



RADIOLOGIA INDUSTRIAL

Ed. Jan./ 2009

AUTOR: Ricardo Andreucci

apoio

abende

RI

RICARDO ANDREUCCI

A Radiologia Industrial

Prefácio

“Este trabalho apresenta um guia básico para programas de estudos e treinamento de pessoal em Radiologia Industrial, contendo assuntos voltados para as aplicações mais comuns e importantes deste método de Ensaio Não Destrutivo. Trata-se portanto de um material didático de interesse e consulta, para os profissionais e estudantes que se iniciam ou estejam envolvidos com a inspeção de materiais por radiografia. Por utilizar as radiações ionizantes como principal fonte de energia penetrante para a inspeção, isto pode representar risco e danos à saúde, assim recomendamos que a utilização deste método de ensaio seja acompanhado de treinamento específico em Proteção Radiológica. O autor disponibiliza um livro específico sobre o assunto com título - Curso Básico de Proteção Radiológica Industrial”

O Autor

Copyright ã

ANDREUCCI, Assessoria e Serviços Técnicos Ltda
e-mail: ricardo.andreucci@hotmail.com

*Esta publicação poderá ser obtida gratuitamente através de
download nos seguintes web sites:*

www.infosolda.com.br/andreucci
www.abende.org.br

Edição:

Jan. / 2009

Ricardo Andreucci

- Professor da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC/ SP, nas disciplinas de Controle da Qualidade do Curso de Soldagem.
 - Qualificado e Certificado pelo IBQN como Nível III nos métodos de ensaio radiográfico, partículas magnéticas ultra-som e líquidos penetrantes, conforme norma CNEN-NN 1.17
 - Membro da Comissão de Segurança e Radioproteção da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos - ABENDE.
 - Diretor Técnico da ANDREUCCI Ass. e Serv. Técnicos Ltda.
 - Consultor Técnico como Nível III de END para importantes empresas brasileiras e do exterior
 - Participante como Autor do livro "Soldagem" editado pelo SENAI / SP
 - Autor do Livro "Curso Básico de Proteção Radiológica" - ABENDE / SP - Set./ 1998
 - Autor do livro "Radiografia Industrial - Aspectos Básicos"- ABENDE/SP - Jan./1999
 - Participante como autor do Capítulo 07 3ª Ed. do Livro – Tecnologia Radiológica e Diagnóstico por Imagem, Difusão , 2007
-

Sumário

Assunto	Pág.
Introdução aos Ensaios Não Destrutivos.....	5
Princípios e Fundamentos	7
Equipamentos e fontes de radiação.....	12
Equipamentos de Raios-X	13
Aceleradores	20
Os Raios Gama	21
Equipamentos de Raios Gama	22
Equipamentos Crawler	30
Registro Radiográfico	31
Filmes Radiográficos	31
Processamento de Filmes Radiográficos.....	36
Telas Intensificadoras de Imagem	43
Radioscopia	46
Tomografia Industrial	49
Radiografia Digital	52
Parâmetros Radiográficos	60
Princípios Geométricos	60
Cálculo da Penumbra Geométrica	61
Sobreposição	61
Controle da Sensibilidade Radiográfica (IQI's)	63
Controle da Radiação Retrospalhada	69
Cálculo do Tempo de Exposição do Filme Radiográfico	70
Curvas de Exposição para Gamagrafia	71
Curvas de Exposição para Radiografia	74
Relação entre Tempo e Corrente	75
Relação entre Corrente e Distância	76
Relação entre Tempo e Distância	76
Curvas de Exposição para Aceleradores	78
Avaliação da Qualidade da Imagem	81

Assunto	Pág.
Técnicas de Exposição Radiográfica	84
Interpretação dos Resultados	88
Aparência das Descontinuidades	88
Descontinuidades Internas em Juntas Soldadas	89
	93
Critérios de Aceitação	93
Critérios para Ensaio Radiográfico de Soldas	93
Critério de Aceitação para Radiografia Total - UW-51	93
Critério de Aceitação para Radiografia "Spot" - UW-52	94
Critério de Aceitação para Qualificação de Soldadores – QW-191.....	98
Outras Aplicações da Radiologia	98
Tabelas Úteis	110
Obras Consultadas	115



Introdução

Os Ensaios Não Destrutivos

Quando pensamos em aeronaves, automóveis, metro, trens, navios, submarinos, e outras, todas estas máquinas não poderiam ter um bom desempenho não fossem a qualidade do projeto mecânico, dos materiais envolvidos, dos processos de fabricação e montagem, inspeção e manutenção.

Todo esse elevado grau de tecnologia foi desenvolvido e aplicado para um fim comum, que é assegurar e proteger a vida daqueles que dependem de alguma forma, do bom funcionamento dessas máquinas, quer sejam nas indústrias automobilísticas, petróleo e petroquímicas, geração de energia inclusive nuclear, siderúrgica, naval e aeronáutica.

Hoje no mundo moderno, a globalização nestes segmentos industriais fez aumentar o número de projetos e produtos de forma multinacional. Usinas elétricas, plantas petroquímicas, aviões, podem ser projetados em um país e construídos em outro, com equipamentos e matéria prima fornecidos pelo mundo todo. Esta revolução global tem como consequência a corrida por custos menores e pressão da concorrência.

Sendo assim, como garantir que os materiais, componentes e processos utilizados tenham a qualidade requerida ? Como garantir a isenção de defeitos que possam comprometer o desempenho das peças ? Como melhorar novos métodos e processos e testar novos materiais ?

As respostas para estas questões estão em grande parte na inspeção e consequentemente na aplicação dos Ensaios Não Destrutivos.

Um dos avanços tecnológicos mais importantes na engenharia, podem ser atribuídos aos ensaios não destrutivos. Eles investigam a sanidade dos materiais sem contudo destruí-los ou introduzir quaisquer alterações nas suas características.

Aplicados na inspeção de matéria prima, no controle de processos de fabricação e inspeção final, os ensaios não destrutivos constituem uma das ferramentas indispensáveis para o controle da qualidade dos produtos produzidos pela indústria moderna.

Quando se deseja inspecionar peças com finalidade de investigar sobre defeitos internos, a **Radiografia** e o **Ultra-som** são poderosos métodos que podem detectar com alta sensibilidade descontinuidades com poucos milímetros de extensão. Usados principalmente nas indústrias de petróleo e petroquímica, nuclear, alimentícia, farmacêutica, geração de energia para inspeção principalmente de soldas e fundidos, e ainda na indústria bélica para inspeção de explosivos, armamento e mísseis, a radiografia e o ultra-som desempenham papel importante na comprovação da qualidade da peça ou componente em conformidade com os requisitos das normas, especificações e códigos de fabricação. Usados também na qualificação de soldadores e operadores de soldagem, a radiografia e ultra-som proporcionam registros importantes para a documentação da qualidade.

Em juntas soldadas, a radiografia e o ultra-som são dois métodos frequentemente referenciados pelos Códigos de fabricação de peças ou estruturas de responsabilidade para determinação da eficiência da base de cálculo pela engenharia.

Outros ensaios não destrutivos também fazem parte das ferramentas da qualidade onde podemos citar: Partículas Magnéticas , Termografia , Emissão acústica , Correntes Parasitas , Líquido Penetrante.

Considerado como um **processo especial** pelos Sistemas da Qualidade, **NBR ISO-9001¹** e outros, os ensaios não destrutivos são aplicados segundo requisitos de projeto do produto fabricado, e não de forma aleatória ao prazer da conveniência de engenheiros e técnicos.

A radiologia industrial desempenha um papel importante e de certa forma insuperável na documentação da qualidade do produto inspecionado, pois a imagem projetada no filme radiográfico representa a "fotografia" interna da peça, o que nenhum outro ensaio não destrutivo é capaz de mostrar na área industrial.

Sendo assim, o treinamento, qualificação e certificação dos profissionais envolvidos com estes métodos é requisito importante do sistema da qualidade. Hoje no Brasil, as qualificações e certificações de pessoal para ensaios não destrutivos são efetuadas por organizações de classe como associações, ou por instituições ou fundações governamentais. A mais importante é o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação - SNQ&C gerenciado pela Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos - ABENDE, com reconhecimento pelo INMETRO e pela comunidade industrial. As certificações de pessoal são dirigidas a segmentos industriais, tais como: siderurgia, aeronáutica, calderaria, petróleo e petroquímica e outros.

Em particular, a radiografia industrial no Brasil é uma atividade que requer além da qualificação do profissional na técnica radiológica (veja norma NA-01 e DC-01 da ABENDE em www.abende.org.br) , requer também sua qualificação em radioproteção pela CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear, para atendimento da norma CNEN NN-6.04 (veja a norma em www.cnen.gov.br)

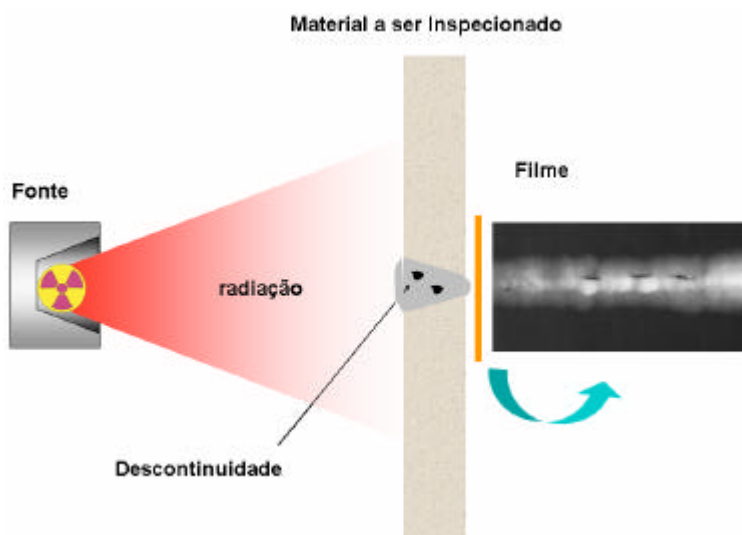
¹Processos Especiais são considerados processos em que as características da qualidade não podem ser totalmente recuperados após o serviço acabado. São exemplos de processos especiais: Soldagem, pintura, paladar, textura, e outros. A edição mais atual ISO 9001:2000 relata que a organização deve validar quaisquer processos de produção ou prestação de serviço onde o resultado não possa ser verificado por subsequente monitoramento ou medição ou após o serviço prestado. Em tais casos os técnicos devem ser qualificados.

P rincípios e Fundamentos

Descrição Genérica do Método e Aplicações

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que baseia-se na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme, ou através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detetores eletrônicos de radiação. Essa variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um meio, irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou defeito no material.

A radiografia industrial é então usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha, em outras palavras, a radiografia é um método capaz de detectar com boa sensibilidade defeitos volumétricos. Isto quer dizer que a capacidade do processo de detectar defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe, como trinca dependerá da técnica de ensaio realizado. Defeitos volumétricos como vazios e inclusões que apresentam uma espessura variável em todas direções, serão facilmente detectadas desde que não sejam muito pequenos em relação à espessura da peça.



Técnica Geral de Ensaio Radiográfico na indústria

A Natureza da Radiação Ionizante

Com a descoberta dos Raios X pelo físico W. C. Roentgen em 1895, imediatamente iniciaram-se os estudos sobre as emissões de partículas, provenientes de corpos radioativos, observando suas propriedades e interpretando os resultados.

Nesta época, destacaram-se dois cientistas, Pierre e Marie Curie, pela descoberta do polônio e o radium e ainda deve-se a eles a denominação "Radioatividade" (propriedade de emissão de radiações por diversas substâncias).

No começo do século XX, 1903, Rutherford, após profundos estudos formulou hipóteses sobre as emissões radioativas, pois convém frisar, que naquela época ainda não se conhecia o átomo e os núcleos atômicos e coube a este cientista a formulação do primeiro modelo atômico criado e que até hoje permanecem suas características.

O nome "Radiação Penetrante" se originou da propriedade de que certas formas de energia radiante possui de atravessar materiais opacos à luz visível. Podemos distinguir dois tipos de radiação penetrante usados em radiografia industrial: os Raios X e os Raios Gama. Eles se distinguem da luz visível por possuírem um comprimento de onda extremamente curto, o que lhes dá a capacidade de atravessarem materiais que absorvem ou refletem a luz visível.

Por serem de natureza semelhante à luz, os Raios X e os Raios Gama possuem uma série de propriedades em comum com a luz entre as quais podemos citar: possuem mesma velocidade de propagação (300.000 km/s), deslocam-se em linha reta, não são afetadas por campos elétricos ou magnéticos, possuem a propriedade de impressionar emulsões fotográficas.

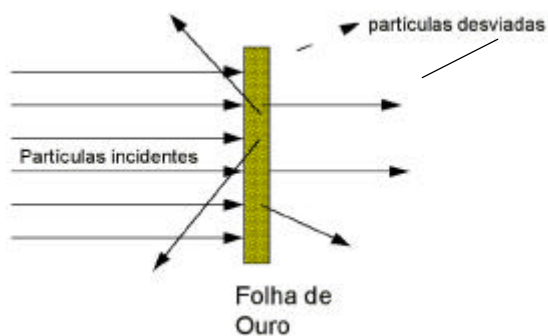
Poderíamos citar outras propriedades comuns entre as radiações penetrantes e a luz visível. Ocorre, no entanto, que vários fenômenos que observamos na luz, são muitos difíceis de serem detectados. O fenômeno de refração, por exemplo, ocorre nas radiações penetrantes, mas numa escala tão pequena que são necessários instrumentos muito sensíveis para detectá-lo. Isso explica porque a radiação penetrante não pode ser focalizada através de lentes, como acontece com a luz.

No âmbito dos ensaios não destrutivos devemos salientar seis propriedades da radiação penetrante que são de particular importância:

- deslocam-se em linha reta;
- podem atravessar materiais opacos a luz, ao fazê-lo, são parcialmente absorvidos por esses materiais;
- podem impressionar películas fotográficas, formando imagens;
- provocam o fenômeno da fluorescência ;
- provocam efeitos genéticos ;
- provocam ionizações nos gases.

Estrutura da Matéria:

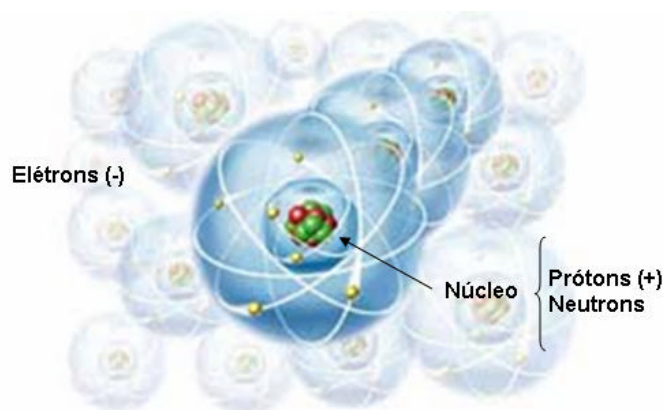
Em 1906, Ernest Rutherford realizou experiências com bombardeio de partículas alfa em finas folhas de ouro (as partículas alfa são emitidas por certos radioisótopos, ocorrendo naturalmente). Ele achava que a maioria das partículas passavam direto através da fina folha do metal em sua direção original. Contudo, algumas partículas foram desviadas.



Experiência atômica de Rutherford em 1906.

Isto levou ao desenvolvimento do modelo atômico que é aceito até hoje. O núcleo contém carga positiva do átomo e ao redor do núcleo, giram um número de elétrons.

Os elétrons ocupam níveis ou camadas de energia e o espaçamento desses níveis causam o grande tamanho do átomo em comparação com o núcleo.



Modelo atômico de Rutherford.

Os cientistas conheciam agora que o átomo consistia de um núcleo contendo um número de **prótons** e uma nuvem eletrônica com igual número de **elétrons**. Contudo eles achavam confuso, pelo fato do átomo de hélio (número atômico 2) pesar quatro vezes mais que o átomo de hidrogênio. Irregularidades no peso persistiam através da tabela periódica. Predisseram algumas teorias para o acontecido, mas a confusão terminou em 1932, quando James Chadwick, físico inglês, descobriu uma partícula chamada de **neutron**.

Essa partícula tinha uma massa igual ao do próton, mas não tinha carga. Para descrever essa nova propriedade, cientistas alegaram o número de massa, número de partículas (prótons e nêutrons no núcleo). Descrevendo o átomo, o número de massa seria escrito com um número superior no símbolo químico.

Variações e Composição dos Átomos , Radioisótopos:

Todos os elementos que contém, em seu núcleo atômico, o mesmo número de prótons, mas que possuem números diferentes de neutrons, manifestam as mesmas propriedades químicas e ocupam o mesmo lugar na classificação periódica. São elementos que, por terem o mesmo número de prótons, têm o mesmo número atômico e por terem números diferentes de neutrons têm número de massa diversos. São chamados isótopos, nome cuja etimologia indica o mesmo lugar que ocupam na classificação periódica dos elementos.

O número de isótopos conhecidos, de cada elemento, é muito variável. O Iodo, por exemplo, tem 13, o ferro e o Urânio tem 6, cada um. Os isótopos de um mesmo elemento não tem as mesmas propriedades físicas. Assim, por exemplo, o isótopo do Iodo (I-127) é estável, todos os outros são radioativos, isto é, são chamados de radioisótopos.

A partir de 1954, os radioisótopos passaram a ser produzidos em escala apreciável, nos reatores, iniciando-se a fase de produção de fontes radioativas de alta intensidade que têm um grande número de aplicações industriais.

Os trabalhos baseados no emprego dos radioisótopos tem hoje enorme extensão. As experiências multiplicaram-se em muitos setores e, não é exagero dizer que os radioisótopos têm trazido uma verdadeira revolução em todos os domínios, nos quais a experimentação desempenha papel preponderante.

Radiação e Radioatividade

Define-se "Radioatividade" como sendo a emissão espontânea de radiação por um núcleo atômico, que se encontra num estado excitado de energia. Existem três tipos diferentes de radiação, como segue:

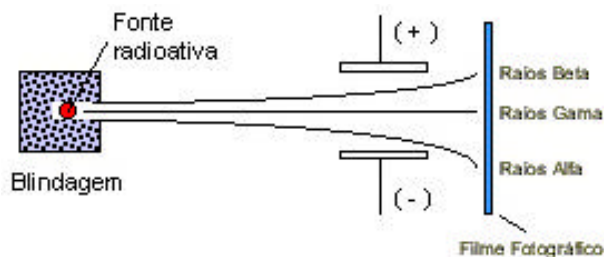
- Partículas Alfa (α)
- Partículas Beta (β)
- Raios Gama (γ)

As partículas "Alfa" são constituídas de dois neutrons e dois prótons, caracterizando um núcleo atômico de Hélio. Devido ao seu alto peso e tamanho, elas possuem pouca penetração e são facilmente absorvidas por poucos centímetros de ar.

As partículas "Beta" são constituídas por elétrons, que possuem velocidades próximas da luz, com carga elétrica negativa. Possuem um poder de penetração bastante superior às radiações Alfa, podendo ser absorvidas por alguns centímetros de acrílico ou plásticos, na sua grande maioria.

As "partículas" "Gama" são de natureza ondulatória, ao contrário das demais que tem características corpusculares. Devido a isto, adquire um alto poder de penetração nos materiais.

E possível separar os três tipos de radiação descritos através da aplicação de um campo elétrico ou magnético, numa amostra de material radioativo.



Esquema de separação das radiações alfa, beta e gama.

O poder de penetração das radiações eletromagnéticas, Raios X e Gama, são caracterizadas pelo seu comprimento de onda (ou energia) . As propriedades dos Raios X que tem importância fundamental, quando se trata de ensaios não destrutivos e são aquelas citadas anteriormente.

Outras grandezas relativas às ondas eletromagnéticas são frequência e energia. Podemos converter a energia em comprimento de onda ou em frequência. A equação que relaciona a energia com o comprimento de onda é a equação de Planck:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

onde:

E = energia (Joule).

h = constante de Planck (6.624×10^{-34} Joule x segundo).

c = velocidade da luz.

λ = comprimento de onda.

A energia das radiações emitidas tem importância fundamental no ensaio radiográfico, pois a capacidade de penetração nos materiais está associada a esta propriedade.

Exemplo de aplicação:

Qual a energia de uma radiação eletromagnética com comprimento de onda igual a 0,1 Angstrom?

Resposta:

sendo $c = 300\,000\text{ km/s} = 3 \times 10^8\text{ m/s}$ e $0,1\text{ A} = 10^{-9}\text{ m}$

$$E = 6,624 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 10^{-9} = 1,987 \times 10^{-16} \text{ Joule}$$

como $1 \text{ Joule} = 6,242 \times 10^{12} \text{ Mev}$

$E = 0,0012 \text{ Mev}$ ou $1,2 \text{ kev}$

Equipamentos e Fontes de Radiação

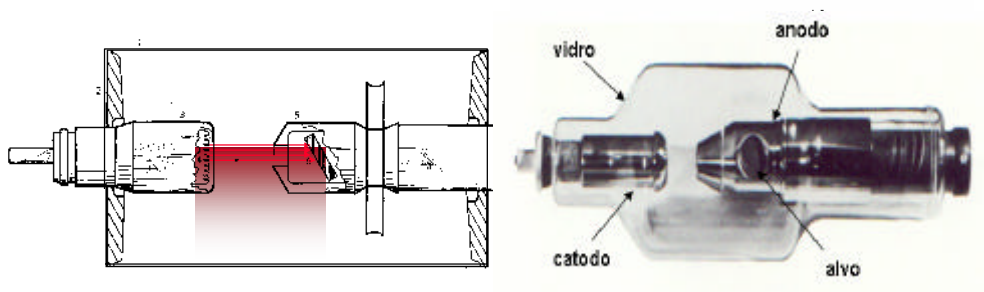
Produção das Radiações X

Os Equipamentos Geradores de Radiação – Raios X

Os Raios X, são emitidas das camadas eletrônicas dos átomos. Essas emissões não ocorrem de forma desordenada, mas possuem “padrão” de emissão denominado espectro de emissão.

Os Raios X, destinados ao uso industrial, são gerados numa ampola de vidro, denominada tubo de Coolidge, que possui duas partes distintas: o ânodo e o cátodo.

O ânodo e o cátodo são submetidos a uma tensão elétrica da ordem de milhares de Volts, sendo o polo positivo ligado ao ânodo e o negativo no cátodo. O ânodo é constituído de uma pequena parte fabricada em tungstênio, também denominado de alvo, e o cátodo de um pequeno filamento, tal qual uma lâmpada incandescente, por onde passa uma corrente elétrica da ordem de miliamperes.



Esquema de tubos convencionais de Raios X Industrial. O tubo da esquerda é um tubo metálico e o da direita de vidro.

Quando o tubo é ligado, a corrente elétrica do filamento, se aquece e passa a emitir espontaneamente elétrons que são atraídos e acelerados em direção ao alvo. Nesta interação, dos elétrons com os átomos de tungstênio, ocorre a desaceleração repentina dos elétrons, transformando a energia cinética adquirida em Raios X.

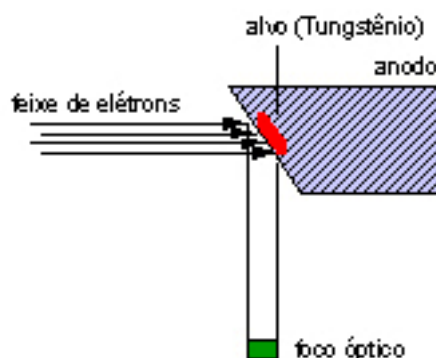
Outros fenômenos de interação dos elétrons acelerados com as camadas eletrônicas dos átomos de tungstênio, também são responsáveis pela emissão dos Raios X.

Os Raios X, são gerados nas camadas eletrônicas dos átomos por variados processos físicos. Caracteriza-se por apresentar um espectro contínuo de emissão ao contrário das radiações gama. Em outras palavras, os Raios X emitidos pelo aparelho apresentam uma variedade muito grande de comprimento de onda ou seja que a energia varia de uma forma contínua.

Os tamanhos das ampolas ou tubos de Raios X são em função da tensão máxima de operação do aparelho.

Do ponto de vista da radiografia, uma atenção especial deve ser dada ao alvo, contido no ânodo. Sua superfície é atingida pelo fluxo eletrônico, proveniente do filamento, e denomina-se foco térmico. É importante que esta superfície seja suficiente grande para evitar um superaquecimento local, que poderia deteriorar o ânodo, e permitir uma rápida transmissão do calor.

Define-se “carga focal”² como sendo a carga em Watts por milímetro quadrado (por exemplo: 200 W/mm²) na área focal. Nas áreas focais de pequenas dimensões, podem ser aplicadas uma carga relativamente mais elevada que as grandes; esta diferença é devida a diferença no modo de transmissão do calor, a partir do centro.



Corte transversal do ânodo, na ampola de Raios X

Para obter-se imagens com nitidez máxima, as dimensões do foco óptico devem ser as menores possíveis. As especificações de aparelhos geralmente mencionam as dimensões do foco óptico.

O calor que acompanha a formação de Raios X é considerável, e portanto é necessário especial atenção aos sistemas e métodos para refrigerar o ânodo. Esta refrigeração pode ser feita de diversas maneiras:

a) Refrigeração por irradiação: Neste caso o bloco de tungstênio, que compõe o alvo, se aquece e o calor se irradia pelo ânodo.

b) Refrigeração por convecção: O calor irradiado pelo ânodo, se transmite ao prolongamento de cobre, o qual está imerso em óleo ou gás, que se refrigera por convecção natural, ou por circulação.

c) Refrigeração por circulação forçada de água: A refrigeração descrita em (b), é limitada, principalmente se o aparelho for operado continuamente, exposto ao sol. Neste caso, a circulação de água por uma serpentina interna à unidade geradora, é eficaz, permitindo o uso do aparelho por longos períodos de uso.

Unidade Geradora, Painel de Comando

Os equipamentos de Raios X industriais se dividem geralmente em dois componentes: o painel de controle e o cabeçote, ou unidade geradora.

O painel de controle consiste em uma caixa onde estão alojados todos os controles, indicadores, chaves e medidores, além de conter todo o equipamento do circuito gerador de alta voltagem. E através do painel de controle que se fazem os ajustes de voltagem e amperagem, além de comando de acionamento do aparelho.

No cabeçote está alojada a ampola e os dispositivos de refrigeração. A conexão entre o painel de controle e o cabeçote se faz através de cabos especiais de alta tensão.

As principais características de um equipamento de Raios X são:

- a - tensão e corrente elétrica máxima;
- b - tamanho do ponto focal e tipo de feixe de radiação;
- c - peso e tamanho;

Esses dados determinam a capacidade de operação do equipamento, pois estão diretamente ligados ao que o equipamento pode ou não fazer. Isso se deve ao fato dessas grandezas determinarem as características da radiação gerada no equipamento. A voltagem se refere à diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo e é expressa em quilovolts (kV). A corrente elétrica do tubo é expressa em miliampères (mA).

Outro dado importante se refere à forma geométrica do ânodo no tubo. Quando em forma plana, e angulada, propicia um feixe de radiação direcional, e quando em forma de cone, propicia um feixe de radiação panorâmico, isto é, irradiação a 360 graus, com abertura determinada.

Os equipamentos considerados portáteis, com voltagens até 400 kV, possuem peso em torno de 40 a 80 kg, dependendo do modelo. Os modelos de tubos refrigerados a gás são mais leves ao contrário dos refrigerados a óleo.



Raios X industrial, de até 300 kV
(CONFAB)



Inspeção radiográfica de soldas em tubos

Energia Máxima dos Raios X e Rendimento

Duas grandezas são geralmente usadas para descrever um determinado feixe de Raios X: a qualidade e a intensidade de radiação.

Sabemos que os Raios X são gerados quando elétrons em alta velocidade são desacelerados no material do alvo. Essa desaceleração se faz por meio de colisão dos elétrons com o material do alvo. O caso mais simples ocorre quando um elétron se choca diretamente com o núcleo de um átomo do alvo. A energia adquirida pelo elétron, no campo elétrico entre o cátodo e o ânodo será dada pela relação seguinte:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot V \quad (\text{eq.1})$$

onde: V = diferença de potencial aplicada entre o cátodo e o ânodo.

m = massa do elétron

v = velocidade do elétron quando atinge o alvo (ânodo)

e = carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ C

Por outro lado a energia pode ser escrita na forma : $E_{\text{max}} = h \times f_{\text{max}}$ sendo $f_{\text{max}} = c / \lambda_{\text{min}}$

onde: h = é a constante de Planck = $6,62 \times 10^{-34}$ J.s

c = velocidade da luz = 3×10^8 m/s

Portanto podemos reescrever a eq.(1) acima na forma:

$$\frac{h \times c}{\lambda_{\min}} = e \times V \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\min} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \text{ m}}{1,6 \times 10^{-19} \times V}$$

$$\lambda_{\min} = 1,24125 \times 10^6 \text{ m} / V \quad \text{sendo } 1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$$

Portanto quando um elétron se choca com o núcleo de um átomo do alvo e transforma toda a sua energia em radiação X, podemos determinar o comprimento de onda mínimo da radiação gerada .

$$\lambda_{\min} = \frac{12.412,5}{V} \text{ Angstroms} \quad , \quad V = \text{diferença de potencial aplicada em Volts.}$$

O comprimento de onda encontrado é chamado de comprimento de onda mínimo, (λ_{\min}) pois representa a onda de maior energia que pode ser criada. Quanto menor o comprimento de onda mais penetrante serão os Raios X gerados. Assim como regra geral, para peças finas devemos utilizar maior comprimento de onda (menor energia) do que para peças com grande espessura.

Assim, para uma tensão máxima de 60 kV, o comprimento de onda mínimo será de 0,2 Angstrom; e para 120 kV será de 0,1 Angstrom

Nota-se que esse comprimento de onda depende da voltagem aplicada ao tubo. Assim, quando aumentamos a voltagem no tubo, estamos criando radiação com o menor comprimento de onda, ou seja, radiação de maior energia.

Apenas uma parcela muito pequena dos elétrons que atingem o alvo troca toda a sua energia através do choque com o núcleo. A maior parte dos elétrons incidentes choca-se com outros elétrons orbitais, transferindo-lhes parte de sua energia. Portanto, quando esses elétrons chegam a se chocar contra o núcleo de um átomo, já perderam parte de sua energia, indo gerar, portanto, Raios X de maior comprimento de onda, ou seja, de menor energia.

Dessa forma, os Raios X emitidos por um determinado aparelho apresentam uma grande variedade de comprimento de onda, a partir do comprimento de onda mínimo.

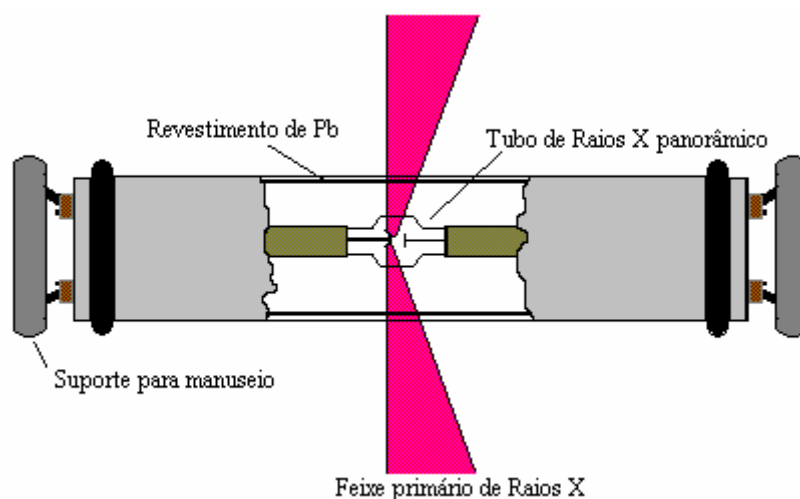
O conceito de qualidade de radiação está ligado à energia do feixe de Raios X. Quando aumentamos a voltagem do aparelho, aumentamos a energia do feixe de radiação gerado, estamos aumentando a qualidade da radiação, com conseqüente aumento do poder de penetração da mesma.

Os Raios X de alta energia, geralmente produzidos com voltagem superiores a 120 kV, são também chamados de raios “duros”. Os Raios X gerados com tensão inferiores a 50 kV são chamados Raios X “moles”.

O conceito de intensidade de radiação se refere à “quantidade” de Raios X produzidos, ou, de uma forma mais correta ao número de “fótons” produzidos.

Quando aumentamos a corrente do filamento fazemos com que ele se aqueça mais, liberando um número maior de elétrons. Isso fará com que ocorra um aumento na intensidade da radiação gerada, sem implicar em aumento na qualidade dessa mesma radiação. Em outras palavras, nós conseguimos aumentar a intensidade sem aumentar a energia do feixe de radiação.

De uma forma prática podemos dizer que a qualidade da radiação (energia) se relaciona com a capacidade de penetração nos materiais, enquanto que a intensidade está intimamente ligada com o tempo de exposição.

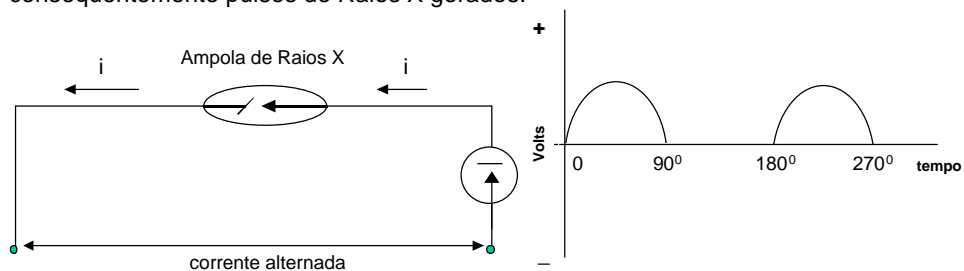


Equipamentos gerador de radiação tipo panorâmico

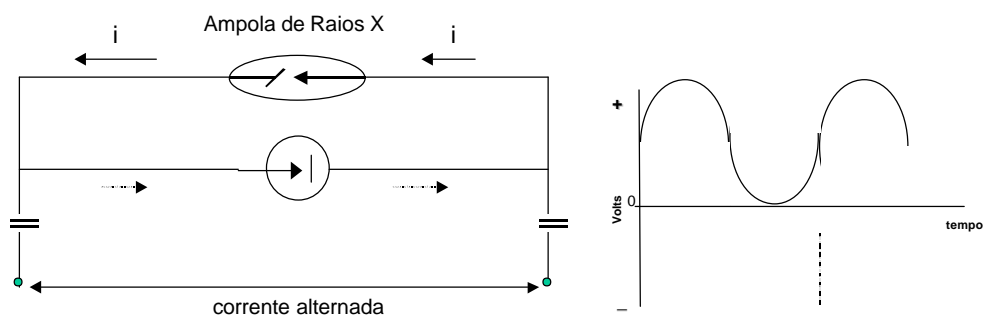
Circuitos de Alta Tensão do Tubo de Raios X

A ampola de Raios X pode estar ligada em circuitos elétricos de alta tensão de formas diferentes que desempenham rendimentos diferentes, assim como também uma taxa de exposição diferente, dependendo do tipo do circuito elétrico do sistema. A seguir mostramos alguns circuitos elétricos que podem ser utilizados para a geração de Raios X na ampola.

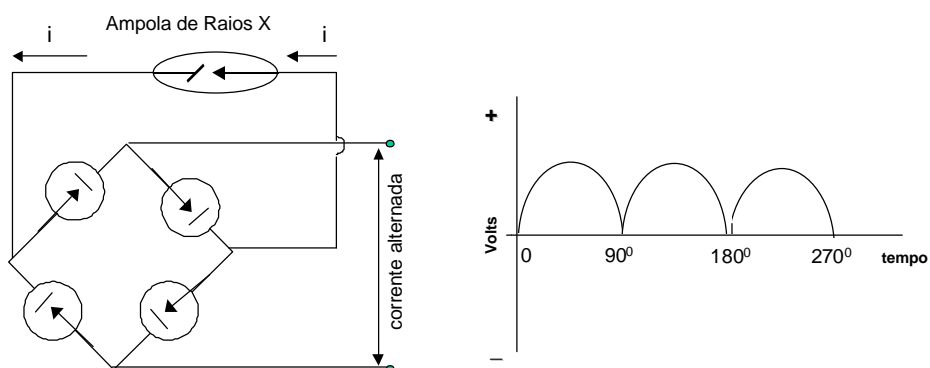
O circuito elétrico abaixo contém um diodo que permite a passagem da corrente na ampola de raios X em somente num sentido propiciando pulsos de corrente na ampola e consequentemente pulsos de Raios X gerados.



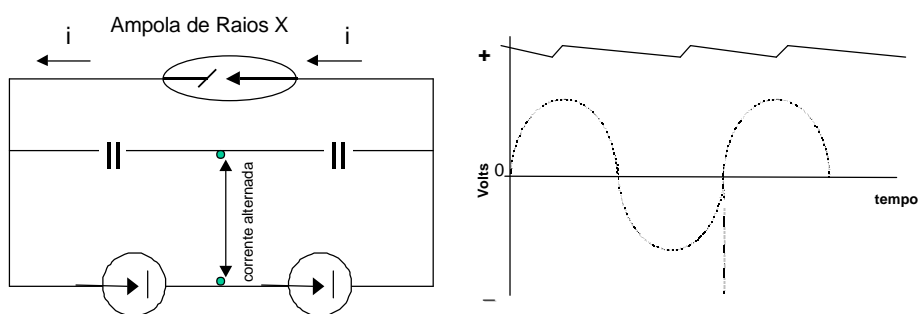
O circuito abaixo é um sistema que permite elevar a tensão na ampola de Raios X porém com oscilação. Este circuito elétrico é denominado Circuito Villard



O circuito abaixo é um retificador de corrente alternada denominado Circuito Graetz, que permite a passagem de corrente na ampola de Raios X de forma constante porém oscilando entre máximos e mínimos.



O circuito elétrico abaixo denominado Circuito Greinacher é um sistema que permite a passagem de corrente elétrica na ampola de Raios X quase que contínuo, com uma tensão de operação maior, também conhecido como **Potencial Constante**.



Circuito Greinacher

O Gráfico abaixo permite estimar as faixas de espessuras e tensões máximas, para vários materiais diferentes, onde o Raios X é aplicável.

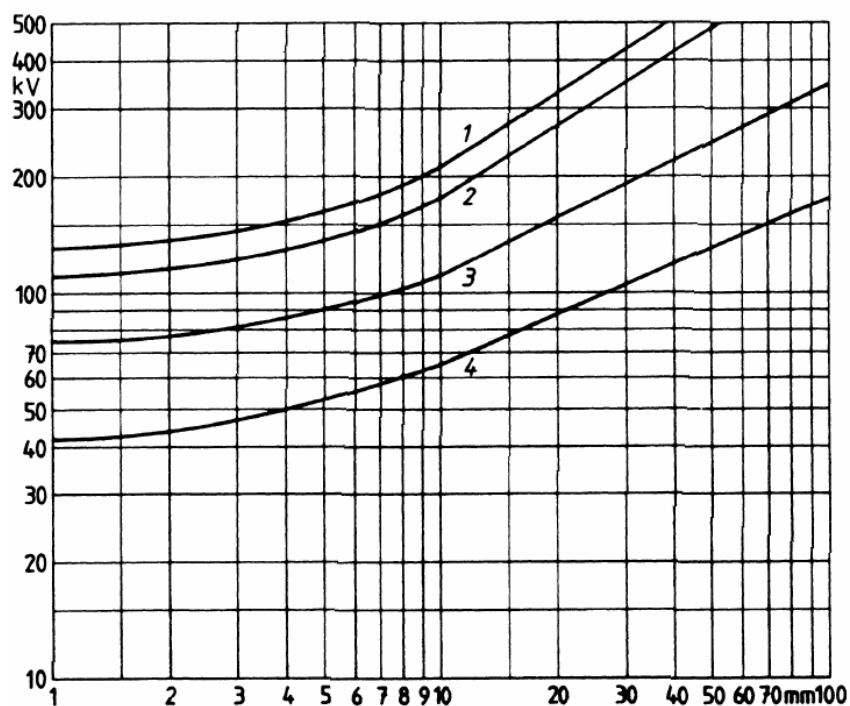


Gráfico indicando os limites de aplicação da tensão dos Raios X em função da espessura de material: (1) cobre, (2) aço, (3) titânio e (4) alumínio (extraído da norma EN-1435)

Acessórios do Equipamento gerador de Radiação (Raios X)

Cabos de energia:

O aparelho gerador de radiação é composto pela mesa de comando e unidade geradora, são ligadas entre si através do cabo de energia. A distância entre a unidade geradora e a mesa de comando deve ser tal que o operador esteja protegido no momento da operação dos controles, segundo as normas básicas de segurança. Para tanto os fabricantes de aparelhos de Raios X fornecem cabos de ligação com comprimento de 20 a 30 metros dependendo da potência máxima do tubo gerador.

Blindagem de Proteção :

O início da operação do aparelho deve ser feita com aquecimento lento do tubo de Raios X, conforme as recomendações do fabricante. Neste processo o operador deve utilizar as cintas ou blindagens especiais que são colocadas na região de saída da radiação, sobre a carcaça da unidade geradora. Este acessório fornecido pelo fabricante permite maior segurança durante o procedimento de aquecimento do aparelho.



A foto ao lado representa uma unidade de comando de um aparelho de Raios X industrial moderno. O painel, digital, resume uma série de informações técnicas sobre a exposição, tais como distância fonte-filme, tensão, corrente, tempo de exposição. As informações no display poderá ser memorizada e recuperada quando necessário.

Foto extraída do catálogo da Seifert

Aceleradores Lineares

O aceleradores lineares são aparelhos similares aos aparelhos geradores de radiação X convencionais com a diferença que os elétrons são acelerados por etapas por campos magnéticos sequenciais e por meio de uma onda elétrica de alta frequência, adquirindo altas velocidades ao longo de um tubo retilíneo. Os elétrons ao se chocarem com o alvo, transformam a energia cinética adquirida em calor e Raios X com altas energias cujo valor dependerá da aplicação. Para uso industrial em geral são usados aparelhos capazes de gerar Raios X com energia máxima de 4 Mev.

Os Betatrons , pouco usados na indústria, são considerados como transformadores de alta tensão o que consiste na aceleração dos elétrons de forma circular por mudança do campo magnético primário, adquirindo assim altas velocidades e consequentemente a transformação da energia cinética em Raios X, após o impacto destes com o alvo. Este processo podem gerar energias de 10 a 30 Mev.

Os aceleradores lineares e os betatrons são aparelhos destinados a inspeção de componentes com espessuras acima de 100 mm de aço.

As vantagens do uso desses equipamentos de grande porte, são:

- foco de dimensões reduzidas (menor que 2 mm)
- tempo de exposição reduzido
- maior rendimento na conversão em Raios X



Acelerador linear industrial, para radiografias de peças com espessuras acima de 100 mm de aço. Projetado para produzir um feixe de radiação de 4 Mev, com ponto focal bastante reduzido de 2 mm, produz uma taxa de dose de 2,5 Gy/min a 1 m operando com 2 Mev, e 0,25 Gy/min com 1 Mev.. Produz filmes com alta qualidade, mesmo em altas espessuras.

Foto e dados extraída do catálogo da VARIAN

Estes equipamentos não são portáteis e necessitam de instalação adequada, tanto do ponto de vista de movimentação do aparelho como das espessuras das paredes de concreto requeridas, que podem alcançar cerca de 1,2 metros.



Fotos de um acelerador linear LINAC - Mitsubishi, usado para radiografia industrial de peças com espessura de 20 a 300 mm de aço.

(Foto cedida pela CBC Indústrias Mecânicas – São Paulo)

Os Raios Gama

Com o desenvolvimento dos reatores nucleares, foi possível a produção artificial de isótopos radioativos através de reações nucleares de ativação.

O fenômeno de ativação, ocorre quando elementos naturais são colocados junto ao núcleo de um reator e, portanto, irradiados por neutrons térmicos, que atingem o núcleo do átomo, penetrando nele. Isto cria uma quebra de equilíbrio energético no núcleo, e ao mesmo tempo muda sua massa atômica, caracterizando assim o isótopo. O estabelecimento do equilíbrio energético do núcleo do átomo, é feito pela liberação de energia na forma de Raios gama.

Um átomo que submetido ao processo de ativação, e portanto seu núcleo se encontra num estado excitado de energia passa a emitir radiação. É fácil ver, portanto, que o número de átomos capazes de emitir radiação, diminui gradualmente com o decorrer do tempo. A esse fenômeno chamamos de Decaimento Radioativo.

Atividade de uma Fonte Radioativa:

A atividade de um radioisótopo é caracterizada pelo número desintegrações que ocorrem em um certo intervalo de tempo. Como a atividade apresenta uma proporcionalidade com o número de átomos excitados presentes no elemento radioativo, podemos expressa-la através de uma fórmula semelhante à do Decaimento Radioativo, uma vez que $A = \lambda \cdot N$, ou seja:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

onde:

A_0 = atividade inicial do elemento radioativo.

A = atividade do elemento radioativo após transcorrido um certo intervalo de tempo.

λ = constante de desintegração.

t = tempo transcorrido.

Como demonstrado no Decaimento Radioativo, a atividade de um certo elemento diminui progressivamente com o passar do tempo, porém nunca se torna igual a zero.

A unidade padrão de atividade é o **Becquerel**, que é definida como sendo a quantidade de qualquer material radioativo que sofre uma desintegração por segundo.

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps.} & 1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ dps.} \\ 1 \text{ kBq} = 10^3 \text{ dps.} & 1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ dps.} \end{array}$$

$$\text{unidade antiga : } 1 \text{ Curie} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps. ou}$$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq ou } 37 \text{ GBq.}$$

Meia Vida

Quando produzimos uma fonte radioativa, colocamos em estado excitado, um certo número "No" de átomos na fonte. Vimos através da Lei do Decaimento Radioativo que esse número de átomos excitado diminui com o passar do tempo, segundo as características do elemento radioativo.

Portanto, após passado um certo intervalo de tempo, podemos ter no material radioativo exatamente a metade do número inicial de átomos excitados.

A esse intervalo de tempo, denominamos Meia - Vida do elemento radioativo. Como a taxa em que os átomos se desintegram é diferente de um elemento para outro elemento a Meia - Vida também será uma característica de cada elemento.

A Meia - Vida é representada pelo símbolo "T_{1/2}" e pode ser determinada pela seguinte :

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{onde } T_{1/2} = \text{meia-vida do elemento.}$$

λ = constante de desintegração radioativa

Nota: Não confundir com vida-média que é um parâmetro estatístico e vale 1/ λ .

Equipamentos de Raios Gama

As fontes usadas em gamagrafia (radiografia com raios gama), requerem cuidados especiais de segurança pois, uma vez ativadas, emitem radiação, constantemente.

Deste modo, é necessário um equipamento que forneça uma blindagem, contra as radiações emitidas da fonte quando a mesma não está sendo usada. De mesma forma é necessário dotar essa blindagem de um sistema que permita retirar a fonte de seu interior, para que a radiografia seja feita. Esse equipamento denomina-se Irradiador.

Os irradiadores compõe-se, basicamente, de três componentes fundamentais: Uma blindagem, uma fonte radioativa e um dispositivo para expor a fonte.

As blindagens podem ser construídas com diversos tipos de materiais. Geralmente são construídos com a blindagem, feita com um elemento (chumbo ou urânio exaurido), sendo contida dentro de um recipiente externo de aço, que tem a finalidade de proteger a blindagem contra choques mecânicos.

Uma característica importante dos irradiadores, que diz respeito à blindagem, é a sua capacidade. Como sabemos, as fontes de radiação podem ser fornecidas com diversas atividades e cada elemento radioativo possui uma energia de radiação própria. Assim cada blindagem é dimensionada para conter um elemento radioativo específico, com uma certa atividade máxima determinada.

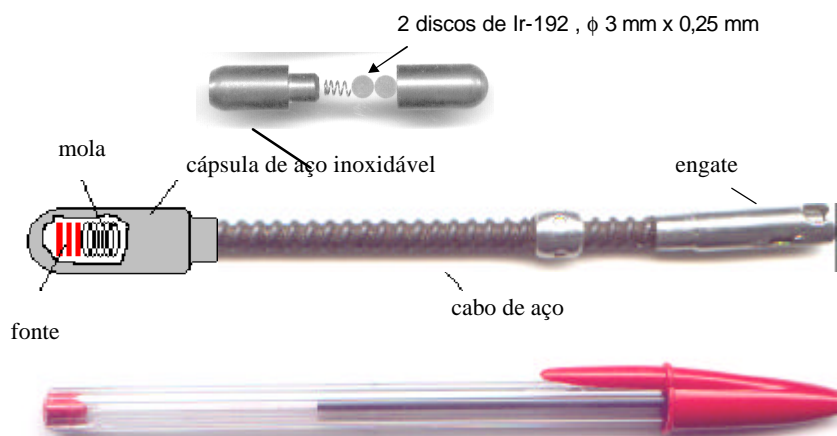
Portanto, é sempre desaconselhável usar um irradiador projetado para um determinado radioisótopo, com fontes radioativas de elementos diferentes e com outras atividades.

Características Físicas e Tipo de Fontes Gama:

As fontes radioativas para uso industrial, são encapsuladas em material austenítico, de maneira tal que não há dispersão ou fuga do material radioativo para o exterior.

Um dispositivo de contenção, transporte e fixação por meio do qual a cápsula que contém a fonte selada, está solidamente fixada em uma ponta de um cabo de aço flexível, e na outra ponta um engate, que permite o uso e manipulação da fonte, é denominado de “porta fonte”.

Devido a uma grande variedade de fabricantes e fornecedores existem diversos tipos de engates de porta-fontes.



Características das fontes seladas radioativas industriais comparadas com uma caneta BIC.

Embora apenas poucas fontes radiativas seladas sejam atualmente utilizadas pela indústria moderna, daremos a seguir as principais que podem ser utilizadas assim como as suas características físico-químicas.

(a) Cobalto - 60 (^{60}Co , $Z=27$)

O Cobalto-60 é obtido através do bombardeamento por nêutrons do isótopo estável Co-59. Suas principais características são:

- Meia - Vida = 5,24 anos
- Energia da Radiação = 1,17 e 1,33 MeV
- Faixa de utilização mais efetiva = 60 a 150 mm de aço
- Fator Gama (Γ) = $9,06 \mu\text{C/kg.h} / \text{GBq a } 1 \text{ m}$ ou $1,35 \text{ R/h} \cdot \text{Ci a } 1 \text{ m}$ ou $0,351 \text{ mSv/h.GBq a } 1 \text{ m}$

Esses limites dependem das especificações técnicas da peça a ser examinada e das condições da inspeção.

(b) Iridio - 192 (^{192}Ir , Z=77)

O Iridio-192 é obtido a partir do bombardeamento com nêutrons do isótopo estável Ir-191. Suas principais características são:

- Meia - Vida = 74,4 dias
- Energia da Radiação = 0,137 a 0,65 MeV
- Faixa de utilização mais efetiva = 10 a 80 mm de aço
- Fator Gama (Γ) = 3,48 $\mu\text{C/kg.h}$ / GBq a 1 m ou 0,50 R/h.Ci a 1m ou 0,13 mSv/h . GBq a 1m

(c) Túlio -170 (^{170}Tm , Z=69)

O Túlio-170 é obtido com o bombardeamento por nêutrons do isótopo estável, Túlio - 169. Como esse material é extremamente difícil de produzir, o material é geralmente manuseado sob a forma de óxido. Suas principais características são:

- Energia de Radiação: 0, 084 e 0,54 MeV. (O espectro do Túlio possui também radiação de Bremsstrahlung, que é a radiação liberada pelo freamento dos elétrons em forma de partículas beta).
- Meia - Vida = 127 dias
- Faixa de utilização mais efetiva = 1 a 10 mm de aço
- Fator Gama (Γ) = 0,017 $\mu\text{C/kg.h}$ / GBq a 1 m ou 0,0025 R/h.Ci a 1m ou 0,0007 mSv/h .GBq a 1m

(d) Césio - 137 (^{137}Cs , Z=55)

O Césio-137 é um dos produtos da fissão do Urânio-235. Este é extraído através de processos químicos que o separam do Urânio combustível e dos outros produtos de fissão. Suas principais características são:

- Meia - Vida = 33 anos
- Energia de Radiação = 0,66 MeV
- Faixa de utilização mais efetiva = 20 a 80 mm de aço
- Fator Gama (Γ) = 2,30 $\mu\text{C/kg.h}$ / GBq a 1 m ou 0,33 R/h.Ci a 1m ou 0,081 mSv/h .GBq a 1m

É uma fonte de radiação quase sem utilidade no momento, em razão das dificuldades de obtenção e da má qualidade do filme radiográfico

(e) Selênio - 75 (^{75}Se)

- Meia-vida = 119,78 dias
- Energia das Radiações = de 0,006 a 0,405 MeV
- Faixa de utilização mais efetiva = 4 a 30 mm de aço
- Fator Gama (Γ) = 1,39 $\mu\text{C/kg.h}$ / GBq a 1 m ou 0,28 R/h.Ci a 1m

É um radioisótopo de uso recente na indústria, proporcionando uma qualidade muito boa de imagem, assemelhando-se à qualidade dos Raios-X



Irradiador gama específico para fontes radiativas de Selênio-75 (Se-75)

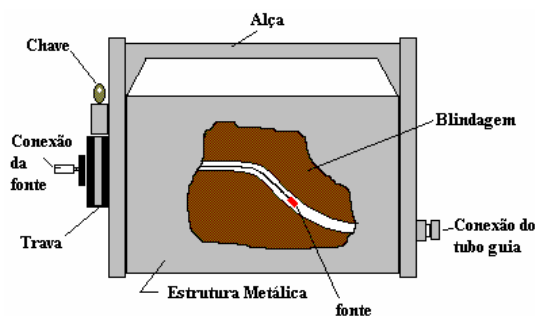
Foto extraída do catálogo da Sauerwein

Características Físicas dos Irradiadores Gama:

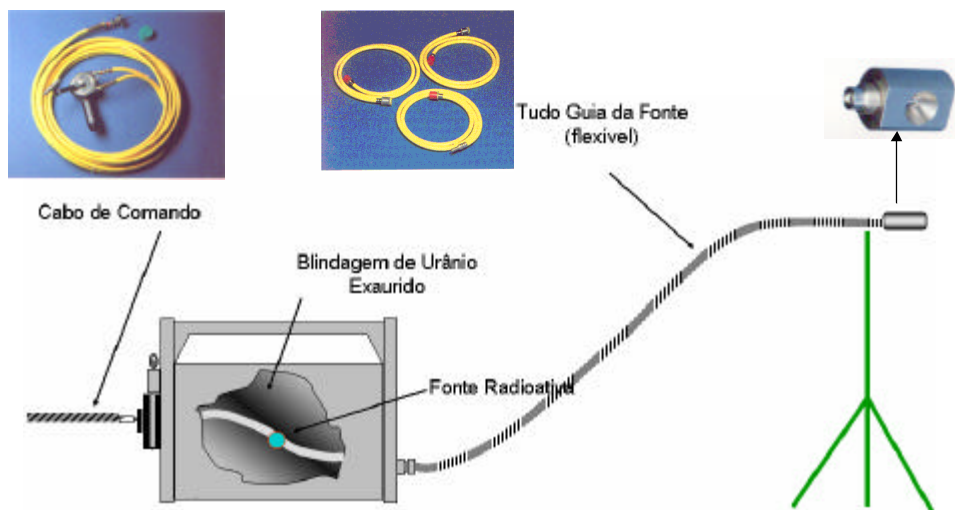
Os irradiadores gama são equipamentos dotados de partes mecânicas que permitem expor com segurança a fonte radioativa. A principal parte do irradiador é a blindagem interna, que permite proteção ao operador a níveis aceitáveis para o trabalho, porém com risco de exposição radiológica se armazenado em locais não adequados ou protegidos.

O que mais diferencia um tipo de irradiador de outro são os dispositivos usados para se expor a fonte. Esses dispositivos podem ser mecânicos, com acionamento manual ou elétrico, ou pneumático. A única característica que apresentam em comum é o fato de permitirem ao operador trabalhar sempre a uma distância segura da fonte, sem se expor ao feixe direto de radiação.

Os irradiadores gama são construídos através de rígidos controles e testes estabelecidos por normas internacionais, pois o mesmo deve suportar choques mecânicos, incêndio e inundação sem que a sua estrutura e blindagem sofram rupturas capazes de deixar vazar radiação em qualquer ponto mais do que os máximos exigidos.



Aparelho para gamagrafia industrial, projetado para operação com capacidade máxima de 100 Ci de Ir-192. O transito interno da fonte no interior da blindagem é feita no canal em forma de "S "



Esquema do Equipamento para Gamagrafia Industrial



Aparelho para Gamagrafia usando fonte radioativa de Cobalto-60 com atividade máxima de 30 Curies , pesando 122 kg, projetado com tipo de canal reto.

Foto extraída do catálogo da Sauerwein



Aparelho de gamagrafia industrial projetado para operação com capacidade máxima de 130 Ci de Ir-192. O canal interno de trânsito da fonte é do tipo de canal reto. Peso 30 kg

EXEMPLO DE UMA TABELA DE DECAIMENTO RADIOATIVO PARA
UMA FONTE DE Ir-192 INDUSTRIAL PRODUZIDA NO IPEN/SP

IPEN-CNEN/SP

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

TABELA DE DECAIMENTO PARA FONTE DE Ir¹⁹²

USUARIO :
Nº FONTE: IrS 3402 (X-54) GAMMAT LOTE 111 CAN/IPEN
UNIDADE : C1

DATA	DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB
25/05/2000							
28/05/2000	122.53	121.39	120.27	119.15	126.00	124.83	123.67
04/06/2000	114.79	113.73	112.68	111.63	118.05	116.95	115.87
11/06/2000	107.35	106.35	105.36	104.38	110.60	109.57	108.55
18/06/2000	100.76	99.82	98.90	97.98	103.61	102.65	101.70
25/06/2000	94.40	93.52	92.66	91.80	97.07	96.17	95.28
02/07/2000	88.44	87.62	86.81	86.00	90.55	89.63	88.72
09/07/2000	82.86	82.09	81.33	80.58	84.02	83.09	82.17
16/07/2000	77.63	76.91	76.20	75.49	77.49	76.56	75.65
23/07/2000	72.73	72.06	71.40	70.72	70.07	69.14	68.22
30/07/2000	68.18	67.56	66.95	66.34	65.72	64.79	63.87
06/08/2000	63.98	63.41	62.84	62.27	61.69	60.76	59.84
13/08/2000	60.12	59.59	59.06	58.53	57.95	57.02	56.10
20/08/2000	56.60	56.11	55.62	55.13	54.55	53.62	52.70
27/08/2000	53.42	52.97	52.52	52.07	51.49	50.56	49.64
03/09/2000	50.58	50.17	49.76	49.35	48.77	47.84	46.92
10/09/2000	48.08	47.70	47.32	46.94	46.36	45.43	44.51
17/09/2000	45.92	45.57	45.22	44.87	44.29	43.36	42.44
24/09/2000	44.08	43.76	43.44	43.12	42.54	41.61	40.69
01/10/2000	42.55	42.26	41.96	41.67	41.09	40.16	39.24
08/10/2000	41.32	41.05	40.77	40.49	39.91	38.98	38.06
15/10/2000	40.38	40.13	39.87	39.60	39.02	38.09	37.17
22/10/2000	39.71	39.48	39.24	38.99	38.41	37.48	36.56
29/10/2000	39.29	39.07	38.84	38.60	38.02	37.09	36.17
05/11/2000	39.05	38.84	38.62	38.39	37.81	36.88	35.96
12/11/2000	39.00	38.81	38.62	38.42	37.84	36.91	35.99
19/11/2000	39.07	38.89	38.71	38.52	37.94	37.01	36.09
26/11/2000	39.17	38.99	38.81	38.62	38.04	37.11	36.19
03/12/2000	39.30	39.14	38.98	38.81	38.23	37.30	36.38
10/12/2000	39.45	39.30	39.15	38.99	38.41	37.48	36.56
17/12/2000	39.62	39.48	39.34	39.20	38.62	37.69	36.77
24/12/2000	39.81	39.68	39.55	39.42	38.84	37.91	36.99
31/12/2000	40.02	39.90	39.78	39.66	39.08	38.15	37.23
07/01/2001	40.25	40.14	40.03	39.92	39.34	38.41	37.49
14/01/2001	40.50	40.40	40.30	40.20	39.62	38.69	37.77
21/01/2001	40.77	40.68	40.59	40.50	39.92	38.99	38.07
28/01/2001	41.07	40.99	40.91	40.83	40.25	39.32	38.40
04/02/2001	41.39	41.33	41.26	41.19	40.61	39.68	38.76
11/02/2001	41.74	41.69	41.63	41.57	40.98	40.06	39.14
18/02/2001	42.11	42.07	42.02	41.97	41.39	40.47	39.55
25/02/2001	42.51	42.48	42.44	42.40	41.81	40.89	39.97
03/03/2001	42.93	42.91	42.88	42.85	42.23	41.31	40.39
10/03/2001	43.38	43.36	43.34	43.32	42.71	41.79	40.87
17/03/2001	43.85	43.84	43.83	43.82	43.21	42.29	41.37
24/03/2001	44.34	44.34	44.34	44.34	43.73	42.81	41.89
31/03/2001	44.85	44.86	44.86	44.86	44.25	43.33	42.41
07/04/2001	45.38	45.40	45.41	45.42	44.81	43.89	42.97
14/04/2001	45.93	45.96	45.98	45.99	45.39	44.47	43.55
21/04/2001	46.50	46.54	46.57	46.60	46.00	45.08	44.16
28/04/2001	47.09	47.14	47.18	47.22	46.62	45.70	44.78
05/05/2001	47.70	47.76	47.81	47.86	47.27	46.35	45.43
12/05/2001	48.33	48.40	48.47	48.54	47.95	47.03	46.11
19/05/2001	48.98	49.06	49.14	49.22	48.63	47.71	46.79
26/05/2001	49.65	49.74	49.83	49.92	49.33	48.41	47.49
02/06/2001	50.34	50.44	50.54	50.64	50.05	49.13	48.21
09/06/2001	51.05	51.16	51.27	51.38	50.79	49.87	48.95
16/06/2001	51.78	51.90	52.02	52.14	51.55	50.63	49.71
23/06/2001	52.53	52.66	52.79	52.92	52.33	51.41	50.49
30/06/2001	53.30	53.44	53.58	53.72	53.13	52.21	51.29
07/07/2001	54.09	54.24	54.39	54.54	53.95	53.03	52.11
14/07/2001	54.90	55.06	55.22	55.38	54.79	53.87	52.95
21/07/2001	55.73	55.90	56.07	56.24	55.65	54.73	53.81
28/07/2001	56.58	56.76	56.94	57.12	56.53	55.61	54.69
04/08/2001	57.45	57.64	57.83	58.02	57.43	56.51	55.59
11/08/2001	58.34	58.54	58.74	58.94	58.35	57.43	56.51
18/08/2001	59.25	59.46	59.67	59.88	59.29	58.37	57.45
25/08/2001	60.18	60.40	60.62	60.84	60.25	59.33	58.41
01/09/2001	61.13	61.36	61.59	61.82	61.23	60.31	59.39
08/09/2001	62.10	62.34	62.58	62.82	62.23	61.31	60.39
15/09/2001	63.09	63.34	63.59	63.84	63.25	62.33	61.41
22/09/2001	64.10	64.36	64.62	64.88	64.29	63.37	62.45
29/09/2001	65.13	65.40	65.67	65.94	65.35	64.43	63.51
06/10/2001	66.18	66.46	66.74	67.02	66.43	65.51	64.59
13/10/2001	67.25	67.54	67.83	68.12	67.53	66.61	65.69
20/10/2001	68.34	68.64	68.94	69.24	68.65	67.73	66.81
27/10/2001	69.45	69.76	70.07	70.38	69.79	68.87	67.95
03/11/2001	70.58	70.90	71.22	71.54	70.95	70.03	69.11
10/11/2001	71.73	72.06	72.39	72.72	72.13	71.21	70.29
17/11/2001	72.90	73.24	73.58	73.92	73.33	72.41	71.49
24/11/2001	74.09	74.44	74.79	75.14	74.55	73.63	72.71
01/12/2001	75.30	75.66	76.02	76.38	75.79	74.87	73.95
08/12/2001	76.53	76.90	77.27	77.64	77.05	76.13	75.21
15/12/2001	77.78	78.16	78.54	78.92	78.33	77.41	76.49
22/12/2001	79.05	79.44	79.83	80.22	79.63	78.71	77.79
29/12/2001	80.34	80.74	81.14	81.54	80.95	80.03	79.11
05/01/2002	81.65	82.06	82.47	82.88	82.29	81.37	80.45
12/01/2002	82.98	83.40	83.82	84.24	83.65	82.73	81.81
19/01/2002	84.33	84.76	85.19	85.62	85.03	84.11	83.19
26/01/2002	85.80	86.24	86.68	87.12	86.53	85.61	84.69
02/02/2002	86.89	87.34	87.79	88.24	87.65	86.73	85.81
09/02/2002	88.00	88.46	88.92	89.38	88.79	87.87	86.95
16/02/2002	89.13	89.60	89.99	90.42	89.83	88.91	87.99
23/02/2002	90.28	90.76	91.24	91.72	91.13	90.21	89.29
01/03/2002	91.45	91.94	92.43	92.92	92.33	91.41	90.49
08/03/2002	92.64	93.14	93.64	94.14	93.55	92.63	91.71
15/03/2002	93.85	94.36	94.87	95.38	94.79	93.87	92.95
22/03/2002	95.08	95.60	96.12	96.64	96.05	95.13	94.21
29/03/2002	96.33	96.86	97.39	97.92	97.33	96.41	95.49
05/04/2002	97.60	98.14	98.68	99.22	98.63	97.71	96.79
12/04/2002	98.89	99.44	99.99	100.54	99.95	99.03	98.11
19/04/2002	100.20	100.76	101.32	101.88	101.29	100.37	99.45
26/04/2002	101.53	102.10	102.67	103.24	102.65	101.73	100.81
03/05/2002	102.88	103.46	104.04	104.62	104.03	103.11	102.19
10/05/2002	104.25	104.84	105.43	106.02	105.43	104.51	103.59
17/05/2002	105.64	106.24	106.84	107.44	106.85	105.93	105.01
24/05/2002	107.05	107.66	108.27	108.88	108.29	107.37	106.45
31/05/2002	108.48	109.10	109.72	110.34	109.75	108.83	107.91
07/06/2002	109.93	110.56	111.19	111.82	111.23	110.31	109.39
14/06/2002	111.40	112.04	112.68	113.32	112.73	111.81	110.89
21/06/2002	112.89	113.54	114.19	114.84	114.25	113.33	112.41
28/06/2002	114.40	115.06	115.72	116.38	115.79	114.87	113.95
05/07/2002	115.93	116.60	117.27	117.94	117.35	116.43	115.51
12/07/2002	117.48	118.16	118.84	119.52	118.93	118.01	117.09
19/07/2002	119.05	119.74	120.43	121.12	120.53	119.61	118.69
26/07/2002	120.64	121.34	122.04	122.74	122.15	121.23	120.31
02/08/2002	122.25	122.96	123.67	124.38	123.79	122.87	121.95
09/08/2002	123.88	124.60	125.32	126.04	125.45	124.53	123.61
16/08/2002	125.53	126.26	126.99	127.72	127.13	126.21	125.29
23/08/2002	127.20	127.94	128.68	129.42	128.83	127.91	126.99
30/08/2002	128.89	129.64	130.39	131.14	130.55	129.63	128.71
06/09/2002	130.60	131.36	132.12	132.88	132.29	131.37	130.45
13/09/2002	132.33	133.10	133.87	134.64	134.05	133.13	132.21
20/09/2							

EXEMPLO DE UM CERTIFICADO DE FONTE SELADA PARA USO INDUSTRIAL

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN/SP)
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN)

CERTIFICADO DE FONTE RADIOATIVA SELADA

CARACTERÍSTICAS DA FONTE SELADA

Usuario :
Lote 1 : 111CAN/IPEN
Lote 2 :
N. de Série : Irs 3402 (X-54)
Radionuclídeo : IRIDIUM
Atividade : 4.662 TBq (126 Ci)
Tamanho focal 1: (Ø 2.7 X 0.25 mm)
Tamanho focal 2:
Medida em : 25/05/2000
Discos 17
Discos

TESTES EFETUADOS (ISO 4826)

Livre de Contaminação Superficial: teste de esfregão

Data: 25/05/2000

Resultado: < 5,0 nCi

Livre de Vazamentos: teste de imersão a 100°C (Imersão em água em ebulição)

Data: 25/05/2000

Resultado: < 5,0 nCi

Responsável:

Data : 25/05/2000

GILBERTO CARVALHO
IPEN/CNEN/SP, 11
Data, pl. Produto
da Fonte Selada

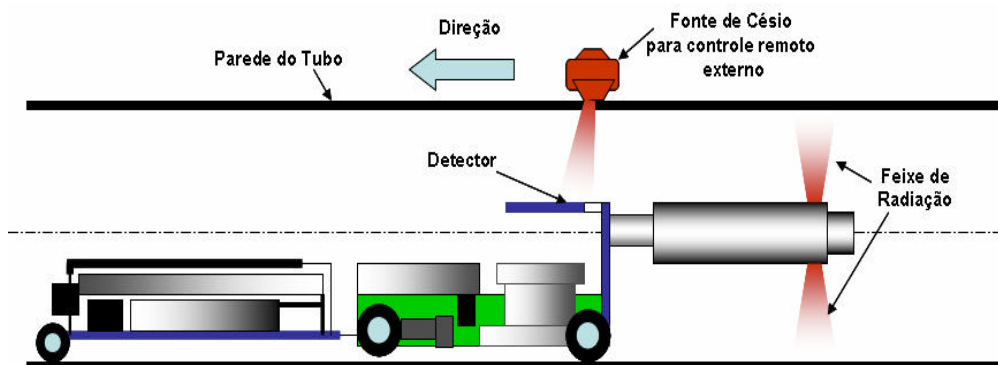
Observações

1. Vida útil recomendada : 10 meses.
2. Serviços de manutenção só serão feitos dentro do prazo correspondente a vida útil recomendada e somente se o defeito apresentado não decorrer de mau uso da fonte.

1. VIA - USUÁRIO
2. VIA - PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (NP)
3. VIA - LABORATÓRIO DE PRODUÇÃO DE FONTES SELADAS (TE)

O Equipamento Crawler

Este equipamento foi desenvolvido para radiografias de soldas em linhas de tubulações do tipo gasoduto ou oleoduto com diâmetros de 6 pol. até 60 pol., dependendo do modelo. Ele pode ter incorporado um gerador de raios-X de 160 kV até 300 kV ou uma fonte gama de Ir-192 ou Se-75. Operado com baterias recarregáveis, o Crawler é introduzido dentro da tubulação por onde percorre toda sua extensão, parando nos pontos onde a radiografia será feita. O controle da movimentação do equipamento de 16 metros/minuto dentro da tubulação, é feita pelo lado externo da tubulação, remotamente usando uma fonte de Césio com baixa atividade, da ordem de 20 mCi.



Esquema de operação do Crawler



Crawler sendo testado antes de operar dentro da tubulação
Foto extraída do website: <http://www.sievert.in/Weprovide/crawler.html>

Rregistro Radiográfico

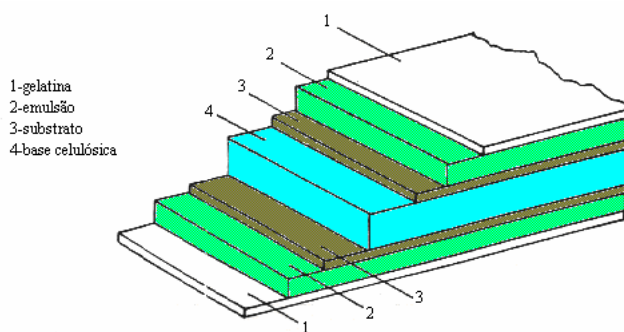
Filmes Radiográficos

Os filmes radiográficos são compostos de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada muito fina (espessura de 0,025 mm) de gelatina, que contém, dispersos em seu interior, um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata. A emulsão é colocada sobre um suporte, denominado base, que é feito geralmente de um derivado de celulose, transparente e de cor levemente azulada.

Uma característica dos filmes radiográficos é que, ao contrário dos filmes fotográficos, eles possuem a emulsão em ambos os lados da base.

Os cristais de brometo de prata, presentes na emulsão, possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação ou luz, tornarem-se susceptíveis de reagir com produto químico denominado revelador. O revelador atua sobre esses cristais provocando uma reação de redução que resulta em prata metálica negra.

Os locais do filme, atingidos por uma quantidade maior de radiação apresentarão, após a ação do revelador, um número maior de grãos negros que regiões atingidas por radiação de menor intensidade, dessa forma, quando vistos sob a ação de uma fonte de luz, os filmes apresentarão áreas mais escuras e mais claras que irão compor a imagem do objeto radiografado.



Os filmes radiográficos industriais são fabricados nas dimensões padrões de 3.1/2" x 17" ou 4.1/2" x 17" ou 14" x 17". Outras dimensões e formatos podem ser encontrados em outros países da Europa e EUA

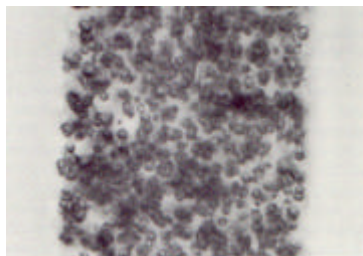
Estrutura de um filme radiográfico

Granulação

A imagem nos filmes radiográficos é formada por uma série de partículas muito pequenas de sais de prata, os quais não visíveis a olho nu. Entretanto, essas partículas se unem em massas relativamente grandes que podem ser vistas pelo olho humano ou com auxílio de pequeno aumento. Esse agrupamento das partículas de sais de prata da emulsão cria uma impressão chamada de "Granulação".

Todos os filmes apresentam o fenômeno de granulação. Por possuírem grãos maiores, os filmes mais rápidos apresentam uma granulação mais acentuada que os filmes lentos. A granulação, além de ser característica de cada filme, também sofre uma influência da qualidade da radiação que atinge o filme. Portanto, podemos afirmar que a granulação de um filme aumenta quando aumenta a qualidade da radiação. Por essa razão os filmes com grãos mais finos são recomendados quando se empregam fontes de alta energia (Raios X da ordem de milhões de volts). Quando usados com exposição longa, esses filmes também podem ser empregados com raios gama.

A granulação é também afetada pelo tempo de revelação do filme. Se aumentarmos, por exemplo, o tempo de revelação, haverá um aumento simultâneo na granulação do filme. Esse efeito é comum quando se pretende aumentar a densidade, ou a velocidade, de um filme por intermédio de um aumento no tempo de revelação. É claro que o uso de tempos de revelação pequenos resultarão em baixa granulação porém corremos o risco de obter um filme sub-revelado. É importante salientar que a granulação aumenta de acordo com o aumento de grau de revelação. Dessa forma, aumentamos no tempo de revelação que visam a compensar atividade do revelador ou a temperatura do banho, terão uma influência muito pequena na granulação do filme.



Ampliação dos grãos de um filme radiográfico ainda não processado.

(foto extraída do Livro da Kodak)

Densidade Óptica

A imagem formada no filme radiográfico possui áreas claras e escuras evidenciando um certo grau de enegrecimento que denominamos de Densidade. Matematicamente expressamos a densidade como sendo logaritmo da razão entre a intensidade de luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida e visualmente observada.

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

onde

I_0 = intensidade de luz incidente

I = intensidade de luz transmitida

Velocidade

Antes de introduzirmos o conceito de velocidade é preciso definir o que entendemos por exposição. É uma medida da quantidade de radiação que atinge um filme. Ela é representada pelo produto da intensidade da radiação pelo tempo que o filme fica exposto. É evidente, portanto, quanto maior a exposição a que submetemos um filme, maior a densidade que esse filme atinge.

Se submetemos dois filmes diferentes a uma mesma exposição, notaremos que as densidades obtidas nos dois filmes serão diferentes. Ou seja, com uma mesma exposição, um filme apresenta maior rapidez com que um filme atinge determinada densidade, quando comparado com um outro filme. Portanto, um filme rápido necessita de menor tempo de exposição para atingir uma determinada densidade, que num outro filme, mais lento. Ou ainda, se um filme rápido e um filme lento forem submetidos a uma exposição idêntica, o filme rápido atingirá uma densidade maior.

A velocidade é uma característica própria de cada filme. Ela depende, principalmente, do tamanho dos cristais de prata presentes na emulsão. Quanto maior o tamanho dos cristais mais rápido é o filme. É claro que uma imagem formada por grãos de grandes dimensões é mais grosseira, ou seja, menos nítida, que uma imagem formada por grãos menores. Portanto, quanto mais rápido o filme, menos nítida será a imagem formada por ele.

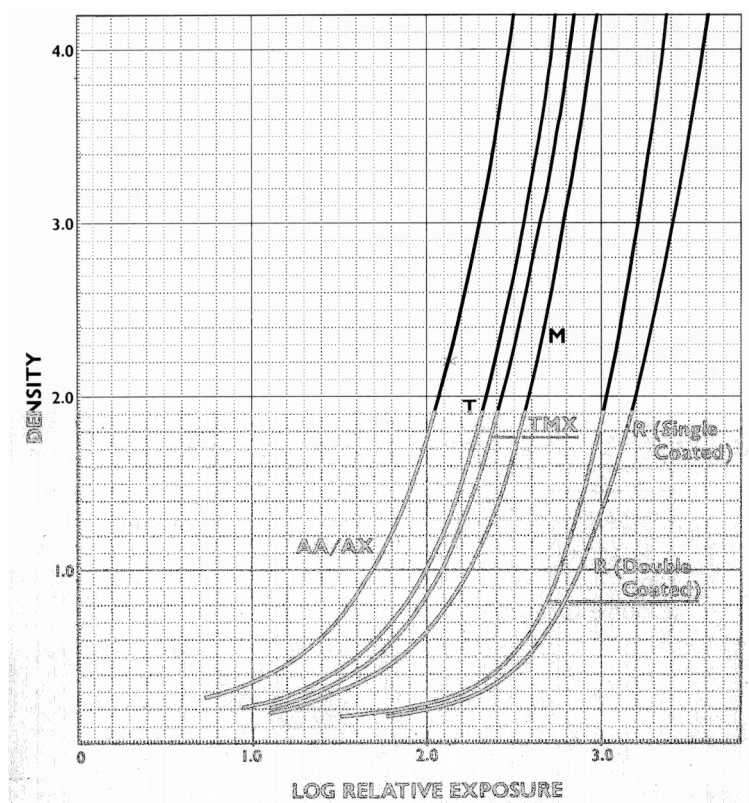
Os filmes de grande velocidade podem ser utilizados em radiografias de peças com grandes espessuras que exigiria um tempo de exposição incompatível com a produtividade, quando utilizado filmes mais lentos.

Curva Característica dos Filmes Industriais

A curva característica de um filme, também chamada de curva sensitométrica ou curva H e D (Hurter-Driffield) relaciona a exposição dada a um filme com a densidade resultante. Através das curvas características podemos comparar qualitativamente filmes diferentes, e ainda estabelecer critérios para corrigir densidades obtidas para uma dada exposição.

As curvas são em geral fornecidas pelo fabricante do filme e são obtidas mediante a exposições sucessivas do filme, tendo suas densidades medidas em cada exposição. Os valores são plotados num gráfico de densidades em função do logaritmo da exposição relativa.

Observe que mesmo sem exposição alguma o filme apresenta uma certa densidade de fundo denominado "Véu de Fundo", (base azul) próprio do filme, podendo aumentar caso o filme estiver guardado em condições irregulares, tais como na presença de níveis baixos de radiação ou calor excessivo.



Curva característica de filmes radiográficos Kodak.

Exemplo de aplicação:

Suponhamos que uma densidade radiográfica $D = 1,8$ num filme Kodak AA-400 o filme não foi aceito e portanto se deseja aumentar a densidade para $D = 2,3$. Qual será o novo tempo de exposição?

Temos que: Usando o gráfico abaixo, na curva do filme Kodak AA-400

para $D = 1,8$	-----	$\log E_r = 2,04$
para $D = 2,3$	-----	$\log E_r = 2,14$

diferença = 0,10		
antilog 0,10 = 1,25		

Neste caso devemos aumentar 1,25 vezes o tempo de exposição para alcançarmos a densidade 2,3 no mesmo filme considerado.

Classificação dos Filmes Industriais

A grande variedade de condições e a heterogeneidade de materiais encontrados na radiografia industrial, levaram os fabricantes a produzir várias espécies de filmes. Uma classificação dos filmes foi estabelecida pelo ASTM E-1815-96, que identifica os tipos de filmes pela velocidade de exposição e sensibilidade. A velocidade de exposição é função logarítmica da dose de radiação necessária para que o filme atinja densidade óptica de 2,0. A seguir descrevemos de forma simplificada os tipos de filmes.

Tipos dos Filmes :

- **Tipo 1** - Características: granulação ultra fina alto contraste e qualidade. Deve ser usado em ensaios de metais leves ou pesados, ou seções espessas, com radiação de alta energia.
- **Tipo 2** - Características: Filme com granulação muito fina e com alta velocidade e alto contraste quando utilizado em conjunto com telas intensificadoras de chumbo.
- **Tipo 3** - Características: Filme de granulação fina, com alto contraste e velocidade. É o filme mais utilizado na indústria em razão do atendimento em qualidade e maior produtividade
- **Tipo 4** - Características: Filme de granulação média, pouco utilizado na indústria.

Qualidade da Imagem Radiográfica

A qualidade da imagem radiográfica está associada a alguns parâmetros importantes ligados a características do filme radiográfico e da fonte de radiação utilizada, e é um fator para aceitação ou rejeição da radiografia.

Contraste

Para que se forme uma imagem no filme é necessário que ocorram variações na densidade ao longo do mesmo. Em outras palavras, uma imagem é formada a partir de áreas claras e escuras. A diferença de densidades entre duas regiões adjacentes no filme é denominada de Contraste. Por exemplo se medirmos a densidade de duas áreas adjacentes no filme e encontrarmos os valores $D_1 = 2,2$ e $D_2 = 1,8$, o contraste será dado pela diferença entre D_2 e D_1 , e portanto de 0,4.

O contraste pode também ser entendido como sendo a capacidade do filme detectar intensidades e energias diferentes de radiação. Imagens com alto contraste permitem em geral melhor qualidade e segurança na interpretação da radiografia.

Gradiente

Para avaliar o efeito da forma da curva característica do filme radiográfico, podemos empregar outra grandeza denominada "Gradiente". O gradiente de um filme é numericamente igual à tangente em um certo ponto de sua curva. Quando regiões da curva apresenta um gradiente maior que 1,0, o contraste é amplificado, da mesma forma, nas regiões em que o gradiente é menor que 1,0 o contraste transmitido pela peça é diminuído.

Definição

Observando com detalhe a imagem formada no filme radiográfico, veremos que a mudança de densidades de uma área a outra não se faz de maneira brusca. Por exemplo, a imagem de um objeto apresenta um pequeno halo que acompanha as bordas da mesma, com uma densidade intermediária entre a densidade da imagem e a de fundo. Quanto mais estreita for esta faixa de transição a definição será melhor.

Processamento do Filme Radiográfico

Preparação Inicial:

A preparação do filme e dos banhos para o processamento radiográfico deve seguir algumas considerações gerais, necessárias ao bom desempenho desta tarefa.

- **Limpeza:** no manuseio do filme, a limpeza é essencial. A câmara escura, bem como os acessórios e equipamentos, devem ser mantidos rigorosamente limpos, e usados somente para o propósito aos quais eles se destinam. Qualquer líquido de fácil volatilização deve estar acondicionado em recipientes fechados, para não contaminar o ambiente. O termômetro e outros acessórios que manuseados devem ser lavados em água limpa imediatamente após o uso, para evitar a contaminação das soluções. Os tanques devem estar limpos e preenchidos com soluções frescas.
- **Preparação dos banhos:** a preparação dos banhos devem seguir a recomendação dos fabricantes, e preparados dentro dos tanques que devem ser de aço inoxidável ou da matéria sintética, sendo preferível o primeiro material. É importante providenciar agitação dos banhos, utilizando pás de borracha dura ou aço inoxidável ou ainda de material que não absorva e nem reaja com as soluções do processamento. As pás devem ser separadas, uma para cada banho, para evitar a contaminação das soluções.
- **Manuseio:** após a exposição do filme, o mesmo ainda se encontra dentro do porta-filmes plástico, e portanto deverá ser retirado na câmara escura, somente com a luz de segurança acionada. Nesta etapa os filmes deverão ser fixados nas presilhas das colgaduras de aço inoxidável para não pressionar o filme com o dedo, que poderá manchá-lo permanentemente.

- Controle da temperatura e do tempo: os banhos de processamento e a revelação devem ser controlados, quanto a temperatura. Normalmente devem estar de acordo com a recomendação do fabricante.

Processamento Manual

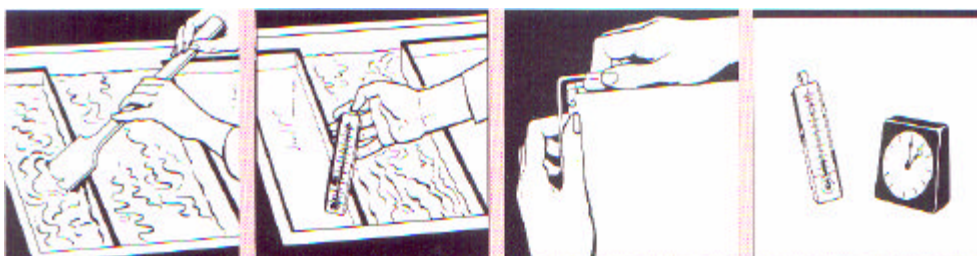
A partir do momento que temos um filme exposto à radiação e passamos então ao processamento, o mesmo passará por uma série de banhos nos tanques de revelação, de acordo com as seguintes etapas:

1 –Preparação dos banhos: a preparação dos banhos devem seguir a recomendação dos fabricantes, e preparados dentro dos tanques que devem ser de aço inoxidável ou da matéria sintética, sendo preferível o primeiro material. É importante providenciar agitação dos banhos, utilizando pás de borracha dura ou aço inoxidável ou ainda de material que não absorva e nem reaja com as soluções do processamento. As pás devem ser separadas, uma para cada banho, para evitar a contaminação das soluções.

2 –Medição da Temperatura: O grau de revelação é afetado pela temperatura da solução: Quando a temperatura aumenta o grau de revelação também aumenta. Desta forma, quando a temperatura do revelador é baixa, a reação é vagarosa e o tempo de revelação que fora recomendado para a temperatura normal (20°C), será insuficiente resultando em uma “sub-revelação”. Quando a temperatura é alta, a “sobre-revelação”. Dentro de certos limites, estas mudanças no grau de revelação podem ser compensadas aumentando-se ou diminuindo-se o tempo de revelação. São fornecidas, inclusive, tabelas tempo-temperatura, através das quais pode-se a correção de comparação.

3 – Manuseio: após a exposição do filme, o mesmo ainda se encontra dentro do porta-filmes plástico, e portanto deverá ser retirado na câmara escura, somente com a luz de segurança acionada. Nesta etapa os filmes deverão ser fixados nas presilhas das colgaduras de aço inoxidável para não pressionar o filme com o dedo, que poderá manchá-lo permanentemente.

4 – O dispositivo para medição do tempo necessário para cada passo do processamento, deve ser acionado (cronômetro)



1 - Preparação dos Banhos 2- Medição da Temperatura 3 - Prender dos Filmes 4. Acionamento do Cronômetro

5 - Revelação

Quando imergimos um filme exposto no tanque contendo o revelador, esta solução age sobre os cristais de brometo de prata metálica, por ação do revelador. Esta seletividade está na capacidade de discriminar os grãos expostos dos não expostos. Devido a fatores eletroquímicos as moléculas dos agentes reveladores atingem os cristais, que ficam como que revestidos. Os cristais, que são constituídos de íons, ganham elétrons do agente revelador, que se combinam com o íon Ag^+ , neutralizando-o, tornando "Ag metálica".

Essa reação química provoca uma degradação progressiva do revelador que é lentamente oxidado pelo uso e pelo meio ambiente.

A visibilidade da imagem e consequentemente o contraste, a densidade de fundo e a definição, dependem do tipo de revelador usado, do tempo de revelação e da temperatura do revelador. Desta forma, o controle tempo-temperatura é de fundamental importância para se obter uma radiografia de boa qualidade.

A revelação deve ser feita com agitação permanente do filme no revelador, afim de que se obtenha uma distribuição homogênea do líquido em ambos os lados da emulsão, evitando-se a sedimentação do brometo e outros sais que podem provocar manchas susceptíveis de mascarar possíveis descontinuidades.

Em princípio, o revelador deveria somente reduzir os cristais de haletos de prata que sofrem exposição durante a formação da imagem latente. Na realidade, os outros cristais, embora lentamente, também sofrem redução.

Chama-se "Véu de fundo" o enegrecimento geral resultante, que deve ser sempre mínimo para otimizar a qualidade da imagem radiográfica.



5 – Revelação

6 – Agitar os Filmes

7 – Deixar escorrer

8 – Banho de Parada

6- Os filmes devem ser agitados na solução reveladora para que não haja formação de bolhas grudadas no filme que possam causar falta de ação do revelador nestes pontos, formando assim um ponto claro.

7 – Deixar escorrer por alguns segundos o filmes.

8 - Banho Interruptor ou Banho de Parada.

Quando o filme é removido da solução de revelação, uma parte revelador fica em contato com ambas as faces do filme, fazendo dessa forma que a reação de revelação continue. O banho interruptor tem então, a função de interromper esta reação a partir da remoção do revelador residual, evitando assim uma revelação desigual e prevenindo ainda a ocorrência de manchas no filme.

Portanto, antes de se transferir o filme do tanque de revelação para o de fixação, deve-se usar o tanque do banho interruptor, agitando-o durante mais ou menos 40 segundos.

O banho interruptor pode ser composto, na sua mistura, de água com ácido acético ou ácido glacial. Neste último caso, deve-se ter cuidado especial, prevendo-se uma ventilação adequada e evitando-se tocá-lo com as mãos. Quando se fizer a mistura com água e não ao contrário, pois poderá respingar sobre as mãos e face causando queimaduras.

O banho interruptor perde o seu efeito com o uso e deve ser sempre substituído. Uma solução nova do banho interruptor é de cor amarela e quando vista sob a luz de segurança é quase incolor. Quando a cor se modifica para azul púrpura que aparece escuro sob a iluminação de segurança, a solução deve ser trocada. Geralmente 20 litros, de banho de parada são suficientes para se revelar 400 filmes de 3 ½ x 17 pol.

9- Fixação

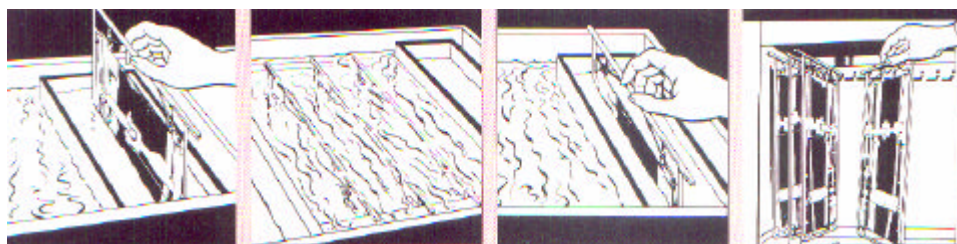
Após o banho interruptor, o filme é colocado em um terceiro tanque, que contém uma solução chamada de “fixador”. A função da fixação é remover o brometo de prata das porções não expostas do filme, sem afetar os que foram expostos à radiação. O fixador tem também a função de endurecer a emulsão gelatinosa, permitindo a secagem ao ar aquecido.

O intervalo do tempo entre o início da fixação até o desaparecimento da coloração amarelo-esbranquiçada que se forma sobre o filme, é chamada de tempo de ajuste ou tempo de definição (clearing time). Durante este tempo o fixador estará dissolvendo o haleto de prata não revelado. Este tempo, é em geral o dobro do tempo de **clareamento**. O tempo de fixação normalmente não deve exceder a 15 minutos. Os filmes devem ser agitados quando colocados no revelador durante pelo menos 2 minutos, a fim de que tenhamos uma ação uniforme dos químicos.

O fixador deve ser mantido a uma temperatura igual ao do revelador, ou seja, cerca de 20 graus Celsius. Os fixadores são comercialmente fornecidos em forma de pó ou líquido e a solução é formada através da adição de água de acordo com as instruções dos fornecedores.

10 - Lavagem dos Filmes.

Após a fixação, os filmes seguem para o processo de lavagem para remover o fixador da emulsão. O filme é imerso em água corrente de modo que toda superfície fique em contato constante com a água corrente. O tanque de lavagem deve ser suficientemente grande para conter os filmes que passam pelo processo de revelação e fixação, sendo que devemos prever uma vazão de água de maneira que o volume do tanque seja de 4 a 8 vezes renovado a cada hora. Cada filme deve ser lavado por um período de aproximadamente 30 minutos. Quando se imergem as colgaduras carregadas no banho de lavagem, deve ser adotado um procedimento tal que se as mesmas sejam primeiramente colocadas próximas ao dreno de saída (água mais suja) e sua posição vá mudando o tempo de lavagem de maneira que se termine o banho o mais próximo possível da região de entrada da água, onde a mesma se encontra mais limpa.



9 – Fixação

10- Lavagem com água

11- Distensor

12 - Secagem

A temperatura da água no tanque de lavagem é um fator muito importante. Os melhores resultados são obtidos com a temperatura por volta de 20 graus centígrados. Se tivermos altos valores para a mesma, poderemos causar efeitos danosos ao filme, assim como valores baixos poderão reduzir a eficiência.

11 - Além das etapas acima relatadas, é aconselhável, após a lavagem passar os filmes durante mais ou menos 30 segundos, por um quinto banho que tem a finalidade de quebrar a tensão superficial da água, facilitando desta maneira, a secagem e evitando que pequenas gotas de água fiquem presas à emulsão, o que iria acarretar manchas nos filmes depois de secos.

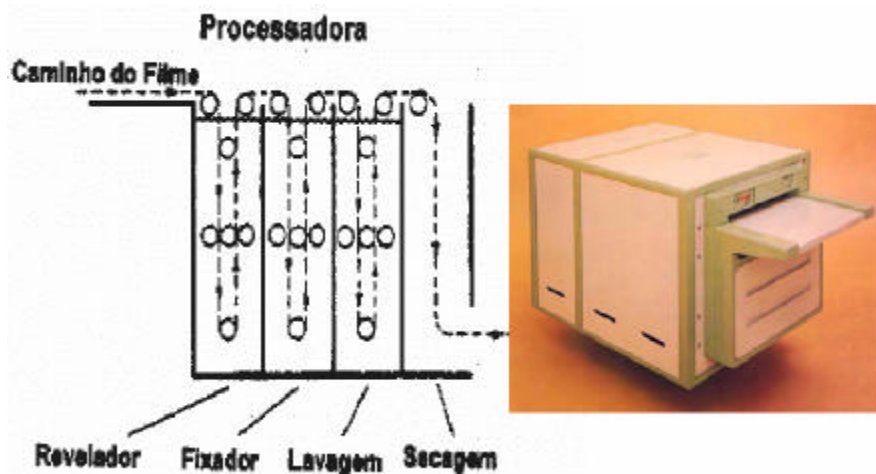
12 - Antes do filme ser colocado no secador, deve-se pendurar as colgaduras em um escorredor por cerca de 2 a 3 minutos.

A partir do momento que temos um filme exposto à radiação e passamos então ao processamento, o mesmo passará por uma série de banhos nos tanques de revelação, após o descrito acima, deverá ser feitas as seguintes etapas:

Processamento Automático

Este sistema de processamento químico e mecânico é utilizado quando há grande volume de trabalho, pois só assim torna-se econômico. O processamento é inteiramente automático sendo que o manuseio só é utilizada para carregamento e descarregamento de filmes. O ciclo de processamento é inferior a 15 minutos. Quando adequadamente mantido e operado, este equipamento produz radiografia de alta qualidade.

A alta velocidade de processamento torna-se possível pelo uso de soluções químicas especiais, contínua agitação dos filmes, manutenção da temperatura das soluções e secagem por jatos de ar aquecido.



Revelação

A imagem latente torna-se visível por ação do agente químico chamado de revelador. A solução reveladora fornece elétrons que migram para grãos que foram sensibilizados pelos raios X, e converte os outros íons de prata que não foram expostos em íons metálicos de cor escura. Isto faz com que apareçam pintas pretas na emulsão. Geralmente, o filme radiográfico é revelado por uma processadora automática onde se mostram os quatro estágios do processamento. Em uma processadora convencional, o filme é revelado por um período entre 20 e 25 segundos.

Concentração - o revelador, em geral, é fornecido em forma de um concentrado que deve ser diluído em água para abastecer a processadora. Se a diluição não for correta haverá alterações na sensibilidade.

Taxa de reposição - a revelação do filme consome uma quantidade de solução reveladora e torna o restante menos reativa. Se não houvesse reposição do revelador, a sensibilidade diminuiria gradual-mente. Nas processadoras a reposição é automática. A taxa de reposição depende do tamanho do filme

Contaminação - se o revelador for contaminado com outro químico, como o fixador, por exemplo, ocorrerão alterações abruptas na sensibilidade do filme (aumento ou decréscimo), dependendo do tipo e da quantidade de contaminação. É mais provável que a contaminação do revelador ocorra quando os rolos de transporte são removidos ou substituídos.

Tempo - quando o filme entra na solução reveladora, a revelação não é instantânea. É um processo gradual durante o qual os grãos são revelados, aumentando a densidade do filme. O processo termina com a saída do tanque de revelação e a ida do filme para o tanque de fixação. Geralmente, aumentando-se o tempo de revelação, aumenta-se a sensibilidade do filme, pois menos exposição é necessária para produzir uma determinada densidade óptica. O tempo de processamento é em geral de 20 a 25 s.

Temperatura - a atividade do revelador varia com a sua temperatura. Um aumento na temperatura aumenta a taxa da reação, e também aumenta a sensibilidade do filme para produzir uma determinada densidade óptica. Geralmente, a temperatura do revelador está na faixa de 32 a 35 °C.

Fixação

Após passar pelo revelador, o filme é transportado para um segundo tanque que contém uma solução fixadora. O fixador é uma mistura de várias soluções químicas que desempenham as funções:

Clareamento: a solução fixadora também clareia os grãos de haletos de prata não revelados. Utiliza-se amônia ou tiosulfato de sódio. Os grãos não expostos são retirados do filme e se dissolvem na solução fixadora. A prata que se acumula no fixador durante o processo de clareamento pode ser recuperada.

Conservação: o sulfato de sódio é usado para proteger o fixador de reações que o deterioram.

Lavagem

O próximo estágio do filme é passar por um banho de água para retirar dele a solução fixadora em contato com a emulsão. É muito importante que se remova todo o tiosulfato proveniente do fixador. Se o tiosulfato ficar retido na emulsão, ele eventualmente poderia reagir com nitrato de prata e o ar para formar o sulfato de prata, dando a radiografia uma coloração marrom-amarelada.

A quantidade de tiosulfato retida na emulsão determina o tempo de vida útil da radiografia do filme processado. O "American National Standard Institute" recomenda uma retenção máxima de 30 µg por polegada quadrada.

Secagem

A última etapa do processamento do filme é a secagem. Em uma processadora automática o filme passa em uma câmara por onde circula o ar quente.

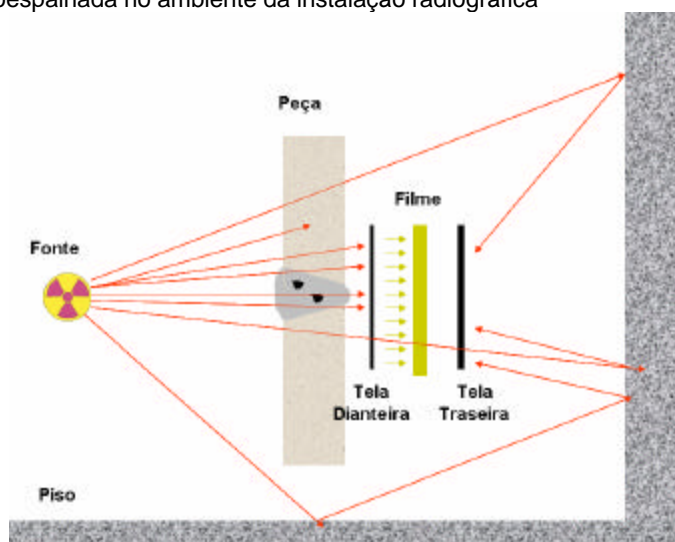
Telas Intensificadoras de Imagem

Telas de chumbo

As telas de chumbo também chamados de telas intensificadoras possuem como finalidade diminuir o tempo de exposição em ensaios radiográficos industriais, usam-se finas folhas de metal (geralmente chumbo) com intensificadoras da radiação primária emitida pela fonte. O fator de intensificação, além de ser função da natureza e da espessura da tela, depende do contato efetivo entre elas e o filme.

As telas intensificadoras de chumbo geralmente são coladas sobre cartolina com espessura da ordem de 100 gramas por centímetro quadrado. Essa cartolina deve ter espessura constante para evitar que qualquer falta de homogeneidade prejudique a qualidade da radiografia.

A tela intensificadora de chumbo precisa ter uma espessura ideal para determinada energia da radiação incidente, pois, caso contrário, a eficiência dela será reduzida. Em geral a espessura de chumbo é da ordem de 0,005 pol. (0,127 mm) para a tela dianteira e de 0,010 pol. (0,254 mm) para a tela traseira. A tela traseira tem a função de absorver a radiação retroespalhada no ambiente da instalação radiográfica



Esquema de exposição mostrando a radiação retroespalhada no piso e parede, que retorna ao filme, que é eliminada pela tela intensificadora traseira.

A atenuação da intensidade da radiação primária em uma tela intensificadora de chumbo será insignificante, desde que esta tela tenha a espessura ideal que deve ser igual ao alcance dos elétrons emitidos pela folha de chumbo. Os elétrons que são emitidos por

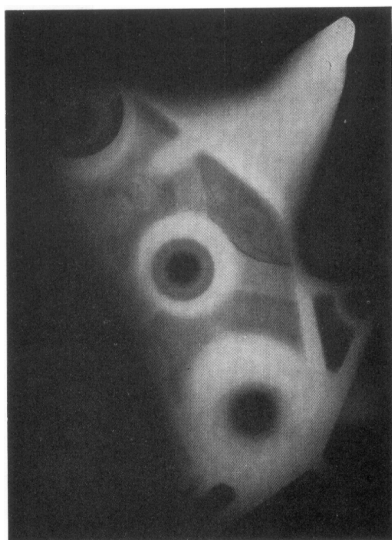
uma face devem atingir a face oposta e conseqüentemente o filme produzindo ionização adicional na emulsão fotográfica. Quando se aumenta a espessura da tela de chumbo, a radiação primária e os elétrons emitidos pela face oposta dessa tela sofrem atenuação, e em conseqüência o fator de intensificação diminui.

O grau de intensificação das telas de chumbo depende da natureza e espessura do material a ensaiar, da qualidade da fonte emissora de radiação e do tipo de filme usado.

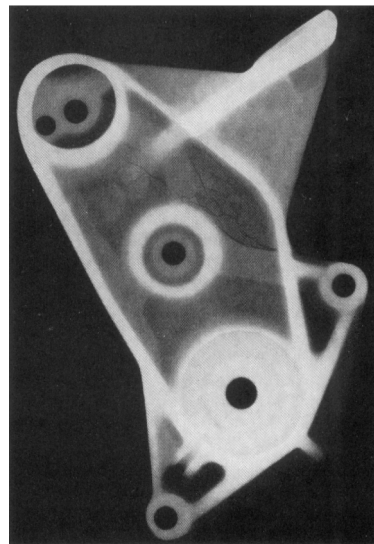
As funções das telas intensificadoras de chumbo em radiografia industrial devem ser as seguintes:

- gerar elétrons por efeito fotoelétrico ou Compton, produzindo fluxo adicional de radiação e diminuindo o tempo de exposição;
- absorver ou filtrar a radiação secundária espalhada que pode atingir o filme radiográfico, borrando a imagem e empobrecendo a definição.

Outras telas fabricadas em outros materiais também podem ser utilizadas, como por exemplo telas de cobre para uso com fontes de Cobalto-60.



Radiografia sem telas intensificadoras



Radiografia com telas intensificadoras

(fotos extraídas do livro Radiografia Industrial – Agfa NDT NV 1989)

Os Chassis Industriais

O chassis para armazenar o filme para a exposição é fabricado na forma de um envelope plástico duplo reforçado, flexível para acompanhar a curvatura ou irregularidades da peça a ser inspecionada. Os tamanhos padrão são iguais aos dos filmes.

Dentro chassis é inserido as telas intensificadoras de imagem e no meio o filme. O chassis é fechado com fita adesiva para evitar a entrada de luz.



Chassis plástico flexível típico industrial tamanho 4,5 x 8,5 polegadas

Telas fluorescentes

Ecrans fluorescentes ou também chamadas telas intensificadoras fluorescentes são usadas para reduzir consideravelmente, o tempo de exposição em radiografias industriais. Constam, fundamentalmente, de fina folha de cartolina impregnada de minúsculos grãos de sais (usualmente o tungstato de cálcio) os quais, sob a ação da radiação incidente, emitem luz fluorescentes para a qual o filme radiográfico é sensível.

Estas telas fluorescentes causam um empobrecimento da definição radiográfica e, portanto, não devem ser usadas.

Por essas razões acima expostas, as telas fluorescentes somente são utilizadas em sistemas de radioscopia ou como um sistema de identificação do filme radiográfico.

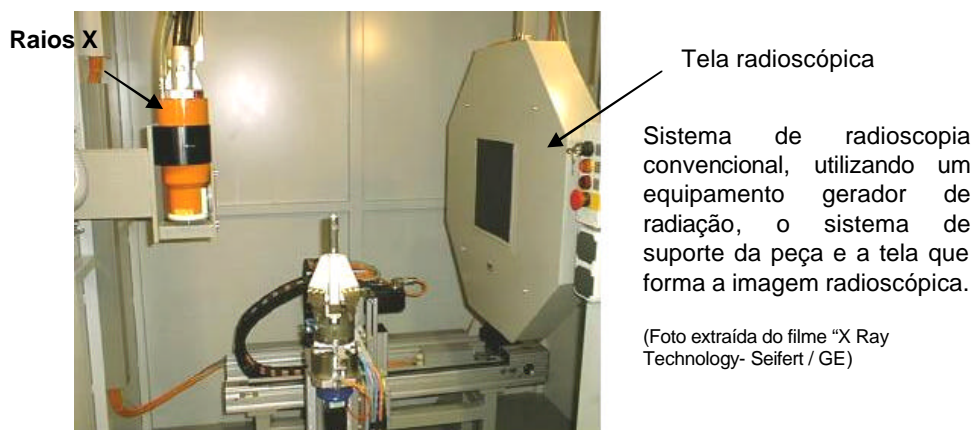
R adioscopia Industrial

A radioscopia, é um meio usado para se detectar a radiação que emerge da peça, numa tela fluorescente. As telas fluorescentes se baseiam no princípio que determinados sais (tungstato de cálcio, por exemplo), possuem a propriedade de emitir luz em intensidade mais ou menos proporcional à intensidade de radiação que incide sobre eles .

A radiação é emitida de um tubo de raios X, colocado no interior de um gabinete blindado, atravessando a peça e indo atingir uma tela fluorescente. Este, por sua vez, transforma as intensidades de radiação que emergem da peça em luz de diferentes intensidades, formando na tela a imagem da peça. Essa imagem, refletida em um espelho , é examinada pelo inspetor, a procura de possíveis defeitos.

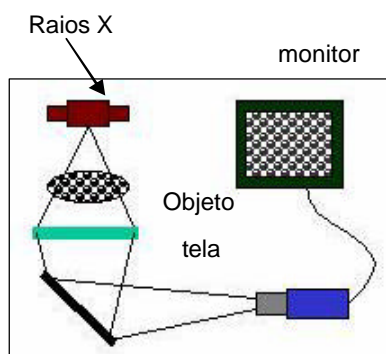
A radioscopia é usada principalmente, no exame de pequenas peças, com espessura baixa. Sua grande vantagem reside na rapidez do ensaio e no seu baixo custo. Em contrapartida, apresenta três limitações importantes:

- Não é possível se inspecionar peças de grande espessura ou de alto número atômico, pois nesse caso a intensidade dos Raios X não seria suficientemente alta para produzir uma imagem clara sobre a tela fluorescente.
- Devido às características próprias das telas fluorescentes e à baixa distância foco-tela, usada, a qualidade de imagem na radioscopia não é tão boa quanto na da radiografia.
- A radioscopia, com imagem visualizada diretamente na tela fluorescente, não permite a localização precisa na peça das áreas que contém descontinuidades inaceitáveis.

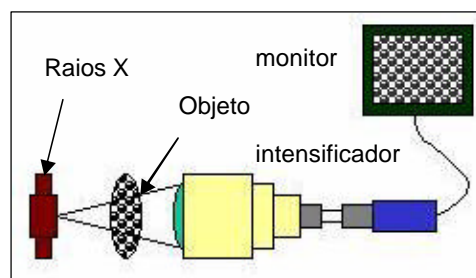


Como foi descrito acima, a observação da imagem pelo inspetor é feita diretamente na tela fluorescente, ou por reflexão num espelho. Entretanto tal procedimento pode muitas vezes

ser perigoso para o operador, pois este leva muitas horas para a inspeção de componentes de fabricação seriada, principalmente, sendo obrigatório nesses casos a sua substituição após um período de trabalho.



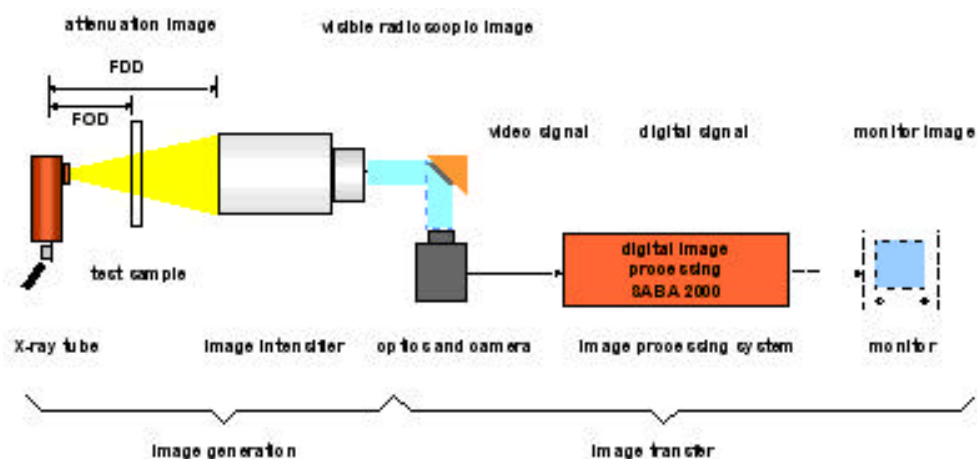
Sistema com Tela Fluorescente e Câmera



Sistema com uso de Câmera de TV e intensificador

(figuras cedidas pela Seifert / GE)

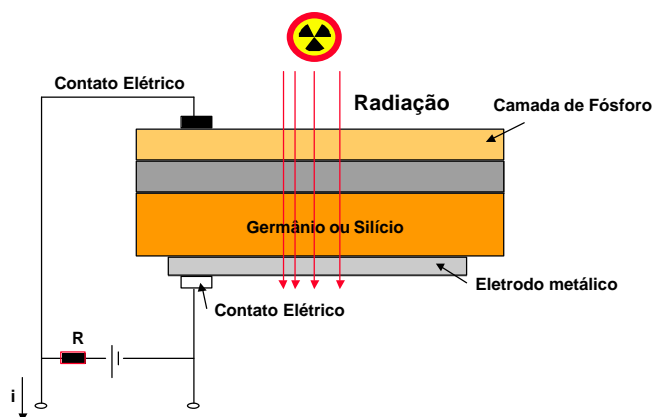
Os sistemas de TV foram criados para eliminar totalmente os problemas de radioproteção mencionados, pois a captação da imagem, feita diretamente da tela fluorescente, é procedida mediante a utilização do circuito interno de TV, ou seja uma câmera de TV de alta sensibilidade, ligada a um monitor de alta resolução. Deste modo o operador ou inspetor visualiza a imagem no monitor de TV, distante o suficiente para garantir sua segurança radiológica, podendo ainda, caso necessário, registrar as imagens produzidas em vídeo tape (vídeo cassete).



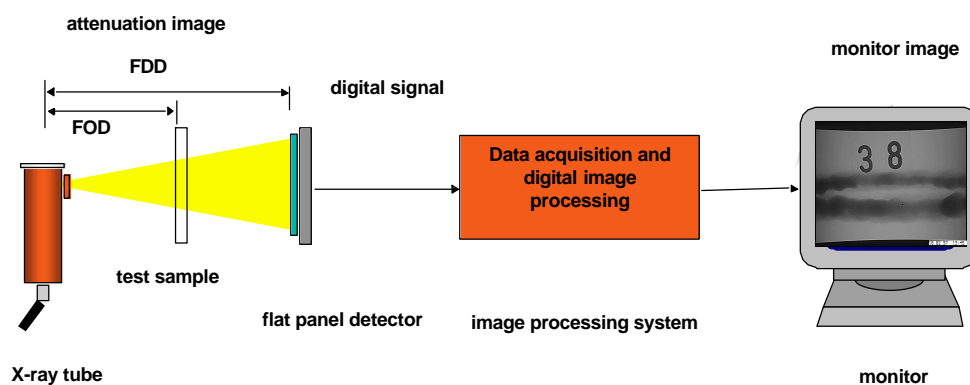
Sistema de Radioscopia usando intensificadores de imagem com Câmera de TV.

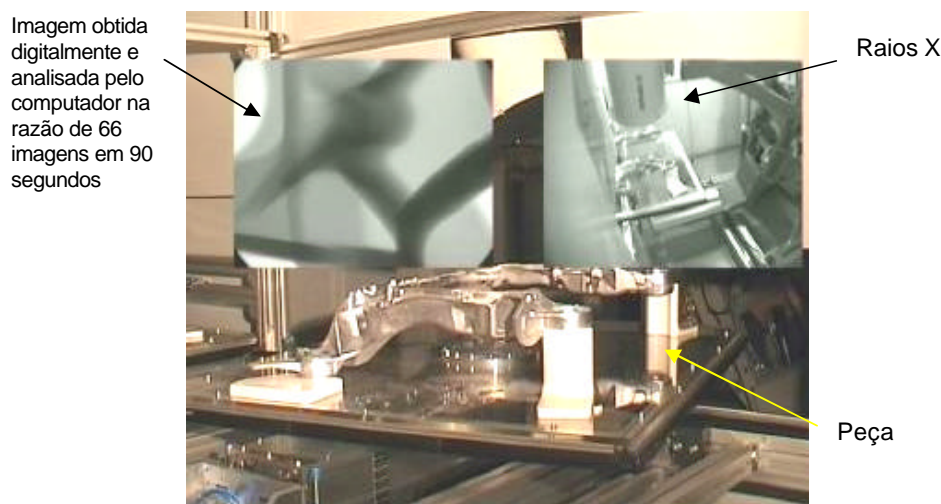
Conversor Universal de Imagem

A captura da imagem na forma de um sinal elétrico é feita através de detectores de radiação no estado sólido que tornam possível converter a radiação ionizante em sinal elétrico, conforme mostrado na figura abaixo:



Os detectores de estado sólido são formados pela parte superior que contém um material a base de fósforo que emite luz (cintilação) pela passagem da radiação, que por sua vez incide no núcleo do detector que por efeito foto-elétrico emite elétrons, dando origem a uma corrente elétrica no terminal do detector, que é proporcional ao fóton de radiação de entrada. Esta corrente elétrica pode ser usada para gerar imagens em TV, gravação em vídeo, digitalização e outros.





Sistema de Radioscopia automatizado.

(Foto extraída do filme "X Ray Systems for Industrial Applications in Automotive Industries " produzido pela Seifert / GE)

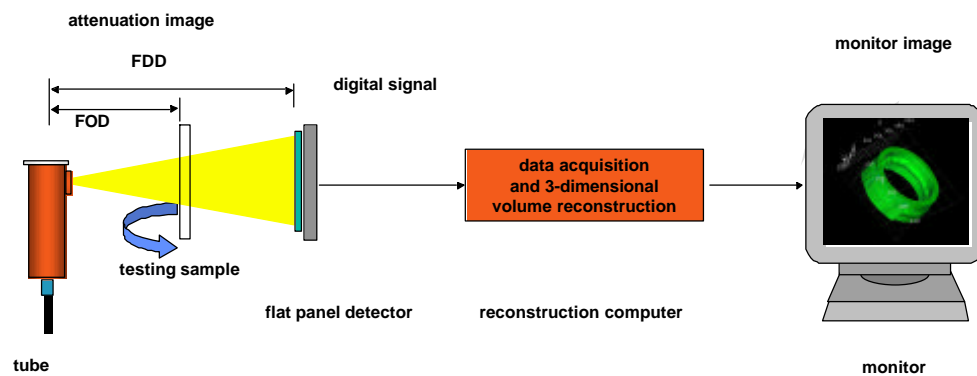
As principais aplicações da radioscopia é na inspeção de rodas de alumínio, pontas de eixo de automotivos, carcaça da direção hidráulica, pneus automotivos , nos aeroportos para verificação de bagagens, inspeção de componentes eletrônicos, e muitas outras aplicações.

A radioscopia moderna pode ser totalmente automatizada, não sendo necessário o técnico para analisar as imagens, sendo estas escaneadas e verificadas por um sistema óptico de um computador por comparação a uma imagem padrão da mesma peça. Todas as imagens podem ser armazenadas em fita de vídeo, como arquivo eletrônico , filme ou papel.

Tomografia Industrial

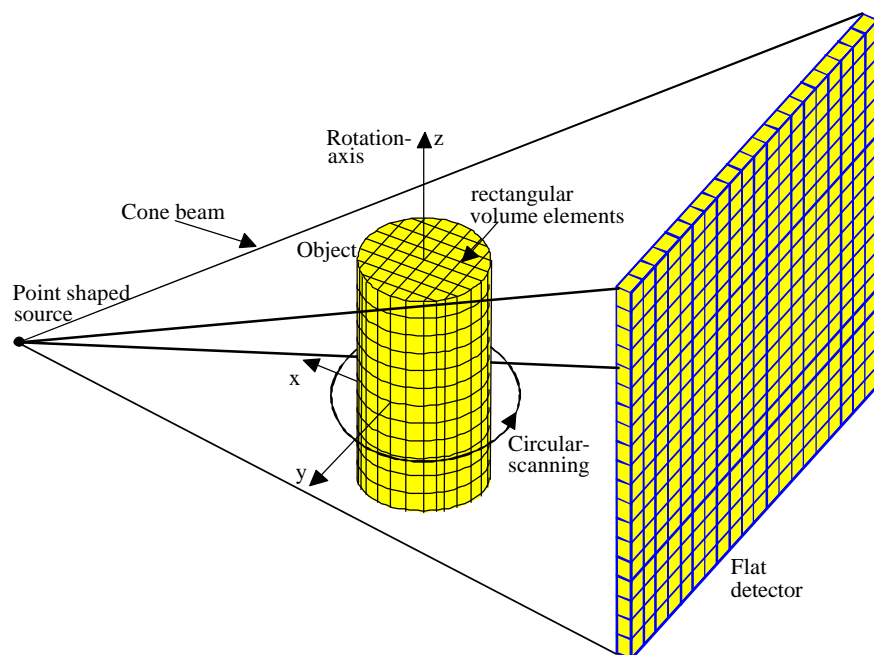
A tomografia industrial também pode ser considerada como um método de inspeção não destrutiva que não utiliza o filme radiográfico para registro dos resultados, assim como na radioscopia convencional.

Nesta técnica , a peça é exposta a um feixe estreito de Raios X giratório que atravessa a peça em vários planos , projetando sua imagem processada por computador, num monitor. Este processo é feito por um complexo sistema que permite visualizar a imagem de uma peça em 3D e permite separar por planos ou camadas a peça.



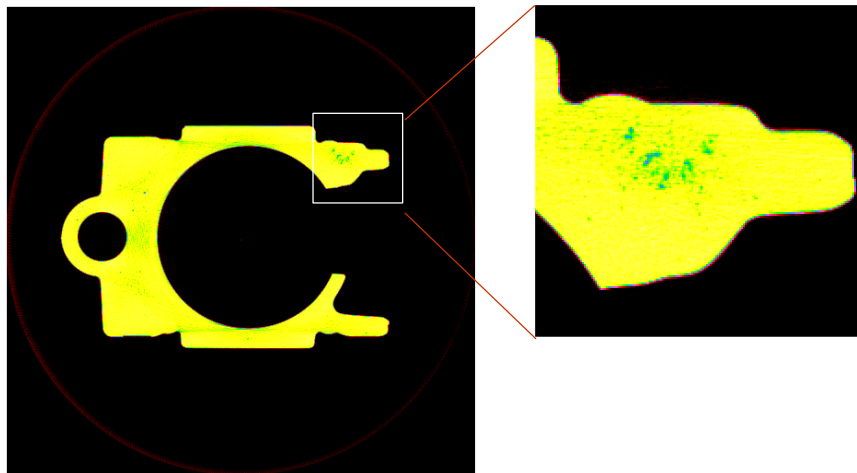
Esquema do Sistema de Inspeção por Tomografia Industrial

A Tomografia industrial é um ensaio muito pouco aplicado na indústria em razão do alto custo como também das aplicações restritas a peças pequenas.



Princípio da formação da imagem Tomográfica.

A seqüência abaixo mostra uma carcaça de bomba de alumínio, inspecionada por tomografia. A figura a seguir mostra a projeção no plano da imagem da peça e à direita o defeito interno.



Sequencia a seguir é a imagem volumétrica tomográfica da mesma peça usando Raios X de 225 kV e 1,5 mA, de uma caixa de bomba de Alumínio, mostrando na imagem 1 a peça inteira e na imagem 2 o corte tomográfico indicando por um círculo a presença de um defeito interno.

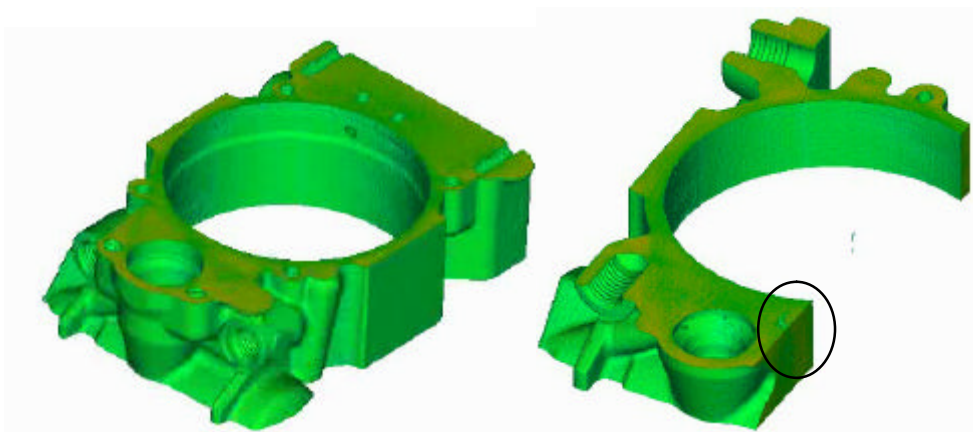


Imagem 1 – Visualização completa defeito

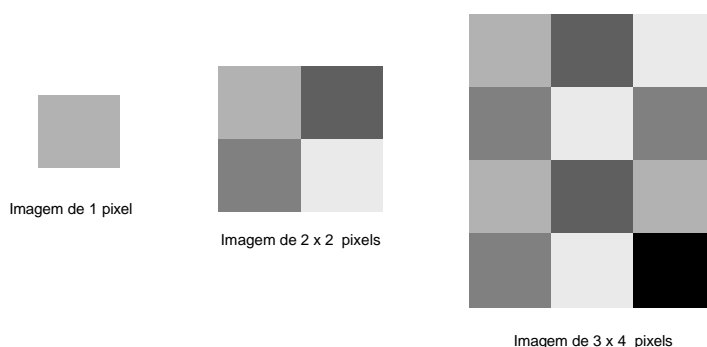
Imagem 2 – Visualização em corte. Observe o

(Imagens extraídas do filme “3D Computed Tomography “ produzido pela Seifert - RAIMECK)

Radiografia Digital

Os métodos de obtenção de imagem através da radiação sem o uso do filme fotográfico, já está disponível a muitos anos, como por exemplo os sistemas de radioscopia com camera de vídeo analógica em tempo real, que evoluíram para o CCD, tubos de raios X microfoco, e finalmente a digitalização da imagem analógica. Porém, nestes sistemas, por melhores que sejam, a qualidade da imagem intrínseca não é comparável à imagem do filme radiográfico convencional, restando assim pouca escolha para a substituição do filme.

Quando falamos em qualidade da imagem digital, estamos nos referindo à **resolução** da imagem. A resolução é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidas ou visualizadas. O olho humano é o observador final de uma imagem, assim em linguagem simples, a resolução seria "o que o olho consegue ver". A imagem digitalizada é formada por "pixels" ou seja é a célula ou partícula que quando agrupadas formam a imagem digital. Cada "pixel" possui uma única tonalidade de cor e possui a mesma medida horizontal e vertical.



O número de "pixels" lineares existentes em uma medida padrão, tal como milímetro ou polegada (p.p.m ou em inglês d.p.m) defini a resolução, e é única para toda a imagem. Por exemplo uma resolução de 6 p.p.m significa que existem 6 pixels em cada medida linear de 1 mm.

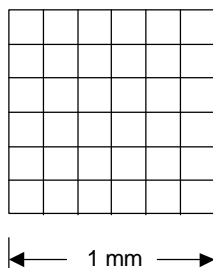
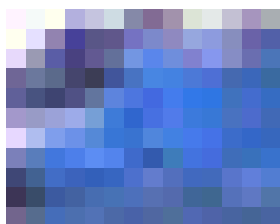


Imagem com
resolução de
6 p.p.m ou d.p.m

Sempre haverá perda de qualidade e da resolução de uma imagem digitalizada, quando ampliamos uma outra imagem já digitalizada, a menos que se aumente a quantidade de pixels na mesma proporção da ampliação.



Digitalização de uma imagem com resolução de: 14 pixels x 11 pixels

Tamanho da Imagem: 1 kbyte



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 84 pixels x 63 pixels

Tamanho da Imagem: 16 kbytes



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 640 pixels x 480 pixels

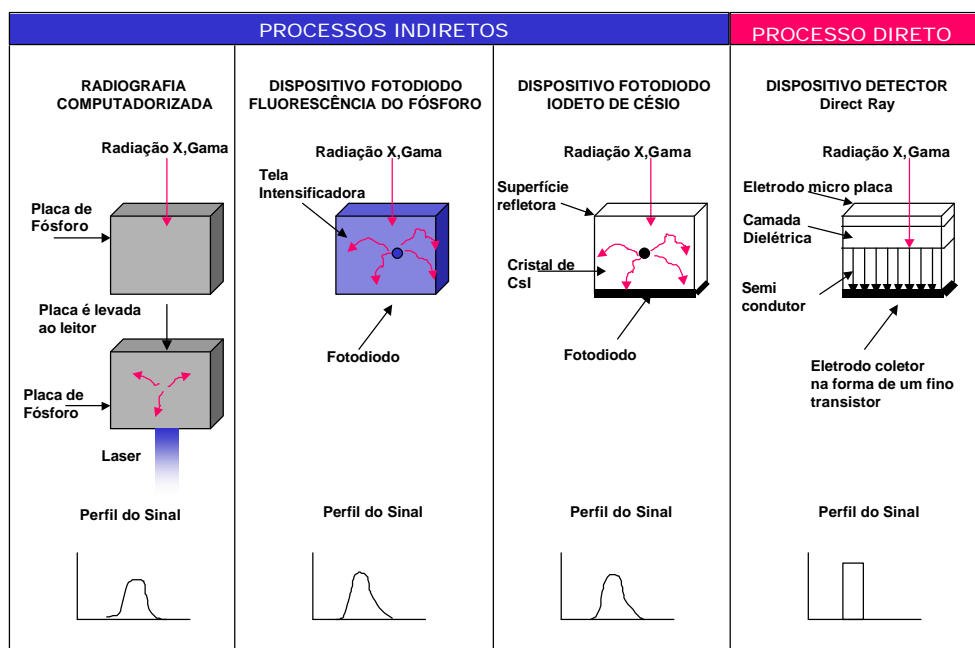
Tamanho da Imagem: 900 kbytes

Exemplos de graus de resolução diferentes para uma mesma imagem

Portanto para avaliar a capacidade de resolução de diferentes sistemas de imagem a quantidade de pixels é fator determinante. Na radiografia digital industrial valores como 2500 x 3000 pixels são comuns para uma boa qualidade de imagem. Outro fator que mede a qualidade é o contraste entre dois pontos adjacentes como uma função da sua distância de separação. Isto é chamado de "Função Modulação de Transferência- MTS" que assume valores de 0 a 1 dependendo do sistema digital usado. Por exemplo, quanto maior for o valor do MTS mais facilmente será visualizada uma descontinuidade.

Processos de Digitalização da Imagem Radiográfica

Os processos de digitalização da imagem radiográfica são os seguintes mostrados no quadro abaixo.

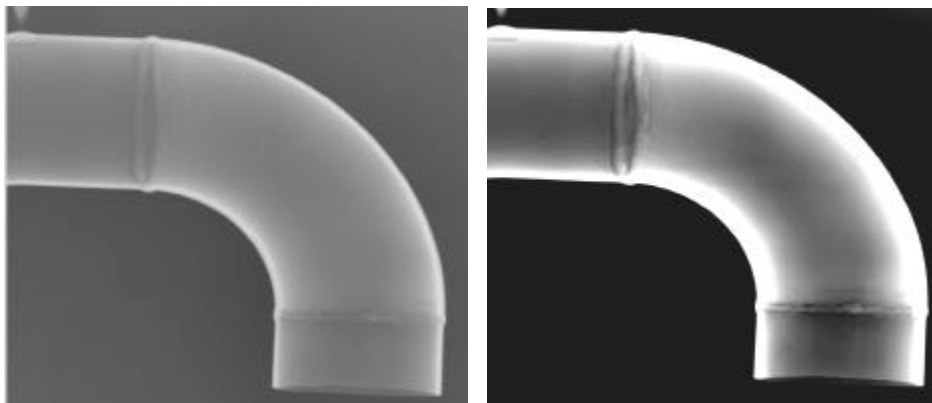


- **Radiografia Computadorizada - CR**

O método de Radiografia computadorizada (CR), utiliza uma tela contendo cristais de fósforo fotoestimulado. Os grãos de fósforo são cobertos por um substrato flexível e armazenam a energia da radiação incidente. Os elétrons são excitados por um feixe de laser que emitem uma luz proveniente dos pequenos elementos "pixels" da placa. A luz emitida produzida é detectada eletronicamente, digitalizada e armazenada na memória do computador na forma de um sinal digital. A imagem produzida no final é comparável à um filme radiográfico tipo III ou seja de grãos grosseiros.

- **Usando uma Tela Fluorescente**

Outro método de digitalizar a imagem é utilizar uma tela intensificadora fluorescente de fósforo ou iodeto de cério (CsI) para converter Raios X ou gama em luz visível que é capturada por um fotodiodo. A qualidade da imagem final é similar ao método anterior CR.



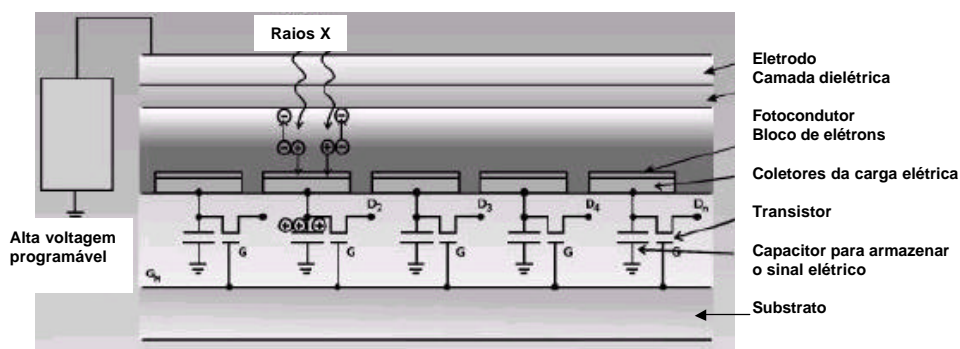
Radiografia Original Digitalizada

Radiografia Processada Digitalmente

(Imagens cedidas pela GE)

- **Processo Direto**

No processo direto, a energia da radiação é convertida diretamente em sinal elétrico através do detetor o que previne perdas e aumenta a eficiência do sistema.

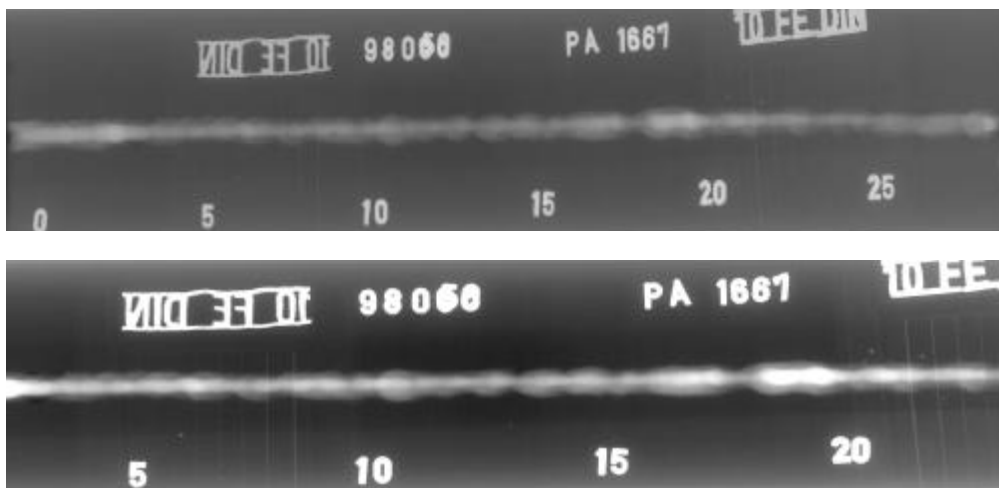


Esquema do detetor para captura da imagem digital no sistema direto.



Placa para captura direta da imagem digital, de selenio amorfo. Permite uma imagem com area ativa de 35 x 43 cm, com resolução de 2560 x 3072 pixels, com máxima exposição de 10 R em 1 segundo.

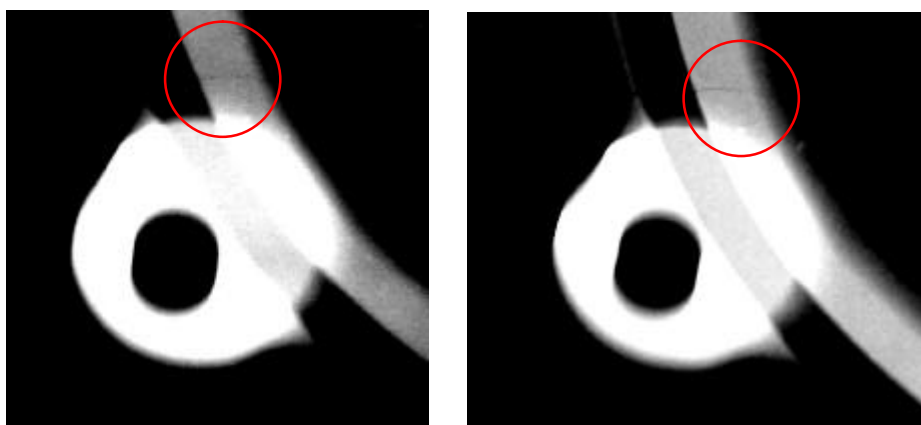
(Imagem cedida pela GE)



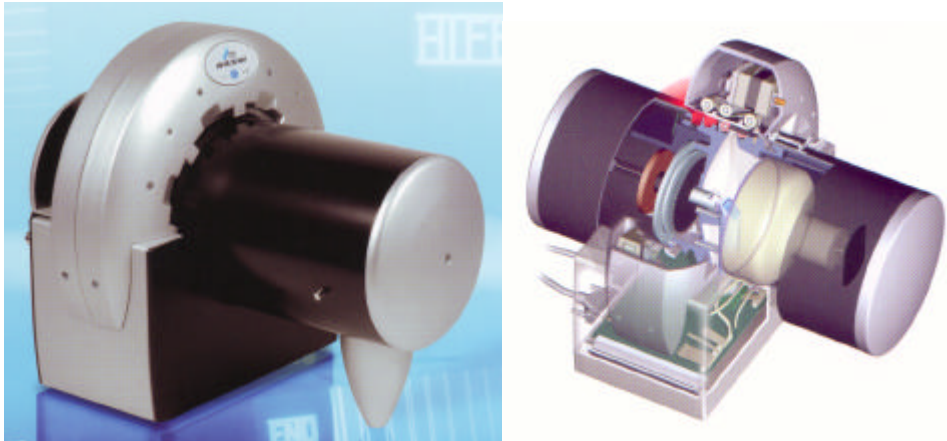
Estas radiografias mostram a diferença entre uma imagem original (foto superior) não processada digitalmente e outra (foto inferior) processada pelo sistema digital (Imagens cedidas pela GE)

- **Digitalização de Filmes Radiográficos**

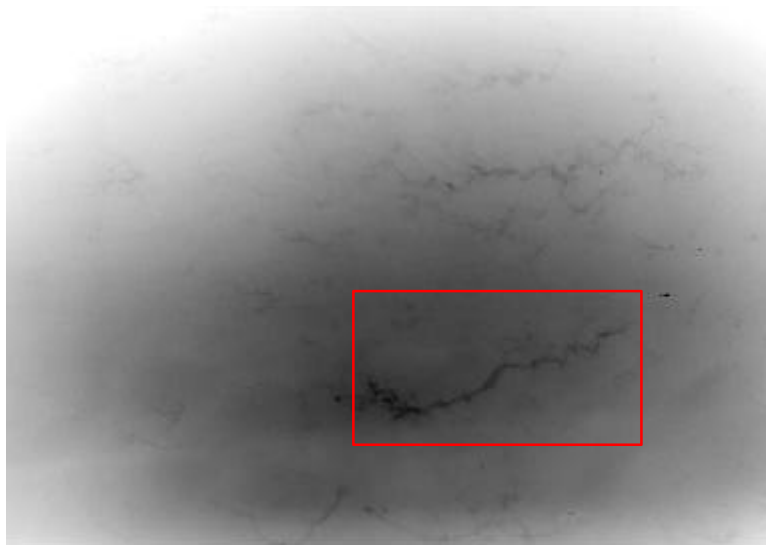
Um outro método existente para radiografia digital é a obtenção da imagem pelo escaneamento do filme radiográfico, usando um scanner especial de alta resolução. A vantagem desta técnica é passar para o computador a imagem do filme e através do programa, poder ampliar e estudar indicações de descontinuidades presentes na área de interesse. O arquivamento em meio eletrônico também traz vantagens.



Radiografia Computadorizada (CR) Imagem Capturada pelo Método Direto (DR)
(Imagens cedidas para GE)



Digitalizador de imagem radiográfica . A radiografia é fixada na parte cilíndrica do scanner onde um leitor óptico realiza a leitura da imagem radiográfica transmitindo esta para o computador e monitor de alta definição
(imagem cedida por DURR-NDT)



Radiografia digitalizada de uma peça fundida. Observe as trincas na região marcada.

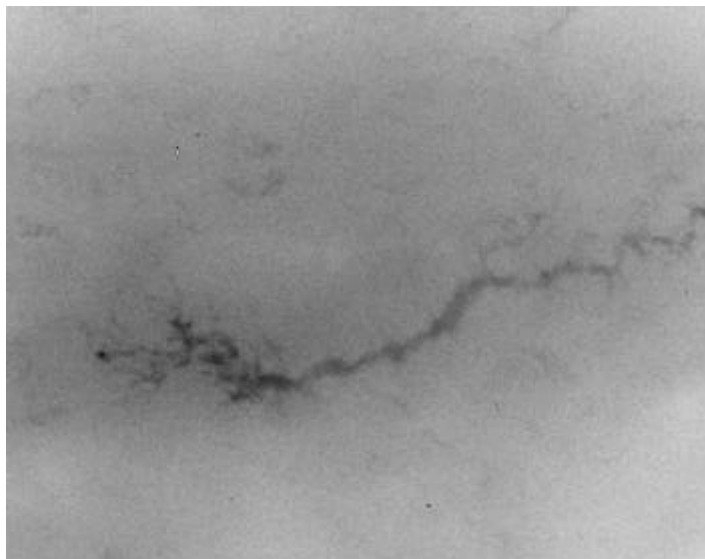
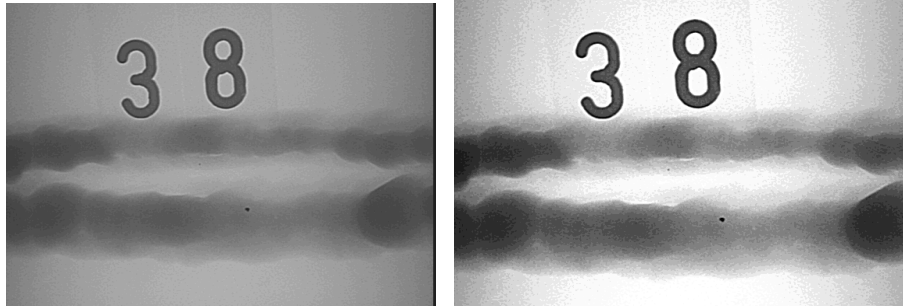


Imagem ampliada digitalmente da região marcada acima. Observe que a visualização das trincas se tornaram mais nítidas, sem perda de qualidade em razão da ampliação.
(Imagens cedidas pela GE)

As principais vantagens da radiografia digital podem ser resumidas nos seguintes:

- As placas de captura da imagem digital permitem uma ampla utilização em variadas condições de exposição, possibilitando reutilização imediata caso ocorrer erros na exposição, evitando assim perdas de material e tempo para o ensaio;
- A grande latitude de exposição das placas de captura digital permitem a visualização da imagem radiográfica com somente uma pequena exposição à radiação, o que permite melhorar a proteção radiológica da instalação, otimizando a segurança;
- As placas de captura possuem longa durabilidade e de boa proteção mecânica, podendo operar em temperaturas de 10 a 35 °C, pesando 8 kg.
- Os programas de computador para análise da imagem digital são versáteis, permitindo ampliações localizadas da imagem propiciando maior segurança do laudo radiográfico.



Melhoria do contraste por tratamento digital das imagens radiográficas.
(Imagens cedidas pela AGFA)



Técnica de radiografia digital em uma solda de tubulação. Na foto do meio, a placa digitalizadora da imagem, gira ao redor da solda, por um guia fixado no tubo.

Parâmetros Radiográficos

Princípios Geométricos

Suponhamos uma fonte emissora de radiação com diâmetro F , muito pequeno, que pode, para efeitos didáticos, ser considerado um ponto. Neste caso, colocando-se um objeto entre o foco puntiforme e um filme radiográfico teríamos uma imagem muito nítida. Se aumentarmos o diâmetro do foco para o valor F e o aproximarmos do objeto, obteremos uma imagem no filme (depois de revelado) com uma zona de penumbra, perdendo essa imagem muito da sua nitidez (definição).

Na prática, deve-se levar em conta que a fonte radioativa possui dimensões compreendidas entre 1 mm e 7 mm de tamanho, dependendo da natureza e atividade do radioisótopo. Quando a distância fonte-filme for muito pequena, para efeito de cálculo de penumbra, é impossível considerá-la como um ponto.

A ampliação é problema de geometria, e a nitidez ou definição é função da fonte emissora de radiação e da posição do material situado entre a fonte e o filme. Quando a fonte possui diâmetro considerável ou está muito próxima do material, a sombra ou imagem não é bem definida.

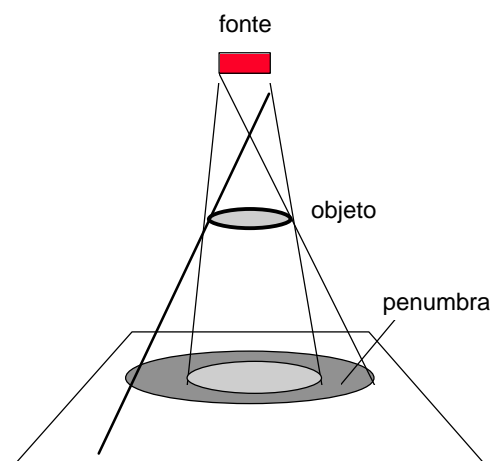
A forma de imagem poderá ser diferente da que tem o material se o ângulo do plano do material variar em relação aos raios incidentes, produzindo neste caso uma distorção da imagem.

Para obtenção de imagens bem definidas ou próximas ao tamanho do objeto, devemos ter:

- o diâmetro da fonte emissora de radiação deve ser o menor possível;
- a fonte emissora deve estar posicionada o mais afastado possível do material a ensaiar;
- o filme radiográfico deve estar mais próximo do material;
- o feixe de radiação deve se aproximar o mais possível, da perpendicularidade em relação ao filme;
- o plano do material e o plano do filme devem ser paralelos.

A distorção da imagem não pode ser totalmente eliminada em virtude dos formatos complicados das peças e dos ângulos de que se dispõem para a realização do ensaio radiográfico.

Por isso, geralmente as normas de inspeção radiográfica recomenda somente inspecionar peças com geometria simples, como junta soldada de topo e peças com espessura uniforme, para tornar mais fácil o controle da penumbra geométrica. O valor máximo da penumbra geométrica é recomendado por norma ou código de fabricação da peça a ser inspecionada. No entanto quando a penumbra é excessiva, outros parâmetros da qualidade da imagem também serão prejudicados,



Disposição Geométrica entre fonte-filme-objeto.

Cálculo da Distância Mínima Fonte-Filme

A distância mínima fonte-filme "Dff" pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$D_{ff} = \frac{F \times t}{U_g} + d$$

onde:

U_g = penumbra geométrica (ver tab.)

F = dimensão do ponto focal

t = espessura do objeto

D_{ff} = distância da fonte ao filme

d = maior distância da solda ou objeto ao filme, a ser considerada na radiografia, em mm, igual à espessura da solda ou do objeto que está sendo radiografado acrescida da distância entre a solda ou objeto, considerando sua face mais próxima ao filme distância do objeto de interesse ao filme.

Tabela de Penumbra Máxima Aceitável

Espessura do material pol. (mm)	Valor máx. da penumbra pol. (mm)
abaixo de 2 (51)	0,020 (0,5)
de 2 (51) até 3 (76)	0,030 (0,76)
acima de 3 (76) até 4 (102)	0,040 (1,0)
maior que 4 (102)	0,070 (1,78)

Referência Código ASME Sec. V Artigo 2

Sobreposição

A inspeção radiográfica de objetos planos, tal como juntas soldadas de topo a serem radiografadas totalmente, requerem cuidados especiais quanto a distância fonte-filme, pois nesses casos se essa distância for muito pequena seções da solda poderão não ser inspecionadas no seu volume total.

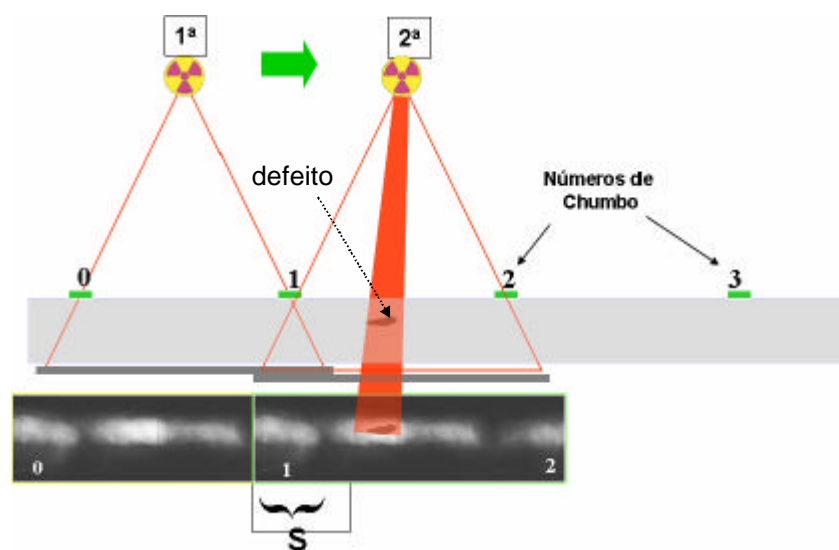
* A abreviação " U_g " vem do termo em inglês "unsharpness"

A sobreposição deverá ser comprovada através do uso de marcadores de posição que são letras ou números de chumbo fixados na superfície da peça, do lado da fonte de radiação, sempre que possível, e que serão projetados no filme radiográfico quando da exposição. A imagem dos marcadores poderão serem vistos como imagem no filme, evidenciando a sobreposição requerida.

Quando o objeto radiografado for plano ou quando a distância fonte-filme for menor que o raio de curvatura da peça, a sobreposição deverá ser calculada pela fórmula:

$$S = \frac{C \times e}{D_{ff}} + 6 \text{ mm}$$

onde: S = Sobreposição (mm)
 C = Comprimento do filme (mm)
 e = Espessura da peça (mm)
 Dff = Distância fonte-filme (mm)



Sobreposição entre filmes para a cobertura total. A sobreposição correta permite que o volume de solda seja totalmente inspecionado. Na prática, a análise da posição da imagem dos marcadores de posição na radiografia, indica se este procedimento foi adequado. A imagem dos marcadores de posição, podem ser utilizados como referência no filme para localizar na peça possíveis descontinuidades presentes. Utilizando uma máscara da imagem do objeto, feita com papel transparente, é possível registrar as indicações na área de interesse e transportar para a peça, tendo como referência os marcadores de posição.

Controle da Sensibilidade Radiográfica

Indicadores da Qualidade da Imagem - IQI's (Penetrâmetros)

Para que possamos julgar a qualidade da imagem de uma certa radiografia são empregadas pequenas peças chamadas Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), e que são colocadas sobre o objeto radiografado. Os IQI's são também chamados como "Penetrâmetros". O tipo ou norma de fabricação do IQI deve ser aquela que o projeto de construção do equipamento a ser radiografado requerer ou mesmo especificações contratuais.

O IQI é uma pequena peça construída com um material radiograficamente similar ao material da peça ensaiada, com uma forma geometricamente simples e que contem algumas variações de forma bem definidas tais como furos ou entalhes.

IQI ASME e ASTM tipo Furos

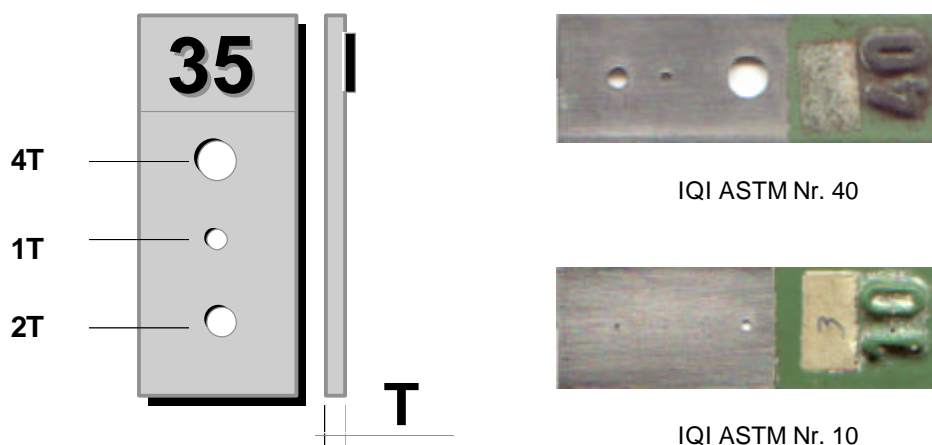
Os IQI's americanos mais comuns consistem em uma fina placa de metal contendo três furos com diâmetros calibrados. Os IQI's adotados pela Normas ASME, Sec V SE-1025 ou ASTM E-1025, possuem três furos cujos diâmetros são 4T, 2T, e 1T, onde "T" corresponde à espessura do IQI. Nesses IQI's, a sensibilidade é igual a 2 % da espessura da peça a ser radiografada.

Para avaliar a técnica radiográfica empregada, faz-se a leitura do menor furo, que é visto na radiografia. As classes de inspeção mais rigorosas são aquelas que requerem a visualização do menor furo do IQI. Dessa forma, é possível se determinar o nível de inspeção, ou seja, o nível mínimo de qualidade especificado para o ensaio.

O nível de inspeção é indicado por dois números em que o primeiro representa a espessura percentual do IQI e o segundo o diâmetro do furo que deverá ser visível na radiografia.

Os níveis comuns de qualidade são os seguintes:

- Nível 2 - 2T - o furo 2T de um IQI de 2 % da espessura do objeto deve ser visível.
- Nível 2 - 4T - o furo de 4T de um IQI de 2 % da espessura do objeto deve ser visível.
- Nível 1- 1T - o furo 1T de um IQI de 1 % da espessura do objeto deve ser visível (sensibilidade 1 %).
- Nível 1- 2T - o furo 2T de um IQI de 1 % da espessura do objeto deve ser visível (sensibilidade 1 %).
- Nível 4- 2T - o furo 2T de um IQI de 4 % da espessura do objeto deve ser visível (sensibilidade 4 %).



IQI ASME ou ASTM tipo furos

Esses IQI's devem ser colocados sobre a peça ensaiada, com a face voltada para a fonte e de modo que o plano do mesmo seja normal ao feixe de radiação.

Quando a inspeção for feita em soldas, o IQI será colocado no metal de base, paralelo à solda e a uma distância de 3 mm no mínimo.

No caso de inspeção de solda, é importante lembrar que a seleção do IQI inclui o reforço, de ambos os lados da chapa. Portanto, para igualar a espessura sob o IQI à espessura da solda, deverão ser colocados calços sob o IQI feitos de material radiograficamente similar ao material inspecionado. Para efeito da determinação da área de interesse não devem ser considerados os anéis ou tiras de cobre-junta caso existam.

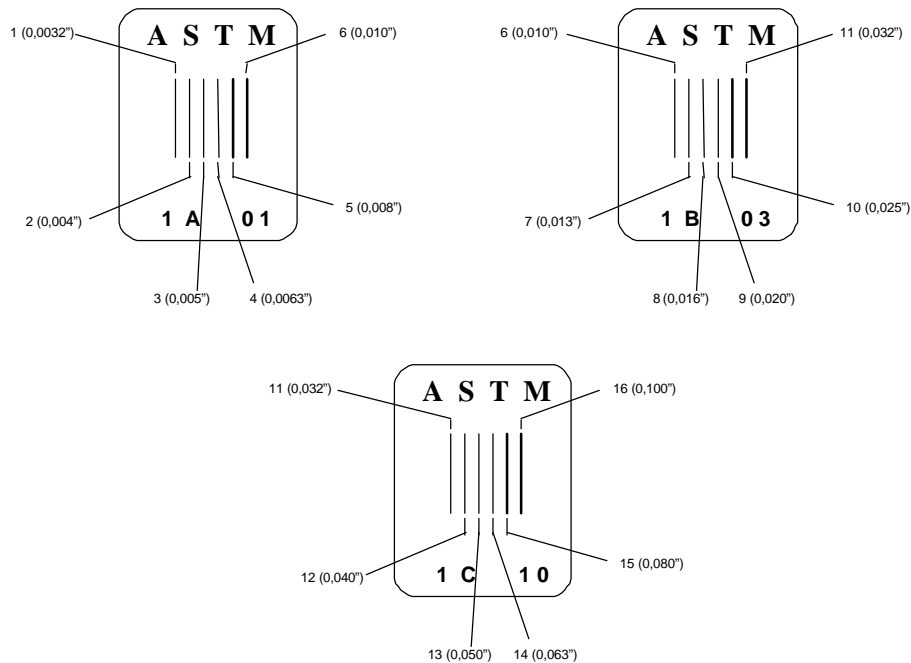
TABELA 3 - Seleção do IQI ASME / ASTM em função da Espessura do Material

Espessura do Material (mm)	Lado da Fonte			Lado do Filme		
	Desig. IQI	Furo essencial	Ident. do Fio (ϕ fio pol.)	Desig. IQI	Furo essencial	Ident. do Fio (ϕ fio pol.)
até 6,4 incl.	12	2T	5 (0,008)	10	2T	4 (0,006)
acima de 6,4 até 9,5	15	2T	6 (0,010)	12	2T	5 (0,008)
acima de 9,5 até 12,7	17	2T	7 (0,013)	15	2T	6 (0,010)
acima de 12,7 até 19,0	20	2T	8 (0,016)	17	2T	7 (0,013)
acima de 19,0 até 25,4	25	2T	9 (0,020)	20	2T	8 (0,016)
acima de 25,4 até 38,1	30	2T	10 (0,025)	25	2T	9 (0,020)
acima de 38,1 até 50,8	35	2T	11 (0,032)	30	2T	10 (0,025)
acima de 50,8 até 63,5	40	2T	12 (0,040)	35	2T	11 (0,032)
acima de 63,5 até 101,6	50	2T	13 (0,050)	40	2T	12 (0,040)

Fonte: Código ASME Sec. V , Artigo 2 , Tab. T-276 ou ASTM E-1025

IQI ASTM DE FIOS

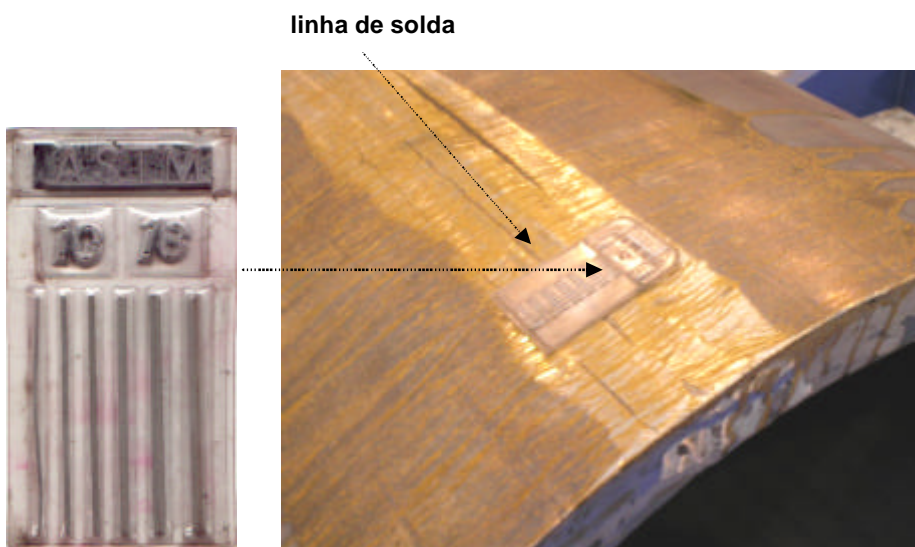
A norma ASTM E-747 descreve um tipo de IQI denominado tipo fios, que trata de um conjunto de 5 fios de material similar ao do material a ser radiografado com diâmetros diferentes, desde o mais fino até o mais grosso, selados em um envelope plástico transparente, contendo identificações e informações sobre o IQI. O IQI deve ser colocado sobre a área de interesse, no caso de soldas os fios devem estar aproximadamente perpendiculares ao cordão de solda. A seleção do IQI deve ser feita com base na espessura a ser radiografada, verificando qual o fio essencial que deverá ser visualizado na radiografia, conforme a tabela 3.



Alguns tipos mais usados de IQI's ASME ou ASTM tipo fios, para aço carbono. Os números indicam os diâmetros dos fios em polegadas, as letras "A", "B" e "C" identificam o conjunto de fios ou o próprio IQI



Uso do IQI ASTM tipo fios, numa junta soldada



Uso do IQI ASTM tipo fios, numa junta soldada com reforço esmerilhado

IQI TIPO FIOS CONFORME EN-462-1

O IQI fabricado conforme a norma EN-462 Part 1, é constituído por 7 arames, dispostos paralelamente, cujo material é radiograficamente similar ao material ensaiado.

A relação entre o diâmetro do arame e seu número respectivo é descrito na norma indicada. Os arames foram divididos em quatro grupos, a saber: W1 a W7, W6 a W12 e W10 a W16 e W13 a W19. A letra "W" do inglês "wire", significa tipo fios. Quanto maior o número, menor seu diâmetro, o que determina os níveis de qualidade especificado na tabela 4.



Cada IQI se caracteriza pelas identificações : Ex. 10 FE EN (ver fig. ao lado)

- a norma EN 462-1
- o fio mais grosso - W10
- a abreviatura do material do arame, no exemplo- FE.

A identificação completa, como descrita acima, pode ser abreviada como por exemplo: W 10 FE. O IQI EN-462 . O IQI deve ser colocado sobre a solda ou área de interesse, com o fio essencial na mesma direção do eixo principal de radiação, para garantir maior sensibilidade possível.

Em geral a projeção do fio essencial mais fino requer técnicas apuradas, como filme mais sensível de granulação muito fina e distância fonte filme maior.



IQI conforme a norma EN-462 Parte 1 (antiga DIN 54109 Part 1)

O IQI, sempre que possível, deve ser colocado sobre a solda de forma que os arames estejam perpendiculares à linha da solda, e de forma que sua imagem apareça na zona central da radiografia.

O número da qualidade de imagem é o número do arame mais fino visível na radiografia. O número de qualidade de imagem requerido, é definido para cada faixa de espessura de material. A classe de qualidade de imagem A ou B é função do rigor com que a inspeção deve ser feita e deve ser especificado pelo fabricante, código ou projeto do equipamento.

TABELA 4 - Seleção de IQI's EN-462 para Técnica de Parede Simples / Lado Fonte

CLASSE A (Padrão)		CLASSE B	
Espessura do Material (mm)	Fio Essencial	Espessura do Material (mm)	Fio Essencial
Até 1,2	W18	Até 1,2	W19
> 1,2 a 2,0	W17	> 1,2 a 2,5	W18
> 2,0 a 3,5	W16	> 2,5 a 4,0	W17
> 3,5 a 5,0	W15	> 4,0 a 6,0	W16
> 5,0 a 7,0	W14	> 6,0 a 8,0	W15
> 7,0 a 10	W13	> 7,0 a 10	W14
> 10 a 15	W12	> 8,0 a 12	W13
> 15 a 25	W11	> 12 a 20	W12
> 25 a 32	W10	> 20 a 30	W11
> 32 a 40	W 9	> 35 a 45	W10
> 40 a 55	W 8	> 45 a 65	W 9
> 55 a 85	W 7	> 65 a 120	W 8
> 85 a 100	W 6	> 120 a 200	W 7

Localização e Posicionamento dos IQI's

Sempre que possível, o IQI deverá ser colocado no lado da peça, voltado para a fonte. Caso isso não seja possível, o IQI poderá ser colocado no lado voltado para o filme, sendo nesse caso acompanhado de uma letra "F", de chumbo.

Apenas um IQI é geralmente usado para cada radiografia se variações de espessura provocarem uma variação de - 15 % ou + 30% da densidade vista através do corpo do IQI tipo furos ou adjacente ao fio essencial, na área de interesse de uma radiografia, será necessária colocação de um IQI adicional para cada área excepcional, conforme recomenda o Código ASME Sec.V Artigo 2.

Em radiografia de componentes cilíndricos (tubos, por exemplo) em que são expostos mais de um filme por sua vez, deverá ser colocado um IQI por radiografia. Apenas no caso de exposições panorâmicas, em que todo o comprimento de uma junta circunferencial é radiografado com uma única exposição, é permitida a colocação de três IQI igualmente espaçados. A disposição em círculo de uma série de peças iguais, radiografadas simultaneamente, não é considerada como panorâmica para efeito de colocação de IQI, sendo necessário que a imagem do mesmo apareça em cada uma das radiografias.

Quando porções de solda longitudinal forem radiografadas simultaneamente com a solda circunferencial, IQI adicionais devem ser colocados nas soldas longitudinais, em suas extremidades mais afastadas da fonte.

Para componentes esféricos, onde a fonte é posicionada no centro do componente e mais de um filme é exposto simultaneamente deverão ser usados, pelo menos 3 IQI's, igualmente espaçados, para cada 360 graus de solda circunferencial mais um IQI adicional para cada outro cordão de solda inspecionado simultaneamente.

Controle da Radiação Retroespalhada ou Retroespalhamento

Quando abordamos a interação da radiação com a matéria vimos que o espalhamento é inerente ao processo de absorção da radiação. São radiações de pequena energia que emergem da peça em direção aleatória. Qualquer material, tal como, o objeto, o chão, as paredes ou outros materiais que recebem o feixe direto de radiação, são fontes de radiação espalhada ou dispersa.

A radiação espalhada é também função da espessura do material radiografado, constituindo a maior porcentagem do total de radiação que atinge o filme, nas radiografias de materiais espessos. Como exemplo, podemos afirmar que ao se radiografar uma peça de aço de mm de espessura, a radiação espalhada que emana da peça é quase duas vezes mais intensa que a radiação primária que atinge o filme.

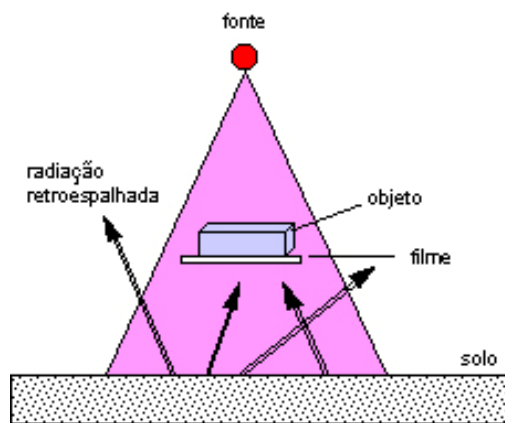
A radiação espalhada, portanto, é um fator importante, que produz uma sensível diminuição no contraste do objeto.

As telas intensificadoras de chumbo diminuem sensivelmente o efeito das radiações espalhadas, particularmente aquelas que atingem o filme e que possuem baixas energias. Esse efeito contribui para a máxima clareza de detalhes na radiografia.

O uso de fonte de radiação com altas energias, propicia não somente o aparecimento das radiações dispersas na peça, como também as radiações retroespalhadas, que da mesma forma empobrecem com a imagem no filme.

As radiações retroespalhadas podem ser atenuadas com o uso das telas traseiras, ou filtros que são lâminas de materiais absorvedores (cobre, alumínio, chumbo), dispostos de modo a proteger o filme.

Para que exista um controle das radiações retroespalhadas pelo operador, este deve fixar na parte trazeira do chassi, uma letra "B" de chumbo. Caso as radiações retroespalhadas sejam muito intensa, a letra "B" será fortemente projetada na imagem do filme, aparecendo como uma imagem clara no filme, indicando que radiações atingiram o filme por detrás.



Radiação Retro-espalhada

Cálculo do tempo de Exposição do Filme Radiográfico

Lei do Inverso do Quadrado da Distância

Quando tratamos dos filmes radiográficos, dissemos que a exposição é representada pelo produto da intensidade da radiação pelo tempo, para uma certa energia em particular. Sabemos, também, que a intensidade de radiação que é emitida pela fonte não é totalmente recebida pelo filme, pois uma parcela é absorvida pelo objeto que será sendo radiografado. Acrescentaremos, agora, que mesmo que não houvesse um objeto entre a fonte e o filme, a intensidade de radiação que o atinge seria menor que aquela emitida pela fonte.

Esse fenômeno é explicado pela Lei do Inverso do Quadrado. Sabemos que a intensidade da radiação é definida em termos da quantidade de raios que são gerados em um determinado intervalo de tempo.

Ora, sabemos que a radiação se espalha após ser emitida pela fonte, portanto o mesmo número de raios gerados diverge, ocupando áreas cada vez maiores. Desse modo, um objeto próximo à fonte de radiação, recebe uma quantidade maior de raios, porque recebe um feixe de radiação mais concentrado.

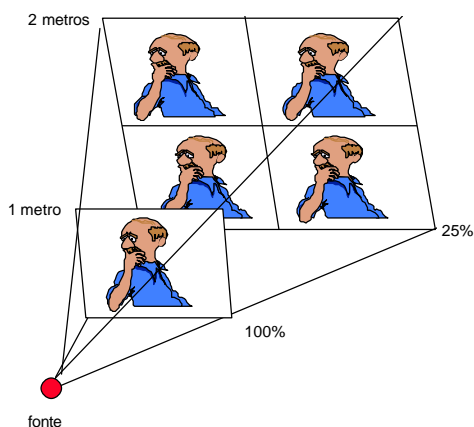
Algebricamente, a Lei do Inverso do Quadrado, pode ser escrita como segue:

$$\frac{I(1)}{I(2)} = \frac{[D(2)]^2}{[D(1)]^2}$$

onde: $I(1)$ = intensidade da radiação a uma distância $D(1)$
 $I(2)$ = intensidade da radiação a uma distância $D(2)$

Uma vez definida essa lei, podemos notar que se dobrarmos a distância ao filme, a intensidade de radiação que o atingirá será $\frac{1}{4}$ de intensidade original. Como sabemos que a exposição é proporcional à intensidade da radiação, podemos dizer que ao dobrar a distância do filme em relação a fonte, precisamos de uma exposição 4 vezes maior para obtermos um filme com a mesma densidade inicial. Isso significa que é necessário um aumento no tempo de exposição, ou na corrente do tubo, para compensar a diminuição da intensidade.

Esse fato explica porque não é possível se compensar o tamanho da fonte com uma distância foco-filme maior, uma vez que esse aumento de distância provoca um incremento muito grande no tempo de exposição.



Lei do Inverso do Quadrado da Distância.

Curvas de exposição para gamagrafia

O tipo mais comum de curva de exposição é o que correlaciona o fator de exposição com a atividade da fonte, tempo de exposição e distância fonte-filme. Numericamente, o fator de exposição é representado pela formulação:

$$t = \frac{Dff^2 \times FE}{A}$$

onde:

FE = fator de exposição;
 A = atividade da fonte em milicuries;
 t = tempo de exposição em minutos;
 Dff = distância fonte-filme em centímetros.

Exemplo de aplicação:

Suponhamos, que se realiza um ensaio, por gamagrafia, de uma chapa de aço, com 1,5 cm de espessura, para obter uma densidade radiográfica de 2,0. Para este ensaio dispõe-se de uma fonte de Ir-192 com atividade 20 Ci e filme Classe 1.

Pelo gráfico de exposição abaixo, conclui-se que para 1,5 cm de espessura de aço, e densidade radiográfica de 2,0, corresponde um fator de exposição igual a 50. Lembrando que 20 Ci correspondem a 20.000 milicuries.

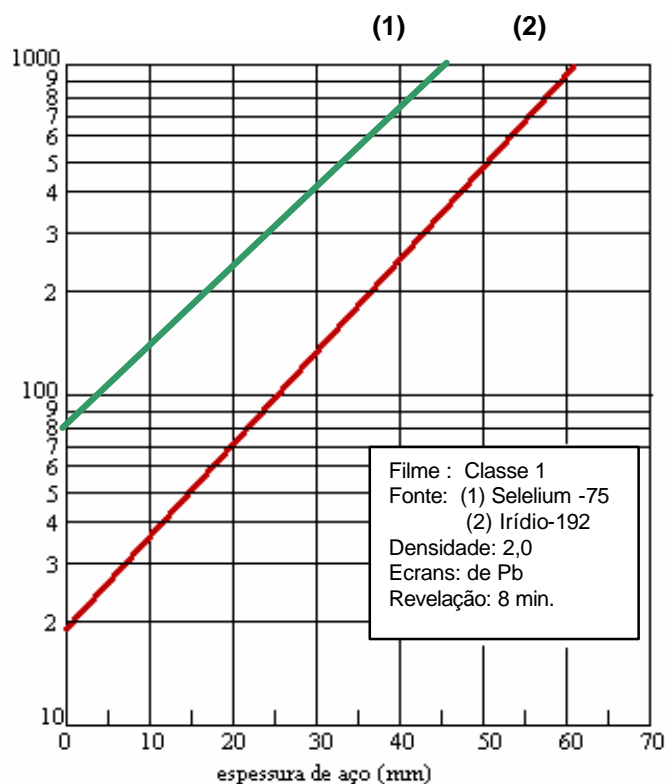
Tem-se:

$$t = \frac{D_{ff}^2 \times 50}{20.000}$$

Observa-se que podemos fixar uma das duas variáveis, tempo de exposição ou distância fonte-filme. Quando o tempo de exposição não é muito importante, pode-se escolher uma distância fonte-filme adequada, para melhorar a qualidade radiográfica.

Supondo que a distância fonte-filme é 60 cm, tem-se:

$$t = \frac{3600 \times 50}{20.000}, \quad \boxed{t = 9,0 \text{ minutos}}$$



Fator de Exposição para Selênio-75 e Irídio-192, para aços carbono

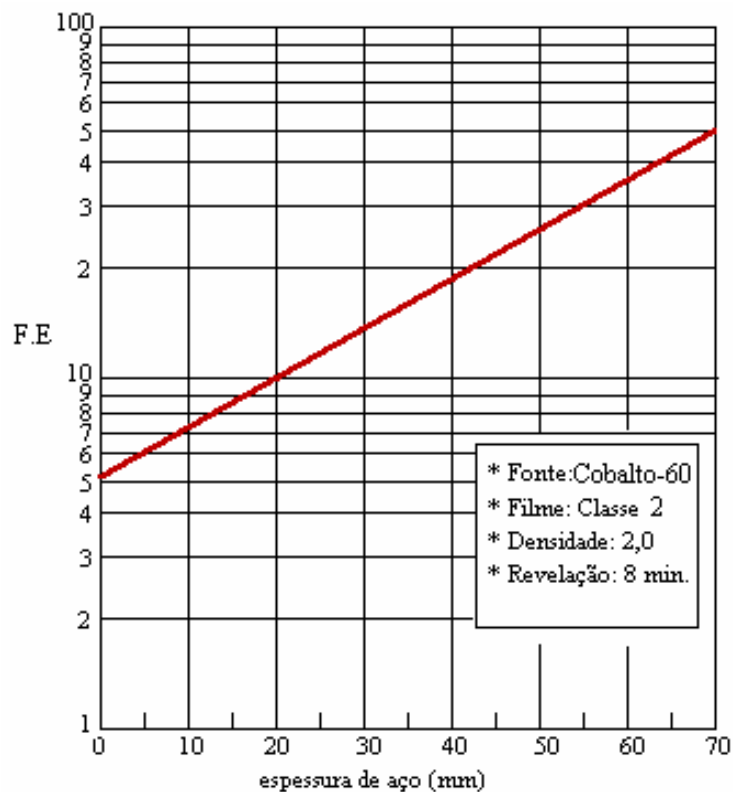
Existem outras formas de calcular o tempo de exposição para fontes radioativas, utilizando as curvas de exposição Curies-hora e Espessura de Aço, nessas curvas figuram várias retas representando diferentes densidades radiográficas e elas só podem ser realmente eficientes quando forem obedecidas as condições de revelação, de telas intensificadoras e tipo de filme.

Quando for muito pequena ou muito grande a distância fonte-filme utilizada na construção da curva de exposição pode-se alterá-la levando em conta a lei do inverso do quadrado da distância.

Para a determinação de um tempo de exposição é necessário, primeiramente a espessura da peça a ensaiar. A seguir, escolhe-se a fonte radioativa e o filme mais apropriado para esse isótopo.

Determina-se a atividade da fonte radioativa na hora do ensaio e fixa-se a distância fonte-filme. A seguir, determina-se o tempo de exposição.

Pode ocorrer, e na prática de fato ocorre muitas vezes, que o tempo de exposição calculado não é adequado porque o fabricante mudou as características de seus filmes, ou porque elas variam em função dos parâmetros e variáveis de processamento. Em qualquer desses casos, só a experiência prática ensinará introduzir modificações oportunas.



Fator de Exposição para Co-60 , para aços carbono

Curvas de exposição para radiografia

O primeiro fator a ser determinado em uma exposição com Raios X, é a voltagem (energia) a ser usada. Essa voltagem deverá ser suficiente para assegurar ao feixe de radiação energia suficiente para atravessar o material a ser inspecionado. Por outro lado, uma energia muito alta irá causar uma diminuição no contraste do objeto, diminuindo a sensibilidade da radiografia.

De forma a tornar compatíveis esses dois fatores, foram elaborados gráficos que mostram a máxima voltagem a ser usada para cada espessura de um dado material. É muito importante lembrar que, como materiais diferentes absorvem quantidades diferentes de radiação, existem gráficos para cada tipo de material a ser radiografado.

É importante notar que cada gráfico fixa uma série de fatores como segue:

- material inspecionado
- tipo e espessura das telas
- densidade óptica do filme
- distância do foco-filme
- tipo de filme usado
- tempo e temperatura de revelação do filme

Se qualquer um desses fatores for alterado, o gráfico perderá a sua validade, fornecendo resultados imprecisos. Outro fator importante, é que esses gráficos somente são válidos, para um determinado aparelho e modelo.

Normalmente, os aparelhos de Raios X, são fornecidos com uma série de gráficos que permitem a sua utilização em uma vasta gama de situações. A escolha da corrente e ou do tempo de exposição, prende-se à capacidade do aparelho, usando-se o que for mais conveniente.

Relação entre Tempo e Corrente Elétrica

Em geral podemos relacionar a exposição devido aos Raios X com a corrente (M) e tempo de exposição (T). Podemos dizer também que a intensidade de radiação, requerida para uma certa exposição, é inversamente proporcional ao tempo de exposição.

$$\frac{M(1)}{M(2)} = \frac{T(2)}{T(1)}$$

onde: T(1) = tempo de exposição necessário ao se usar uma corrente M(2) e T(2) = tempo de exposição necessário ao se usar uma corrente M(1)

Exemplo 1: Se obtemos uma boa radiografia usando uma corrente de 5 mA e um tempo de 10 minutos, qual corrente necessária para se reduzir o tempo de exposição a 2 minutos ?

temos:

$$\begin{array}{ll} M(1) = 5 \text{ mA} & T(2) = 2 \text{ min} \\ T(1) = 10 \text{ min} & M(2) = ? \end{array}$$

portanto:

$$\frac{5}{M(2)} = \frac{2}{10}, \quad \boxed{M(2) = 25 \text{ mA.}}$$

Relação entre a Corrente Elétrica e Distância

A intensidade requerida para uma certa exposição é diretamente proporcional ao quadrado da distância foco-filme.

Desse modo, podemos escrever:

$$\text{para Raios-X:} \quad \frac{M(1)}{M(2)} = \frac{[D(1)]^2}{[D(2)]^2}$$

onde:

D(1) = distância usada para uma radiografia feita com uma corrente M(1) ou com uma fonte de atividade A(1).

D(2) = distância usada para uma radiografia feita com uma corrente M(2) ou com uma fonte de atividade A(2).

Exemplo 1: Uma certa radiografia é feita usando-se uma corrente de 5 mA e uma distância de 120 cm. Pergunta-se qual a corrente necessária, se aumentarmos a distância para 150 cm?

temos:

$$M(1) = 5 \text{ mA}$$

$$M(2) = ?$$

$$D(1) = 120 \text{ cm}$$

$$D(2) = 150 \text{ cm}$$

portanto:

$$\frac{5}{M(2)} = \frac{[120]^2}{[150]^2},$$

$$M(2) = 7,8 \text{ mA}$$

Relação Tempo - Distância

O tempo de exposição requerido para uma certa radiografia, é diretamente proporcional ao quadrado da distância. Matematicamente podemos descrever:

$$\frac{T(1)}{T(2)} = \frac{[D(2)]^2}{[D(1)]^2}$$

Exemplo:

Uma boa radiografia é obtida com uma distância foco-filme de 30 cm e tempo de exposição de 10 min.. Se alterarmos para 24 cm a distância foco-filme, qual a mudança necessária no tempo de exposição?

temos que:

$$T(1) = 10 \text{ min}$$

$$D(1) = 30 \text{ cm}$$

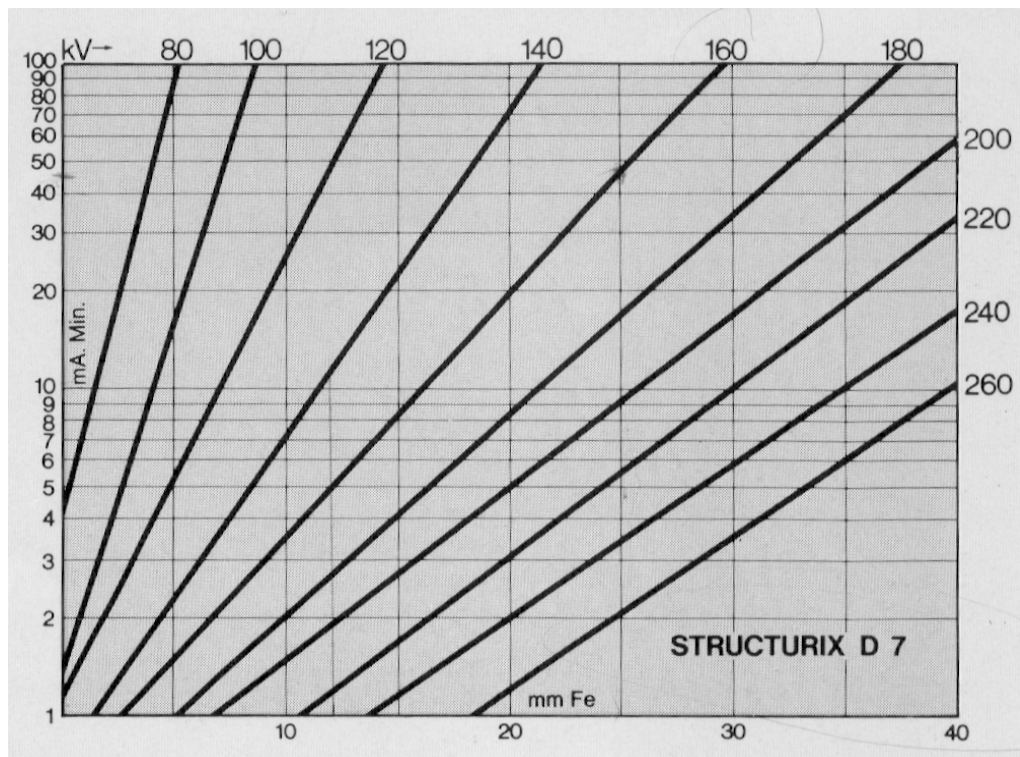
$$T(2) = ?$$

$$D(2) = 24 \text{ cm}$$

portanto:

$$\frac{10}{T(2)} = \frac{[30]^2}{[24]^2}$$

$$T(2) = 6,4 \text{ minutos}$$



Exemplo de Curva de Exposição para Raios X , direcional, para aço carbono filme AGFA, Tipo D7 (classe 2) , com DFF=700 mm.

O cálculo do tempo de exposição de filmes para aparelhos de Raios-X pode ser calculado com auxílio do gráfico , fornecido pelo fabricante do aparelho ou do filme.

Exemplo:

Pretende-se radiografar uma peça em aço com 25 mm de espessura, utilizando-se 200 kV e 5 mA a 70 cm de distância fonte-filme, utilizando-se filme Classe 2 (D7). Qual o tempo de exposição ?

Solução: Analisando o gráfico da figura anterior, temos que, para 25 mm uma exposição de 9 mA.min. Assim para uma amperagem de 5mA, o tempo será 1,8 min, ou seja 1 minuto e 48 segundos.

Se caso o operador desejar alterar a distância, que é um parâmetro fixo do gráfico, deverá ser utilizado as relações matemáticas estudadas anteriormente.

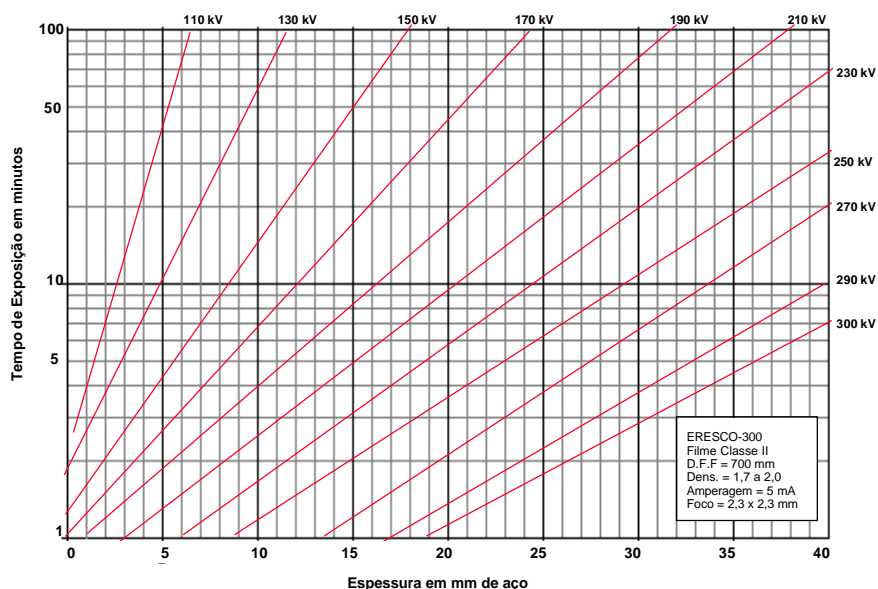


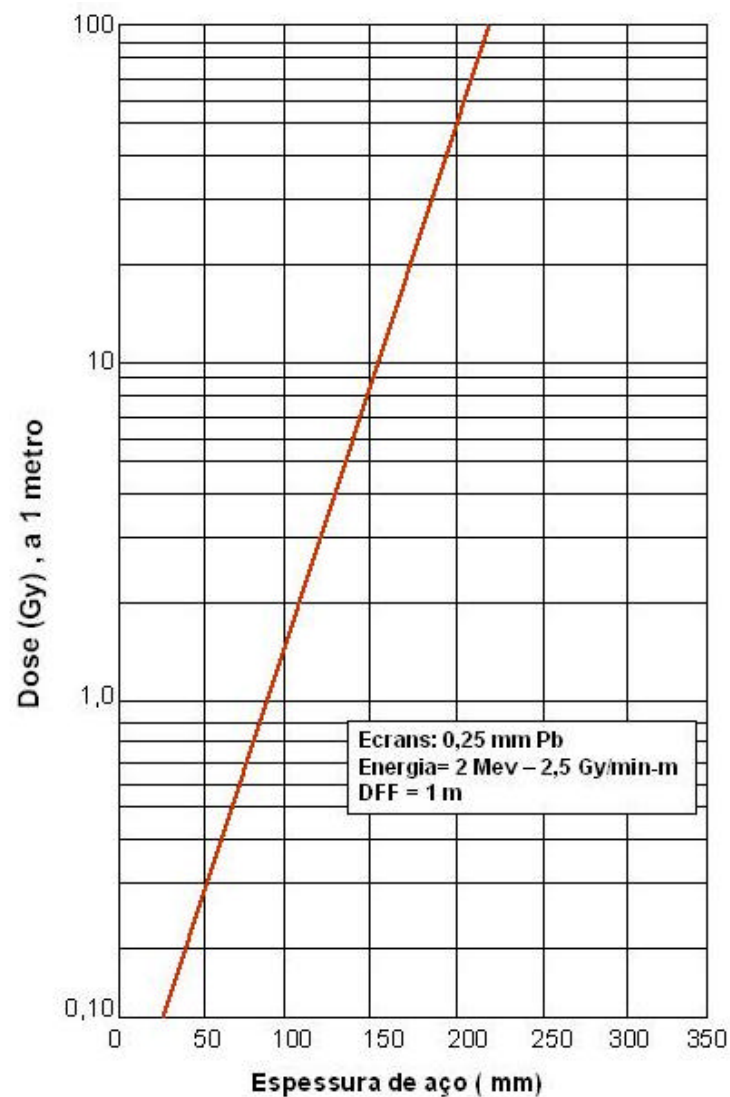
Gráfico para cálculo do tempo de exposição para Raios-X

Cedido pela empresa VOITH PAPER Máquinas e Equipamentos Ltda

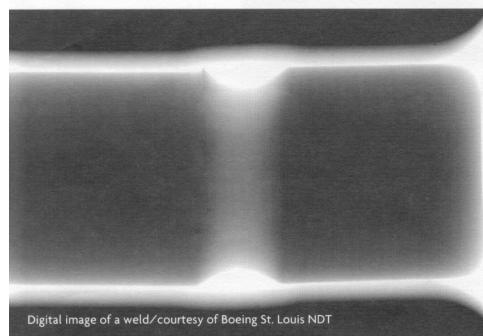
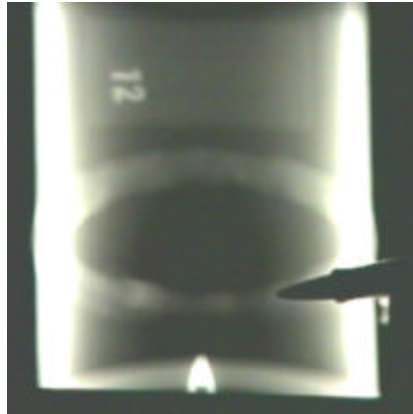
O gráfico acima permite calcular diretamente o tempo de exposição para Raios-X, tendo os alguns parâmetros radiográficos fixados, tais como: Aparelho de raios-X direcional modelo Eresco 300 da Seifert, filmes Classe 2, distância fonte-filme de 700 mm, corrente 5 mA, densidade radiográfica prevista de 1,7 a 2,0 material aço carbono.

Curva de Exposição para Aceleradores

Para os aceleradores lineares industriais, os fabricantes fornecem uma curva de exposição que leva em consideração a espessura em aço do objeto e a dose em Gray necessária para sensibilizar o filme radiográfico Classe 2 na densidade 2, como mostrado no gráfico a seguir.



O gráfico acima foi reproduzido a partir do catálogo do fabricante VARIAN , aparelho modelo LINATRON 200A. As características do aparelho estão descritas no parágrafo "Aceleradores Lineares". O técnico deve verificar a espessura do objeto, e identificar no gráfico a dose correspondente à espessura. No painel de controle, ajusta-se a dose encontrada no gráfico, o tempo de exposição é automaticamente ajustado no aparelho.



Radiografia de uma solda de emenda de um tubo pela técnica PD-VD

Exemplo de aplicação do Gráfico: Uma peça em aço carbono com 30 mm de espessura deve ser radiografada com filme Classe 2 , distância fonte filme de 700 mm, usando um aparelho Eresco 300, usando 230 kV. Qual o tempo de exposição ?

Solução: Observando o gráfico acima, temos que para 30 mm , o tempo de exposição deve ser aproximadamente de 20 minutos.



Técnico de uma companhia aérea preparando a inspeção radiográfica da turbina do avião, utilizando um aparelho de Raios X. A inspeção radiográfica das aeronaves em operação é uma ferramenta indispensável para controlar os componentes , e verificar se os mesmos permanecem na mesma condição de fabricação.

Foto extraída do catálogo da Seifert
Ensaio Radiográfico da Turbina de um avião

Avaliação da Qualidade da Imagem

Identificação do Filme

Na identificação do filme deve conter informações importantes tais como: data do ensaio, identificação dos soldadores, no caso de juntas soldadas, identificação da peça e local examinado, número da radiografia, identificação do operador e da firma executante.

Todas essas informações devem aparecer claramente no filme radiográfico, para permitir a rastreabilidade do ensaio. Tais informações poderão ser feitas a partir de letras e números de chumbo dispostos sobre o porta-filmes exposto juntamente com o filme registrando-o de modo permanente. Poderá também ser utilizado o sistema de telas fluorescentes que consiste em escrever no papel vegetal ou similiar toda a identificação do filme e o mesmo colocado junto a tela fluorescente. Este conjunto é montado previamente junto ao filme radiográfico entre a tela traseira, na câmara escura, e posteriormente exposto, registrando de modo permanente no filme, toda a identificação.

Verificação da Densidade Radiográfica

A densidade óptica deve ser medida a partir de aparelhos eletrônicos (densitômetro), ou fitas densitométricas calibradas, especialmente feitas para esta tarefa. A densidade deve ser sempre medida sobre área de interesse, por exemplo, sobre a imagem do cordão de solda, no caso de juntas soldadas, e o valor numérico é normalmente recomendado uma faixa de 1,8 até 4,0 para radiografias feitas com Raios X e de 2,0 a 4,0 para Raios Gama, sendo que a faixa mais usual é de 2,0 a 3,5. Procedimentos para calibração do densitômetro e da fita densitométrica são recomendados pelo **ASME Sec. V , Art.2.**

Defeitos de Processamento do Filme

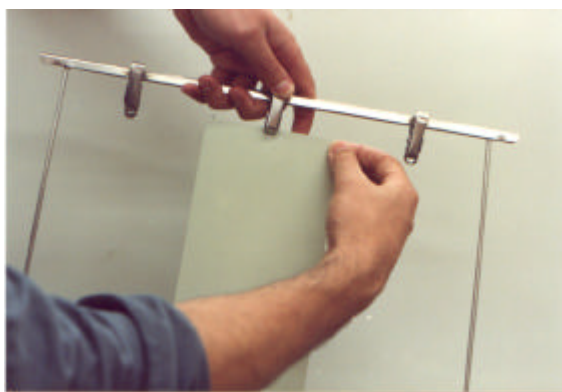
O trabalho em câmara escura após a exposição do filme corresponde a parte mais importante do processo radiográfico, pois caso ocorram falhas técnicas durante o processamento do filme, todo o serviço de preparação de exposição do filme será perdido. Tais falhas ocorrem na maioria dos casos por manuseio inadequado do filme nesta fase e podem resultar em:

- Manchas

Geralmente aparecem em forma arredondada que no caso esteja sobre a área de interesse poderá mascarar descontinuidades inaceitáveis. Tais manchas decorrem de pequenas gotas de água que é visível no filme somente contra a luz.

- Riscos

Geralmente ocorrem por ação mecânica sobre a película superficial do filme, decorrente da sua manipulação durante a preparação e processamento. Tais riscos, visíveis sobre filme contra a luz, confundem-se com trincas, sendo assim inaceitáveis, devendo o filme ser repetido.



A manipulação do filme durante seu processamento pode gerar riscos e manchas inaceitáveis

- Dobras

Assim como os riscos as dobras aparecem no filme como imagens escuras e bem pronunciadas, também decorrentes do manuseio do filme antes e durante a exposição. Por exemplo podem ocorrer com frequência em peças curvas, com raios pequenos, em que o operador para manter o porta-filme junto a peça deve força-lo a acompanhar a superfície, resultando numa dobra no filme que será observada após seu processamento.

Análise do IQI

O indicador de qualidade da imagem ou IQI, deve aparecer na radiografia de maneira clara que permita verificar as seguintes informações: se o número do IQI está de acordo com a faixa de espessura radiografada, se o tipo de IQI está de acordo com a norma de inspeção, se o furo ou arame essencial são visíveis sobre a área de interesse, se o posicionamento foi corretamente feito, e finalmente em se tratando do IQI ASME ou ASTM, se a densidade no corpo do IQI está dentro da tolerância em relação a área de interesse.



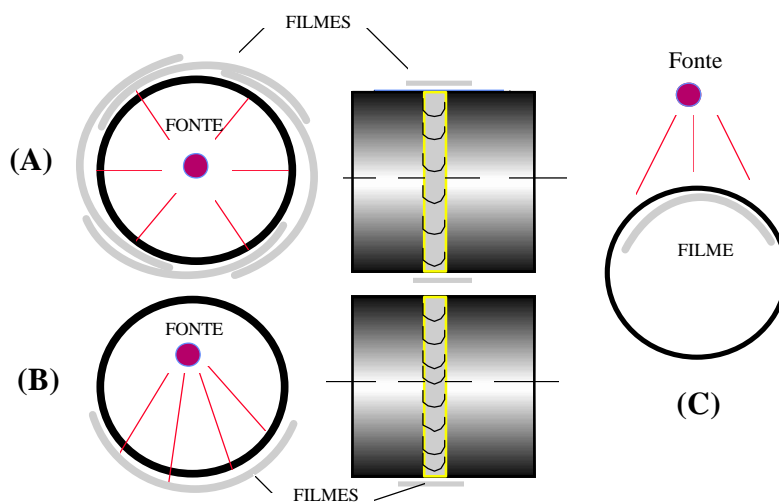
Preparação da exposição radiográfica, fixação do IQI tipo fios sobre a solda a ser inspecionada

Técnicas de Exposição Radiográfica

As disposições e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça, e o filme, devem seguir algumas técnicas especiais tais que permitam uma imagem radiográfica de fácil interpretação e localização das descontinuidades rejeitadas. Algumas destas técnicas que apresentamos a seguir são largamente utilizadas e recomendadas por normas e especificações nacionais e internacionais.

Técnica de Parede Simples (PSVS)

Essa técnica é assim chamada pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e filme, somente a seção da peça que está próxima ao filme será inspecionada e a projeção será em apenas uma espessura do material. É a principal técnica utilizada na inspeção radiográfica, e a mais fácil de ser interpretada.

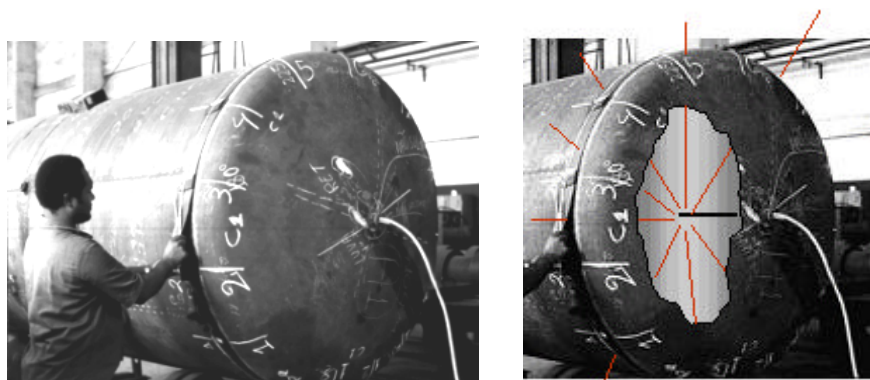


Técnica de exposição parede simples - vista simples

Exposição Panorâmica

Esta técnica constitui um caso particular da técnica de parede simples vista simples descrita acima, mas que proporciona alta produtividade em rapidez num exame de juntas soldadas circulares com acesso interno.

Na técnica panorâmica a fonte de radiação deve ser centralizada no ponto geométrico equidistante das peças e dos filmes, ou no caso de juntas soldadas circulares a fonte deve ser posicionada no centro da circunferência. Com isso numa única exposição da fonte, todos os filmes dispostos a 360 graus serão igualmente irradiados, possibilitando assim o exame completo das peças ou das juntas.



Técnica Radiográfica Panorâmica numa solda entre cilindro fundo de um vaso de pressão. Observe as marcações das posições dos filmes radiográficos ao redor da solda na foto do lado esquerdo e a posição da fonte no interior do vaso na foto do lado direito.

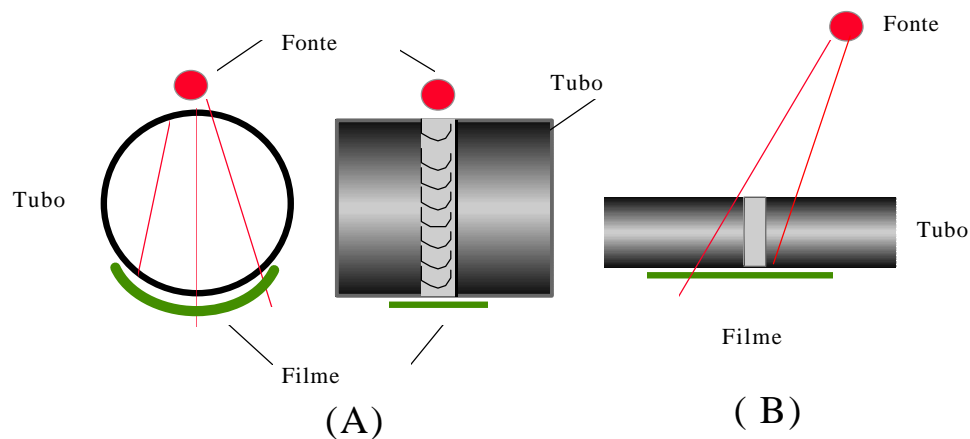
Técnica de Parede Dupla

Técnica de Parede Dupla Vista Simples (PDVS):

Nesta técnica de parede dupla vista simples, o feixe de radiação, proveniente da fonte, atravessa duas espessuras da peça, entretanto projeta no filme somente a seção da peça que está mais próxima ao mesmo.

Freqüentemente esta técnica é utilizada em inspeções de juntas soldadas, as quais não possuem acesso interno, por exemplo tubulações com diâmetros maiores que 3.½ polegadas, vasos fechados, e outros.

É importante lembrar que esta técnica requer que a radiação atravesse duas espessuras da peça e portanto o tempo de exposição será maior que a inspeção pela técnica de parede simples. Assim, esta opção deverá ser selecionada quando outra técnica não for possível ou permitida.



Técnica de exposição parede dupla e vista simples (A)
e parede dupla e vista dupla (B)

Técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD)

Neste caso o feixe de radiação proveniente da fonte, também atravessa duas espessuras, entretanto projetará no filme a imagem de duas seções da peça, e serão objetos de interesse. Nesta técnica o cálculo do tempo de exposição deve ser levado em conta as duas espessuras das paredes que serão atravessadas pela radiação.

A técnica de parede dupla e vista dupla (PDVD) é freqüentemente usada para inspeção de juntas soldadas em tubulações com diâmetros menores que 3.½ polegadas.

Quantidade de Filmes por Solda Circular em Tubos Totalmente Radiografado
em Vista Simples

Diâmetro Externo do Equipamento ou Tubo	Quantidade de Filmes
a) acima de 89 mm (3,500") até 219 mm (8,625")	a) 4 filmes com exposições separadas de 90°, dimensões 216 mm (máximo) x 89 mm (8 1/2" x 3 1/2") ou 216 mm (máximo) x 114 mm (8 1/2" x 4 1/2"), com a fonte locada externamente e o filme internamente ao equipamento ou tubo; 3 ou 4 filmes com exposições separadas de 120 ou 90°, respectivamente, dimensão 216 mm x 89 mm (8 1/2" x 3 1/2") ou 216 mm x 114 mm (8 1/2" x 4 1/2"), com a fonte e filme locados externamente ao equipamento ou tubo.
b) de 219 mm (8,625") até 457mm (18")	b) 4 filmes com exposições separadas de 90°, dimensões 432 x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
c) de 457 mm (18") até 610 mm (24")	c) 5 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 114 mm (17" x 4 1/2").
d) de 610 mm (24") até 737 mm (29")	d) 6 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
e) de 737 mm (29") até 864 mm (34")	e) 7 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").
f) de 864 mm (34") até 991 mm (39")	f) 8 filmes com exposições igualmente separadas, dimensão 432 mm x 89 mm (17" x 3 1/2") ou 432 mm x 114 mm (17" x 4 1/2").

Fonte: Norma Petrobras - N-1595 d

Interpretação dos Resultados

Aparência das Descontinuidades

As descontinuidades são quaisquer variações na homogeneidade de uma peça ou material, tanto em sua estrutura como em sua forma.

Através da análise da influência que a descontinuidade terá sobre a utilização do material, ou do equipamento, é que poderemos definir critérios de aceitabilidade. As descontinuidades podem ser atribuídas a diferentes causas. Elas podem ocorrer durante o próprio processo de fabricação do material (por exemplo: durante a fundição), durante o processamento (por exemplo: durante a laminação, forjamento, usinagem, etc.), ou durante o uso de equipamento, em serviço (por exemplo: durante a aplicação de esforços mecânicos ou corrosão). As descontinuidades típicas mais comuns são:

- **Rupturas**

São descontinuidades típicas de processamento ocorrem tanto em materiais ferrosos como em materiais não ferrosos. Elas consistem em cavidades, pequenas e irregulares, superficiais, geralmente paralelas com os grãos. As rupturas ocorrem durante operação de forjamento, extrusão ou laminação, devido a temperaturas muito baixas, material excessivamente trabalhado ou por movimentação do material durante o processo.

O ensaio radiográfico não é normalmente usado para a detecção deste tipo de descontinuidade. Fatores tais como a direção da ruptura, suas dimensões e a espessura do material diminuem a eficiência da radiografia.

- **Trincas de Filete**

São descontinuidades que ocorrem com o uso do equipamento, são trincas superficiais, que se localizam na junção dos filetes, e que se propagam para o inferior da peça.

As trincas em filetes ocorrem quando houver uma brusca mudança de diâmetros, tal como a que ocorre na união da cabeça de um parafuso com a haste, onde existe um grande acúmulo de tensões. Esses defeitos não são normalmente detectados pelo ensaio radiográfico. As descontinuidades superficiais desse tipo são de difícil avaliação na radiografia devido à pequena dimensão da trinca em relação a espessura do material.

- **Trincas de Esmerilhamento**

São descontinuidades que ocorrem durante o processamento das peças, tanto em materiais ferrosos quanto não ferrosos. São descontinuidades de pouca profundidade e muito finas, semelhantes a trincas ocasionadas por tratamento térmico. Geralmente, mas não sempre, ocorrem em grupos, e geralmente em ângulos retos com a direção de usinagem.

Esse tipo de trinca são encontradas em materiais que sofreram tratamento térmico, endurecimento superficial e de materiais cerâmicos que sofrem usinagem. São trincas térmicas causadas por superaquecimento localizado, na superfície usinada.

Esse superaquecimento é causado por falha de refrigeração, velocidade muito alta ou alta velocidade de corte.

- **Trincas de Tratamento Térmico**

São falhas de processamento que ocorrem em materiais ferrosos e não ferrosos, fundidos e forjados. São falhas superficiais, geralmente de grande profundidade e em forma de forquilha. Originam-se em áreas onde ocorrem bruscas mudanças de espessura, ou áreas onde outras descontinuidades estejam expostas à superfície do material. São causados por tensões podem exceder a tensão de ruptura do material causando as trincas.

Os ensaios mais recomendados para a detecção desse tipo de falhas são líquidos penetrantes e partículas magnéticas. A radiografia não é normalmente usada para detectar defeitos superficiais.

- **Escamas de Hidrogênio**

Ocorrem durante o processamento característico dos materiais ferrosos. Consistem em descontinuidades pequenas e finas, geralmente aos grãos. Aparecendo como fissuras, em uma superfície fraturada, são representadas por áreas com um brilho prateado. As escamas são fissuras internas atribuídas a tensões produzidas por uma transformação localizada por um decréscimo na solubilidade do hidrogênio durante o resfriamento após o trabalho a quente.

São geralmente encontradas apenas em aços forjados de alta liga. Também são difíceis de serem detectadas por Radiografia.

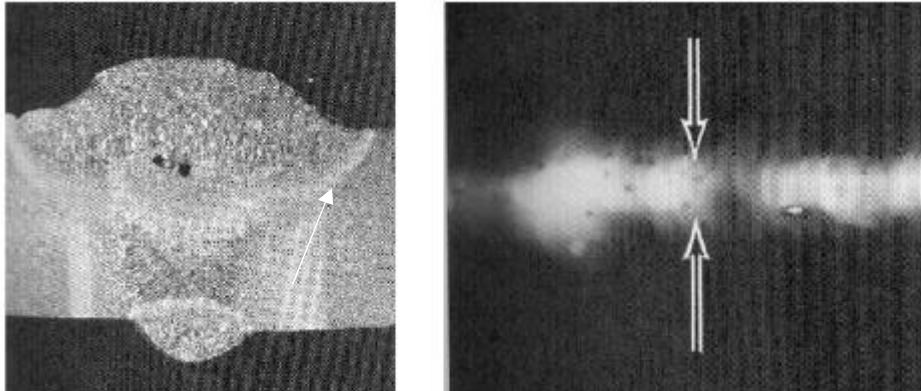
Descontinuidades Internas em Juntas Soldadas

- **Inclusão Gasosas (Poros)**

Durante a fusão da solda, pode haver o aprisionamento da mesma, devido a várias razões como o tipo de eletrodo utilizado, má regulagem do arco, deficiência na técnica do operador, umidade etc. Estas inclusões gasosas podem ter a forma esférica ou cilíndrica.

Sua aparência radiográfica é sob a forma de pontos escuros com o contorno nítido. Algumas destas inclusões gasosas assumem uma forma alongada, cilíndrica e sua imagem radiográfica vai depender de uma orientação em relação ao feixe de radiação incidente.

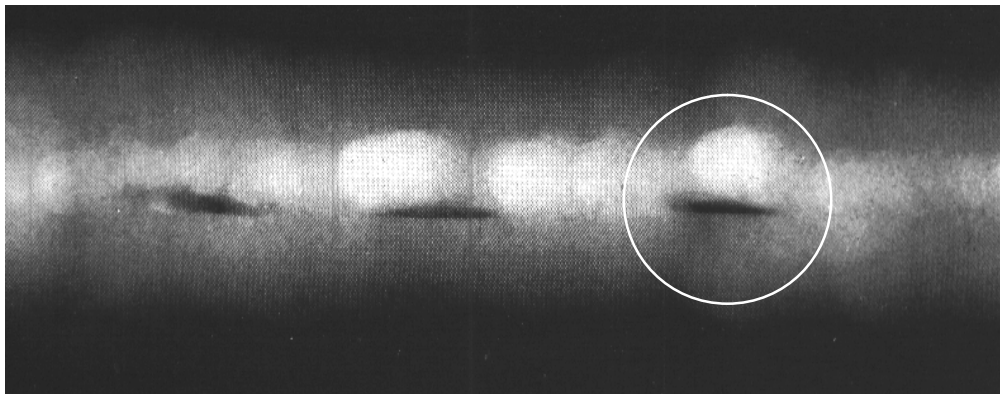
Outra forma típica de inclusão é aquela que tem a aparência de um galho ramificado, chamada, também, de porosidade Vermiforme.



Solda contendo porosidade
(Fotos extraídas do livro "Nondestructive Testing Handbook - ASNT)

- Inclusão de Escória

São devidas ao aprisionamento de escória ou materiais estranhos durante o processo de soldagem. Elas apresentam-se com mais frequência em soldas de passes múltiplos, principalmente quando a limpeza não é bem efetuada entre um passe o outro.



Aparência radiográfica de soldas contendo inclusões de escória.

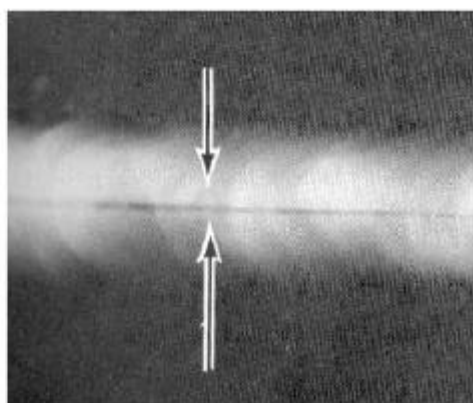
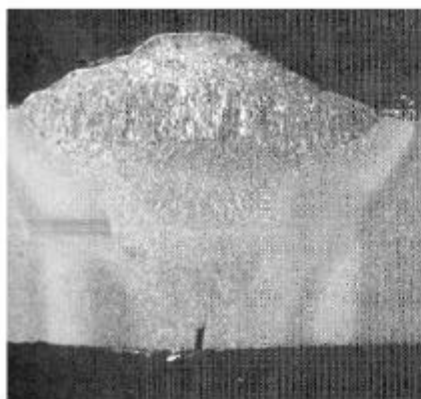
- Inclusão de Escória em Linha.

Inclusões de Escória em Linha, ou “Linha de Escória” é caso particular de inclusão, que se manifesta radiograficamente sob a forma de linhas contínuas ou intermitentes.

Elas são causadas por insuficiente limpeza das bordas de um determinado passe e são aprisionadas pelo passe seguinte.

- Falta de Penetração

Consideramos falta de penetração, como sendo a falta de material depositado na raiz da solda, devido ao fato do material não ter chegado até a raiz. No caso de não haver passe de raiz (selagem) a falta de penetração pode ficar aparente. A aparência radiográfica em ambos os casos é uma linha escura, intermitente ou contínua, no centro do cordão.



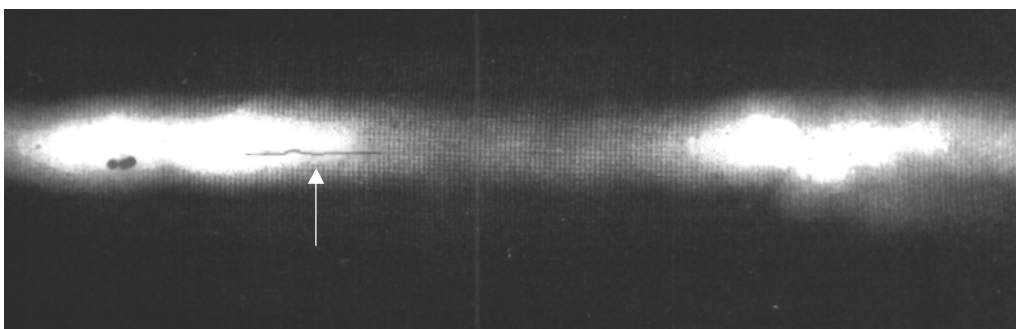
Fotos de uma solda contendo falta de penetração na raiz
(Fotos extraídas do livro "Nondestructive Testing Handbook - ASNT)

- Trincas

As trincas são descontinuidades produzidas por rupturas no metal como resultado de tensões produzidas no mesmo durante a soldagem, sendo mais visível na radiografia, quando o feixe de radiação incide sobre a peça numa direção sensivelmente paralela ao plano que contém a trinca.

A trinca produz uma imagem radiográfica na forma de uma linha escura com direção irregular. A largura desta linha dependerá da largura da trinca. Se a direção do plano que contém a trinca coincide com feixe de radiação, sua imagem será bem escura. De outra forma, ela perderá densidade, podendo até não aparecer. Devido ao fato das trincas serem o mais grave defeito de uma solda, devemos ter uma atenção especial para a sua detecção. A imagem das trincas, especialmente em filmes de granulação grossa pode não ser muito clara.

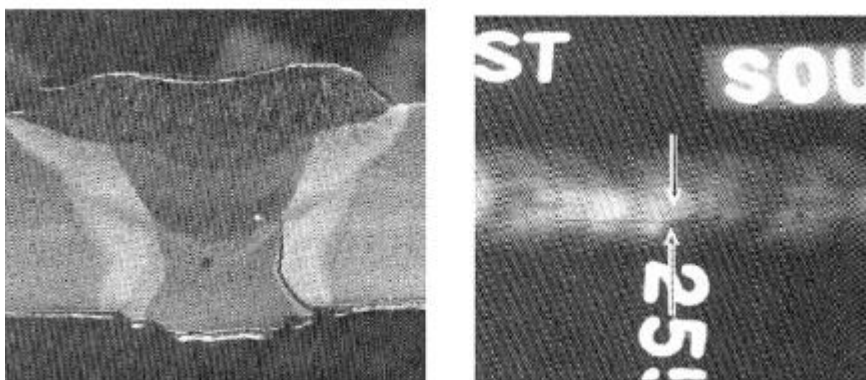
No caso de dúvidas por parte do inspetor, seria aconselhável uma mudança na direção do feixe de radiação e a utilização de filmes de granulação fina. Pode ocorrer, também, o fato das trincas não serem detectadas, principalmente quando radiografamos peças de grande espessura.



Seção de uma solda contendo poro e uma trinca longitudinal no cordão

- Falta de Fusão

Descontinuidades em duas dimensões, devido a uma falta de fusão entre o metal depositado e o metal base. A falta de fusão só é bem caracterizada numa radiografia quando a direção do feixe incidente coincide com o plano do defeito. A imagem radiográfica da falta de fusão é uma linha escura, estreita, paralela ao eixo da solda, em um ambos os lados.



Seção de uma solda contendo uma falta de fusão junto ao chanfro no cordão
(Fotos extraídas do livro "Nondestructive Testing Handbook - ASNT)

Critérios de Aceitação

O critério de aceitação de qualquer componente inspecionado por radiografia deve ser avaliado segundo a norma ou código de projeto de construção. Não existe nenhuma possibilidade de avaliar radiografias com base em normas diferentes ou até mesmo com base na experiência do inspetor. Assim apresentamos a seguir traduções livres dos principais critérios de aceitação mais usados para vasos de pressão.

Critérios para Ensaio Radiográfico de Soldas

O critério de aceitação a seguir foi extraído do Código ASME Sec. VIII Div. 1 para vasos de pressão, sendo o mesmo aplicável a juntas soldadas de topo, dividido em dois grupos: Soldas projetadas para ensaio radiográfico total (parágrafo **UW-51**) e soldas projetadas para ensaio radiográfico "Spot" (parágrafo **UW-52**).

As juntas soldadas de topo, de um vaso de pressão projetadas conforme o Código ASME, com eficiência 1, devem ser radiografadas totalmente, mas somente aquelas principais, classificadas como categoria A e B, como por exemplo as soldas longitudinais do casco e conexões e circulares do casco e emendas de fundos. Assim sendo, soldas circulares de conexões menores que 10" de diâmetro, soldas entre conexões e casco, não estão sujeitas ao ensaio radiográfico (ver UW-11 do referido Código).

As juntas soldadas de topo, de um vaso, projetadas conforme o Código ASME com eficiência 0,85, devem ser radiografadas conforme os critérios do ensaio "Spot". Neste caso, o ensaio deve ser aplicado para cada soldador ou conjunto de soldadores que participaram da soldagem do casco ou fundos do vaso. A extensão mínima destas soldas deve ser de 152 mm, na prática utiliza-se metade do comprimento do filme padrão (8.1/2") que excede 152 mm. Portanto, antes de ser aplicado o ensaio "Spot" deve ser verificado no vaso os soldadores que participaram das soldagens, para se estabelecer a quantidade de filmes necessários.

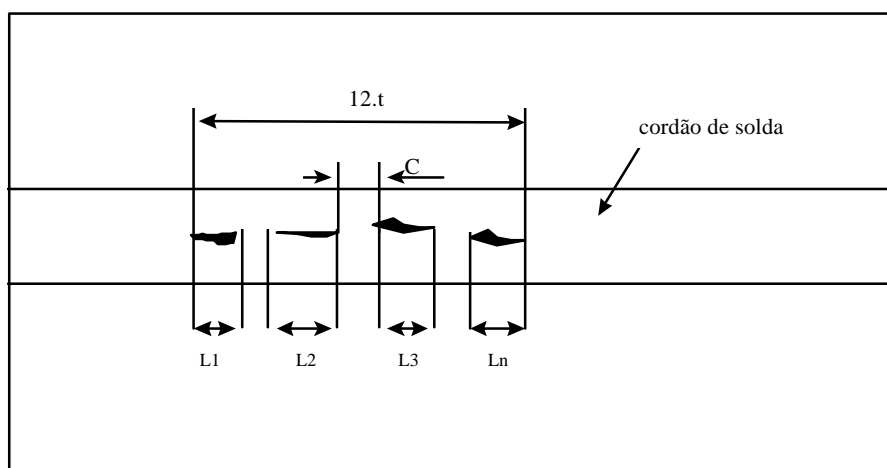
- **Critério de Aceitação para radiografia total (ASME Sec. VIII Div. 1 UW-51)**

As soldas deverão estar livres de:

- (1) qualquer indicação caracterizada como trinca, zona de fusão ou penetração incompleta;
- (2) qualquer outra indicação alongada na radiografia que tenha um comprimento maior que:
 - (a) $\frac{1}{4}$ pol. (6,0 mm) para t até $\frac{3}{4}$ pol. (19 mm);
 - (b) $\frac{1}{3}t$ para t de $\frac{3}{4}$ pol. (19 mm) até 2.1/4 pol. (57 mm)
 - (c) $\frac{3}{4}$ pol. (19 mm) para t acima de 2.1/4 pol. (57 mm)

onde t é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido. Para juntas de topo que tenham diferentes espessuras de soldas, t é a mais fina das dessas espessuras.

- (3) qualquer grupo de indicações alinhadas que tenham um comprimento agregado maior que t num comprimento de $12 \cdot t$ exceto, quando a distância entre duas imperfeições sucessivas exceder a $6 \cdot L$ onde L é o comprimento da mais longa imperfeição no grupo.



Obs:

$C < 6 \times$ o comprimento da maior indicação do grupo

$L1 + L2 + L3 + \dots + Ln \leq t$ (espessura do metal base)

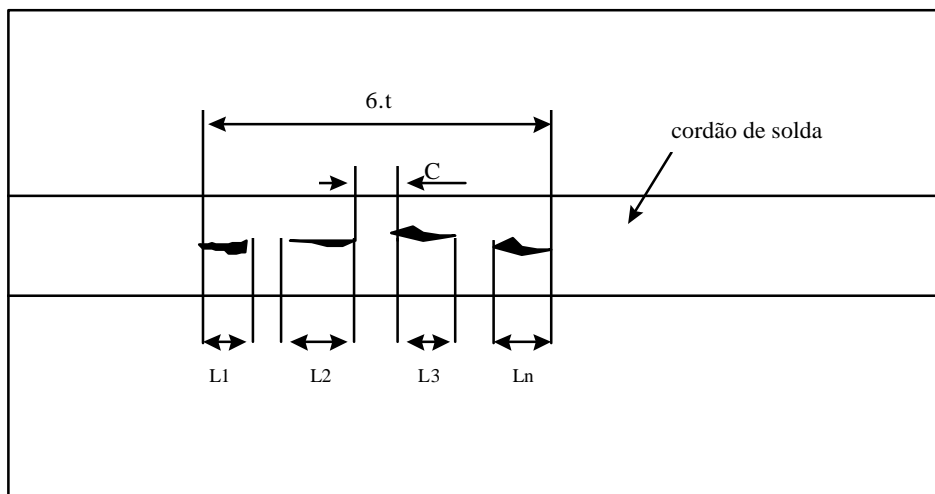
- (4) indicações arredondadas em excesso ao especificado no padrão de aceitação do ASME Sec.VIII Div.1 Ap.4. As descontinuidades arredondadas poderão ser comparadas diretamente com os limites indicados nos padrões reproduzidos.

• **Critério de Aceitação para radiografia “Spot” (ASME Sec. VIII Div. 1 UW-52)**

As soldas deverão estar livres de:

- (1) qualquer indicação caracterizada como trinca, zona de fusão ou penetração incompleta;
- (2) qualquer outra indicação alongada na radiografia que tenha um comprimento maior que: $2/3 \cdot t$ onde t é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido. Para juntas de topo que tenham diferentes espessuras de soldas, t é a mais fina das dessas espessuras.

Qualquer grupo de indicações alinhadas que tenham um comprimento agregado maior que t num comprimento de $6.t$ ou proporcionalmente para radiografias menores que $6.t$, exceto, quando a distância entre duas imperfeições sucessivas exceder a $3.L$ onde L é o comprimento da mais longa imperfeição no grupo.



Obs:

$C < 3 \times$ o comprimento da maior indicação do grupo

$L1 + L2 + L3 + \dots + Li \leq t$ (espessura do metal base)

O máximo comprimento de uma indicação aceitável deve ser de $\frac{3}{4}$ pol. (19 mm) Qualquer indicação menores que $\frac{1}{4}$ pol. (6 mm) deve ser aceitável para qualquer espessura da chapa.

(3) Indicações arredondadas não é fator para aceitabilidade de soldas. A aceitação de descontinuidades arredondadas deverá ser resultado de um acordo entre fabricante e cliente.

A radiografia "Spot" estabelece que se um filme apresenta descontinuidade considerada rejeitada , então deve-se ampliar a amostragem, radiografando mais dois filmes adjacentes ao rejeitado, na mesma junta soldada. Caso, pelo menos um desses filmes adicionais mostrarem descontinuidades inaceitáveis, toda a solda inspecionada deve ser julgada inaceitável.

- **Critério de Aceitação para qualificação de soldadores e operadores de soldagem conforme ASME Sec.IX , QW-191**

Indicações do tipo linear: Qualquer tipo de trinca, ou zona de fusão incompleta, ou falta de penetração;

Qualquer inclusão de escória alongada, que tenha um comprimento maior que:

- a) 3 mm para espessuras t até 10 mm, inclusive;
- b) $1/3 \cdot t$, para t acima de 10 mm e até 55 mm, inclusive;
- c) 20 mm para t acima de 55 mm.

Qualquer grupo de inclusões de escórias que estejam em alinhamento e que tenha um comprimento acumulado maior do que t numa extensão igual a $12t$, exceto nos casos em que a distância entre imperfeições sucessivas seja maior do que $6L$, onde L é o comprimento da imperfeição mais alongada verificada no agrupamento.

Indicações de formato arredondado

A dimensão máxima permissível para as imperfeições de formato arredondado é 20% de t ou 3 mm, a que for menor.

Para as soldas de materiais com espessuras menores do que 3 mm, a quantidade máxima aceitável de imperfeições de formato arredondado não deve ser superior a 12 em um comprimento de solda de 150 mm. Para comprimentos de solda inferiores a 150 mm, deve ser permitida uma quantidade de imperfeições proporcionalmente menor.

Para soldas em materiais de espessura igual ou maior do que 3 mm, os gráficos estabelecidos no ASME Sec. IX , indicam os limites máximos permissíveis para essas imperfeições, ilustradas com as configurações típicas: em agrupamentos, diversificadas ou dispersas de forma aleatória.

As imperfeições de formato arredondado menores do que 0,8 mm não devem ser consideradas no julgamento das radiografias, quando da aprovação dos corpos de prova de soldadores e operadores nessas faixas de espessuras de materiais.

Exemplo de Relatório de Ensaio Radiográfico

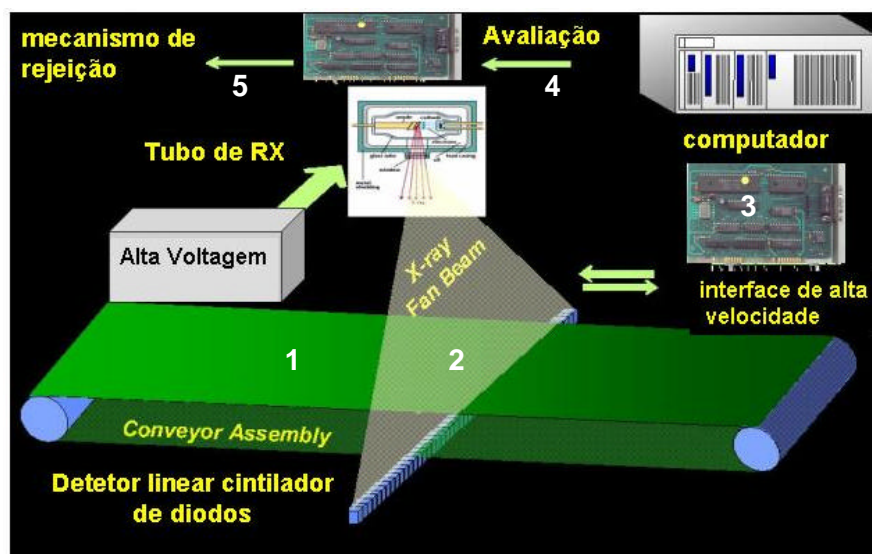
SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM				Nº: 30501					
RELATÓRIO DE ENSAIO RADIOGRÁFICO RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT									
Ordem de Serviço: Job Order No.: 5225	Nº Desenho/Rev.: Drawing No/Rev.: 5-5225/1	Relatório Adicional: Additional Report: 2394	Folha Page: 01	De of: 01					
Cliente: Customer: Petrobras									
Equipamento: Equipment: Torne de Refrigeração									
Itens do P.I./Rev.: I.P. Sequence: 01									
Extensão do Ensaio: Examination Extent: Total			Procedimento/Rev.: Procedure/Rev.: PQ-061 Rev 2						
Código de Referência: Reference code: ASME Sec VII div 1 Ed. 2004			Critério de Aceitação: Acceptance Standard: ASME Sec VII div 1, UW51						
Material: Material: Aço Carbono			Tratamento Térmico: Heat Treatment: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/> Yes After						
Tipo de Fonte: Radiation Source: IR-192		Modelo(Equip.): Model: Tech/OPS 660	Tipo de Filme: Film Type: Kodak AA-54		Filmes/Cassete: Film/Cassette: 01				
Atividade (Ci)/Max. Voltagem(V): Activity (Ci/Mr. Voltage (V): 40 Ci		Tamanho Focal (mm): Focal size: 410 mm	Dist. Max. de Superf. da Peça até o Filme: Espessura do objeto: Maximum Distance From Source Side of Object to the Film: Thickness of Object: 38						
MAPA DE LOCALIZAÇÃO RADIOGRÁFICO RADIOGRAPH LOCATION MAP									
RESULTADO DO ENSAIO EXAMINATION RESULTS									
POSICÃO POSITION	Nº FILMES No OF FILMS	TÉCNICA TECHNIQUE	QI KI	CÓD. CODE	LAUDO RESULTS	SOLDADORES WELDERS	ESP. (mm) THICKNESS	D.R. MR. (mm) S/D	
L1	0-1	PS-VS	40		A	ZB, 05	55	3 600	
L1	1-2	PS-VS	40	IE	R	ZB, 05	55	3 600	
L1	2-F	PS-VS	40		A	ZB, 05	55	3 600	
CÓDIGO CODE									
A = Aprovado Approved		TL = Trinca Longitudinal Long Crack		TT = Trinca Transversal Transversal Crack		MO = Mordedura Undercutting		FF = Falta de Fusão Lack of Fusion	
NC = Não Conforme Not Conforming		IA = Indicação Arredondada Rounded Indication		FP = Falta de Penetração Lack of Penetration		IE = Indicação Alongada Elongated Indication		IL = Indicação em Linha Aligned Indication	
OPERADOR: OPERATOR:						INSPECTOR			
Data: 15, 05, 2005						Data:			
INSPECTOR CLIENTE/TERCEIROS: CUSTOMER'S INSPECTOR:						INSPECTOR AUTORIZADO: AUTHORIZED INSPECTOR:			
Data:						Data:			

Outras Aplicações da Radiologia

A indústria alimentícia de produtos seriados, embalados para o consumo, possuem alguns problemas críticos relacionados à qualidade dos alimentos produzidos que podemos enumerar conforme segue:

- Assegurar que todos os itens estejam na embalagem ;
- Assegurar a contagem correta de todos os itens ;
- Assegurar que o volume de líquido na bebida esteja correta;
- Inspeccionar objetos estranhos ;
- Assegurar que a folha de alumínio de selagem envolva toda bandeja de plástico

Neste sentido, a radioscopia tem sido usada nas grandes empresas alimentícias, principalmente aquelas que exportam tais produtos. O esquema abaixo mostra a sequência da verificação do alimento, já embalado para expedição.

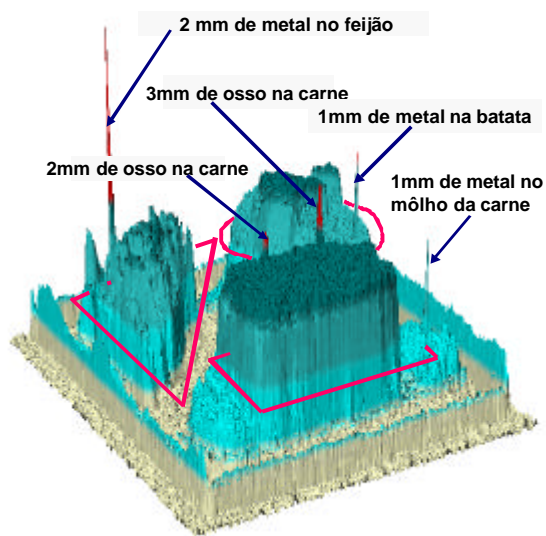


- 1 – Esteira transportadora dos produtos ,
- 2 – O produto é submetido aos Raios X produzindo uma imagem por captura digital ,
- 3 – A imagem é processada na interface de alta velocidade ,
- 4 – A imagem do produto é avaliada automaticamente quanto ao conteúdo, contaminantes e outros itens
- 5 – Mecanismo de separação do produto bom do rejeitado.

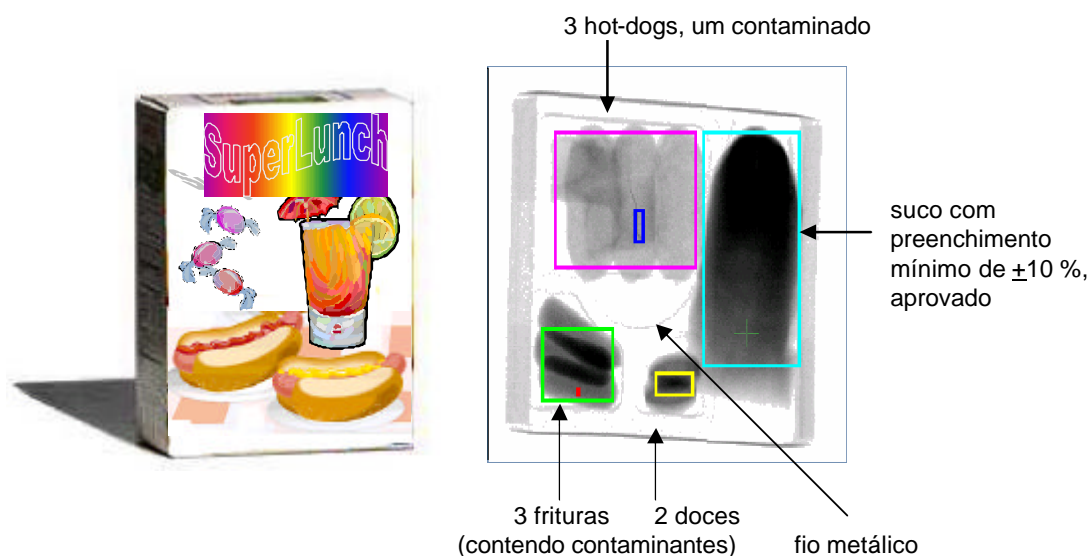


Instalação de uma radioscopia em uma linha de inspeção de produtos alimentícios embalados.

A análise das imagens produzidas pelo equipamento de radioscopia podem ser bastante sofisticadas, gerando imagens em 3 D, conforme mostrado abaixo. Para cada contaminante não aceitável, é destacado como um sinal identificável e nítido na imagem radioscópica.



A possibilidade da inspeção dos produtos embalados, representa uma vantagem muito grande em comparação com outros processos. Observe na figura seguinte, uma caixa de lanche contendo 2 doces, 1 suco, 3 hot-dogs, 3 frituras, e as marcas retangulares mostrando as contaminações detectadas.

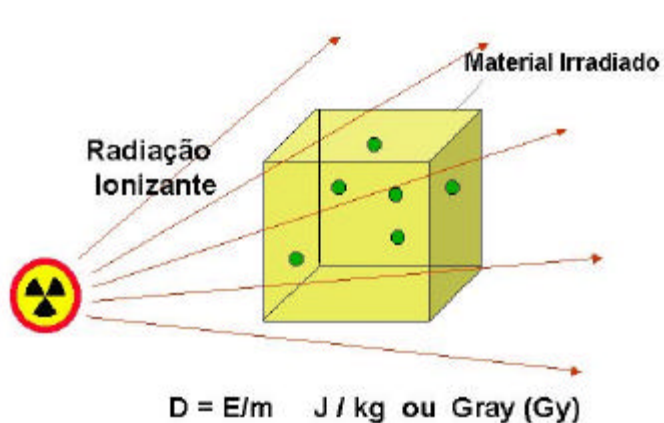


A Irradiação de Alimentos para sua Preservação

O Conceito de Dose Absorvida:

Quando a matéria é atravessada por qualquer forma de radiação ionizante, pares de íons são produzidos e átomos e moléculas são excitados, havendo absorção de parte dessa energia transferida. Estes pares de íons podem ter energia suficiente para produzir novas ionizações e excitações. Estas ionizações são as responsáveis pelos efeitos biológicos das radiações.

A Dose devida à exposição à radiação eletromagnética, elétrons, alfa, nêutrons, é definida como sendo a energia absorvida ou transferida por unidade de massa do produto ou objeto irradiado. Assim, a unidade de medida é **ergs/g ou Joule/kg**. Na unidade usual a dose absorvida é o **Gray (Gy)**.



$$1 \text{ J / kg} = 1 \text{ Gray (Gy)}$$

Nas unidades antigas a dose era medida em rads , que valia:
 $1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/g}$ ou seja $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads}$

A título de exemplo, para uma massa de 1 g de água , exposta a $2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ (1 R) de radiação X ou Gama, a dose absorvida será de aproximadamente 9,3 mGy (0,93 rads). Como curiosidade, podemos citar que uma dose absorvida de 10 kGy por 1 g de água equivale à energia calorífera requerida para aumentar a temperatura de 2,4 °C, por outro lado para elevarmos a temperatura de 1 g de gelo de zero até 20 °C serão necessários 42 kGy.

A unidade de dose de radiação “**Gray**” é muito importante para o controle da exposição dos alimentos, assim como os efeitos que isso pode causar.

Os Tipos de Contaminantes, Bactérias e Patogenias mais Comuns nos Alimentos

A Salmonela

As **Salmonelas** são bactérias Gram-negativas e constituem um gênero extremamente heterogêneo, composto por duas espécies, *Salmonella bongori* e *S. enterica*, essa última possuindo quase 2000 sorotipos. Dentre os de maior importância para a saúde humana destacam-se *Salmonella enterica* sorotipo Typhi (*S. typhi*), que causa infecções sistêmicas e febre tifóide – doença endêmica em muitos países em desenvolvimento – e *Salmonella enterica* sorotipo Typhimurium (*S. typhimurium*), um dos agentes causadores das gastroenterites.

A *Salmonella* é transmitida ao homem através da ingestão de alimentos contaminados com fezes animais. Os alimentos contaminados apresentam aparência e cheiro normais e a maioria deles é de origem animal, como carne de gado, galinha, ovos e leite. Entretanto, todos os alimentos, inclusive vegetais,, podem tornar-se contaminados. É muito freqüente a contaminação de alimentos crus de origem animal.

Por ser um patógeno intracelular, *S. enterica* tem sido um dos organismos preferidos pelos microbiologistas moleculares para identificar e elucidar fatores de virulência bacterianos. Nos últimos anos, acumulam-se informações sobre os mecanismos de interação e patogenia da *Salmonella* com as células hospedeiras. Esse conhecimento se deve principalmente à grande similaridade dessa bactéria com a *Escherichia coli*, permitindo a utilização de instrumentos e técnicas em genética já desenvolvidos e conhecidos.

Muitos trabalhos já comprovaram a habilidade de linhagens vivas atenuadas de *Salmonella* em induzir potente resposta imunológica, celular e humoral, após vacinação. Além disso, já foram estabelecidos alguns sistemas eficientes para a produção heteróloga de proteínas em *Salmonella*. Isto torna particularmente atrativo o uso dessas bactérias como sistemas de administração de antígenos de diversos patógenos como vírus, bactérias e parasitos, proporcionando uma base para o desenvolvimento de novas vacinas.



Bactéria do gênero *Salmonella* vista por microscopia eletrônica.
(www.uea.ac.uk/.../images/large/salmonella.jpg)

Estafilococos

O *Staphylococcus aureus*, um microorganismo que causa uma outra forma muito comum de intoxicação alimentar, geralmente está presente na superfície da pele, principalmente em torno do nariz, e também em certas infecções cutâneas, tais como cortes sépticos, espinhas e furúnculos. Um corte infeccionado na mão ou no braço de uma dona de casa que prepara uma refeição para sua família, por exemplo, pode contaminar os alimentos se eles não forem cozidos a uma temperatura de 60°C ou mais durante no mínimo meia hora. Se os alimentos contaminados por esta bactéria forem ingeridos crus ou parcialmente cozidos, eles podem provocar uma intoxicação alimentar que, na verdade, não é causada pela própria bactéria, mas sim pela toxina que ela produz.

Os alimentos comumente relacionados com esse tipo de intoxicação são presunto, língua, carnes defumadas (os conservantes usados nesses alimentos, infelizmente não eliminam as bactérias), pasta de carne, maionese, sorvetes, confeitos e doces industrializados.

Os sintomas surgem de uma a quatro horas após a ingestão do alimento contaminado e costumam ser bastante acentuados. Logo no início, o paciente sente tonturas e náuseas. Esses primeiros sintomas são acompanhados de vômitos abundantes que duram entre quatro e seis horas. Algumas pessoas também têm diarreia, sobretudo se ingerirem uma grande quantidade de toxina. A maioria dos pacientes se recupera em um período de 24 horas, mas as crianças e as pessoas idosas costumam levar mais tempo para se fazer.

As Técnicas Existentes para Conservação dos Alimentos

Os processos de conservação que são utilizados na indústria de alimentos têm por objetivo evitar as alterações, sejam elas de origem microbiana, enzimática, física ou química.

Conservação pelo calor;
Conservação pelo frio;
Conservação pelo controle da umidade;
Conservação pela adição de um soluto;
Conservação por defumação;
Conservação por fermentação;
Conservação pela adição de aditivos;
Conservação pelo uso da Irradiação.

a) Conservação pelo Calor:

Baseia-se no emprego de temperaturas ligeiramente acima das máximas que permitem a multiplicação dos microrganismos, que já é capaz de provocar a morte ou a inativação de suas células vegetativas.

Os principais métodos de conservação por Calor são:

Pasteurização
Esterilização
Tindalização
Apertização

b) Conservação pelo Frio:

Temperaturas abaixo das que se tem registrados no ambiente são utilizadas para retardar as reações químicas e as atividades enzimáticas, bem como para retardar ou inibir o crescimento e a atividade dos microrganismos nos alimentos

- Refrigeração
- Congelamento

c) Conservação pelo Controle da Umidade:

- Secagem natural
- Desidratação ou secagem artificial (liofilização)

d) Conservação pela Adição de Solutos:

A adição elevada de quantidades de açúcar ou sal ao alimento pode reter quantidades variadas de água, o que resulta em um estado qualificado como pressão osmótica.

- Adição de sal
- Adição de açúcar

e) Conservação por Fermentação:

É um processo que utiliza o crescimento controlado de microrganismos selecionados, capazes de modificar sua textura, sabor e aroma, como também suas propriedades nutricionais.

- Fermentação alcoólica
- Fermentação acética
- Fermentação láctica

f) Conservação pela Utilização de Aditivos

Os aditivos podem contribuir muito para a conservação dos alimentos. Mas essa prática deve ser encarada com bastante atenção, uma vez que, a ingestão excessiva de alimentos conservados por aditivos químicos pode provocar perturbações no equilíbrio fisiológico do consumidor.

O Tratamento dos Alimentos pela Radiação

O tratamento de alimentos através da radiação gama para redução de contagem microbiana e preservação, já é um método conhecido e aprovado pela legislação brasileira desde 1985.

A irradiação é uma técnica eficiente na conservação dos alimentos pois reduz as perdas naturais causadas por processos fisiológicos (brotamento, maturação e envelhecimento) além de eliminar ou reduzir microrganismos, parasitas e pragas, sem causar qualquer prejuízo ao alimento, tornando-os também mais seguros ao consumidor. Uma grande vantagem do processo de esterilização por radiação está na possibilidade de esterilizar os itens em suas próprias embalagens invioladas, que só serão abertas para o uso final do produto.

O processo consiste em submetê-los, já embalados ou a granel, a uma quantidade minuciosamente controlada dessa radiação, por um tempo prefixado e com objetivos bem determinados.

A irradiação pode impedir a multiplicação de microrganismos que causam a deterioração do alimento, tais como bactérias e fungos, pela alteração de sua estrutura molecular, como também inibir a maturação de algumas frutas (veja a foto abaixo à direita) e legumes, através de alterações no processo fisiológico dos tecidos da planta.



Cebolas irradiadas há seis meses (direita) Banana Irradiada Banana não irradiada e cebolas não irradiadas (esquerda)

(fotos extraídas do website do CENA)

Princípios da Irradiação

O tratamento de alimentos através da radiação gama para redução de contagem microbiana e preservação, já é um método conhecido e aprovado pela legislação brasileira desde 1985.

A irradiação de alimentos é um método efetivo para destruir bactérias tais como: E.Coli, Sallmonella, Listeria e outras. Tal método só é possível com o uso de fontes de radiação com alta intensidade, tais como o Cobalto-60 com atividades de milhares de Curies que proporciona altas doses de radiação em poucos minutos de exposição, necessária para a redução dos organismos microbiológicos.

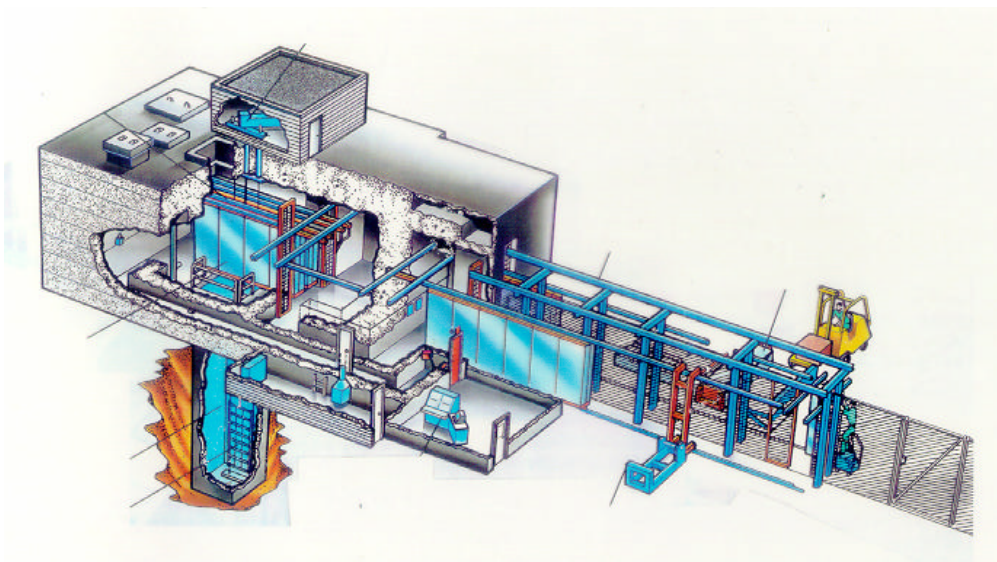
O processo de irradiação é influenciado pela temperatura, umidade e tensão de oxigênio do meio, assim como pelo estado físico do material a ser irradiado. Por este motivo, para cada produto a ser irradiado são estabelecidos procedimentos específicos, inclusive diferentes doses de radiação.

Métodos de Irradiação

Os principais alimentos irradiados são: Especiarias, Condimentos, Ervas, Carnes, Frangos, Frutas secas, Peixes, Vegetais. Os alimentos são irradiados embalados, sem o contato manual.

Normas , Portarias e Leis Relacionadas à Irradiação de Alimentos

A ANVISA regulamentou o tratamento por irradiação dos alimentos através da Resolução RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001. A antiga Portaria DINAL Nr. 30 de 1989, foi revogada.



Desenho esquemático do sistema de irradiação – extraída do website CTMSP

Podemos reunir em três grupos os principais processos de irradiação de alimentos: Radurização, Radicidação e Radapertização., conforme segue:

Radurização

Neste método se usa dose baixas (em média de 0,25 a 1 kGy) com a finalidade de inibir brotamentos (batata, cebola, alho,etc), retardar o período de maturação (frutas) e de deterioração fúngica de frutas e hortaliças (morango, tomate, etc) e controle de infestação por insetos e ácaros (cereais, farinhas, frutas, etc).

Radicidação ou radiopasteurização

Neste método se usa doses intermediárias (de 1 a 10 kGy) com o fim de pasteurizar sucos, retardar a deterioração de carnes frescas, controle de *Salmonella* em produtos avícolas,etc.

Radapertização ou esterilização comercial

Neste método se usa doses elevadas (10 a 70 kGy) na esterilização de carnes, dietas e outros produtos processados.



Filé e peito de peru embalados foram irradiados pela NASA (EUA) para alimentação de astronautas



Símbolo internacional dos Produtos Irradiados denominado “Radura”
(Não obrigatório seu uso, conforme resolução da ANVISA)

**Níveis de Doses e Tratamentos de Principais Alimentos
Somente para Referencia**

Tipo de Alimento	Dose Absorvida (kGy)	Resultado e Efeitos da Irradiação
Carne, Frango, Peixe, Marisco, Alguns vegetais	20 a 70	Esterilização. Os produtos tratados podem ser armazenados à temperatura ambiente
Especiarias	8 a 30	Reduz a contagem de microorganismos e destrói insetos, substituindo produtos químicos
Carne , Frango e Peixe	1 a 10	Retarda a deterioração, mata alguns tipos de bactérias patogênicas (salmonella)
Morangos e outras frutas	1 a 4	Aumenta o tempo de prateleira, retarda o aparecimento de mofo
Grãos, frutas e vegetais	0,1 a 1	Mata insetos e evita sua reprodução, podendo substituir parcialmente os fumigantes
Banana, abacate, manga, mamão, e outras frutas não cítricas	0,25 a 0,35	Retarda a maturação
Carne de porco	0,08 a 0,15	Inativa a bactéria Trichinella
Batata, cebola e alho	0,05 a 0,15	Inibe o brotamento

Efeitos da Exposição dos Alimentos à Radiação com Alta Dose

As radiações quebram as ligações químicas para formar moléculas de vida curta e instáveis, denominadas *radicais livres*. Algumas dessas moléculas do alimento, combinam uma com a outra formando moléculas denominadas "*produtos radiolíticos*". A irradiação de carne pode produzir benzeno, por exemplo , a irradiação de alimentos ricos em carboidrato pode formar formaldeídos. Esse efeito não é limitado ao processo de irradiação, mas também ocorre nos processos de cozinhamento, pasteurização e outros, formando os produtos radiolíticos. Tais efeitos são dependentes do nível de dose, e na maioria dos casos são tão pequenos que se confundem com os que se formam naturalmente nos alimentos.

A quantidade de produtos radiolíticos podem ser os únicos que podem afetar a saúde, mas tais efeitos existem somente na teoria, pois ainda não foram identificados.

Tabelas Úteis

TABELA DE CONVERSÃO ENTRE POLEGADAS E MILÍMETROS

Pol.	mm	Pol.	mm	Pol.	mm
1/64	0,39	12	304,8	28	711,2
1/32	0,79	12. 1/2	317,5	28. 1/2	723,9
1/16	1,58	13	330,2	29	736,6
1/8	3,17	13. 1/2	342,9	29. 1/2	749,3
1/4	6,35	14	355,6	30	762,0
5/16	7,93	14. 1/2	368,3	30. 1/2	774,7
3/8	9,52	15	381,0	31	787,4
1/2	12,7	15. 1/2	393,7	31. 1/2	800,1
5/8	15,87	16	406,4	32	812,8
3/4	19,05	16. 1/2	419,1	32. 1/2	825,5
1	25,4	17	431,8	33	838,2
1. 1/2	38,1	17. 1/2	444,5	33. 1/2	850,9
2	50,8	18	457,2	34	863,6
2. 1/2	63,5	18. 1/2	469,9	34. 1/2	876,3
3	76,2	19	482,6	35	889,0
3. 1/2	88,9	19. 1/2	495,3	35. 1/2	901,7
4	101,6	20	508,0	36	914,4
4. 1/2	114,3	20. 1/2	520,7	36. 1/2	927,1
5	127,0	21	533,4	37	939,8
5. 1/2	139,7	21. 1/2	546,1	37. 1/2	952,5
6	152,4	22	558,8	38	965,2
6. 1/2	165,1	22. 1/2	571,5	38. 1/2	977,9
7	177,8	23	584,2	39	990,6
7. 1/2	190,5	23. 1/2	596,9	39. 1/2	1003,3
8	203,2	24	609,6	40	1016,0
8. 1/2	215,9	24. 1/2	622,3	40. 1/2	1028,7
9	228,6	25	635,0	41	1041,4
9. 1/2	241,3	25. 1/2	647,7	41. 1/2	1054,1
10	254,0	26	660,4	42	1066,8
10. 1/2	266,7	26. 1/2	673,1	42. 1/2	1079,5
11	279,4	27	685,8	43	1092,2
11. 1/2	292,1	27. 1/2	698,5	43. 1/2	1104,9

REQUISITOS RECOMENDADOS PARA PROCESSAMENTO MANUAL DE FILMES

Fase do Processamento	Revelação	Banho de Parada	Fixação	Lavagem Final	Agente Umectante	Secagem
Composição ou tipo da solução	G 127 (ver nota 2)	30 ml de ácido acético glacial por litro de água	G 321 (ver nota 2)	Água Corrente	0,25% em vol. de Agepon (ver nota 2)	estufa
Tempo do Banho	Temp.(C) Tempo (min.) 18 6 20 5 22 4 24 3,5 26 3	de 30 a 60 segundos	No mínimo 2 vezes o tempo de clareamento (ver nota 1) A temperatura do fixador deve ser a mesma que a do revelador	20 minutos	2 minutos	ar frio por 30 min. + ar quente por 15 min.

Notas da Tabela :

1. Durante o uso, cada dia, a solução fixadora deve ser verificada antes de iniciar a revelação através do tempo de clareamento, que é o intervalo de tempo entre a colocação do filme na solução fixadora e o desaparecimento do amarelado original do filme. Se o tempo de clareamento exceder a 2,5 min. Então a solução fixadora deve ser trocada ou restaurada de acordo com as recomendações do fabricante.

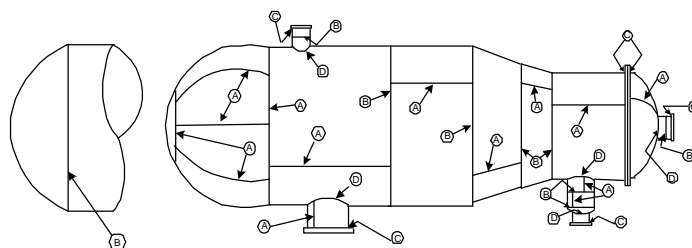
2. As soluções químicas devem ser trocadas e/ou restauradas de acordo com as recomendações do fabricante.

Valores de $X_{1/2}$ ou HVL e TVL para alguns materiais

FONTE DE RADIAÇÃO	Alumínio (cm)		Chumbo (cm)		Concreto (cm)		Aço (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
Raios X 100 kVp	10,24	34,00	0,026	0,087	1,65	5,42	-	-
Raios X 200 kVp	2,20	7,32	0,043	0,142	2,59	8,55	-	-
Raios X 250 kVp *	-	-	0,088	0,29	0,28	0,94	-	-
Raios X 300 kVp *	-	-	0,147	0,48	0,31	1,04	-	-
Raios X 400 kVp *	-	-	0,25	0,83	0,33	1,09	-	-
Iridio 192	3,66	12,16	0,55	1,90	4,30	14,00	1,30	4,30
Cobalto 60	5,36	17,80	1,10	4,00	6,30	20,30	2,00	6,70
Césio 137	4,17	13,85	0,65	2,20	4,90	16,30	1,60	5,40

Fonte: IAEA , Manual on Gamma Radiography , e NCRP

* valores aproximados obtidos para voltagem de pico de um tubo direcional para uso médico

REFORÇO MÁXIMO PARA SOLDAS PROJETADAS CONFORME CÓDIGO ASME SEC.VIII DIV.1, UW-35

Espessura Nominal do Metal Base (mm)	Reforço Máximo (mm) para cada lado da solda	
	categoria "B" e "C" junta de topo (ver Fig)	outras soldas
$t < 2,4$	2,4	0,8
$2,4 \leq t \leq 4,8$	3,2	1,6
$4,8 < t \leq 13$	4,0	2,4
$13 < t \leq 25$	4,8	2,4
$25 < t \leq 51$	5	3,2
$51 < t \leq 76$	6	4
$76 < t \leq 102$	6	6
$102 < t \leq 127$	6	6
$t > 127$	8,0	8,0

TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
* Lantanídeos			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinídeos			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Séries químicas da tabela periódica

Metais alcalinos ²	Metais alcalinos-terrosos ²	Lantanídeos ^{1, 2}	Actinídeos ^{1, 2}	Metais de transição ²
Metais Representativos	Semimetais	Não-Metais	Halogêneos ³	Gases nobres ³

¹ Actinídeos e lantanídeos são conhecidos coletivamente como "Metais-terrosos raros".

² Metais alcalinos, metais alcalinos-terrosos, metais de transição, actinídeos e lantanídeos são conhecidos coletivamente como "Metais".

³ Halogêneos e gases nobres também são não-metais.

UNIDADES ESPECIAIS

Atividade (Ci-curie/Bq-Bequerel)		Doses Equivalente (rem/sievert)	Doses Absorvida (rad/gray)
1 μ Ci = 37 mBq	1 Bq = 27 μ Ci	10 μ rem = 0.1 μ Sv	1 mrad = 0.01 mgy
1 nCi = 37 Bq	1 KBq = 27 nCi	100 μ rem = 1 μ Sv	10 mrad = 0.1 mgy
1 μ Ci = 37 KBq	1 MBq = 27 μ Ci	1 mrem = 0.01 mSv	100 mrad = 1 mgy
1 mCi = 37 MBq	1 GBq = 27 mCi	10 mrem = 0.1 mSv	1 rad = 0.01 gy
1 Ci = 37 GBq	1 TBq = 27 Ci	100 mrem = 1 mSv	10 rad = 0.1 gy
1 KCi = 37 TBq	1 PBq = 27 KCi	1 rem = 0.01 Sv	
1 MCi = 37 PBq	1 Ebq = 27 MCi	10rem = 0.1 Sv	
1 GCi = 37 EBq			
Prefixos			
a(ato)	= 10^{-18}	k(kilo)	= 10^3
f(femto)	= 10^{-15}	M(mega)	= 10^6
p(pico)	= 10^{-12}	G(giga)	= 10^9
n(nano)	= 10^{-9}	T(tera)	= 10^{12}
μ (micro)	= 10^{-6}	P(peta)	= 10^{15}
m(mili)	= 10^{-3}	E(exa)	= 10^{18}

Fonte: Guia Prático em Segurança Radiológica para contratação de Serviços de Radiografia Industrial



bras Consultadas

Código ASME Sec. V e VIII Div.1 e 2 , "American Society of Mechanical Engineer, New York, Ed.2007

Petrobrás , Norma N-1595 d – Ensaio Não Destrutivo – Radiografia ,

Leite, P. GP, "Curso de Ensaio Não Destrutivos", São Paulo, 8ª ed.

USA, EASTMAN KODAK COMPANY, "Radiography in Modern Industry" , 4ª Ed. New York, 1974

Sanchez,W. ; "Ensaio Não Destrutivos pela Técnica de Raios X e Gama", Informação Nr.29 IEA, Instituto de Energia Atômica, São Paulo , 1974

Bélgica , Agfa Gevaert, "Radiografia Industrial"

Mc Gonnagle, Warren J. ; "Nondestructive Testing", McGraw-Hill Book Company, New York, 1961

BRYANT,L., Nondestructive Testing Handbook - Radiography and Radiation Testing , 2ª Edição, Ohio/USA , ASNT , vol. 3

ALMENDRA, A. Carlos e outros, Soldagem, 1ª Edição, São Paulo, SENAI, 1997, vol.1

BRITO, Ricardo R.Azevedo e Outros; "Guia Prático em Segurança Radiológica para contratação de Serviços de Radiografia Industrial", Rio de Janeiro, PETROBRAS, Jun./2000

DGZfP - Proceedings BB 67-CD - "Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology" , Março./1999, Berlin, Germany

Website da AGFA em <http://ndt.agfa.com> "RadView" , Jul. 2002

D.Stegemann , "Radiografia e Radioscopia Técnica de Microfoco" , Alemanha, KFA, 1995

FMI-Food Marketing Institute , "Backgrounder", Washington DC , Fev./ 2000



**DIREITOS RESERVADOS PARA PUBLICAÇÃO E VENDAS
COM A AUTORIZAÇÃO DO AUTOR**



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO
Rua Guapiaçu 05 , 04024-020 , São Paulo / SP
Tel: 0XX-11-5586-3199 setor de publicações , e-mail : **abende@abende.org.br**
ou com o autor: ricardo.andreucci@hotmail.com

