

## A IMPORTÂNCIA DO FATOR DE EQUIVALÊNCIA NOS ENSAIOS RADIOGRÁFICOS

Gilberto Carvalho

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP  
Av. Lineu Prestes, 2.242  
05508-900, Butantã, São Paulo, SP, Brasil

### RESUMO

Para a realização de um ensaio não destrutivo, utilizando-se raios-X ou gama, são necessárias a determinação e a definição de vários parâmetros, para que o ensaio seja conduzido e realizado corretamente, obtendo-se uma radiografia com qualidade aceitável e dentro dos custos previstos. Definidos alguns parâmetros, resta determinar o principal deles, que é o tempo de exposição. Para tanto, é fundamental a elaboração de curvas de exposição, tendo como material padrão, o ferro. No presente trabalho, utilizou-se a radiação gama ( $^{192}\text{Ir}$ ) no ensaio de outros materiais e comparou-se os valores obtidos na prática, com aqueles calculados teoricamente, a partir do elemento padrão.

Keywords: radiography, gammagraphy, exposure curve, exposure factor, radiographic equivalence factor.

### I. INTRODUÇÃO

A gamagrafia[1,2,3,4] é um método não destrutivo, que utiliza a capacidade de penetração da radiação gama na matéria, para detectar eventuais descontinuidades. Esse ensaio é realizado com uma fonte de radiação gama, uma peça, que pode ser um fundido, uma solda, etc, e um filme radiográfico, para o registro da imagem obtida no ensaio.

A intensidade do feixe de radiação que atinge o filme radiográfico, determina um maior ou menor escurecimento do filme, e é definido como contraste, dependendo em última análise, do tempo que o filme fica exposto à radiação. Esse tempo é definido como tempo de exposição, sendo de suma importância no ensaio radiográfico, porque a densidade óptica obtida e medida no filme, após o processamento fotográfico, é que permite ou não, a percepção de detalhes e/ou descontinuidades nas peças ensaiadas.

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia que possibilite o cálculo do Fator de Equivalência de qualquer material, em relação ao material tomado como padrão, ferro/aço, independente da existência da curva de exposição característica do material (fator de exposição versus espessura do material).

### II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

**Fator de Exposição**[1,2,3,4] O Fator de Exposição (FE) é um parâmetro importante, pois permite o cálculo do tempo de exposição. É definido pela expressão:

$$FE = \frac{At}{d^2} \quad (1)$$

na qual,

FE - Fator de Exposição, em Ci. min/cm<sup>2</sup>(Bq.min/cm<sup>2</sup>),

A - atividade da fonte de radiação, em Ci(Bq),

t - tempo de exposição, em min,

d- distância fonte-filme, em cm.

O Fator de Exposição depende da fonte de radiação gama, do filme radiográfico utilizado, do processamento fotográfico, do uso ou não de telas intensificadoras de exposição e do material sob ensaio.

**Equivalência Radiográfica**[1,2,3,4]. O estudo da equivalência radiográfica, deve-se ao fato do ensaio não destrutivo (END) por gamagrafia, é aplicável a outros materiais além do ferro/aço, porém na prática, curvas de exposição para outros materiais são raras. Assim, o que se faz na prática, é o cálculo das espessuras equivalentes ao padrão (ferro/aço), determinando-se na curva de exposição, o Fator de Exposição e a partir deste, o tempo de exposição para o material sob ensaio.

Essa equivalência radiográfica pode ser referida às propriedades dos materiais, como a densidade específica ou o coeficiente de atenuação atômico, mássico ou linear. No presente trabalho, levou-se em consideração a equivalência em relação à densidade específica [1,3,4,9] ao coeficiente de atenuação linear [1,3,4,7], mediante as expressões:

Para a densidade específica,

$$X_{eqFe} = \frac{x_n \rho_n}{\rho_{Fe}} \quad (2)$$

para o coeficiente de atenuação linear,

$$X_{eq,Fe} = \frac{x_n \mu_n}{\mu_{Fe}} \quad (3)$$

nas quais,

$X_{eq,Fe}$ - espessura equivalente ao ferro, em cm;

$x_n$ - espessura do material n, em cm;

$\rho_{Fe}$ -densidade específica do ferro, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_n$ -densidade do material n, em g/cm<sup>3</sup>;

$\mu_{Fe}$ - coeficiente de atenuação linear do ferro, cm<sup>-1</sup>;

$\mu_n$ -coeficiente de atenuação linear do material n, em cm<sup>-1</sup>.

Ao utilizar-se a expressão (2), supôs-se que materiais diferentes mas com espessuras equivalentes se comportem de maneira similar, quando submetidos a um feixe de raios gama, atenuando e retirando do feixe, quantidades iguais de radiação, o que não é correto. Assim, essa expressão é eficaz somente para elementos de números atômicos próximos ao do ferro. Para corrigir parcialmente essa distorção, usa-se nos demais casos, a expressão (3). Para tanto, é necessário calcular o coeficiente de atenuação linear médio para o material padrão e demais materiais envolvidos no trabalho (Tabela 1), considerando o radioisótopo utilizado.

O <sup>192</sup>Ir[1,2,3,4,8] apresenta 22 energias diferentes, porém tomou-se como referência, as principais em termos de energia e probabilidade de emissão: 0,295 MeV(32,00%), 0,308 MeV(31,20 %), 0,316 MeV(89,00 %), 0,468 MeV(57,00 %), 0,588 MeV(6,32 %), 0,604 MeV(12,50 %) e 0,613 MeV(7,48 %).

Os cálculos dos coeficientes de atenuação linear, médios, do padrão e demais materiais, foram realizados segundo a fórmula genérica:

$$\mu_n = \frac{\sum[\%emissão \cdot \mu(E)]}{\sum\%emissão} \quad (4)$$

A título ilustrativo, apresenta-se a seguir, o cálculo realizado para o material padrão (ferro/aço), a partir dos valores de  $\mu(E)$ [7].

$$\mu_{Fe} = \frac{32,00 \cdot 0,8346 + 31,20 \cdot 0,8346 + 89,00 \cdot 0,8346 + 57,00 \cdot 0,6519 + 6,32 \cdot 0,599 + 12,50 \cdot 0,599 + 7,48 \cdot 0,599}{235,50} + \frac{6,32 \cdot 0,599 + 12,50 \cdot 0,599 + 7,48 \cdot 0,599}{235,50}$$

$$\mu_{Fe} = 0,764 \text{ cm}^{-1}$$

Obtidos os coeficientes de atenuação linear médios, foram calculados os Fatores de Equivalência Radiográfica

(FER)<sub>μ</sub>, em relação ao material padrão. Da mesma forma, foram calculados os Fatores de Equivalência Radiográfica (FER)<sub>ρ</sub>, levando-se em conta as densidades específicas dos materiais sob ensaio e comparados os valores, para a verificação da diferença entre eles.

Os cálculos foram feitos, aplicando-se as expressões genéricas:

$$(FER)_\rho = \frac{\rho_n}{\rho_{Fe}} \quad (5)$$

$$(FER)_\mu = \frac{\mu_n}{\mu_{Fe}} \quad (6)$$

Os valores obtidos estão listados na Tabela 2.

### III. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

**Materiais Empregados.** Foram empregados os seguintes materiais: a) fonte de radiação gama, <sup>192</sup>Ir, modelo T/0 660[5], com atividade de 1,332 TBq (36 Ci), em 02/10/2000; b) filmes radiográficos da marca Kodak, tipo AA; c) soluções para processamento fotográfico da marca Kodak; d) telas intensificadoras de exposição, de chumbo, nas espessuras: tela anterior de 0,10 mm e tela posterior de 0,15 mm e corpos- de- prova de aço carbono.

**Construção da curva de exposição para o elemento padrão.** Utilizou-se um corpo-de-prova, com a forma escalonada, de aço carbono, conforme Fig. 1, que possibilitou o levantamento da curva densidade óptica versus tempo de exposição, e a partir desta, a construção da curva fator de exposição versus espessura do material [1,2,4,6], conforme Fig. 2, que possibilita o cálculo do tempo de exposição, a partir da expressão (1):

$$FE = \frac{A \cdot t}{d^2} \quad \text{da qual obtêm-se} \quad t = \frac{FE \cdot d^2}{A} \quad (7)$$

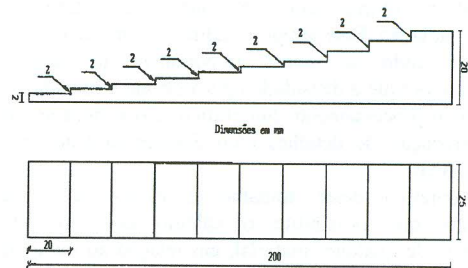


Figura 1 – Corpo-de-prova de forma escalonada.

TABELA 2. Resultados Teóricos e Práticos.

Material	(FER) <sub>ρ</sub> <sup>(a)</sup>	(FER) <sub>μ</sub> <sup>(b)</sup>	Valores <sup>(c)</sup>
Magnésio	0,221	0,223	0,230
Alumínio	0,343	0,337	0,335
Concreto	0,305	0,268	0,270
Ferro	1,000	1,000	1,000
Cobre(latão)	1,138	1,150	1,100
Cádmio	1,098	1,498	1,580
Tungstênio	2,450	5,830	6,450
Urânio	2,420	8,720	10,300

- (a) Fator de Equivalência Radiográfica em relação à densidade específica;  
 (b) Fator de Equivalência Radiográfica em relação ao coeficiente de atenuação linear;  
 (c) Obtidos nos ensaios radiográficos.

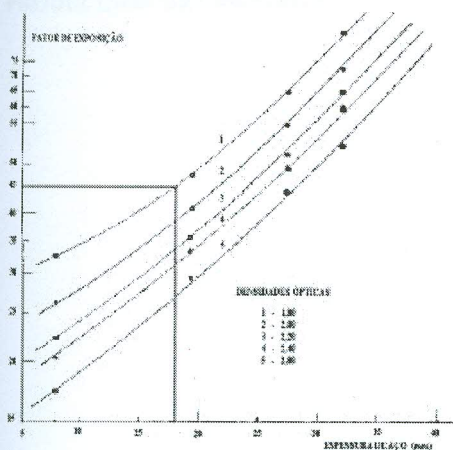


Figura 2 – Curva de exposição do elemento padrão.

TABELA 1. Propriedades dos Materiais<sup>(9)</sup>.

Material	Número Atômico	Densidade Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficiente Atenuação Linear (cm <sup>-1</sup> )
Magnésio	12	1,738	0,1719
Alumínio	13	2,689	0,2570
Concreto	-----	2,400	0,2049
Ferro	26	7,874	0,7641
Cobre	29	8,960	0,8784
Cádmio	48	8,650	1,1415
Tungstênio	74	19,300	4,4563
Urânio	92	19,040	6,6622

Os materiais foram ensaiados com espessuras desde 3,40 mm (tungstênio), de maior densidade específica, até 36,40 mm (concreto), de menor densidade específica, utilizando-se a mesma distância fonte-filme (15 cm). Os filmes radiográficos foram submetidos ao mesmo processamento fotográfico (tempo e temperatura), a fim de evitar alteração nas densidades ópticas finais.

#### IV. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os valores resultantes dos cálculos teóricos dos Fatores de Equivalência Radiográfica, utilizando-se as densidades específicas e os coeficientes de atenuação lineares de cada material, bem como os valores encontrados na prática, com os ensaios radiográficos, constam da Tabela 2.

Observando-se os valores constantes das Tabelas 1 e 2, verificamos que: 1) os valores dos Fatores de Equivalência Radiográfica, dos elementos com números atômicos menores que o do ferro (26), como o magnésio (12) e o alumínio (13), não apresentam variações sensíveis entre si; 2) elemento como o cobre (29), com número atômico logo acima ao do ferro, apresenta valores práticos e teóricos similares; 3) a partir do cádmio (48), as diferenças passam a ser significativas, mesmo entre os valores resultantes dos cálculos teóricos. Assim, podemos concluir que para elementos de números atômicos mais elevados, como o tungstênio, urânio, etc, os testes devem ser realizados mediante tentativas ou construção de curvas de exposição para cada elemento. Para elementos de números atômicos próximos ao do ferro e utilizando-se o <sup>192</sup>Ir, o uso do Fator de Equivalência Radiográfica (FER), principalmente levando-se em consideração os coeficientes de atenuação lineares, constitui-se uma ferramenta eficaz para os usuários de END, pois a grande maioria dos materiais ensaiados, encontra-se dentro da faixa citada.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BRYANT, L. E.; MC ENTIRE, P. Radiographic and radiation testing **Nondestructive testing handbook**, v.3, 1985.  
 [2] KODAK, E. C. *Radiographic in Modern Industry*. Kodak. Rochester, New York, N.Y., 1969.  
 [3] MC MASTER, R. C. *Nondestructive testing handbook* Ronald, New York, N.Y., 1959.  
 [4] SANCHEZ, W. *Ensaio não destrutivo pela técnica dos raios-X e raios gama*. Informação IEA n. 29, agosto 1974.  
 [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Equipamento de radiografia gama*. ABNT 1984(NBR 8670)

[6] CARVALHO, G. *Determinação de defeitos em profundidade (Estereoradiografia)*. Dissertação de Mestrado. Setembro/ 2001.

[7] FANO, U.; ZERBY, C.D.; BERGER, M.J. *Gamma-Ray Attenuation*. Reactor Handbook, Shielding. Interscience, V. III, p.121-127, 1962.

[8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation protection and safety in industrial radiography*. Safety Series. n. 13, IAEA. Vienna, 1999.

[9] RUBEN, S. *Manual de elementos químicos*. E. Blucher. São Paulo. 1970.

#### ABSTRACT

To perform correctly a nondestructive testing, using X and gamma rays, it is necessary to determine and to define several parameters. In this way, radiographies with acceptable quality and economical costs are obtained. Among the defined parameters, the exposure time is the most important. Therefore, it is fundamental to elaborate the exposure curves, using iron as standard. In the present work, gamma radiation source ( $^{192}\text{Ir}$ ) was used to test others materials. The experimental values with others materials are compared with those theoretically calculated values related to the standard metal (iron).