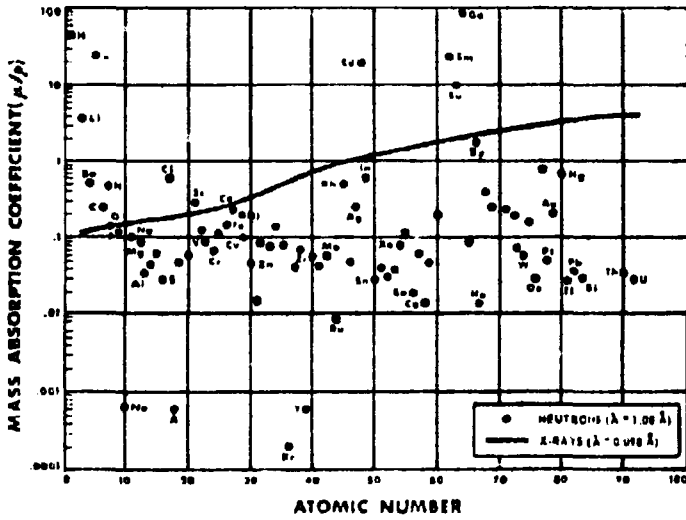


Figura 1 - coeficientes de atenuação de massa em cm^2/g como função do número atômico.

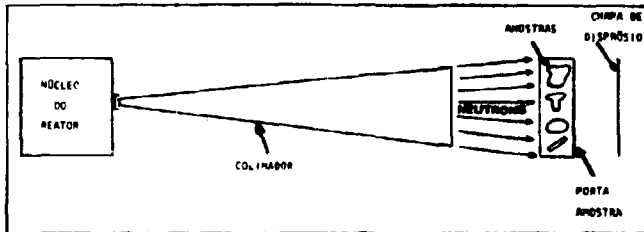


Figura 2 - Diagrama esquemático do equipamento neutrongráfico empregado.

REFERENCIAS

- 1) BERGER, H. - Neutron radiography. Methods Capabilities and Application. Amsterdan - Elsevier (1965).
- 2) DOMANUS, J. C.; MATFIEL, R. S. -Neutron Radiography Handbook - D. Reidl Publishing Company (1966).
- 3) HAWKESWORTH, M. R. - Neutron Radiography. Equipments and Methods. Atomic Energy Review 15, 2, (1977).
- 4) PUGLIESI, R.; MORAES, M. A. P. V.; YAMAZAKY, I. M.; AGOSTA, G. F. - Neutron Radiography Experiments at the IEA-R1 Nuclear Research Reactor. Proceedings of the international conference on nuclear data for science and technology. MITO, JAPAN 1988 (1095-1097).