

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS INDICADORES DE QUALIDADE
DE IMAGEM (IQI) DE FIOS UTILIZADOS EM ENSAIOS RADIOGRAFICOS
DE METAIS E SUAS LIGAÇÕES**

WLADIMYR SANCHEZ. HIROSHI OKI

PUBLICAÇÃO IEA N.º 348
Julho — 1974

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO -- BRASIL

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE
IMAGEM (IQI) DE FIOS UTILIZADOS EM ENSAIOS RADIOGRÁFICOS DE
METAIS E SUAS LIGAS**

Wladimir Sanchez, Hiroshi Oki

**Coordenadoria de Aplicação de Radioisótopos
na Engenharia e na Indústria
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 348
Julho - 1974**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng.º Roberto N. Jafet – Presidente
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng.º Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM (IQI) DE FIOS UTILIZADOS EM ENSAIOS RADIOGRÁFICOS DE METAIS E SUAS LIGAS

Wladimir Sanchez, Hiroshi Ōki

RESUMO

Define-se o conceito de sensibilidade radiográfica e estabelece-se uma formulação matemática para justificar a utilização dos indicadores de qualidade de imagem (IQI) formado por fios de diferentes diâmetros, como representativos da qualidade radiográfica. Resultados experimentais mostram boa concordância com a formulação matemática proposta. Demonstra-se que a sensibilidade dos IQI não se refere as dimensões mínimas das descontinuidades metálicas que podem ser detectadas em ensaios radiográficos.

Deve-se analisar a qualidade radiográfica em função da visibilidade do IQI na radiografia acabada. Demonstra-se que a mesma qualidade de imagem tem distintas sensibilidade radiográficas conforme se utilizam diferentes tipos de IQI. É mais fácil visualizar a imagem de um IQI formado por degraus do que a imagem de um fio, de diâmetro idêntico à espessura do degrau. Por outro lado, a imagem do fio é mais visível do que a imagem de um furo circular de igual diâmetro e profundidade, porque a visibilidade depende dessas duas variáveis.

Os IQI não podem garantir a detecção de descontinuidade cujas dimensões sejam iguais ao valor da sensibilidade obtida no ensaio. A detecção da descontinuidade depende das suas dimensões e da orientação, em relação ao feixe de radiação incidente.

A sensibilidade percentual de espessura é um valor relativo que depende da espessura do corpo de prova. Ao contrário, o "índice de qualidade de imagem", caracterizado pelo número de ordem do fio do IQI, é um valor absoluto. Consideram-se no texto alguns exemplos ilustrativos.

1 - INTRODUÇÃO

Quando se realiza um ensaio radiográfico, por técnica de gamagrafia ou por raios X, a percepção de possíveis descontinuidades metálicas existentes no corpo de prova depende da qualidade da imagem e da sensibilidade radiográfica. Em muitos ensaios radiográficos a sensibilidade e a qualidade de imagem são consideradas sinônimas. Assim, um técnico pode interpretar um aumento de sensibilidade necessário para determinar defeitos em estruturas como uma melhoria de qualidade radiográfica. Por outro lado, em ensaios de peças fundidas, de espessuras irregulares, pode-se considerar um critério de qualidade a possibilidade de obter-se uma sensibilidade aceitável, para cada espessura, durante uma única exposição radiográfica. Às vezes é preferível este critério do que obter-se uma sensibilidade máxima para uma espessura determinada da peça. Neste caso, a qualidade radiográfica leva em conta a visualização das distintas espessuras e a sensibilidade do ensaio. Quando se radiografam determinados corpos de prova com o objetivo de medir-se uma dimensão, como por exemplo o diâmetro de um fio ou furo, o critério mais importante pode ser a definição do detalhe ou a nitidez da imagem das bordas. Nestas circunstâncias a sensibilidade radiográfica pode ser um fator relativamente secundário, na definição de uma radiografia de alta qualidade.

Um grande número de ensaios radiográficos tem por objetivo a detecção de defeitos em estruturas e nessas condições a sensibilidade passa a ser um fator importante. No ensaio radiográfico existem limitações relativas às dimensões mínimas das descontinuidades que podem ser detectadas. Discute-se adiante os fatores e limites que regem a sensibilidade tomando-se por base os conceitos de contraste e definição radiográfica.

Utilizam-se com frequência em relação à sensibilidade radiográfica muitos termos ambíguos que necessitam ser bem definidos.

Uma das técnicas mais antigas utilizadas na medição da sensibilidade radiográfica consiste em colocar sobre o corpo de prova uma espessura adicional e analisar a imagem final obtida. Essa espessura adicional pode ser constituída por uma pequena placa, em forma de escada, de mesma natureza do corpo de prova e com degraus contendo espessuras proporcionais a do corpo de prova. Toma-se como critério de sensibilidade, na radiografia acabada, a imagem do degrau mais fino cujo contorno aparece nítido. A imagem da espessura desse degrau é uma medida da sensibilidade que se obteve, com este corpo de prova e com a técnica empregada.

Não se expressa a sensibilidade radiográfica como uma espessura mas sim em termos percentuais, ou seja:

$$S\% = \frac{\Delta x}{x} 100 \quad (1)$$

- Δx - espessura do degrau mais fino visível na radiografia acabada;
- x - espessura do corpo de prova;
- S - sensibilidade radiográfica.

Esse valor recebe várias denominações, a saber: "sensibilidade percentual de espessura", "sensibilidade de espessura" e "sensibilidade de contraste". Assim, um ensaio radiográfico que mostra a imagem bem definida de um degrau com 0,1 mm de espessura, colocado sobre um corpo de prova com 10 mm de espessura, apresenta uma sensibilidade de espessura de 1%. A expressão sensibilidade de espessura implica em que a espessura adicional deve ser colocada sobre o material, na posição mais desvantajosa em relação ao feixe de radiação incidente, isto é, junto a extremidade do corpo de prova. Colocando-se a espessura adicional junto a face posterior do corpo de prova obtém-se para a sensibilidade um valor totalmente diferente.

Levando-se em conta esta técnica de avaliar a sensibilidade percentual deve-se notar que uma melhor sensibilidade, obtida por meio de outra técnica radiográfica diferente, com visibilidade de uma placa mais fina, implica em um valor numérico menor para a sensibilidade percentual. Por outras palavras, a sensibilidade de 2% não é tão boa quanto a de 1% quando se toma a sensibilidade como critério de qualidade. Assim, expressões como "maior sensibilidade" e "menor sensibilidade" são ambíguas pois podem significar maior em sentido de melhor qualidade ou maior numericamente, no sentido de menor qualidade. Evita-se interpretações errôneas utilizando-se as expressões "melhor sensibilidade" e "pior sensibilidade".

As placas delgadas, em forma de escada, com degraus de diferentes espessuras ou de

outras geometrias diversas recebem a denominação de "Penetrômetro". A origem deste nome está ligada à radiologia médica que no início de seu desenvolvimento propunha a colocação de uma espessura adicional de material, sobre a parte radiografada, para comprovar que todo o enegrecimento do filme não era proveniente da radiação espalhada. A palavra penetrômetro derivou da palavra inglesa "penetrometer", que é a soma de outras duas "penetration" e "meter". A palavra penetrômetro não deve ser empregada, porque na realidade não se mede a penetração da radiação.

A "sensibilidade do penetrômetro" significa pouco ou nada, no sentido quantitativo, a menos que se especifiquem a forma do sistema e o método de leitura da imagem.

Existem muitas formas de penetrômetros (placas planas com orifícios, placas em degraus, fios etc) e a sensibilidade pode ser expressa em um valor percentual que não obedece a equação (1). A menos que se estabeleçam e se utilizem termos bem definidos, a expressão sensibilidade radiográfica poderá causar muita confusão nos meios técnicos.

Ademais, a imagem do penetrômetro na radiografia acabada está ligada a uma série de fatores dos quais depende o contraste. Assim, o correto é substituir o termo penetrômetro por Indicador de Qualidade de Imagem - IQI e utilizar a expressão "sensibilidade de IQI".

Encontram-se também com frequência, no campo da radiografia industrial, expressões como "sensibilidade das descontinuidades" ou "sensibilidade para a detecção da mínima descontinuidade" embora não se possa estabelecer uma definição quantitativa e exata desses termos pois as descontinuidades variam em forma geométrica e natureza. A sensibilidade de detecção de uma descontinuidade não pode ser confundida com a sensibilidade do IQI, embora exista uma relação entre ambas.

II - SENSIBILIDADE RELATIVA À ESPESSURA DO MATERIAL RADIOGRAFADO

Os feixes incidentes de radiações eletromagnéticas X e gama ao atravessarem o corpo de prova interagem com a matéria e sofrem espalhamento. Como resultado final desse fenômeno, a radiação que incide sobre o filme radiográfico é formada de duas componentes: a primária e a secundária ou espalhada. Levando-se em conta a sensibilidade radiográfica, definida pela equação (1) tem-se:

$$S\% = \frac{\Delta x}{x} 100 = \frac{\Delta D}{0,43 \delta_D \mu x} \frac{I_s}{I_D} \quad (2)$$

ΔD - diferença mínima apreciável da densidade radiográfica no filme;

δ_D - gradiente da curva característica do filme utilizado no ensaio, entre o intervalo ΔD de densidade radiográfica;

μ - coeficiente de absorção linear, para a radiação utilizada e para o material do corpo de prova;

x - espessura do corpo de prova;

I_s - intensidade da radiação espalhada que chega ao filme, em um ponto qualquer, admitida uniforme durante a exposição;

I_D - intensidade da radiação direta que chega ao filme, no mesmo ponto.

A intensidade da radiação que chega ao filme é $(I_s + I_D)$. Os valores de I_D e I_s , muitas vezes recebem a denominação de "componente formadora de imagem" e "componente não formadora de imagem", respectivamente. Na realidade, os valores de I_D e I_s da equação (2) representam melhor uma quantidade de radiação medida pelo efeito sobre o filme exposto, em condições radiográficas adequadas, do que a intensidade de radiação propriamente dita.

Determinam-se experimentalmente os valores de μ , I_D e I_s construindo-se duas curvas de absorção da radiação pelo corpo de prova considerado. A primeira curva deve corresponder às condições de feixe de radiação incidente divergente e a segunda de feixe colimado. Em ambas as curvas de natureza semilogarítmica, relacionam-se as espessuras do corpo de prova com a exposição, tomando-se a densidade radiográfica como constante. Na Figura 1 representa-se um par de curvas deste tipo.

O valor de μ que aparece na equação (2) está relacionado diretamente com o coeficiente angular da curva correspondente ao feixe de radiação colimado, ou seja:

$$\mu = \frac{0,693}{0,303 \text{ m}} = \frac{2,25}{\text{m}}$$

μ é o coeficiente angular da curva $x \cdot \log E$. Observa-se que a inclinação da curva mostrada na figura 1 não é constante e como consequência, para a mesma radiação primária incidente, o valor de μ depende da espessura x do corpo de prova. A variação de μ em função da espessura do corpo de prova é gradual. Na figura 1 as curvas dizem respeito a radiação gama, de 660 keV, do ^{137}Cs e as espessuras normalmente radiografadas com ela, e que estão compreendidas entre 35 mm e 100 mm de aço. A variação de μ é de 6%, aproximadamente, e nesse intervalo de espessura, ele pode ser obtido com grande precisão. A figura 2 mostra a variação que sofre μ quando um feixe de radiação incidente, constituído por raios X atravessa um corpo de prova de aço com espessura de 50 mm.

Obtém-se a relação I_s / I_D medindo-se a distância que separa a curva de feixe colimado de radiação da curva de feixe não colimado. As figuras 3 e 4 mostram a variação da fração $(1 + \frac{I_s}{I_D})$ em função da espessura do corpo de prova, considerando-se diferentes energias da radiação eletromagnética incidente.

Obtém-se o valor de δ_D , gradiente da curva característica para a densidade considerada, por meio de curvas características $D \cdot \log E$, dos filmes radiográficos. Os resultados experimentais mostram que δ_D é razoavelmente constante em diferentes lotes e idades de filmes radiográficos, desde que as condições de trabalho estejam convenientemente normalizadas. Pode-se utilizar o valor médio de $\delta_D = 4,0$ na equação (2), desde que se realize o ensaio considerado com filme de grão fino, sem telas intensificadoras de exposição e com densidade radiográfica 2,0.

Considerando-se Δx como o valor mínimo de variação de espessura que pode ser evidenciada, ΔD converte-se na variação mínima de densidade radiográfica que o olho humano pode distinguir, na radiografia acabada. Admitindo-se que as condições onde se efetuam as leituras da radiografia sejam adequadas para a densidade radiográfica obtida e que a imagem final seja bem definida, o valor mínimo de densidade radiográfica é $D_{\min} = 0,006$. Esse valor

refere-se, na realidade, a visibilidade da borda de um só degrau do IQI e quando não existem considerações sobre as dimensões da imagem. É possível obter-se valores para $\Delta D = 0,004$ desde que se utilizem condições ótimas de intensidade luminosa e filmes de granulação extra fina. O valor desse limiar de densidade ΔD e função das condições de observação, do instrumental utilizado, do analista etc.

III VALORES EXPERIMENTAIS DA SENSIBILIDADE DE ESPESSURA

Para comprovar as considerações anteriores realizaram-se experiências de determinação da sensibilidade percentual de espessura e compararam-se os resultados com os valores teóricos obtidos pela equação (2). É conveniente frisar que os valores apresentados na tabela I referem-se a sensibilidade de espessura ou seja a sensibilidade de contraste não guardando nenhuma relação com a possibilidade de detecção de pequenas descontinuidades metálicas. Observa-se que em um ensaio radiográfico de determinado corpo de prova, realizado com radiação de energia adequada, a variação da distância fonte filme (DFF) influi muito pouco na sensibilidade de espessura, excepto no caso dessa distância ser tão pequena que a imagem do degrau do IQI seja totalmente indefinida. Por outro lado, a variação da distância fonte filme influi acentuadamente na visibilidade dos pequenos detalhes.

A equação (2) mostra que em um ensaio radiográfico, de corpo de prova de espessura constante, aumentando-se a energia da radiação eletromagnética incidente, o coeficiente de absorção linear μ diminui (figura 2). Mantendo-se constante os demais termos da equação (2) conclui-se que a sensibilidade de espessura piora. Entretanto, variando-se a relação I_s / I_D e considerando-se que o aumento de energia acarreta uma diminuição de $[1 + (\frac{I_s}{I_D})]$ que é proporcionalmente superior a diminuição de μ , nota-se uma melhoria da sensibilidade de espessura. Os dados disponíveis permitem desenhar curvas de variação de espessuras mínimas discerníveis em função da energia da radiação eletromagnética incidente. Essas curvas indicam que para espessuras compreendidas entre 25 e 50 mm de aço, quanto menor a energia gama (ou a kV, no caso da radiação X) melhor será a sensibilidade. A partir de espessuras da ordem de 100 mm de aço ocorre o inverso, isto é, obtêm-se melhores sensibilidades de espessura com energias maiores.

IV SENSIBILIDADE DE DETECÇÃO DOS IQI DE FIOS

É de grande interesse correlacionar em uma equação matemática as variáveis que intervêm na radiografia de um material e que podem influir na sensibilidade de detecção das suas possíveis descontinuidades internas.

Os fatores que determinam o contraste são os mesmos que se encontram na equação (2). O problema da definição, e em particular, da definição da imagem próxima do limite de perceptibilidade visual não é simples, para ser expresso quantitativamente.

Burril (2) formulou uma teoria e propôs uma relação para ser considerada como aproximação e não uma fórmula exata, a saber:

$$S = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 = \left[\left(\frac{2,3 \cdot D}{\delta \cdot C_0} \right) \left(\frac{1}{\mu x} + \frac{K}{\mu} \right) \left(\sqrt{U_g^2 + U_f^2} \right) \right] \quad (3)$$

K é o fator de dispersão, ou seja $\left(\frac{I_s}{I_D} \cdot \frac{1}{x} \right)$
 C_0 é o "limite de resolução" do olho humano e que pode assumir o valor 0,7 mm, para uma distância de 60 cm.

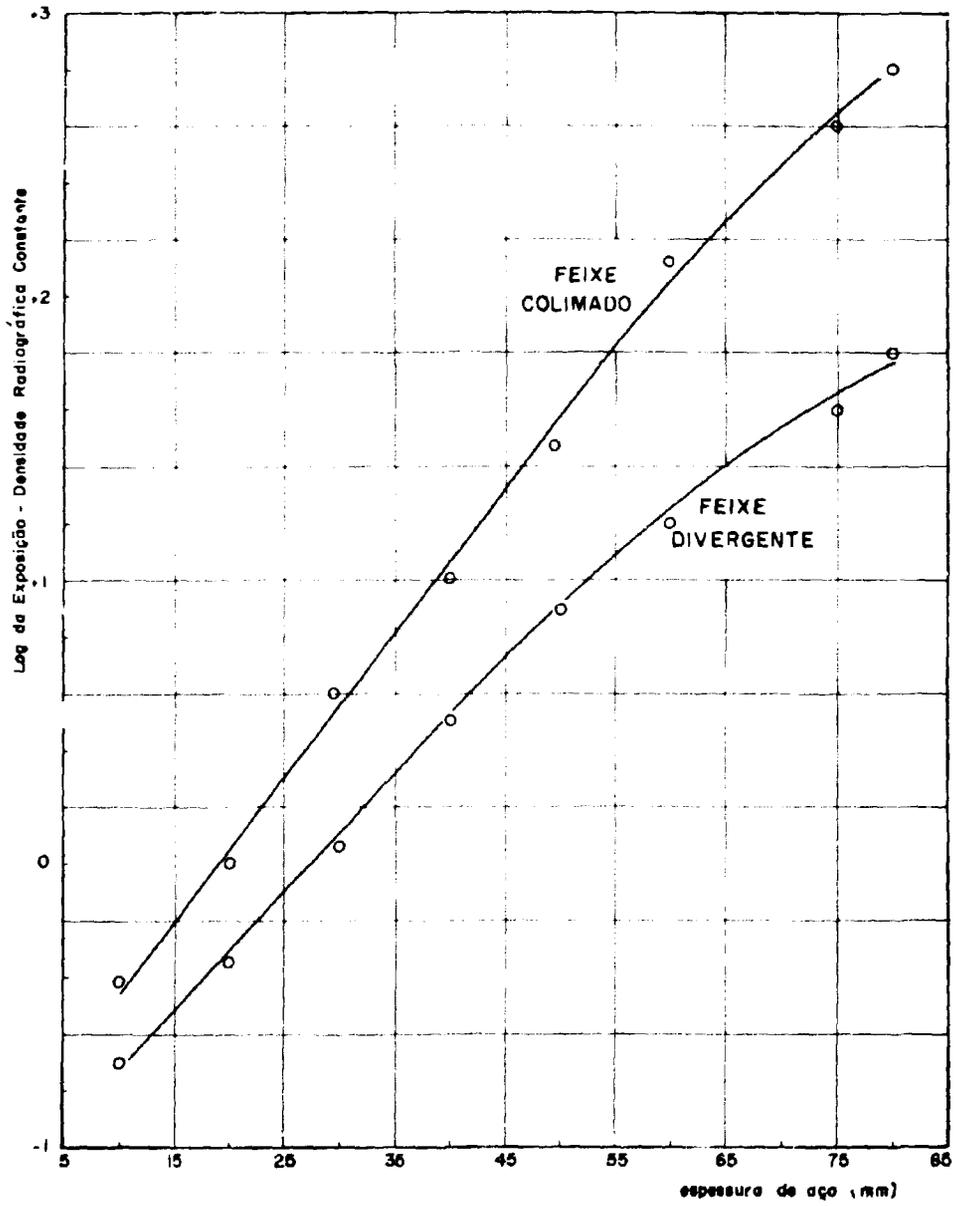


Figura 1 - Curvas de Absorção para Raios Gama do ^{137}Cs

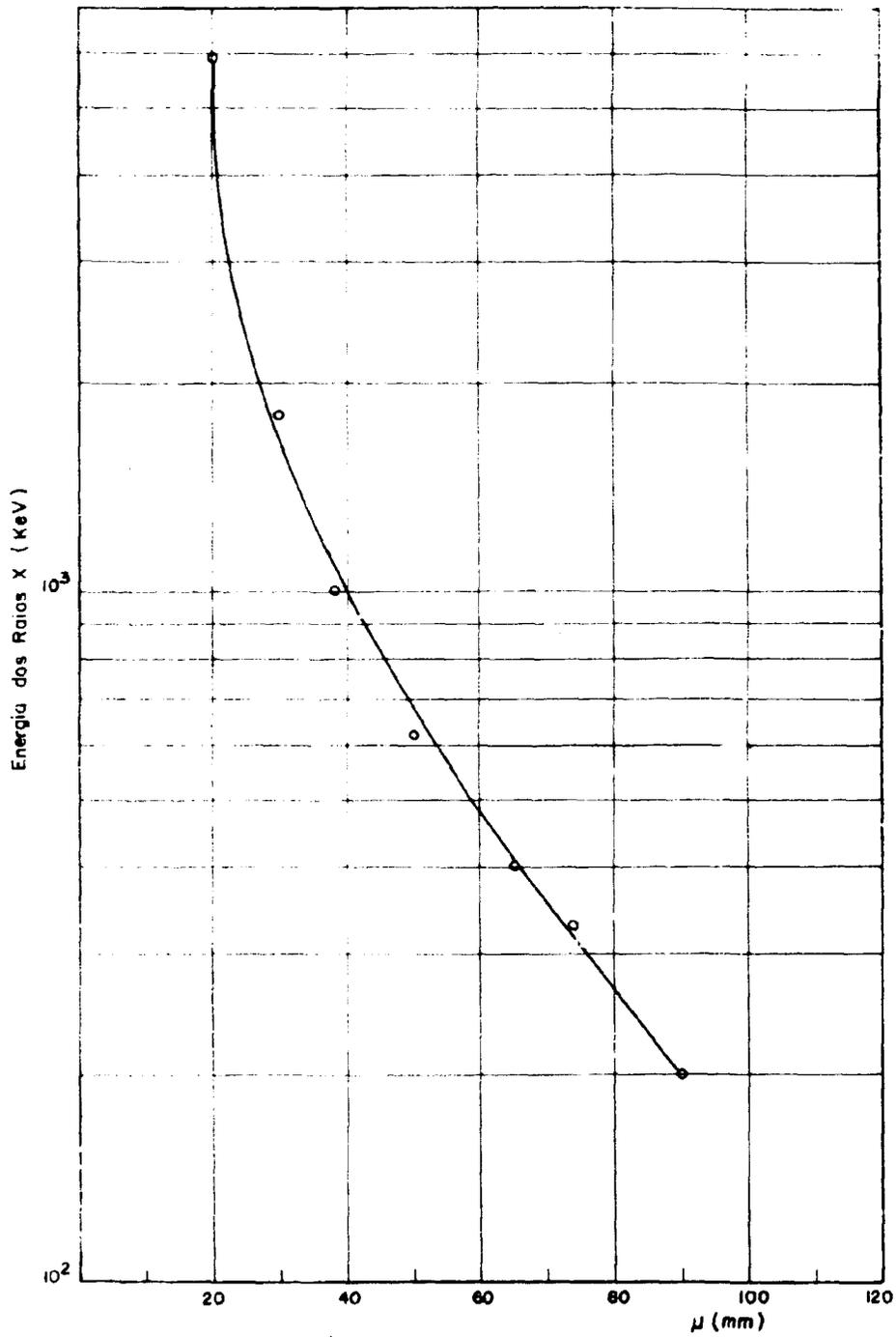


Figura 2 - Variação de μ em função da energia dos Raios X que incidem sobre um corpo de prova de aço com 50 mm de espessura

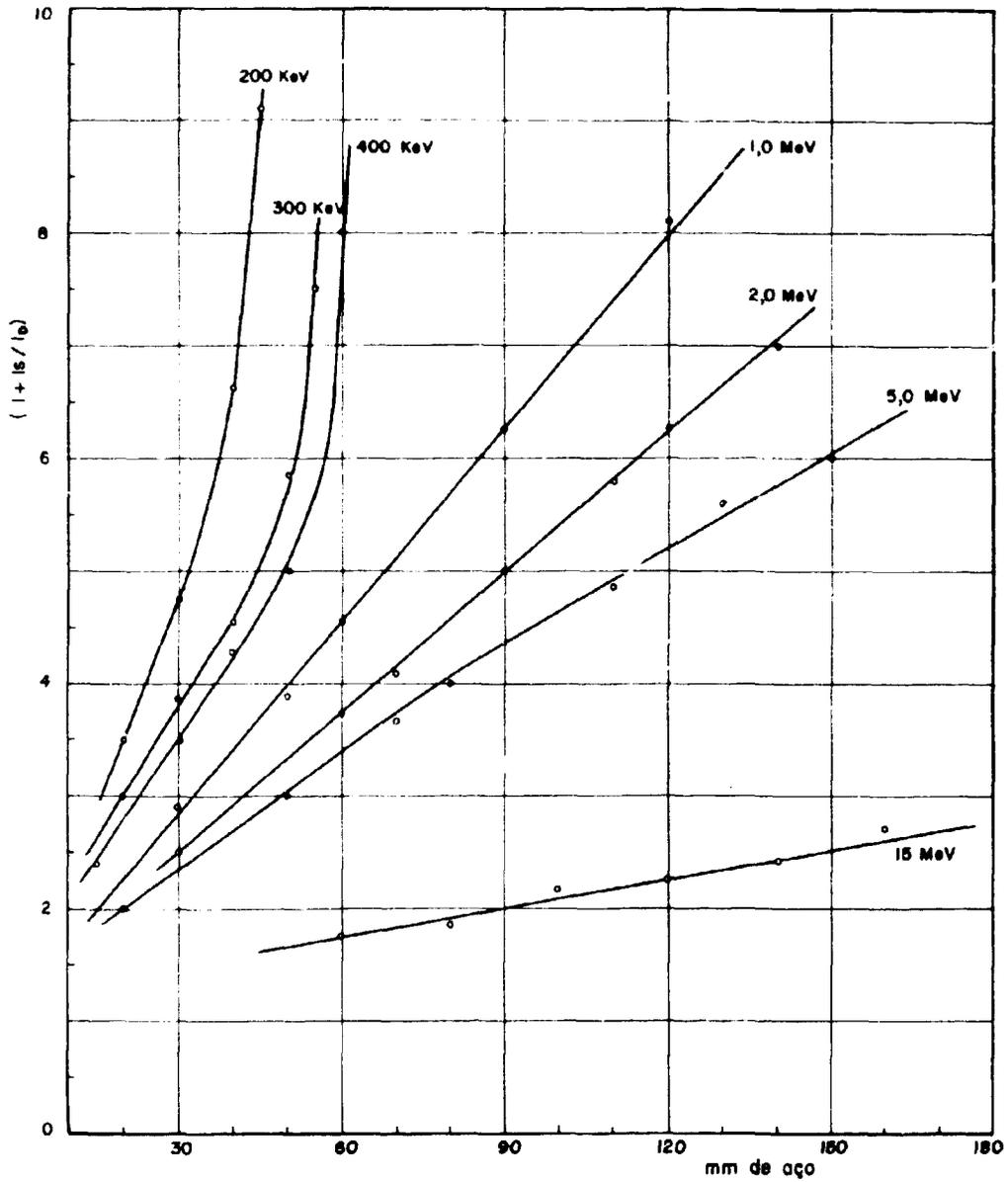


Figura 3 - Variação de $(I + I_s / I_0)$ em função da espessura do corpo de prova, para diferentes energias da radiação incidente

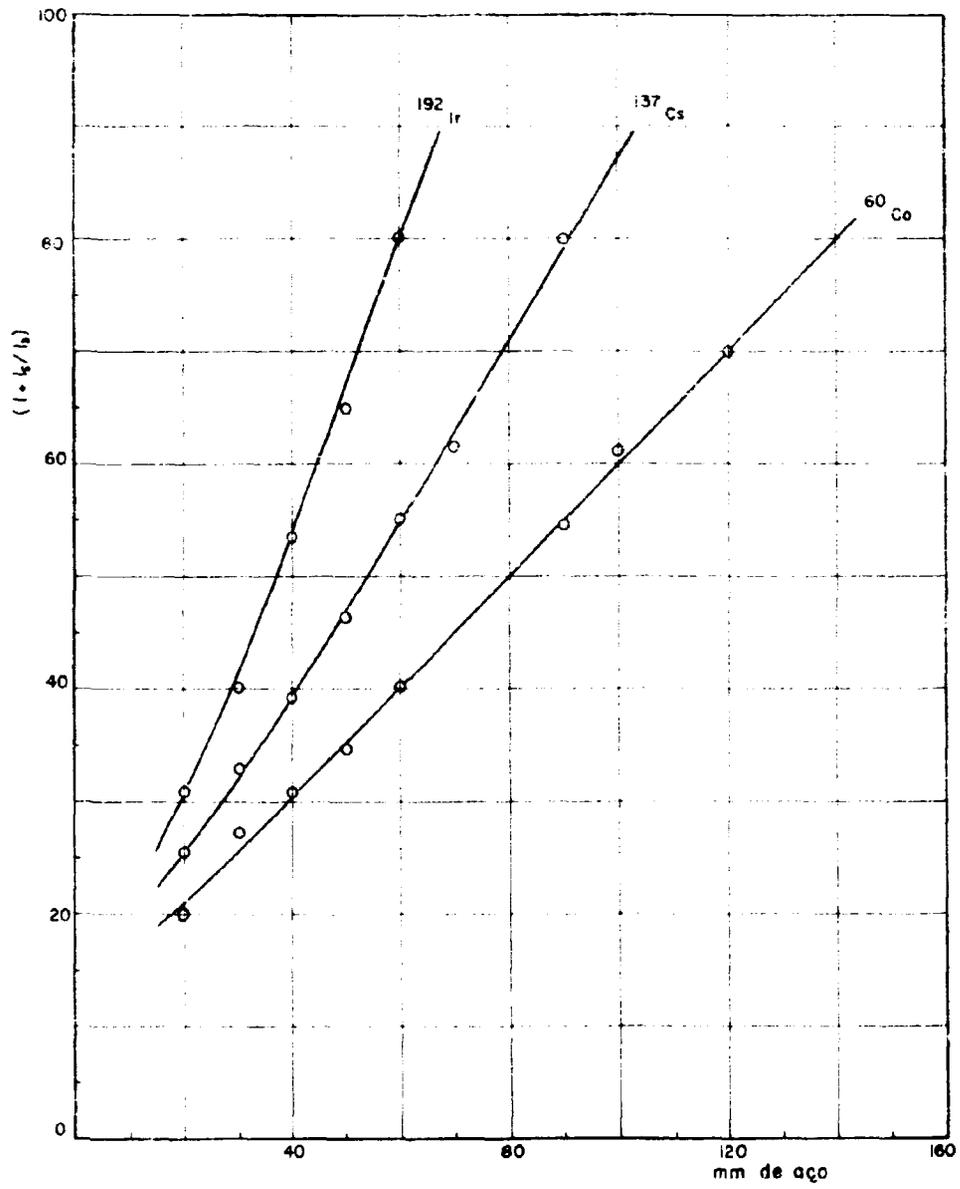


Figura 4 - Variação de $(I + I_q / I_a)$ em função da espessura do corpo de prova, para diferentes fontes de gamagrafia

U_f é a granulação do filme, ou falta de definição

Utilizando-se hipóteses simplificadoras pode-se estabelecer uma equação para a sensibilidade radiográfica, no caso de indicadores de qualidade de imagem (IQI) formados por fios.

A seção transversal de um fio metálico circular pode ser representada pela equação:

$$y = 4x(2r - x) \quad (4)$$

sendo $x = r$ e $y = r$, no centro da seção.

Partindo-se da lei exponencial de interação da radiação eletromagnética com a matéria e admitindo-se que em um pequeno intervalo de densidades D seja proporcional a $\log I$ demonstra-se que D é proporcional a espessura y . Consequentemente as curvas de variação de espessura ao longo da seção podem ser consideradas equivalentes às curvas de variação de densidade do filme radiográfico. Assim, é possível estabelecer uma curva de variação da densidade pela imagem de um fio metálico de seção circular, representando-se y em função de x . A máxima diferença de densidade entre a imagem e o fundo toma-se como sendo

$$\Delta D_{\max} = 2r \quad (5)$$

Na figura 5 mostram-se curvas que representam a distribuição da densidade na imagem quando ela está afetada pela falta de definição. Os métodos aditivos empregados na obtenção dessas curvas podem ser utilizados para demonstrar que ΔD_{\max} , na imagem de um fio metálico afetado pela falta de definição U , é representada pela equação:

$$\Delta D_{\max} = \frac{\pi r^2}{U} \quad (6)$$

sempre que $U > 2r$, ou seja, que a falta de definição diminua o valor de ΔD_{\max} em um fator

$\frac{\pi r^2}{U} \cdot \frac{1}{2r} = \frac{\pi a}{4U}$ onde a representa o diâmetro do fio metálico. Quando a diferença de densidade radiográfica diminui, pelo fato de considerar-se a imagem de um fio no lugar da imagem dos degraus de uma escadinha, este fator passa a ser considerado. Assim, a equação:

$$\Delta D_{\max} = \frac{1}{2,3} \frac{\delta_D}{1 + (I_s/I_D)} \pi \frac{a^2}{4U} \quad (7)$$

torna-se representativa da sensibilidade do indicador de qualidade de imagem (IQI), na forma de fio.

$$S\%_{fio} = \frac{a}{x} 100 = \frac{100}{x} \left[\frac{2,92 \cdot \Delta D \cdot (1 + (I_s/I_D) \cdot U)^{1/2}}{\delta_D \mu} \right] \quad (8)$$

Admitindo-se que a diferença de densidade radiográfica $\Delta D = 0,006$ seja aplicável a imagem de um fio de pequeno diâmetro pode-se calcular a sensibilidade e compará-la com os valores experimentais.

Na dedução desta equação leva-se em conta que a visibilidade da imagem de um fio de

TABELA I
SENSIBILIDADE DE ESPESSURA TEORICA E EXPERIMENTAL

Energia da Radiação	Material e Espessura	Distancia Fonte Filme	Tipo de Filme	Densidade Radiografica	SENSIBILIDADE DE ESPESSURA	
					Experimental	Teorica
keV	mm	cm				
⁶⁰ Co - 1,250	25 - aço	25	G. F. T. Pb	0,9	1,40	1,45
⁶⁰ Co - 1,250	50 - aço	50	G. F. T. Pb	1,7	0,60	0,60
⁶⁰ Co - 1,250	75 - aço	60	G. F. T. Pb	1,6	0,60	0,57
¹⁹² Ir - 350	12 - aço	50	G. F. T. Pb	2,2	0,60	0,80
¹⁹² Ir - 350	25 - aço	50	G. F. T. Pb	2,0	0,62	0,57
¹⁹² Ir - 350	50 - aço	50	G. F. T. Pb	1,9	0,50	0,55
¹⁹² Ir - 350	75 - aço	50	G. F. T. Pb	1,9	0,60	0,67
Raios X - 135 kV	25 - aço	90	G. F. T. F	1,2	0,40	0,38
Raios X - 140 kV	12 - aço	90	G. F. T. Pb	1,9	0,30	0,28
Raios X - 150 kV	75 - alumínio	100	G. F. T. Pb	2,0	0,40	0,43
Raios X - 210 kV	25 - aço	90	G. F. T. Pb	2,2	0,20	0,22
Raios X - 250 kV	50 - aço	90	G. F. T. Pb	2,5	0,30	0,29

G.F. - Grão Fino

T.Pb - Tela intensificadora de chumbo

T.F - Tela intensificadora de tungstato de cálcio

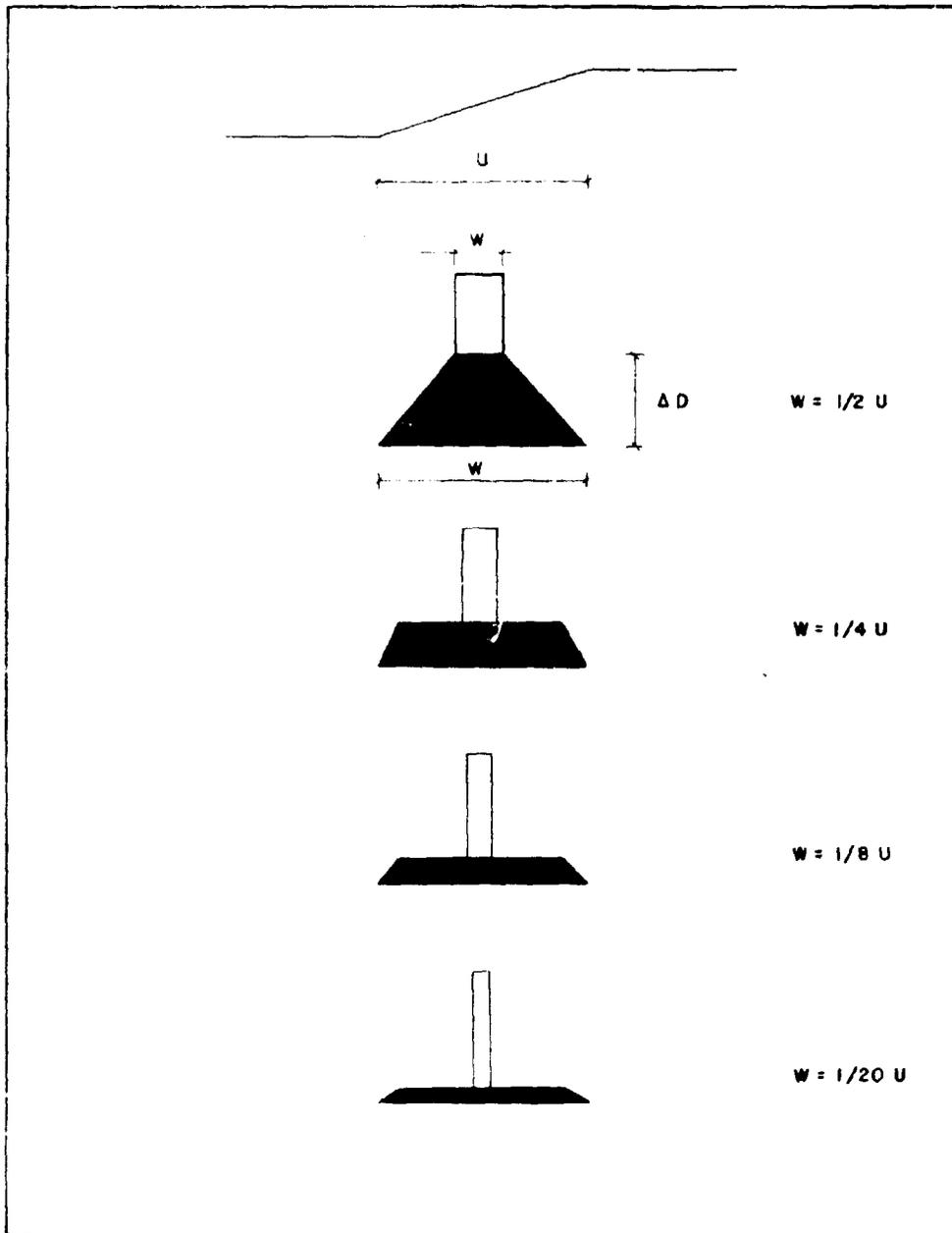


Figura 5 - Distribuição de densidades na imagem de uma fenda de diferentes larguras, compreendidas entre $0,50 U$ e $0,05 U$

pequeno diâmetro depende da diferença de densidades entre o centro da imagem e o fundo. Não se considera a distribuição de densidade ao longo da imagem. Apesar desta limitação a concordância entre valores teóricos e experimentais é muito boa mostrando que a equação (8) pode representar a sensibilidade do IQ de fio metálico. Observa-se que a sensibilidade depende da raiz quadrada dos fatores envolvidos e que alteram muito pouco o valor de $S\%_{f,10}$.

Considerando-se que no interior do corpo de prova de espessura x existe uma descontinuidade metálica de comprimento a e profundidade b , o excesso de radiação que atravessa esta descontinuidade pode ser representado matematicamente pelas equações.

$$I = I_0 \left[e^{-\mu(x-b)} - e^{-\mu x} \right] = I_0 e^{-\mu x} \left[e^{\mu b} - 1 \right]$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \mu b \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \text{ s} \right)$$

$$I = \mu A b I_0 e^{-\mu x} (\text{MeV s}) = \mu A I_0 e^{-\mu x}$$

$$i = \mu A I_D (\text{MeV s}) \quad (9)$$

Estas equações também são válidas para o caso de uma descontinuidade qualquer, com pequenas dimensões. Admitindo-se um fio metálico de raio r , representa-se a intensidade de radiação eletromagnética direta, por unidade de comprimento de fio, que chega ao filme radiográfico por

$$\pi r^2 \mu I_D \quad (10)$$

O efeito da penumbra e a falta de definição fazem a imagem final, considerada como a projeção da descontinuidade sobre o plano do filme ser formada pela soma de dois (2) fatores: (projeção da descontinuidade) + (falta de definição)

Considerando-se um fio de secção circular posicionado sobre um corpo de prova de espessura X , na face voltada para a fonte emissora de radiação eletromagnética e utilizando-se uma distância d entre a fonte e o filme radiográfico, representa-se a projeção da imagem por

$$\frac{2rd}{d-x} + U_f \quad (11)$$

Representa-se a característica de um fio radiográfico pela equação

$$D = \delta_D \log (I_s + I_D) T + \text{constante} \quad (12)$$

Diferenciando-se a equação (12) em relação a componente direta da radiação incidente e admitindo-se que a componente da radiação espalhada não varia com a presença de um fio metálico fino, posicionado sobre o corpo de prova, tem-se:

$$\Delta D = \frac{1}{2,3} \delta_D \frac{\Delta I_D}{I_s + I_D} = 0,43 \delta_D \frac{\Delta I_D}{I_s + I_D}$$

$$\Delta I_D = \frac{\Delta D}{0,43 \delta_D} (I_s + I_D) \quad (13)$$

Indica-se a variação da intensidade da radiação que forma a imagem do fio, de acordo com as equações (10) e (11) pela relação

$$\Delta I_I = \frac{\pi r^2 \mu I_D}{\left(\frac{2rd}{d-x} + U_T\right)} \quad (14)$$

Igualando-se as equações (13) e (14) e considerando-se que a densidade radiográfica ao longo da imagem do fio não é uniforme, introduz-se um "fator de forma F", para representar esta distribuição variável de densidade radiográfica. Tem-se

$$F \frac{\Delta D}{0,43 \delta_D} (I_s + I_D) = \frac{\pi r^2 \mu I_D}{\left(\frac{2rd}{d-x} + U_T\right)} \quad (15)$$

Para $d \gg x$ pode-se reescrever a equação (15) como segue.

$$\frac{r^2}{2r + U_T} = \frac{2,3 F \Delta D (1 + I_s/I_D)}{\pi \mu \delta_D} \quad (16)$$

Obtendo-se o valor de $2r$ na equação (16), a relação

$$\frac{2r}{x} = 100\%$$

representará o valor da sensibilidade do IQI de fio.

As diferenças existentes entre esta formulação e a equação (8) são:

- 1) fator de forma;
- 2) a largura da imagem, representada por $(2r + U)$ e não por U , eliminando-se a limitação introduzida na equação (8) de que $U > 2r$

Analogamente pode-se estabelecer equações similares para determinar a sensibilidade de um IQI formado por uma escadinha metálica de degrau h e furo de raio r

$$\frac{r^2 h}{\left[rd/(d-x) + U\right]^2} = \frac{2,3F \Delta D}{\delta_D \mu} \left[1 + \left(\frac{I_s}{I_D}\right)\right]$$

No caso de ser $h = 2r$ e $d \gg x$ tem-se

$$\frac{h^3}{2(h + 2U)^2} = \frac{2,3F \Delta D}{\delta_D \mu} \left(1 + \frac{I_s}{I_D}\right) \quad (17)$$

Os valores do "fator de forma" F podem ser obtidos como segue. Quando a distribuição de densidade radiográfica ao longo da imagem é uniforme, F deve ser igual a unidade. Esta condição verifica-se com IQI que tem furo de diâmetro relativamente grande e quando $r \gg U_T$. No caso de IQI de fio metálico fino estima-se o valor de $F = \frac{2}{\pi} \approx 0,64$, baseando-se na distribuição de densidade radiográfica ao longo da imagem, excepto nos casos em que $2r \gg U_T$.

O estudo das curvas de distribuição de densidade radiográfica da imagem de um fio, sugere que na maioria dos casos os valores de U_T estão compreendidos entre r e $3r$ e os valores de F entre 0,53 e 0,60.

Embora nas equações anteriores não se leve em conta a influência da granulação do filme radiográfico, os valores de sensibilidade teóricos e experimentais, apresentam boa concordância.

Um cálculo simples mostra que são iguais as sensibilidades de dois filmes que tem mesmo contraste, mas granulações e rapidez diferentes. A experiência mostra que ao utilizar-se a radiação X de média quilovoltagem obtém-se sensibilidades diferentes para cada filme. Em peças de pequena espessura a granulação do filme influe acentuadamente na imagem do IQI. Assim, com radiação X de baixa energia, a granulação do filme adquire grande importância e os valores teóricos e experimentais da sensibilidade diferem entre si acentuadamente.

Apresentam-se na tabela II os valores experimentais de sensibilidade radiográfica considerando-se dois tipos de IQI e diferentes filmes radiográficos, tipos e energias das radiações incidentes, densidades radiográficas, telas intensificadoras de exposição, distâncias fonte-filme e exposição radiográfica.

V - INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGENS CONSTRUIDOS COM FIOS

A visualização das possíveis descontinuidades existentes no interior de um corpo de prova metálico, quando submetido ao ensaio radiográfico, depende fundamentalmente da qualidade da imagem que se obtém. Essa qualidade de imagem é consequência da técnica radiográfica utilizada e para representá-la por um valor numérico recorre-se aos "indicadores de qualidade de imagem IQI". Esta nomenclatura é aceita pelo "International Institute of Welding" e substitui a palavra penetrômetro, muito usada entre os técnicos brasileiros. O termo penetrômetro presta-se frequentemente a equívocos, no sentido de não existir nenhuma relação entre as imagens dos IQI (de formas geométricas regulares e bem definidas) e as dimensões das mínimas descontinuidades que podem ser detectadas (geométrica irregular e contornos indefinidos).

O indicador de qualidade de imagem que em geral é uma pequena peça de material idêntico ao do corpo de prova ou com propriedades análogas, do ponto de vista de absorção da radiação, deve ser colocado na face da peça que está voltada para a fonte emissora de radiação.

A qualidade da radiografia será melhor nos casos em que a parte mais fina do indicador de qualidade de imagem aparece bem visível. Os IQI não podem garantir a detecção de descontinuidades cujas dimensões sejam iguais ao valor da sensibilidade obtida no ensaio. A detecção da descontinuidade depende das suas dimensões e da sua orientação em relação ao feixe de radiação incidente. Comete-se um erro considerar os resultados da sensibilidade do IQI como uma medida absoluta.

TABELA II
VALORES EXPERIMENTAIS DA SENSIBILIDADE DOS IQI

Tipo e Energia da Radiação	Espessura do Corpo de Prova	Exposição Radiográfica	Tipo de Filme	Tela Intensificadora	Densidade Radiográfica	Distância Fonte-Filme	Sensibilidade dos IQI	
							Din	Bwr
kv	mm	mA min Cimim				cm	%	%
RX - 90	3,0	40	Kodak M	—	2,0	25	1,6	2,9
RX - 100	6,0	24	Ilford C	Pb	1,2	50	1,0	2,0
RX - 80	10,0	30	Industrex S	Fluorescente	1,4	50	1,3	2,1
RX - 80	10,0	32	Industrex S	Fluorescente	1,6	50	1,4	2,0
RX - 120	10,0	40	Ilford C	Pb	2,0	38	1,0	1,2
RX - 125	10,0	40	Ilford-C	Pb	2,1	50	0,8	1,3
RX - 130	10,0	40	Ilford-C	Pb	1,8	75	1,0	1,3
¹⁹² Ir	12,5	70	Ilford-C	Pb	1,8	25	1,6	1,70
¹⁹² Ir	12,5	270	Ilford-C	Pb	1,7	50	1,6	1,70
¹⁹² Ir	12,5	13	Cristalex	Pb	2,2	25	1,6	1,80
⁶⁰ Co	12,5	6	Cristalex	Pb	2,7	23	3,9	4,0
RX 110	20,0	80	Industrex-S	Fluorescente	1,6	80	0,8	1,2
RX - 150	20,0	100	Ilford-C	Pb	0,9	80	1,0	1,4
¹⁹² Ir	20,0	117	Industrex-D	Pb	2,0	80	2,0	2,5
¹⁹² Ir	20,0	740	Ilford-C	Pb	1,7	80	1,3	1,7
⁶⁰ Co	20,0	450	Ilford-C	Pb	2,1	70	1,8	2,1

TABELA II
VALORES EXPERIMENTAIS DA SENSIBILIDADE DOS IQI

Tipo e Energia da Radiação	Espessura do Corpo de Prova	Exposição Radiográfica	Tipo de Filme	Tela Intensificadora	Densidade Radiográfica	Distância Fonte Filme	Sensibilidade dos IQI	
							Din	Bwr
kv	mm	mA·min C·m·m				cm	%	%
RX - 120	30	80	Industrex S	Fluorescente	2,1	80	1,0	2,3
RX - 140	30	40	Industrex S	Fluorescente	1,7	80	0,8	2,1
RX - 150	30	120	Industrex-D	Pb	1,5	80	1,0	2,2
192 Ir	50	880	Cristalex	Pb	1,8	50	1,0	2,5
192 Ir	50	200	Industrial C	Pb	2,5	30	0,8	2,8
192 Ir	50	360	Industrial-C	Pb	2,0	30	0,8	2,9
137 Cs	50	800	Cristalex	Pb	2,0	50	0,9	2,9
60 Co	50	270	Cristalex	Pb	2,2	50	1,2	2,9
60 Co	50	1000	Cristalex	Pb	2,0	120	1,0	3,0
137 Cs	100	$3,6 \cdot 10^3$	Kodak AA	Pb	2,0	120	1,0	3,2
60 Co	100	640	Kodak AA	Pb	2,0	120	0,9	3,6
60 Co	100	$1,8 \cdot 10^3$	Kodak AA	Pb	2,2	200	0,8	3,1
60 Co	100	$2,6 \cdot 10^3$	Kodak AA	Pb	2,1	240	0,8	3,3
60 Co	750	$7,8 \cdot 10^3$	Kodak M	Pb	2,2	80	0,8	3,4
60 Co	150	$7,4 \cdot 10^3$	Kodak M	Pb	2,2	80	1,0	3,2
60 Co	150	$8,6 \cdot 10^3$	Kodak M	Pb	2,0	100	0,9	3,0

Costuma-se caracterizar a qualidade da imagem pela visibilidade de uma dimensão do IQI, expressa em percentagem da espessura do corpo de prova. Deve-se considerar que a mesma qualidade de imagem tem diferentes sensibilidades quando se utiliza diferentes tipos de IQI, como considerado na tabela II. Por exemplo, é mais fácil ver a imagem de um degrau de determinada espessura do que a de um fio de mesmo diâmetro. Por outro lado, a imagem do fio é mais visível do que a de um furo circular de iguais diâmetro e profundidade porque a visibilidade depende desses dois fatores.

Entre os vários tipos de IQI que se encontram em uso pode-se citar:

- 1 - IQI de fios, formados por uma série de fios metálicos de diâmetros crescentes, embutidos em uma capa plástica. Quando se analisa a radiografia acabada interessa-se pelo fio de menor diâmetro que está perfeitamente visível em toda a sua extensão.
- 2 - IQI em forma escalonada, constituído por placas de espessura crescente, as vezes tendo no seu centro furos com diâmetros constantes. A leitura faz-se sobre a espessura mais fina que aparece na radiografia, sem levar em conta a imagem do furo.
- 3 - IQI em forma escalonada com números de referência em cada degrau. Em cada espessura existe certa quantidade de furos formando um número característico de referência. Na leitura da radiografia interessa-se pela menor espessura cujo número de referência é visível.
- 4 - IQI em forma escalonada e com furos calibrados. Neste caso o diâmetro do furo é igual a espessura do degrau onde ele se encontra. Na leitura da radiografia o interesse é dirigido à imagem do furo de menor diâmetro que aparece nítido.
- 5 - IQI de furos calibrados em placa de espessura constante, que representa uma percentagem determinada de espessura à radiografar. A placa está provida de vários furos com diâmetros crescentes, iguais ou múltiplos da espessura da placa. Na leitura da imagem interessa o menor diâmetro do furo visível.
- 6 - IQI com sulcos sobre uma placa de espessura constante. Os sulcos podem ter largura constante e profundidade variável ou o inverso.

Esta grande variedade de IQI, para suprir especificações e normas nacionais, militares, da indústria do petróleo, naval etc justifica definir um sistema comum. Assim, o IIW, depois de apurados estudos recomenda o uso de dois tipos de IQI, a saber:

- a) IQI de fios metálicos,
- b) IQI escalonado, com furos.

A recomendação do IIW foi integralmente aceita pela International Standards Organization (ISO).

O IQI de fios metálicos recomendados pelo IIW deve possuir os diâmetros crescentes em progressão geométrica e com comprimento de 50 mm. No caso do IQI escalonado aplica-se a mesma progressão geométrica, para a espessura dos degraus e para o diâmetro dos furos. Esta progressão está especificada na tabela III.

TABELA III

**VALORES RECOMENDADOS PELO IIW PARA O DIÂMETRO DOS FIOS
OU ESPESSURAS DOS DEGRAUS DOS I.Q.I (Normas DIN 54109, de
1962 e A.F.N.O.R., N.F.A. 04 304)**

mm	polegada	mm	polegada
0,100	0,0040	1,00	0,040
0,125	0,0050	1,25	0,050
0,160	0,0065	1,60	0,065
0,200	0,0080	2,00	0,080
0,250	0,0100	2,50	0,100
0,320	0,0130	3,20	0,130
0,400	0,0160	4,00	0,160
0,500	0,0200	5,00	0,200
0,630	0,0250	6,30	0,250
0,800	0,0320	—	—

V.1 - INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM QUE SEGUEM AS NORMAS DO INTERNACIONAL INSTITUTE OF WELDING - I.I.W

O IQI de fios, de acordo com as normas DIN 54109, tem diâmetro em progressão geométrica crescente e forma três séries de indicadores, cada qual com sete (7) fios embutidos em uma capa plástica transparente ou de borracha. Cada indicador leva várias marcas, de classes diferentes e que aparecem na radiografia (figura 6).

marcas comuns: DIN 62

ISO

Marcas variáveis: Fe, Al, Cu

1, 7, 6-12, 10-16

As marcas variáveis referem-se a três tipos de indicadores sendo um para materiais fundidos e diferentes tipos de aço (classe Fe), outro para alumínio e suas ligas (classe Al) e o terceiro para materiais de cobre e suas ligas (classe Cu).

O grupo de número 1-7, 6-12, e 10-16 são os números de ordem do primeiro e último fio, respectivamente, de cada indicador. A tabela IV mostra os tipos de indicadores DIN e os diâmetros dos fios presentes em cada um.

O valor percentual da sensibilidade fica definido pela grandeza D E (Draht Erkennbarkeit) que representa a relação entre o diâmetro do fio mais fino que é visível na radiografia e a espessura do material ensaiado.

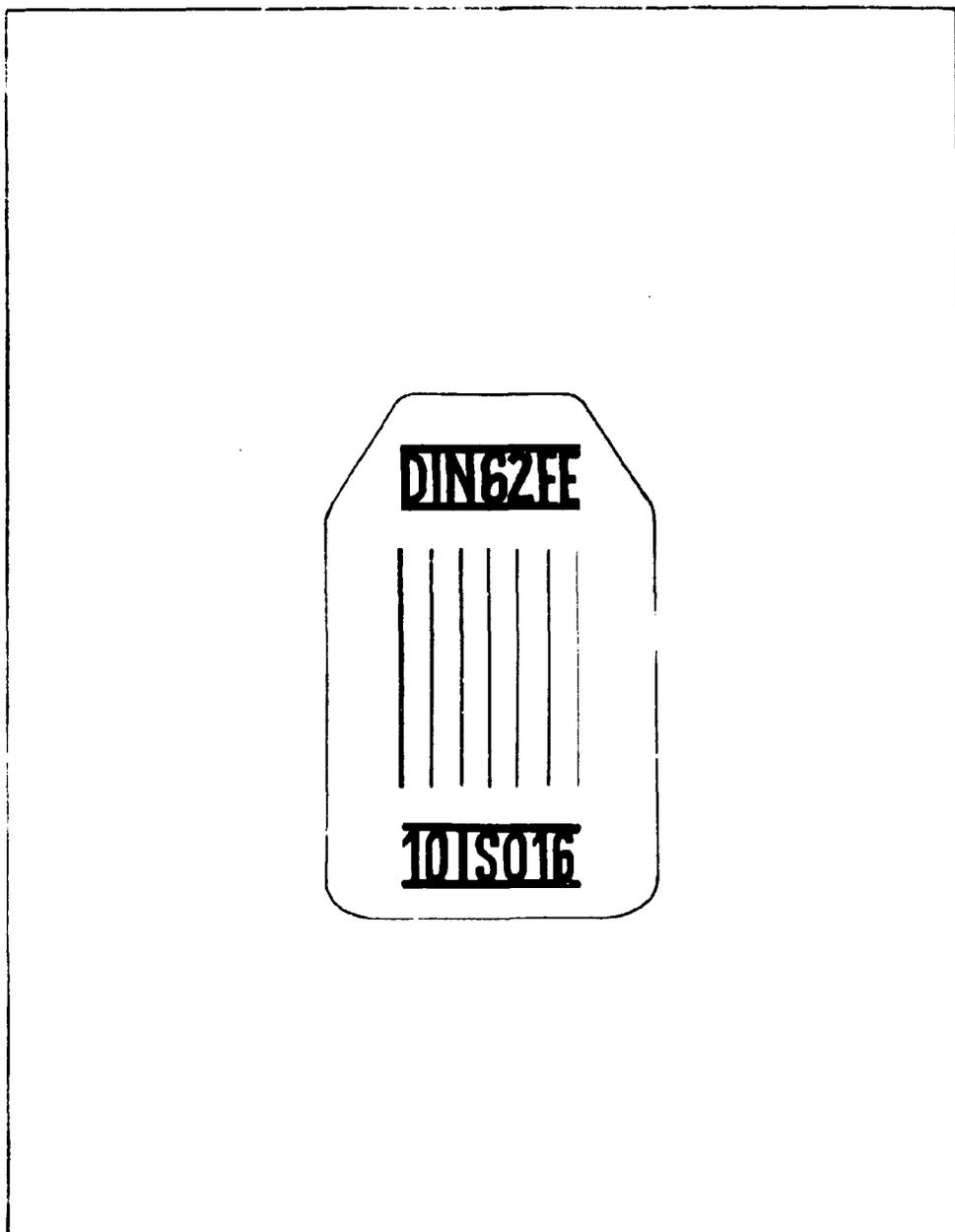


Figura 6 - Indicadores de Qualidade de Imagem que seguem as normas do International Institute of Welding - I.I.W.

$$DE = \frac{\phi \text{ do fio mais fino visível na radiografia}}{\text{espessura do material ensaiado}} \cdot 100$$

TABELA IV
INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM DAS NORMAS DIN - 54109

Fe 1/7			Fe 6/13			Fe 10/16		
NÚMERO	ϕ mm	ϕ in	NÚMERO	ϕ mm	ϕ in	NÚMERO	ϕ mm	ϕ in
1	3,2	0,130	6	1,00	0,040	10	0,40	0,0160
2	2,5	0,100	7	0,80	0,032	11	0,32	0,0120
3	2,0	0,080	8	0,63	0,025	12	0,25	0,0100
4	1,60	0,065	9	0,50	0,020	13	0,20	0,0080
5	1,25	0,050	10	0,40	0,016	14	0,16	0,0065
6	1,00	0,040	11	0,32	0,013	15	0,13	0,0050
7	0,80	0,032	12	0,25	0,010	16	0,10	0,0040

Observa-se que a qualidade de imagem será melhor a medida que o valor numérico de DE diminui. Assim, uma sensibilidade de 1,3% sobre 30 mm significa que é visível o fio de 0,4 mm de diâmetro (número de ordem 10). Analogamente se este mesmo fio apresenta-se visível na radiografia, depois de colocado sobre um corpo de prova de 45 mm, a nova sensibilidade será:

$$DE = \frac{0,4 \times 100}{45} = 0,9\%$$

A sensibilidade DE% é um valor relativo que depende da espessura do corpo de prova. Ao contrário, o "índice de qualidade de imagem B.Z" (Bildgutezahl) é um valor absoluto, independente da espessura do material radiografado. O índice de qualidade de imagem é o número de ordem do fio que aparece visível na radiografia acabada.

As normas DIN 54109 classificam as radiografias, de acordo com a sensibilidade, em duas classes ou categorias:

- categoria 1 - radiografias de alta sensibilidade
- categoria 2 - radiografias de sensibilidade normal.

Esta classificação em categorias faz-se de acordo com os valores apresentados na tabela V

No exemplo anterior, o valor 10 para o índice de qualidade de imagem representa uma radiografia de categoria 2 quando o material ensaiado possui espessura de 30 mm e categoria 1 se a espessura for de 45 mm.

Além da técnica normal de especificar a sensibilidade, como um percentual da espessura do corpo de prova, existe também o conceito de "índice de visibilidade N" proposto pelo IIW, no documento (V-139 60), "Projeto de Recomendações Concernentes ao Uso dos Indicadores de Qualidade Radiográfica".

TABELA V

CATEGORIA DAS RADIOGRAFIAS DE ACORDO COM O ÍNDICE DE QUALIDADE DE IMAGEM

CATEGORIA 1			CATEGORIA 2		
Espessura do Corpo de Prova		BZ	Espessura do Corpo de Prova		BZ
> mm	≤ mm		> mm	≤ mm	
mm	0	16	0	6	14
	6	15	6	8	13
	10	14	8	10	12
	16	13	10	16	11
	25	12	16	25	10
	32	11	25	32	9
	40	10	32	40	8
	50	9	40	60	7
	80	8	60	80	6
		7	80	150	5
			150	170	4
			170	180	3
			180	190	2
			190	200	1

Para estabelecer-se o índice de visibilidade utilizando-se IQI de fios ou escalonados determinam-se em cada radiografia os números a de fios ou furos visíveis e b , de fios ou furos cujos diâmetros sejam iguais a K% da espessura do material radiografado. Tomando-se para K os valores.

K = 5 para IQI de furos

K = 2 para IQI de fios

representa-se o índice de visibilidade pela equação

$$N = a - b$$

onde N pode assumir valores positivos, negativos ou nulo. Quanto maior for o valor de N melhor será a qualidade da imagem.

Calcula-se o índice de visibilidade, no caso do exemplo anterior como segue:

- 1) aço, 30 mm de espessura, com visibilidade do fio de 0,4 mm do IQI Fe. 6-12
 - a) - são visíveis 5 fios (0,4; 0,5; 0,63; 0,80; 1,00) daí ter-se $a = 5$;
 - b) - 2% da espessura do material corresponde a 0,6 mm. que encontra-se compreendido entre os valores 0,50 e 0,63 mm, conforme mostra a tabela IV. Tomando-se por base o diâmetro imediatamente superior, ou seja 0,63 mm, tem-se três (3) fios, com diâmetros de 0,63 mm, 0,80 mm e 1,00 mm. Assim, $b = 3$ e conseqüentemente

$$N = 5 - 3 = 2$$

- 2) aço, 45 mm de espessura, sendo visível o fio de 0,4 mm do IQI Fe 6-12
- a) - são visíveis 5 fios como no caso anterior, daí ter-se $a = 5$,
 - b) - 2% da espessura do material ensaiado é 0,90 mm que não corresponde a nenhum dos fios que há no IQI. Nesta condição considera-se o valor imediatamente superior, ou seja 1,00 mm. Assim, $b = 1$ e conseqüentemente

$$N = 5 - 1 = 4$$

Caso o diâmetro de referência encontrado para b não esteja na série de fios do IQI empregado torna-se necessário prolongar esta série e contar os fios que faltam entre o último que aparece visível na radiografia e o diâmetro de referência. Neste caso N pode assumir valores negativos.

A relação que existe entre o índice de visibilidade e a sensibilidade percentual está indicada na tabela VI. Observa-se que para um determinado valor do índice de visibilidade o IQI de fios apresenta uma sensibilidade percentual 2 ou 3 vezes menor do que o IQI de furos.

VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Caracteriza-se a qualidade da imagem radiográfica por um parâmetro do IQI, expresso em percentagem da espessura do material radiografado. Esse valor representa a sensibilidade percentual ou sensibilidade do IQI e indica uma medida convencional da qualidade técnica do ensaio. Ele demonstra apenas a condição de radiografia bem executada, não indicando nunca quais as mínimas dimensões de uma descontinuidade metálica que podem ser detectadas.

A radiografia de um mesmo material realizada em condições idênticas, mas com diferentes IQI posicionados sobre o corpo de prova proporcionará valores distintos de sensibilidade; Isto implica que na qualificação de sensibilidade de uma radiografia deve-se especificar qual o tipo de IQI que serviu de referência.

Ao se considerar a sensibilidade do IQI deve-se lembrar que os resultados são subjetivos.

Quando vários técnicos com experiências acentuada no campo radiográfico julgam determinada radiografia, nas mesmas condições de observação, geralmente existe discordância sobre o mesmo número de fios ou furos visíveis. Os diferentes observadores podem ter distintos critérios de discernibilidade, e diferentes níveis de visão que contribuem para pareceres discordantes.

Quando se especifica determinado IQI deve-se lembrar que as sensibilidades radiográficas, para qualquer espessura, correspondem a valores discretos e não a uma curva contínua.

TABELA VI

Relação entre o Índice de Visibilidade N e a Sensibilidade Percentual S

N	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
IQI - fios	2,5 - 3,2%	2,0% - 2,5%	1,6% - 2,0%	1,25% - 60%	1,0% - 1,25	0,8% - 1,0%	0,63% - 0,8%
IQI - furos	6,3% - 8,0%	50% - 6,3%	4,0% - 50%	3,2% - 4,0%	2,5% - 3,2%	2,0% - 2,5%	1,6% - 2,0%

ABSTRACT

Radiographic sensitivity is defined and its mathematical expression is derived in order to justify the use of image quality indicators (IQI) formed by wires of different diameters which represent the radiographic quality. It is demonstrated that the IQI sensitivity is not related to the minimum dimensions of the metallic discontinuities that may be detected in radiographic tests. The experimental results are in good agreement with the mathematical formulation proposed.

The radiographic quality of the finished radiograph must be analysed as function of the IQI visibility. For the same image quality, the existence of different sensitivities based on different IQI'S, is demonstrated. It is easier to visualize a stepped IQI image than a wire image of the same diameter. On the other hand, the image of a wire is more visible than that of a circular hole of the same diameter and depth, because the visibility depends on both diameter and depth.

The IQI cannot guarantee the detection of discontinuities with the same dimensions as those of the test sensitivity obtained. The detection of a discontinuity depends on its dimensions and on its orientation, relative to the bundle of incident radiation.

The percentual sensitivity of thickness is a relative value which depends on the sample thickness. On the other hand, the "image quality index", characterized by the order number of the IQI wire is an absolute value. This paper includes some illustrative examples.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - MAC MASTER, R; "Non Destructive Testing Handbook".
- 2 - RUIZ, A. R; "Inspeccion Radiográfica de las Uniones Soldadas". Ediciones Urmo, Bilbao - 9, 1971
- 3 - SANCHEZ, W; "Ensaio Não Destructivos dos Materiais Pela Técnica dos Raios X e Raios Gama", Publicação IEA Série Informações - nº 29, 1974.