

Forschungszentrum Jülich GmbH
Scientific Series of the International Bureau

Radiografia e Radioscopia Técnica de Microfoco

Dieter Stegemann
Dr.-Eng., Professor Titular
Universidade de Hannover

German-Brazilian-Cooperation
in Scientific Research and Technological Development

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Stegemann, Dieter:

Radiografia e radioscopia : técnica de microfoco ; German Brazilian cooperation in scientific research and technological development / Dieter Stegemann.

Forschungszentrum Jülich GmbH. - Jülich : Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 1995

(Scientific series of the International Bureau / Forschungszentrum Jülich GmbH ; Vol. 36)

ISBN 3-89336-167-7

NE: Forschungszentrum <Jülich> / Internationales Büro: Scientific series of ...

Herausgeber Forschungszentrum Jülich GmbH
und Vertrieb: ZENTRALBIBLIOTHEK
 D-52425 Jülich
 Telefon (02461) 61-5368 · Telefax (02461) 61-6103

Druck: Graphische Kunstanstalt Dieter Gehler, Düren-Birkesdorf

Copyright: Forschungszentrum Jülich 1995

Scientific Series of the International Bureau, Volume 36

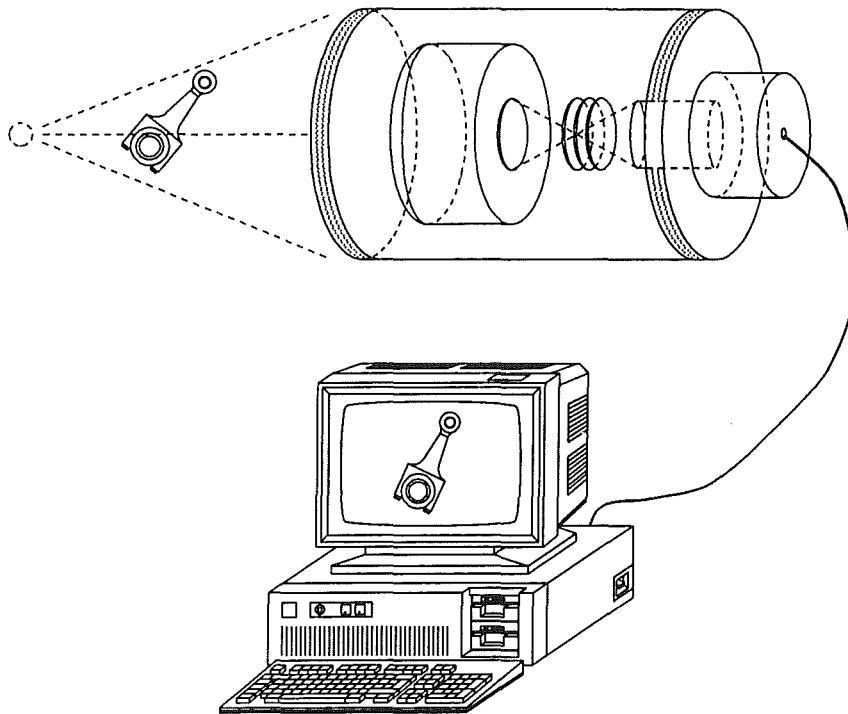
ISSN 0938-7676

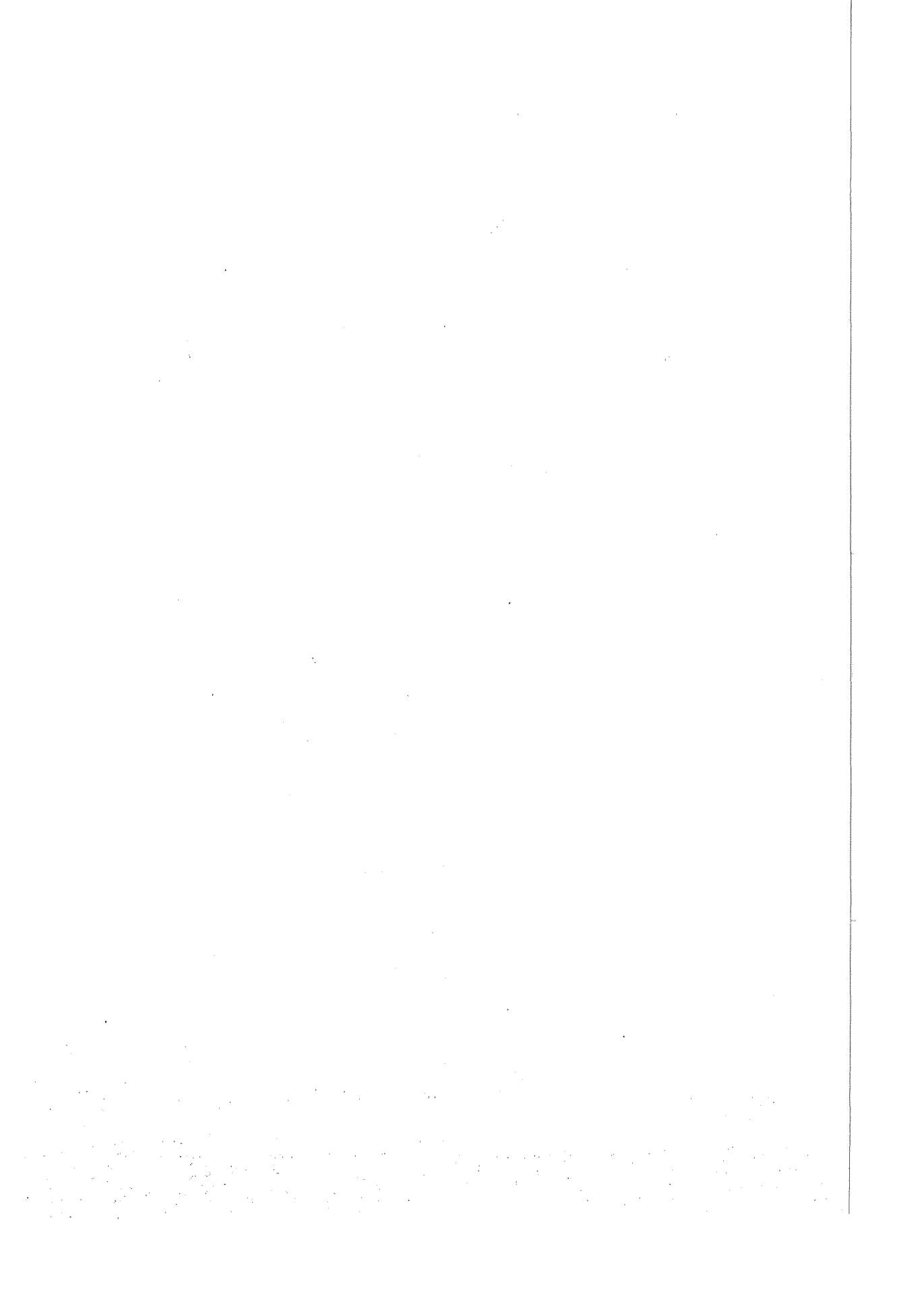
ISBN 3-89336-167-7

Dieter Stegemann

RADIOGRAFIA e RADIOSCOPIA

TÉCNICA DE MICROFOCO





PREFÁCIO

Este trabalho sobre a Técnica de Microfoco foi elaborado dentro da Cooperação Alemã - Brasileira no campo de Ensaios Não Destrutivos. Tal Cooperação está amparada pelo Ministério Federal de Educação, Ciência, Pesquisa e Tecnologia (BMBF), Bonn, através do Escritório Internacional do Centro de Pesquisa (KFA), Jülich.

A proposta para a realização do trabalho partiu do Dr. H. D. Talarek, do Escritório Internacional da KFA.

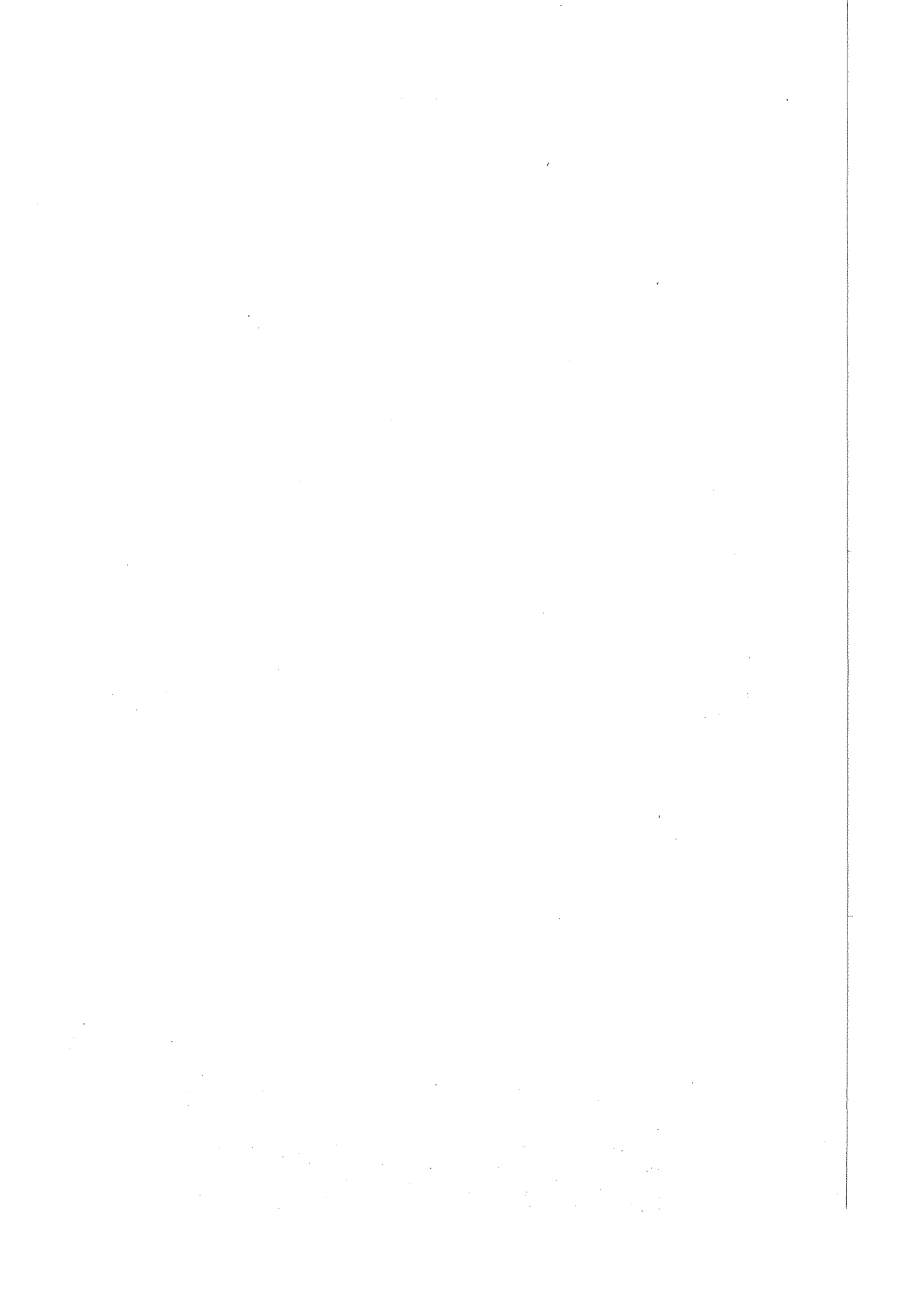
Este manual foi elaborado com base nas aulas, as quais foram ministrados pelo autor, no campo dos Ensaios Não Destrutivos - na universidade de Hannover - e levando em consideração as recomendações e normas nacionais e internacionais, para especialização no campo da Radiografia e Radioscopia.

O manuscrito em alemão foi traduzido para o português. A coordenadora do trabalho editorial foi a Sra. Eliza Prette, a quem expressamos os mais especiais agradecimentos. Também queremos agradecer aos colaboradores e estudantes do Instituto de Tecnologia Nuclear e Ensaios Não Destrutivos, de Hannover, que participaram na elaboração das figuras e fórmulas comandadas por computador, em primeiro lugar a Sra. Anke Engelke, Srs. Axel Vortriede e Karsten Feiste, além do comitê de revisão composto pelos Professores Ricardo Tadeo Lopes e Joaquim T. Assis e Sra. Rita Izabel Ricciardi.

Gostaria que este trabalho contribuísse para promover a aplicação da Técnica de Microfoco para Radiografia e Radioscopia e, com isso, alcançar um melhoramento da qualidade dos produtos industriais.

Hannover 1995

Dieter Stegemann



Índice

	Prefácio	I
	Índice	III
	Símbolos das formulas	VI
1	Introdução	1
2	Características da Radiação	1
	2.1 Radiação Eletromagnética	
	2.2 Radiação de Raios X	4
	2.3 Radiação Gama	8
3	Método de Transmissão	12
	3.1 Princípio de trabalho	12
	3.2 Atenuação da radiação	13
	3.2.1 Processos de atenuação	13
	3.2.2 Lei da atenuação	16
	3.2.3 Espessuras de semi-atenuação	20
	3.2.4 Radiação secundária	21
	3.2.5 Fator de acréscimo da dose	22
	3.3 Dose da radiação	24
	3.3.1 Dose absorvida	25
	3.3.2 Dose equivalente	27
	3.4 Detecção da radiação	28
	3.4.1 Medição da radiação com filmes	28
	3.4.2 Medição da radiação com detectores	42
	3.5 Focalização da radiação	49
	3.5.1 Desfocagem geométrica	50
	3.5.2 Ampliação da imagem	52
	3.5.3 Desfocagem total	54
	3.5.4 Contraste da imagem	57
	3.5.5 Qualidade da imagem	59
	3.6 Proteção radiológica	63
	3.6.1 Efeito das radiações	63
	3.6.2 Medidas de proteção contra radiações	65
	3.6.3 Zona de proteção contra radiações	70
	3.6.4 Aparelhos de medição de radiações	71

4	Método de Difração e de Retroespalhamento	74
	4.1 Difração de Raios X	74
	4.1.1 Mecanismos de difração	75
	4.1.2 Equações de Laue	75
	4.1.3 A condição de reflexão de Bragg	77
	4.1.4 Análise de difração	78
	4.2 Método de Retroespalhamento	79
	4.2.1 Procedimento	81
	4.2.2 Tomografia computadorizada por retroespalhamento	84
	4.2.3 Exemplos de aplicação	85
5	Fontes de Radiação	87
	5.1 Equipamentos de Microfoco	87
	5.1.1 Instalação de Equipamentos de Microfoco	87
	5.1.2 Dados técnicos	90
	5.1.3 Propriedades características	92
	5.1.4 Determinação do tamanho do foco de raios X	94
	5.2 Aparelhos de Raios X	101
	5.2.1 Tubos de Raios X	101
	5.2.2 Alimentação de alta tensão	103
	5.2.3 Filtragem das radiações	106
	5.3 Acelerador de Elétrons	107
	5.3.1 Acelerador Linear	107
	5.3.2 Aceleradores Circulares	109
	5.4 Fontes Radioativas	110
	5.4.1 Recipientes de trabalho	110
	5.4.2 Dados técnicos	112
6	Tratamento da Informação do Teste	113
	6.1 Técnica de filme	113
	6.1.1 Interpretação óptica	113
	6.1.2 Interpretação automática	114
	6.2 Conversão de imagem	117

Índice

6.3	Tratamento digital da imagem	118
6.3.1	Matriz da imagem	118
6.3.2	Média da imagem	119
6.3.3	Caracterização da imagem	121
6.3.4	Métodos de processamento da imagem	123
6.3.5	Exemplos de processamento da imagem	127
6.3.6	Interpretação automatizada das imagens	129
6.4	Tomografia	132
6.4.1	Princípios do método CT	132
6.4.2	Aplicações do método CT	135
7	Exemplos de aplicação da Técnica de Microfoco	138
7.1	Técnica de Semicondutores	138
7.2	Placas de circuitos impressos/multicamadas	142
7.3	Indústria metalúrgica	143
7.4	Cerâmica	149
7.5	Materiais Compostos	152
7.6	Técnica de Engenharia Industrial	154
8	Literatura	159
9	Índice de termos técnicos	165

Símbolos das formulas

Ângulo	= $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \Theta$
Atividade	= A
Coeficiente de atenuação	= μ
Colunas da imagem	= BS
Comprimento de onda	= λ
Constante de Planck	= h
Coordenadas cartesianas	= x,y,X,Y
Corrente elétrica, número de quanta, intensidade	= I
Densidade	= ρ
Desfocagem	= US
Desvio quadrado médio	= q
Diâmetro	= ϕ
Diferença	= Δ
Distância fonte - detector	= F
Distância fonte - objeto	= b
Distância objeto - detector	= a
Dose	= D
Enegrecimento (densidade óptica), matriz da imagem	= S
Energia	= E
Espessura, distância dos níveis da grade	= d
Fator de acréscimo da dose	= B
Fator de ampliação	= V
Fator de atenuação	= SF
Fator de efeito biológico relativo	= RBW
Frequência relativa	= i
Frequência	= v
Frequência espacial	= f
Função de transmissão	= $\ddot{U}F$
Função de filtragem	= ϕ
Função de borda difusa	= ESF
Gradiente logarítmico do filme	= G
Joule	= J
Linhas da imagem	= BR
Luminância	= L
Massa, valor médio	= m
Medida de granulação	= σ
Modulação, pontos da imagem	= M
Nível de cinza	= g
Número dos quanta por desintegração, número	= n
Número atômico	= Z
Número da qualidade da imagem	= BZ
Par de linhas	= LP
Período de semi-desintegração	= $T_{1/2}$
Potência	= P
Potência específica, distribuição de probabilidade	= p
Probabilidade	= W

Símbolos das formulas

Raio	= r
Sensibilidade do filme	= FE
Tamanho da imagem	= H
Taxa de dose	= \dot{D}
Tempo	= t
Tensão elétrica	= U
Trajetória de radiação	= w
Velocidade da luz	= c

Índices

Calor	= w
Cinética	= k
Compton	= co
Defeito	= F
Elétron	= e
Energia	= E
Equivalente	= \ddot{A}
Filme, foco	= f
Fio	= D
Fonte	= q
Foto	= ph
Geométrico	= g
Imagem, exposição, movimento	= b
Interno	= i
Linear	= l
Massa	= m
Material	= M
Medida	= G
Objeto (sem)	= o
Primário	= p
Produção de pares	= pe
Prova	= NW
Quantum de radiação	= s
Radiação, retroespalhamento	= STR
Raio gama	= γ
Sombra	= SCH
Total, inteiro	= t



1 INTRODUÇÃO

Ao tratar-se de métodos de ensaios não destrutivos, é necessário ter em vista sempre dois objetivos principais:

- determinação de defeitos, suas posições, tamanhos e formas
- caracterização das propriedades do material.

Para isso, todas as possibilidades existentes em cada método devem ser estudadas para que os objetivos acima mencionados possam ser alcançados. Além disso, é importante analisar o potencial de tais métodos para verificar também a rapidez do ensaio e se o método pode ser automatizado. Em muitos casos, isso leva à possibilidade de integrar o método do ensaio no processo de produção ou controle, o que pode oferecer vantagens econômicas.

A aplicação dos raios penetrantes para fins de análise está sendo realizada desde a descoberta dos raios X e, portanto, já tem uma longa tradição. A criação de novas técnicas e a possibilidade de suas aplicações também influenciaram, de modo positivo, nos métodos de exames radiográficos que operam com raios penetrantes. Por isso, apresentamos aqui uma resenha dos princípios de atuação dos métodos e suas possibilidades de aplicação mais avançadas. Somente entraremos em pormenores nos princípios fundamentais se isso for necessário para a compreensão o funcionamento dos métodos e suas aplicações práticas.

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

Tratam-se aqui de métodos de ensaios não destrutivos que operam com radiação eletromagnética penetrante. Fazem parte deste estudo, principalmente, os raios X e os raios gama. Por isso, trataremos, em primeira instância, das características gerais da radiação eletromagnética e, depois, detalhadamente, da radiação X e da radiação gama.

2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Pode-se ter uma idéia clara da radiação eletromagnética com base nas ondas eletromagnéticas ou nos quanta de radiação eletromagnética. Ambos os métodos de descrição são equivalentes e servem para mostrar as características da radiação e expressá-las em grandezas quantitativas. Uma onda eletromagnética pode ser caracterizada pelas seguintes grandezas:

- COMPRIMENTO DE ONDA λ
- FREQUÊNCIA ν

Como a onda eletromagnética se propaga com a velocidade da luz c ($c = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s), existe a seguinte relação entre o comprimento da onda e a frequência:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.1.1)$$

A energia de um quantum de radiação eletromagnética é definida pela fórmula:

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

$$E = h\nu \quad (2.1.2)$$

sendo:

$$h = \text{constante de Planck} = 4,138 \cdot 10^{-15} \text{ [eV} \cdot \text{s]}.$$

Na menção da dimensão da constante de Planck, aparece a grandeza "eV", a ser explicada a seguir. O símbolo "eV" é a abreviatura de ELETRON-VOLT. Este elétron-volt é uma unidade de energia muito prática para os quanta de radiações eletromagnéticas e a descrição de fenômenos energéticos nos átomos, sendo por isso apreciada.

A unidade ELETRON-VOLT corresponde à seguinte DEFINIÇÃO:

1 elétron-volt é igual à energia adquirida por um elétron, como energia cinética, depois de passar por uma diferença de potencial de 1 volt.

À esta unidade estão relacionados:

$$1 \text{ QUILOELETRON-VOLT} = 1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MEGAELETRON-VOLT} = 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

A conversão da unidade de energia elétron-volt na unidade de energia JOULE (J) ou WATT-SEGUNDO (Ws) do Sistema Internacional de Unidades é efetuada com a ajuda do valor da carga do elétron: $e = 1,601 \cdot 10^{-19}$ ampère-segundos [As]. De acordo com a definição do elétron-volt, a carga deve ser multiplicada pela diferença de potencial de 1 volt, sendo que, a potência elétrica é dada pelo produto da corrente (em ampères, A) e tensão (em volts, V) na unidade watt ($W = VA$), resulta a fórmula de conversão

$$1 \text{ eV} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ W} \cdot \text{s} \quad (2.1.3)$$

ou

$$1 \text{ Ws} = 6,246 \cdot 10^{18} \text{ eV} \quad (2.1.4)$$

Da fórmula de conversão (2.1.3), deduz-se que o elétron-volt representa uma quantidade de energia muito pequena. Após a explicação do elétron-volt, voltamos agora a tratar das características da radiação eletromagnética. Se introduzirmos a frequência ν , expressa pela fórmula (2.1.1), na fórmula (2.1.2), resulta:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1.5)$$

2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

DISCUSSÃO:

Esta fórmula estabelece a ligação entre a energia de radiação eletromagnética com o seu comprimento de onda λ , respectivamente a frequência ν . Ela mostra que a energia E da radiação eletromagnética é tanto maior quanto mais curto for o seu comprimento de onda λ ou quanto maior a sua frequência ν . Conclui-se da fórmula (2.1.5) que a radiação eletromagnética de energia elevada é uma radiação de ondas muito curtas. Quanto maior for o comprimento de onda, tanto menor será a energia. Esta caracterização da radiação eletromagnética pela energia e pelo comprimento de onda permite uma representação sistemática da radiação eletromagnética, como se vê na FIGURA 2.1.1.

Energia	Comprimento de onda	Tipo de radiação	Técnicas de ensaios não destrutivos
	10 km		
	1 km		
	100 m		
	10 m		
	1 m	Ondas eletromagnéticas (radiodifusão, etc.)	Métodos eletromagnéticos (Ruido magnético, fluxo de fuga, corrente de Foucault, etc.)
	100 mm		
	10 mm		
	1 mm		
	100 μ m		
0.1 eV	10 μ m	Radiação térmica	Termografia
1 eV	1 μ m	Luz visível	Laser de penetração da cor
10 eV	100 nm	Radiação ultra-violeta	
100 eV	10 nm		
1 keV	1 nm		
10 keV	100 pm	Radiação de Raios X	Métodos com radiação penetrante
100 keV	10 pm		
1 MeV	1 pm	Radiação gama (radiação nuclear)	
10 MeV	0.1 pm		
100 MeV	0.01 pm		

FIGURA 2.1.1: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Na FIGURA 2.1.1, podem ser vistos que tipos de radiações ou ondas se apresentam em cada campo de comprimento de ondas e de energia. As ondas eletromagnéticas, por exemplo para a radiodifusão e televisão, têm comprimentos entre vários quilômetros a poucos milímetros. Aos comprimentos de onda menores, segue-se a radiação térmica, seguida pela luz visível e pela radiação ultra-violeta no campo de nanômetros (nm) ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). No campo de picômetros ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$), encontram-se os raios X e os raios gama como radiação eletromagnética de alta energia e ondas curtas, que estudaremos mais detalhadamente nos próximos capítulos. Na coluna da direita da FIGURA 2.1.1, também estão indicados os métodos de ensaios não-destrutivos, baseados na radiação ou nas ondas eletromagnéticas. Este esquema é bastante adequado para classificar estes métodos de exame e permite obter uma visão global sistemática.

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

2.2 RADIAÇÃO DE RAIOS X

A radiação eletromagnética de Roentgen aparece quando há um impacto de elétrons acelerados sobre um material, sendo então desacelerados. Para explicar os fenômenos que ocorrem nessa ocasião, definiremos inicialmente, de modo geral, o material contra o qual se chocam os elétrons e discutiremos depois os fenômenos durante a desaceleração. Os materiais são constituídos de átomos, respectivamente moléculas, e as características dos materiais são determinadas principalmente pelo tipo e pela disposição dos átomos. Em princípio, os átomos são formados de um núcleo com carga positiva e de elétrons negativos que rodeiam o núcleo em camadas. O átomo completo deve ser eletricamente neutro, o que significa que, ao redor do núcleo, deve existir o mesmo número de elétrons negativos quanto o número de cargas positivas do núcleo. O número de cargas positivas do núcleo é chamado NÚMERO ATÔMICO. Portanto, o número atômico também indica o número de elétrons do respectivo átomo. O número e a disposição dos elétrons nas camadas são decisivos para a definição de suas propriedades químicas, bem como para suas classificações no SISTEMA PERIÓDICO DOS ELEMENTOS. A ligação entre os elétrons e o núcleo realiza-se por campos elétricos. Assim, o NÚMERO ATÔMICO contém as seguintes informações:

- Z : Número de cargas positivas do núcleo
- : Número de elétrons nas camadas
- : Identificação do elemento químico

Por exemplo, o átomo do ferro ($Z=26$) tem um total de 26 elétrons, enquanto átomos de tungstênio ($Z=74$) têm um total de 74 elétrons e átomos de chumbo ($Z=82$) um número ainda maior de elétrons. A FIGURA 2.2.1 mostra um modelo da constituição de átomos.

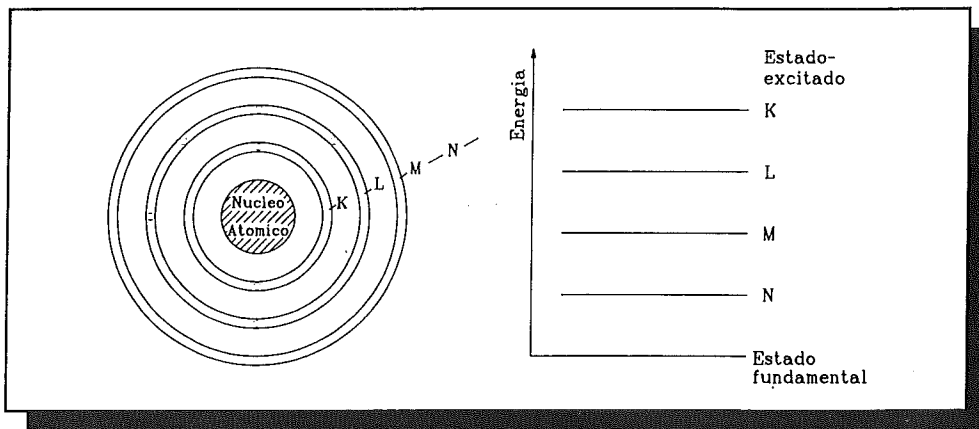


FIGURA 2.2.1: MODELO ATÔMICO

As camadas de elétrons ao redor do núcleo atômico são designadas com as letras K, L, M, N,... A camada K está mais próxima do núcleo. Os elétrons que se encontram nas camadas estão ligados ao núcleo. A energia com a qual se realiza essa ligação, é diferente nas várias camadas, como mostra a FIGURA 2.2.1, à direita. Os elétrons na camada K estão ligados

2.2 RADIAÇÃO DE RAIOS X

mais fortemente. Isso quanto à caracterização do material.

Elétrons acelerados podem ser gerados num dispositivo representado de forma esquemática na FIGURA 2.2.2. Os elétrons negativos de um emissor de elétrons (cátodo), que formam a corrente de elétrons I_e , são acelerados por uma tensão positiva (tensão de aceleração U_e) em feixes em direção a uma placa metálica (ânodo), colimados e chocando-se contra a assim chamada mancha catódica (foco).

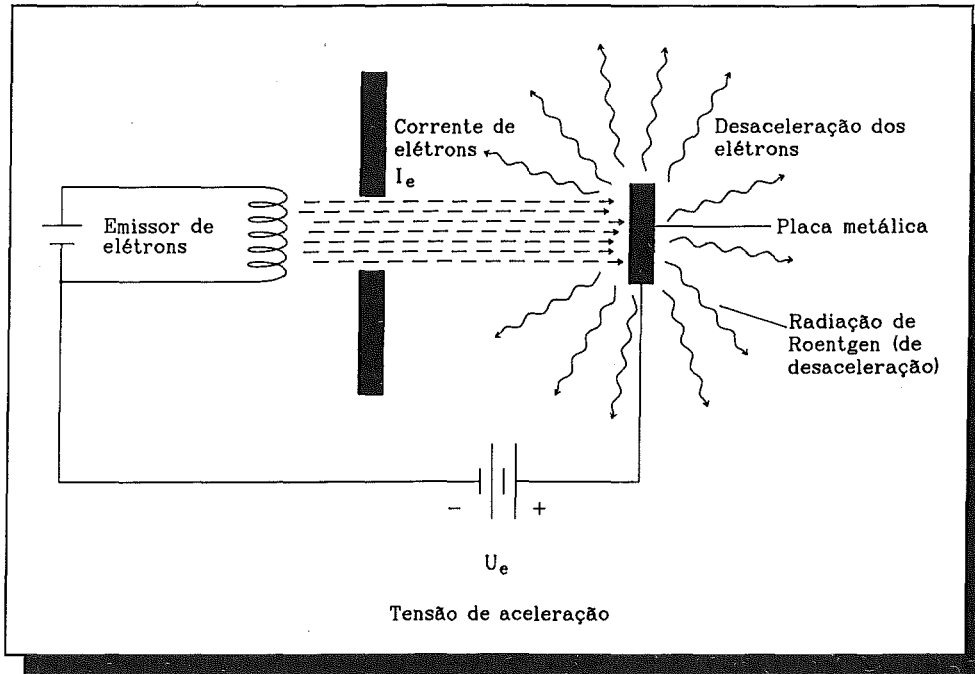


FIGURA 2.2.2: GERAÇÃO DE RAIOS X

A energia cinética que o elétron adquire nessa oportunidade é determinada pela tensão de aceleração U_e . Esta energia cinética pode ser expressa em ELETRONS-VOLTS [eV]. De acordo com a definição do ELETRON-VOLT (veja o capítulo 2.1), o valor da energia cinética do elétron, em eV, resulta diretamente da tensão de aceleração U_e , em volts [V]. Sendo U_e , por exemplo, de 50.000 V, a energia cinética E_{ke} é de 50.000 eV ou 50 KeV. Os se chocarem contra a placa metálica, os elétrons são desacelerados e perdem a sua energia cinética. De acordo com a lei de conservação da energia, esta energia cinética deve ser transformada numa outra forma de energia. Este processo de desaceleração, pelo qual são gerados os raios X, pode ser realizado de dois modos diferentes:

(1) Desaceleração por campos elétricos:

Se um elétron que se desloca rapidamente no material da placa for desacelerado pelo campo elétrico na proximidade dos núcleos atômicos, ele pode transformar uma parte da sua energia cinética (E_{ke}) em energia eletromagnética. A radiação eletromagnética resultante foi descoberta por ROENTGEN e por ele denominada de radiação X. Hoje, ela é denominada,

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

em sua homenagem, de **RADIAÇÃO DE ROENTGEN**. A energia de radiação de Roentgen pode ser calculada, de acordo com as leis da radiação eletromagnética, pela fórmula já mencionada (2.1.3). A parte da energia cinética do elétron não transformada em energia de radiação eletromagnética é convertida, por processos de dispersão nos elétrons dos átomos do material, em energia térmica E_w . Conforme a lei da conservação de energia, resulta a fórmula 2.2.1.

$$E_{ke} = h \frac{c}{\lambda} + E_w \quad (2.2.1)$$

Caso a energia cinética total do elétron E_{ke} for transformada em energia radiante, isto é, $E_w = 0$, é resultada **ENERGIA MÁXIMA DA RADIAÇÃO DE ROENTGEN**. E esse caso, porém, é muito raro, porque a percentagem dos processos de dispersão, dos quais resulta energia térmica, é muito elevada. Na conversão de E_{ke} , a percentagem da radiação - que depende do valor de E_{ke} e do tipo do material da placa - é somente de 1 a 3%, enquanto que a percentagem da energia térmica é de 97 a 99%. Pelo fato de que em virtude do tipo do processo de desaceleração dos elétrons a energia de radiação de Roentgen pode apresentar valores entre zero e E_{ke} , há uma distribuição contínua da energia dos quanta de radiação, designada por **ESPECTRO CONTINUO DE ROENTGEN** ou **ESPECTRO DE DESACELERAÇÃO**. Na FIGURA 2.2.3, está representada, de modo esquemático, uma distribuição típica de energia desse tipo.

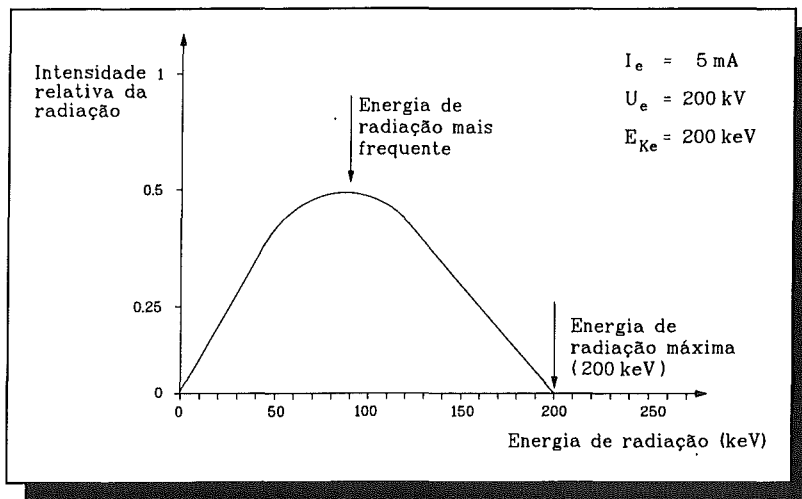


FIGURA 2.2.3: ESPECTRO CONTINUO DE DESACELERAÇÃO

Está representada a **INTENSIDADE RELATIVA DA RADIAÇÃO** (para um caso de referência) como função da energia de radiação [KeV]. Para uma tensão de aceleração de 200 quilovolts [KV], a energia máxima da radiação de Roentgen - de acordo com as explicações acima - é de aprox. 200 KeV. A intensidade da radiação distribui-se continuamente entre zero e E_{ke} , com um máximo da intensidade da radiação.

2.2 RADIAÇÃO DE RAIOS X

(2) Desaceleração por processos de choque

Elevando-se a tensão de aceleração U_e até que a energia cinética E_{ke} dos elétrons seja suficiente para retirar de um átomo um elétron que esteja próximo ao seu núcleo, sobrepõe-se ao espectro contínuo da radiação de Roentgen uma linha de radiação. A energia dessa radiação é característica do material da placa de impacto e, por isso, é designada por **RADIAÇÃO DE ROENTGEN CARACTERÍSTICA**. Pode-se explicar a formação da radiação de Roentgen característica por meio do modelo atômico (veja a FIGURA 2.2.1). Para demonstrar sua formação, os processos decorrentes estão representados na FIGURA

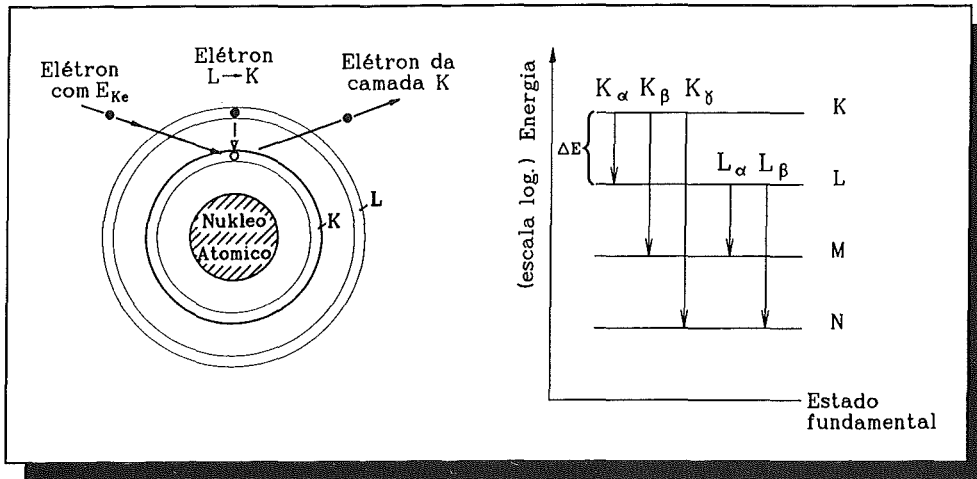


FIGURA 2.2.4: GERAÇÃO DA RADIAÇÃO CARACTERÍSTICA

2.2.4. O elétron que se aproxima com a energia cinética E_{ke} expulsa um elétron da camada K, em consequência o átomo fica num estado excitado de maior energia; nesse caso no estado de quanta K, pois o elétron foi expulso da camada K. Processos correspondentes também podem ter lugar nas camadas L, M, etc. Como mostra a FIGURA 2.2.4, o estado de quanta K é o estado de energia mais elevada. Porém, esse estado energético não é estável e converte-se outra vez num estado estável se a vacância existente for preenchida, p.ex. por um elétron da camada L. Nessa passagem da camada L à camada K, a diferença de energia ΔE é irradiada como quantum de radiação eletromagnética. Como as diferenças entre os estados energéticos K, L, M, ... têm valores característicos para cada material, surgiu a designação de "radiação de Roentgen característica". As designações das diversas linhas de radiações podem ser vistas na FIGURA 2.2.4. A mais importante é normalmente a radiação K_{α} .

Na TABELA 2.2.1, estão reunidos os valores energéticos da radiação K_{α} para alguns materiais.

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

ELEMENTO	NUMERO ATOMICO	LINHA K_{α} [KeV]
ZIRCÔNIO	40	17,60
MOLIBDÊNIO	42	20,04
PRATA	47	25,59
TUNGSTÊNIO	74	69,64
OURO	79	80,91
CHUMBO	82	88,23
URÂNIO	92	116,30

TABELA 2.2.1: VALORES ENERÉTICOS DA RADIAÇÃO K_{α}

Com a elevação do número atômico, aumenta a energia de radiação K_{α} característica. Ela é excitada quando a energia cinética E_{ke} dos elétrons excede os valores K_{α} indicados. Nesse caso, a radiação K_{α} sobrepõe-se ao espectro contínuo de Roentgen; então, os processos de choque e desaceleração por campos elétricos podem ocorrer em paralelo. Na FIGURA 2.2.5, pode-se ver uma distribuição de energia combinada (espectro). Assim, evidencia-se que, pela escolha adequada do material do ânodo e da tensão de aceleração, com ajuda das linhas características, é possível produzir uma radiação de Roentgen monoenergética, o que é interessante para aplicações especiais (veja o capítulo 4).

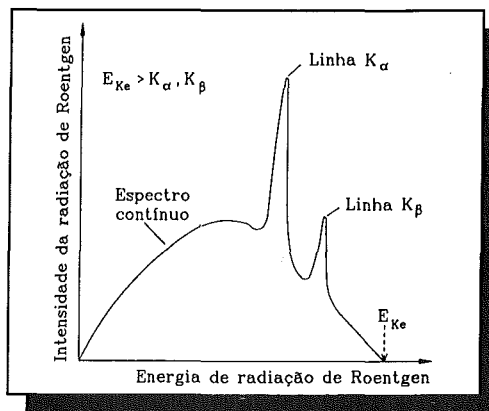


FIGURA 2.2.5: ESPECTRO DE ROENTGEN COMBINADO

2.3 RADIAÇÃO GAMA

A radiação gama é uma radiação eletromagnética de alta energia, emitida por núcleos atômicos radioativos. Para explicar a sua formação, trataremos primeiro da estrutura energética dos núcleos atômicos. Um núcleo atômico estável encontra-se normalmente no seu estado energético mais estável, o assim chamado ESTADO FUNDAMENTAL.

Isso está representado esquematicamente na FIGURA 2.3.1. De maneira semelhante aos estados energéticos discretos das camadas dos elétrons no envoltório do átomo (veja a FIGURA 2.2.1), no núcleo atômico existem também estados energéticos mais elevados, que se diferenciam pelos valores energéticos. Estes estados energéticos mais elevados são denominados ESTADOS EXCITADOS.

2.3 RADIAÇÃO GAMA

O núcleo atômico pode ser colocado em estados excitados por mecanismos excitantes diferentes (p.ex. por choques, captura de neutrons, etc.), que não são estáveis como tais, de modo que o núcleo atômico procura voltar ao seu estado energético fundamental. Ao passar de um estado excitado ao estado fundamental, o núcleo atômico emite a diferença de energia como energia de radiação eletromagnética, em forma de RAIÓ GAMA.

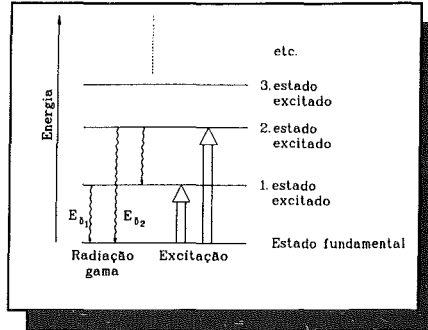


FIGURA 2.3.1:
ESTADOS ENERGETICOS DE
NUCLEOS ATOMICOS

Se o núcleo atômico passa, p.ex., do 1º estado excitado ao estado fundamental, ele emite um quantum gama de energia E_{γ_1} ; do 2º estado excitado ao estado fundamental de E_{γ_2} , e assim por diante. Como as distâncias entre os estados energéticos são características do respectivo núcleo atômico, cada núcleo radioativo emite os raios gama característicos. Mostramos isso com dois exemplos representados na FIGURA 2.3.2.

No primeiro exemplo (à esquerda na figura), trata-se do núcleo atômico radioativo de cobalto 60, que se transforma no núcleo atômico de níquel 60, que então passa de estados excitados para o estado fundamental. Nesse processo de desintegração do cobalto 60, são emitidos dois raios gama característicos, com energia

$E_{\gamma} = 1,33 \text{ MeV}$ e $1,17 \text{ MeV}$. No segundo exemplo (à direita na figura), trata-se do núcleo atômico radioativo de césio 137, que se desintegra, formando o núcleo atômico de bário 137.

Na FIGURA 2.3.2, vê-se que nesse caso só se emite um raio gama característico, que possui a energia $E_{\gamma} = 0,66 \text{ MeV}$. Portanto, pode-se notar que determinados materiais radioativos (emissores) emitem uma radiação gama característica, cuja energia depende do tipo do emissor de raios gama. Para determinar a intensidade da radiação emitida, é decisivo o número de processos de desintegração por unidade de tempo, que se verificam no material emissor. Para caracterizá-lo, emprega-se o termo de **ATIVIDADE**. Ela é definida como:

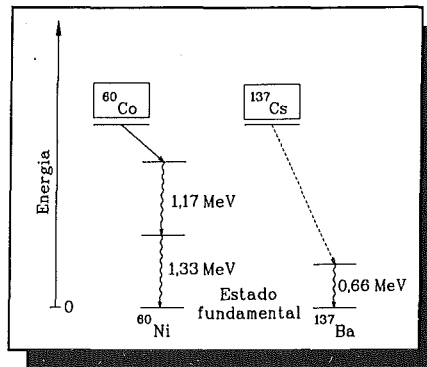


FIGURA 2.3.2: RADIAÇÃO
GAMA CARACTERÍSTICA

ATIVIDADE A: Número de desintegrações nucleares radioativas por segundo

A unidade correspondente no sistema SI é o **BECQUEREL**. A sua definição é:

1 **BECQUEREL (Bq)** = 1 desintegração de um núcleo por segundo

Anteriormente, era usado como unidade da atividade o **CURIE**, cuja definição é:

1 **CURIE (Ci)** = $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegrações/s

2 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO

Como o Becquerel representa uma unidade de atividade muito pequena, também são usadas as seguintes unidades:

1 QUILOBECQUEREL	[KBq]	=	10^3 Bq
1 MEGABECQUEREL	[MBq]	=	10^6 Bq
1 GIGABECQUEREL	[GBq]	=	10^9 Bq

Deve-se notar, porém, que a atividade não tem o mesmo significado que a intensidade do emissor, o qual indica o número dos raios gama emitidos por segundo. Como mostram os exemplos na FIGURA 2.3.2, podem ser emitidos um ou vários raios gama por desintegração de um núcleo. Para calcular a intensidade do emissor gama, deve-se multiplicar a sua atividade pelo número de raios gama por desintegração de um núcleo. Como exemplo, consideremos o emissor gama cobalto 60.

Sendo

n = número de raios gama por desintegração de um núcleo,

para o cobalto 60 vale $n = 2$, porque um tem a energia de 1,33 MeV e o outro de 1,77 MeV. Sendo a atividade do emissor de cobalto 60 de

$$A = 10^9 \text{ Bq}$$

resulta a intensidade I da radiação

$$I = n \cdot A = 2 \cdot 10^9 \text{ raios gama/s} \quad (2.3.1)$$

Para um ensaio não destrutivo, o emprego da radiação gama é tão importante quanto o da radiação de Roentgen. Nesse contexto, porém, também é importante a questão da diminuição da atividade ou da intensidade no tempo. Ao tratar da radiação gama característica, mostramos que, durante a sua formação, um núcleo radioativo se transforma e depois não existe mais como tal. Isso significa que com o tempo, o material do emissor se reduz e, por consequência, a sua atividade também diminui. Para a diminuição da atividade no tempo, devido à desintegração dos núcleos, vale a LEI DA DESINTEGRAÇÃO, expressa pela seguinte fórmula:

$$A(t) = A_0 \exp \left(- \frac{0,693}{T_{1/2}} \cdot t \right) \quad (2.3.2)$$

sendo

$A(t)$ = atividade no tempo t

A_0 = atividade no momento $t = t_0$

$T_{1/2}$ = período de semi-desintegração

De acordo com a lei de desintegração (2.3.2), a atividade do emissor diminui com o tempo de forma exponencial. No que se refere à descrição da redução temporal da atividade, ou seja da intensidade, o PERÍODO DE SEMI-DESINTEGRAÇÃO $T_{1/2}$ tem um significado especial:

PERÍODO DE SEMI-DESINTEGRAÇÃO $T_{1/2}$: PERÍODO após o qual a atividade inicial do emissor diminuiu pela METADE.

2.3 RADIAÇÃO GAMA

Cada emissor tem um período de semi-desintegração característico. Assim, por exemplo, o emissor cobalto 60 tem um período de semi-desintegração de 5,2 anos. Isso significa que, decorridos 5,2 anos, ele perde a metade de sua atividade, ou seja sua atividade é emitida somente com a metade de sua intensidade. Devido à grande importância do período de semi-desintegração como propriedade característica dos emissores, o decurso temporal da atividade é representado em múltiplos do período de semi-desintegração, como se vê na FIGURA 2.3.3. A curva exponencial permite ver diretamente a diminuição da atividade. Assim, depois de dois períodos de semi-desintegração, resta somente um quarto de sua atividade, depois de três períodos de semi-desintegração, a oitava parte e depois de dez períodos de semi-desintegração, aproximadamente UM MILESIMO da atividade inicial. Este fato é observado durante os ensaios. Na TABELA 2.3.1, estão reunidos alguns emissores gama para ensaios não destrutivos, com as suas grandezas características. O número n dos raios gama por desintegração de um núcleo está indicado no total e, para cada energia gama são indicados separadamente.

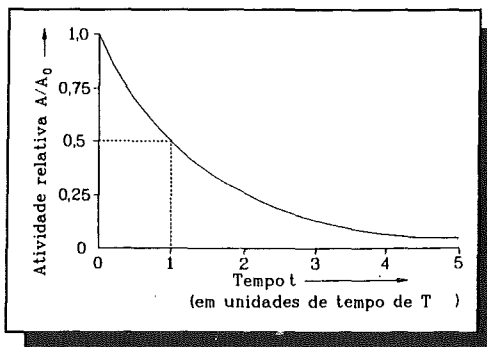


FIGURA 2.3.3: DIMINUIÇÃO DA ATIVIDADE DO EMISSOR NO TEMPO

FONTE	$T_{1/2}$	n	$E_{\gamma 1}$ [MeV]	n_1	$E_{\gamma 2}$ [MeV]	n_2	$E_{\gamma 3}$ [MeV]	n_3
COBALTO - 60	5,27 a	2,00	1,33	1,00	1,17	1,00	--	--
CÉSIO - 137	30,1 a	0,92	0,66	0,92	--	--	--	--
IRÍDIO - 192	74,3 d	2,41	0,60	0,27	0,47	0,67	0,31	1,47
TÚLIO - 170	129 d	0,08	0,084	0,03	0,052	0,05	--	--

Explicação: a = anos; d = dias

TABELA 2.3.1: EMISSORES GAMA

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

Designam-se por métodos de transmissão da radiação os métodos nos quais a radiação eletromagnética entra em contato com a peça a ser examinada, penetra em parte na mesma e depois sai. Em consequência, os métodos de transmissão da radiação são especialmente adequados para verificar defeitos volumétricos no interior da peça.

3.1 PRINCÍPIO DE TRABALHO

O princípio de trabalho dos métodos de transmissão da radiação é explicado com um equipamento de prova formado por uma fonte de radiação, pela peça a ser examinada e um dispositivo detector da radiação. Tal equipamento está representado na FIGURA 3.1.1. A radiação eletromagnética (de Roentgen ou gama) sai da fonte emissora e entra em contato com a peça a ser examinada. A FIGURA 3.1.1, à esquerda, está representado um CORPO DE PROVA SEM DEFEITO. A radiação é atenuada pelo material do corpo de prova, de modo que só uma parte da radiação original escapa do lado inferior do corpo de prova, podendo ser medida pelo detector de radiação. A distribuição da intensidade da radiação medida está indicada em baixo, à esquerda, sobre a coordenada x . A forma da curva

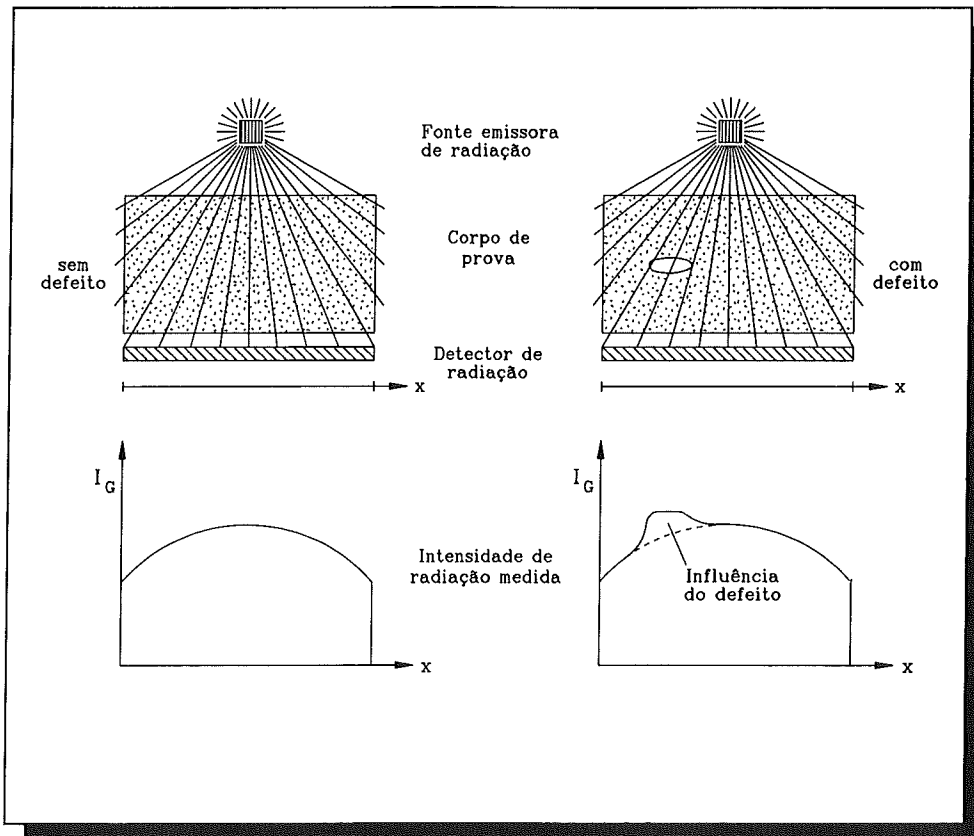


FIGURA 3.1.1: PRINCÍPIO DO ENSAIO COM TRANSMISSÃO DA RADIAÇÃO

3.1 PRINCÍPIO DE TRABALHO

deve-se ao fato de que, em ambos os lados, a radiação tem um percurso mais longo através do corpo de prova do que no centro, sendo sua curvatura, desta forma, mais atenuada em comparação ao centro, cujo percurso é plano. No lado direito da FIGURA 3.1.1, está representado um CORPO DE PROVA COM DEFEITO. Admitamos que o defeito consiste de uma cavidade no material. Como não há matéria nesta cavidade, a radiação não é atenuada nesse ponto. Isso significa que a radiação nesse lugar passa pelo corpo de prova com menor atenuação, caso não haja um defeito. Por isso, a intensidade da radiação I_G medida deve ser maior no lugar do defeito, o qual está representado em baixo, à direita, na FIGURA 3.1.1. Pelos motivos descritos, é possível representar o defeito volumétrico externamente, com ajuda da prova de radiação. Naturalmente, essa possibilidade não é usada somente na área técnica, mas também na medicina, o que muitas pessoas conhecem por experiência própria. Conclui-se do princípio de trabalho que o comportamento de atenuação dos materiais em questão é decisivo para o método de penetração da radiação. Para a constatação de um defeito, são importantes as diferenças da atenuação da radiação nos diversos pontos do material com e sem defeito. Por isso, é preciso dar atenção especial à atenuação da radiação. Como os raios eletromagnéticos se propagam em linha reta - como a luz - e em consequência a representação do defeito também deve obedecer às leis da ótica, a disposição geométrica do sistema de prova também tem grande importância. O objetivo é obter uma representação com o maior contraste possível e nítida.

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

Quando a radiação eletromagnética de Roentgen e gama entra em contato com materiais, ela é atenuada. Como esse fato tem importância especial para o princípio de trabalho do ensaio com penetração da radiação, trataremos dele com mais detalhes.

3.2.1 PROCESSOS DE ATENUAÇÃO

Pode-se representar a radiação eletromagnética pelos quanta de radiação de energia conhecida. O material, sobre o qual atuam esses quanta de radiação, é constituído de átomos. A estrutura dos átomos, formados pelo núcleo e pelos elétrons, foi explicada no capítulo 2.2. Com base nessa idéia do modelo atômico, a ação recíproca entre a radiação de Roentgen e gama com os átomos do material pode realizar-se das seguintes três formas:

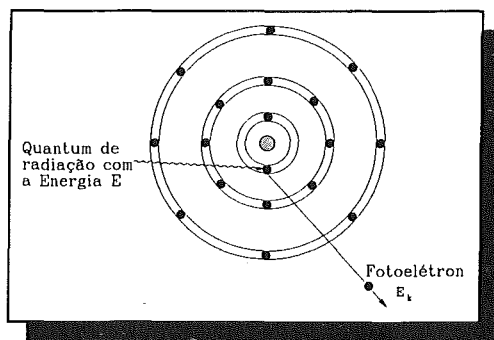


FIGURA 3.2.1: EFEITO FOTOELÉTRICO

EFEITO FOTOELÉTRICO: Os processos no efeito fotoelétrico estão representados esquematicamente na FIGURA 3.2.1. O quantum de radiação interage com o átomo do material, transmitindo toda a sua energia a um elétron do envoltório. Nessa ocasião, o elétron do envoltório sai da sua camada, sendo chamado de FOTOELÉTRON. A sua

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

velocidade é atenuada dentro do material. Nesse processo, o quantum de radiação desaparece completamente - ele é ABSORVIDO - e a sua energia é transformada em energia térmica. No material, fica um átomo resultante com carga positiva (ION), porque lhe falta a carga negativa do elétron. De uma maneira geral, os processos, nos quais elétrons são expulsos das camadas, chamam-se PROCESSOS DE IONIZAÇÃO. A probabilidade de haver um efeito fotoelétrico, depende

- (a) da energia do quantum de radiação
- (b) da espécie de material, caracterizada pelo número atômico

Introduzindo-se:

W_{ph} = probabilidade de que um quantum γ seja absorvido pelo efeito fotoelétrico, vale

$$W_{ph} \text{ proporcional } \frac{Z^5}{\sqrt{E^7}} \quad (3.2.1)$$

Discussão da fórmula (3.2.1): A probabilidade de verificar-se um efeito fotoelétrico aumenta com a quinta potência do número atômico Z . Isso significa que a absorção de radiação por efeito fotoelétrico é especialmente forte no caso de núcleos atômicos com Z elevado (chumbo, urânio, etc.). A dependência da raiz quadrada da sétima potência da energia de radiação no denominador significa que o efeito fotoelétrico se produz especialmente no caso de baixa energia.

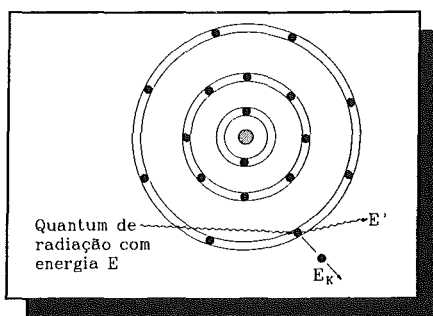


FIGURA 3.2.2: EFEITO COMPTON

EFEITO COMPTON: Os processos que se desenvolvem no caso do efeito Compton estão representados esquematicamente na FIGURA 3.2.2. Trata-se de um processo de dispersão, no qual o quantum de radiação só transfere uma parte da sua energia ao elétron ligado e expulsa o mesmo da sua camada. O quantum de radiação disperso (QUANTUM DE DISPERSÃO) continua o seu movimento com a energia restante. Este processo de dispersão, designado pelo nome do seu descobridor, COMPTON, também é um processo de ionização.

Introduzindo-se

W_{co} = probabilidade de se verificar o efeito Compton

$$W_{co} \text{ proporcional } \frac{Z}{E} \quad (3.2.2)$$

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

Discussão da fórmula (3.2.2): A probabilidade de verificar se o efeito Compton aumenta de forma linear com o número atômico Z . Isso significa que ele se apresenta com maior frequência no caso de núcleos pesados que no caso de núcleos leves. Quanto à energia, ele diminui com o aumento da energia de radiação, ou seja, com valores baixos ele se apresenta com maior frequência. Observe-se que no efeito Compton o quantum de radiação não desaparece por absorção, mas continua a existir como quantum de espalhamento, com energia reduzida. Isso significa que nesse caso se forma um espalhamento secundário da radiação (RADIAÇÃO SECUNDÁRIA), que só pode ser absorvida por outros processos de interação.

PRODUÇÃO DE PARES: A FIGURA 3.2.3 mostra o que ocorre na produção de pares. O quantum de radiação produz, na proximidade de um núcleo atômico, um elétron negativo (NEGATRON) e um elétron positivo (PÓSITRON).

Nesse processo, o quantum de radiação desaparece, consumindo toda a sua energia em primeiro lugar para produzir os dois elétrons e em segundo lugar para a energia cinética dos mesmos.

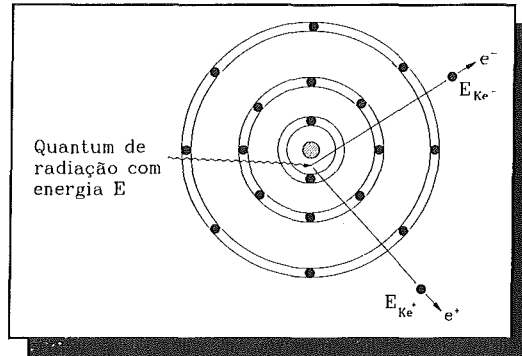


FIGURA 3.2.3: PRODUÇÃO DE PARES

Introduzindo-se:

W_{pe} = probabilidade de uma produção de pares

vale:

W_{pe} proporcional $Z^2 \ln E$	$E > 1,02 \text{ MeV}$	(3.2.3)
-----------------------------------	------------------------	---------

Discussão da fórmula (3.2.3): A probabilidade de uma produção de pares aumenta com o quadrado do número atômico Z . Por isso, também nesse caso, aumenta muito a probabilidade de interações com núcleos pesados. A probabilidade aumenta de forma logarítmica com a energia de radiação. Isso significa que, ao contrário do efeito fotoelétrico e do efeito Compton, verifica-se aqui um aumento com o incremento da energia. Devido à formação das massas dos dois elétrons, o quantum de radiação deve ter uma energia mínima de 1,02 MeV, para poder iniciar a produção de pares.

Em consequência da produção de pares, tem-se o seguinte efeito: enquanto que o negatron é uma partícula estável, com o pósitron não se dá o mesmo. O pósitron une-se com um elétron negativo e desmaterializa-se em dois raios gama. Este processo, chamado de ANIQUILAÇÃO, forma, na produção de pares, uma radiação secundária, de maneira que o quantum de radiação primária é absorvido, mas resultam dois quanta de radiação como produtos de aniquilação.

A probabilidade total de haver uma interação entre o quantum de radiação e os átomos do material, com atenuação e absorção, compõe-se da soma das três probabilidades individuais

(3.2.1) a (3.2.3), de modo que vale

$$W = W_{ph} + W_{co} + W_{pe} \quad (3.2.4)$$

A interação total é uma superposição dos três processos.

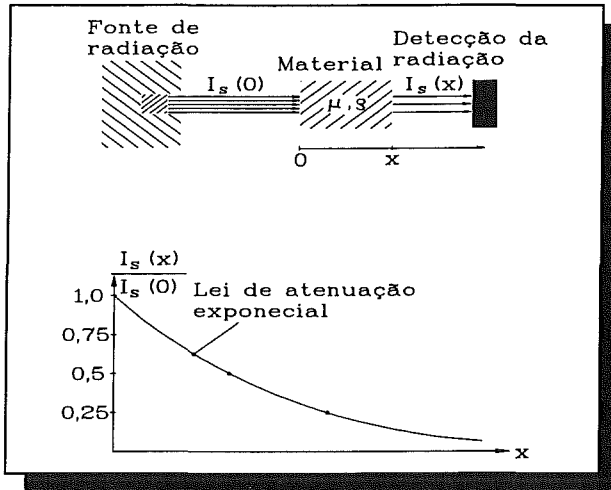


FIGURA 3.2.4: ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

Para o TRATAMENTO QUANTITATIVO da atenuação ou absorção da radiação eletromagnética observa-se um feixe de radiação I_s , que choca contra um material com a espessura x , como mostra a FIGURA 3.2.4. O feixe $I_s(0)$ choca contra o material, é atenuado ao penetrar através do material com a espessura x , sendo detectado após a sua saída como feixe $I_s(x)$.

3.2.2 LEI DA ATENUAÇÃO

A atenuação é calculada conforme a assim chamada "LEI DA ATENUAÇÃO EXPONENCIAL":

$$I_s(x) = I_s(0) e^{-\mu x} \quad (3.2.5)$$

sendo:

- $I_s(x)$ = número dos quanta de radiação por m^2 e s após a passagem pela espessura do material x
- $I_s(0)$ = número dos quanta de radiação por m^2 e s que chocam contra o material
- x = espessura do material [m]
- μ = coeficiente total de atenuação linear [m^{-1}]

O feixe de radiação é atenuado de forma exponencial com a espessura do material. Quanto maior for o coeficiente de atenuação μ do material, tanto maior é a atenuação. Mas a grandeza do coeficiente de atenuação μ e a sua dependência da energia dos quanta de radiação e da espécie do material, está compreendida na probabilidade de interação W (veja a fórmula 3.2.4), porque os processos de interação, ali realizados, têm como resultado a

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

absorção. Em consequência, o coeficiente de atenuação μ depende da

- (a) espécie do material, expressa pelo número atômico Z e a densidade do material ρ
- (b) energia E dos quanta de radiação

O coeficiente de atenuação μ é indicado de duas maneiras diferentes:

- (1) COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO LINEAR = μ_l [m^{-1}]
- (2) COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DA MASSA = μ_m [m^2/kg]

Os dois coeficientes estão ligados entre si pela fórmula

$$\mu_l = \mu_m \cdot \rho \quad (3.2.6)$$

ρ = densidade do material [kg/m^3]

Empregando-se na lei da atenuação (3.2.5) o coeficiente de atenuação linear μ_l [m^{-1}], a espessura do material x [m] deve ser escrita em metros, porque o expoente sempre deve ser indicado sem dimensão. Empregando-se o coeficiente de atenuação da massa μ_m , deve-se indicar a espessura do material x em kg/m^2 ou g/cm^2 . Exemplo: consideremos o material ferro ($Z = 26$; $\rho = 7,87 g/cm^3$), que é o componente principal de muitos aços. No caso de uma energia de radiação de 1 MeV resulta um coeficiente de atenuação da massa $\mu_m = 0,06 cm^2/g$. O coeficiente de atenuação linear resulta da fórmula (3.2.6), em relação a 1, sendo $\mu_l = 0,47 cm^{-1}$.

Como os coeficientes de atenuação linear permitem descrever facilmente o comportamento da radiação ao passar por materiais, indicam-se na TABELA 3.2.1 coeficientes de atenuação linear para diversos materiais e energias de radiação.

ENERGIA DE RADIAÇÃO	μ_l [cm^{-1}] ALUMINIO	μ_l [cm^{-1}] FERRO	μ_l [cm^{-1}] COBRE	μ_l [cm^{-1}] CHUMBO
50 KeV	0,964	15,2	22,9	65,0
100 KeV	0,459	2,93	4,10	62,0
150 KeV	0,373	1,54	1,98	21,8
200 KeV	0,329	1,15	1,39	10,7
300 KeV	0,281	0,866	0,997	4,29
400 KeV	0,250	0,740	0,837	2,49
500 KeV	0,228	0,662	0,742	1,72
1 MeV	0,166	0,471	0,524	0,798
2 MeV	0,116	0,334	0,374	0,524
3 MeV	0,0959	0,283	0,320	0,482
4 MeV	0,0837	0,260	0,295	0,484
5 MeV	0,0769	0,247	0,284	0,494
6 MeV	0,0718	0,239	0,277	0,505
8 MeV	0,0656	0,235	0,271	0,538
10 MeV	0,0621	0,233	0,272	0,570

TABELA 3.2.1: COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO LINEAR

Como explicamos na discussão dos processos de interação, a atenuação da radiação é especialmente forte nos materiais com núcleos atômicos pesados e alta densidade, motivo pelo qual estes são utilizados de preferência para blindagem de radiações, na proteção radiológica. Nesses materiais, o coeficiente de atenuação é especialmente elevado. A dependência do coeficiente de atenuação da energia dos quanta de radiação está representada

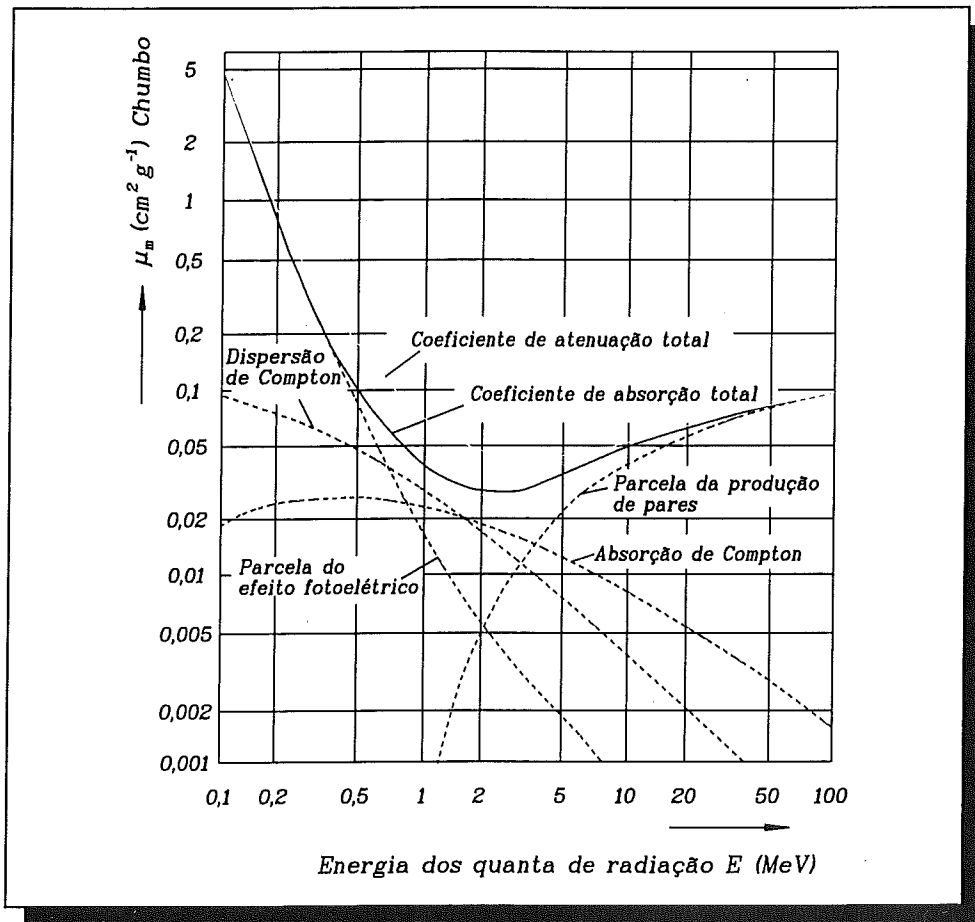


FIGURA 3.2.5: COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DA MASSA DE CHUMBO EM FUNÇÃO DA ENERGIA

na FIGURA 3.2.5, tomando-se como exemplo μ_m de chumbo. Estão representados o COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO TOTAL μ_m e o COEFICIENTE DE ABSORÇÃO TOTAL μ_m , assim como os valores do efeito fotoelétrico e do efeito Compton, bem como da produção de pares. Chama-se de ATENUAÇÃO, quando o feixe de radiação, que choca primariamente contra o material, é atenuado conforme a fórmula (3.2.5) de acordo com o valor de μ_m , havendo, conforme o processo interação, uma radiação secundária. Chama-se

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

ABSORÇÃO quando os quanta de radiação, que chocam contra o material, desaparecem completamente durante o processo de interação. A dependência da energia das parcelas individuais também pode ser vista na FIGURA 3.2.5.

De acordo com a fórmula (3.2.1), o efeito fotoelétrico é especialmente pronunciado no caso de energias reduzidas e diminui muito com o aumento da energia. Isso significa que, até energias de radiação de aproximadamente 0,5 MeV, o efeito fotoelétrico contribui com a parcela principal para μ_m . Na região de energia de aproximadamente 0,5 a 5 MeV, é o efeito Compton e, no caso de energias mais elevadas, a produção de pares. Pela superposição dos três efeitos, o coeficiente de atenuação μ_m diminui consideravelmente com uma energia de até aproximadamente 3 MeV, onde ele é mínimo, e depois aumenta ligeiramente. De uma maneira

geral, um coeficiente de atenuação elevado significa uma forte atenuação da radiação, e um valor reduzido, um elevado poder de penetração da radiação através do material. Para o ensaio com transmissão da radiação, esta descrição quantitativa da atenuação da radiação é muito importante, porque a determinação de defeitos se baseia nas diferenças de atenuação da radiação, como mostra o princípio do ensaio na FIGURA 3.1.1. Com respeito ao coeficiente de atenuação, pode-se dizer, em resumo, que ele representa uma grandeza característica do material e depende da energia dos quanta de radiação.

Para mostrar isso, estão representados na FIGURA 3.2.6 os coeficientes de atenuação de massa dos três materiais água, ferro e chumbo. O chumbo e a água são materiais de blindagem típicos, enquanto que o ferro, como elemento principal de muitos aços, é um exemplo típico de um material a ser examinado.

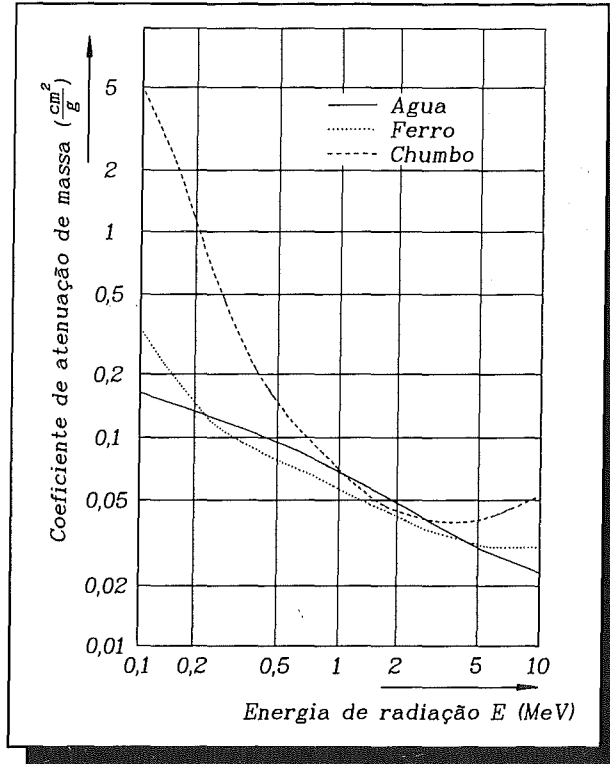


FIGURA 3.2.6: COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

3.2.3 ESPESSURAS DE SEMI-ATENUAÇÃO

No ensaio de transmissão da radiação, é interessante a questão de em que medida a radiação de ensaio utilizada é atenuada pelo material a ser examinado. Isso pode ser calculado com ajuda da lei de atenuação, conforme a fórmula (3.2.5), conhecendo-se a espessura do material x e o coeficiente de atenuação μ . Mas a lei da atenuação exponencial também permite obter uma resposta muito valiosa sobre a atenuação, em forma da assim chamada "ESPESSURA DE SEMI-ATENUAÇÃO", definida do seguinte modo:

ESPESSURA DE SEMI-ATENUAÇÃO: Espessura do material que atenua a intensidade da radiação incidente **pela metade**.

De acordo com a fórmula (3.2.5), $I_s(o)$ é reduzida pela metade, se a espessura do material for

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad (3.2.7)$$

Conhecendo-se o coeficiente de atenuação μ , é possível calcular facilmente a espessura de semi-atenuação $d_{1/2}$ ou pode-se determinar o coeficiente de atenuação, medindo a espessura de semi-atenuação. É importante notar que μ e $d_{1/2}$ dependem da energia de radiação. Na TABELA 3.2.1, estão indicadas espessuras de semi-atenuação de vários materiais, com diferentes energias da radiação.

ENERGIA DA RADIAÇÃO	$d_{1/2}$ (cm) AÇO	$d_{1/2}$ (cm) ALUMÍNIO	$d_{1/2}$ (cm) CHUMBO	$d_{1/2}$ (cm) CONCRETO
100 KeV	0,24	1,51	0,01	
500 KeV	1,05	3,04	0,40	
1 MeV	1,60	3,90	0,75	4,50
2 MeV	2,00	5,40	1,25	6,20
6 MeV	2,80	8,90	1,70	10,20

TABELA 3.2.1: ESPESSURAS DE SEMI-ATENUAÇÃO

Em alguns casos, também são indicadas as ESPESSURAS DE ATENUAÇÃO A UM DÉCIMO. Trata-se de espessuras de materiais que atenuam a intensidade da radiação incidente a um décimo.

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

3.2.4 RADIAÇÃO SECUNDÁRIA

Ao tratarmos do efeito Compton e da produção de pares, mostramos que, pelos processos de interação, a radiação primária produz uma radiação secundária, a qual é importante para o ensaio com transmissão de radiação e a blindagem da radiação. Para mostrar a importância da radiação dispersa, especialmente com respeito ao ensaio com transmissão da radiação, apresentam-se dois casos extremos de condução da radiação:

1º CASO: A radiação proveniente da sua fonte é orientada fortemente por dois colimadores, cuja finalidade é limitar a radiação. (Geometria de feixe estreito).

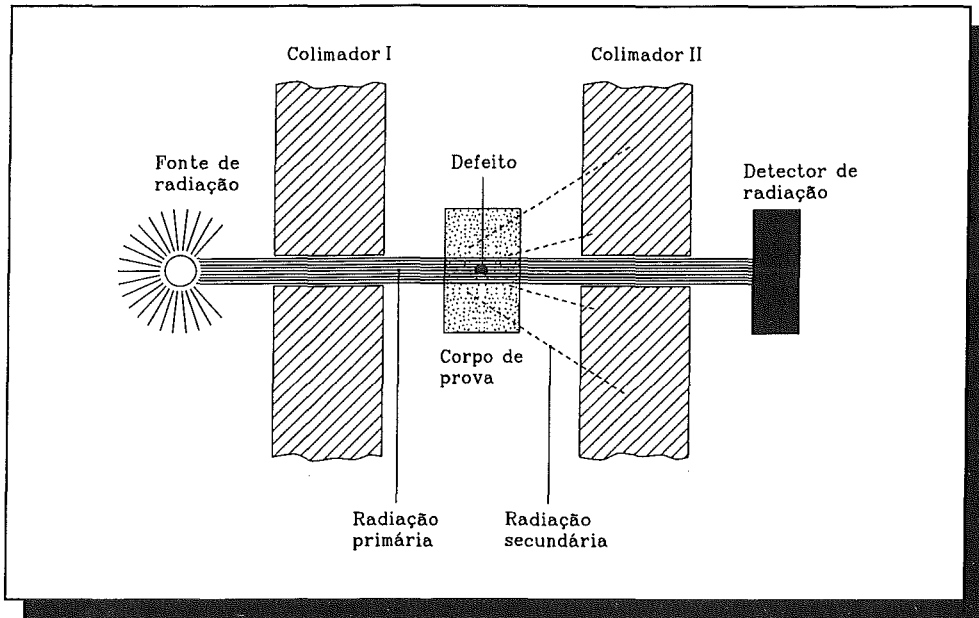


FIGURA 3.2.7: RADIAÇÃO COM COLIMADORES

Este caso está representado na FIGURA 3.2.7. Devido à ação de blindagem do colimador I, a radiação primária é limitada a uma faixa estreita e incide dessa forma sobre o corpo de prova. No corpo de prova, realiza-se a atenuação da radiação primária, que causa a representação do defeito ao detectar-se a radiação. A radiação secundária que se forma no corpo de prova é blindada na sua maior parte pelo colimador II, de modo que ela não possa alcançar o detector de radiação. Esta radiação secundária não contém informações sobre o defeito, motivo pelo qual ela é eliminada, pois só perturba a representação do defeito pela radiação primária.

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

2º CASO: A radiação proveniente da sua fonte atinge o corpo de prova e o detector da radiação sem colimadores. (Geometria de feixe largo).

Este caso está representado na FIGURA 3.2.8. A radiação primária atinge o corpo de prova, dentro do qual é atenuada, e provoca a representação do defeito no detector da radiação. Nesse caso, a radiação secundária passa sem obstáculos até o detector da radiação, sendo registrada pelo mesmo. Como a radiação secundária não contém informações sobre o defeito, ela é uma grandeza perturbadora que torna pior a representação do defeito. Trataremos da detecção quantitativa dessa piora ao estudar a representação da radiação, no capítulo 3.4.

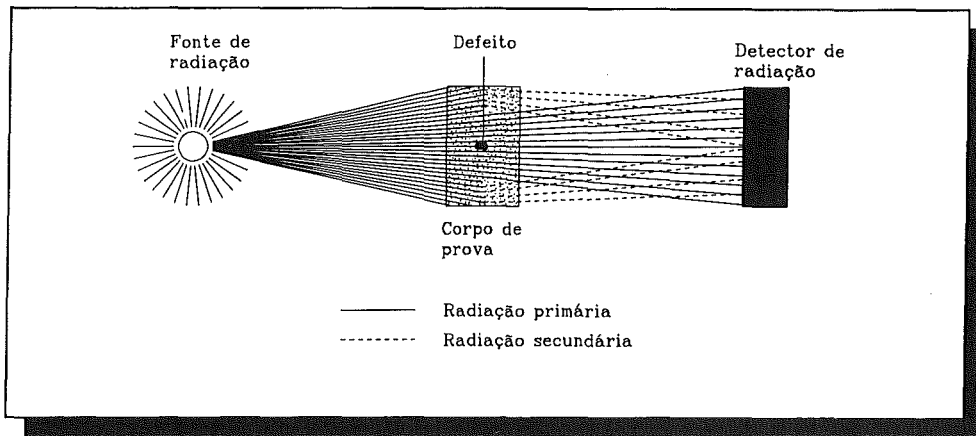


FIGURA 3.2.8: RADIAÇÃO SEM COLIMADORES

3.2.5 FATOR DE ACRÉSCIMO DA DOSE

A intensidade da radiação secundária, em comparação com a radiação primária, registrada pelo detector da radiação, pode ser detectada quantitativamente pelo FATOR DE ACRÉSCIMO DA DOSE (BUILD-UP FATOR).

A DEFINIÇÃO do fator de acréscimo da dose B é:

$$B = \frac{\text{INTENSIDADE DA RADIAÇÃO TOTAL}}{\text{INTENSIDADE DA RADIAÇÃO PRIMÁRIA}} \quad (3.2.8)$$

ou

$$B = 1 + \frac{\text{INTENSIDADE DA RADIAÇÃO SECUNDÁRIA}}{\text{INTENSIDADE DA RADIAÇÃO PRIMÁRIA}} \quad (3.2.9)$$

3.2 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO

porque a intensidade da radiação total compõe-se da intensidade da radiação primária e secundária. Se não houver radiação secundária, o fator de acréscimo da dose, nesse caso mais favorável, é igual a um; se houver radiação secundária, ele sempre é maior que um. Para o ensaio com transmissão da radiação, o fator de acréscimo da dose sempre deve ser o menor possível. O fator de acréscimo da dose B depende das seguintes grandezas:

- * Espécie de material do corpo de prova
- * Energia de radiação
- * Espessura do corpo de prova

A dependência do fator de acréscimo da dose desses três fatores é em parte bastante

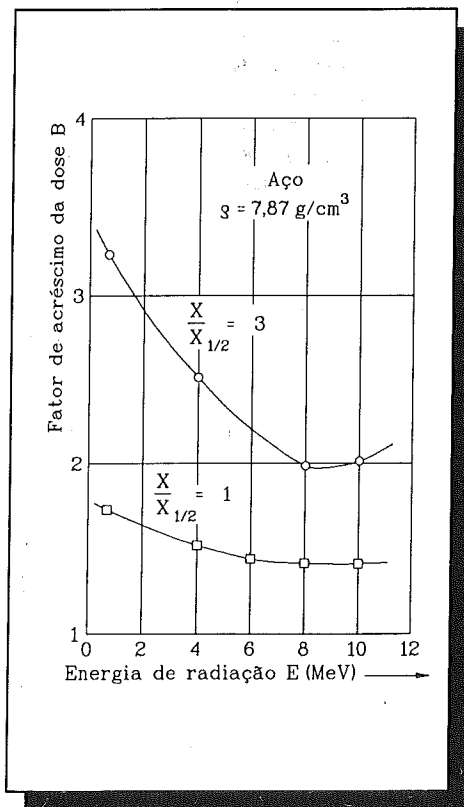


FIGURA 3.2.9: FATORES DE ACRÉSCIMO DA DOSE PARA AÇO

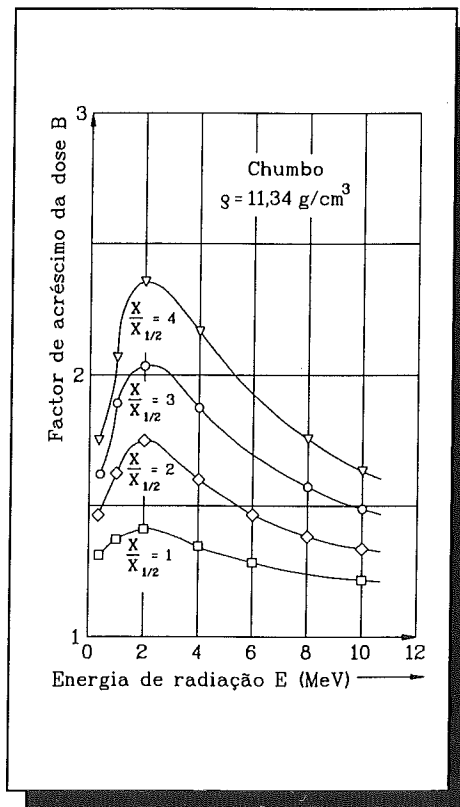


FIGURA 3.2.10: FATORES DE ACRÉSCIMO DA DOSE PARA CHUMBO

complicada e a melhor forma de esclarecê-la é por meio de curvas paramétricas. Para os dois materiais aço (material a examinar) e chumbo (material de blindagem), as FIGURAS

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

3.2.9 e 3.2.10 mostram curvas do fator de acréscimo da dose. Para o aço, o fator de acréscimo da dose está representado na FIGURA 3.2.9 em função da energia de radiação, para duas espessuras do material, indicadas como múltiplos da espessura de semi-atenuação. Vê-se que o fator de acréscimo da dose tem tendência para diminuir com aumento da energia e a crescer quando a espessura do material for maior. No exemplo do chumbo, a FIGURA 3.2.10 mostra que o fator de acréscimo da dose primeiro aumenta com a energia, chega a um máximo e depois diminui. O aumento da espessura do material - expresso também em múltiplos da espessura de semi-atenuação - é perfeitamente visível.

O aumento, válido de modo geral, do fator de acréscimo da dose, ao aumentar a espessura do material, também é compreensível pela representação da FIGURA 3.2.8. No caso de maiores espessuras do material, tornam-se mais frequentes principalmente os processos de dispersão (efeito Compton), o que faz aumentar a radiação secundária em comparação à radiação primária. Para o ensaio com transmissão da radiação, conclui-se disso que, principalmente ao examinar componentes com paredes grossas, o fator de acréscimo da dose, e com isso a radiação secundária, aumenta. Por outro lado, o ensaio de componentes com paredes grossas precisa ser realizado com energia mais elevada, por causa da atenuação reduzida da radiação, sendo então o fator de acréscimo da dose menor. Se, num ensaio com transmissão da radiação, o fator de acréscimo da dose for muito elevado, recomenda-se usar colimadores para reduzir a radiação secundária. Ao montar-se o equipamento para o ensaio, é preciso observar que a radiação secundária também pode passar através das paredes circundantes ao detector de radiação, o que deve-se evitar, se possível.

3.3 DOSE DE RADIAÇÃO

Ao tratarmos da atenuação da radiação, descrevemos a interação entre os quanta de radiação e os átomos do respectivo material com base nos três processos efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. Em cada processo, uma parcela da energia de radiação é transferida aos elétrons dos átomos do material. Em outras palavras: em cada processo de interação, o material absorve energia de radiação. Agora interessa conhecer a grandeza

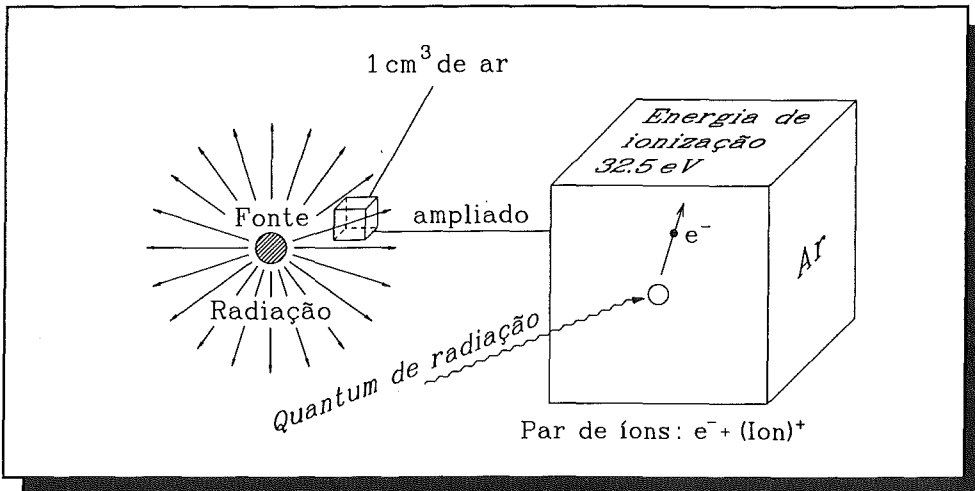


FIGURA 3.3.1: ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO PELO AR

3.3 DOSE DE RADIAÇÃO

dessa parcela de energia. Vejamos um exemplo simples, representado na FIGURA 3.3.1. Trata-se da absorção da radiação pelo ar. Durante a ionização do átomo pelo quantum de radiação, separa-se um elétron negativo (e^-) e fica um átomo restante com carga positiva (íon). O valor da energia que o quantum de radiação deve fornecer para a ionização no ar, é de 32,5 eV. Isso significa: em cada processo de ionização, o ar absorve uma energia de radiação de 32,5 eV, sendo produzido um par de íons. Medindo-se as cargas formadas por meio de uma tensão elétrica aplicada, é possível determinar o número de ionizações realizadas. Exemplo: se em 1 cm³ de ar, sob condições normais (pressão de 1 bar, 20° C), forem produzidos $2,08 \cdot 10^9$ pares de íons, isso equivale a uma energia de radiação absorvida de $2,08 \cdot 10^9 \cdot 32,5 = 6,76 \cdot 10^{10}$ eV. Se essa energia for convertida segundo a fórmula (2.1.3), resultam $1,08 \cdot 10^{-8}$ Ws (Joule). Se em 1 g de ar forem produzidos $1,61 \cdot 10^{12}$ pares de íons, isso corresponde a uma energia de radiação absorvida de $2,58 \cdot 10^{-6}$ Ws (Joule).

3.3.1 DOSE ABSORVIDA

A energia de radiação absorvida por unidade de massa é designada por DOSE ABSORVIDA e a sua definição é a seguinte:

$$\text{DOSE ABSORVIDA} = D_E = \frac{\text{ENERGIA DE RADIAÇÃO ABSORVIDA}}{\text{MASSA}} \quad (3.3.1)$$

No sistema internacional de unidades SI, a dose absorvida corresponde à unidade GRAY, cuja definição é:

$$1 \text{ GRAY (Gy)} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (3.3.2)$$

As unidades usuais anteriormente eram:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ROENTGEN (R)} &= 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg de ar} \\ 1 \text{ RAD} &= 10^{-2} \text{ J/kg de ar} \end{aligned}$$

No exemplo acima, a convenção da unidade ROENTGEN é bem compreensível. Para o ensaio com transmissão da radiação, a dose absorvida é uma grandeza importante, p.ex. para indicar quantitativamente a radiação que chegou ao detector (veja a FIGURA 3.1.1).

A dose absorvida D_E , que chega ao detector, depende da dose emitida pela fonte de radiação e da distância F entre a fonte da radiação e o nível de detecção, como se vê na FIGURA 3.3.2.

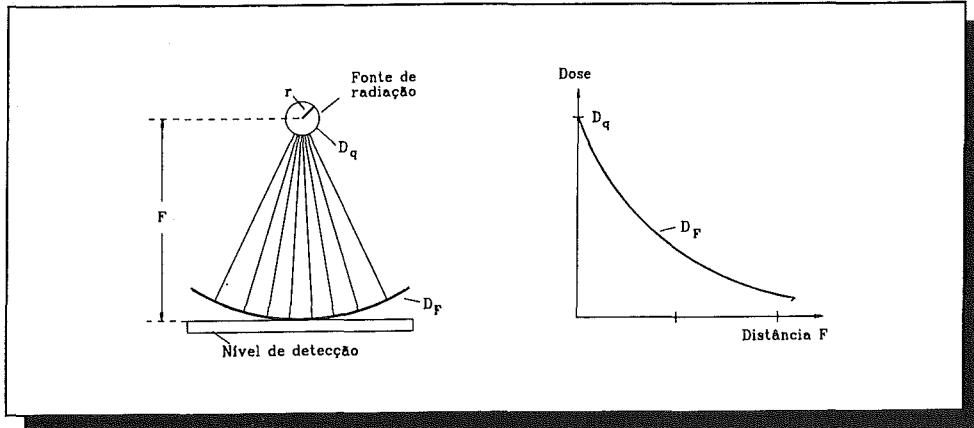


FIGURA 3.3.2: CURVA DOSE-DISTÂNCIA

Consideremos uma fonte de radiação com o raio r , ao redor da qual encontra-se uma esfera com o raio F , correspondente à distância entre a fonte de radiação e o nível de detecção. A dose de radiação que sai da fonte também deve passar pela superfície da esfera na distância F . A dose absorvida à distância F , D_f , resulta então da relação entre a superfície da esfera da fonte de radiação e a superfície da esfera à distância F :

$$D_f (F) = \frac{4 \pi r^2}{4 \pi F^2} D_q = \frac{r^2}{F^2} D_q \quad (3.3.3)$$

Com uma fonte de radiação definida ($r = \text{const}$), a dose D_f diminui ao quadrado da distância entre a fonte de radiação e o nível de detecção, o que está representado à direita da FIGURA 3.3.2.

TAXA DE DOSE ABSORVIDA

Referindo-se a dose absorvida à unidade de tempo, resulta a TAXA DE DOSE ABSORVIDA, cuja definição é a seguinte:

$$\text{TAXA DE DOSE ABSORVIDA} = \dot{D}_E = \frac{\text{DOSE ABSORVIDA } D_E}{\text{TEMPO } t} \quad (3.3.4)$$

A sua unidade no sistema SI é:

$$\text{UNIDADE : } \frac{\text{GRAY}}{\text{SEGUNDO}} = \frac{\text{Gy}}{\text{S}}$$

3.3 DOSE DE RADIAÇÃO

3.3.2 DOSE EQUIVALENTE

A dose absorvida indica a quantidade de energia de radiação absorvida por unidade de massa, mas não diz nada sobre o efeito biológico da radiação absorvida, o que é importante para a proteção radiológica, da qual trata o capítulo 3.6. O efeito da radiação no corpo humano não depende somente dos pares de íons formados por unidade de massa, mas também da densidade da ionização, isto é, do número de pares de íons formados por unidade de volume pela radiação incidente. Como isso depende do tipo da radiação, o, efeito biológico também dependerá. Essa dependência é expressa pelo EFEITO BIOLÓGICO RELATIVO (RBW), em forma do FATOR RBW.

Na TABELA 3.3.1, estão compilados os fatores RBW de diversos tipos de raios. A dose que - diferenciando-se da dose absorvida - também leva em consideração o efeito biológico da radiação, chama-se DOSE EQUIVALENTE $D_{\bar{\lambda}}$. Obtém-se a dose equivalente, multiplicando-se a dose absorvida pelo fator do efeito biológico relativo (RBW):

$$D_{\bar{\lambda}} = D_E \cdot \text{RBW} \quad (3.3.5)$$

A unidade da dose equivalente no sistema SI é o SIEVERT [Sv].

DEFINIÇÃO: 1 SIEVERT é igual à dose equivalente que resulta como produto da dose absorvida de 1 GRAY e do fator de avaliação RBW = 1.

As sub-unidades são:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Mili-Sievert (mSv)} &= 10^{-3} \text{ Sievert (Sv)} \\ 1 \text{ Micro-Sievert (Sv)} &= 10^{-6} \text{ Sievert (Sv)} \end{aligned}$$

Anteriormente, utilizava-se para a dose equivalente a unidade REM (Roentgen equivalent man). Faz-se a conversão com a seguinte fórmula:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} \quad (3.3.6)$$

TIPO DE RADIAÇÃO	FATOR RBW
RADIAÇÃO DE RÖNTGEN, GAMA- E BETA	1
PRÓTONS $E_p > 2 \text{ MeV}$	2
NÊUTRONS $E_n < 10 \text{ KeV}$	3
$E_n > 10 \text{ KeV}$	10
PARTÍCULAS ALFA	20

TABELA 3.3.1: FATORES RBW

TAXA DA DOSE EQUIVALENTE

Referindo-se a dose equivalente à unidade de tempo, resulta a TAXA DA DOSE EQUIVALENTE $D_{\bar{\lambda}}$, segundo a fórmula:

$$\text{TAXA DA DOSE EQUIVALENTE } \dot{D}_A = \frac{\text{Dose equivalente } D_A}{\text{Tempo } t} \quad (3.3.7)$$

No caso da radiação de Roentgen e gama, a dose absorvida e a dose equivalente têm os mesmos valores, por ser $RBW = 1$, de modo que, em ambos os casos, pode-se usar o termo "dose".

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

Para detectar a radiação, usam-se principalmente dois processos:

- Medição da radiação com filmes sensíveis à radiação
- Medição da radiação com detectores

Como para o ensaio com transmissão da radiação está muito difundido o uso de filmes sensíveis à radiação, trataremos inicialmente desse processo.

3.4.1 MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO COM FILMES

O filme sensível à radiação serve para representar o defeito ou uma estrutura do material. Como essa representação é feita pela radiação, o filme deve estar em condições de mostrar a distribuição da intensidade da radiação. O princípio dos filmes sensíveis à radiação é explicado na FIGURA 3.4.1. Fazem parte do assim chamado SISTEMA DE FILME o tipo de filme e o seu tratamento, que deve ser feito conforme as recomendações do fabricante do filme e do fabricante dos reagentes químicos.

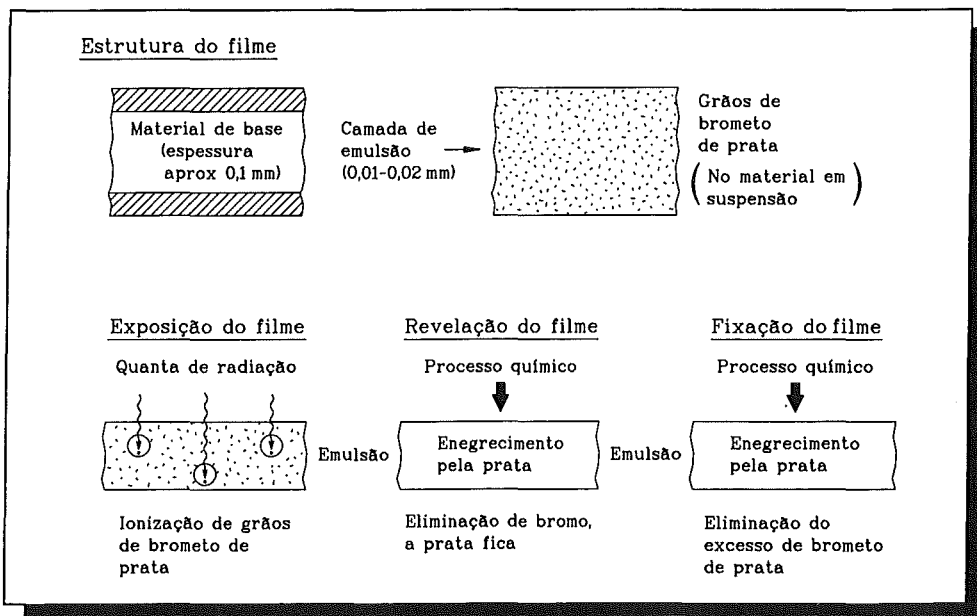


FIGURA 3.4.1: MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO COM SISTEMA DE FILME

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

O filme é constituído por um material de base (p.ex. poliéster), sobre o qual foi depositada uma camada fina de emulsão. Nessa camada de emulsão, estão suspensos grãos de brometo de prata. O que ocorre durante a medição da radiação, pode-se subdividir nas seguintes fases:

EXPOSIÇÃO DO FILME:

Os quanta de radiação incidentes entram em interação com os grãos de brometo de prata e provocam, pelos processos de interação descritos no capítulo 3.2, uma ionização dos grãos. Quanto maior for a dose de radiação absorvida, tanto mais forte será a ionização. Pelo processo de ionização, o grão de brometo de prata é alterado, o que é importante para o passo seguinte.

REVELAÇÃO DO FILME:

Por um processo químico, elimina-se o bromo dos grãos de brometo de prata ionizados. Nesses grãos, só resta a prata, que provoca o enegrecimento ótico da camada de emulsão. Quanto maior for a dose de radiação absorvida, tanto maior é o teor de prata e o enegrecimento do filme, causado pelo mesmo.

FIXAÇÃO DO FILME:

Os grãos de brometo de prata que NÃO foram ionizados são eliminados por um processo químico.

3.4.1.1 ENEGRECIMENTO DO FILME

Mede-se a dose de radiação D no filme por meio do enegrecimento do mesmo. O enegrecimento S é proporcional à dose D no filme. Pode-se expressar isso na fórmula

$$S \text{ é proporcional a } D \quad (3.4.1)$$

A dose de radiação D foi tratada detalhadamente no capítulo 3.3. A sua unidade de medida é o GRAY (Gy).

ENEGRECIMENTO:

Pode-se medir óticamente o enegrecimento do filme, causado pelos quanta de radiação, como está representado na FIGURA 3.4.2. Uma fonte luminosa emite luz com uma luminância L_0 , que passa através de uma placa de vidro transparente, incide no filme, sendo atenuada no mesmo de acordo com o enegrecimento do filme. No lado inferior

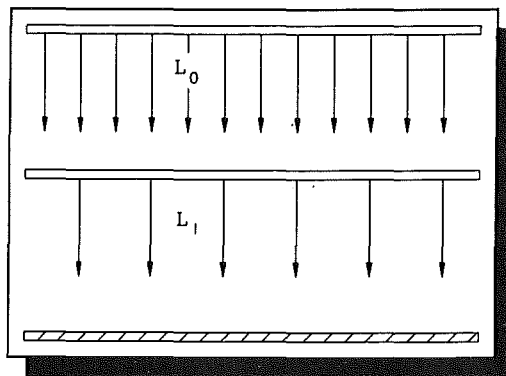


FIGURA 3.4.2: DETERMINAÇÃO DO ENEGRECIMENTO

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

do filme, sai a luz com uma luminância L_1 . As luminâncias podem ser medidas por meios óticos. Pela relação, pode-se determinar o enegrecimento S - chamado também de DENSIDADE ÓTICA - pela DEFINIÇÃO:

$$S = \log \frac{L_0}{L_1} \quad (3.4.2)$$

Um filme com $S = 0$ é completamente translúcido. Através de um filme com $S = 1$ ainda é possível ler letras impressas. Um filme com $S = 5$ praticamente não deixa passar luz. Como, segundo a fórmula (3.4.1), o enegrecimento do filme S é proporcional à dose de radiação D , trataremos agora da relação entre estas duas grandezas. No ensaio com transmissão da radiação, a radiação incide no filme, para a representação do defeito, conforme a FIGURA 3.1.1; por analogia com fotografias normais, essa operação também é denominada "EXPOSIÇÃO". O produto da taxa de dose que incide no filme, multiplicada pelo tempo de exposição t_b , é a dose D , conforme a fórmula (3.4.3), que causa o enegrecimento do filme.

$$D = \dot{D} \cdot t_b \quad (3.4.3)$$

A relação entre o enegrecimento S e a dose D pode ser representada, para um determinado filme, por uma curva. A FIGURA 3.4.3 mostra esquematicamente uma curva. Está representado o enegrecimento dependente da dose de radiação para três tipos de filmes G1, G2 e G3. O enegrecimento é determinado por

$$S = S_1 + S_0 \quad (3.4.4)$$

sendo

S_1 = enegrecimento, causado pela radiação

S_0 = enegrecimento do filme não exposto, tratado, inclusive a sua base

Resulta uma relação linear entre o enegrecimento causado pela radiação e a dose de radiação no lugar do filme. Esta relação linear é compreensível pelo processo de enegrecimento, devido à prata formada.

3.4.1.2 GRADIENTE LINEAR DO FILME

A inclinação de cada curva de enegrecimento - dose pode ser expressa do seguinte modo pelo gradiente:

$$\text{GRADIENTE LINEAR DO FILME} = \frac{dS}{dD} \quad (3.4.5)$$

O gradiente linear do filme possui valores diferentes para os diversos tipos de filmes, como mostra a FIGURA 3.4.3. Assim, p.ex., o tipo de filme G3 apresenta a inclinação mais pronunciada.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

Isso significa que, com uma determinada dose D , o filme G3 é o que sofre o enegrecimento mais forte dos três tipos de filmes. Em comparação, a curva do filme tipo G1 apresenta a menor inclinação e o enegrecimento mais reduzido. Quanto mais forte for o enegrecimento de um filme com uma determinada dose, tanto maior é a sensibilidade com a qual o filme reage à radiação. Em outras palavras: quanto menor for a dose necessária para obter um determinado enegrecimento, tanto maior será a sensibilidade do filme. A linha pontilhada na FIGURA 3.4.3 faz ver isso. O filme tipo G3 tem a sensibilidade mais elevada e o filme tipo G1 a mais reduzida. De modo geral, pode-se constatar que os filmes com gradientes lineares elevados têm uma alta sensibilidade e os filmes com gradientes lineares baixos uma sensibilidade reduzida.

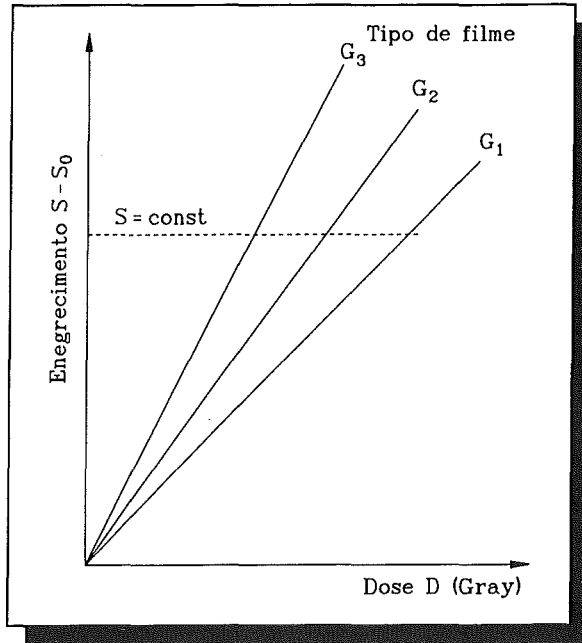


FIGURA 3.4.3: CURVA LINEAR DE ENEGRECIMENTO - DOSE

Em consequência, nos filmes sensíveis (tipo G3) se alcança um determinado enegrecimento com uma dose relativamente baixa. Se for conhecida a intensidade da radiação, expressa pela taxa de dose absorvida pelo dispositivo de ensaio, isso significa, segundo a fórmula (3.4.3), que para uma dose reduzida só é necessário um tempo de exposição breve e que, por isso, a velocidade de ensaio é relativamente elevada. Se, por outro lado, for usado um filme menos sensível (tipo G1), o tempo de exposição necessário para obter um determinado enegrecimento é mais longo e aumenta o tempo do ensaio. Pode-se ver isso na TABELA 3.4.1:

TIPO DE FILME	SENSIBILIDADE	TEMPO DE EXPOSIÇÃO	VELOCIDADE DO ENSAIO
G1	BAIXA	LONGO	REDUZIDA
G2	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
G3	ALTA	BREVE	ELEVADA

TABELA 3.4.1: CARACTERÍSTICAS DOS FILMES

3.4.1.3 GRANULAÇÃO

A sensibilidade de um filme depende muito da sua GRANULAÇÃO. A granulação é dada pela distribuição dos grãos de prata, pelo seu tamanho, no filme exposto e completamente tratado. Pode-se determiná-la quantitativamente por meio das variações estocásticas do enegrecimento no filme, causadas pela distribuição dos grãos de prata. Pode-se determinar a granulação pela exploração linear de um filme com enegrecimento constante ($S = 2,0$) com um microfotômetro. Esse aparelho permite detectar as pequenas variações do enegrecimento, quando o diâmetro do seu diafragma for de 10 - 100 μm . Quanto mais elevadas, forem as variações do enegrecimento, verificadas no ensaio, tanto mais elevada será a granulação do filme. Por isso, determina-se a granulação pela diferença normal σ_s das variações do enegrecimento.

$$\text{MEDIDA DA GRANULAÇÃO} = \sigma_s \quad (3.4.6)$$

Para explicar a relação entre a granulação e a sensibilidade do filme, consideremos mais uma vez o processo de formação dos grãos de prata a partir do brometo de prata, pela radiação incidente. Os grãos de prata foram formados no processo de ionização pelos quanta de radiação nos grãos de brometo de prata. A probabilidade de os quanta de radiação atingirem grãos de brometo de prata grandes é muito maior que a de ionizar grãos pequenos. Por isso, com a mesma dose, formam-se mais grãos de prata nos filmes de granulação grossa, do que nos de granulação fina, e o enegrecimento é correspondentemente maior. Isso significa que os filmes de granulação grossa são mais sensíveis do que os de granulação fina.

A escolha da sensibilidade de um filme depende muito do tamanho dos defeitos a detectar. A granulação deve ser consideravelmente menor que o tamanho dos defeitos a detectar, porque se não uma boa representação dos defeitos não será possível. A consequência é que, para detectar defeitos muito pequenos, deve-se usar necessariamente filmes com granulação fina, que são muito insensíveis e, portanto, requerem doses correspondentemente elevadas, que normalmente exigem tempos de exposição mais longos.

3.4.1.4 SENSIBILIDADE DO FILME

Na FIGURA 3.4.3, a dependência do enegrecimento da dose de radiação foi representada como curva linear de enegrecimento - dose. A dose foi medida diretamente no filme. Normalmente, as doses são de mili-Gray (mGy). A inclinação da curva indica o gradiente linear do filme $d(S-S_0)/dD$ para cada tipo de filme. Quanto maior for a inclinação da curva, tanto menor será a dose para um determinado enegrecimento e, com isso, tanto mais elevada a sensibilidade do filme. Portanto, é possível determinar a sensibilidade do filme FE diretamente da curva linear de enegrecimento - dose. Em geral, ela resulta da relação entre o enegrecimento obtido ($S - S_0$) e a dose de radiação D (em Gy) no filme. Para a medição, foi fixado um enegrecimento de $(S - S_0) = 2$, de modo que se faz a determinação da sensibilidade do filme:

$$\text{FE} = \frac{(S - S_0) = 2}{D} \quad (3.4.7)$$

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

medindo-se a dose (em Gy) necessária para o enegrecimento de $(S - S_0) = 2$. A TABELA 3.4.2 mostra a relação entre a dose no filme e a sensibilidade do mesmo.

D [Gy]	$\text{Log}_{10} D$ [Gy]	Sensibilidade do filme
Para $(S - S_0) = 2$	Para $(S - S_0) = 2$	FE [1/Gy]
$0,5 \cdot 10^{-3}$	-3,30	4.000
$1,0 \cdot 10^{-3}$	-3,00	2.000
$2,0 \cdot 10^{-3}$	-2,69	1.000
$3,0 \cdot 10^{-3}$	-2,52	667
$4,0 \cdot 10^{-3}$	-2,40	500
$5,0 \cdot 10^{-3}$	-2,30	400
$1,0 \cdot 10^{-2}$	-2,00	200
$5,0 \cdot 10^{-2}$	-1,30	40
$1,0 \cdot 10^{-1}$	-1,00	20

TABELA 3.4.2: CÁLCULO DA SENSIBILIDADE DO FILME

Na FIGURA 3.4.4, vê-se esta relação em forma de uma curva. Para obter condições de radiação comparáveis para a determinação de FE, determina-se uma tensão do tubo de aproximadamente 200 KV, de modo que a camada de semi-atenuação ($3,5 \pm 0,2$ mm) corresponda ao cobre. Para a aplicação prática, a sensibilidade do filme tem uma grande importância, em virtude do tempo de exposição requerido. Altos valores de FE significam tempos de exposição mais breves e baixos valores de FE tempos de exposição mais longos. Por isso, para a sensibilidade do filme também se usa o termo de VELOCIDADE DO FILME, sendo que FE elevadas correspondem a altas velocidades e FE baixas a velocidades reduzidas.

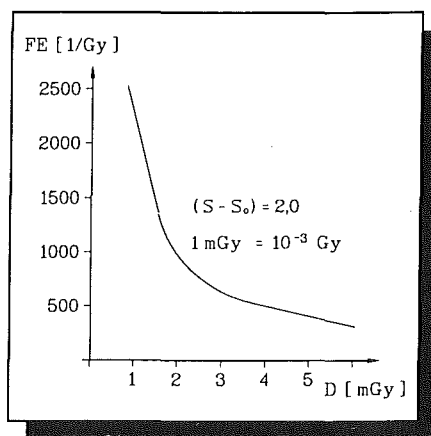


FIGURA 3.4.4: CURVA DA SENSIBILIDADE DO FILME

3.4.1.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS FILMES, GRADIENTE LOGARÍTMICO DO FILME

Representando-se o enegrecimento S como função do logaritmo da dose D - escrito de forma geral chama-se CURVA CARACTERÍSTICA DO FILME.

$$S = f (\log_{10} D) \quad (3.4.8)$$

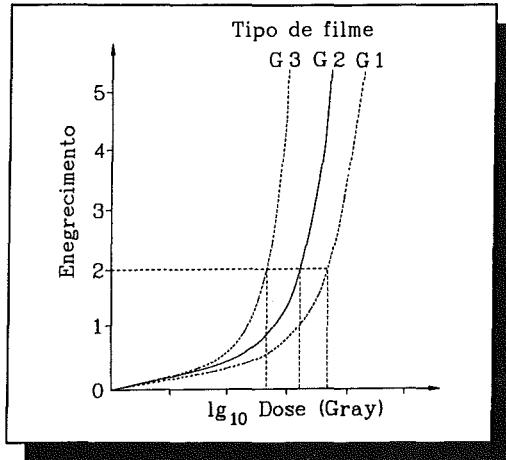


FIGURA 3.4.5: CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS FILMES

Normalmente, uma representação logarítmica só é vantajosa quando a função a representar tem caráter exponencial. Mas esse não é o caso da curva de enegrecimento - dose, de modo que a utilidade prática desta representação é duvidosa. Porém, como a curva característica é usada em alguns casos, ela também será tratada aqui. Para os tipos de filme G1, G2 e G3, as curvas características constam da FIGURA 3.4.5.

Por analogia, com o gradiente linear do filme, de acordo com a fórmula (3.4.5), pode-se formar aqui, com base na inclinação das curvas características dos filmes, o GRADIENTE LOGARÍTMICO DO FILME:

$$\text{GRADIENTE LOG. DO FILME } G = \frac{dS}{d \log_{10} D} \quad (3.4.9)$$

O gradiente logarítmico do filme pode ser calculado com base no gradiente linear do filme dS/dD pela seguinte conversão:

$$\frac{dS}{dD} = \frac{dS}{dD} \cdot \frac{d \ln D}{d \ln D} \cdot \frac{d \log_{10} D}{d \log_{10} D} \quad (3.4.10)$$

ou

$$\frac{dS}{dD} = \frac{dS}{d \log_{10} D} \cdot \frac{d \ln D}{dD} \cdot \frac{d \log_{10} D}{d \ln D} \quad (3.4.11)$$

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

Sendo

$$\frac{d \ln D}{dD} = \frac{1}{D} \quad \text{e} \quad \frac{d \log_{10} D}{d \ln D} = \frac{1}{2,303} \quad (3.4.12)$$

resulta o gradiente logarítmico do filme:

$$G = 2,303 D \cdot \frac{dS}{dD} \quad (3.4.13)$$

Calcula-se o mesmo, multiplicando o gradiente linear do filme dS/dD pela dose e um fator constante de 2,303. Conhecendo-se o gradiente linear de um filme, p.ex. da FIGURA 3.4.3 ou de outra fonte, pode-se calcular o gradiente logarítmico do filme para uma determinada dose D conforme a fórmula (3.4.13). Aqui nota-se a desvantagem desta representação, porque o gradiente logarítmico do filme depende da dose e, em consequência, para a definição inequívoca, é preciso indicar, além do valor de G , também o valor da dose D , o que é desnecessário para o gradiente linear do filme.

Como exemplos, foram calculados, na TABELA 3.4.3, gradientes logarítmicos de filmes para diversas doses de radiação no filme e para filmes com diversas sensibilidades, expressos pelo gradiente linear do filme, conforme a equação (3.4.13).

DOSE [mGy]	GRADIENTE LINEAR DO FILME [mGy] ⁻¹	GRADIENTE LOGARÍTMICO DO FILME [-]
0,5	4,0	4,6
1,0	4,0	9,2
2,0	4,0	18,4
3,0	4,0	27,6
0,5	2,0	2,3
1,0	2,0	4,6
2,0	2,0	9,2
3,0	2,0	13,8
0,5	1,0	1,2
1,0	1,0	2,3
2,0	1,0	4,6
3,0	1,0	6,9

TABELA 3.4.3: GRADIENTES LOGARÍTMICOS DE FILMES

3.4.1.6 RELAÇÃO ENTRE GRADIENTE - RUÍDO

Na interpretação de radiografias, a granulação é importante, porque ela causa um "ruído" na imagem. No filme, esse "ruído" torna-se visível pelas variações do enegrecimento, provocadas pela granulação. Quanto maiores forem as variações do enegrecimento, tanto mais se nota o "ruído" da imagem. Como numa imagem de televisão com "ruído", também aqui não se pode reconhecer bem o objeto a representar, porque essas variações se sobrepõem ao sinal propriamente dito - o contraste causado pelo objeto. Portanto, pode-se falar nesse caso, como é usual na técnica de telecomunicações, de uma **RELAÇÃO ENTRE SINAL - RUÍDO**, que torna-se pior devido ao "ruído" da imagem. Pode-se descrever isso quantitativamente, estabelecendo a relação entre o gradiente do filme, que também determina a qualidade do sinal, e a grandeza da granulação, que determina o "ruído" da imagem:

$$\text{RELAÇÃO ENTRE GRADIENTE - RUÍDO} = \frac{G}{\sigma_s} \quad (3.4.14)$$

Forma-se a relação com o gradiente do filme resultante do enegrecimento $(S-S_0) = 2$ e da diferença normal σ_s das variações do enegrecimento, medida nesse estado.

Com o gradiente do filme e a relação gradiente - ruído, podem-se determinar as características principais de um filme. Por isso, as duas grandezas também podem servir para classificar filmes.

3.4.1.7 FOLHAS INTENSIFICADORAS

Um aumento do enegrecimento S com a dose D pré-fixada aumentaria a sensibilidade do filme e o gradiente do filme. Para conseguir isso, utilizam-se folhas intensificadoras, constituídas de metais pesados - de preferência chumbo. Com ajuda das folhas intensificadoras, deseja-se conseguir um aproveitamento ainda melhor da radiação que incide no filme, para obter, por meio de uma ionização adicional de grãos de brometo de prata, um enegrecimento mais intenso do filme. Expliquemos o modo de funcionamento das folhas intensificadoras com a FIGURA 3.4.6. Aproveitam-se processos de interação da radiação com a folha intensificadora, que produzem uma ionização adicional no filme. Os processos de interação estão explicados no capítulo 3.2. Como estes processos decorrem de modo especialmente intenso em metais pesados, empregam-se de preferência folhas de chumbo. Numa folha de chumbo se produzem os seguintes efeitos:

- (1) Enegrecimento mais intenso do filme pela ionização de elétrons secundários e quanta de radiação secundários, que passam da folha para o filme.
- (2) Absorção mais intensa da radiação secundária, de baixa energia, em comparação com a radiação primária. Em consequência, reduz-se o fator de acréscimo da dose (veja o capítulo 3.2).
- (3) Maior reforço da radiação primária, de alta energia, em comparação com a radiação de baixa energia no filme.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

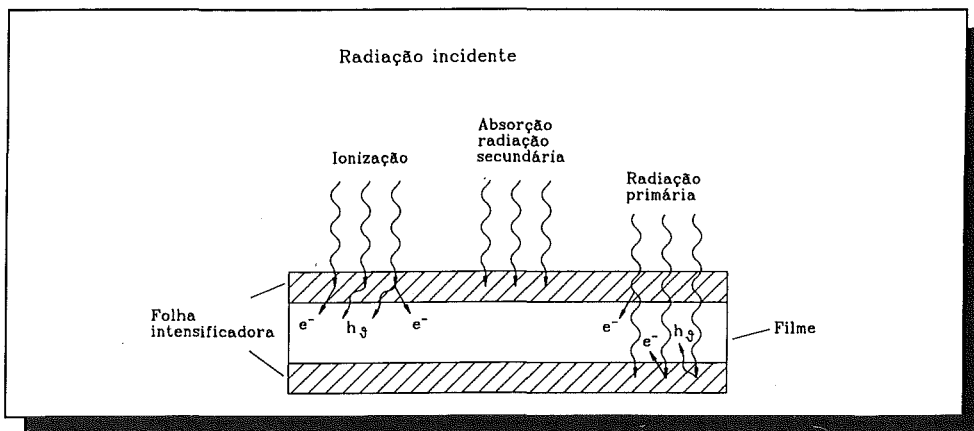


FIGURA 3.4.6: MODO DE FUNCIONAMENTO DE FOLHAS INTENSIFICADORAS (CHUMBO)

O fator intensificador, correspondente à relação entre o enegrecimento do filme com folha e o enegrecimento do filme sem folha, depende:

- do material e da espessura da folha intensificadora
- do tipo do filme
- da energia da radiação incidente

A FIGURA 3.4.7 mostra um exemplo do desenvolvimento do fator intensificador em dependência da tensão de aceleração e da espessura da folha de chumbo no ensaio com transmissão da radiação. No caso de folhas de chumbo muito finas, os elétrons secundários e os quanta da radiação secundária, formados nos processos de interação, podem sair bem da folha e entrar no filme. A condição para isso é que exista sempre um ótimo contato entre o filme e a folha. Para conseguir isso, empregam-se muitas vezes cassetes de vácuo. No caso de folhas mais grossas, a interação é mais intensa, devido ao volume maior, mas uma parte da radiação secundária formada não pode sair da folha devido à absorção.

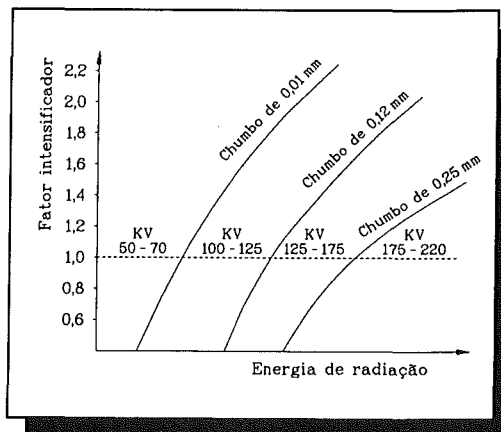


FIGURA 3.4.7: FATOR INTENSIFICADOR DE FOLHAS DE CHUMBO

Outros exemplos:

- No caso da transmissão da radiação em aço de 30 mm de espessura, com energias de radiação de 200 KeV, podem-se obter com folhas de chumbo fatores intensificadores ao redor de 3, o que corresponde a uma redução do tempo de radiação a 1/3.

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

- No caso da transmissão da radiação em aço de 30 mm de espessura com radiação gama de Co-60, podem-se obter com folhas de chumbo fatores intensificador ao redor de 2.

Além de chumbo, pode-se empregar outros metais de alta densidade (tântalo) ou materiais que contêm chumbo. Entre estes, contam-se, p.ex., folhas de óxido de chumbo. Estas folhas são de papel, revestidas de óxido de chumbo, embaladas à prova de luz. A vantagem dessas folhas é o seu manuseio simples e a sua grande flexibilidade. O seu campo de aplicação também se encontra na faixa de tensão de aceleração de 100-300 KV. Os fatores intensificadores são similares aos das folhas de chumbo.

FOLHAS FLUORESCENTES

Para aumentar o enegrecimento do filme, utiliza-se ainda um outro tipo de folhas, que se baseia num outro princípio, explicado na FIGURA 3.4.8.

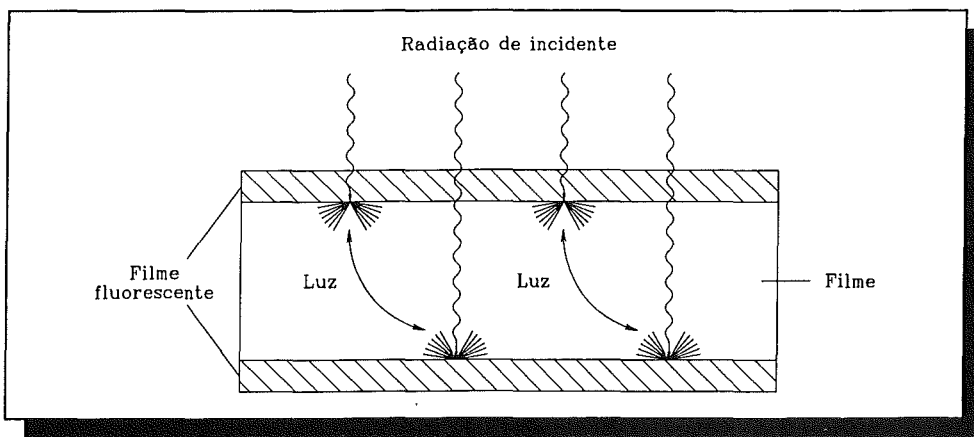


FIGURA 3.4.8: MODO DE FUNCIONAMENTO DE FOLHAS FLUORESCENTES

Empregam-se materiais que transformam a radiação de Roentgen ou gama incidente em radiação luminosa. Consegue-se isso por meio da radiação incidente, que em processos de interação põe os elétrons dos envoltórios dos átomos em excitação, os quais voltam ao seu estado inicial, emitindo quanta de luz. Chama-se esse processo de FLUORESCÊNCIA. Os quanta de luz produzidos causam um enegrecimento adicional do filme. Compostos químicos frequentemente usados são sais em forma de

- tungstato de cálcio
- sulfato de bário e chumbo

motivo pelo qual essas folhas também são chamadas folhas salinas. Também aqui o fator intensificador depende:

- do material da folha fluorescente
- do tipo do filme
- da energia da radiação incidente

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

Os fatores intensificadores de folhas fluorescentes para tensões de serviço de 100 a 300 KV ficam na faixa entre 60 e 100. Usando-se a radiação de Co-60 para examinar aços de grande espessura, podem-se obter folhas com fluorescentes com fatores intensificadores de até 10. Uma desvantagem considerável da aplicação dessas folhas é uma imagem menos nítida, porque a luz se difunde num espaço maior, como também se vê na FIGURA 3.4.8, sendo menor a nitidez, o que na literatura em inglês designa-se por "SCREEN MOTTLE".

As folhas metálicas e as folhas fluorescentes são dispostas em ambos os lados do filme, também em combinação, devendo colocar-se as folhas fluorescentes entre a folha metálica e o filme.

3.4.1.8 DIAGRAMAS DE EXPOSIÇÃO

A exposição do filme é realizada pela dose de radiação que incide no filme. O correspondente enegrecimento do filme pode ser determinado pela curva linear de enegrecimento - dose (veja a FIGURA 3.4.3) ou pela curva característica do filme (veja a FIGURA 3.4.5). Isso pressupõe que a dose é conhecida ou medida no lugar onde está o filme. Em muitos casos, porém, a dose nesse lugar não é conhecida, de modo que a exposição deve ser caracterizada por outras grandezas.

A dose de radiação no filme D_f depende das seguintes grandezas:

- intensidade da dose da fonte de radiação
- distância F entre a fonte de radiação e o nível do filme
- tempo de exposição t_b
- tipo do material e espessura d do corpo de prova

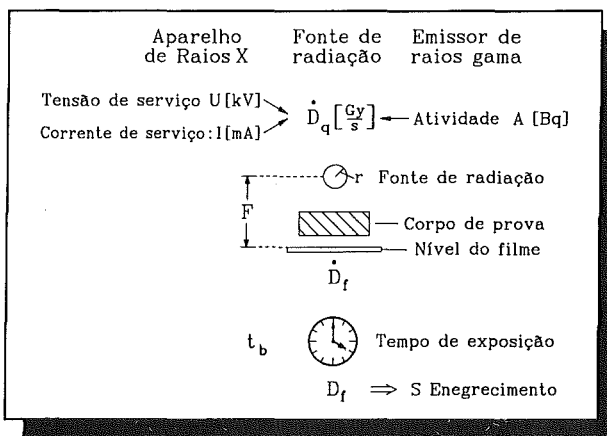


FIGURA 3.4.9: PROCESSO DE EXPOSIÇÃO

O processo de exposição e as grandezas importantes para o mesmo podem ser vistos na FIGURA 3.4.9. A intensidade da dose da fonte de radiação, numa instalação de raio-x, é o produto da tensão de serviço U [KV] pela corrente de serviço I [mA]. Normalmente, a tensão de serviço é ajustada de forma invariável e a intensidade da dose é regulada por meio da corrente do tubo I .

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

Nesse caso, pode-se usar a corrente do tubo I [mA] como medida da intensidade da dose da fonte de radiação. Isso significa que se pode representar a taxa de dose pela corrente do tubo I [mA]. No caso de uma fonte de radiação com emissor de raios gama, pode-se representar a taxa de dose da fonte pela atividade A [Bq]. A intensidade da dose no filme resulta da lei do quadrado da distância, segundo a fórmula (3.3.3), sendo

$$\dot{D}_f = \frac{r^2}{F^2} \dot{D}_q \quad (3.4.15)$$

e a dose responsável pelo enegrecimento S, segundo a fórmula (3.3.4),

$$D_f = \dot{D}_f \cdot t_b \quad (3.4.16)$$

como produto da taxa de dose no filme e do tempo de exposição. Em conclusão, pode-se constatar que, em lugar da taxa de dose [Gy/s], pode ser usadas a tensão U [KV] ou a corrente I [mA], de modo que basta multiplicar estas grandezas pelo tempo de exposição t_b [min] para obter uma medida do enegrecimento S. Assim, pode-se representar a exposição como o produto da corrente I [mA] - permanecendo a tensão constante - pelo tempo de exposição t_b [min]:

$$\text{EXPOSIÇÃO} = I \cdot t_b \text{ [mA} \cdot \text{min]} \quad (3.4.17)$$

ou, no caso de fontes radioativas,

$$\text{EXPOSIÇÃO} = A \cdot t_b \text{ [GBq} \cdot \text{horas]} \quad (3.4.18)$$

Como a exposição do filme depende não só do produto $I \cdot t_b$, respectivamente, com a atividade, $A \cdot t_b$, mas também, conforme a equação (3.4.15), do quadrado da distância F^2 , podem-se formar FATORES DE EXPOSIÇÃO para a caracterização:

$$\text{FATOR DE EXPOSIÇÃO para a radiação X} = \frac{I \cdot t_b}{F^2} \quad (3.4.19)$$

$$\text{FATOR DE EXPOSIÇÃO para a radiação gama} = \frac{A \cdot t_b}{F^2} \quad (3.4.20)$$

Além disso, na exposição também deve-se considerar o tipo do material e a espessura d do material do corpo de prova, porque o material causa uma atenuação da radiação. Como em consequência a dose no filme diminui, a exposição deve aumentar, para obter-se o mesmo enegrecimento do filme. Isso significa, em geral, que a exposição deve aumentar no caso de uma maior espessura do material.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

A relação entre as grandezas

- Exposição $I \cdot t_b$ com a tensão U dada, resp. com $A \cdot t_b$
- Espessura do material d
- Enegrecimento do filme S

é representada em DIAGRAMAS DE EXPOSIÇÃO. Para a caracterização completa de um tal diagrama são necessários sobretudo:

- a tensão de prova U ajustada
- o tipo das folhas intensificadoras
- o tipo do filme

A FIGURA 3.4.10 mostra um diagrama de exposição para aço, empregando-se uma instalação de Raio-X com $U = 200$ KV, $F = 1$ m e folhas intensificadoras de chumbo, de 0,02 mm.

Para um enegrecimento $S = 3$ no caso de aço de 25 mm de espessura e uma intensidade da corrente I de 10 mA, é necessário um tempo de radiação de 10 minutos. Um diagrama de exposição para enegrecimento constante $S = 2$ e o emprego de uma instalação de Raio-X de 400 KV/10 mA, na qual a tensão foi alterada, estão representados na FIGURA 3.4.11 para o material aço a ser examinado. Nesta figura, vê-se como é possível determinar a exposição necessária para uma determinada espessura do aço e tensão de serviço. Para o uso de fontes de radiação radioativas, as FIGURAS 3.4.12 e 3.4.13 mostram dois outros diagramas de exposição. A FIGURA 3.4.12 refere-se a um emissor de radiação gama de cobalto-60 e a FIGURA 3.4.13 a um emissor de radiação gama de irídio-192.

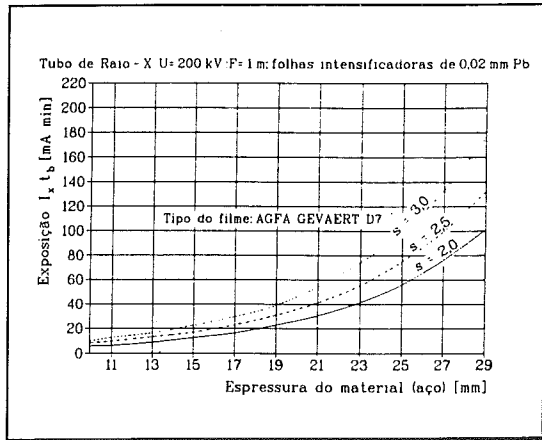


FIGURA 3.4.10: DIAGRAMA DE EXPOSIÇÃO, TIPO 1

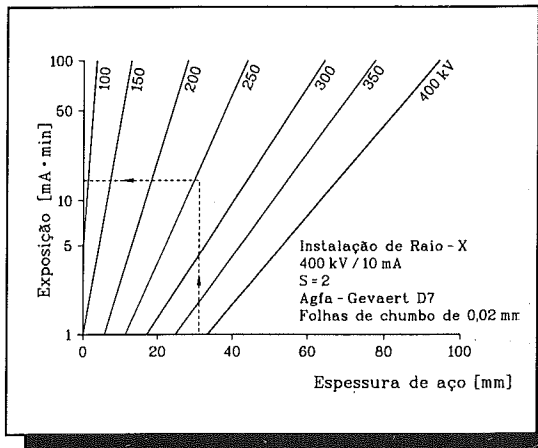


FIGURA 3.4.11: DIAGRAMA DE EXPOSIÇÃO, TIPO 2

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

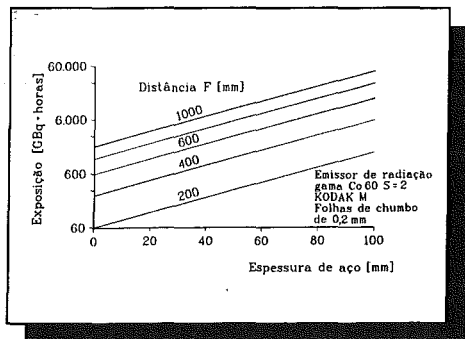


FIGURA 3.4.12: DIAGRAMA DE EXPOSIÇÃO PARA CO-60

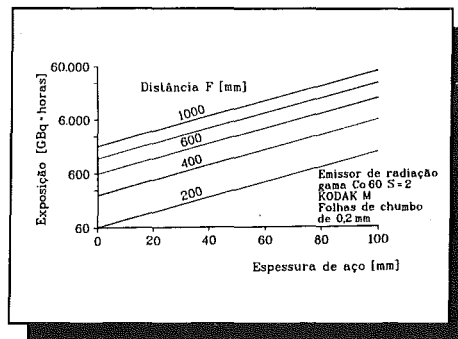


FIGURA 3.4.13: DIAGRAMA DE EXPOSIÇÃO PARA IR-192

Com valores dados, como corrente e tensão dos tubos de Raios-X, ou atividade das fontes de radiação, pode-se ver nos diagramas de exposição o tempo de exposição para um determinado enegrecimento do filme. Depois do tempo de exposição, é preciso tratar o filme, o que também leva um certo tempo. Depois, é possível a interpretação. Todos esses tempos são importantes para a velocidade do ensaio de elementos construtivos por meio da transmissão de uma radiação. Esses tempos naturalmente põem limites superiores à velocidade do ensaio. Por isso, não é possível conseguir elevadas velocidades de ensaio com filmes. Essa é uma desvantagem evidente da técnica de filmes, motivo pelo qual se fizeram grandes esforços por realizar a representação da radiação mais rapidamente e, se possível, em tempo real, para obter o resultado diretamente ao fazer o ensaio. Isso também permite fazer o ensaio automaticamente em tempo real, o que é de grande importância para muitos ensaios. As possibilidades para isso são tratadas no capítulo seguinte.

3.4.2 MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO COM DETECTORES

No ensaio radiográfico de elementos construtivos, é necessária uma representação interpretável do interior do elemento. Realiza-se a representação por meio da radiação eletromagnética de raio X ou gama, para a qual esta deve ser detectada. No capítulo 3.4.1, explica-se como se faz esta detecção com filmes sensíveis à radiação. No presente capítulo, trataremos da detecção da radiação com detectores. O objetivo é obter, por meio da radiação, uma representação do corpo de prova, que possa ser interpretada diretamente e com rapidez. Para isso, a radiação de raio X ou gama precisa ser convertida em radiação luminosa, para obter-se uma imagem visível da representação da radiação, ou ser convertida em sinais de corrente ou tensão, que podem ser medidos, para representar a imagem por via eletrônica num monitor.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

3.4.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS DETECTORES DE RADIAÇÃO

Como a radiação eletromagnética de raio X ou gama, de alta energia, não é visível nem palpável diretamente, é preciso convertê-la numa radiação visível (luz) ou em sinais mensuráveis. Para isso, são necessários materiais que possibilitem um tal processo de conversão. Para a conversão, podem-se aproveitar vários processos no material do detector:

EXCITAÇÃO: Como já foi explicado, os átomos e as moléculas possuem elétrons com estados energéticos discretos, que podem ser representados esquematicamente como níveis de energia, como se vê na FIGURA 3.4.14 (à esquerda). Os quanta da radiação de raio X ou gama, de alta energia, interagem com os átomos do material do detector.

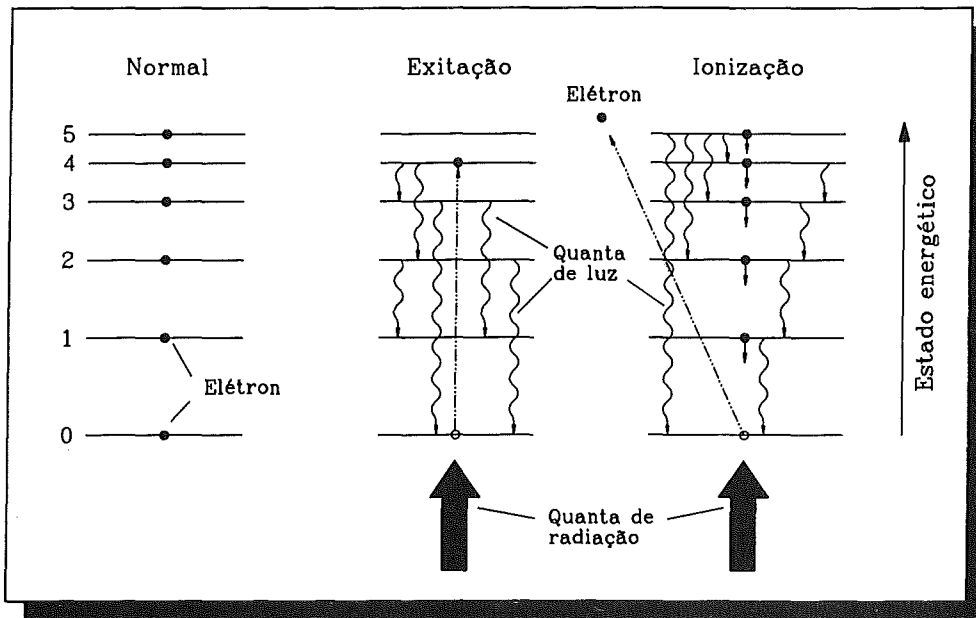


FIGURA 3.4.14: CONVERSÃO DA ENERGIA DA RADIAÇÃO

Nessa oportunidade, o quantum de radiação cede uma parte da sua energia, por choque, a um dos elétrons do átomo do detector, elevando assim o estado energético do mesmo. Designa-se esse processo por **EXCITAÇÃO** e ele está representado de forma esquemática no centro da FIGURA 3.4.14. Mas o átomo tende a restabelecer o estado energético inicial estável e emite a energia absorvida dos estados excitados em forma de radiação. Selecionando-se o material do detector de modo que a radiação emitida pelos átomos do detector esteja na faixa visível, é possível tornar visível, com essa luz, a radiação de raio X ou gama original. Chama-se esse processo de fluorescência.

IONIZAÇÃO: O quantum da radiação de raio X ou gama também pode transmitir, por choque, tanta energia a um dos elétrons do átomo do detector, que este é expulso do conjunto de elétrons. Nesse caso, fala-se de **IONIZAÇÃO**, que está representada de forma

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

esquemática no lado direito da FIGURA 3.4.14. Então, os outros elétrons podem ocupar o espaço que ficou vago e as alterações dos estados energéticos também causam a emissão de radiação, como no caso da excitação. Selecionando-se corretamente o material do detector, a energia dos quanta de radiação também é convertida em luz.

3.4.2.2 DETECTORES DE FLUORESCÊNCIA

Para esse tipo de detector, utiliza-se material fluorescente, que é aplicado com um adesivo ao material de base. Vê-se a constituição esquemática na FIGURA 3.4.15. Os quanta de radiação que passam pelo material de base geram processos de excitação ou ionização no material fluorescente.

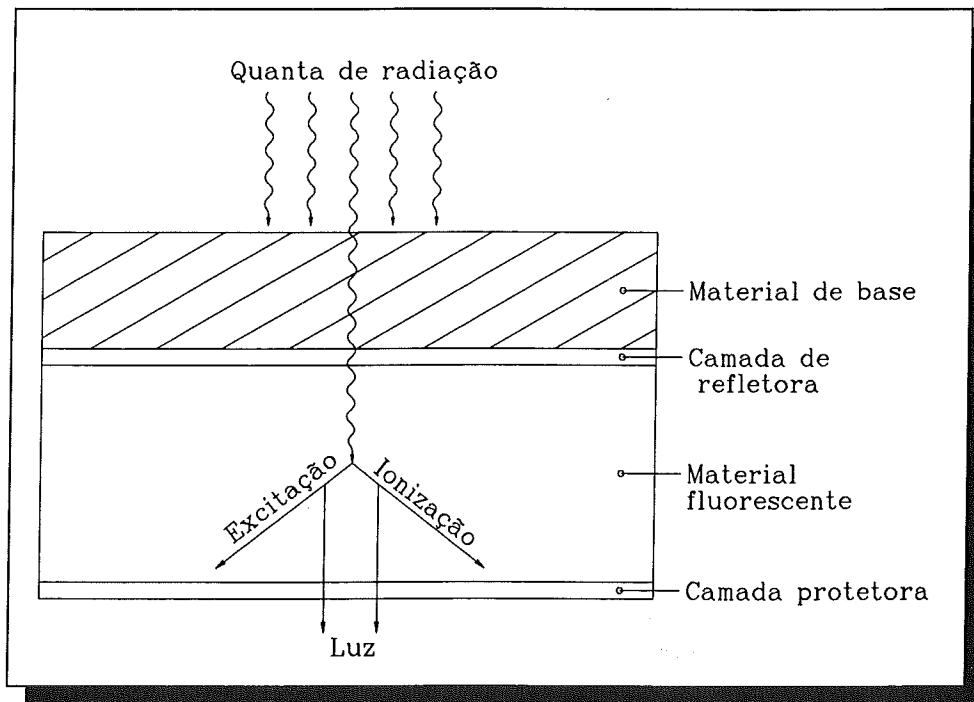


FIGURA 3.4.15: DETECTOR DE FLUORESCÊNCIA

Liberam-se então quanta de luz, que são emitidos para todos os lados. Para tornar visíveis o maior número deles, há uma camada refletora, aplicada ao material de base, para fazer sair a luz para a frente. Devido a essa fluorescência, a radiação torna-se visível. Para evitar que seja absorvida uma quantidade demasiada de luz pelo material fluorescente, não se deve aplicar uma camada espessa demais do mesmo. São usuais espessuras da camada de 50 a 100 mg/cm². Na TABELA 3.4.4 estão indicados materiais fluorescentes típicos, com a sua densidade e o comprimento das ondas da luz emitida. Nos processos de excitação e ionização, o rendimento luminoso é relativamente reduzido, de modo que a luminância de tais detectores fluorescentes é pequena. O dispositivo de medição mais simples, com detector fluorescente, está representado na FIGURA 3.4.16. Da fonte emissora, a radiação passa através do corpo de prova ao detector fluorescente.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

MATERIAL	DENSIDADE (g/cm ³)	COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	COR
ZnS	4,1	450	VIOLETA/AZUL
ZnCdS	4,5	550	VERDE
CsI	4,5	420	VIOLETA
CaWO ₄	6,1	430	VIOLETA
Gd ₂ O ₂	7,3	544	AMARELO/VERDE

TABELA 3.4.4: MATERIAIS FLUORESCENTES

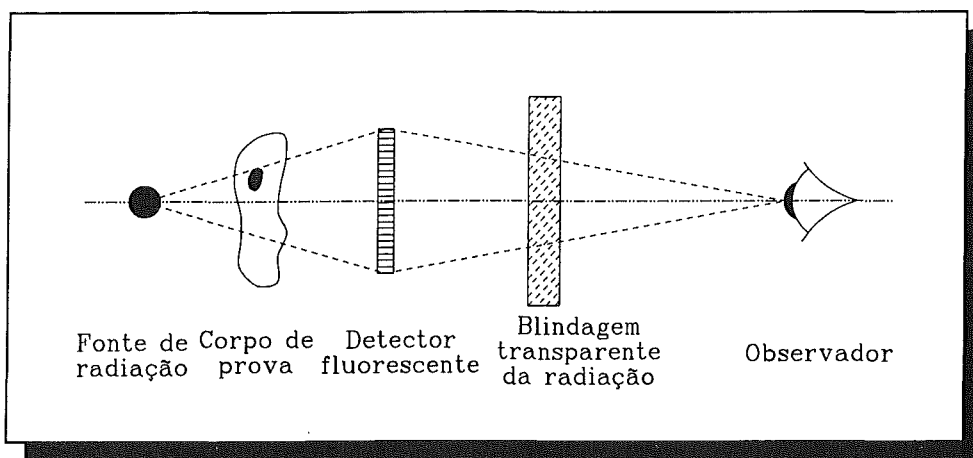


FIGURA 3.4.16: DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO COM DETECTOR FLUORESCENTE

Neste, o corpo de prova é representado e fica visível, como imagem, devido ao processo de fluorescência. No caso de observação direta da imagem, é necessária ainda uma blindagem transparente da radiação, pois senão a dose de radiação é demasiado alta para o observador.

3.4.2.3 DETECTORES DE CINTILAÇÕES

Quando se utilizam materiais translúcidos, nos quais a energia dos quanta de radiação é convertida, por excitação e ionização, em quanta de luz, fala-se de CINTILAÇÕES no material. Com elas pode-se tornar visível a radiação e delas veio o nome do detector. A constituição esquemática de um DETECTOR DE CINTILAÇÕES está representada na FIGURA 3.4.17. Ele é formado por um CINTILADOR, no qual as cintilações são provocadas pelos quanta de radiação. O material do cintilador é um cristal translúcido, utilizando-se principalmente iodetos alcalinos, em forma de iodeto de sódio (NaI), iodeto de céσιο (CsI) ou iodeto de lítio (LiI). Ao redor do cristal, encontra-se um refletor para conduzir a luz para o lado aberto (fotocatodo). Desse modo, os quanta de radiação tornam-se visíveis e podem ser observados.

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

Porém, na FIGURA 3.4.17, está representado um tipo no qual a luz não é observada diretamente, mas transformada num sinal elétrico. Isso se faz do seguinte modo: os quanta de luz incidem sobre uma camada de material (FOTOCATODO), da qual, pela sua energia, expulsam elétrons. Esses elétrons são acelerados por uma tensão (U_1) aplicada e chocam-se contra outra camada, na qual, pelo impacto, são liberados outros elétrons. Isso continua em vários passos sucessivos e tem por consequência uma multiplicação de elétrons. Assim, o sinal luminoso original é convertido num sinal elétrico amplificado, que pode ser tratado para fornecer a representação de uma imagem. A amplificação é realizada pelo multiplicador de elétrons, que permite obter fatores elevados de amplificação de sinais.

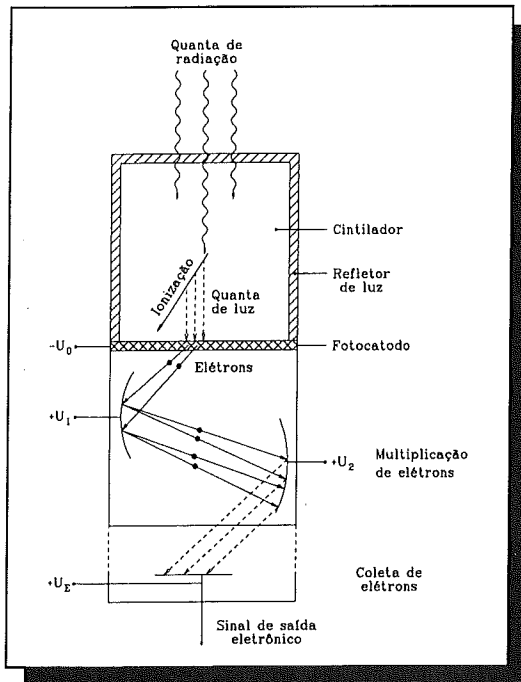


FIGURA 3.4.17: DETECTOR DE CINTILAÇÕES

3.4.2.4 CONVERSOR DE IMAGEM

Para o ensaio com transmissão da radiação, é muito importante obter uma imagem do corpo de prova que possa ser tratada na forma necessária - também automaticamente - para analisar a qualidade do corpo de prova quanto às suas características e os seus defeitos. Os detectores fluorescentes e de cintilações tornam possível converter a **IMAGEM DA RADIAÇÃO** numa outra **FORMA DE IMAGEM**. Isso se faz com os assim chamados **CONVERSORES DE IMAGEM**, dos quais existem diversos tipos.

CONVERSOR DE IMAGEM COM DETECTOR DE FLUORESCÊNCIA:

No tratamento dos detectores de fluorescência se havia mencionado que o coeficiente de eficácia luminosa do processo de fluorescência era muito pequeno e que, por isso, a intensidade da luz era diminuta. Por este motivo, é ligado ao detector de luz um amplificador de luz para aumentar a intensidade da mesma. Na FIGURA 3.4.18, é

mostrada uma tal montagem de um conversor de imagem. Devido à amplificação da luz e de tratamento ótico da imagem fluorescente, pode ser ainda ligada uma câmara de TV de luz escura que recebe a imagem que vai surgir então num monitor de televisão. Por esta forma, pode-se atingir uma **REPRESENTAÇÃO DE IMAGEM DE TEMPO REAL** da focalização radiográfica.

3.4 DETECÇÃO DA RADIAÇÃO

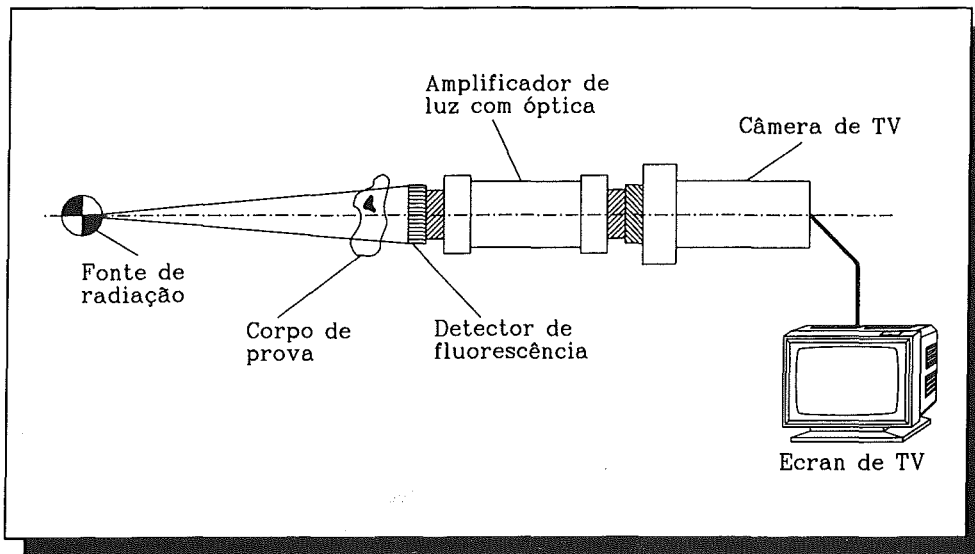


FIGURA 3.4.18: CONVERSOR DE IMAGEM COM DETECTOR DE FLUORESCÊNCIA

CONVERSOR DE IMAGEM COM DETECTORES DE CINTILAÇÃO:

Devido a suas características favoráveis, os detectores de cintilação adequam-se especialmente bem para a montagem de transformadores de luz. Na FIGURA 3.4.19, pode-se ver um exemplo esquematicamente representado. A focalização das radiações do corpo a ensaiar é feita com uma disposição múltipla de detectores de cintilação de forma a poder obter-se uma boa imagem. De acordo com o processo de funcionamento do detector, os sinais elétricos intensificados da imagem podem ser levados a um conversor de sinal que os transforma numa forma televisiva. Desta maneira, teremos à disposição num monitor de televisão uma REPRESENTAÇÃO DE IMAGEM EM TEMPO REAL que poderemos examinar e é por isso que aqui se fala de RADIOSCOPIA. Para muitas tarefas de exame, esta representação radioscópica de imagem em tempo real traz imensas vantagens. Para ensaios em que é necessária rapidez ou grande velocidade no ensaio, esta é, muitas vezes, uma necessidade obrigatória, uma vez que o problema do ensaio não pode ser resolvido por outros processos.

Este tipo de representação de imagem constitui, por isso, uma forte concorrência à técnica de filmagem que é tratada no capítulo 3.4.1. Uma vez que, na demonstração de radiação com detectores, a representação da imagem, como ficou demonstrado, é representável numa forma diferente de sinal; a radioscopia oferece a possibilidade de se poder continuar trabalhando nos sinais do conversor de imagem com computadores digitais.

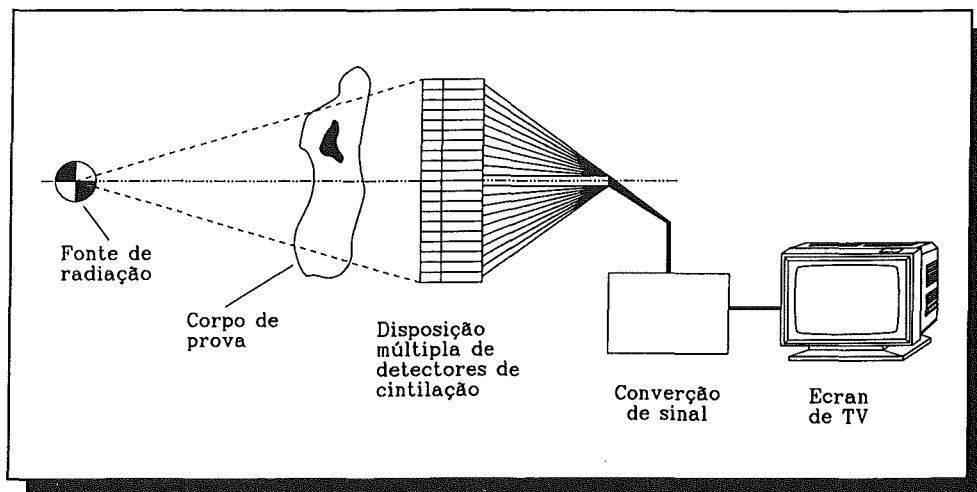


FIGURA 3.4.19: CONVERSOR DE IMAGEM COM DETECTOR DE CINTILAÇÃO

Em resultado disso, para o sinal de imagem há as seguintes possibilidades:

- DOCUMENTAÇÃO em forma de
 - FILMES DE VÍDEO
 - DADOS DIGITAIS em disquetes ou discos
- CONTINUAÇÃO DO TRATAMENTO DO SINAL com vista a
 - MELHORIA DA QUALIDADE DE IMAGEM
 - ANÁLISE DE DEFEITOS

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

No ensaio das radiações, o objetivo mais importante é - como já foi explicado no capítulo 3.1 - conseguir um tanto quanto possível bom reconhecimento de defeitos. Isto aplica-se a qualquer outra focalização das radiações. Na focalização dos defeitos existentes no corpo a examinar por meio de aparelhos de demonstrações de radiações, a imagem do defeito terá que apresentar as seguintes características:

- NITIDEZ
- CONTRASTE

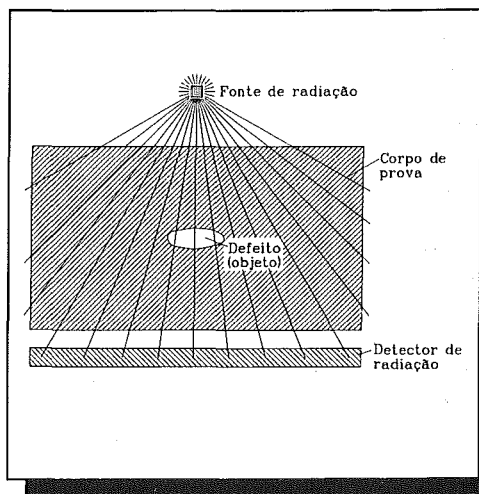


FIGURA 3.5.1: REPRESENTAÇÃO DO DEFEITO

O tipo de focalização de defeitos no método de radiações já tinha sido explicado no início do trabalho, no capítulo 3.1, através da FIGURA 3.1.1. Os pontos essenciais na focalização de defeitos devem ser verificados claramente uma vez mais com a ajuda da figura 3.5.1.

A radiação que sai da fonte é atenuada de acordo com o coeficiente de atenuação μ_M e densidade ρ_M . Dado que na área do defeito no material predomina um outro coeficiente de atenuação μ_F e uma densidade ρ_F , altera-se nesta área também a atenuação da radiação de acordo com a diferença entre μ_M e densidade ρ_F , assim como a extensão dos defeitos no sentido da radiação. No caso de espaços vazios ou oclusões, μ_F é menor que μ_M de forma que a radiação na área do defeito é menos atenuada do que no restante da área

do corpo de prova. Este fato leva a que seja registrada na área do defeito uma dose de radiação maior (D_E) do que fora da área do defeito, devido a atenuação da radiação. Na FIGURA 3.5.2, o comportamento da dose de energia também está registrado com traços sobre a coordenada local x , as quais darão um resultado sem defeitos.

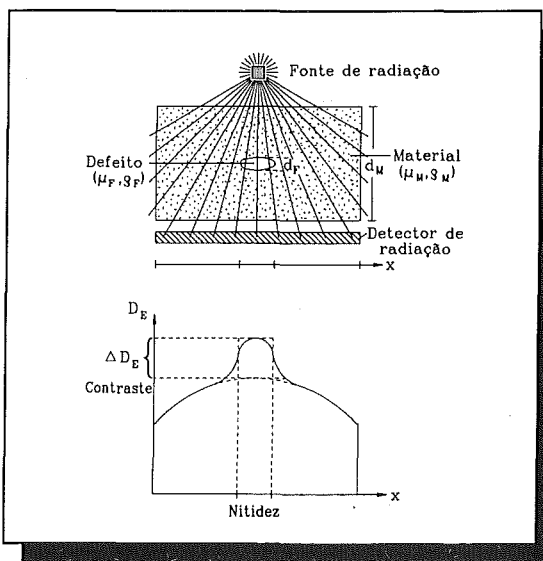


FIGURA 3.5.2: DISPOSIÇÃO DE TESTE

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

A diferença da dose de energia que seria provocada por um defeito, passa a chamar-se **CONTRASTE** e deveria ser a maior possível para dar boas possibilidades de reconhecimento de defeito. A reprodução local do erro na superfície da detecção da radiação deveria ser a mais nítida possível, o que se chama **NITIDEZ** da imagem. A seguir iremos tratar com mais precisão a nitidez e o contraste, ou seja, as duas características que determinam a **QUALIDADE DE IMAGEM**.

3.5.1 DESFOCAGEM GEOMÉTRICA

Dado que a radiação electromagnética se espalha em linha reta, podem aplicar-se aqui também as leis da óptica. Na verificação radioscópica, a disposição compõe-se da fonte de radiação, do corpo de prova com o defeito como objeto a reproduzir e da detecção da radiação. Tal disposição é mostrada na FIGURA 3.5.2. A fonte de radiação será tomada como sendo circular e a sua medida marcada como diâmetro. O objeto, que deverá ser representado com uma boa nitidez ou uma pequena desfocagem, é o defeito no corpo de prova. A reprodução de defeitos faz-se através da detecção da radiação. A respectiva disposição geométrica óptica é apresentada na FIGURA 3.5.3.

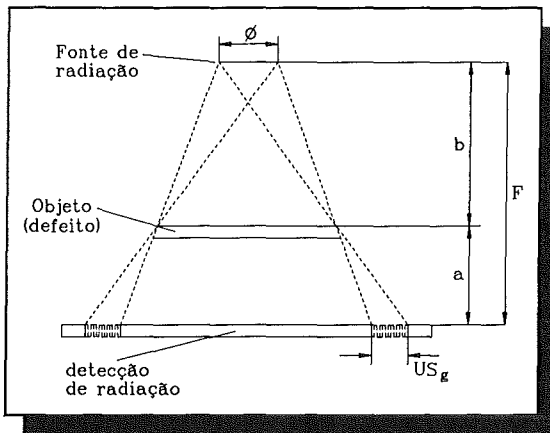


FIGURA 3.5.3: DESFOCAGEM GEOMÉTRICA

Se tivermos

- Φ = diâmetro da fonte de radiação
- F = distância fonte - detector de radiação
- a = distância objeto (no lado da fonte) - detector de radiação
- b = distância fonte - objeto

então resulta daí, segundo as leis da óptica, como equação para o cálculo da DESFOCAGEM GEOMÉTRICA US_g :

$$US_g = \frac{\Phi \cdot a}{F - a} = \Phi \cdot \frac{a}{b} \quad (3.5.1)$$

Discussão da relação (3.5.1): O objetivo de uma desfocagem tão pequena quanto possível é alcançado por

- *A maior distância possível entre a fonte de radiação e o objeto*

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

Por motivos práticos, a distância para cima é limitada pela perda de intensidade da radiação com b cada vez maior. Para, no entanto, poder representar o defeito por meio da radiação, é necessária uma dose suficiente de radiação para a sua detecção, de forma a que distância b não seja aumentada demasiadamente. Quantitativamente, é possível calcular a diminuição da dose de radiação através da representação que se encontra na FIGURA 3.5.4.

Da superfície da fonte de radiação surge a taxa da dose \dot{D}_1 . A superfície da fonte de radiação é obtida pelo produto de $\pi\Phi^2$. Na distância b , a radiação terá que atravessar a superfície esférica e possui aqui a taxa de dose \dot{D}_2 a qual se pode calcular a partir da relação de ambas as superfícies

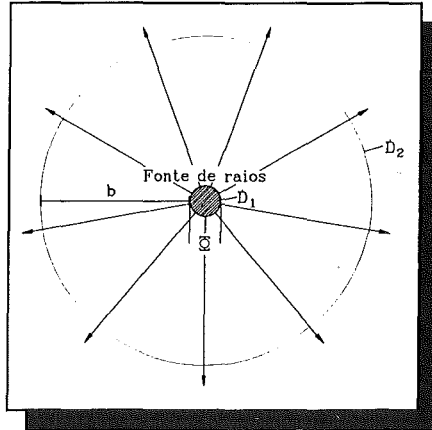


FIGURA 3.5.4: REDUÇÃO DA POTÊNCIA DA DOSE

$$\dot{D}_2(b) = \frac{\pi\Phi^2 \dot{D}_1}{4\pi b^2} = \frac{\Phi^2}{4b^2} \dot{D}_1 \quad (3.5.2)$$

A taxa da dose diminui com o quadrado da distância da fonte de radiação, e é por isso que o valor tem que ser limitado para cima, pois, de outra maneira, em alguns métodos de detecção da radiação resultariam tempos demasiados longos de exposição para obter uma dose suficiente para a detecção do defeito.

■ *A menor distância possível entre o objeto e o detector*

A menor distância é alcançada quando a detecção da radiação se faz diretamente em contato com o objeto a ensaiar. Desta forma, utilizando filmes altamente sensíveis à radiação, por exemplo, (ver Capítulo 3.4) estes são colocados diretamente em contato com o objeto.

■ *O menor diâmetro possível da fonte de radiação*

Nas fontes radioativas gama, o limite inferior das medidas é dado pela quantidade de material que é necessária para se atingir a necessária atividade de radiação. As medidas a alcançar são na ordem dos milímetros. Nos raios X, o diâmetro do foco é limitado pela quantidade de calor gerada no alvo do tubo.

Quanto ao diâmetro do foco do aparelho de raios X, podem distinguir-se três tipos, como se pode ver na TABELA 3.5.1. De acordo com a relação (3.5.1), a distância dada entre a fonte de radiação, o objeto, e o detector, a desfocagem geométrica é tanto menor quanto menor for o diâmetro do foco.

TIPO	TAMANHO DO FOCO
Foco normal	4 - 1 mm
Mini-foco	1 - 0,1 mm
Micro-foco	100 - 1 μm

TABELA 3.5.1 : TIPO DE FOCO DOS APARELHOS DE RAIOS X

Exemplo: Uma configuração para ensaio radiológico possui uma distância fonte de radiação - objeto de $b = 1500$ mm e uma distância objeto - detector de $a = 100$ mm. Com um diâmetro de foco de 3 mm, resulta uma desfocagem geométrica de 0,2 mm. Com um diâmetro de 30 μm , a desfocagem geométrica é de somente 2 μm .

Para se obter uma imagem nítida do defeito no detector, a desfocagem geométrica tem de ser menor que a grandeza do defeito, perpendicularmente à direção da radiação. Dadas previamente as distâncias a e b , a escolha do diâmetro do foco tem um papel muito importante para se obter nitidez de imagem. É especialmente a detecção de pequenos defeitos que exige um menor diâmetro.

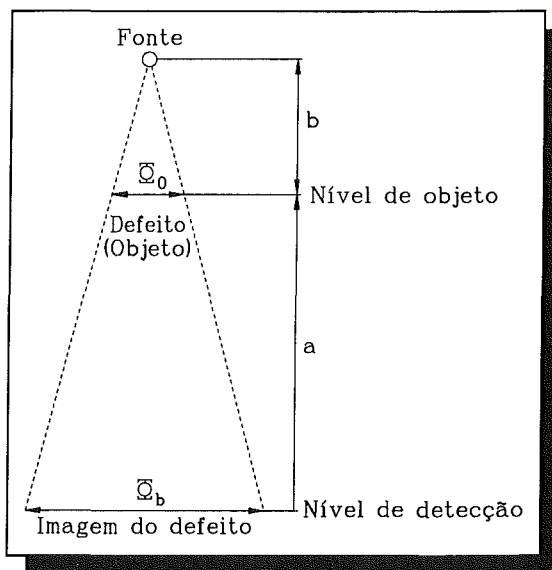


FIGURA 3.5.5: AMPLIAÇÃO DA IMAGEM

3.5.2 AMPLIAÇÃO DA IMAGEM

Na demonstração de pequenos defeitos com o método radiológico, é necessário uma ampliação da imagem do defeito.

É possível calcular o FATOR DE AMPLIAÇÃO V partindo da disposição geométrica, como se mostra na FIGURA 3.5.5.

De acordo com a óptica resultam para o fator de ampliação

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

$$V = \frac{\Phi_b}{\Phi_o} = \frac{a + b}{b} = 1 + \frac{a}{b} \quad (3.5.3)$$

sendo

Φ_b = diâmetro da imagem

Φ_o = diâmetro do objeto

Deslocando o corpo de prova com defeito (objeto) entre a fonte de radiação e o detector, pode ser ajustada a ampliação da imagem. Quanto mais perto da fonte de radiação se encontrar o defeito, maior é o valor de V. As influências de uma ampliação de imagem na desfocagem geométrica pode ser vista quando a relação (3.5.3) é colocada na relação (3.5.1). Daí resulta

$$US_g = \Phi (V - 1) \quad (3.5.4)$$

A desfocagem geométrica depende tanto do diâmetro do foco como do fator de ampliação. A representação gráfica da relação (3.5.4) é mostrada na FIGURA 3.5.6.

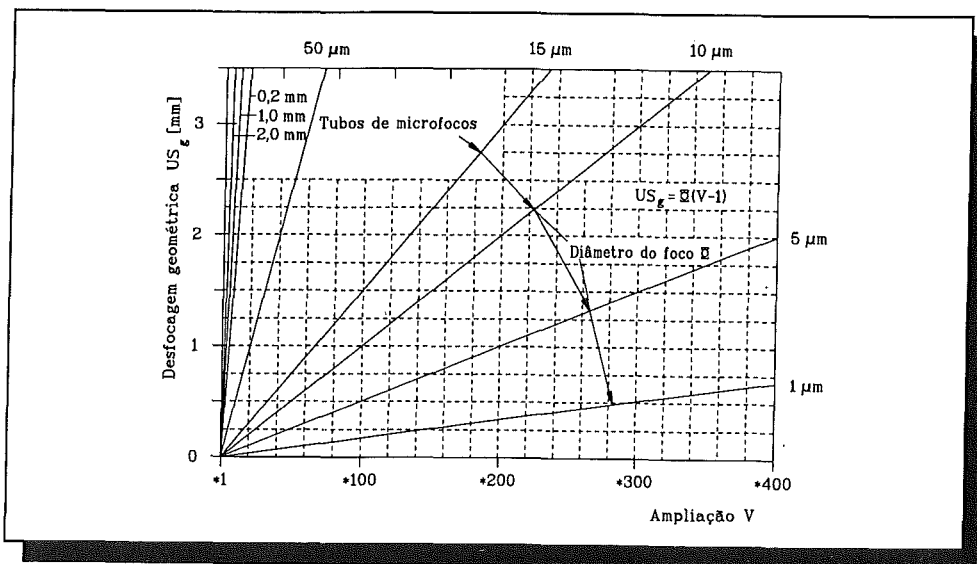


FIGURA 3.5.6: RELAÇÃO ENTRE US_g e V

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

No caso de se tratar de grandes diâmetros de foco, a desfocagem geométrica sobe proporcionalmente a ampliação. Por este motivo, utilizando um tubo convencional (diâmetro do foco 1 - 4 mm), em regra não se registra nenhuma ampliação. É favorável uma ampliação de imagem sob as seguintes condições:

- (1) O defeito é tão pequeno que mal se consegue demonstrar como imagem.
- (2) As dimensões do defeito são muito pequenas em comparação com a desfocagem geométrica.

Isto é o âmbito de aplicação da assim chamada **TÉCNICA DE MICROFOCO**, que foi especialmente desenvolvida para demonstrar pequenos defeitos e para tornar visível a estrutura de pequenos componentes. Um campo de aplicação muito vasto desta técnica relativamente nova é a microeletrônica e a micromecânica. Mas, ela também é usada com vantagens em muitos outros campos que trataremos mais detalhadamente no Capítulo "Exemplos de aplicação".

3.5.3 DESFOCAGEM TOTAL

O objetivo da imagem das radiações é obter uma imagem tão nítida quanto possível do objeto a examinar. Caso se trate da aplicação da técnica de filmagem, isto significa que o trajeto da densidade óptica no filme deveria seguir exatamente os contornos do objeto a reproduzir. Como exemplo, está representado na FIGURA 3.5.7 o caso de um corpo de prova com alterações de espessura descontínua. Esta disposição serve para definir a DESFOCAGEM TOTAL US.

Na FIGURA 3.5.7, o trajeto da densidade óptica do filme está representado como função da coordenada local x , $S(x)$. No caso de se tratar de uma alteração descontínua da espessura, $S(x)$ é chamada a **FUNÇÃO DE BORDA DIFUSA ESF** (Edge-Spread-Function) e a área na qual ela se altera devido a descontinuidade de espessura serve para definir a **DESFOCAGEM TOTAL RADIOGRÁFICA DA IMAGEM** U_{St} . U_{St} é aqui a largura da ESF para 63% da alteração total entre $S_{máx}$ e $S_{mín}$. Segundo a fórmula, o valor aproximado para ESF é:

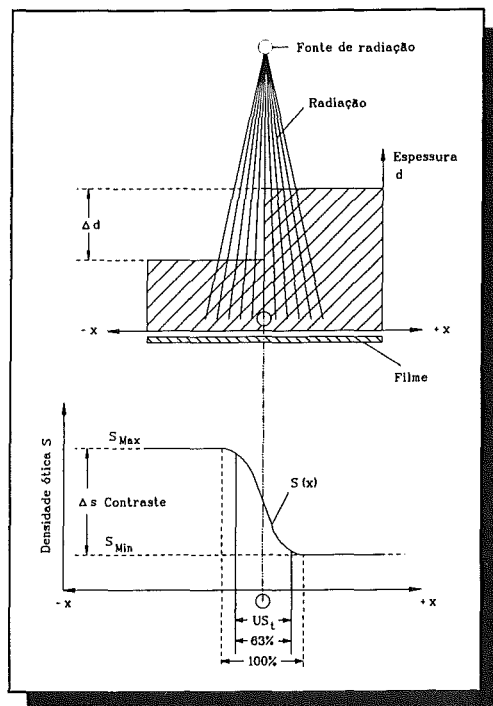


FIGURA 3.5.7: DESFOCAGEM TOTAL

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

$$\begin{aligned}
 S(x) &= \frac{1}{2} \Delta S \left[1 - \exp \frac{2x}{US_t} \right] \\
 S(-x) &= \frac{1}{2} \Delta S \left[1 - \exp \left(- \frac{2x}{US_t} \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.5.5}$$

A desfocagem geométrica total US_t compõe-se de:

- Desfocagem geométrica US_g
- Desfocagem interna US_i do sistema de detecção
- Desfocagem de movimento US_m

A *desfocagem geométrica* US_g é tratada no capítulo 3.5.1

A *desfocagem interna* US_i do sistema de detecção das radiações é provocada pela dispersão do feixe de radiação no detector. Na técnica de filmes, esta depende da distribuição de tamanhos dos grãos de brometo de prata, dos processos de ionização dos raios e do tipo de revelação do filme. Nos detectores de raios, esta depende do material detector e, também, dos processos de ionização, os quais, por seu lado, dependem da energia de radiação. Resumindo, se poderá dizer que a desfocagem interna depende essencialmente do seguinte:

- Material para detecção de radiações
- Energia de radiação

Em geral, a desfocagem interna aumenta com a energia da radiação. Como exemplo são dados na TABELA 3.5.2 os valores para a desfocagem interna na aplicação de um filme de grão fino (classe G1) com uma densidade óptica de $S = 2$.

ENERGIA DA RADIAÇÃO		DESFOCAGEM INTERNA [mm]
RAIOS X	200 KeV	0,06
RAIOS X	1 MeV	0,18
RAIOS X	2 MeV	0,30
RAIOS X	4 MeV	0,40
RAIOS X	8 MeV	0,60
RAIOS X	10 MeV	0,80
RAIOS X	16 MeV	1,00
Co - 60	1,1 - 1,3 MeV	0,40

TABELA 3.5.2: VALORES PARA DESFOCAGEM INTERNA

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

A *desfocagem de movimento* US_b surge quando o objeto ou a fonte de radiação se move durante o processo de reprodução. Na verificação, na qual não há qualquer espécie de movimento, $US_b = 0$.

A desfocagem total de imagem US_t compõe-se, como foi dito acima, de três partes. Para proceder o cálculo, foram seguidos diversos caminhos que não diferem muito uns dos outros, no que diz respeito ao resultado. A fórmula mais fácil de cálculo é:

$$US_t = \sqrt[3]{US_g^3 + US_i^3 + US_b^3} \quad (3.5.6)$$

Para uma verificação radiográfica sem movimento ($US_b = 0$), resulta em:

$$US_t = \sqrt[3]{US_g^3 + US_i^3} \quad (3.5.7)$$

EXEMPLO 1: Temos um aparelho de raios X com microfoco com uma tensão de operação de 200 KV e um diâmetro focal de $10 \mu\text{m}$. O sistema de teste apresenta os seguintes dados: distância corpo de prova - detector $a = 100 \text{ mm}$ e distância corpo prova - fonte de radiação $b = 1000 \text{ mm}$. É usado aqui um filme de grão fino da classe G1. Segundo a equação (3.5.1), desconta-se a desfocagem geométrica de $US_g = 10^{-3} \text{ mm} = 1 \mu\text{m}$. Segundo a TABELA 3.5.2, obtém-se a desfocagem interna de $US_i = 0,06 \text{ mm} = 60 \mu\text{m}$. A desfocagem total de imagem obtém-se segundo a equação (3.5.7) $US_t = 60 \mu\text{m}$. Dado que o diâmetro focal é pequeno, a desfocagem geométrica não tem importância em comparação com a desfocagem interna. Só no caso de um aumento de 60 vezes, a desfocagem geométrica atinge o valor da desfocagem interna.

EXEMPLO 2: Temos um sistema de raios X com uma tensão de serviço de 200 KV e um diâmetro focal de 2 mm. O sistema de teste possui os mesmos dados do exemplo 1 ($a = 100 \text{ mm}$, $b = 1000 \text{ mm}$) e é usado também um filme de grão fino da classe G1. A desfocagem geométrica desconta-se, neste caso, de $US_g = 0,2 \text{ mm}$ e a desfocagem interna é $US_i = 0,06 \text{ mm}$. A desfocagem total de imagem é de $US_t = 0,2 \text{ mm}$. Como resultado pode-se verificar que, neste sistema de teste, devido à superfície focal de 2 mm, a desfocagem geométrica é mais de três vezes maior que a desfocagem interna e que, por isso, a desfocagem total de imagem US_t aqui é determinada pela desfocagem geométrica.

Com estes dois exemplos, completaremos o capítulo da desfocagem de imagem e dos seus motivos.

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

3.5.4 CONTRASTE DA IMAGEM

O mecanismo que faz gerar o contraste da imagem foi explicado, em princípio, na FIGURA 3.5.1. Aqui vai ser abordada a formação de contraste devido à sua enorme importância para o reconhecimento de defeitos. Vamos considerar de novo uma disposição da imagem semelhante à da FIGURA 3.5.1. Para a detecção da radiação, é utilizada a técnica de filmagem. A sua formação é mostrada na FIGURA 3.5.8. O defeito no corpo de prova é demonstrado no filme pela alteração local da atenuação das radiações no corpo de prova por influência da alteração da densidade óptica condicionada por aquela. A alteração da máxima densidade óptica que surge na zona do defeito, é designada por contraste ΔS . A grandeza do contraste depende do seguinte:

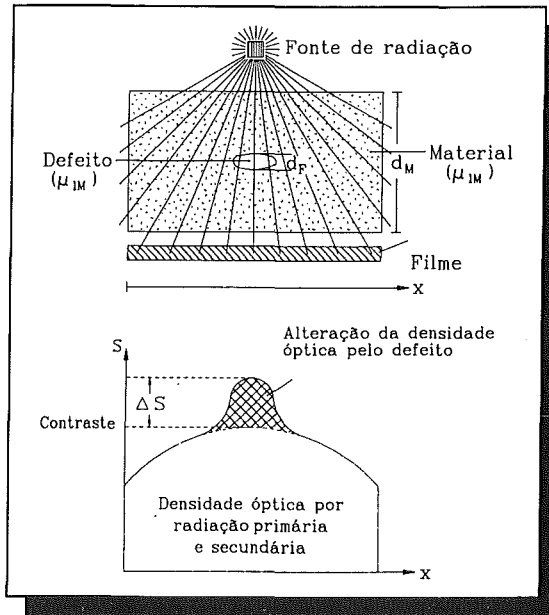


FIGURA 3.5.8: EXPLICAÇÃO DO CONTRASTE

- Material do corpo de prova,
 - Coeficiente linear de atenuação μ_M do corpo de prova na respectiva energia de radiação.
- Tipo do defeito marcado por
 - Coeficiente linear de atenuação μ_F do defeito na respetiva energia de radiação (esta é normalmente tão pequena que pode ser desprezada quando comparada com μ_M).
- Espessura, na direção da radiação, do
 - material d_M
 - defeito d_F
- Tipo de filme, caracterizado pelo gradiente do filme
- Força da radiação secundária em proporção com a radiação primária, assinalada pelo fator de acréscimo da dose B

Para redação do contraste através uma fórmula, partimos, de novo, de uma alteração progressiva da espessura do corpo de prova, como está representado na FIGURA 3.5.7. A radiação primária que incide no corpo de prova, assinalada como dose D_p , é atenuada no corpo de prova de acordo com a sua espessura, aplicando-se a lei de atenuação exponencial

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

segundo a equação (3.5.2). Além disso, é produzida uma radiação secundária que incide também sobre o filme, e cuja contribuição terá que ser levada em consideração, devido ao fator de acréscimo da dose B, equação (3.2.8). Para o contraste ΔS só interessa, a ALTERAÇÃO DA DOSE ΔD_f por meio da alteração da espessura d_f do corpo de prova. Esta alteração da dose no filme resulta do fator de atenuação exponencial para:

$$\Delta D_f = e^{-\mu_M d_f} \quad (3.5.8)$$

Para proceder ao cálculo do contraste ΔS , deve-se levar em consideração, além disso, as características do filme. Estas podem ser representadas pelo gradiente do filme, como ficou demonstrado no capítulo 3.4. Se for usado aqui como característica o gradiente logarítmico do filme e for considerado que através da radiação secundária a densidade óptica do filme é aumentada pelo fator de acréscimo da dose B, então teremos, segundo a equação (3.4.9), neste caso:

$$G = \frac{B \cdot \Delta S}{\log_{10} \Delta D_f} \quad (3.5.9)$$

Se esta equação for resolvida para ΔS e for usada a variação de dose da equação (3.5.8), então segue-se

$$\Delta S = \frac{G}{B} \log_{10} (e^{-\mu_M d_f}) \quad (3.5.10)$$

Ou então, já que $\log e = 0,43$ e for ignorado o sinal de menos, porque só interessa a variação, teremos assim para a grandeza do contraste

$$\Delta S = 0,43 \cdot \mu_M \cdot d_f \cdot \frac{G}{B} \quad (3.5.11)$$

Discussão da equação: o contraste é tanto maior

- (1) quanto maior for o produto resultante do coeficiente de atenuação linear do material a testar e a grandeza do defeito, aqui caracterizado pela variação da espessura d_f ;
- (2) quanto maior for o gradiente logarítmico do filme, isto é, quanto mais sensível for o filme;
- (3) quanto menor for o factor de acréscimo da dose, isto é, quanto menor for a contribuição da radiação secundária sobre densidade óptica do filme.

Exemplo: Em um corpo de aço que se pretende ensaiar, com um comprimento de 50 mm, existe um defeito com ca. de $d_f = 5$ mm de tamanho na direção dos raios, e que é ensaiado

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

com um aparelho de raios X de 400 KV. O coeficiente de atenuação linear é de $\mu_M = 1,2 \text{ cm}^{-1}$ e o fator de acréscimo da dose é $B = 3$. É utilizado um filme possuindo um gradiente de filme de $G = 4,6$. O contraste é a consequência da variação da densidade óptica de $\Delta S = 0,4$.

O conhecimento detalhado, relativo a qual das grandezas determina o contraste, é sobretudo importante com vista a uma boa interpretação do ensaio e à possibilidade de poder tomar medidas objetivas para, caso necessário, conseguir obter uma melhoria do contraste. Pela qualidade da imagem, são responsáveis o contraste e a nitidez.

3.5.5 QUALIDADE DA IMAGEM

Na prática, para ajustar a qualidade da imagem não é necessário usar as grandezas para determinar contraste e nitidez, o que leva muito tempo, mas são colocados **CORPOS DE TESTE DA QUALIDADE DA IMAGEM** no componente a ensaiar. A imagem deste corpo de teste da qualidade da imagem por meio da detecção de raios usada é então utilizada para determinar a qualidade da imagem. Normalmente, esta não é calculada antes do ensaio para determinar a qualidade da imagem, mas procede-se a várias experiências durante o teste. Por este motivo, é importante saber quais são as grandezas que influenciam a qualidade da imagem, o que já foi tratado nos capítulos 3.5.3 e 3.5.4.

Para determinar a qualidade da imagem, há várias normas, como, por exemplo a ISO (International Standardisation Organisation), o DIN (Instituto Alemão de Padronização), a ASTM (American Society for Testing and Materials), a AFNOR (Associação Francesa de Padronização) e a BSI (British Standards Institution). A determinação da qualidade da imagem é tratada a seguir de acordo com a norma DIN 54109.

CORPO DE TESTE DA QUALIDADE DE IMAGEM

Existe uma certa disposição de fios de vários diâmetros que está representada na FIGURA 3.5.9. Este corpo a ensaiar é designado por **PASSARELA DE FIOS**, fabricado de diversos materiais, para que o material do elemento a testar e o do corpo de teste da qualidade da imagem possuam, tanto quanto possível, os mesmos coeficientes de atenuação ou pelo menos coeficientes semelhantes para a radiação. O sistema do corpo de teste da qualidade da imagem baseia-se em uma série de 19 fios de diâmetros variáveis os quais são apresentados com as suas dimensões e os seus respectivos números na TABELA 3.5.3. Estes 19 fios estão subdivididos em quatro grupos sobrepostos tendo cada um 7 fios com números seguidos. Os 7 fios paralelos entre si de um corpo de teste da qualidade da imagem têm respectivamente um comprimento unitário 1, de 10 mm, 25 mm ou 50 mm.

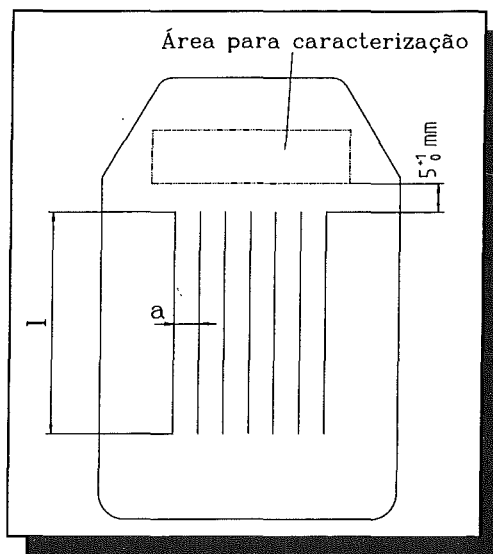


FIGURA 3.5.9: CORPO DE TESTE DA QUALIDADE DE IMAGEM

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

CORPO TESTE QUALIDADE IMAGEM				FIO			DISTÂNCIA AXIAL
1	6	10	13	Número do fio	Diâmetro nominal (mm)	Diferenças limites mm	a mm
x				1	3,2	± 0,03	9,6 ⁺¹ ₀
x				2	2,5		7,5 ⁺¹ ₀
x				3	2		6 ⁺¹ ₀
x				4	1,6	± 0,02	5 ⁺¹ ₀
x				5	1,25		
x	x			6	1		
x	x			7	0,8		
	x			8	0,63		
	x			9	0,5		
	x	x		10	0,4	± 0,01	
	x	x		11	0,32		
	x	x		12	0,25		
		x	x	13	0,2		
		x	x	14	0,16	± 0,005	
		x	x	15	0,125		
		x	x	16	0,1		
		x	x	17	0,08		
			x	18	0,063		
			x	19	0,05		

TABELA 3.5.3: DADOS PARA O CORPO DE TESTE DA QUALIDADE DE IMAGEM

Os materiais usados nos fios, que deverão ter tanto quanto possível um comportamento idêntico ao do material a ensaiar, no que diz respeito a atenuação, estão registrados na TABELA 3.5.4. Como designação curta para o corpo de teste da qualidade de imagem, é escolhido o número do fio mais grosso, de acordo com a TABELA 3.5.3 e a abreviatura do material usado para o fio.

Exemplo: O corpo de teste da qualidade da imagem 10 FE tem, como fio mais grosso, o número 10 com 0,4 mm de diâmetro e compõe-se de aço sem liga. Este pode ser usado para o ensaio de materiais de ferro.

3.5 FOCALIZAÇÃO DA RADIAÇÃO

Corpo de prova da qualidade da imagem	Número do fio segundo tabela 3.5.3	Material do fio	Grupo de materiais a ensaiar
1 FE 6 FE 10 FE 13 FE	1 a 7 6 a 12 10 a 16 13 a 19	Aço (sem liga)	Materiais de ferro
1 CU 6 CU 10 CU 13 CU	1 a 7 6 a 12 10 a 16 13 a 19	Cobre	Cobre, Zinco, Estanho e suas ligas
1 AL 6 AL 10 AL 13 AL	1 a 7 6 a 12 10 a 16 13 a 19	Alumínio	Alumínio e suas ligas
1 TI 6 TI 10 TI 13 TI	1 a 7 6 a 12 10 a 16 13 a 19	Titânio	Titânio e suas ligas

TABELA 3.5.4: CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DA QUALIDADE DA IMAGEM

NÚMERO DA QUALIDADE DA IMAGEM

O número da qualidade da imagem é a medida para a qualidade da imagem exigida ou alcançada. Este é igual ao número dado na TABELA 3.5.3 para o mais fino fio que pode reconhecer-se na radiografia. Um fio considera-se como reconhecido quando é claramente visível com uma densidade óptica uniforme e trajeto ininterrupto em pelo menos 10 mm do seu comprimento.

A relação entre o número da qualidade da imagem BZ e o diâmetro Φ do fio mais fino e direito que se pode reconhecer é dada pela proporção:

$$BZ = 6 - 10 \log \Phi \quad (3.5.12)$$

sendo Φ dado em mm. Quanto menor for o diâmetro do fio reconhecido, tanto maior é o número da qualidade da imagem. O trajeto do número da qualidade da imagem como função do diâmetro ainda reconhecível está representado graficamente na FIGURA 3.5.10

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

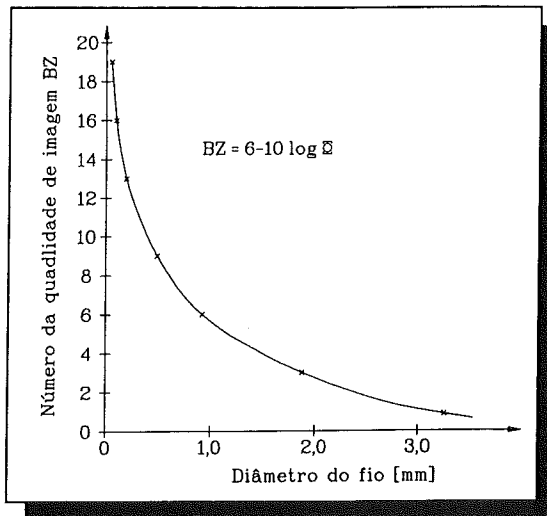


FIGURA 3.5.10: DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DA QUALIDADE DE IMAGEM

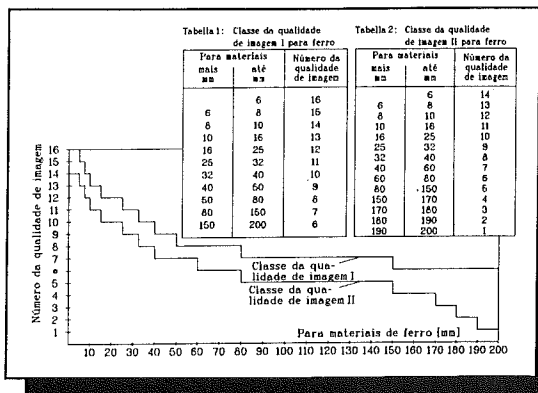


FIGURA 3.5.11: FIXAÇÃO DE CLASSES DE QUALIDADE DE IMAGEM

CLASSE DA QUALIDADE DA IMAGEM

Por meio da classe da qualidade da imagem, são fixadas as exigências mínimas do número da qualidade da imagem a demonstrar em função da espessura da parede do elemento a ensaiar. A espessura da parede é, em geral, a espessura do objeto do ensaio na superfície de apoio do corpo de teste da qualidade da imagem, medida no sentido da superfície do normal em direção à superfície exterior.

A introdução de classes de qualidade da imagem foi feita com vista ao teste de elementos com altas funções de segurança para as quais a classe de qualidade de imagem I é o padrão, e de elementos com funções de segurança menos marcadas para as quais a classe de qualidade de imagem II é suficiente. Na classe de qualidade de imagem I, é necessária uma boa possibilidade de reconhecimento de defeitos, ficando por isso os números da qualidade de imagem mais acima do que na classe de qualidade de imagem II: Como exemplo, está representada na FIGURA 3.5.11 a fixação das classes de qualidade de imagem I e II para materiais de ferro. De forma correspondente, pode proceder-se a uma fixação da classe de qualidade de imagem também para outros materiais.

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Ao trabalhar com radiações penetrantes de raios X e gama, é absolutamente necessário manter a dose que o pessoal recebe nos ensaios tão pequena quanto possível. As normas legais que devem ser observadas na instalação e na operação de sistemas de radiações encontram-se fixadas nas normas relativas à radiações ou nas normas de Proteção Radiológica.

Os mais importantes pontos de vista referentes à proteção radiológica vão ser apresentados resumidamente neste capítulo.

FONTES DE RADIAÇÃO

Na radiografia e radioscopia são usados equipamentos que têm por função gerar radiação penetrante ou fontes de radiação. O principal método de trabalho destas fontes de radiação e as características da radiação foram tratados no capítulo 2. A descrição técnica das fontes de radiação e os seus campos de aplicação serão tratados no capítulo 5. No caso das radiações X e das radiações gama, trata-se de uma radiação penetrante de natureza electromagnética.

3.6.1 EFEITO DAS RADIAÇÕES

As quantidades de radiações interagem com matéria por meio de três processos: efeito foto-elétrico, efeito Compton e produção de pares, perdendo assim energia, o que foi tratado detalhadamente no capítulo 3.2. Por esse motivo, são provocados processos de ionização, perdendo o átomo um elétron de carga negativa restando um íon positivo (átomo restante). Os processos de ionização conjuntamente com a energia de radiação absorvida por unidade de massa são responsáveis pelos danos biológicos no corpo humano. Estes danos biológicos são expressos pelo fator RBW e encontram a sua dimensão na dose equivalente D_A cuja unidade é o Sievert (comparar capítulo 3.3.2), são sobretudo as células que são afetadas pelos efeitos da radiação. Um organismo vivo é composto de células que, por sua vez, são constituídas por moléculas complicadas. De acordo com a parte do corpo, as células apresentam estruturas diferentes. Os processos de ionização e de excitação podem provocar modificações nas moléculas, as quais, por sua vez, afetarão as características e o comportamento das células. Assim, sucede uma ação no campo celular que pode afetar a função vital das células, o que, no fim, vai ocasionar prejuízos provocados pelas radiações.

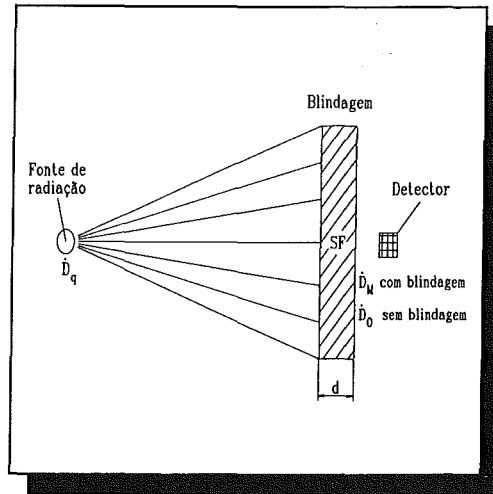
■ REAÇÕES PRIMÁRIAS

Trata-se aqui de processos de ionização e excitação provocados pelas quantidades de radiação.

As consequências desta reação primária são as seguintes:

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

Para que a blindagem dos materiais seja eficaz, são determinantes os coeficientes de atenuação ou espessuras de meio-valor. É de considerar aqui também o fator de acréscimo da dose B, que é fornecido pelas radiações secundárias à dose. Para determinar a blindagem contra as radiações, é considerada uma disposição de radiações como a que está representada na FIGURA 3.6.1.



Da detecção da radiação é medida:

Sem blindagem, a dose na unidade de tempo, \bar{D}_0

Com blindagem, a dose na unidade de tempo, \bar{D}_M

FIGURA 3.6.1: FATOR DE ATENUAÇÃO

A atenuação da radiação por meio de blindagem pode ser expressa pelo fator de atenuação SF como

$$SF = \frac{\bar{D}_0}{\bar{D}_M} \quad (3.6.1)$$

Desta forma, o fator de atenuação contém tanto a atenuação da radiação primária como ainda a contribuição dada pela radiação espalhada à dose na unidade de tempo \bar{D}_M , a qual terá que ser contemplada, de forma não separada pelo fator de acréscimo da dose B. Por este motivo, o fator de atenuação SF é uma grandeza especialmente prática para a seleção de uma blindagem contra a radiação.

Se a fonte de radiação for um aparelho de raios X com radiação na geometria de feixe largo sem colimadores (comparar também FIGURA 3.2.8), então pode ser utilizado como blindagem contra as radiações, p. ex. concreto normal ou chumbo. Na FIGURA 3.6.2 o fator inverso de atenuação $1/SF$ para o concreto normal é dado como função da espessura da camada para diversas tensões de operação da ordem dos 50 KV até 2000 KV. Também são de observar as condições secundárias da medição. Para determinar o fator de atenuação, os raios X foram filtrados (comparar capítulo 5.2). A filtragem total de 1 mm Al para 50 KV, 2 mm Al para 100 KV, 3 mm Al para de 125 KV a 400 KV, 5 mm Pb para 500 KV, 7 mm Pb para 1000 KV e 6,8 mm Pb para 2000 KV. Para a blindagem de chumbo, a forma do fator de atenuação está representada na FIGURA 3.6.3. Condições de medição com filtragem total: 2 mm Al para de 50 KV até 200 KV, 0,5 mm Cu para 250 KV e 300 KV, 3 mm Cu para 400 KV, 5 mm Pb para 500 KV, 7 mm Pb para 1000 KV e 6,8 Pb para 2000 KV. A utilização do diagrama será explicado com um exemplo.

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

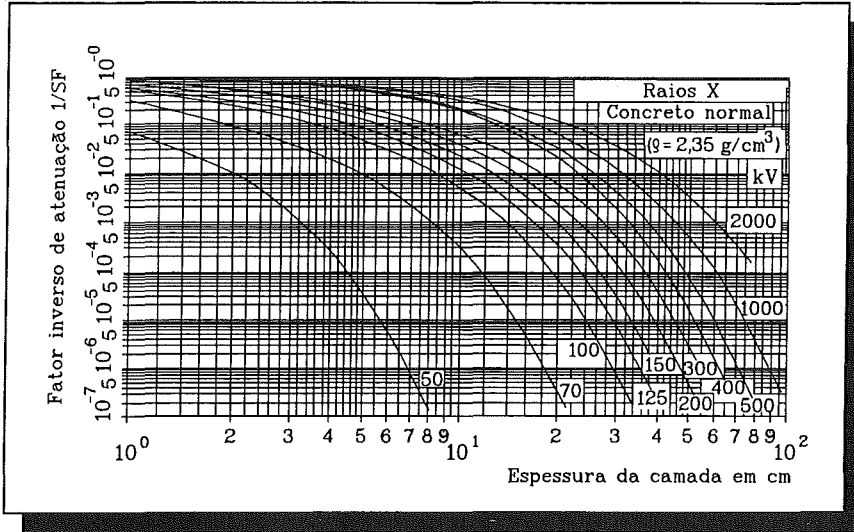


FIGURA 3.6.2: FATOR INVERSO DE ATENUAÇÃO PARA CONCRETO NORMAL (RAIOS X)

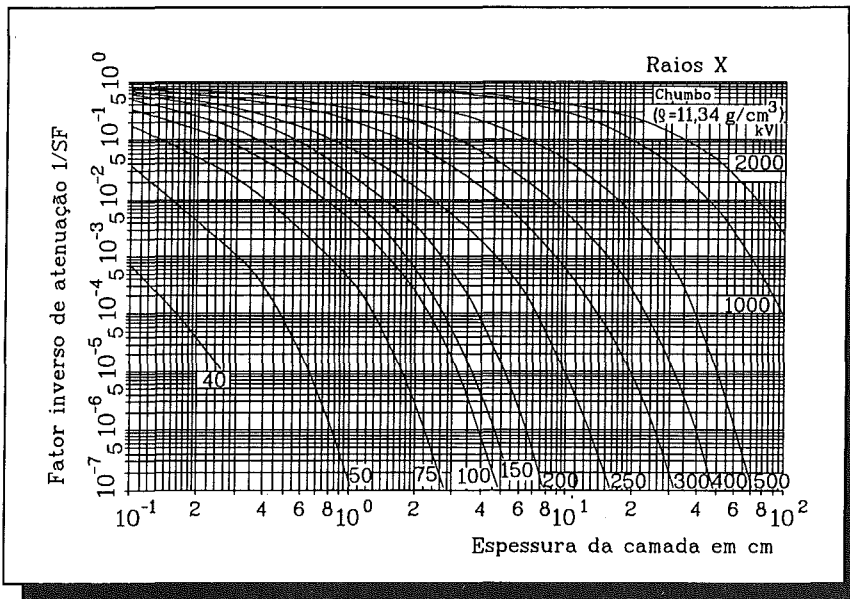


FIGURA 3.6.3: FATOR INVERSO DE ATENUAÇÃO PARA CHUMBO (RAIOS X)

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

Exemplo: Temos um aparelho de raios X de 200 KV, cuja dose por unidade de tempo terá que ter para a blindagem o fator de diminuição 10.000. O valor inverso do fator de atenuação resulta de $1/SF = 10^{-4}$. Se este valor é procurado no diagrama no eixo $1/SF$ e é observado na linha para a direita até à curva dos 200 KV, partindo do ponto de intersecção e seguindo para baixo, assim teremos, quando utilizado concreto normal, uma espessura de isolamento de 30 cm e, quando usado o chumbo, uma espessura de 4 mm. Se a fonte de radiação for um emissor de raios gama, assim podemos ter como materiais de blindagem, por exemplo, o chumbo ou o bari-concreto. Na FIGURA 3.6.4, está representada a forma do fator de atenuação do bari-concreto para o emissor de raios gama. A FIGURA 3.6.5 mostra a forma para o chumbo como blindagem. A utilização dos diagramas faz-se de forma análoga àquela que foi usada para os raios X.

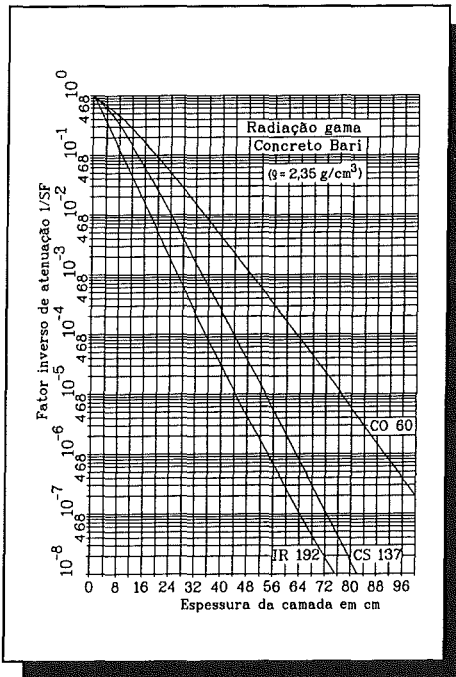


FIGURA 3.6.4: FATOR RECÍPROCO DE ENFRAQUECIMENTO PARA CONCRETO BARI (RADIAÇÃO X)

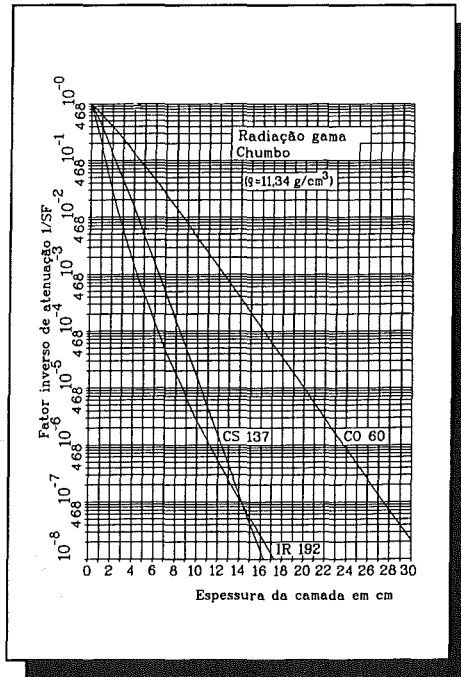


FIGURA 3.6.5: FATOR RECÍPROCO DE ENFRAQUECIMENTO PARA CHUMBO

Exemplo: A taxa de dose de uma fonte de radiação Co-60, terá que ser diminuída por meio de blindagem usando o fator 10.000. O valor é $1/SF = 10^{-4}$. Procurar este valor no eixo $1/SF$, observar até ao ponto de intersecção da curva Co-60 e proceder à leitura do ponto de projeção no eixo das espessuras das camadas, dá para o bari-concreto uma espessura necessária para a blindagem de 62 cm e para o chumbo de 17 cm. Pode constatar-se também através dos diagramas que para Cs-137 e Ir-192, devido à baixa energia da radiação, são suficientes espessuras menores como no caso do Co-60.

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Regra 2: manter distâncias tão grandes quanto possível da fonte de radiação

Se a fonte de radiação possuindo um raio r_1 , como está representado na FIGURA 3.6.6, emite uma taxa de dose \dot{D}_q , segundo a equação (3.3.3) daí resultará uma taxa de dose \dot{D}_0 na distância r_2 , para:

$$\bar{D}_0 = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \bar{D}_q \quad (3.6.2)$$

Pode-se ver que a taxa de dose diminui com a distância da fonte com a RAIZ QUADRADA. Por este motivo, mantendo grandes distâncias, a dose devido a exposição da radiação diminui sensivelmente, o que pode-se ver diretamente na curva dose - distância na FIGURA 3.3.2.

Regra 3: Limitação da duração de permanência na zona de radiação ao mínimo tempo possível.

Se no local de permanência domina uma taxa de dose constante \bar{D}_e , e a permanência tem o tempo t , então teremos a dose de radiação assim expressa

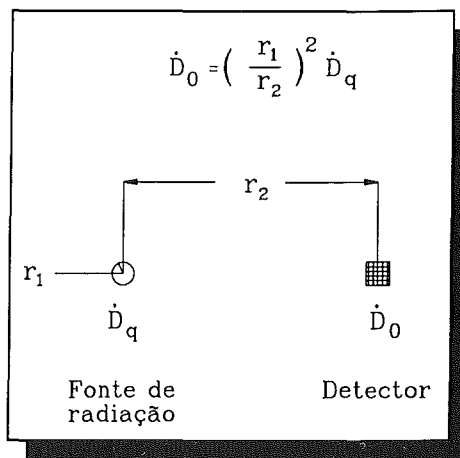


FIGURA 3.6.6: LEI DA DISTÂNCIA

$$D = \bar{D}_e \cdot t \quad (3.6.3)$$

Pode-se ver diretamente que quanto mais curta é a permanência na zona de radiação tanto menor é a dose de radiação recebida. Por este motivo, a permanência nas proximidades da fonte de radiação deveria limitar-se a um mínimo de tempo necessário para o ensaio.

Uma outra medida de precaução contra radiações é selecionar a intensidade da fonte de radiações, a qual não deve ser mais intensa que o necessário. Além disso, deve-se procurar garantir tomando medidas no que diz respeito à construção e à organização, que só se deve entrar na sala do aparelho quando os dispositivos de proteção contra radiações estiverem a funcionando perfeitamente. As prescrições citadas agora lhe dão conselhos concretos a esse respeito.

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

3.6.3 ZONA DE PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES E VALORES LIMITE

As zonas de proteção contra radiações distinguem-se umas das outras de acordo com a dose equivalente (dose do corpo) que as pessoas recebem por ano. A FIGURA 3.6.7 apresenta um esquema destas zonas.

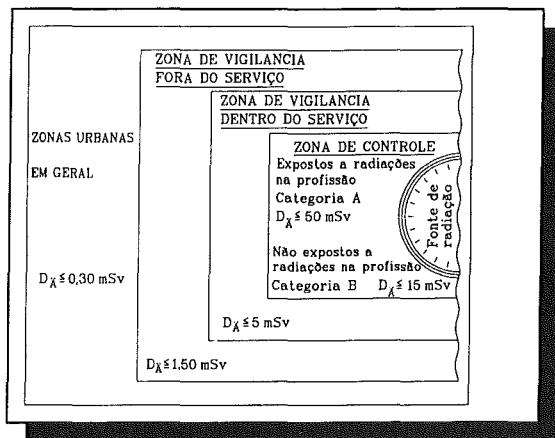


FIGURA 3.6.7: ZONAS DE PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES

Zonas nas quais as pessoas durante um ano possam receber altas doses equivalentes devido a exposição à radiação no corpo inteiro e que são superiores a 15 mSv, devem estar assinaladas como ZONAS DE CONTROLE e, por isso, isoladas. A dose não deve ultrapassar o valor de 50 mSv para pessoas que, devido à sua profissão, têm que estar expostas a radiações (categoria A). Pessoas da categoria B não devem receber radiações superiores a 3/10 do valor limite, isto é, 15 mSv. Zonas profissionais que não pertencem à zona de controle e nas quais as pessoas possam receber doses de radiações por exposição de todo o corpo de mais de 5 mSv, devem

manter-se assinaladas e vigiadas.

Na zona de vigilância fora do serviço, a dose não deve exceder 1,5 mSv por ano. Nas zonas urbanas em geral, não são permitidas doses de radiações provenientes de fontes de radiação não naturais superiores a 0,30 mSv.

As pessoas que devido às suas profissões estão expostas a radiações devem observar as seguintes prescrições especiais:

- (1) Num trimestre, a dose máxima equivalente não deve ultrapassar o valor de 25 mSv.
- (2) Se estas pessoas ficarem expostas extraordinariamente a radiações entre os 30 e os 250 mSv uma vez na vida, esta dose deve ser somada à dose prescrita a que cada um possa ter estado exposto em toda a sua vida.
- (3) A dose por idade é, a partir dos 18, aumentada com a idade, somada à dose equivalente, e o seu valor máximo pode ser calculado pela eq. 3.6.4.

$$\text{DOSE PARA A IDADE} = (\text{ANOS DE VIDA} - 18) \times 50(\text{mSv}) \quad (3.6.4)$$

- (4) Após uma exposição única a dose de radiação extraordinária da ordem de grandeza descrita no item 2, a atividade na zona de radiações terá que ser fechada até que esta baixe a dose até valores inferiores à dose máxima para a idade.

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Como já foi dito, é obrigatório, em todos os casos, manter a dose de radiações tão baixa quanto possível sem atender aos valores máximos permitidos. Isto significa, para o pessoal encarregado da segurança de cada pessoa que trabalha com radiações, terá que dar atenção especial às medidas de proteção contra radiações e fazer cumprir integralmente as regras de proteção.

3.6.4 APARELHOS DE MEDIÇÃO DE RADIAÇÕES

Os aparelhos de medição de radiações destinam-se, em geral, a cumprir as seguintes tarefas principais:

- (1) Medição da taxa de dose em um certo local (taxa de dose local)
- (2) Medição da dose especialmente para o pessoal (medição da dose por pessoa)

A medição da radiação faz-se pelos métodos de detecção das radiações, que foi tratado no capítulo 3.4. Tanto podem ser utilizados detectores de radiações como filmes sensíveis às radiações.

Para medir a taxa de dose local, em regra geral, são usados detectores de radiações em forma de detectores de cintilação ou câmaras de ionização. O princípio de funcionamento dos detectores de cintilação está descrito no capítulo 3.4.2. Os sinais da corrente ou da tensão recebidos no detector são diretamente proporcionais a taxa de dose. É necessário proceder uma calibração de forma que a taxa de dose possa ser diretamente lida e indicada. A câmara de ionização funciona, como o próprio nome indica, à base de ionização de átomos de gás. O seu modo de funcionamento está explicado na FIGURA 3.6.8.

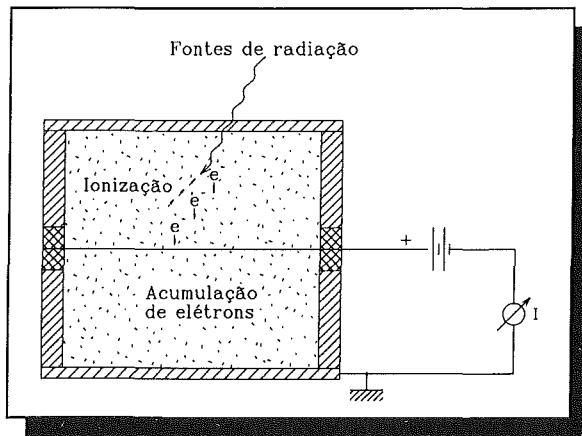


FIGURA 3.6.8: MODO FUNCIONAL DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO

A câmara de ionização compõe-se, em princípio, de um cilindro cheio de gás no qual é colocado um fio isolado que se encontra sobre tensão positiva. A quantidade de radiação que chega à câmara de ionização provoca processos de ionização no gás, no qual são gerados elétrons negativos e íons positivos. Os elétrons negativos acumulam-se no fio, devido à tensão positiva (eléctrodo coletor), e geram uma corrente I que é diretamente proporcional à taxa de dose. Por calibração, o fator de proporcionalidade é determinado de forma a que a taxa de dose possa ser lida diretamente.

A corrente gerada pela taxa de dose também pode ser calculada. Tomemos como ponto de

3 MÉTODO DE TRANSMISSÃO

partida que a câmara de ionização está cheia com 1 g de ar e que a taxa de dose recebida é 1 mGy/s, o que corresponde a uma transformação em energia de 10^{-6} W/g no ar. Para que se forme um par de íons no ar é necessário, em média, uma energia de 32,5 eV, com a qual, usando a carga de um elétron $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C calcula-se uma corrente de cerca de 30 mA.

Para garantir que os aparelhos de medição funcionem perfeitamente, estão previstas diversas medidas como verificação da construção do aparelho, calibração e medições de controle por instâncias independentes que possam garantir um controle seguro da proteção contra as radiações.

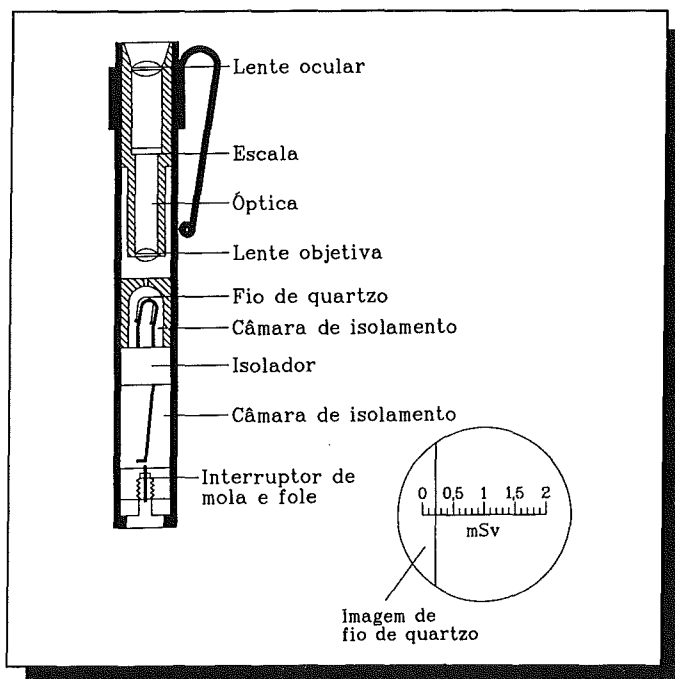


FIGURA 3.6.9: CANETA DOSIMÉTRICA

por meio do interruptor de mola e fole. Os processos provocados pela energia de radiação levam a uma descarga da câmara por meio dos elétrons negativos. Por meio de calibração, a grandeza da medição pode ser lida diretamente em mSv. Para isso, está instalado no aparelho um sistema óptico. Há caneta dosimétrica deste tipo para diversas faixas de doses.

O dosímetro de filme compõe-se de filmes altamente sensíveis às radiações que são colocados em plaquetas encaixáveis. A sua montagem esquemática é mostrada na FIGURA 3.6.10. O princípio de medição baseia-se na relação linear entre a densidade óptica e a dose, (comparar capítulo 3.4.1). Por comparação da densidade óptica do filme de medição da dose com filmes de referência do mesmo tipo, que estiveram expostos a dose de radiações

O controle da dose por pessoa serve para assegurar certo valor para a dose equivalente no corpo. Para fazer a medição, no caso dos aparelhos de raios X e dos raios gama, sobretudo há canetas dosimétricas e de filme.

Os dosímetros de coluna são aparelhos de medição portáteis com um apoio de mola em todo o seu tamanho composto de uma câmara de ionização isolada.

A Figura 3.6.9 apresenta uma representação esquemática deste aparelho. A parte de medição propriamente dita é constituída de uma pequena câmara de ionização que se carrega com tensão positiva

3.6 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

calibradas (Co-60, raios X), pode-se determinar a dose. Na plaqueta, são colocados dois filmes de sensibilidade diferente para aumentar a faixa de dose. Além disso, nas áreas, são colocadas placas filtrantes para que, em caso de exposição às radiações, se possa proceder a uma análise exata do tipo de radiação. A faixa de radiação fica normalmente entre 0,2 e 10 mSv. A avaliação do dosímetro de filme deve ser feita por instituições independentes e especialmente autorizadas para isso. O dosímetro de filme possui como grande vantagem uma possibilidade direta de documentação, uma vez que os documentos relativos à proteção contra as radiações podem conservar-se durante um certo período de tempo previamente fixado. Por este motivo, na Alemanha e no Brasil, se dá preferência ao dosímetro de filme precisamente por possuir este carácter documental. Para manter dentro dos limites, as influências provocadas pelas radiações ambientais e dos processos químicos de envelhecimento no filme, o tempo de utilização do dosímetro de filme é, em geral, limitado a um mês.

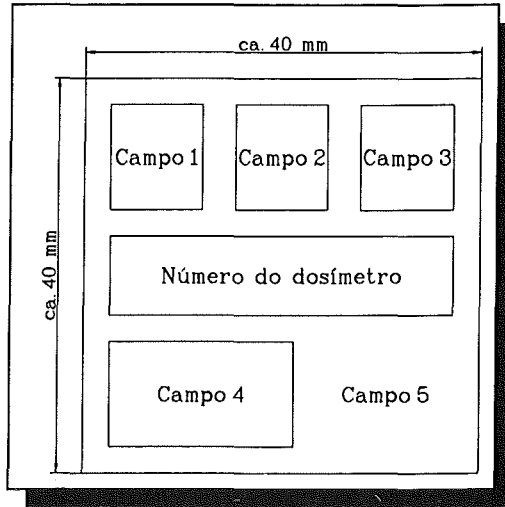


FIGURA 3.6.10: DOSÍMETRO DE FILME

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

Ao contrário do ensaio radiográfico, no qual é aproveitada a radiação que atravessa o corpo a ensaiar, são usadas, no método de difração, as radiações espalhadas e, no método de retrodifusão, as radiações retroespalhadas pelo corpo a ensaiar. Dado que estes métodos também pertencem ao campo da radiografia e da radioscopia, serão aqui incluídos de forma sumária, pois podem ser utilizados tanto na caracterização do material como ainda no reconhecimento de defeitos.

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Com a ajuda da difração dos raios X em cristais, pode ser determinada a sua estrutura, o que traz imensas vantagens com vista à caracterização do material. Quando são produzidos raios X, o que já foi tratado no capítulo 2, ponto 2.2, há que distinguir entre a divisão contínua da energia das quantidades de raios X em forma de espectro de frenamento e as radiações características dos raios X em forma de radiações monoenergéticas. Na radiação linear, a radiação K_{α} é normalmente a mais importante. Para a difração de raios X, é utilizada esta radiação linear. A radiação característica dos raios X é diferente para cada um dos elementos. Procedendo a uma seleção correta do material anódico, podem ser gerados raios X com comprimentos de onda muito diversos. Para fins de teste, somente alguns poucos metais podem ser utilizados, uma vez que, ao utilizar elementos muito leves, o comprimento de onda da radiação que se forma é muito grande; no caso de se tratar de elementos muito pesados, contudo, prevalece o frenamento, sendo assim o aproveitamento das radiações lineares características muito reduzido. Na TABELA 4.1.1, foram compilados os materiais anódicos mais importantes.

NÚMERO ORDINAL Z	ELEMENTO	K_{α} [$\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$]	K_{α} [KeV]
24	CRÔMO	2,0701	5,99
26	FERRO	1,7433	7,12
27	COBALTO	1,6081	7,71
28	NÍQUEL	1,4880	8,57
29	COBRE	1,3804	8,99
42	MOLIBDÊNIO	0,6198	20,02
47	PRATA	0,4858	25,54
74	TUNGSTÊNIO	0,17837	69,55
79	OURO	0,15375	80,68

TABELA 4.1.1: VALORES PARA RADIAÇÕES K_{α}

Os efeitos das interações entre as radiações dos raios X e os materiais são devidos a três processos, que foram tratados no capítulo 3, ponto 3.2. São eles:

- (1) EFEITO FOTOELÉTRICO
- (2) EFEITO COMPTON
- (3) FORMAÇÃO DE PARES

No efeito fotolétrico, a incidência da radiação dos raios X tem energia suficiente para retirar

4. 1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

um elétron da camada interna do átomo, assumindo assim o átomo um estado excitado de energia. Ao voltar ao estado fundamental de energia, é emitida uma radiação característica de raios X.

No efeito Compton, no momento do impacto, são modificados a energia e o momento que ambos os corpos se chocam. Forma-se, então, uma radiação espalhada com um comprimento de onda alterado em relação à radiação original. Este processo é designado também por **ESPALHAMENTO INCOERENTE** e tem uma importância secundária quando é usada uma radiação de raios X de baixa energia.

Um outro tipo de efeito entre os raios X e os elétrons é, neste contexto, muito importante. Se a radiação dos raios X encontra um elétron, então este pode ser excitado e pode começar a vibrar tornando-se, assim, ele próprio a fonte de uma radiação cujo comprimento de onda é idêntico ao da radiação incidente. Neste caso, trata-se de **ESPALHAMENTO COERENTE**. Esta constitui a condição para a difração dos raios X sobre cristais.

4.1.1 MECANISMOS DE DIFRAÇÃO

Se os raios X encontrarem no seu trajeto elétrons de átomos ordenados regularmente, então forma-se, devido às vibrações periódicas dos elétrons, um número de fontes de radiação com a mesma frequência e comprimento de onda que o raio incidente. A partir de cada elétron em vibração, alargam-se frentes esféricas de ondas que se sobrepõem de forma a fazer surgir fenômenos de interferência. As interferências podem ocasionar um aumento ou um desaparecimento das ondas. Para que possa surgir um aumento numa rede de cristal durante a difração de ondas, terão que ter sido preenchidos alguns requisitos de ordem geométrica os quais podem ser descritos por meio de **EQUAÇÕES DE LAUE** ou **CONDIÇÕES DE REFLEXÃO DE BRAGG**:

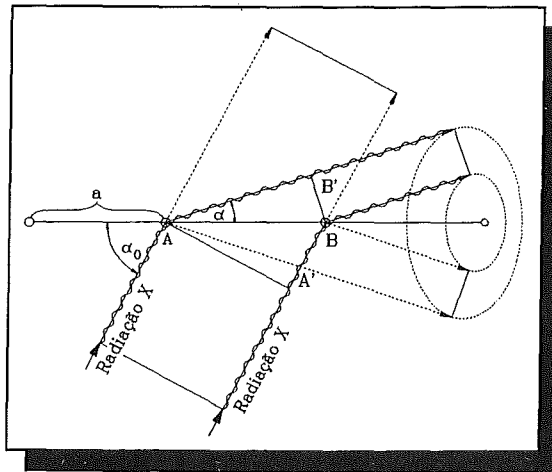


FIGURA 4.1.1: DIFRAÇÃO EM GRADE UNIDIMENSIONAL

4.1.2 EQUAÇÕES DE LAUE

Para poder ilustrar melhor os processos de **DIFRAÇÃO**, está assinalada na **FIGURA 4.1.1** uma série de pontos de uma rede de cristal que mantêm uma distância constante entre si, distância a e que formam, assim, uma rede de uma só dimensão.

Se incidirem nestes pontos da rede raios X paralelos formando um ângulo α_0 , então só há aumento dos raios difratados quando os trajetos AB' - $A'B$ formarem um múltiplo inteiro do comprimento de onda:

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

$$AB' - A'B = n_1 \lambda \quad (4.1.1)$$

n_1 é um número inteiro e λ é o comprimento de onda. Se continuarmos a manter "a" como sendo a distância dos pontos da rede, então podem ser calculados ambos os trajetos por meio de uma simples relação trigonométrica:

$$AB' = a \cos \alpha \quad (4.1.2)$$

$$A'B = a \cos \alpha_0 \quad (4.1.3)$$

Com isto, é possível formular, como se segue, a condição de interferência numa rede unidimensional:

$$n_1 \lambda = a (\cos \alpha - \cos \alpha_0) \quad (4.1.4)$$

É de realçar ainda que no caso da difração de raios X, se trata sempre de um problema de espaço. Como mostra na FIGURA 4.1.1, os raios X difratados formam cones numa série de pontos da rede, cujo eixo é a série de pontos, e metade do ângulo de abertura corresponde a α .

Se estas considerações forem transpostas para um caso bidimensional ou tridimensional, no qual k é a distância dos pontos no caso bidimensional e l é a distância no tridimensional, enquanto que β_0 e β ou γ_0 e γ o ângulo do raio incidente e difratado, então teremos que introduzir mais duas outras equações:

$$n_2 \lambda = k (\cos \beta - \cos \beta_0) \quad (4.1.5)$$

$$n_3 \lambda = l (\cos \gamma - \cos \gamma_0) \quad (4.1.6)$$

n_2 e n_3 são novamente números inteiros.

As equações (4.1.4 até 4.1.6) são conhecidas por serem as três EQUAÇÕES DE LAUE, dado que a difração foi descoberta pela primeira vez por M. v. LAUE. Para obter interferências de difração em redes tridimensionais, terão que estar preenchidos simultaneamente os requisitos das três equações, pois só neste caso pode haver aumento

4. 1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

devido à interferência.

4.1.3 A CONDIÇÃO DE REFLEXÃO DE BRAGG

Na condição de reflexão estabelecida por BRAGG, parte-se do princípio que os cristais se formam em níveis ocupados por átomos e que são acompanhados sempre por níveis paralelos do mesmo valor e a uma distância constante d (distância dos níveis reticulares). Se um raio X incidir sobre um nível reticular num cristal, pode então registrar-se a difração como sendo uma reflexão. O termo reflexão é usado, por isso, muitas vezes em vez de difração. Importantes são aqui os fenômenos de interferência dos raios X. De acordo com a energia, o raio X penetra, em geral, em alguns milhões de níveis reticulares até ser completamente absorvido. Uma parte da radiação é, por isso, refletida em cada um dos níveis reticulares. As ondas surgidas sobrepõem-se formando interferências. Devido a estas interferências, as ondas reforçam-se em certas direções que foram fixadas segundo uma condição geométrica, enquanto que se extinguem nas outras direções.

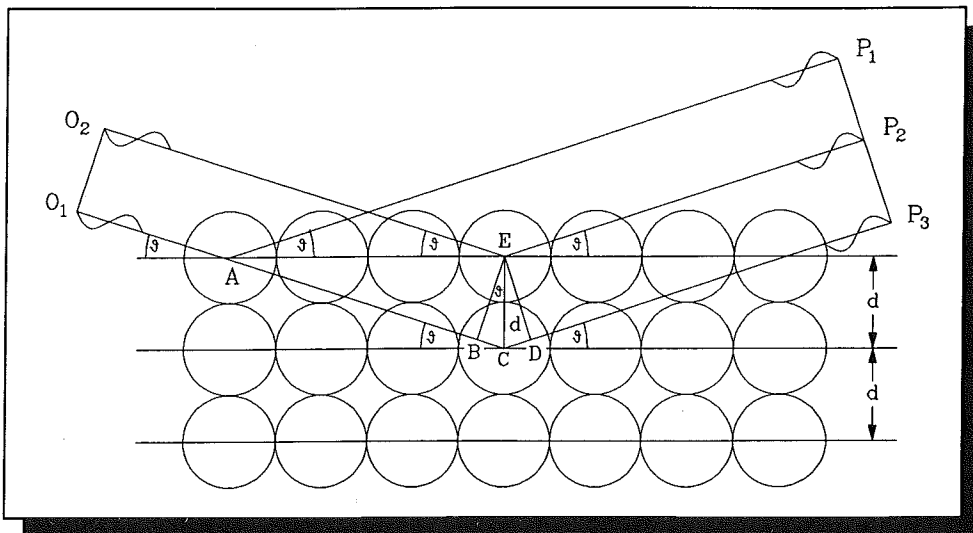


FIGURA 4.1.2: CONDIÇÃO DE REFLEXÃO DE BRAGG

Como exemplo, estão representadas esquematicamente na FIGURA 4.1.2 três posições dos átomos (níveis reticulares) de um cristal. Os círculos representam os átomos (pontos reticulares). Os raios X paralelos, partindo de O_1 e O_2 , encontram-se em fase e incidem sobre o cristal em um ângulo. Estes são reflectidos nos pontos A e E. Dado que os trajetos O_1AP_1 e O_2EP_2 têm comprimentos iguais, as ondas chegam a P_1 e P_2 em fase e tornam-se mais fortes. No caso da reflexão no segundo nível reticular, a onda O_1C é refletida para CP_3 . Dado que o trajeto EB é paralelo a O_1O_2 e o trajeto ED é paralelo a P_2P_3 , o comprimento total do trajeto O_1CP_3 , com uma diferença Δ é mais longo que o do trajeto O_2EP_2 . A soma de Δ corresponde ao trajeto ACD ou $2BC$, pois BC é igual a CD. O trajeto BC pode ser calculado como segue por meio de uma simples relação geométrica:

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

$$BC = d \sin \vartheta \quad (4.1.7)$$

A diferença de percurso Δ entre o raio refletido no primeiro e no segundo nível reticular resulta em:

$$\Delta = 2 BC = 2d \sin \vartheta \quad (4.1.8)$$

Da FIGURA 4.1.2, pode-se deduzir que as ondas refletidas só podem vibrar em fase se a diferença de comprimento do trajeto Δ for um múltiplo inteiro do comprimento da onda. Deste fato pode-se formular assim a CONDIÇÃO DE REFLEXÃO DE BRAGG:

$$n \lambda = 2d \sin \vartheta \quad (4.1.9)$$

Esta diz que, para cada número inteiro n , ocorre um aumento das radiações refletidas. Esta relação abre a possibilidade de proceder à caracterização do material. Se a equação (4.1.9) for resolvida em função de d , então teremos:

$$d = \frac{n \lambda}{2 \sin \vartheta} \quad (4.1.10)$$

Dado que o comprimento das ondas das radiações provocadas pelos raios X é conhecido e constante e o ângulo ϑ , que condiciona a geometria da difração, é calculável, é possível determinar a distância dos níveis da grade e assim também a estrutura dos cristais d de um material com a equação (4.1.10). Se, além da geometria da difração, forem consideradas ainda as intensidades das reflexões, então é possível, sob determinadas condições, determinar a disposição exata dos átomos dentro de uma célula elementar, e assim proceder uma análise completa da estrutura do cristal. Este tipo de exame é chamado geralmente ANÁLISE DE DIFRAÇÃO.

4.1.4 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO

Dos campos de aplicação da análise de difração, para caracterização do material, são conhecidos alguns parâmetros importantes, que vamos passar a enumerar resumidamente:

- (1) **IDÊNTIFICAÇÃO DE UM MATERIAL.** A identificação baseia-se na comparação da imagem da estrutura fina com um material de grade conhecida. Não é necessário proceder a uma interpretação matemática especial do registro.
- (2) **DISTÂNCIA DOS ÁTOMOS.** A verificação de pequenas alterações das distâncias dos átomos em uma grade conhecida, p. ex., em processos de eliminação de ligas, faz-se mediante medição exata da alteração da posição da máxima interferência de difração.

4. 1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

- (3) **ESTRUTURA DO CRISTAL.** As pesquisas da estrutura dos cristais para determinação da disposição atômica nas células elementares da grade utilizam em primeira linha a posição da máxima interferência. Em estruturas entrelaçadas terão que ser também interpretados os valores da intensidade. Em determinadas circunstâncias, é necessário um cálculo matemático muito trabalhoso.
- (4) **QUOTAS DE QUANTIDADE.** A determinação quantitativa das quotas de massa de dois materiais cristalinos baseia-se na interpretação das intensidades de interferência de ambas as grades espaciais.
- (5) **ORIENTAÇÃO DOS CRISTAIS.** A orientação cristalográfica de um monocristal pode ser deduzida do registro da estrutura fina, no caso de se tratar de estruturas de grade, por meio de considerações geométricas.
- (6) **TEXTURA.** A disposição regular dos cristalitos (textura) em materiais de fibra, fios, chapas, etc, resulta dos pontos de acumulação da interferência máxima.
- (7) **TENSÕES ELÁSTICAS.** Para determinar as tensões elásticas nos materiais, que são constantes em zonas macroscópicas, serve para medir as pequenas deslocamentos da interferência máxima em consequência da dilatação da grade. As tensões que já se alteram em zonas submicroscópicas, fornecem um alargamento da interferência máxima. Por meio da interpretação dos perfis lineares, podem ser registradas separadamente as influências que levam ao alargamento de microtensões e o tamanho pequeno das partículas.

Com isto terminamos aqui o capítulo que dedicamos à difração dos raios X e às possibilidades da sua aplicação.

4.2 MÉTODO DE RETROESPALHAMENTO

No método de retroespalhamento é medida a radiação que é retroespalhada pelo corpo de prova e este método é usado para reconhecer defeitos (descontinuidades). O processo de interação da radiação com material que é altamente utilizado neste processo, é o EFEITO COMPTON, que foi tratado no capítulo 3, item 3.2.1. Este método está representado uma vez mais na FIGURA 4.2.1. O efeito compton encontra-se no espalhamento não elástico e incoerente das quantidades de radiação sobre elétrons e é dominante para números atômicos baixos Z . A energia das quantidades espalhadas é dada pela relação (4.2.1), sendo E a energia de incidência, ϑ é o ângulo de espalhamento e m_e a massa de elétron. A relação (4.2.1) mostra que em pequenos ângulos de espalhamento, a perda de energia é pequena; somente no caso de grandes ângulos de espalhamento a perda de energia é notória e a quantidade da radiação espalhada recebe menos energia.

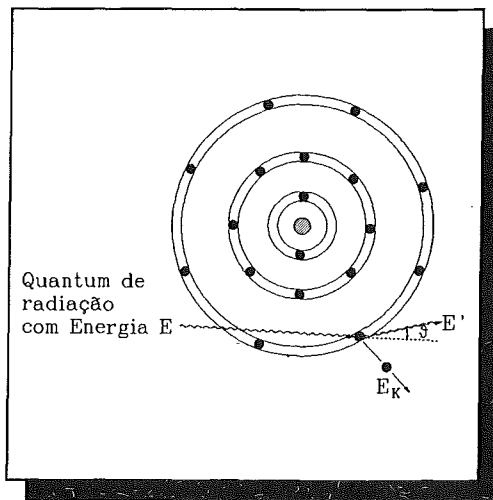


FIGURA 4.2.1: EFEITO COMPTON

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

A característica a assinalar no efeito Compton é que cada processo de espalhamento num elétron origina uma porção de espalhamentos. O número de porções de espalhamentos é assim proporcional à densidade dos elétrons no material de forma que os processos de espalhamento fornecem informações sobre isso.

$$\bar{E}(\vartheta) = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta)} \quad (4.2.1)$$

A densidade dos elétrons é normalmente proporcional à densidade física do material de forma que o espalhamento Compton pode ser usado como meio para determinar a densidade ou as mudanças de densidade. Uma outra característica interessante do espalhamento Compton é a distribuição angular da radiação espalhada. Se considerarmos a probabilidade W_{STR} que a porção de espalhamentos chega a uma faixa de ângulos que vai de 0° a 180° , então resulta uma representação, como a que é mostrada na FIGURA 4.2.2. Aí está registrada a distribuição da probabilidade W_{STR} (em unidades arbitrárias) para diversos ângulos de espalhamento ϑ e duas energias (30KeV e 300 KeV) para as radiações incidentes.

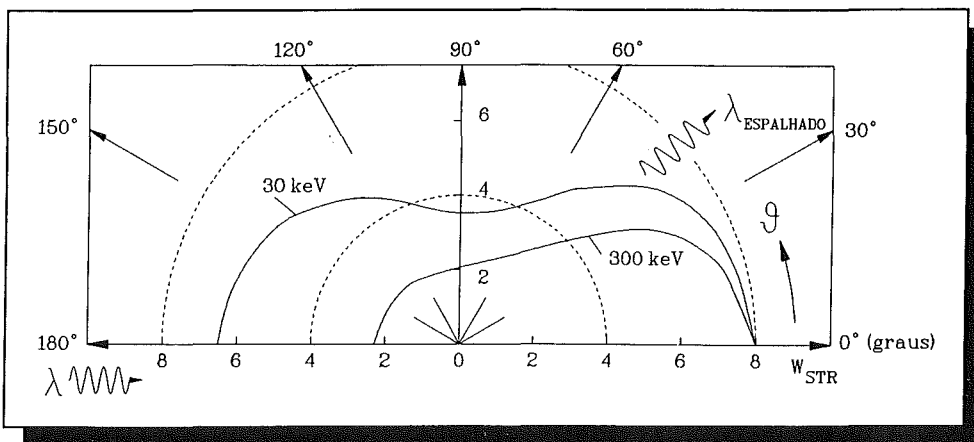


FIGURA 4.2.2: DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE NO ESPALHAMENTO COMPTON

Na figura pode-se ver que o retroespalhamento ($\vartheta > 90^\circ$), por exemplo, para feixes de radiações incidentes de 30 KeV se manifesta fortemente, mas que para altas energias diminui, o que é claramente visível na curva dos 300 KeV.

A consequência disto é que a radiação com retroespalhamento pode ser utilizada muito bem para proceder à determinação da densidade do material ou das suas alterações. Em comparação com o método radiográfico, que permite também determinar as densidades dos materiais e as suas alterações, pode-se notar duas diferenças nítidas:

4.2 MÉTODO DE RETRODIFUSÃO

- (1) A medição pode ser feita num só lado, a fonte de radiação e o detetor das radiações para a radiação com retroespalhamento podem ser colocados no mesmo lado. Isto traz muitas vantagens em várias aplicações quando o corpo a ensaiar só é acessível por um lado.
- (2) A intensidade da radiação com retroespalhamento varia linearmente com a densidade do material, o que em relação à lei de atenuação exponencial do ensaio de transmissão pode ser aproveitado também de forma muito vantajosa.

4.2.1 PROCEDIMENTO

No método de retroespalhamento, o objetivo é obter também uma imagem tridimensional tão boa quanto possível. Uma caracterização de tais sistemas pode ser feita através do número de dimensões (zero a duas) que são medidas simultaneamente. Com esta divisão, obtém-se processos com um elemento volumétrico (Voxel) com detecções linear e plana. Um bom exemplo para o *processo Voxel* é o sistema AIDECS, que foi desenvolvido por J. A. STOKES, entre outros. Em princípio, o modo de trabalho está representado na figura 4.2.3.

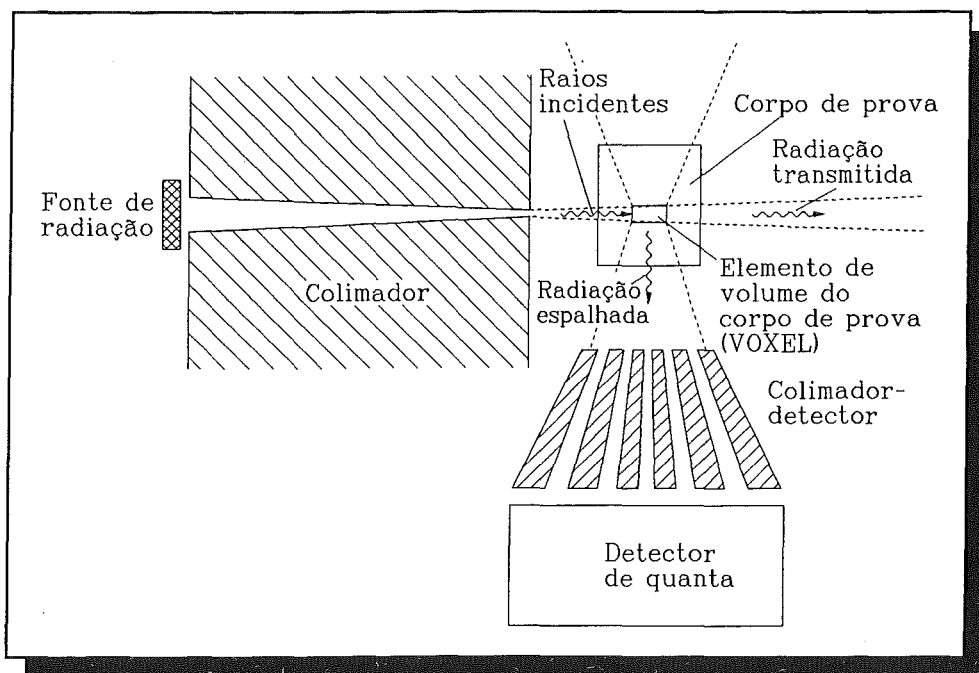


FIGURA 4.2.3: SISTEMA AIDECS (SEGUNDO STOKES)

As radiações emitidas (raios X e gama) a partir da fonte de radiação são colimadas e o corte transversal do feixe emitido tem o valor típico de 2 mm x 2 mm. A radiação espalhada no elemento volumétrico do corpo de prova (Voxel) chega a um detector após a passagem pelo colimador.

O colimador está instalado de tal forma que a radiação espalhada só chega ao detector por

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

um pequeno segmento (cerca de 5 mm) do feixe primário. Com isto, consegue-se que a maior parte da radiação espalhada provenha do Voxel e seja diretamente proporcional à densidade do material no Voxel. Para obter uma imagem tridimensional do corpo de prova, é necessário dividi-lo de forma tridimensional no Voxel e medir suas partes. Ao fazê-lo, deve se dar atenção para que a atenuação da radiação, que vai do Voxel para o segmento, não seja muito diferente, pois, de outra forma, isto terá que ser levado em consideração ao proceder à interpretação.

Para a aplicação prática, foi utilizada, por exemplo, a radiação X de um acelerador linear e grandes detectores de cintilação NaJ (ca. de 100 mm de espessura) para examinar o estado de corpos explosivos encontrados abandonados, especialmente para saber se eles ainda podem explodir e se estão carregados. Dado que isso depende do tipo e da posição do pó e do detonador, o método de retroespalhamento Compton é especialmente apropriado para isso, uma vez que é mais fácil examinar materiais de baixa densidade (pó) do que materiais de densidade mais alta (aço), permitindo assim demonstrar melhor do que usando o método de transmissão. Com este método, foram também examinadas as pás das turbinas dos aviões.

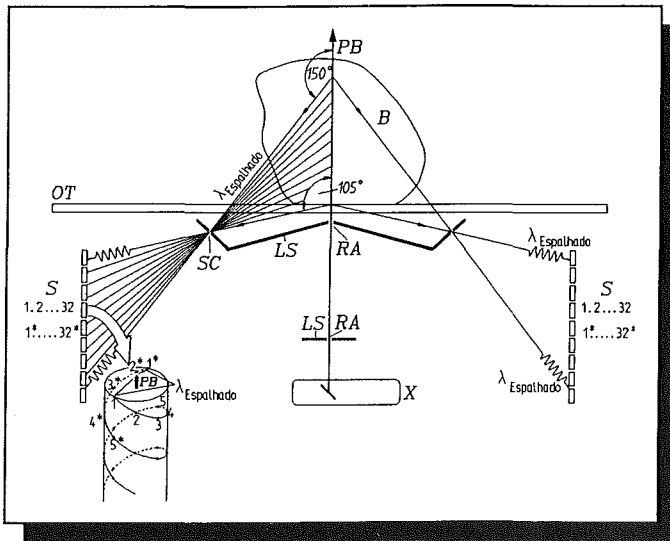


FIGURA 4.2.4: PRINCÍPIO DOS SISTEMA COMSCAN (SEGUNDO HARDING, ROYE)

Como método linear, foi desenvolvido por HARDING e ROYE um método que permite medir vários Voxel de uma só vez para, por este meio, reduzir o longo tempo que demorava a inspeção usando o método Voxel. O princípio da construção é mostrado na FIGURA 4.2.4 em forma de um corte transversal por meio da disposição do retroespalhamento Compton (COMSCAN). O corpo de prova (B) está disposto sobre uma mesa porta-objeto (OT). A radiação de frenamento, que é gerada no tubo de raios X, passa pelos colimadores, compostos por uma placa de chumbo (LS) e uma abertura com colimadores (RA), de forma que no corpo de prova (B) entre um feixe colimado de 1 mm x 1 mm.

As radiações espalhadas ao longo do trajeto do raio primário (PB) têm que passar pela abertura dos colimadores (SC) antes de chegar ao arranjo dos detectores de radiação (S) e neles serão medidos.

No exemplo apresentado, o arranjo compõe-se de 32 pares de detectores. Na forma apre-

Como método linear, foi desenvolvido por HARDING e ROYE um método que permite medir vários Voxel de uma só vez para, por este meio, reduzir o longo tempo que demorava a inspeção usando o método Voxel. O princípio da construção é mostrado na FIGURA 4.2.4 em forma de um corte transversal por meio da disposição do retroespalhamento Compton (COMSCAN). O corpo de prova (B) está disposto sobre uma mesa porta-objeto (OT). A radiação de frenamento, que é gerada no tubo de raios X, passa pelos colimadores, compostos por uma placa de chumbo (LS) e uma abertura com colimadores (RA), de forma que no corpo de prova (B) entre um feixe colimado de 1 mm x 1 mm.

4.2 MÉTODO DE RETRODIFUSÃO

sentada, podem ser medidos simultaneamente 32 Voxels. Pode-se examinar completa e tridimensionalmente, quando se moverem simultaneamente, um corpo e ao mesmo nível os tubos e o arranjo de detectores, e este nível faz um ângulo reto com o eixo do raio primário. Na FIGURA 4.2.5, mostramos a construção mecânica de um SISTEMA COM-SCAN. No modelo apresentado, foram instalados um tubo de raios X de 160 KV (3 KW), como fonte de radiação, e 22 detectores de cintilação. Por meio de uma entrada especial do feixe em um corpo cilíndrico com aberturas em espiral, pode-se proceder a uma análise simples do corpo de prova por meio de rotação. Por meio da geometria da entrada do feixe, é dada a espessura possível de inspeção calculada a partir da superfície. O modelo padrão tem uma zona de 0 - 10 mm. Também é possível proceder ao exame de espessuras mais grossas (até aprox. 50 mm).

O nível detecção é uma aplicação lógica mais vasta do método linear. É necessário haver um ordenamento plano de detectores bidimensionais. O princípio da construção é mostrado na FIGURA 4.2.6.

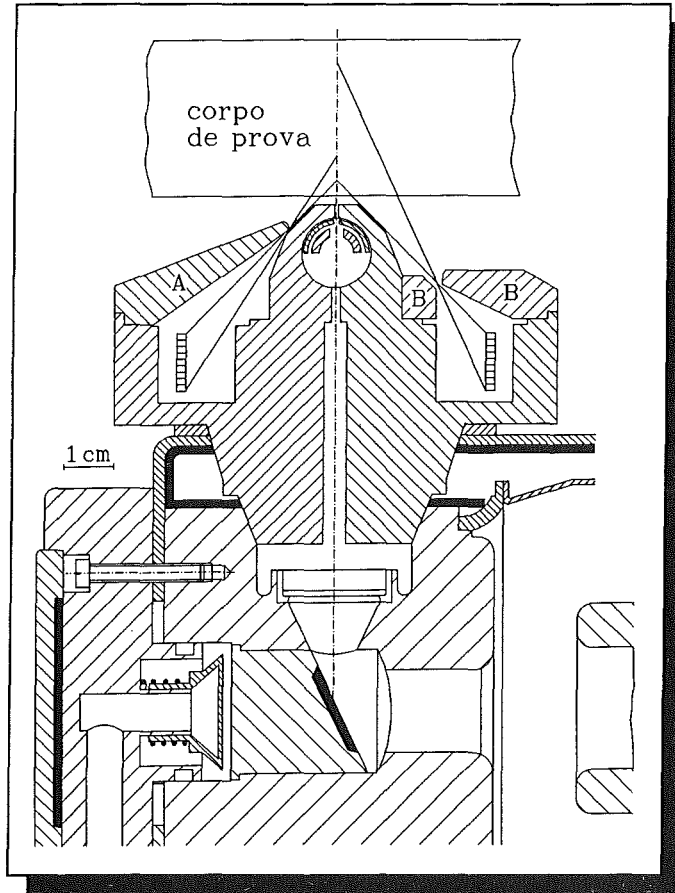


FIGURA 4.2.5: CONSTRUÇÃO MECÂNICA DE UM SISTEMA DE COMSCAN (SEGUNDO ROYE)

A radiação da fonte passa por um colimador com aberturas de forma que um feixe de raios incida sobre o corpo de prova. Da radiação espalhada, só é utilizada a parte que chega a um colimador (diâmetro do furo de cerca de 1 mm). Um conversor de imagem colocado por trás do colimador permite registrar a divisão do material ao nível irradiação. Para proceder a uma análise completa, move-se o corpo de prova através do feixe de raios (perpendicularmente à direção dos raios).

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

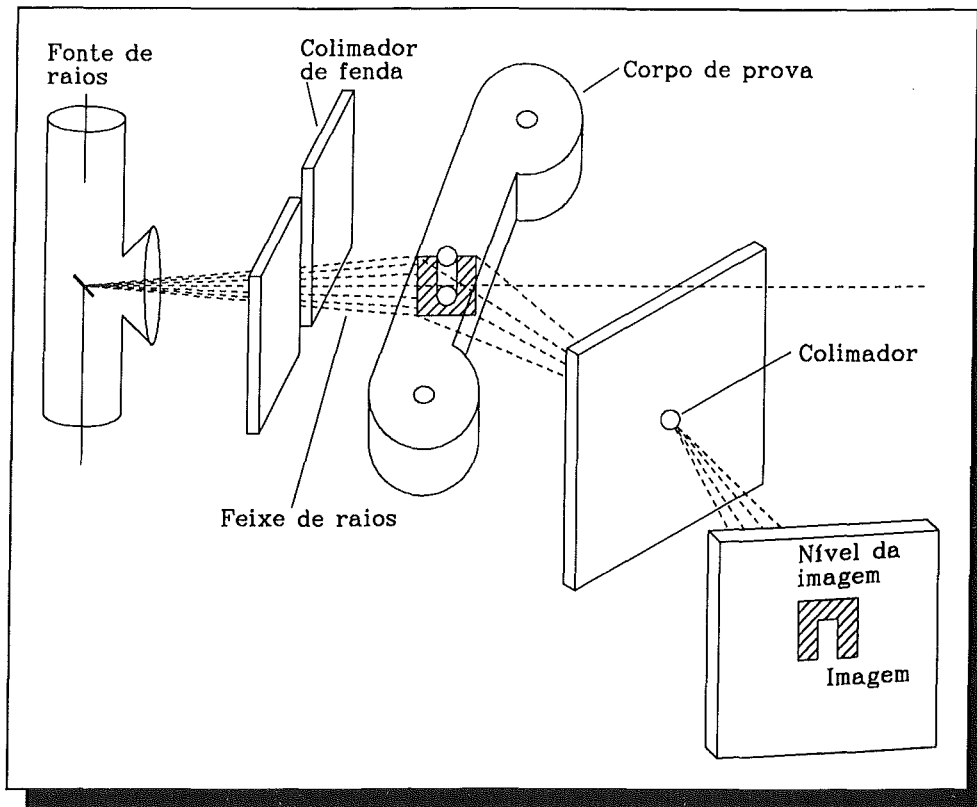


FIGURA 4.2.6: SISTEMA PLANO DE DETECÇÃO

4.2.2 TOMOGRAFIA COMPUTORIZADA POR RETROESPALHAMENTO

A *tomografia computadorizada por retroespalhamento* é um outro desenvolvimento consequente dos passos tratados no método anteriormente explicado. O modo de trabalho do processo tomográfico será tratado mais detalhadamente no capítulo 6, ítem 6.4. Assim, trataremos aqui somente sumariamente deste método. Para explicar melhor, temos a FIGURA 4.2.7. O que se torna necessário é um feixe colimado com dimensões como as que foram utilizadas nas disposições apresentadas nas FIGURA 4.2.3 e 4.2.4. A radiação espalhada criada por este feixe primário no corpo de prova é medida por um arranjo de detectores, o qual deve detectar o máximo possível de radiação espalhada e, então, pode-se processá-la. Para se obter um registro tomográfico completo de forma a interpretar tridimensionalmente o defeito, é necessário um movimento de rotação e translação do corpo de prova (ver capítulo 6.4).

4.2 MÉTODO DE RETRODIFUSÃO

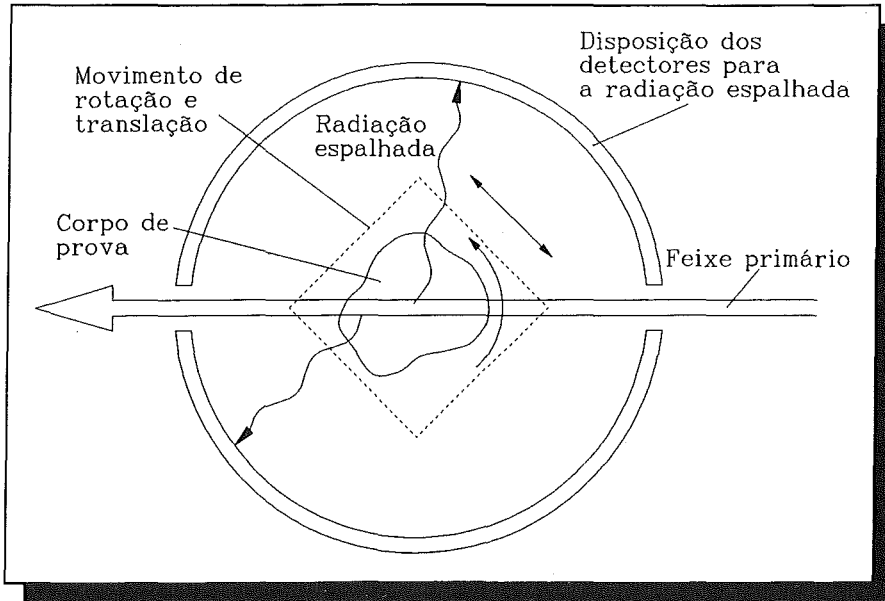


FIGURA 4.2.7: TOMOGRAFIA COMPUTORIZADA POR RETROESPALHAMENTO

A vantagem desta técnica é que não é necessário utilizar nenhum colimador. Esta técnica é especialmente boa de se aplicar quando a dimensão do corpo de prova na espessura de meio-valor (comparar capítulo 3.2) do material a ensaiar for menor, pois que então a atenuação no corpo de prova não é muito grande.

4.2.3 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Os campos de aplicação do método de retroespalhamento são vários. Apresentamos aqui alguns exemplos:

O exame de costuras de solda a topo de alumínio foi realizado por W. ROYE com um aparelho de Comscan. O material tinha 4 mm de espessura e foram utilizados 22 detectores para capturar a radiação espalhada. Na imagem tratada da radiação, são visíveis os defeitos de solda, os quais aparecem como faixas. Devido à boa decomposição local e dos sinais dos detectores amplamente independentes uns dos outros, a detecção dos defeitos é muito mais fácil do que nas radiografias de transmissão, nas quais muitas vezes há uma sobreposição de costuras de solda e nas quais surgem defeitos na imagem. Além disso, é possível, fazer um relatório sobre a profundidade a que se encontra o defeito usando este método de retroespalhamento, o que no método de transmissão não se consegue fazer sem muito trabalho (tomografia). Um segundo exemplo de W. ROYE, e que também foi examinado com um aparelho de Comscan, foram materiais compostos reforçados com fibras de carbono, os quais são difíceis de examinar tanto pelo método de transmissão como por ultrassom. Com o método de retroespalhamento, são facilmente reconhecíveis delaminações como faixas que aparecem na imagem da radiação.

A verificação de corrosão em tubos de aço, nos quais se procedeu o isolamento térmico, foi

4 MÉTODO DE DIFRAÇÃO E DE RETROESPALHAMENTO

realizada por W. L. ANDERSON, P. S. ONG e B. D. COOK com um aparelho de Comscan. Isto é um problema que surge principalmente em sistemas ligados à petroquímica e à técnica de aquecimento. Dado que o material de isolamento térmico tem uma pequena densidade e, por isso, possui também um pequeno coeficiente de atenuação, podem ser analisados sem grandes problemas materiais com maior espessura, como água no material de isolamento, ou a espessura do aço dos tubos. A presença de água ou de outros fluidos no isolamento é normalmente sinal de que os tubos estão altamente corroídos. As experiências mostram que a umidade no material de isolamento pode ser provada e que ainda são claramente detectáveis sinais de retroespalhamento dos tubos de aço com uma camada de corrosão de 3 a 4 mm, embora a tensão do tubo de raios-x é de, no máximo, 160 KV. Tensões mais altas seriam ainda mais vantajosas.

A aplicação do método de retroespalhamento no ensaio subaquático de elementos na técnica de offshore também foi analisada, porque há dois motivos para preferir esta técnica:

- (1) a acessibilidade, que muitas vezes só é possível por um lado;
- (2) a camada existente na estrutura "offshore", que não impede substancialmente o ensaio neste caso.

Por este motivo, foi elaborado por B. BRIDGE um estudo sobre a sua possibilidade de realização, o qual mostrou que a técnica tem boas possibilidades de aplicação. Ensaio experimentais relativos a este tema foram realizados também por D. STEGEMANN, J. RUNKEL, J. FIEDLER, B. NEUNDORF e H. OSTERMEYER. Como aparelho de demonstração do retroespalhamento, foram utilizados quatro detectores de cintilação NaI. A utilização da tomografia por retroespalhamento fez-se em chapas de aço de "offshore", com defeitos definidos introduzidos anteriormente, os quais correspondiam a estruturas de offshore. Os cortes tomográficos foram registrados em zona profunda de 1 a 10 mm e mostraram uma boa possibilidade de detecção dos defeitos, previamente provocados.

A variedade de possibilidades de aplicação do método de retroespalhamento também foi demonstrada num outro exemplo por W. NIEMANN e W. ROYE, onde se inclui a arqueologia e na restauração de monumentos. No campo da restauração de monumentos foi analisada sem a danificar uma escultura de um altar, de madeira, esculpida entre os anos de 1618 e 1629, pois se notavam nela sinais de danificação devido a vermes e coleópteros. As estruturas dos buracos na madeira eram claramente visíveis com a ajuda da técnica de retrodifusão, uma vez que neste método o contraste de imagem se forma pelas diferenças locais dos coeficientes de difusão, as quais, por seu lado, são proporcionais à densidade. Isto trás para a problemática que estamos tratando uma clara vantagem sobre o método de transmissão. Também na arqueologia o método de retrodifusão tem boas possibilidades de aplicação, pois que antes de se começar a fazer escavações é necessário verificar de um lado se há objetos especiais enterrados no solo (pontas de seta, ossos) para assim poder pôr só a descoberto rapidamente os objetos que sejam de interesse.

5 FONTES DE RADIAÇÃO

Neste capítulo, vão ser tratadas a instalação e as propriedades características das fontes de radiação que são usadas para realizar ensaios com raios penetrantes. Em primeiro lugar, vamos tratar das fontes de radiação que emitem raios X e, no final do capítulo, das fontes radioativas de raios gama.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

Na técnica de microfoco, o objetivo é melhorar a qualidade da imagem por meio de um foco de raios X tão pequeno quanto possível. Como no tratamento da imagem das radiações mostrado no capítulo 3.5, o tamanho do foco de raios X é determinante para a desfocagem geométrica e, assim, para a qualidade da imagem. Quanto menor for o foco de raio X, tanto menor será a desfocagem geométrica e também melhor será a qualidade da imagem. Por este motivo, o objetivo é obter no equipamento de microfoco, o diâmetro do foco de raios X na ordem dos micrômetros.

5.1.1 INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

Para obter diâmetros muito pequenos do foco de raios X, é necessária uma série de condições técnicas interligadas que só podem ser conseguidas por meio de elementos especiais.

CANHÃO DE ELÉTRONS

O canhão de elétrons serve para gerar elétrons livres e acelerados (corrente de elétrons), que por fim ainda terão que ser focalizados. Um esquema do princípio deste aparelho está representado na FIGURA 5.1.1, contendo o esquema da aceleração dos elétrons. A aceleração processa-se por meio de um campo elétrico que fica situado entre o cátodo e o ânodo. A sua forma está esquematizada na figura verticalmente às linhas do campo cujo trajeto acompanha as linhas equipotenciais, e é formada pela geometria do cátodo, pela placa reticulada (cilindro de Wehnelt) e pelo ânodo. O cátodo encontra-se normalmente com potencial negativo em relação ao ânodo, de forma que os elétrons são acelerados em direção ao ânodo. Durante esta operação, estes passam pela abertura da placa reticulada, cujo potencial elétrico pode ser alterado. No caso de potencial negativo, no que diz respeito ao cátodo, a corrente de elétrons pode ser interrompida ao passar do cátodo para o ânodo. Além disso, a forma do campo elétrico, que pode ser influenciada pelo potencial da placa reticulada, faz com que se faça uma focalização dos elétrons. A posição e qualidade do ponto de intersecção

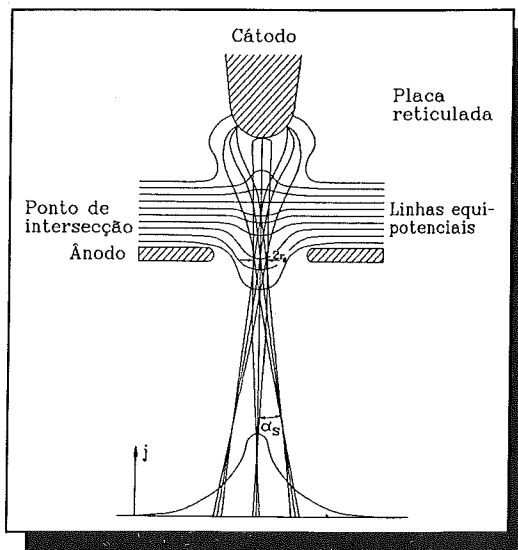


FIGURA 5.1.1: CANHÃO DE ELÉTRONS

representado na figura podem assim ser ajustadas por meio dos potenciais. Os valores típicos do diâmetro da zona de intersecção são da ordem de grandeza de 10 a 100 micrômetros.

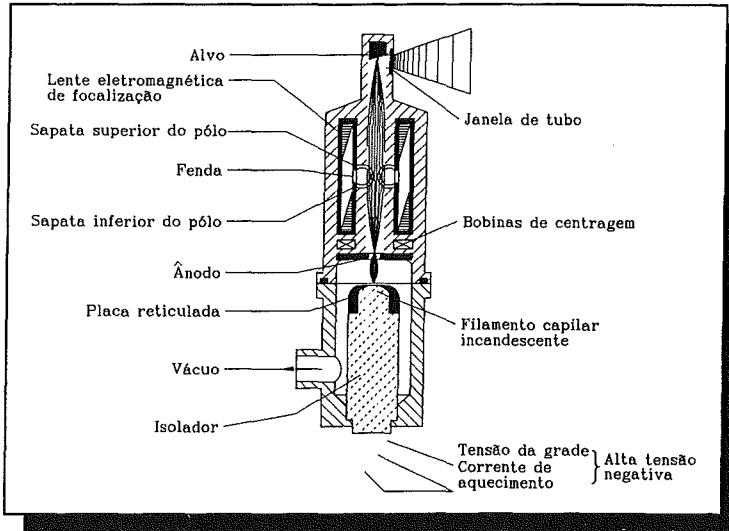


FIGURA 5.1.2: CONSTRUÇÃO DE UM TUBO DE MICROFOCO

Para que se consiga uma focalização muito boa, o que é determinante para obter um pequeno diâmetro do foco de raios X, é necessário tomar uma série de medidas, que estão representadas na FIGURA 5.1.2.

FILAMENTO INCANDESCENTE.

Uma condição essencial para uma boa focalização é ter um diâmetro tão pequeno quanto possível da fonte de

emissão de elétrons. Por este motivo, são colocados filamentos incandescentes extremamente finos na placa reticulada que podem ser substituídos. O finíssimo filamento incandescente é aquecido por uma corrente elétrica, através da qual se processa a emissão de elétrons. O processo total da emissão e da focalização faz-se em alto vácuo. Dado que os filamentos incandescentes têm que ser substituídos de tempos em tempos, o sistema de alto vácuo é um sistema aberto que pode ser ventilado.

LENTE ELETROMAGNÉTICA

Logo que saem dos filamentos incandescentes, os elétrons, como já ficou anteriormente descrito, são acelerados e direcionados através do campo elétrico. Para continuar o processo de focalização, é importante que os elétrons possuam uma energia tão uniforme quanto possível, após atravessarem o ânodo, pois o processo eletromagnético de focalização terá que ser ajustado pela velocidade do mesmo tipo dos elétrons, para que se consigam formar manchas de queimadura tão nítidas quanto possível.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

A focalização dos elétrons se faz por meio de uma lente eletromagnética. A sua execução necessita de cuidados especiais para evitar defeitos na imagem, especialmente aberrações esféricas. O modo correto de funcionamento da lente eletromagnética é determinante para a capacidade de decomposição e para a qualidade do foco de raios X de todo o equipamento. Por este motivo, é preciso dar uma atenção especial aos seguintes pontos, relativos à qualidade de um tubo de microfoco:

- Tensão de aceleração estável e filtrada (para gerar tanto quanto possível elétrons monoenergéticos) e um elemento de ligação à rede de tensão contínua estabilizado e filtrado para a lente eletromagnética de focalização.
- Grande precisão mecânica na fabricação, boa montagem e ajuste dos componentes do tubo.
- Controle da instalação correta do feixe eletrônico por um sistema eletro-óptico de imagem.

Por causa da alta carga térmica local do alvo no foco de raios X, é necessário um resfriamento do alvo. Para proteção contra super-aquecimento das juntas do aparelho de vácuo na zona da cabeça de aço, pode-se usar uma refrigeração à água.

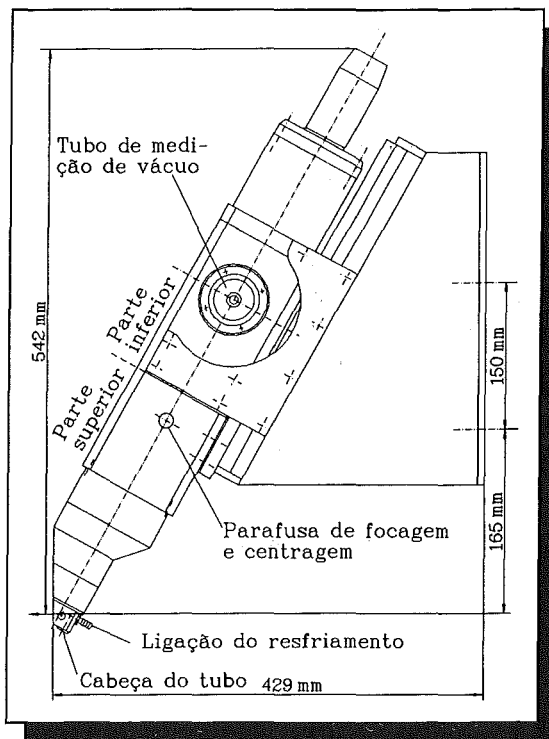


FIGURA 5.1.3: CONSTRUÇÃO MECÂNICA DE UM TUBO DE MICROFOCO (FONTE FEIN FOCUS)

A construção mecânica de um tubo de microfoco com uma tensão de operação de 160 KV está esquematicamente representada na FIGURA 5.1.3. A cabeça do tubo contém o alvo e a ligação para a refrigeração do alvo, assim como a janela de saída dos raios. A cabeça do tubo pode ser móvel e, em seu lugar, pode ser colocado, por exemplo, um ânodo de barra que permita introduzir o alvo no elemento de prova.

A caixa composta de uma parte superior e uma inferior pode ser aberta.

5 FONTES DE RADIAÇÃO

A parte superior contém o ânodo, a faixa de aceleração, a lente de focalização eletromagnética e a cabeça do tubo. A parte inferior contém principalmente a ligação para a bomba turbomolecular de alto vácuo diretamente montada e o aparelho de medição do vácuo assim como ligações para alta tensão.

5.1.2 DADOS TÉCNICOS

Os tubos de microfoco, atualmente, possuem mais ou menos os seguintes dados técnicos:

Tensão de aceleração:	5 a 200 KV
Corrente de elétrons:	0 a 1,5 mA
Diâmetro do foco de raios X (regulável):	3 a 100 micrômetros
Alvo rotativo, materiais:	W, Al, Fe, Cu, Ti, Mo

Devido ao pequeno diâmetro do foco de raios X, a potência térmica específica para a área no foco de raios X é muito alta, o que obriga a estabelecer limites à capacidade de carga do alvo. Sem limitação pode suceder que, devido à temperatura muito alta, aconteça uma vaporização do metal do alvo.

Como no tratamento das radiações emitidas pelos raios X apresentado no capítulo 2.2, só são convertidas pequenas percentagens de potência do feixe eletrônico na radiação, de forma que quase tudo é convertido em potência calorífica, o que é essencial para a capacidade de carga do alvo. Se U for a tensão de aceleração e I a corrente de elétrons do tubo, então teremos a seguinte potência do feixe eletrônico:

$$P_e = U \cdot I \quad (5.1.1)$$

Se r é o raio do foco de raios X, então teremos na superfície do foco de raios X uma potência específica para a área de

$$p_e = \frac{U \cdot I}{\pi r^2} \quad (5.1.2)$$

Se, por motivos de simplificação, aceitarmos que a potência total do feixe eletrônico é convertida em potência calorífica, então é possível calcular facilmente a carga térmica do alvo.

EXEMPLO: Para uma tensão de operação de $U = 160$ KV e com uma corrente no tubo de $I = 1,0$ mA, a potência térmica convertida é, segundo a fórmula (5.1.1), $P_e = 160$ Watts. Se o raio do foco de raios X é de 5 micrômetros, então isso origina uma superfície do foco de raios X de $78,5 \mu\text{m}^2$ e uma potência específica para a área no alvo de cerca de $2 \cdot 10^6 \text{W}/\text{mm}^2$.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

Para um trabalho econômico e seguro do equipamento, é importante saber qual a potência térmica específica para a superfície que o material do alvo suporta. Um material com alta temperatura de fusão e boa condutibilidade térmica traz vantagens, pois a potência térmica tem que ser transportada por condutores térmicos. A teoria da condução térmica a partir de pequenos volumes afirma que o produto da potência específica da superfície e do diâmetro do foco de raios X é constante. Este resultado é importante para a técnica de microfoco, pois, por meio dele e selecionando acertadamente o material do alvo, pode-se trabalhar com potências suficientes da radiação de elétrons. Como materiais para o alvo, são apropriados especialmente o tungstênio

(W), o molibdênio (Mo) e o titânio (Ti). Dado que o diâmetro do foco de raios X é regulável, é importante a potência máxima permitida $P_{e \max}$ do tubo com a qual o alvo pode ser esforçado sem problemas. Na FIGURA 5.1.4, está registrado $P_{e \max}$ em função do diâmetro do foco de raios X para os três materiais do alvo, tungstênio, molibdênio e titânio. Quanto menor for o diâmetro do foco de raios X, tanto menor será também a potência máxima permitida do tubo de microfoco. O tungstênio é o material que aguenta cargas maiores.

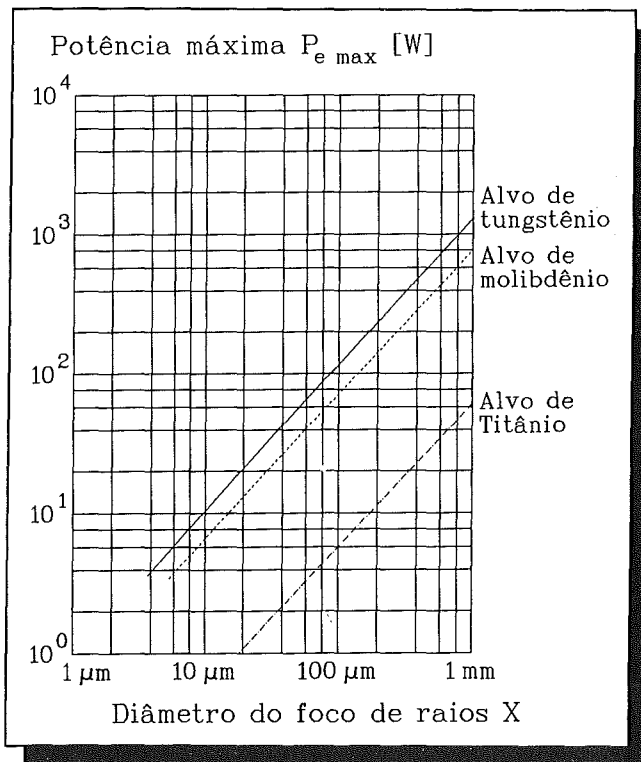


FIGURA 5.1.4: CAPACIDADE DE CARGA DO ALVO

EXEMPLO: Temos um tubo de microfoco que trabalha com uma tensão de aceleração de 160 KV e um alvo de tungstênio, se for usado um diâmetro do foco de raios X de 10 micrômetros, então teremos, de acordo com a FIGURA 5.1.4, a potência máxima relativa a 10 Watts. Isto significa que, com uma tensão de serviço de 160 KV, a corrente no tubo terá que ser limitada a 0,06 mA, isto é a de $60 \mu\text{A}$.

Para evitar desde o início uma sobrecarga do alvo durante o serviço, efetua-se automaticamente uma limitação da potência por meio de uma unidade do equipamento.

5 FONTES DE RADIAÇÃO

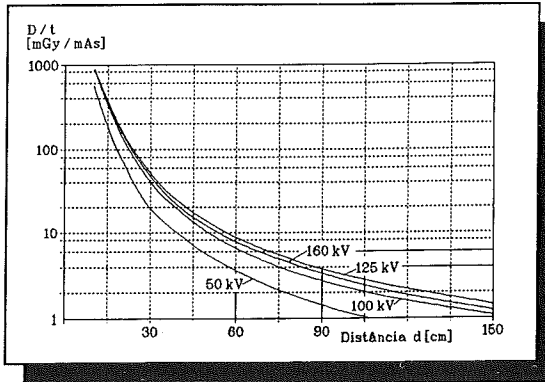


FIGURA 5.1.5: TAXA ESPECÍFICA DA DOSE (FONTE FEINFOCUS)

A relação entre a potência do tubo [W] e a taxa de dose de radiação [Gy/h] é importante para a radiografia e para a proteção radiológica. Na FIGURA 5.1.5, está apresentada a potência do tubo, referente à taxa específica da dose [mGy/mA·s] como função da distância do alvo, para um equipamento de microfoco com uma tensão de operação de 150 KV e um alvo de tungstênio. A taxa específica da dose não depende muito da tensão de operação.

EXEMPLO: Se um equipamento de microfoco for operado com uma tensão de operação de 100 KV e uma corrente de 1 mA, então teremos, a 50 cm de distância do alvo, uma taxa de dose de cerca de 10 mGy/s.

5.1.3 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS

No equipamento de microfoco de raios X trata-se, regra geral, no que diz respeito ao vácuo, de sistemas que podem ser refrigerados (sistemas abertos). Outros sistemas de raios X são sistemas fechados nos quais o tubo de raios X é fundido para que eles sejam blindados.

Este sistema aberto, evacuado com uma bomba de alto vácuo (bomba turbomolecular), é necessário, pois os finos filamentos incandescentes têm que ser substituídos em determinados intervalos de tempo. As soluções de construção existentes permitem uma substituição simples e rápida de forma que, no que diz respeito a operação, a substituição não traga qualquer problema. Uma vantagem essencial do sistema aberto é que a cabeça do tubo (ver FIGURA 5.1.3), na qual se encontra o alvo, pode ser substituída por um ÂNODO DE BARRA. Um ânodo de barra, que possui comprimentos superiores a 1 metro, tem no seu terminal o alvo de forma que o carvão, no qual é formada a radiação de raios X, seja introduzido dentro do corpo de prova. Em muitos casos, isto abre novas possibilidades de aplicação, como por exemplo nas turbinas de propulsão dos aviões. Ao se utilizar ânodos de barra, tem que ser feitos descontos quanto ao tamanho do foco de raios X e da potência.

O PEQUENO DIÂMETRO DO FOCO DE RAIOS X é uma outra característica essencial da técnica de microfoco. As vantagens que daí advêm para a representação da radiação foram tratadas no capítulo 3.5.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

Merecem menção especial:

- As possibilidades de ampliação da imagem
Por meio de um pequeno foco de raios X e da desfocagem daí resultante, é possível efetuar uma ampliação da imagem com fatores de ampliação de até 100 vezes ou mais. Isto é então de importância decisiva caso o defeito que se pretende encontrar e a estrutura a analisar forem muito pequenos. Isto é o caso, por exemplo, da microeletrônica ou da micromecânica. Tais casos de aplicação são tratados no capítulo 7.

- Redução do fator de acréscimo da dose.
O fator de acréscimo da dose fornece a relação entre a radiação secundária e a radiação primária. (ver Capítulo 3.2.5). Dado que a radiação secundária, ao contrário da radiação primária, não contém qualquer informação sobre o defeito na peça a ensaiar, esta piora o contraste e, com isso, a qualidade da imagem.

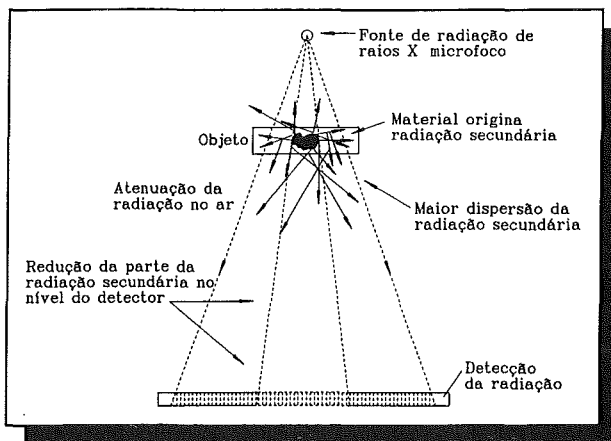


FIGURA 5.1.6: DIMINUIÇÃO DO FATOR DE ACRÉSCIMO DA DOSE

A possibilidade, utilizando a técnica de microfoco, de colocar o objeto entre a fonte de radiação e o detector influencia também o fator de acréscimo da dose através da radiação secundária que atinge o detector. As relações estão esquematizadas na FIGURA 5.1.6. Quanto mais afastado estiver o objeto do detector, tanto menor será a porção de radiação secundária que atinge o detector. Com isto, o fator de acréscimo da dose será respectivamente menor. Isto deve-se ao fato de que a radiação secundária gerada no corpo da prova, devido ao grande afastamento do detector, também sofre uma maior dispersão e, por outro lado, que a radiação secundária é mais fortemente absorvida ao longo do trajeto até o detector do que a radiação primária, uma vez que é de baixa energia. Um fator de acréscimo da dose mais baixo melhora, segundo a relação (3.5.11), o contraste da imagem e, com isso, também a qualidade da imagem.

- Melhoramento da qualidade da imagem.
O melhoramento da qualidade da imagem por redução da desfocagem geométrica e do fator de acréscimo da dose exprime-se também em números mais altos de qualidade da imagem. A qualidade da imagem e a sua representação numérica por meio do número da qualidade da imagem é tratada no capítulo 3.5.5.

5.1.4 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DO FOCO DE RAIOS X

Devido à importância do tamanho do foco de raios X relativamente à qualidade da imagem e ao funcionamento do equipamento, o seu conhecimento tem enorme interesse. Há várias maneiras de se determinar o tamanho, das quais vamos apresentar aqui algumas a seguir.

MÉTODO DO FIO

Com um aparelho de radioscopia em tempo real, o tamanho do foco de raios X pode ser determinado simples e rapidamente com a ajuda de fios de diâmetros diversos. Isto é sobretudo importante para a proteção do alvo contra sobrecargas térmicas, uma vez que, para isso, como mostra a FIGURA 5.1.4, é necessário o conhecimento do diâmetro do foco de raios X. Este processo é explicado com a ajuda da FIGURA 5.1.7. O corpo de prova compõe-se de uma grade de fios finos, de preferência de tungstênio, com espessuras que vão de 0,1 mm até 8 μm . Se considerarmos o caso A na FIGURA 5.1.7, então o tamanho da imagem H_A do fio com um diâmetro Φ_D composto pela superfície Φ_{SCH} com sombras profundas e a zona limite de desfocagem com ela, US_g , de ambos os lados.

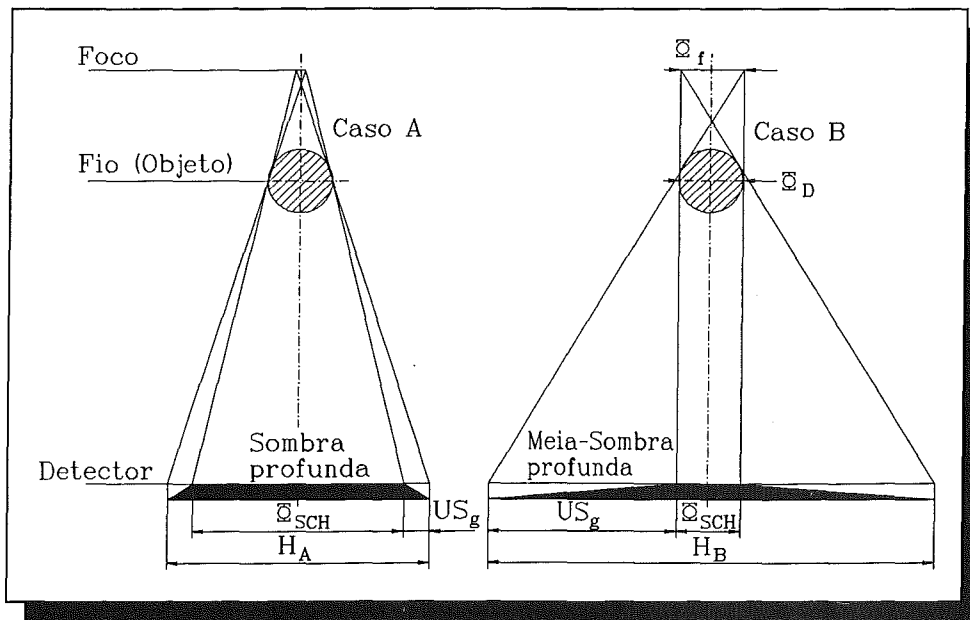


FIGURA 5.1.7: MÉTODO DO FIO

A zona Φ_{SCH} é dominante quando o tamanho do foco de raios X Φ_f é muito menor que o diâmetro do objeto Φ_D . Agora, somente são representados aumentados os fios (ver capítulo 3.5.2) e é regulado no ecrã um fator de ampliação $V \geq 100$ para a representação no monitor. Além disso, o foco de raios X é aumentado até um valor no qual o contraste da sombra profunda logo desaparece e surge a imagem de meia-sombra como está esquematizado para o caso B na FIGURA 5.1.7.

Neste estado, aplica-se que o tamanho do foco de raios X tem que ser igual ao diâmetro do

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

fio quando a meia-sombra tem o dobro da largura do objeto aumentado, o qual anteriormente tinha sido representado com grande nitidez no caso A. Este fato terá que ser explicado por meio da seguinte dedução.

Em geral, aplica-se para o tamanho da imagem a relação:

$$H = \Phi_{SCH} + 2 US_g \quad (5.1.3)$$

Se, de acordo com a relação (3.5.4), for expressa a desfocagem geométrica pelo tamanho do foco de raios X e pelo fator de ampliação, então teremos

$$H = \Phi_{SCH} + 2 \Phi_f (V - 1) \quad (5.1.4)$$

Agora, aceitando que, como para o caso B,

$$V \gg 1$$

$$\Phi_f = \Phi_D = \Phi_{SCH}$$

então teremos,

$$\Phi_{SCH} \ll US_g$$

Daí resulta para a relação (5.1.4),

$$H_B \approx 2 \Phi_f (V - 1) \quad (5.1.5)$$

ou

$$H_B \approx 2 V \Phi_D \quad (5.1.6)$$

Dado que o diâmetro do fio é conhecido, e que o fator de ampliação é determinável pela disposição geométrica, pode assim ser determinado a tamanho do foco de raios X.

O tamanho do foco de raios X é regulado por meio da corrente de focalização da lente eletromagnética, em consequência disto, se o processo descrito for repetido com diferentes espessuras do fio e com correntes de focalização diferentes então é possível representar o

5 FONTES DE RADIAÇÃO

tamanho do foco de raios X por meio da corrente de focalização, assim como é mostrado na FIGURA 5.1.8. Com isto é possível então garantir um controle da sobrecarga do alvo. Para uma interpretação um pouco mais precisa, pode conectar-se o sinal vídeo do conversor de imagem a um a sensor de TV e um osciloscópio.

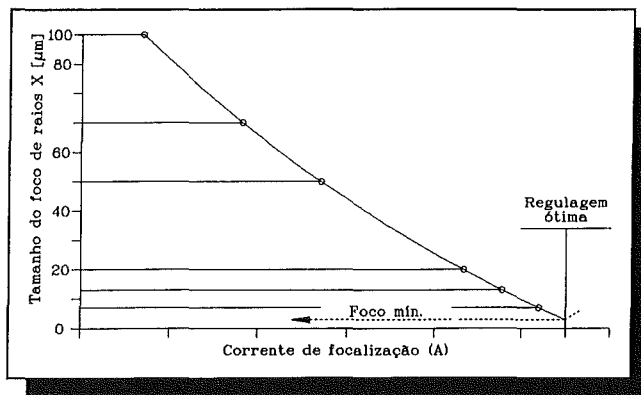


FIGURA 5.1.8: REGULAGEM DO TAMANHO DO FOCO DE RAIOS X

A FIGURA 5.1.9 mostra duas representações de perfis de contraste de um fio de uma espessura de $100\mu\text{m}$. À esquerda na FIGURA 5.1.9 está representado o caso de uma boa focalização (correspondendo ao caso A da FIGURA 5.1.8) e a direita o caso no qual o diâmetro do fio corresponde ao diâmetro do foco de raios X (caso B da FIGURA 5.1.8). É claramente visível a zona de penumbra.

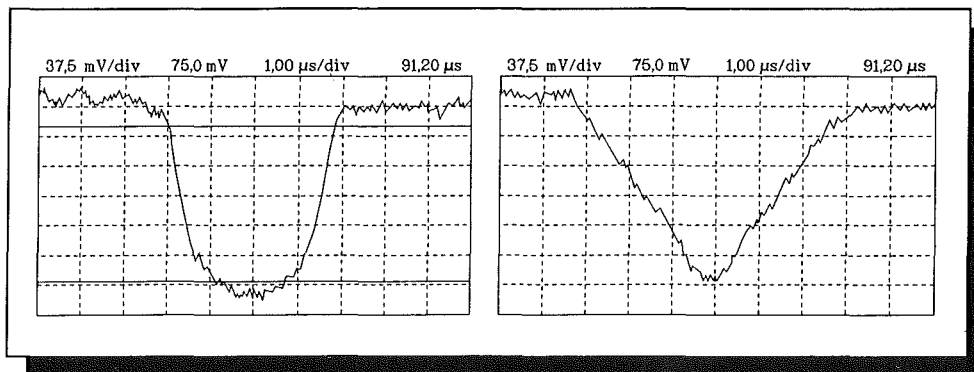


FIGURA 5.1.9: FIO - CONTRASTE - PERFIL

MÉTODO DA DESFOCAGEM

Em imagens radiográficas estáticas, a desfocagem total da imagem é dada pela desfocagem geométrica US_g e a desfocagem interna US_i como foi tratado no capítulo 3.5.3. Se a desfocagem interna do filme é pequena em relação à desfocagem geométrica, então a desfocagem total é dada pela desfocagem geométrica ($US_g = US$). Para este caso a relação

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

(3.5.4) é

$$US_i = US_g = \Phi_f (V - 1) \quad (5.1.7)$$

Se o factor de ampliação V é conhecido, então o tamanho do foco pode ser determinado por meio da determinação da desfocagem US_g . Para a determinação da desfocagem e para a qualidade da imagem utilizando tubos de microfoco, são adequadas as máscaras litográficas de ouro, como é mostrado na FIGURA 5.1.10. A máscara contém uma série de estruturas de ouro de arestas agudas com diversas distâncias entre os pares de linhas (LP). A espessura da camada de ouro é de 1 micrômetro.

Esta espessura da camada fornece um contraste suficiente para determinar a desfocagem, quando, p. ex., o quadrado central com 130 micrômetros de comprimento das arestas é usado para proceder à medição. O resultado de sua medição é mostrado na FIGURA 5.1.11. Foi usado um filme com uma pequena desfocagem interna de forma que se possa aplicar a condição acima indicada

$$US_i \ll US_g.$$

O fator geométrico de ampliação foi regulado para $V = 445$.

O perfil da densidade óptica foi registrado com a ajuda de um micro-densitômetro. A desfocagem medida foi de 1,67 mm. O tamanho do foco de raios X calculado é de 3,8 micrômetros. Isto coincide perfeitamente com as medições que foram feitas com uma folha de tungstênio de arestas agudas de 20 μm de espessura e um fio de tungstênio com o mesmo diâmetro, segundo o método do fio.

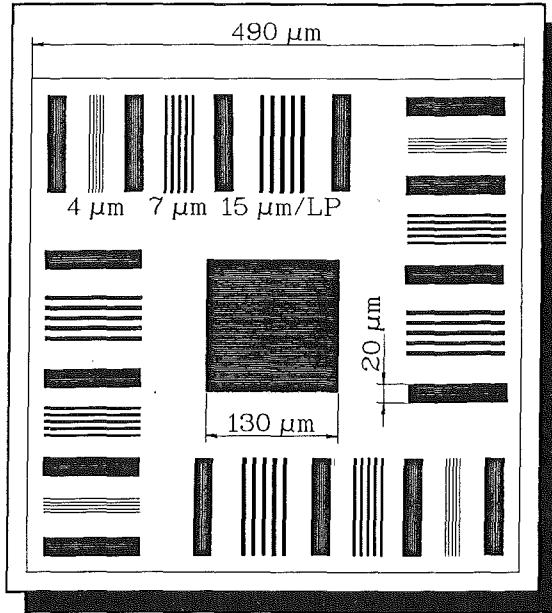


FIGURA 5.1.10: MÁSCARA DE OURO

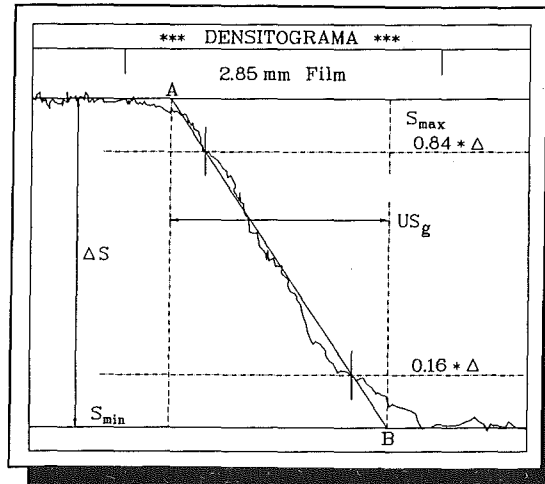


FIGURA 5.1.11: PERFIL DA DENSIDADE ÓPTICA

FUNÇÃO DE TRANSMISSÃO DE MODULAÇÃO

Com a ajuda de uma função de transmissão de modulação, também pode ser determinado o tamanho do foco de raios X. Antes de se utilizar este método para determinar os tamanhos, teremos que explicar, de uma maneira geral, qual o sentido e o objetivo da função de transmissão da modulação.

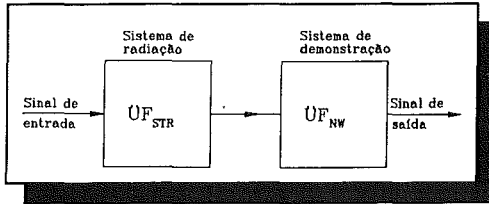


FIGURA 5.1.12: SISTEMA RADIOGRÁFICO DE TRANSMISSÃO

Para caracterizar o sistema radiográfico, foram introduzidos termos como desfocagem geométrica, desfocagem interna, contraste e ruído de fundo da imagem, os quais permitem proceder a uma caracterização das partes do sistema, como da fonte de radiação, detector, etc. O sistema como um todo não pode ser representado muito bem usando estas grandezas. Por isso é aconselhável, assim como é usado na eletrotécnica, caracterizar também os

sistemas radiográficos pelas funções de transmissão. O sistema radiográfico pode, por ex., ser representado por dois sistemas parciais, como mostra a FIGURA 5.1.12. Esta representação é plenamente justificável, pois, no sistema, o processo é a transmissão da imagem. O sinal de entrada é gerado pela detecção da radiação transmitida através do objeto a examinar, e o sinal de saída é a imagem obtida no filme ou no ecran. Todo o equipamento pode, desta forma, ser designado por sistema de transmissão de imagem.

As funções de transmissão dos sistemas parciais recebem as características próprias do sistema parcial. No sistema de radiações, portanto, a forma geométrica da disposição usada no teste com a fonte de radiação, possui como propriedade característica, p. ex., a desfocagem geométrica, que terá que estar contida em $\check{U}F_{STR}$ e o sistema detector tem como propriedade característica, p. ex., a desfocagem interna, ruído de fundo na imagem, etc., o que pode ser representado pelas funções de transmissão $\check{U}F_{NW}$. As funções de transmissão, nesse caso, serão representadas pela assim chamada "frequência espacial" f . Esta frequência espacial foi introduzida por analogia com a frequência normal e a sua unidade é dada em linhas (da respetiva imagem) por milímetro.

Como a função de transmissão se forma em geral da relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada, segundo as regras, aplica-se em geral para as funções de transmissão:

$$\frac{\text{SINAL DE SAÍDA}}{\text{SINAL DE ENTRADA}} = |\check{U}F_{STR}(f)|^2 \times |\check{U}F_{NW}(f)|^2 = M^2 \cdot (f) \quad (5.1.8)$$

Cada sinal de entrada do sistema pode ser representado por meio da transformação de Fourier como sobreposição de curvas senoidais de amplitudes e frequências diversas. Por meio da curva de resposta da frequência da função de transmissão, pode-se representar muito bem quais as características que o sistema possui para o sinal de entrada em relação à frequência, isto é, em outras palavras, quais as frequências que podem ser desprezadas. Isto também se aplica para amplitudes e fases.

5.1 EQUIPAMENTOS DE MICROFOCO

Para caracterizar os sistemas radiográficos usa-se, especialmente uma FUNÇÃO DE TRANSMISSÃO DE MODULAÇÃO.

Isto pode acontecer da seguinte maneira: É usado um corpo de prova constituído por uma série de barras de arestas bem definidas, colocadas a distâncias iguais, assim como está esquematizado na FIGURA 5.1.13. Por baixo deste corpo de prova, é colocado um filme que é exposto à radiação. No caso ideal, resultaria um perfil da densidade óptica designado por A. Através do corpo de prova, ocorreria uma perfeita MODULAÇÃO M da densidade óptica. A transmissão do sistema de radiação é registrada como perfeita em A, o que significaria que a desfocagem geométrica seria igual a zero, expresso por $\check{U}_{STR}(f) = 1$ e o sistema detector seria perfeitamente transmitido - sem desfocagem interna e ruído de fundo na imagem - expresso por $\check{U}_{NW}(f) = 1$, de forma que a relação dos sinais também daria $M(f) = 1$, o valor máximo possível para M. A frequência espacial f é expressa pelo número de linhas por unidade de comprimento do trajeto. No exemplo da FIGURA 5.1.13, isto seria o número de barras (ou os seus intervalos) por mm. Se esta experiência com barras a diferentes distâncias fosse repetida, então resultariam curvas de modulação da densidade óptica para diferentes frequências espaciais. Quanto mais próximas forem as distâncias, maior será a frequência espacial, maior será a frequência espacial. A FUNÇÃO DE TRANSMISSÃO DE MODULAÇÃO M(f) seria, no caso ideal, parecida com a que está registrada na FIGURA 5.1.13.

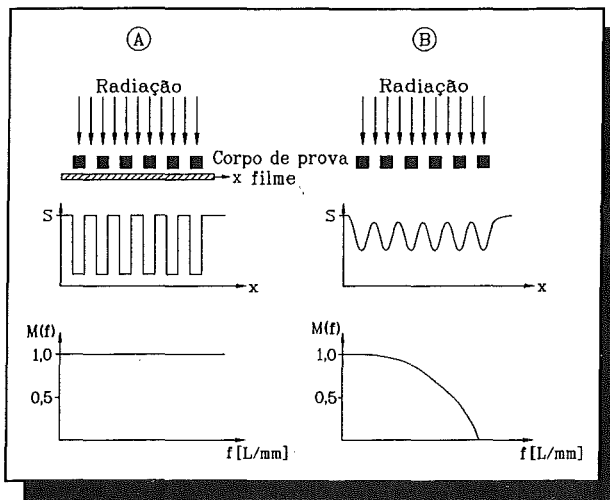


FIGURA 5.1.13: MODULAÇÃO DA DENSIDADE ÓPTICA

Na realidade, representadas por B na FIGURA 5.1.13, as relações não são ideais, dado que em \check{U}_{STR} surge uma desfocagem geométrica e em \check{U}_{NW} uma desfocagem interna e há ruídos de fundo na imagem, e é por isso que o perfil da densidade óptica possui uma forma semelhante a da representada em B.

A função de transmissão de modulação reduz-se quando as frequências espaciais são maiores. Isto significa que as aberturas estreitas como imagem deixam de ser transmitidas. Dado que, para a função de transmissão \check{U}_{STR} a desfocagem geométrica tem um papel determinante e o tamanho do foco de raios X, por seu lado, é essencial para a desfocagem geométrica (comparar relação 3.5.4), então é compreensível que o tamanho do foco de raios X influencie a forma da função de transmissão de modulação, tornando assim o tamanho determinável. Isto terá que ser explicado praticamente mediante um exemplo. Como corpo de prova, pode-se usar a máscara de ouro mostrada na FIGURA 5.1.10. O tubo de

5 FONTES DE RADIAÇÃO

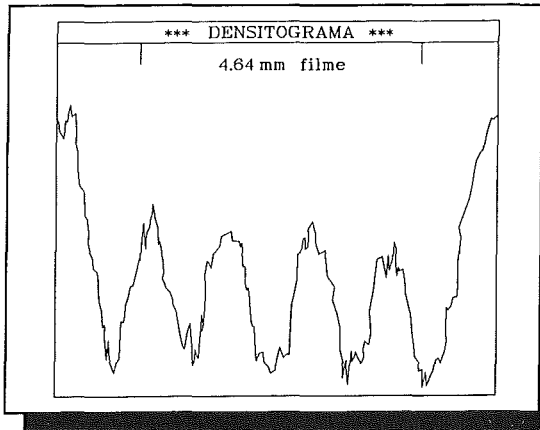


FIGURA 5.1.14: MODULAÇÃO DA DENSIDADE ÓPTICA PARA UM PERÍODO DE 7 μm

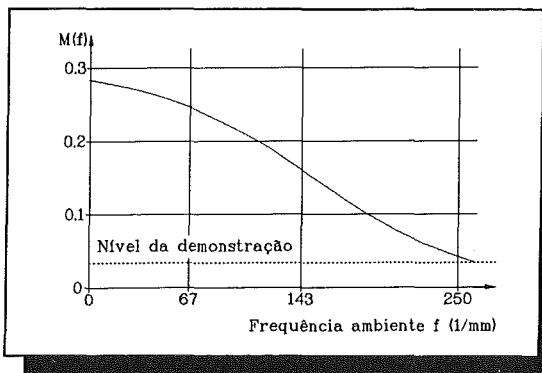


FIGURA 5.1.15: FUNÇÃO DE TRANSMISSÃO DE MODULAÇÃO

microfoco é acionado como no exemplo do método de desfocagem. A máscara de ouro é muito adequada para a formação da função de transmissão de modulação, uma vez que ela já fornece três frequências espaciais com distâncias das linhas de 4,7 e 15 μm - e nomeadamente foi formada logo em dois sentidos da frequência do foco de raios X e da quarta frequência espacial ($f = 0$) pelo quadrado no centro da máscara. A modulação da densidade óptica medida com um microdensitômetro para a distância 7 μm é mostrada como exemplo na FIGURA 5.1.14. Com as quatro frequências espaciais de 0, 67, 143 e 250 LP/mm resulta, para este caso, uma função de transmissão por modulação como a que está representada na FIGURA 5.1.15.

Os limites inferiores do microdensitômetro para o registro das diferenças da densidade óptica encontram-se entre 0,04 e 0,02. Como limite de detecção, foi usado o valor médio 0,03.

A função de transmissão de modulação atinge este valor a uma frequência espacial de 279 LP/mm para o foco de raios X regulado, o que corresponde a um tamanho efetivo do foco de raios X de 3,7 micrômetros.

A utilização da função de transmissão de modulação para a determinação do tamanho do foco de raios X é certamente mais trabalhosa do que os outros métodos, mas o conhecimento da função de transmissão de modulação como tal oferece as seguintes vantagens:

5.2 APARELHOS DE RAIOS X

- (1) O resultado é objetivo e independente das apreciações da pessoa que executa o teste.
- (2) A função de transmissão de modulação pode se formar para qualquer sistema parcial para conhecer as suas características e, eventualmente, melhorá-las.
- (3) A função de transmissão por modulação, de acordo com a relação (5.1.8), pode se formar para todo o sistema.
- (4) A partir da função de transmissão de modulação, podem ser determinadas as propriedades características, como desfocagem, tamanho do foco de raios X, etc.

5.2 APARELHOS DE RAIOS X

Sob a designação de aparelhos de raios X, compreendem-se aparelhos nos quais a tensão elétrica contínua é usada para acelerar os elétrons diretamente entre a fonte de elétrons (cátodo) e o alvo (ânodo).

5.2.1 TUBOS DE RAIOS X

O modo principal de gerar raios X, assim como as suas propriedades características foram tratados no capítulo 2.2. A construção dos tubos compõe-se de uma ligação para alto vácuo, da fonte de elétrons, da disposição do alvo, sobre o qual incide o feixe dos elétrons, e da janela de saída do feixe, assim como da passagem para alta tensão e tensão de filamento. A FIGURA 5.2.1 esquematiza a construção de um tubo de raios X feito de vidro. A fonte de elétrons (cátodo) compõe-se, normalmente, de um filamento incandescente de tungstênio, enrolado em espiral. O filamento incandescente é chamado de um eletrodo especialmente formado, o qual é designado por eletrodo de focalização ou cilindro de Wehnelt. Este eletrodo, que normalmente é de níquel ou de ferro, funciona como uma lente eletrostática e com a sua distribuição elétrica de campo, serve para a focalização do feixe dos elétrons que é emitido pelo filamento incandescente. A forma e o tamanho do foco de raios X dos elétrons sobre o alvo depende da forma e tensão deste eletrodo de focalização. É necessário um posicionamento muito exato.

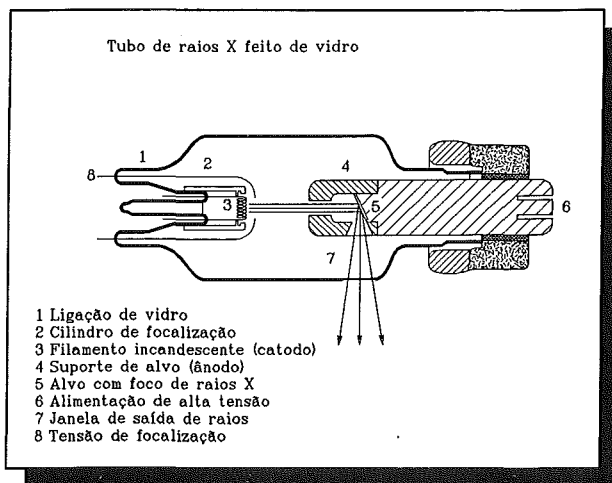


FIGURA 5.2.1: TUBO DE RAIOS X

5 FONTES DE RADIAÇÃO

A alta tensão usada faz com que a aceleração dos elétrons do filamento incandescente para o ânodo seja trazida para o alvo. No alvo, os elétrons acelerados no chamado "foco de raios X" são freados. O tamanho do foco de raios X depende da construção do eletrodo de focalização. O alvo compõe-se, em regra, de tungstênio e ouro, que é colocado no bloco do ânodo feito de cobre, sendo bom condutor. Um bom contato entre o alvo e o bloco anódico é importante para uma boa refrigeração. Nos tubos de alta potência, o alvo é refrigerado com um elemento de refrigeração.

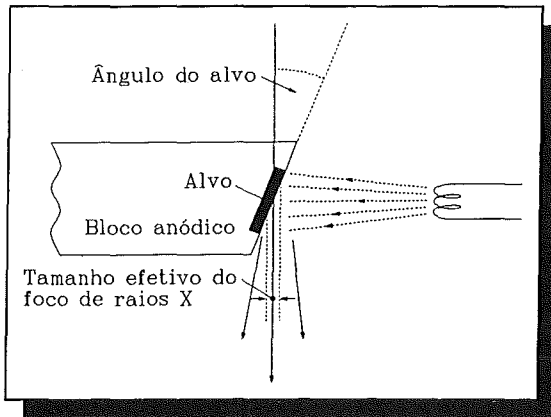


FIGURA 5.2.2: GEOMETRIA DO ALVO

O alvo para o qual é dirigida a corrente de elétrons, de acordo com a figura, está disposto em ângulo (ângulo do alvo) com o eixo vertical do tubo. Assim, consegue-se que os elétrons incidentes e o consumo de potência tenham à sua disposição uma superfície relativamente grande mas que, no entanto, o tamanho do foco de raios X, vistos do ponto de saída do raio, seja relativamente pequeno. O ângulo do alvo é de geralmente 20° . A importância de um pequeno foco de raios X foi discutida detalhadamente na imagem dos feixes no capítulo 3.5.

O tubo da FIGURA 5.2.3 possui também um invólucro de vidro que tem que ser hermético, uma vez que no tubo tem que haver vácuo para que a corrente de elétrons não seja destruída por ação do ar. Para o invólucro, é utilizado um vidro especial de borossilicato, uma vez que isto permite uma ligação vidro-metal. No lado metálico, é usada uma liga do tipo KOVAR que possui o mesmo coeficiente de dilatação térmica do vidro. O lado de vidro é fundido para garantir um alto vácuo no tubo. Muitas vezes são usadas também bombas absorvedoras de gás para retirar os gases residuais e manter o alto vácuo. Este tipo de construção é normal para tubos de até 250 KV.

Para tubos com tensões de 250 KV ou maiores, são construídos modelos de metal e cerâmica. Estes são equipados com eletrodos adicionais, blindados e destinados a impedir correntes de fuga e descargas no interior dos tubos, tornando assim possível trabalhar com este tipo de tubo a altas tensões.

5.2 APARELHOS DE RAIOS X

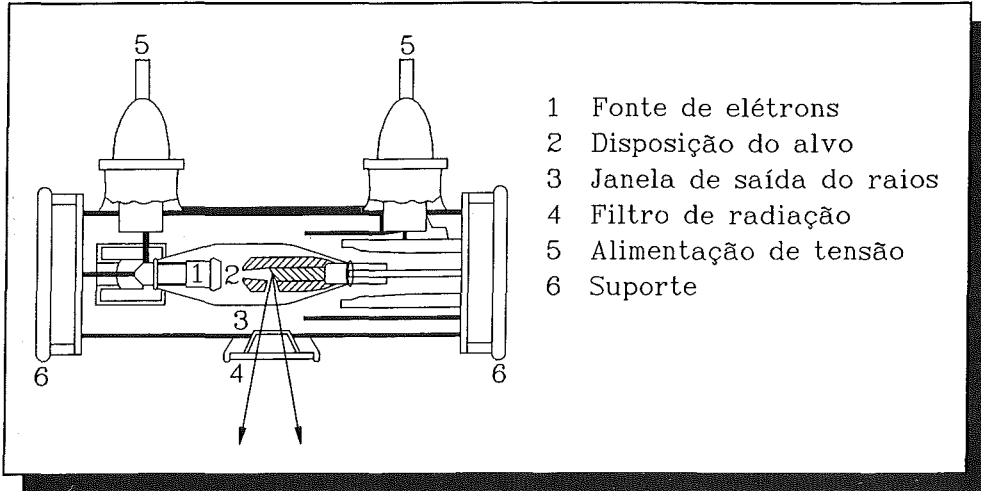


FIGURA 5.2.3: TUBO DE RAIOS X COM SUPORTE DUPLO

Um tipo especial do modelo do alvo está esquematizado na FIGURA 5.2.4. O objetivo do tipo representado do alvo é emitir a radiação com um ângulo periférico de 360°.

Esta geometria do alvo é utilizada nos ensaios radioscópicos de tubulações com tubo de raios X no interior o que permite testar tubulações por meio de uma "FOTOGRAFIA PANORÂMICA", simultaneamente em toda a sua volta.

5.2.2 ALIMENTAÇÃO DE ALTA TENSÃO

Os aparelhos de raios X com tensões de operação de 30 a 400 KV utilizam transformadores de alta tensão e retificadores. Estes encontram-se na maior parte das vezes, imersos em óleo isolante para obter uma boa resistência ao choque, no caso de pequenos volumes de construção. Relativamente à retificação elétrica da corrente alternada transformada em alta tensão há variados tipos de circuitos, alguns dos quais serão aqui tratados.

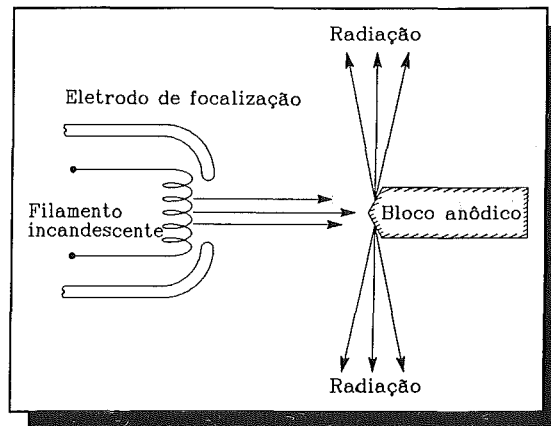


FIGURA 5.2.4: ALVO PANORÂMICO

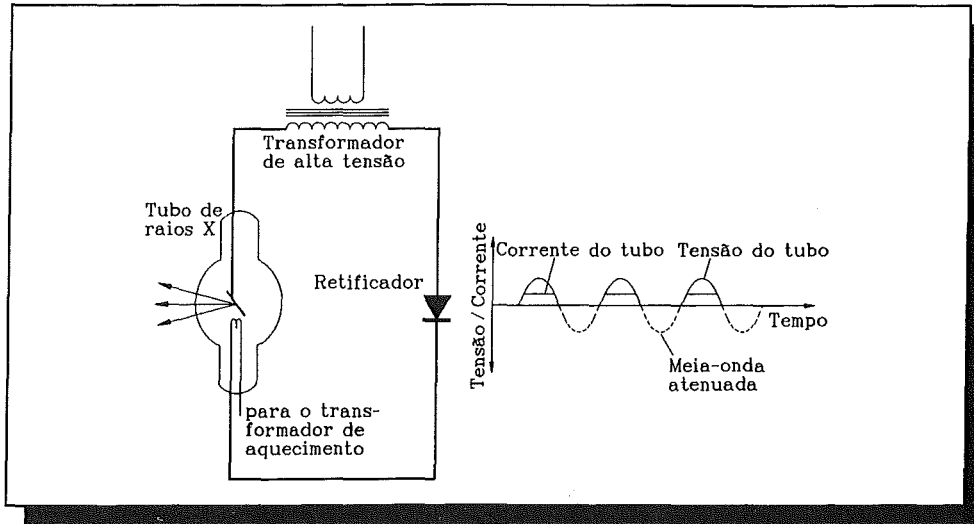


FIGURA 5.2.5: RETIFICAÇÃO DE MEIA-ONDA

RETIFICADORES DE MEIA-ONDA: Trata-se de um circuito especialmente simples, que mostramos na FIGURA 5.2.5. A meia-onda negativa da alta tensão é suprimida, o que faz com que no tubo de raios X deixe de ter tensão. Daí resulta uma corrente intermitente no tubo.

CIRCUITO DE VILLARD: O circuito esquemático é mostrado na FIGURA 5.2.6. O transformador de alta tensão, o retificador e os condensadores encontram-se, normalmente, juntos dentro de um recipiente de óleo. Por meio deste circuito obtém-se uma duplicação da tensão, de forma que a tensão existente no tubo de raios X seja duas vezes mais alta que a tensão do transformador. Uma desvantagem essencial deste circuito é que, no tubo de raios X, fica uma tensão de aceleração senoidal. Isto faz com que a tensão percorra valores baixos e assim seja gerada uma porção relativamente alta de radiações de baixa energia, o que é desvantajoso para muitos dos requisitos do teste.

CIRCUITO DE GRAETZ: A FIGURA 5.2.7 mostra o circuito de Graetz, no qual se toma uma retificação tanto da meia-onda positiva como da negativa da alta tensão. Em comparação com a retificação de meia-onda (comparar figura 5.2.5), surge assim uma potência mais alta do tubo. Devido à existência de tensão não constante no tubo, este circuito não é bem aceito para equipamentos industriais.

5.2 APARELHOS DE RAIOS X

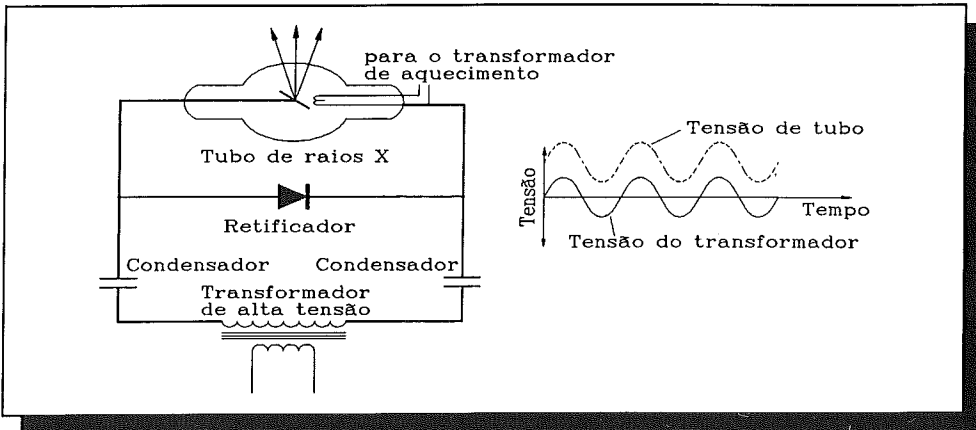


FIGURA 5.2.6: CIRCUITO DE VILLARD

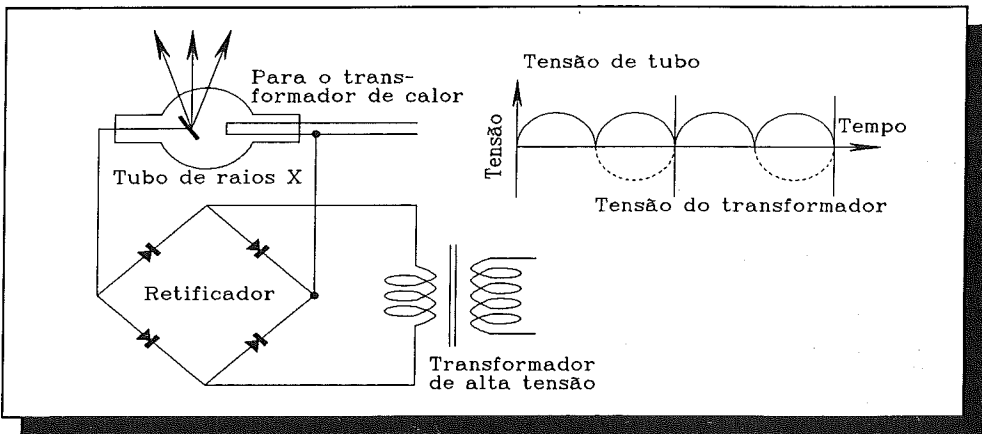


FIGURA 5.2.7: CIRCUITO DE GRAETZ

CIRCUITO DE GREINACHER: O esquema do circuito é mostrado na FIGURA 5.2.8. O circuito de Greinacher é um aperfeiçoamento do circuito de Villard, no qual os condensadores são carregados por ambas as meias-ondas da alta tensão. Ao fazê-lo, a tensão não é somente duplicada como também é consideravelmente constante, como se pode ver na representação do trajeto da tensão no tubo. Para continuar a filtragem do trajeto da tensão, são usados, muitas vezes, filtros elétricos.

Para o fornecimento de alta tensão, o qual exige uma constância de tensão, são utilizados transformadores de alta tensão, mesmo a frequências mais altas no âmbito de kHz. As regulagens eletrônicas estabilizam as tensões.

A utilização de tensões alternadas de alta frequência permite uma redução dos

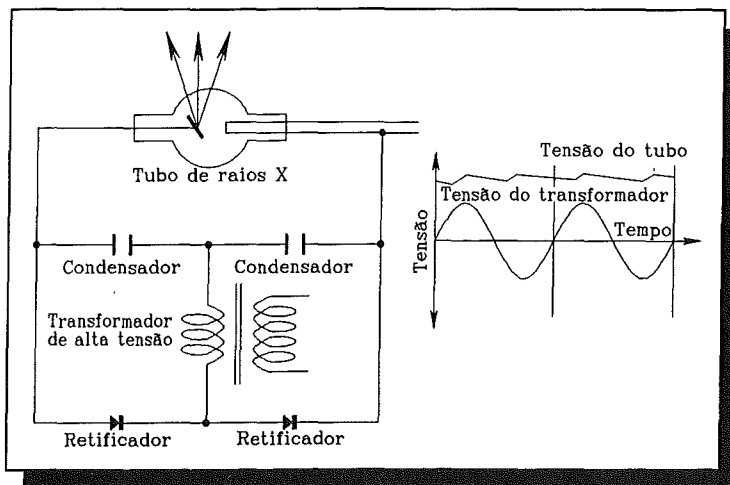


FIGURA 5.2.8: CIRCUITO DE GREINACHER

transformadores de alta tensão e uma forma compacta de construção.

5.2.3 FILTRAGEM DAS RADIAÇÕES

A radiação gerada no alvo devido à desaceleração dos elétrons passa através da janela de saída, como está esquematizado na FIGURA 5.2.9. Por trás da janela de saída é colocado, muitas vezes, um **FILTRO DE RADIAÇÃO** feito de metal. O motivo da filtragem é reduzir a quantidade de radiação de raios X de baixa energia e, com isto, aumentar a quantidade de energia mais alta, o que também é chamado de "endurecimento" do espectro de raios X. No tratamento da radiação dos raios X, no capítulo 2.2, a distribuição da energia das radiações de raios X é mostrada como espectro contínuo (comparar FIGURA 2.2.3). Essa radiação sai do tubo de raios X pela janela de saída. Dado que, por ação dos metais, como é mostrado no capítulo 3.2, sobretudo a radiação de raios X de baixa energia é atenuada, este efeito pode ser utilizado mediante uma folha de metal.

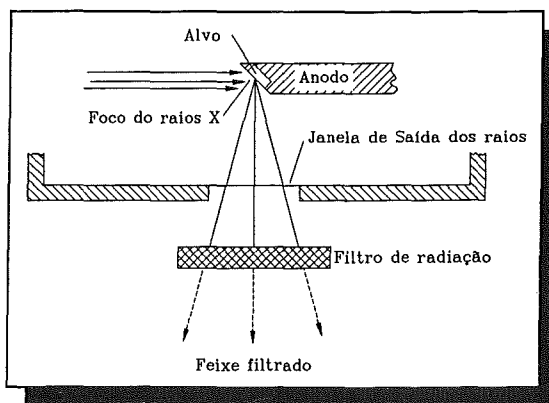


FIGURA 5.2.9: FILTRO DE RAIOS X

Por meio do filtro de metal, a porção de baixa energia da radiação de raios X é diminuída, como está representado esquematicamente na FIGURA 5.2.10. Os materiais típicos para os filtros são o cobre, o latão e o chumbo e as espessuras típicas a título de exemplo são:

5.2 APARELHOS DE RAIOS X

Radiação de raios X de 200 KV: 0,25 - 0,5 mm de chumbo

Radiação de raios X de 400 KV: 0,6 - 1,0 mm de chumbo

Os efeitos de uma filtragem são especialmente positivos quando as peças que serão ensaiadas apresentarem grandes diferenças de espessura e, na zona estreita ou na borda, ainda tiverem uma qualidade de imagem suficientemente boa. Dado que a radiação de baixa energia, por ex., é facilmente detectada por meio de um filme e gera uma alta densidade óptica, a utilização de um filtro faz com que haja uma diminuição da densidade óptica do filme nas zonas estreitas da peça ou em suas margens. Com isto, pode ser evitada uma "SOBRE-EXPOSIÇÃO" do filme nestas zonas. Um exemplo típico para o surgimento deste problema é o exame radioscópico de um cilindro no qual, sem a filtragem nas zonas externas de espessuras reduzidas, é provocada uma alta densidade óptica.

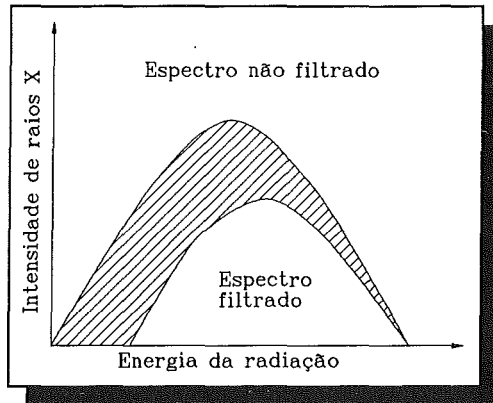


FIGURA 5.2.10: FILTRAGEM DOS RAIOS X

Ao usar um filtro de raios X, naturalmente, a radiação primária também é atenuada, o que exige um tempo mais longo de exposição para obter uma densidade óptica pré-fixada do filme. Em casos especiais, o filtro pode também ser colocado em outro local como diretamente na janela de saída das radiações, para evitar uma densidade óptica demasiadamente alta no filme. Com este objetivo, o filtro é colocado em forma de "máscaras" que são feitas de folha de chumbo ou de materiais de chumbo (pastas, soluções).

5.3 ACELERADOR DE ELÉTRONS

O valor máximo da tensão contínua de aceleração nos aparelhos de raios X é determinado de forma ascendente por meio da resistência elétrica à penetração dos materiais utilizados e possui o seu limite máximo em 600 KV. Isto significa que não podem ser geradas, desta maneira, energias de elétrons maiores que 600 KeV. A radiação de raios X de energias maiores é necessária, no entanto, para os exames radiográficos de elementos de paredes mais espessas, devido à sua capacidade de penetração. Em consequência disto, são utilizados outros métodos para a aceleração dos elétrons de alta energia, os quais são aplicados na RADIOGRAFIA DE ALTA ENERGIA.

5.3.1 ACELERADOR LINEAR

No caso do acelerador linear, os elétrons não são acelerados de uma só vez, mas de várias vezes seguidas, permitindo, assim, obter altas energias com pequenas correntes de elétrons. A FIGURA 5.3.1 mostra a construção esquemática de um acelerador linear.

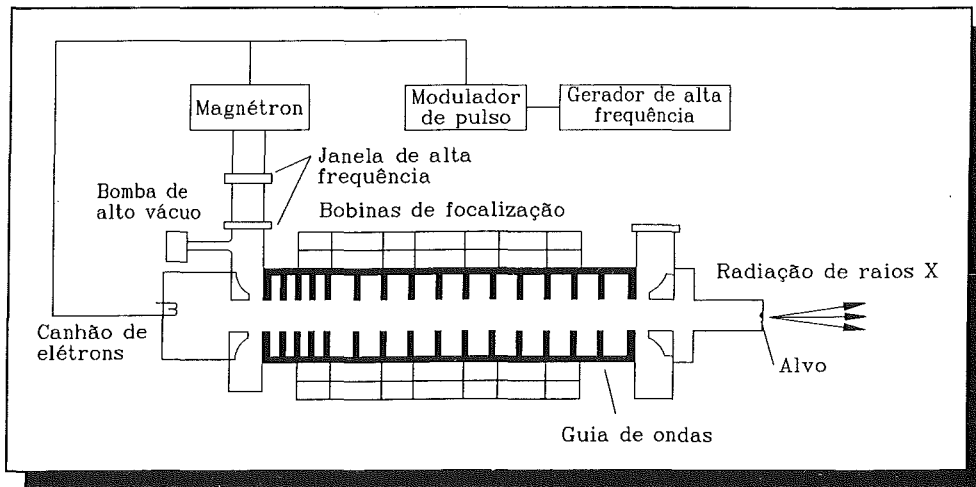


FIGURA 5.3.1: ACELERADOR LINEAR

No canhão de elétrons são gerados os elétrons mediante um filamento incandescente, depois são focalizados e previamente acelerados, e disparados do canhão por um sistema linear de aceleração (em linha reta). Este sistema em linha reta deu o nome ao acelerador linear (linear accelerator) ou, de forma, abreviada "LINAC". Este sistema de aceleração compõe-se de guias de ondas ligadas umas atrás das outras (guia de ondas), nos quais os elétrons são acelerados passo a passo. Nos guias de ondas, a tensão de aceleração de alta frequência é regulada de tal forma que a velocidade dos elétrons e das fases da micro-onda, no guia de ondas, é igual uma à outra e, assim, os elétrons são acelerados por meio da energia elétrica do campo. É necessário que, para isso, os elétrons sejam direcionados em grupos, com energia igual, na primeira parte do sistema de aceleração. Em consequência disto, a corrente de elétrons acelerados não atinge o alvo continuamente, mas pulso a pulso. No alvo, é gerada a radiação dos raios X por meio do frenamento dos elétrons.

O campo elétrico de alta frequência, pulso a pulso, é gerado em um gerador de alta frequência e em um modulador de pulsos e comanda um magnétron ou um clístron para alcançar potência elétrica suficiente. O alto vácuo em sistemas fechados é mantido, normalmente, por meio de uma bomba de absorção de gás. Os dados técnicos dos aceleradores lineares para o exame radiográfico são basicamente os seguintes:

5.3 ACELERADOR DE ELÉTRONS

- | | | |
|--------------------------|--|------------------------|
| <input type="checkbox"/> | Energia dos elétrons : | 6 - 12 MeV |
| <input type="checkbox"/> | Taxa da dose:
(a 1 m de distância do alvo) | até 40 Gray/min. |
| <input type="checkbox"/> | Âmbito de frequência dos geradores de AF: | 6 - 10 GHz |
| <input type="checkbox"/> | Operação pulso a pulso e frequência de
sequência de pulsos: | 60 - 300 Hz (variável) |

O comprimento do guia de ondas é normalmente cerca de um metro. Na moderna radiografia de alta energia são utilizados principalmente aceleradores lineares.

5.3.2 ACELERADORES CIRCULARES

Nestes tipos de sistemas de aceleração, os elétrons não são acelerados linearmente mas em órbitas circulares. O acelerador circular mais conhecido é o BETATRON: o trajeto da aceleração circular é obtido utilizando um campo magnético através do qual os elétrons são mantidos em órbitas circulares. O princípio de construção do betatron está esquematizado na FIGURA 5.3.2. Os elétrons são disparados da fonte de elétrons no sistema circular de vácuo, no qual está colocado um forte imã entre os pólos.

O imã é gerado por uma corrente alternada e, no momento em que a densidade de fluxo magnético, que se segue à frequência da corrente alternada, passa pelo ponto zero, é disparado o feixe de elétrons. Os elétrons circulam em órbitas circulares e são acelerados até que a densidade de fluxo atinja o seu valor máximo. Neste momento, os elétrons são desviados por meio de um pulso de tensão contínua e separados da órbita circular atingindo o alvo no qual geram radiações de raios X. Isto significa que a radiação é emitida em forma

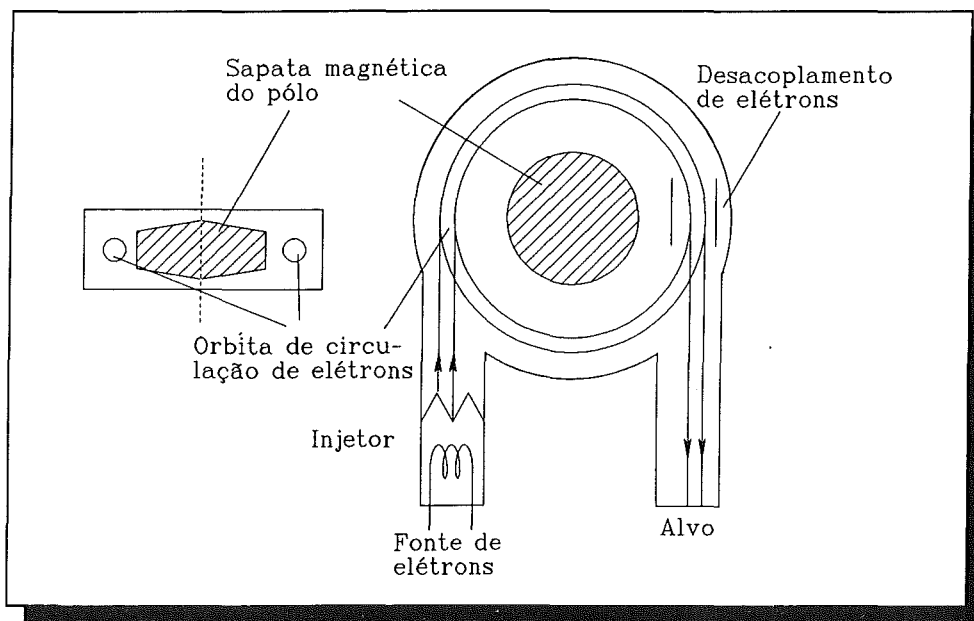


FIGURA 5.3.2: BETATRON

5 FONTES DE RADIAÇÃO

de pulsos de pouca duração. A aceleração circular dos elétrons permite gerar altas energias (15 - 31 Mev), portanto, a potência da corrente de elétrons, e, com ela, a taxa da dose é pequena quando comparada com os aceleradores lineares. Por este motivo, os betatrons somente são usados em casos isolados.

MICROTRON: Neste acelerador circular, os elétrons são acelerados em ressonadores de micro-ondas, os quais estão dispostos em um campo magnético. Também aqui surge, por isso, uma potência de radiação em forma de pulsos. A taxa alcançável da dose é da ordem de grandeza da do betatron e é, por isso, pequena quando comparada à dos aceleradores lineares.

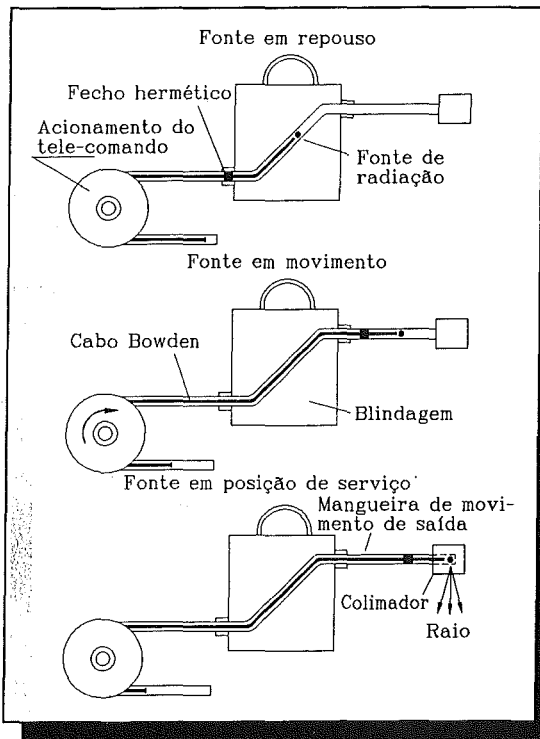


FIGURA 5.4.1: FUNÇÕES DOS DEPÓSITOS DE TRABALHO

5.4 FONTES RADIOATIVAS

Para proceder ao exame radiográfico, são utilizadas, de preferência, fontes de radiações gama. As características desta radiação e do emissor usado para o exame foram tratadas no capítulo 2.3. Dado que a radiação de fontes radioativas é emitida constantemente, as fontes são utilizadas de tal forma que não possa haver contaminação radioativa, nem possam emitir sobrecargas de radiação não permitidas. Para evitar a contaminação, o material que emite as radiações é colocado numa pequena caixa que depois é soldada. As suas dimensões são da ordem de milímetros. A blindagem tem que ser controlada de tempos em tempos. Para aplicação no exame radiográfico, as fontes radioativas encontram-se em **RECIPIENTES DE TRABALHO** que serão descritos a seguir:

5.4.1 RECIPIENTES DE TRABALHO

A função dos recipientes de trabalho para fontes radioativas está esquematizada na FIGURA 5.4.1. Se a fonte de raios gama não for usada, então esta encontra-se em repouso dentro da blindagem. O recipiente é fabricado normalmente de urânio ou chumbo para se conseguir uma blindagem suficiente e será protegido por um revestimento de aço. A partir deste

5.4 FONTES RADIOATIVAS

recipiente, a fonte pode mover-se com a ajuda de um comando à distância, o que está representado na parte central da FIGURA 5.4.1. A posição de trabalho é mostrada na parte inferior da FIGURA 5.4.1. Tem que se garantir um transporte seguro da fonte em mangueiras de descarga com um cabo Bowden. Qualquer exposição involuntária deve ser evitada mediante a colocação de um fecho hermético.

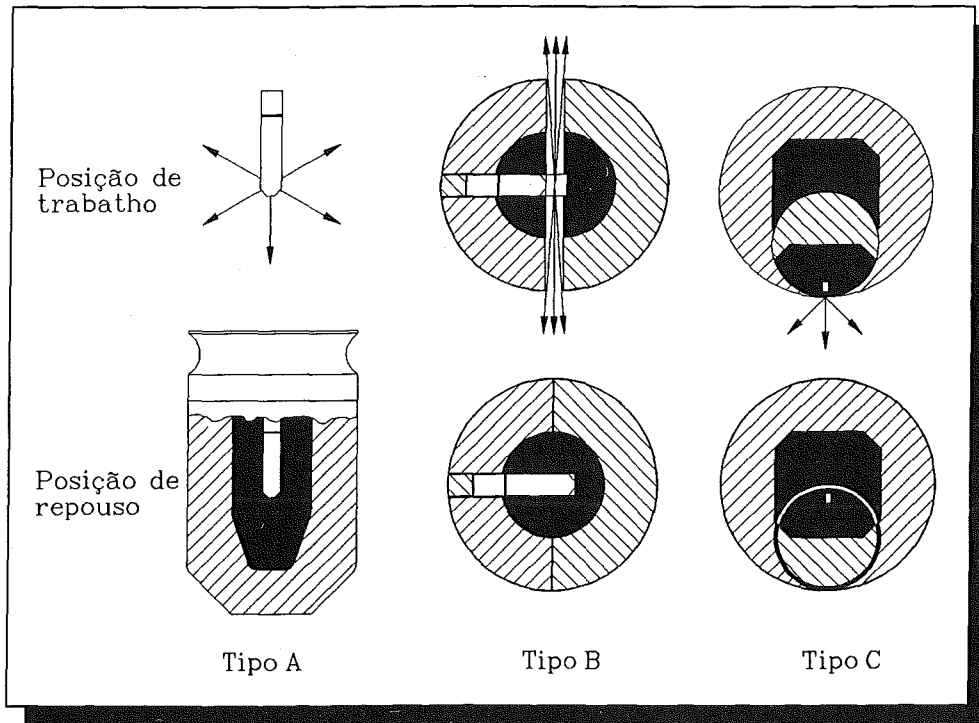


FIGURA 5.4.2: TIPOS DE RECIPIENTES DE TRABALHO

Os recipientes de trabalho possuem, de acordo com suas aplicações, modelos e formas variadas. Algumas das mais comuns estão representadas na FIGURA 5.4.2. A parte superior da figura mostra os recipientes em posição de trabalho e a parte inferior a posição de repouso. No tipo A, trata-se de um recipiente em forma de panela para os métodos de barra. Os emissores que se encontram numa caixa soldada são movidos no recipiente para frente e para trás. O tipo B representa um recipiente para irradiações circulares nas quais o emissor permanece no recipiente. O recipiente propriamente dito compõe-se de dois hemisférios, os quais são deslocáveis um contra o outro no que diz respeito à fonte de radiação. Em posição de trabalho, forma-se um feixe de radiação emitido em todas as direções. O tipo C representa um recipiente com disposição excêntrica. Em posição de repouso, a fonte de radiação encontra-se no centro do recipiente. Rodando o excêntrico 180°, a fonte é colocada em posição de trabalho.

Os materiais de construção, para se obter uma blindagem suficiente, são o urânio, o tungstênio e o chumbo, e o invólucro é normalmente fabricado de aço inoxidável. Estes

5 FONTES DE RADIAÇÃO

recipientes de serviço necessitam de uma autorização especial, e têm que ser regularmente controlados para verificar se suas funções estão em perfeitas condições, especialmente a do equipamento de segurança (fecho hermético, fechadura, etc.).

5.4.2 DADOS TÉCNICOS

Dos dados técnicos das fontes de radiação, os que mais interessam são a energia da radiação e a taxa de dose. Estes dados estão compilados na TABELA 5.4.1, para as fontes de radiação mais comuns:

TIPO	ENERGIA GAMMA [MeV]	TEMPO DE SEMI-DES- INTEGRAÇÃO	ESPESSURA DE SEMI- DESINTEGRAÇÃO (mm chumbo)	TAXA DE DOSE [mSv/h] a 1 m de distância de 1 MBq
Co-60	1,33 1,77	5,27 anos	13	0,35
Cs-137	0,66	30,1 anos	8,4	0,09
Ir-192	0,31 0,47 0,60	74,3 dias	2,8	0,13
Yb-169	0,05 a 0,21	32 dias	0,8	0,03

TABELA 5.4.1: DADOS TÉCNICOS DAS FONTES DE RADIAÇÃO

6 TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO DO TESTE

O exame com radiações penetrantes tem como objetivo descobrir anomalias nos elementos. Estas anomalias podem ser de várias causas e vão desde falhas nos materiais (rugas, oclusões, descontinuidades, etc.), passando por componentes mal ordenados em partes do equipamento até dimensões geométricas erradas. Muitas vezes, é necessário, para a detecção de defeitos, proceder uma comparação com elementos sem falhas ou com falhas do mesmo tipo ou de tipo semelhante que estão reunidas em padrões. Isto é, por exemplo, o caso do exame das costuras de solda, nas quais a radiografia de referência foi elaborada por diversas instituições (DGZfP, IIW, ASTM, etc.). No tratamento das informações do exame em forma de representação radiográfica de defeitos, é essencial possuir anteriormente um conhecimento aproximado dos possíveis defeitos, para poder proceder ao tratamento eficiente das informações.

O tratamento das informações do exame pode ser feito subjetivamente por uma pessoa a qual faz a sua interpretação, ou, objetivamente, por um sistema de interpretação, o qual se compõe de um ou mais aparelhos. O tratamento por pessoas baseia-se na experiência e nas capacidades de cada um desses examinadores, enquanto que o tratamento automático depende das especificações técnicas e do estado de evolução do sistema de interpretação. A tendência é usar a interpretação automática, pois esta, sobretudo em sistemas de produção, devido à rapidez tecnicamente requerida, dá maiores rendimentos em muitos casos. Por este motivo, vamos tratar neste capítulo especialmente do processo usado na interpretação automática da informação obtida com os exames.

6.1 TÉCNICA DE FILME

A detecção e a reprodução de defeitos em filmes altamente sensíveis às radiações foi tratada detalhadamente nos capítulos 3.4 e 3.5. A informação dada pelos exames apresenta-se para ser interpretada em forma de densidade óptica do filme e, como tal, terá que ser interpretada. Como exemplo, temos um filme que, como é altamente sensível às radiações, contrariamente à fotografia luminosa, apresenta-se como negativo.

6.1.1 INTERPRETAÇÃO ÓPTICA

Neste caso, o tratamento das informações fornecidas pelo exame é feito por um examinador. O filme diafragmado e revelado é colocado em frente de um aparelho de observação que produz uma luz difusa. A densidade luminosa do aparelho de observação de filmes terá que ser regulada, de forma a corresponder à densidade óptica do filme. Para uma densidade óptica do filme de $S = 3$, é necessária uma densidade luminosa de cerca de 10^5 cd/m² (cd = candela). As condições de observação são reguladas pela norma DIN 54 116. Na substituição do filme, a densidade luminosa é reduzida com o fator 1000 normalmente por meio de um interruptor de pedal. Para adaptar os olhos do examinador à densidade luminosa, a interpretação se faz em uma câmara escura. A influência da luz, que poderia impedir uma interpretação visual, tem que ser evitada a todo o custo. Também, o manuseio do filme em si terá que ser feito de tal forma que não surjam manchas no filme, que poderiam levar a falsas interpretações, e o examinador então deverá usar luvas.

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

Durante a interpretação do filme, no ecran luminoso há uma imagem positiva, isto significa que os poros, ruturas ou quaisquer outros pontos fracos no material surgem mais claros do que o material base.

A interpretação visual ocorre em dois passos essenciais:

- (1) Verificação da alteração da densidade óptica provocada por um defeito.
- (2) Interpretação da alteração da densidade óptica para classificação do defeito.
- (3) Interpretação da informação fornecida pelo exame com vista aos requisitos que são exigidos da peça.

A verificação da alteração da densidade óptica no filme se faz examinando com os olhos, e depende da capacidade visual dos olhos e do contraste do filme. O contraste pode ser medido através da densidade óptica do filme; é necessário possuir boa visão, o que tem que ser comprovado por meio de testes visuais.

Na interpretação visual, a classificação de um defeito exige um alto conhecimento do examinador. Na classificação subjetiva, a coordenação é feita por experiência. No entanto, para isso, pode-se utilizar também fotografias de referência já citadas, quando se tratar de costuras de solda. Para proceder à coordenação e à classificação, deveria-se também usar os meios de ajuda para a interpretação (p. ex., DIN 8563, parte 3, Conselhos IIW).

6.1.2 INTERPRETAÇÃO AUTOMÁTICA

A técnica de filmes não é propriamente a mais adequada para uma interpretação automática. Isto se deve, por um lado, a que a imagem do filme e sua revelação demoram relativamente muito tempo e, por isso, a vantagem de tempo de uma interpretação automatizada é inexistente e, por outro lado, há outras possibilidades de demonstrar os resultados da radiação (ver capítulo 6.2, Transformação da Imagem), as quais são mais apropriadas para proceder à interpretação automática da informação resultante do teste. Por este motivo, a interpretação automática de filmes só é utilizada em casos especiais.

DIGITALIZAÇÃO DO FILME

Neste método, o perfil da densidade óptica de um filme é registrado com a ajuda de uma unidade de investigação (SCANNER) ponto por ponto. Para isso, o filme é examinado por radioscopia com uma luz intensamente branca e a intensidade luminosa que penetra nele é medida por meio de um sensor óptico (p. ex., elemento CCD). A intensidade luminosa determinada ponto a ponto é transformada em sinal digital. Desta forma, surge um perfil de densidade óptica digital puntiforme. De acordo com o tipo de Scanner, a resolução local é da ordem de 50 a 100 micrômetros com um número de bits de 8 a 12, isto é, 256 a 4096 níveis de cinza para a densidade óptica. A região ideal de trabalho de tais aparelhos fica, no caso da densidade óptica, entre 2,0 e 3,5, portanto, também dentro do região que é mais adequada para a interpretação visual. A densidade óptica máxima que é possível tratar chega até 4,5.

Para compor o sistema junto com o Scanner, utiliza-se um computador de alta capacidade com software especial para armazenagem de grande quantidade de dados que serão fornecidos pela interpretação do filme, assim como, para elaboração de um arquivo, são necessárias memórias de dados de alta capacidade (placas ópticas, etc.).

6.1 TÉCNICA DE FILME

Esta técnica fornece a possibilidade de uma documentação e ordenamento em arquivos das informações obtidas através dos testes, que são independentes dos dados degradados do filme. Além disso, podem ser utilizados métodos de tratamento digital de imagem que serão tratados no capítulo 6.3.

INTERPRETAÇÃO COM MICRODENSITÔMETROS

Os densitômetros são aparelhos para medir a densidade óptica dos filmes. Para delimitação da superfície do filme a medir, é usada a abertura no densitômetro. Enquanto que, o diâmetro das aberturas dos densitômetros normais, fica na ordem dos milímetros, nos MICRODENSITÔMETROS o diâmetro de abertura é da ordem dos micrômetros. Os perfis de densidade óptica de filmes podem, conseqüentemente, ser determinados com uma resolução local mais alta. Se o sinal óptico da densidade óptica obtido, o qual normalmente

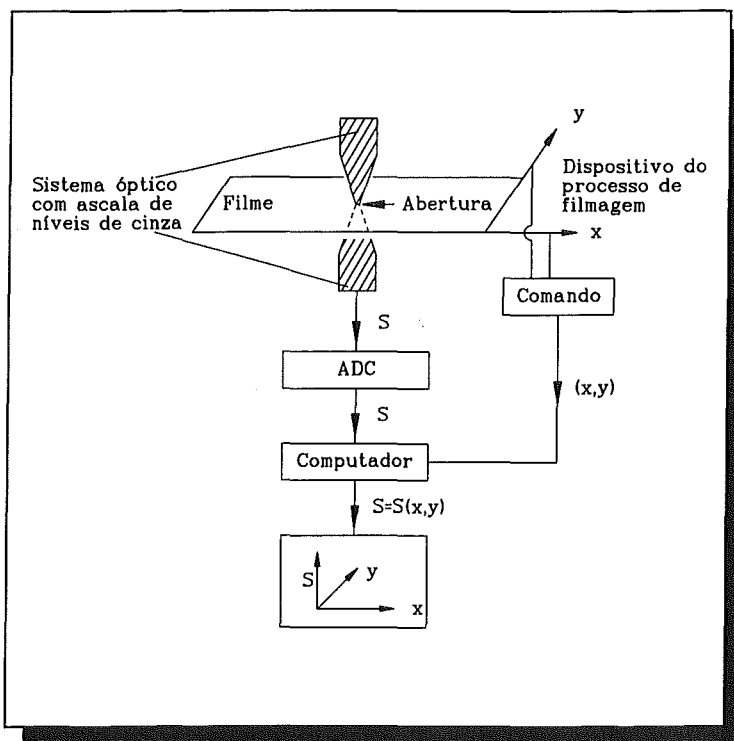


FIGURA 6.1.1: MICRODENSITÔMETRO AUTOMATIZADO

encontra-se como tensão análoga de saída em volts, for digitalizado com um conversor digital analógico (ADC, Analog-Digital-Converter), então pode-se proceder à interpretação automática do perfil da densidade óptica com a ajuda de um computador. A FIGURA 6.1.1 mostra a representação esquemática de um sistema de microdensitômetros em funcionamento.

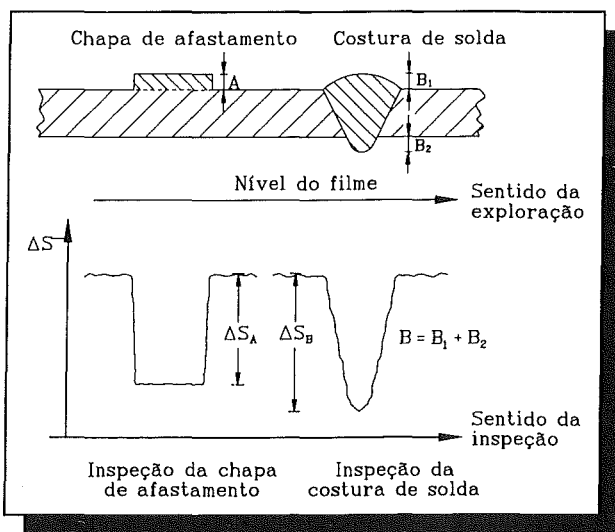
A unidade óptica com uma abertura na ordem dos 5 a 100 micrômetros funciona com uma escala de níveis de cinza de perfis de densidade óptica conhecida.

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

Comparando a densidade óptica medida com a da escala de níveis de cinza, processa-se a saída (OUTPUT) automática calibrada do valor da densidade óptica como tensão analógica. Este sinal de saída é digitalizado e introduzido em um computador com um programa de processamento de dados. Juntamente com as coordenadas também digitalizadas x e y do dispositivo de tratamento do filme, o perfil da densidade óptica pode ser representado em duas dimensões e interpretado automaticamente.

As possibilidades de aplicação do microdensitômetro automatizado são enumeradas nos seguintes exemplos:

- Determinação do tamanho do foco de raios X do equipamento de microfoco. Este exemplo, com a ajuda do microdensitômetro, permite fazer uma determinação o tamanho do foco de raios X, do equipamento de microfoco, que foi tratado mais detalhadamente no item 5.1.4.
- Exame da espessura das costuras de solda. Se no exame das costuras de solda, por exemplo, além de eventuais defeitos, ainda tiver que ser determinada a espessura, então há um método de interpretação, como o que está representado na FIGURA 6.1.2. Na proximidade da costura de solda, está colocada uma chapa distanciadora no tubo com uma espessura conhecida A, a qual é representada no filme juntamente com a costura de solda. Após a revelação do filme, são fotografados os perfis de densidade óptica por meio de um microdensitômetro, como se vê na parte inferior da FIGURA 6.1.2.



Após a revelação do filme, são fotografados os perfis de densidade óptica por meio de um microdensitômetro, como se vê na parte inferior da FIGURA 6.1.2.

Para a relação das alterações da densidade óptica, aplica-se a seguinte proporção:

FIGURA 6.1.2: COSTURA DE SOLDADURA - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA

$$\frac{\Delta S_B}{\Delta S_A} = \frac{B}{A} \quad (6.1.1)$$

A espessura A é conhecida e as alterações da densidade óptica são avaliadas pelo computador. A espessura procurada B, constituída pelas espessuras parciais B₁ e B₂, dá

6.2 CONVERSÃO DE IMAGEM

como resultado:

$$B = \frac{\Delta S_B}{\Delta S_A} A \quad (6.1.2)$$

- Exame de materiais compostos.
No caso de materiais compostos com diferenças mínimas de espessura dos componentes dos materiais, é possível interpretar muito bem as diferenças da densidade óptica com um microdensitômetro para verificar defeitos na matriz.

6.2 CONVERSÃO DE IMAGEM

O funcionamento dos conversores de imagem foi tratado no capítulo 3.4.2.4. A função dos conversores de imagem é de converter a detecção da radiação de raios X e gama, tanto em imagem visível pelo olho humano, como ainda em imagem que possa continuar a ser tratada automaticamente. Com esta técnica, uma imagem produzida por raios X pode ser representada como registro analógico em um ecran de televisão ou de vídeo. O conversor de imagem converte assim a radiação em sinais elétricos, de forma que a informação obtida durante o exame pode continuar a ser tratada. Na FIGURA 6.2.1, é mostrado um sistema de conversão de imagem e de continuação do tratamento da imagem.

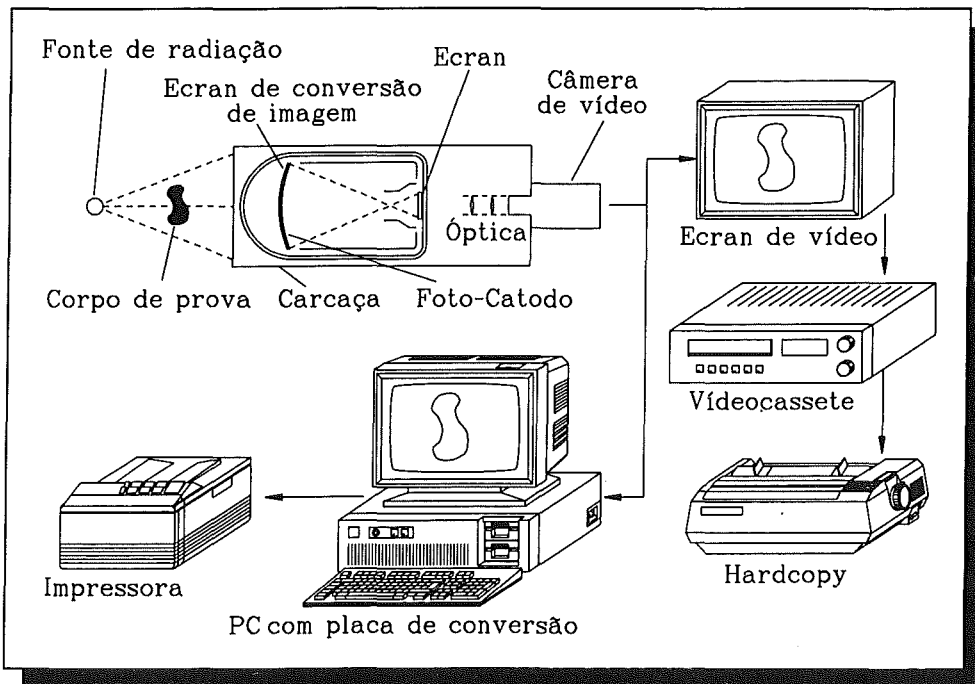


FIGURA 6.2.1: CONVERSOR DE IMAGEM

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

O corpo de prova é primeiramente detectado pela radiação no ecran do conversor de imagens. Por meio dos processos descritos no item 3.4.2.4, a imagem criada com linhas visíveis no ecran é levada até uma câmara de vídeo por meio de uma óptica. De acordo com as normas televisivas (p. ex., 25 imagens por segundo), a imagem é transmitida por uma câmara de vídeo a um ecran de vídeo, e aí representada. A gravação e documentação da imagem pode ser feita em um videocassete. A interpretação da imagem no ecran de vídeo terá que ser realizada por um examinador. A vantagem deste método, em comparação com a técnica de filmes, é que a imagem do corpo da prova está disponível em tempo real e, assim, pode-se obter uma alta velocidade de teste. A imagem da câmara de vídeo pode também ser levada até um conversor analógico digital, a qual é, segundo as regras, convertida em uma imagem digital que, em seguida, é representada e pode continuar a ser tratada. De que forma isso acontece, é o que trataremos no capítulo seguinte.

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

O objetivo do tratamento digital da imagem no exame com raios penetrantes é, primeiramente, obter uma melhoria da qualidade da imagem, a qual, a título de exemplo, pode ser obtida aumentando o contraste da imagem, e, em segundo lugar, conseguir uma interpretação tão ampla quanto possível, para poder fazer uma análise sobre o material de informação fornecido pelo teste com a ajuda de programas inteligentes de software para poder realizar o ensaio, o mais objetivamente possível.

No tratamento digital da imagem, os dados da imagem original são convertidos em formatos de dados compatíveis com o computador. Esta conversão é chamada de **DIGITALIZAÇÃO**. No exemplo mostrado na FIGURA 6.2.1, a digitalização se faz com uma câmara de vídeo através do conversor analógico/digital, que está ligado ao sistema de computador.

6.3.1 MATRIZ DA IMAGEM

Uma imagem digital é representada em forma de **MATRIZ DE IMAGEM** e compõe-se de linhas e colunas. Os elementos da matriz são os pontos da imagem que também são chamados de **PIXEL** (de "picture element"). A FIGURA 6.3.1 mostra um plano de uma tal matriz. A contagem das linhas da imagem se faz de cima para baixo, começando na coluna da linha 0, e a contagem das colunas se faz da esquerda para a direita, começando na coluna

0. Cada ponto da imagem fica dependente de um **VALOR DE NÍVEL DE CINZA g**. Usando para o valor nível de cinza números duais arbitrários, então pode-se falar de uma **IMAGEM DE DOIS NÍVEIS**. Se for representada uma imagem digitalizada em preto e branco, somente com dois valores cinzentos "0" e "1", então isto é chamado muitas vezes de **IMAGEM BINÁRIA**. A dependência dos valores de níveis de cinza dos pontos da imagem também tem a designação de **QUANTIFICAÇÃO**.

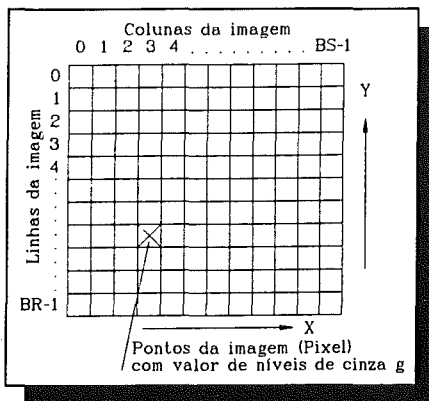


FIGURA 6.3.1: IMAGEM - MATRIZ

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

No exame radioscópico surgem, de acordo com a densidade óptica provocada por espessuras diversas dos materiais, **IMAGENS DE NÍVEIS DE CINZA**, contendo tons entre o preto e o branco. Ao proceder à digitalização de uma imagem de tom de níveis de cinza, cada um dos pontos da imagem-matriz tem que se colocar em dependência de um valor de níveis de cinza. Como quantidade de valor de níveis de cinza é usada na maior parte dos casos

$$g = \{ 0,1,2,3,\dots,255\}$$

uma vez que podem ser representados 256 valores de níveis de cinza com um byte (1 byte = 8 bits e $2^8 = 256$). Em um computador no que se refere aos bytes, a capacidade para guardar os dados da imagem é aproveitado de forma ótima. Aplicam-se as mesmas considerações também para o número de colunas e de linhas da imagem-matriz. Os 256 valores de níveis de cinza de 0 a 255 são suficientes na maioria dos casos. O valor de níveis de cinza 0 é, em regra, interpretado como **PRETO**, o valor 255 como **BRANCO** e um valor de níveis de cinza de 127 é interpretado como **NÍVEIS DE CINZA**. O perfil da densidade óptica da imagem conhecido pela técnica de filmagem é representada aqui como perfil de valor de níveis de cinza em forma digitalizada. O número de pontos da imagem por matriz é importante para a resolução local da imagem. Também são usados novamente números duais devido ao aproveitamento da memória, de forma que os tamanhos da matriz são utilizados em forma de (512 x 512 ou 1024 x 1024 pontos da imagem, etc.).

Dado que, tipicamente, são explorados por uma câmara de vídeo 50 meias imagens por segundo, com aparelhos de radioscopia podem ser registrados mesmo imagens-teste alteráveis com o tempo e interpretadas. Neste caso, dependente do tempo, se fala em imagens **DINÂMICAS** de valores de níveis de cinza. Se um ponto da imagem é representado por $s(x,y)$ e a matriz por $(s(x,y))$, então a imagem-matriz pode assumir as seguintes formas:

$S = (s(x,y))$ Imagem estática do valor de cinzento sem eixo temporal, p. ex., uma imagem digitalizada do valor de níveis de cinza

$S = (s(x,y,t))$ Imagem dinâmica do valor de níveis de cinza com eixo temporal; para os pontos temporais $t = 0,1,2,\dots,T-1$ se obtêm imagens de valor de níveis de cinza $(s(x,y,t))$, p. ex., imagens de vídeo de tons cinzentos com 50 meias- imagens por segundo.

6.3.2 MÈDIA DA IMAGEM

O processo de conversão da imagem, como foi explicado no capítulo 3.4.2, é de natureza estocástica. Este carácter ocasional leva a um ruído de fundo na imagem, através do qual a qualidade da imagem piora. Obtem-se uma diminuição do ruído de fundo da imagem quando se procede à média de várias imagens sobrepostas. O decurso desta média está esquematizado na FIGURA 6.3.2. Neste caso, a média é feita através dos respectivos pontos da imagem que se encontram uns sobre os outros. Os dados fornecidos pelo conversor de imagem A/D (comparar FIGURA 6.2.1) são normalizados antes da formação do ruído por meio de uma divisão. O fator de normalização da imagem n corresponde aqui ao número 2^n .

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

Em seguida, segue-se, por um lado, a gravação provisória da imagem com ruído, pelo outro, esta é entregue a um módulo especial de acumulação de imagens em tempo real após uma multiplicação por $1/2^n$. Este método possibilita, por um lado, a saída constante de dados da imagem em

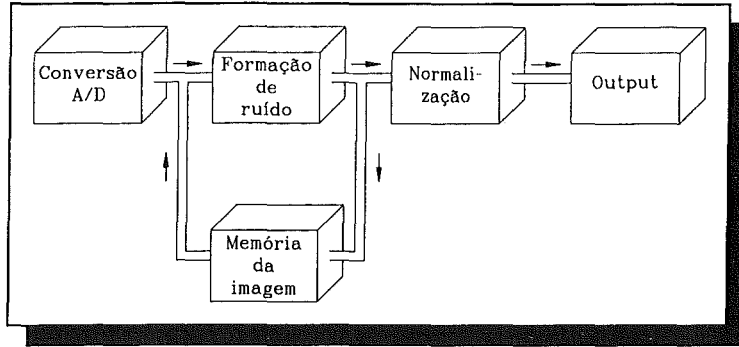


FIGURA 6.3.2: MÉDIA DA IMAGEM

um ecrã e, por outro, ao atingir o número previamente dado para centrar as imagens, o resultado é passado para a memória de trabalho.

O valor médio formado pela imagem-matriz pode ser usado como caracterização de uma imagem. $S = (s(x,y))$ é de novo uma imagem de valor de níveis de cinza com linhas BR e colunas BS. O valor médio do valor dos níveis de cinza da imagem S é calculado de acordo com o que se segue:

$$m_s = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{BR-1} \sum_{y=0}^{BS-1} s(x,y) \quad (6.3.1)$$

$$M = BS \times BR$$

Através do valor médio de uma imagem, pode-se verificar se a imagem em geral é mais escura ou mais clara.

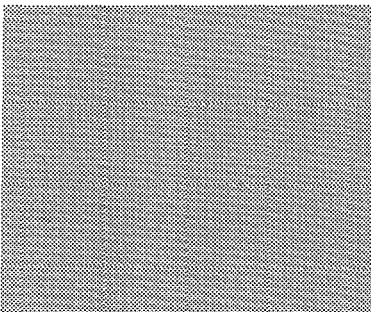


FIGURA 6.3.3: IMAGEM CONSTANTE DE VALOR DE CINZA

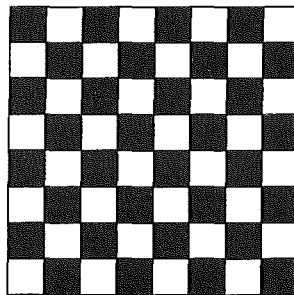


FIGURA 6.3.4: MODELO EM TABULEIRO DE XADREZ

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

Assim, teremos, p. ex., as duas IMAGENS 6.3.3 e 6.3.4 - das quais a IMAGEM 6.3.3 somente contém um valor de cinza de 127 e a IMAGEM 6.3.4 que contém um modelo de tabuleiro de xadrês com valores de cinza de 0 e 254, o mesmo valor médio de 127.

Não é possível fazer qualquer afirmação sobre o contraste a partir do valor médio, e é por isso que são utilizadas para este fim outras grandezas.

6.3.3 CARACTERIZAÇÃO DA IMAGEM

Neste capítulo são tratadas outras grandezas identificativas para uma caracterização detalhada de imagens digitalizadas.

DESVIO QUADRÁTICO MÉDIO

Uma grandeza identificativa que permite fazer afirmações sobre o contraste na imagem é o desvio quadrático médio, dado pela relação

$$q_s = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{BR-1} \sum_{y=0}^{BS-1} (s(x,y) - m_s)^2 \quad (6.3.2)$$

A FIGURA 6.3.3, com um valor constante de níveis de cinza, tem um desvio quadrado médio de $q_s = 0$, enquanto que o modelo de tabuleiro de xadrês da FIGURA 6.3.4 possui um desvio quadrático médio $q_s = 127^2 = 16129$. Quanto mais alto for o desvio quadrático, tanto maior é o contraste. O valor médio e o desvio quadrático médio são simplesmente números das dimensões para a distribuição dos valores de cinza da imagem.

HISTOGRAMA

Um método mais seguro para caracterização da distribuição dos valores de cinza de uma imagem $S = (s(x,y))$ é o dado pelo histograma das frequências relativas de S , representável pela relação

$$p_s(g) = \frac{i_g}{M} \quad g = 0,1,2,3,\dots,255 \quad (6.3.2)$$

Aqui g são os valores de cinza da quantidade de valores de cinza e a frequência do aparecimento do valor de cinza g na imagem S . Dado que o histograma normalizado por meio da porção M de pontos da imagem de S , se aplica

$$\sum_{g=0}^{255} p_s(g) = 1 \quad (6.3.3)$$

O histograma é normalmente representado por diagrama de barras. Como está esquematizado na FIGURA 6.3.5, são registrados na abcissa os valores de cinza g e na ordenada os correspondentes das frequências relativas $p_s(g)$. Na FIGURA 6.3.3, com valor

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

de cinza constante, só surgiria um barra, como está representado.

Um exemplo retirado do exame radioscópico em fundições, e que foi registrado com um aparelho de microfoco a 140 KV, é dado pela FIGURA 6.3.6. Isto mostra uma imagem de tons de cinza de uma coquilha de aço, feita com um conversor de imagem que é utilizado para a fundição em coquilha de metais leves.

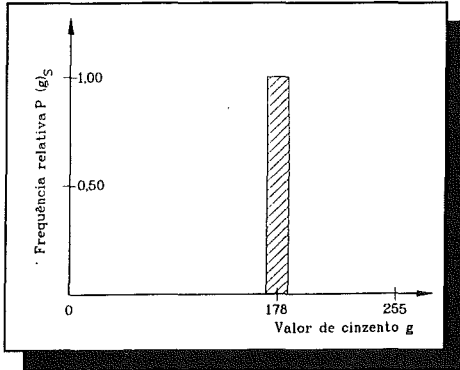


FIGURA 6.3.5: HISTOGRAMA

A parte de aço da coquilha origina uma forte atenuação da radiação e apresenta-se, com isso, enquanto que a parte de metal leve é relativamente clara. Através da FIGURA 6.3.6, foi feito um corte e, para isso, a distribuição de valores de cinza registrados como histograma, que é mostrado na FIGURA 6.3.7. O máximo dos valores de cinza na ordem dos 48 a 139 representa a zona mais escura da parte de aço da coquilha, enquanto que o máximo de 140 a 178 representa a parte mais clara, ou seja, a parte de metal leve. Em princípio, os histogramas podem ser usados para caracterizar imagens e como meio útil de ajuda para uma subsequente preparação da

imagem. O histograma não fornece, no entanto, nenhuma distribuição do valor de cinza da imagem no espaço.

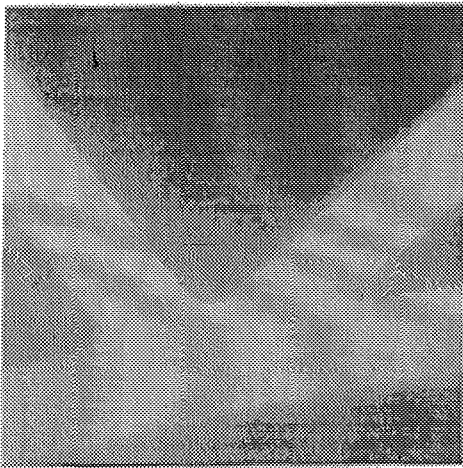


FIGURA 6.3.6: COQUILHA

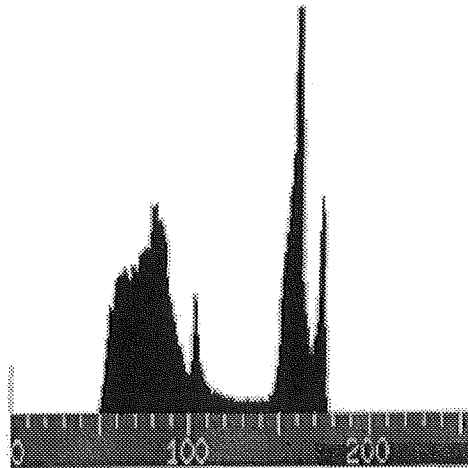


FIGURA 6.3.7: HISTOGRAMA DA COQUILHA

PERFIL E RELEVO DO NÍVEL DE CINZA

Outras representações apropriadas para a caracterização de uma imagem são o perfil e o relevo do nível de cinza. No caso do perfil do nível de cinza, os valores absolutos do nível de cinza ao longo de uma reta da imagem-matriz escolhida ao acaso. A FIGURA 6.3.8

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

mostra o perfil do nível de cinza ao longo de uma reta escolhida na figura 6.3.6, relativa à representação da coquilha.

No caso do relevo do nível de cinza, os valores absolutos de cinza são registrados em duas dimensões sobre uma superfície. Isto é mostrado na FIGURA 6.3.9 para a coquilha (FIGURA 6.3.6).

Esta representação do relevo dos níveis de cinza permite, por um lado, uma interpretação da mudança local do contraste e, por outro, oferece a possibilidade de determinar, através do ruído de fundo existente em uma imagem digitalizada, as possíveis diferenças de exposição à radiação.

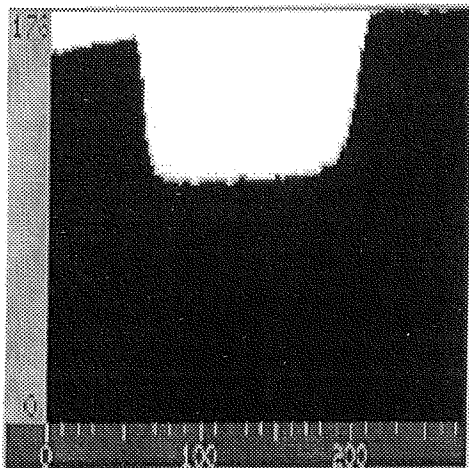


FIGURA 6.3.8: PERFIL DO NÍVEL DE CINZA DA COQUILHA

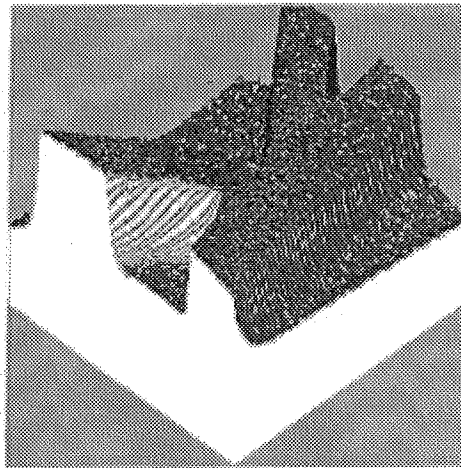


FIGURA 6.3.9: RELEVO DO NÍVEL DE CINZA DA COQUILHA

6.3.4 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DA IMAGEM

A vantagem essencial do processamento digital da imagem é que os dados da imagem existentes podem ser processados por meio de operações de acordo com o motivo da aplicação desejada. Desta forma, é possível realizar operações, por exemplo, como as seguintes:

- Aumento do contraste;
- Minimização de perturbações;
- Indicação dos processos dependentes do tempo entre duas imagens

Com isto, obtém-se a possibilidade de realçar as informações de uma imagem e atenuar as perturbações na informação.

Agora vamos tratar somente de algumas possibilidades de operação que têm interesse especial para a radioscopia.

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

OPERAÇÕES ARITMÉTICAS PONTUAIS

Estas operações permitem uma adição, uma subtração, uma multiplicação e uma divisão ponto a ponto. Isto oferece a possibilidade, tanto de somar aritmeticamente duas imagens, como ainda de trabalhar aritmeticamente imagens isoladas com fatores constantes. A adição ou a subtração de uma constante dá o deslocamento de todos os níveis de cinza para valores maiores ou menores. Por meio de tais operações, as imagens podem ser clareadas (adição) ou escurecidas (subtração).

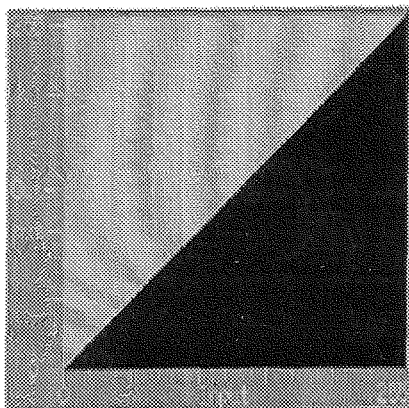
O resultado da subtração de duas imagens registradas, uma a seguir à outra, contém as suas diferenças. Através desta operação, é possível dar destaque aos processos dinâmicos de imagens de séries de tempo. A multiplicação ou a divisão de uma imagem com uma constante dá a extensão ou a deformação do âmbito do nível de cinza.

ESCALONAMENTO

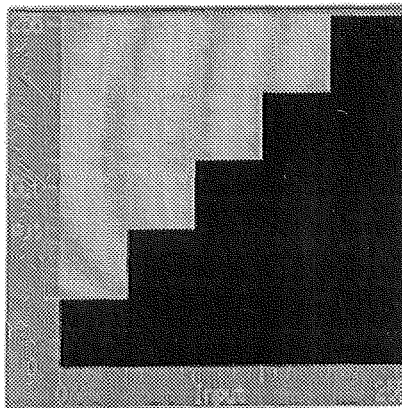
Sob escalonamento, compreende-se, no tratamento digital de imagens, a extensão ou a deformação do âmbito do nível de cinza total ou de uma parte do existente. Podem ser utilizados os seguintes métodos:

- Escalonamento linear
- Equalização
- Binarização
- Tabela Look-Up

O escalonamento estende ou deforma o valor total do nível de cinza dentro de limites previamente fixados. Sob equalização se compreende a correspondência dos valores do nível de cinza em um número livremente escolhido de classes de níveis de cinza. Disto resulta uma imagem final, cheia de contraste, cujo número dos níveis de cinza corresponde ao número das classes de níveis de cinza escolhidas. A binarização é uma redução das quantidades de níveis de cinza de uma imagem para dois níveis de cinza. Todos os níveis de cinza abaixo de um limite definido são aqui colocados a zero (preto); a todos os outros níveis de cinza, é feita uma correspondência ao nível de cinza 255 (branco). Uma tal imagem binária apresenta muito contraste e possibilita uma fácil interpretação do conteúdo da imagem.



**FIGURA 6.3.10: TABELA
PADRÃO LOOK-UP**



**FIGURA 6.3.11: TABELA LOOK
UP LIVREMENTE DEFINIDA**

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

Uma tabela Look-Up oferece a possibilidade de fazer depender, a cada nível de cinza de entrada existente (eixo X) um nível de cinza de saída livremente definido (eixo Y). A FIGURA 6.3.10 mostra uma tabela de Look-Up como a que é usada nos programas padrão de tratamento de imagem. A dependência pode ser escolhida também livremente. Outro exemplo é mostrado na FIGURA 6.3.11.

Enquanto que, a tabela linear de Look-Up representada na FIGURA 6.3.10, a cada nível de cinza de entrada corresponde um nível de cinza de saída da mesma grandeza, os 256 níveis de cinza de entrada da tabela de Look-Up livremente definida dão cinco níveis de cinza de saída.

OPERAÇÕES LÓGICAS

Para aumentar as informações visuais fornecidas pela imagem, podem ser aplicadas também operações lógicas. As operações lógicas conhecidas da técnica digital (Álgebra de Bool) funcionam de forma pontual ou Pixel, assim como os operadores aritméticos. A diferença mais importante entre os dois operadores reside no fato de que os operadores lógicos comparam os níveis de cinza de 8 bit de entrada, não na totalidade mas bit a bit. Os operadores lógicos normalmente aplicados são:

- E (AND) lógico
- OU (OR) lógico
- OU EXCLUSIVO (XOR) lógico

Através da aplicação de uma operação de inversão, poderão ser aplicadas as negações NÃO-E, NÃO-OU, e NÃO-EXCLUSIVO-OU. Os valores dos resultados dos referidos operadores estão representados na TABELA 6.3.1.

Possibilidades de combinação de dois bits de entrada		Resultado das operações lógicas bit					
Bit 1	Bit 2	AND	OR	XOR	NOT AND	NOT OR	NOT XOR
0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	1	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0	1

TABELA 6.3.1: RESULTADOS DE OPERADORES LÓGICOS

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

Para poder aproveitar todo o espaço de nível de cinza de 0 a 255, é necessário proceder-se a uma extensão do espaço de níveis de cinza. Mediante um "software" de análise da imagem, poder-se, na extensão, aplicar os resultados dos níveis de cinza obtidos no histograma como valores máximos ou mínimos. O resultado do escalamento está descrito na FIGURA 6.3.14. Continua a existir uma perturbação provocada pela transformação da imagem e pela exposição não uniforme distribuída. Estas faltas de homogeneidade nos efeitos de exposição provocam certas irregularidades nos níveis de cinza. Esta perturbação susceptível de alterar a informação de imagem poderá ser eliminada, através da aplicação de duas operações pixel aritméticas, nomeadamente, em primeiro lugar, através de uma subtracção com uma imagem de referência contendo um efeito idêntico de exposição e, em segundo lugar, através de uma adição posterior de um nível de cinza constante.

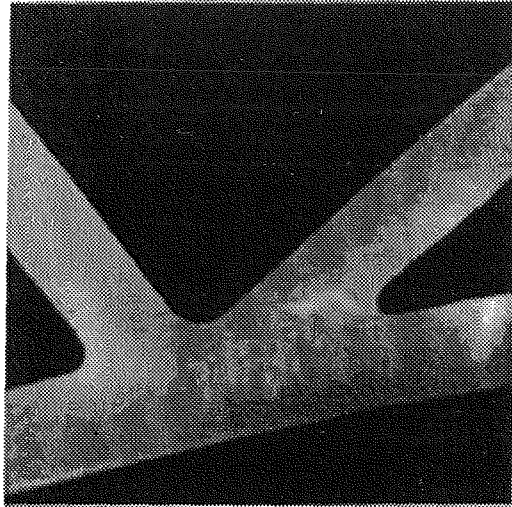


FIGURA 6.3.14: EXTENSÃO DE NÍVEL DE CINZA

O resultado desta operação, que deverá ser aplicada antes da extensão do espaço de nível de cinza, é mostrado na FIGURA 6.3.15.

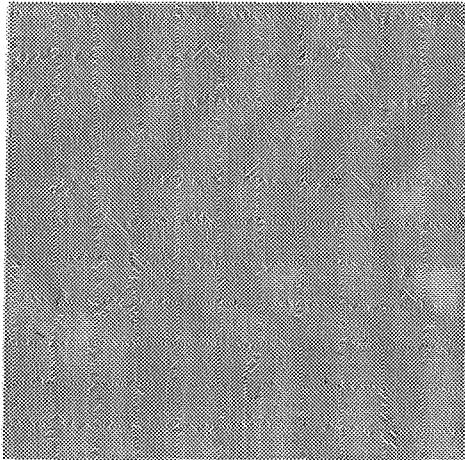


FIGURA 6.3.15: ELIMINAÇÃO DE PERTURBAÇÕES

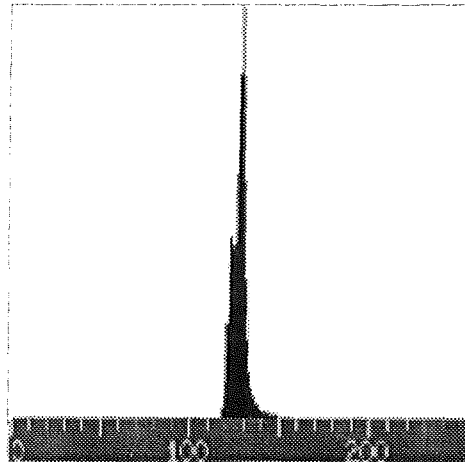


FIGURA 6.3.16: HISTOGRAMA DA FIGURA 6.3.15

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

AUMENTO DE CONTRASTE

Depois da eliminação da falta de homogeneidade de iluminação, deverá proceder a extensão do nível de cinza, extensão esta necessária para o aumento do contraste. Para se poder analisar a distribuição dos níveis de cinza constantes da FIGURA 6.3.15, deverá proceder-se, em primeiro lugar, a confecção do histograma que consta da FIGURA 6.3.16. As operações aritméticas já deslocaram os níveis de cinza mínimos e máximos da imagem eliminada de anomalias para valores entre 99 e 175. Do histograma, consta o valor máximo absoluto de 128 para o nível de cinza. A imagem resultado da extensão de nível de cinza é mostrada na imagem 6.3.17. Para poder comparar melhor os resultados, foi colocada, ao lado na FIGURA 6.3.18, mais uma vez a figura inicial (FIGURA 6.3.12). É evidente que o contraste é consideravelmente mais nítido agora. Depois das imagens obtidas terem

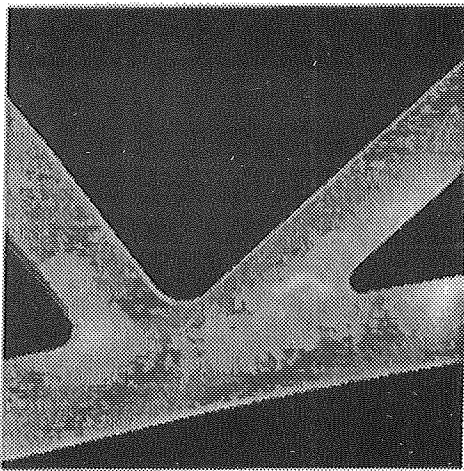


FIGURA 6.3.17: IMAGEM DO RESULTADO FINAL

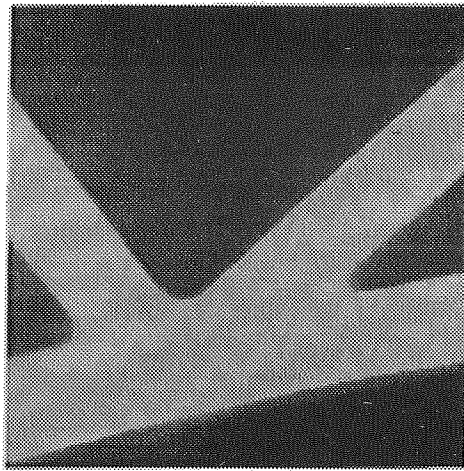


FIGURA 6.3.18: IMAGEM INICIAL

passado as operações de imagem descritas, poderão ser analisadas e impressas mediante uma impressora video. É aconselhável a confecção de cópias de segurança dos dados digitais de imagem, cópias estas que poderão posteriormente ser utilizadas para a documentação de imagens. Deverá ter-se em conta a quantidade relativamente alta de dados, patente em imagens digitalizadas. Os valores são normalmente de 17 MByte por imagem.

6.3.6 INTERPRETAÇÃO AUTOMATIZADA DAS IMAGENS

Devido à existência de imagens digitalizadas, poderá proceder-se à interpretação das imagens obtidas recorrendo também à ajuda de programas de computador, isto é, de forma automatizada. Devido à grande quantidade de formas de avaliação, a interpretação das imagens deverá ser feita de forma adaptada à respectiva circunstância. Apesar da especificidade de cada problema em determinado caso, pode-se recorrer à formulação de pontos gerais de referência, que são de grande importância para tarefas como esta.

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

É aconselhável uma prova totalmente automatizada quando se tratar de grande número de peças a testar que possuem funções importantes para a segurança e, com isto, estejam sujeitas às normas de qualidade. Para tais elementos, em regra, está prescrito proceder a um exame cem por cento correto para garantir a exatidão funcional de cada uma das peças.

Requisitos para o teste automático:

- Reconhecimento e classificação de todos os defeitos que, e acordo com as normas, possam levar a uma exclusão;
- Pequena quota de pseudo-exclusões passíveis de serem ignoradas, isto é, o número de peças que são classificadas de forma errada como peças a excluir pelo sistema de teste;
- Alta confiabilidade do sistema. O sistema terá que estar disponível e funcional sem limitações.
- Alta velocidade de teste que atinja, pelo menos, o valor do teste visual. Por motivos de economia, há grandes vantagens em trabalhar com uma alta velocidade de teste.

As avaliações metódicas para a interpretação da imagem digitalizada são de vários tipos:

COMPARAÇÃO DE IMÁGENS: Um método muito rápido e simples é, em princípio, a comparação da imagem do teste com uma imagem de referência. A condição para uma aplicação com êxito deste método é alta precisão no posicionamento de ambas as imagens e uma geometria relativamente simples da peça a ensaiar.

RECONHECIMENTO DA ESTRUTURA: Neste método, dispensa-se o conhecimento da geometria das peças na imagem de referência e analisa-se o teor da informação fornecida pela imagem com vista ao reconhecimento das características da estrutura. O processo deste princípio está esquematizado na FIGURA 6.3.19.

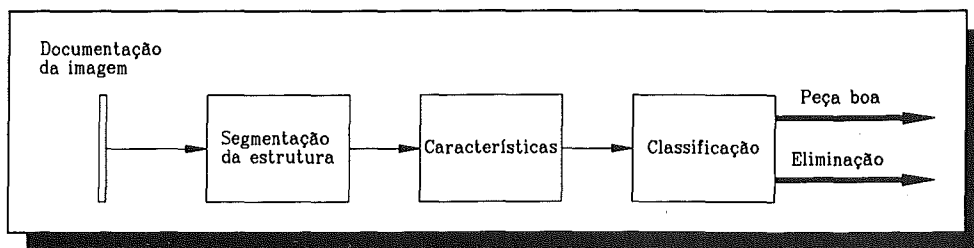


FIGURA 6.3.19: INTERPRETAÇÃO POR MEIO DO RECONHECIMENTO DA ESTRUTURA

Partindo da imagem digitalizada, procedemos a uma segmentação da estrutura. Esta segmentação é usada normalmente no tratamento digital de imagens quando se tem que proceder a uma classificação do teor da imagem baseada nas propriedades relativas à estrutura. Na segmentação em radioscopias industriais, podem surgir nas imagens, de acordo

6.3 TRATAMENTO DIGITAL DA IMAGEM

com a peça a ensaiar, estruturas de contraste muito pequeno mas também de contraste muito grande.

Para formação das propriedades com vista a uma classificação dos defeitos, é necessária, porém, uma grande segurança e qualidade do reconhecimento da estrutura. O trabalho é feito com histogramas locais, valores dinâmicos limite, funções de valores limite e classificadores de valores limite. Com isto, consegue-se, em muitos casos, separar as estruturas de construção e de defeito umas das outras (cantos, espaços ociosos, ligações, etc.). A interpretação das estruturas do defeito permite uma classificação dos defeitos e, assim, uma seleção das peças a ensaiar boas e ruins.

Ambos os métodos tratados representam duas avaliações muito diferentes. De acordo com a peça a ensaiar e os defeitos a classificar, são usadas também combinações de ambos os processos. Naturalmente, que um aperfeiçoamento da técnica digital de tratamento de imagens e a técnica de computadores vai levar a novos campos de aplicação e a melhoramentos.

Até aqui, sobretudo, os sistemas totalmente automáticos de teste são aplicados ao exame radioscópico de peças fundidas de metal leve da indústria automobilística. Aqui trata-se, muitas vezes, de peças importantes para a segurança, como, p. ex., rodas e caixa de direção, que têm que obedecer às normas de qualidade. O número de peças a testar pertencentes ao mesmo tipo é muito alto, o que faz com que o teste automático seja interessante do ponto de vista econômico. As experiências que foram feitas na aplicação industrial foram claramente positivas e a comparação com os testes automáticos com as interpretações visuais e individuais feitas pelos examinadores constituem seguramente um campo que, a par do aperfeiçoamento deste método, é também interessante para proceder a testes sem perturbações em relação ao controle e segurança da qualidade.

Neste campo, foram feitas as primeiras comparações entre os resultados obtidos por diversos examinadores e equipamentos com a interpretação automática. O resultado depende de um número de condições secundárias. Quanto melhor formulados quantitativamente forem os critérios de interpretação, tanto melhor será o resultado da interpretação automática. Por este motivo, é necessário um enorme esforço.

Este investimento traz recompensas, na maioria dos casos, e é rentável mesmo em casos em que seja necessário um sistema automatizado com um alto número de operações, uma vez que a interpretação objetiva de defeitos, ao contrário da interpretação subjetiva, tem grandes vantagens no que diz respeito à comparação e à faculdade de evitar erros, o que ficou claramente provado em algumas comparações. É de se esperar que consigam, no futuro, grandes melhoramentos no processo "teach-in".

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

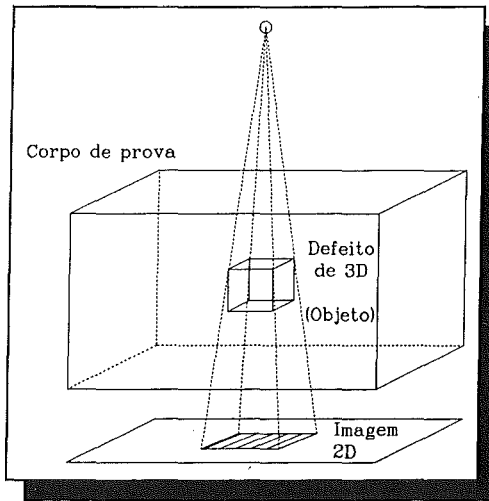


FIGURA 6.4.1: PROJEÇÃO BIDIMENSIONAL DE DEFEITOS

de apenas uma direção mas, sim, de várias direções. Existem, para isso, em princípio, várias possibilidades, isto é, rodando o corpo de prova segundo a direção de radiação (rotação), ou, então, empurrando-o verticalmente em direção a ela (translação). Estas duas possibilidades estão descritas na FIGURA 6.4.2. Trata-se de um procedimento idêntico à

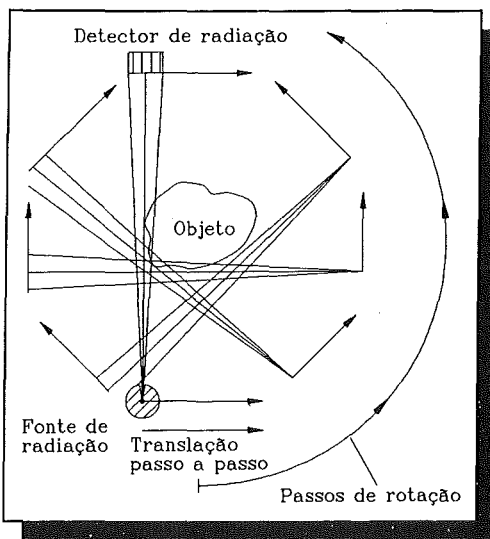


FIGURA 6.4.2: PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA TOMOGRAFIA

6.4 TOMOGRAFIA

Na radioscopia, na representação da radiação, que é tratada no capítulo 3.5, é feita uma representação bidimensional de um defeito tridimensional ao nível da imagem. Isto está esquematizado na FIGURA 6.4.1. As informações que podem ser obtidas na sequência da interpretação da imagem dizem respeito à existência de defeitos, assim como as respectivas dimensões perpendiculares a direção da radiação.

Não poderão ser obtidas informações referentes ao seu posicionamento assim como a sua forma tridimensional. Esta informação pode ser, no entanto, muito importante para a avaliação do defeito existente.

É possível obter informações sobre o posicionamento e a forma do defeito se não se proceder a projeção do defeito a partir de apenas uma direção mas, sim, de várias direções. Existem, para isso, em princípio, várias possibilidades, isto é, rodando o corpo de prova segundo a direção de radiação (rotação), ou, então, empurrando-o verticalmente em direção a ela (translação). Estas duas possibilidades estão descritas na FIGURA 6.4.2. Trata-se de um procedimento idêntico à microscopia de cortes de imagens, no qual as imagens de projeção são feitas camada por camada. Este método é denominado tomografia, visto que o termo grego para camada é "TOMOS". A primeira tomografia de forma computadorizada (computerised tomography, CT) foi efetuada em 1979 por MacCormack e Hounsfield e foi aperfeiçoada para fins médicos.

6.4.1 PRINCÍPIOS DO MÉTODO CT

Os princípios do método CT baseiam-se na medição da atenuação da radiação nas diferentes fatias do corpo de prova. Isto está representado de forma esquemática na FIGURA 6.4.2.

A lei exponencial da atenuação, descrita no capítulo 3.2.2, (ver equação 3.2.5) é a base para a medição da atenuação da radiação. O objetivo do método CT é obter uma representação tridimensional, sobretudo dos

6.4 TOMOGRAFIA

defeitos do corpo de prova, mediante a atenuação da radiação ao longo de trajetos diferentes.

O princípio do processo de funcionamento está representado na FIGURA 6.4.3.

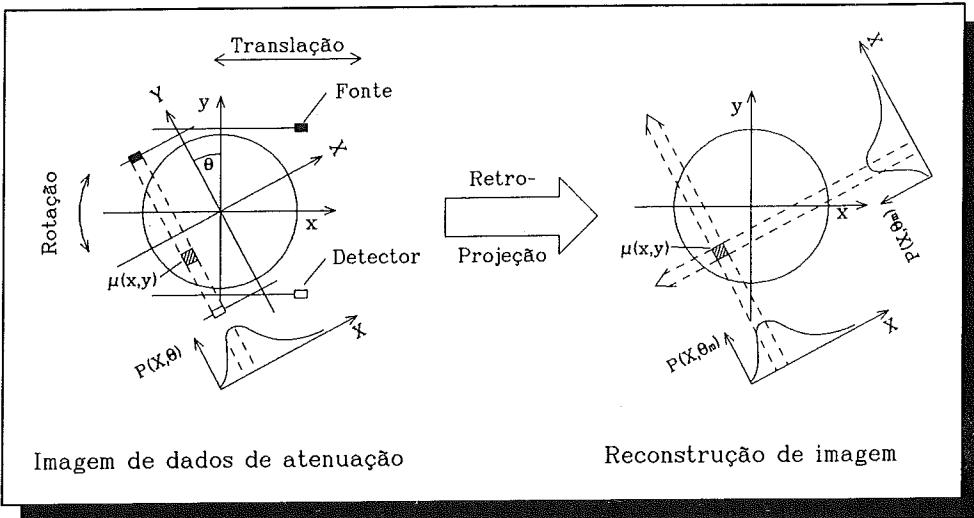


FIGURA 6.4.3: METODOLOGIA DA TOMOGRAFIA COMPUTORIZADA

A fonte de radiação e o detector de radiação são movidos ao longo e em volta do corpo de prova e é medida, em cada passo, a atenuação da radiação. De acordo com a equação (3.2.5), a atenuação ocorre segundo a equação:

$$I_s = I_s(0) \exp\left(-\int_{-\infty}^{\infty} \mu(x,y) dw\right) \quad (6.4.1)$$

considerando

$I_s(0)$	=	Intensidade do feixe de radiação que incide no corpo de prova;
I_s	=	Intensidade de radiação que chega ao detector;
$\mu(x,y)$	=	Coefficiente da atenuação do elemento (x,y) ;
w	=	Trajeto da radiação através do corpo de prova;
x,y, X,Y	=	Coordenadas cartesianas;
θ	=	Ângulo de rotação;

Da equação (6.4.1), é possível calcular, como se segue, a relação logarítmica da intensidade de feixe de radiação I_s e $I_s(0)$:

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

$$P(X, \theta) = \ln \left(\frac{I_s(0)}{I_s} \right) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(X \cos \theta - Y \sin \theta, X \sin \theta + Y \cos \theta) dw \quad (6.4.2)$$

O método mais simples de reconstrução da imagem a partir de valores de P é a chamado "retro-projeção", que está representado na FIGURA 6.4.3. Neste processo muito simples, surge uma desfocagem da imagem que se pode reduzir com a ajuda da função de filtragem $\varphi(x)$. A reconstrução da imagem se faz, então, para a obtenção dos coeficientes de atenuação $\mu(x,y)$, a partir da seguinte convolução integral:

$$\mu(x,y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(\dot{X}, \theta) \cdot \varphi(X-\dot{X}) d\dot{X} d\theta \quad (6.4.3)$$

A tomografia computadorizada fornece, desta forma, uma imagem de uma fatia do objeto a examinar na forma dos seus coeficientes de atenuação dependentes da localização. Foram desenvolvidos vários algoritmos de reconstrução que permitem obter rapidamente uma imagem.

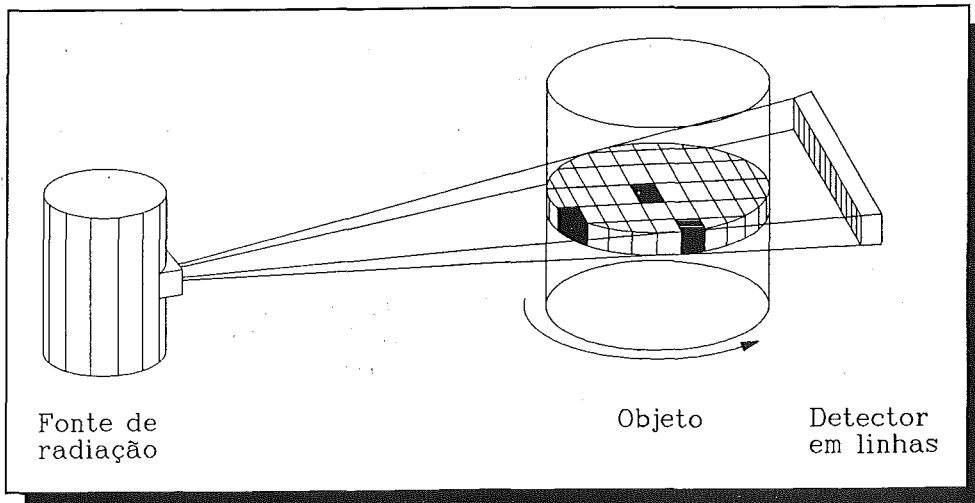


FIGURA 6.4.4: TOMOGRAFIA 2D

6.4 TOMOGRAFIA

Em princípio, há uma diferença entre a tomografia bidimensional (2D) e a tridimensional (3D). Na tomografia bidimensional, com a ajuda de uma fonte de radiação e um detector linear é medido o nível de corte transversal, como está representado na FIGURA 6.4.4. O resultado da medição é uma imagem do corte transversal, na qual cada ponto da imagem representa um elemento volumétrico no objeto.

A grandeza do elemento volumétrico, que é determinante para a resolução local, depende principalmente das propriedades da representação do sistema (ver capítulo 3.5), isto é, sobretudo do tamanho do foco de raios X, das dimensões dos detectores e da ampliação. Um exame completo de corpos de prova por meio de várias imagens parciais paralelas necessita de um grande dispêndio de tempo. Por este motivo, é aconselhável aplicar aqui a tomografia 3D. O modo correspondente de funcionamento está descrito na FIGURA 6.4.5. Mediante a utilização de um detector de superfície, são, ao mesmo tempo, registradas várias camadas de corte aproveitando-se o cone completo de radiação.

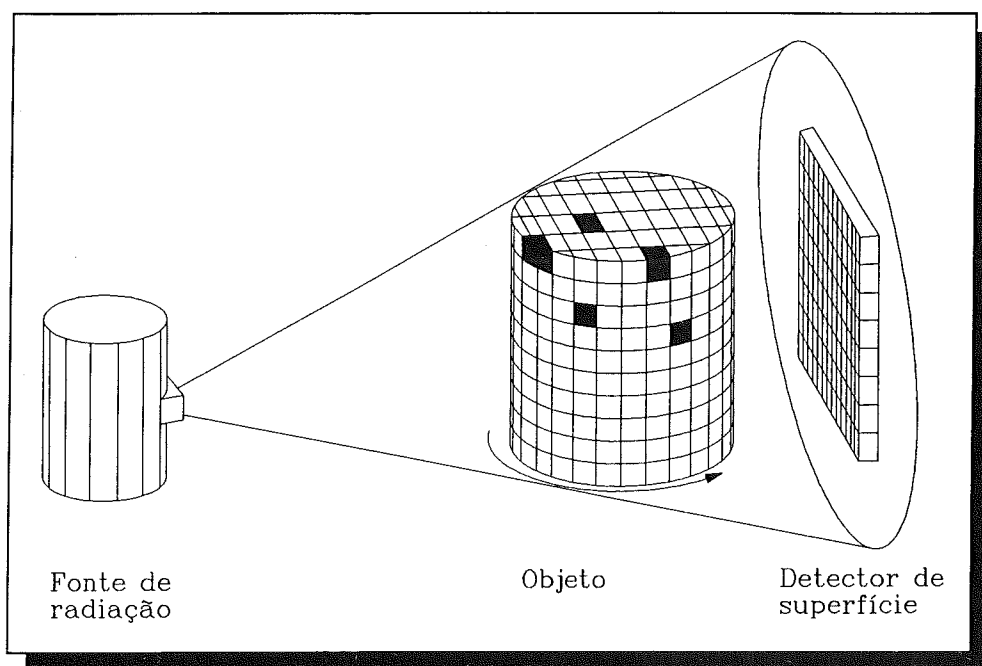


FIGURA 6.4.5: TOMOGRAFIA 3D

6.4.2 APLICAÇÕES DO MÉTODO CT

Para a obtenção de imagens tridimensionais (método 3D) mediante tomografia computadorizada, é necessário um conjunto mais complexo de aparelhos do que para a obtenção de projeções normais bidimensionais. Na FIGURA 6.4.6, é mostrada a composição de um sistema 3D. Servem de fonte de radiação os tubos de microfoco com um pequeno foco de raios X, que foram tratados no capítulo 5.1. Em caso de utilização de um detector de superfície no conversor de imagens (ver capítulo 6.2), poderá ser aproveitada a radiação da forma cônica da fonte de radiação, conseguindo-se, assim, uma reconstrução de

6 TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES DO TESTE

muitas fatias de corte. Caso o detector de superfície disponha de uma sensibilidade uniforme, este processo fornece uma resolução local igual em todas as três direções. Poderá ser utilizado um programa gráfico apropriado o que possibilitará a representação de camadas de corte ao acaso por meio da reconstrução do objeto.

A grande quantidade de dados de medição, que é necessário obter para as diversas fatias de corte (várias centenas de megabytes por medição), e a complexidade dos algoritmos de reconstrução para a confecção de imagens com os programas com vista à visualização necessitam computadores rápidos de alta capacidade. As aplicações da tomografia computadorizada ainda irá aproveitar muito mais de toda a evolução neste campo, de forma que a sua aplicação no futuro seguramente irá aumentar. É exatamente no caso de elementos relevantes para a segurança que os conhecimentos da posição dos defeitos e a sua geometria são de importância determinante, para assim, mediante cálculos de mecânica de fratura, se conseguirem fazer afirmações sobre a capacidade de tolerância de defeitos. Mas a tomografia computadorizada tem um campo de aplicação mais vasto na análise de materiais compostos e no desenvolvimento de novos materiais.

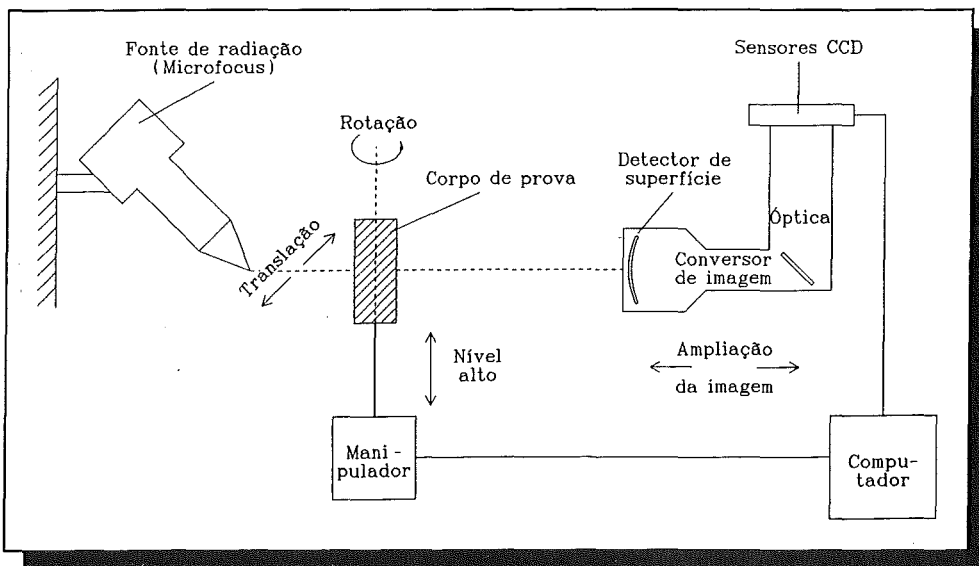


FIGURA 6.4.6: PRINCÍPIO DA COMPOSIÇÃO DE UM APARELHO DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

LAMINOGRRAFIA

Como se pode verificar na figura acima representada (ver FIGURA 6.4.1), o exame radioscópico convencional fornece uma imagem de projeção bidimensional do objeto atravessado pelos raios X. Devido à sobreposição das estruturas internas do objeto, perdem-se muitas informações de profundidade. Este fenômeno encontra-se descrito na FIGURA 6.4.7, (parte A).

Entre esta representação bidimensional e a representação tridimensional da tomografia, está posicionada a estereoradioscopia que também é denominada LAMINOGRRAFIA. O seu modo funcional encontra-se descrito na FIGURA 6.4.7 (parte B). A sua aplicação é menos

6.4 TOMOGRAFIA

complexa que na tomografia que, por motivos de comparação, foi novamente descrita na FIGURA 6.4.7 (parte C). Por isso, a laminografia constitui uma possibilidade interessante em casos especiais.

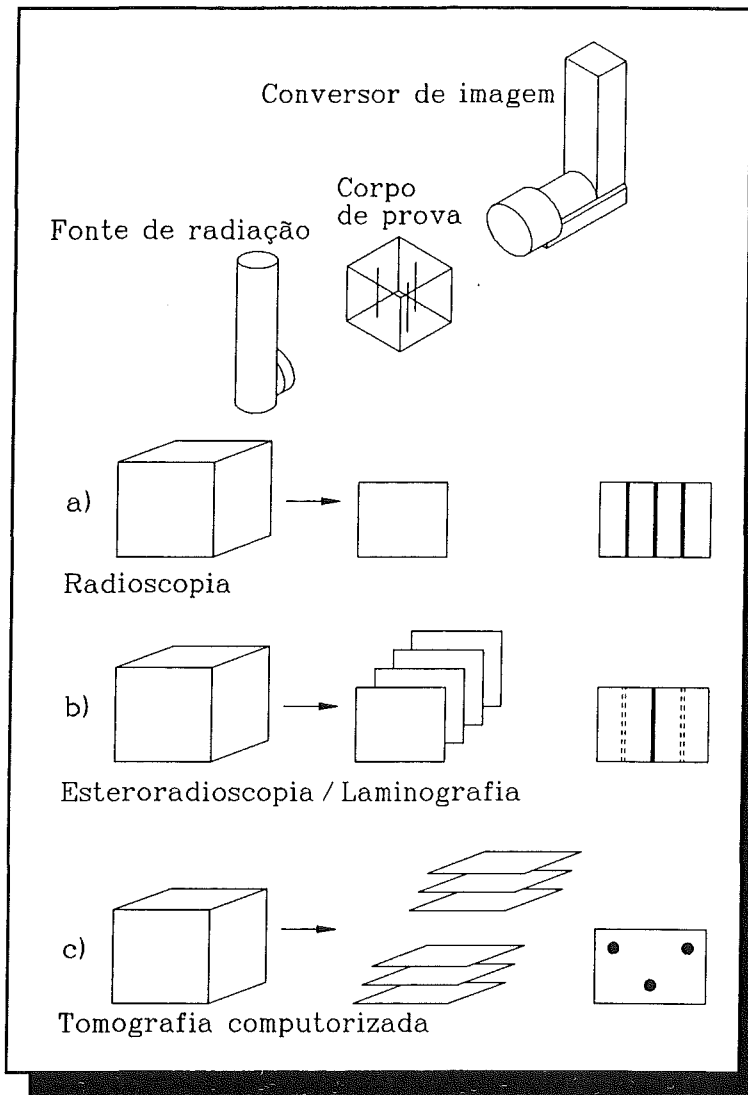


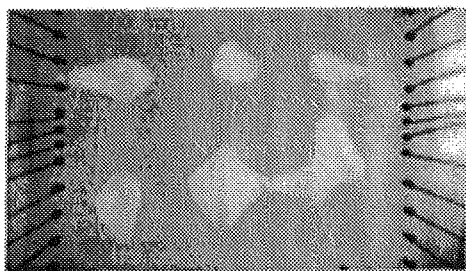
FIGURA 6.4.7: LAMINOGRAFIA

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

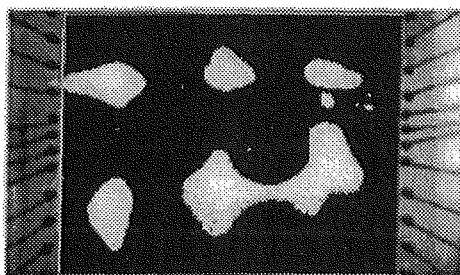
Neste capítulo serão apresentados, resumidamente, alguns exemplos selecionados para a aplicação da técnica de microfoco em diferentes áreas.

7.1 TÉCNICA DE SEMICONdutoRES

A técnica de semicondutores constitui uma área muito vasta de aplicação da técnica de microfoco e de raios X, como ensaio não destrutivo. Trata-se, neste contexto, de assim chamada "microscopia de raios X". Na sua elaboração, é possível examinar sem dificuldades composições de solda de semicondutores e de substratos, assim como de ligas eutéticas e colagens de epoxi. Na FIGURAS 7.1.1 e 7.1.2, está representado um exemplo de uma colagem de epoxi com defeitos. A FIGURA 7.1.1 mostra a imagem original e a FIGURA 7.1.2 mostra a mesma imagem com algum aumento de contraste para assim poder analisar melhor os defeitos na superfície de ligação. A percentagem da superfície que apresenta defeitos determina a longevidade desta peça de construção.



**FIGURA 7.1.1: LIGAÇÃO DEFEITUOSA
FOTOGRAFIA ORIGINAL**
(Fonte FEINFOCUS)



**FIGURA 7.1.2: LIGAÇÃO DEFEITUOSA
AUMENTO DO CONTRASTE**
(Fonte FEINFOCUS)

Como foi mostrado no capítulo 3.5, com a técnica de raios X com microfoco consegue-se perfeitamente uma ampliação da imagem. Com os correspondentes fatores de ampliação é possível, por meio de uma microscopia de raios X, controlar também a qualidade "Bonding". Para isso, as FIGURAS 7.1.3 e 7.1.4 mostram um exemplo.

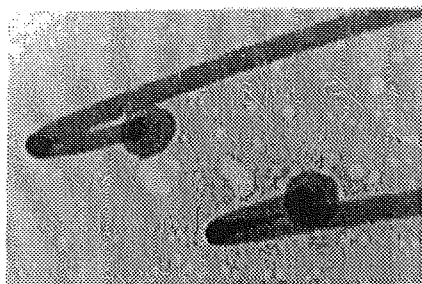


FIGURA 7.1.3: BALL-BONDING FOTOGRAFIA ORIGINAL (Fonte Feinfocus)

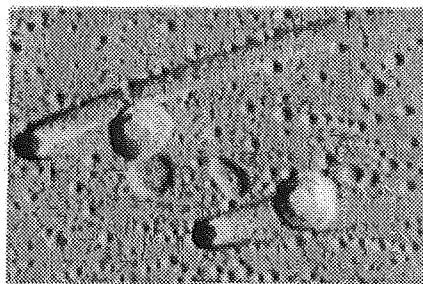


FIGURA 7.1.4: BALL-BONDING PSEUDO EFEITO 3D (Fonte FEINFOCUS)

7.1 TÉCNICA DE SEMICONDUCTORES

Na FIGURA 7.1.3, está novamente representada uma fotografia original, enquanto que na FIGURA 7.1.4, para melhor visualização, é mostrada uma representação pseudo tridimensional. São claramente visíveis os locais defeituosos (voids), que aparecem no processo "Bonding". Como se pode ver nos exemplos, o método permite proceder diretamente a controles de amostras tiradas ao acaso ou em série, segundo o processo de Bonding, antes de continuar com o tratamento que é tão dispendioso. No entanto, estes controles não se fazem somente na fabricação, mas também em elementos já prontos ou blindados, p. ex. no controle de entrada de mercadorias no fabricante de aparelhos. Devido à alta resolução mediante ampliação da imagem, a microscopia por raios X permite, além disso, proceder a exames dos chamados DEFEITOS DE ICs (Circuitos Impressos) blindados: Compreende-se, com isto, uma aproximação não permitida de dois fios de Bond ao proceder à blindagem. Se estes fios se aproximarem da ordem dos microns, pode se ocasionar um curto-circuito em serviço posterior por migração iônica no CI. Defeitos do tipo descrito representam um perigo latente originando posteriores avarias. O teste microscópico por raios X, individual para cada elemento construtivo, permite fazer afirmações mais seguras sobre o comportamento a longo prazo em serviço, do que no caso das afirmações estatísticas feitas após teste de "Burn-in" ou no caso dos métodos clássicos elétricos de teste.

Inspecção de pontos de solda SMD

Por meio da microscopia por raios X, é possível proceder simples e rapidamente a testes de defeitos nos pontos de solda em circuitos SMD (Surface Mounted Device). Dado que na técnica de SMD, as costuras de solda ficam, muitas vezes, por baixo dos elementos construtivos, os métodos de teste ótico não são suficientes para proceder uma inspeção segura. Aos tipos de defeitos que podem ser registrados por meio de microscopia por raios X pertencem:

- Bolhas de gás, porosidade
- Má irrigação
- Fios gotas de solda
- Solda demasiada ou solda diminuta
- Ligações tortas, formação de pontes
- Rupturas e fraturas
- Deslocação de elementos construtivos

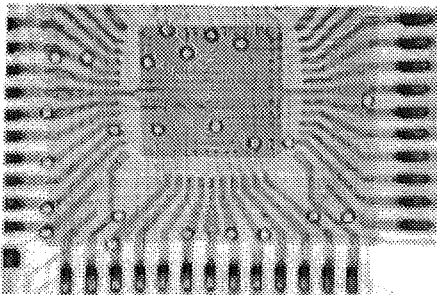


FIGURA 7.1.5: PLACA DE CIRCUITOS IMPRESSOS, TOTALIDADE
(Fonte FEINFOCUS)

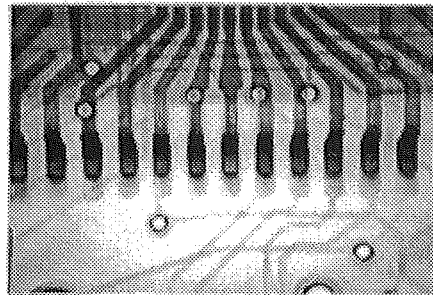


FIGURA 7.1.6: PLACA DE CIRCUITOS IMPRESSOS, CORTE
(Fonte FEINFOCUS)

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

No exemplo seguinte, serão apresentadas as possibilidades de inspeção de pontos de solda por microfoco, explicados por meio de um caso típico.

A FIGURA 7.1.5 mostra a fotografia original de uma placa de circuito impresso, cujos pontos de solda foram submetidos a uma inspeção. Com a ajuda de uma primeira ampliação da imagem (ver capítulo 3.5), está representado na FIGURA 7.1.6 um corte da placa de circuito impresso. Uma vez que são possíveis várias ampliações sem grandes perdas da resolução local, podem ser representados detalhadamente grupos de pontos de solda que vão ser examinados, o que se reconhece perfeitamente na fotografia original mostrada na FIGURA 7.1.7. Esta imagem original pode agora continuar a ser tratada mediante o processo de tratamento digital de imagem, como ficou descrito no capítulo 6.3, para se obter uma interpretação da imagem e dos defeitos tão boa quanto possível. Na FIGURA 7.1.8, é mostrado o resultado de um aumento de contraste para fazer sobressair claramente pontos defeituosos na solda.

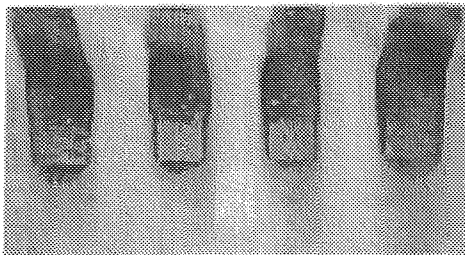


FIGURA 7.1.7: GRUPO DE PONTOS DE SOLDA, FOTOGRAFIA ORIGINAL
(Fonte FEINFOKUS)

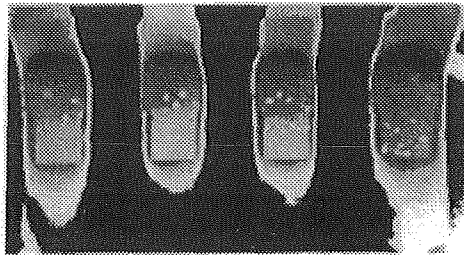


FIGURA 7.1.8: GRUPO DE PONTOS DE SOLDA, AUMENTO DE CONTRASTE
(Fonte FEINFOCUS)

A utilização de um filtro de bordas pode ser vista na FIGURA 7.1.9. A melhoria da imagem é claramente visível. O resultado da utilização de um filtro de extração de bordas é mostrado como representação em positivo na FIGURA 7.1.10.

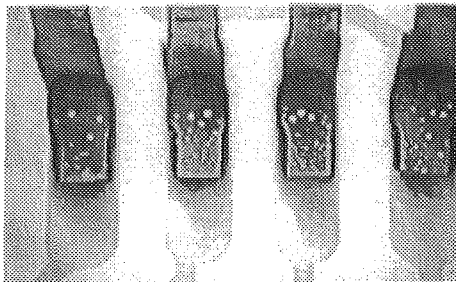


FIGURA 7.1.9: GRUPO DE PONTOS DE SOLDA, FILTRO DE BORDA
(Fonte FEINFOCUS)

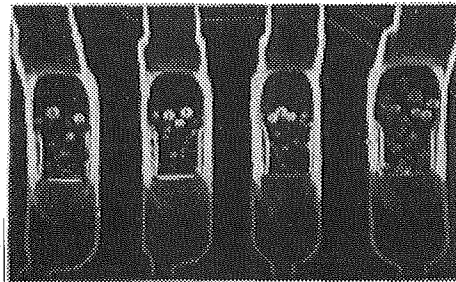


FIGURA 7.1.10: GRUPO DE PONTOS DE SOLDA, FILTRO DE EXTRAÇÃO DE BORDAS
(Fonte FEINFOCUS)

Também pode ser escolhida uma representação em negativo da fotografia, como a que é mostrada na FIGURA 7.1.11, ou uma representação com pseudo-efeito 3D, como a que é mostrada na FIGURA 7.1.12. Nestes exemplos, é muito claro que a técnica de microfoco com tratamento adicional representa um processo rápido e seguro de exame de pontos de

7.1 TÉCNICA DE SEMICONDUTORES

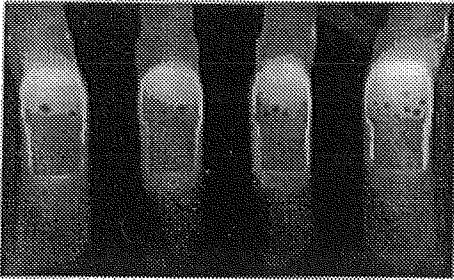


FIGURA 7.1.11: GRUPOS DE PONTOS DE SOLDA, REPRESENTAÇÃO EM NEGATIVO
(Fonte FEINFOCUS)

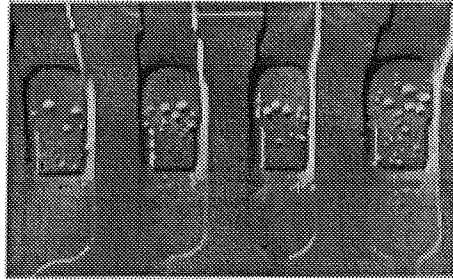


FIGURA 7.1.12: GRUPO DE PONTOS DE SOLDA, PSEUDO-EFEITO 3D
(Fonte FEINFOCUS)

solda.

Semicondutores de alta potência

A montagem de semicondutores de alta potência em corpos de refrigeração faz-se por bonderização, na qual o contato entre o semiconductor e o corpo de refrigeração terá que ser muito bom, para transportar seguramente a potência térmica do semiconductor ao corpo de refrigeração. Para isto, é necessária uma alta qualidade de "BONDERIZAÇÃO". Superfícies relativamente pequenas de ligações defeituosas já podem levar a avarias posteriores devido à uma capacidade condutora pior provocada por temperaturas demasiado altas no semiconductor. A microscopia por raios X permite também aqui aplicar rápida e seguramente a um método de teste para "BONDERIZAÇÃO". Um exemplo retirado da fabricação de semicondutores é mostrado na FIGURA 7.1.13 e na FIGURA 7.1.14. A FIGURA 7.1.13 mostra o semiconductor. Na fabricação, é testada a "BONDERIZAÇÃO" diretamente no final do processo. Na FIGURA 7.1.14, é mostrada a fotografia da "BONDERIZAÇÃO". As zonas claras são pontos defeituosos sem ligação entre o Chip e corpo de refrigeração. Se o equipamento de teste possuir um sistema de microfoco e um sistema de manuseamento relativos ao teste de semicondutores, então podem ser obtidas transferências de dados relativos a até 2.500 elementos construídos por hora.

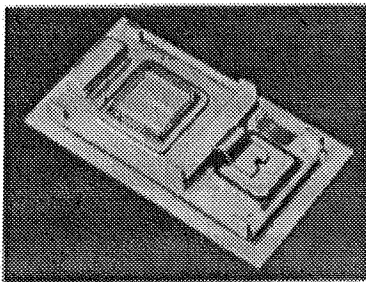


FIGURA 7.1.13: SEMICONDUTOR DE ALTA POTENCIA
(Fonte FEINFOCUS)

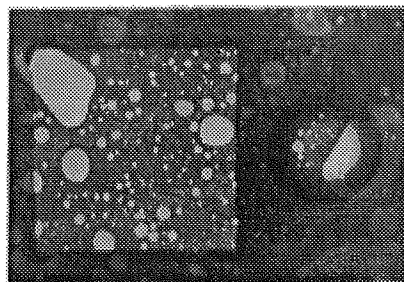


FIGURA 7.1.14: DEFEITO DE BONDERIZAÇÃO
(Fonte FEINFOCUS)

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

7.2 PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS / MULTICAMADAS

A microscopia por raios X permite também, no caso da fabricação de placas de circuito impresso, proceder a testes de critérios de qualidade. Para isso, p. ex., contam-se o controle de qualidade da metalização de furos de placas de circuito impresso com furos metalizados e da medição e inspeção de vias condutoras internas no caso dos multicamadas.

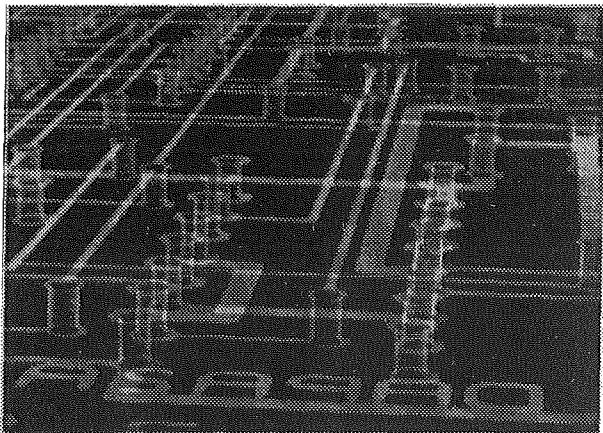


FIGURA 7.2.1: METALIZAÇÃO DE FUROS (Fonte FEINFOCUS)

Na inspeção da metalização de furos, procede-se uma radioscopia oblíqua da placa de circuitos impressos, de forma que as paredes dos furos sejam visíveis. Um exemplo de um registro assim é o que é mostrado na FIGURA 7.1.2. As ligações defeituosas caracterizam-se pelas manchas brancas nas paredes dos furos.

Comprimindo as placas de multicamadas, as camadas internas das placas podem deslocar-se ou deformar-se em relação à sua posição teórica. A causa dos defeitos de deslocamento ou de deformação podem ser de vários tipos. Estas são, em parte, dependentes da temperatura e da

pressão ao serem comprimidos. A deformação, em consequência da distensão e/ou do encolhimento das camadas, além de depender dos materiais depende também do tipo de imagem da via condutora.

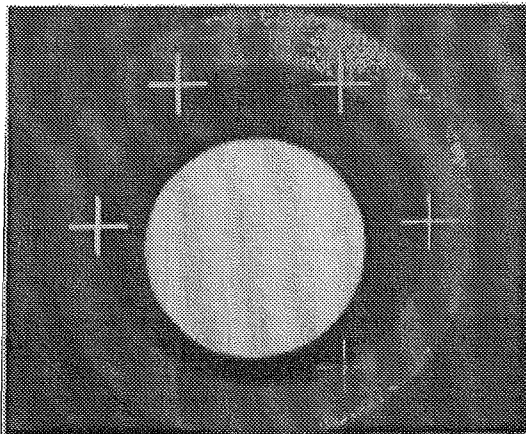


FIGURA 7.2.2: MEDIÇÃO DE UM PAD DE CONTATO (Fonte FEINFOCUS)

Para, por fim, obter uma ligação segura das camadas interiores na metalização de uma multicamada, tem que se garantir que, após a furação, em cada um dos "Pads" de contato, terá que ficar um anel restante de cobre suficientemente largo.

A microscopia por raios X pode ser usada para medir exatamente as coordenadas dos "pads" internos de contato. É mostrado um exemplo na FIGURA 7.2.2. O microscópio integrado no aparelho de teste projeta assim os pads sobrepostos ao mesmo tempo em um só nível no ecran. Assim, são medidas as coordenadas reais que apresentam desvios em relação à posição teórica ideal e, a

7.2 PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS / MULTICAMADAS

partir disso, elaborar um cálculo do ponto central ótimo do furo durante a furação. É possível evitar uma perfuração errada das placas de circuito impresso multicamada, que são muito caras. Se o deslocamento de uma ou mais camadas for tão grande que, apesar de uma otimização das coordenadas do furo, a largura mínima permitida para o furo não atinge o seu valor em qualquer lugar, então o aparelho de teste dará sinal, avisando que a respectiva placa de circuito impresso tem que ser considerada como refugo. O processo é apropriado para testes de placas de circuitos impressos de 50 camadas de grande espessura.

7.3 INDÚSTRIA METALÚRGICA

Na indústria metalúrgica é aplicada também com êxito a técnica de raios X por microfoco. Devido á sua alta resolução local, ela é aplicada, sobretudo, para demonstrar pequenos defeitos em elementos construtivos muitas vezes complexos.

Por meio da radiografia, são analisados processos, independentemente do tempo, e as imagens do elemento construtivo a ensaiar podem ser bidimensionais ou, com a ajuda da tomografia computadorizada (ver capítulo 6.4), também tridimensionais. Por meio da radioscopia, podem também ser analisados processos independentemente do tempo, o qual, para a investigação dos passos dos processos e das causas do surgimento do defeito, é de muito interesse, objetivando esclarecer as causas do defeito logo no processo e assim evitá-las logo no princípio. Para a aplicação da técnica de microscopia na indústria metalúrgica, foram selecionados exemplos retirados da área da fundição e da soldagem.

Pás de turbinas

Para turbinas de alta temperatura de grande potência específica, as pequenas pás têm, muitas vezes, que ser refrigeradas. No processo de fabricação por fundição, devem-se fazer logo os canais de refrigeração na sua forma definitiva. Na fabricação de pás, tem que se certificar que os canais de refrigeração estão na posição prevista no corpo de pás para que se possa garantir uma refrigeração segura. Como exemplo, a FIGURA 7.3.1A mostra a fotografia bidimensional de uma pá de turbina feita com um tubo de raios X com microfoco.

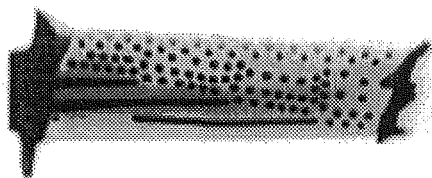


FIGURA 7.3.1A: PÁ DE TURBINA, COMPLETA (Fonte FEINFOCUS)

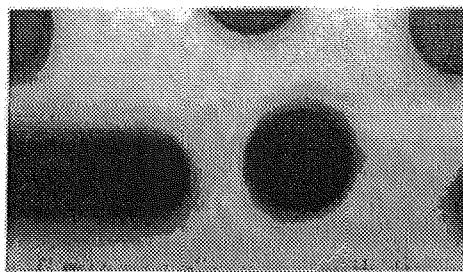


FIGURA 7.3.1B: PÁ DE TURBINA, CORTE (Fonte FEINFOCUS)

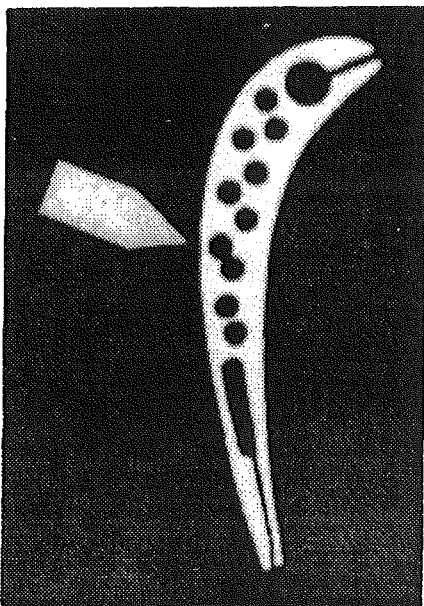
Uma imagem bidimensional fornece somente a projeção de canais de refrigeração dentro da pá, no entanto, não fornece o seu trajeto detalhado. A FIGURA 7.3.1B mostra um corte ampliado da pá. As projeções dos canais de refrigeração podem ser vistas bem como zonas escuras. Com a ajuda da tomografia computadorizada (CT), podem ser feitas imagens

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

parciais no meio da pá e pode ser observado o trajeto dos canais de refrigeração no interior da pá.

Os autores S.F.BURCH e P.F. LAWRENCE utilizaram um sistema de tomografia em tempo real com microfoco para analisar pás de turbinas e outros elementos construtivos. O equipamento de análise foi usado nas seguintes aplicações:

- (1) Medições de espessuras das paredes de elementos construtivos complexos (p. ex., pás de turbinas de avião, peças fundidas na indústria automóvel e em outros ramos da indústria)
- (2) Para tornar visível detalhes internos de estruturas complexas, para, por ex., verificar a sua montagem.
- (3) Medições de dimensões, formas e descontinuidades internas, como, por ex., ruturas, vãos, oclusões e porosidades.
- (4) Exame de alterações de espessura em materiais modernos.



**FIGURA 7.3.2: PÁ DE TURBINA,
CORTE CT
(Fonte BURCH)**

É usada a tomografia 3D, descrita no capítulo 6.4. Utilizando um conversor de imagem como detector de superfície, são registrados, simultaneamente, vários níveis do corte aproveitando todo o cone de raios. O corpo de prova é colocado sobre uma bancada giratória programável e as suas imagens são feitas de vários ângulos. As imagens CT são obtidas mediante exploração do conversor de imagens e representam cortes transversais do corpo de prova, em relação ao qual fica o eixo de rotação. Como sistema de microfoco, foi utilizado um equipamento com uma tensão de serviço de no máximo 225 KV e com um diâmetro de foco de raios X da ordem dos 10-20 microns. Como exemplo, está representada na FIGURA 7.3.2 uma imagem de um corte CT de uma pá de turbina. Nesta fotografia, vê-se claramente a vantagem da tomografia computadorizada. A imagem do corte mostra claramente um defeito na pá (veja a seta), existente em uma ligação não permitida entre dois canais de refrigeração que poderia prejudicar grandemente o resfriamento. Tais defeitos não são reconhecíveis usando uma imagem de projeção bidimensional.

Fundição de coquilhas de metal leve

Normalmente, o exame de peças fundidas e de seus defeitos é feito após a sua fundição e após o seu resfriamento. Ao se pretender saber a causa do defeito, com o objetivo de evitá-lo, as possíveis causas só podem residir no tipo e no modo como decorreu o processo de fundição. O processo de fundição decorre em diversas fases, nomeadamente a do processo

7.3 INDÚSTRIA METALÚRGICA

de enchimento, solidificação e resfriamento, os quais, com a ajuda da radioscopia, podem ser analisados durante o seu decurso.

Os autores K. FEISTE, D. STEGEMANN e W. REIMCHE investigam o decurso do processo de fundição em função do tempo. O objetivo da análise é encontrar pontos comuns entre os parâmetros do processo e os processos de solidificação, assim como do aparecimento de defeitos e o seu alastramento às peças fundidas.

Por influência orientada do processo de fundição e dos processos na peça fundida, pode-se conseguir a produção de peças perfeitas. A experiência é mostrada na FIGURA 7.3.3.

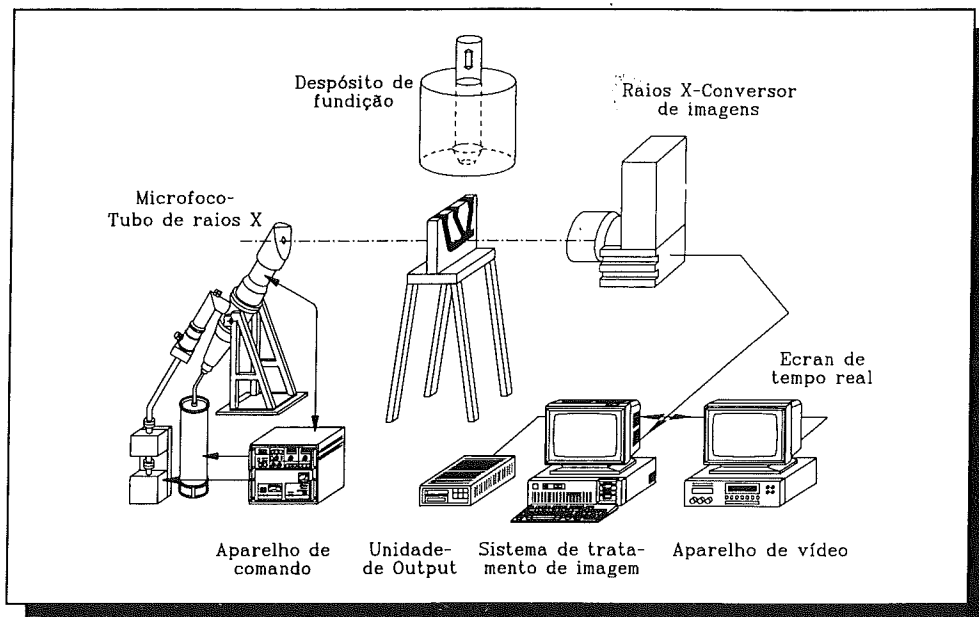


FIGURA 7.3.3: EQUIPAMENTO ON LINE DE ANÁLISE POR MICROFOCUS PARA PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

A coquilha que se encontra entre o tubo de raios X microfocus e um conversor de imagem é preenchida com a ajuda de um recipiente de fundição tele-comandado por motivos técnicos de radiação. Os dados gerados pelo conversor de imagem são reforçados, filmados por meio de uma câmara de vídeo e transmitidos a um ecrã. Paralelamente a isto, os sinais emitidos por um aparelho de vídeo são registrados e transportados para o sistema de tratamento de imagem. Mediante aplicação de algoritmos de tratamento de imagens nos dados das imagens, podem ser analisados os processos dinâmicos na peça fundida, como a decurso da solidificação, do surgimento de defeitos e do seu alastramento.

A coquilha usada para as análises é mostrada na FIGURA 7.3.4. Esta possibilita a simulação de problemas, como, p. ex., os que surgem ao fundir em coquilhas de metal leve jantes para automóveis. A peça fundida que aparece na coquilha compõe-se de quatro raios que fazem entre si um ângulo de 30°, 60° e 90°.

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

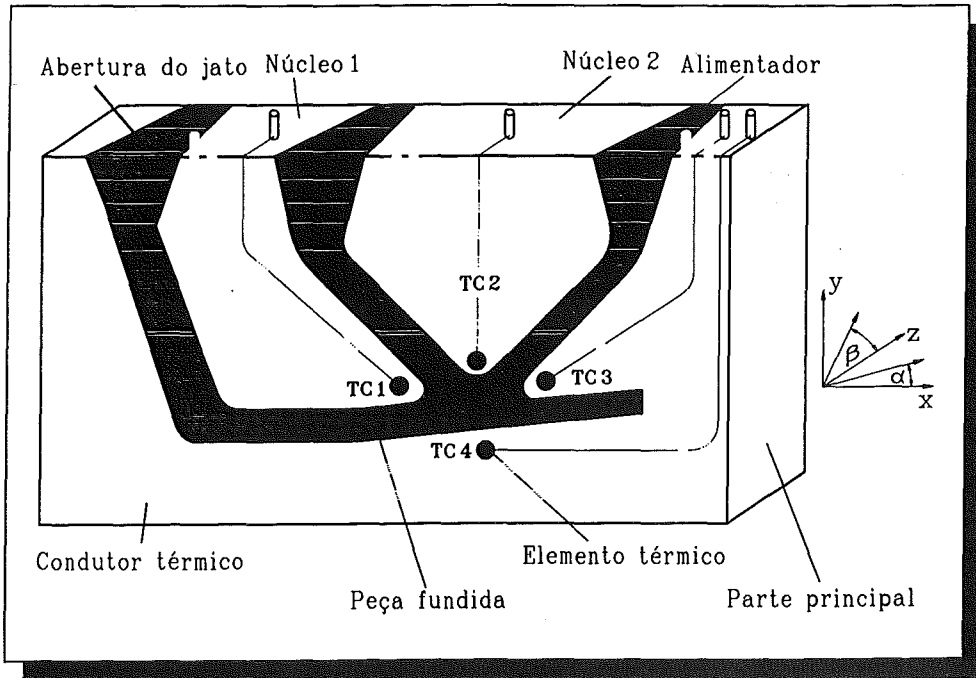


FIGURA 7.3.4: COQUILHA DE FUNDIÇÃO

A acumulação de material na zona central da peça fundida (nós) e as passagens ásperas do corte transversal dificultam a produção de peças fundidas perfeitas. A coquilha é instrumentada por meio de termoelementos e equipada com condutores de aquecimento periférico. Com isto, consegue-se obter a temperatura na coquilha.

Como resultado típico, estão representados nas quatro FIGURAS 7.3.5 a 7.3.8 imagens selecionadas de uma série completa. Aqui foram feitas as seguintes constatações: a coquilha é preta, as partes fluídas são cinzentas e as áreas que sofreram um aumento de densidade devido à solidificação estão representadas em branco. Na FIGURA 7.3.5 (imagem detalhada), o começo da solidificação pode ser visto cerca de 5 segundos após a fundição da massa fundida na coquilha. São reconhecíveis as zonas solidificadas nos raios. À medida que o tempo vai passando, a solidificação espalha-se até as zonas dos nós e, após 18 segundos, está terminado o processo. Este estado é mostrado na FIGURA 7.3.6. A totalidade da peça fundida é representada em branco, não sendo, porém, as zonas que contêm defeitos, cuja diminuição de densidade ou do aumento de densidade exerce efeito contrário devido à solidificação.

7.3 INDÚSTRIA METALÚRGICA

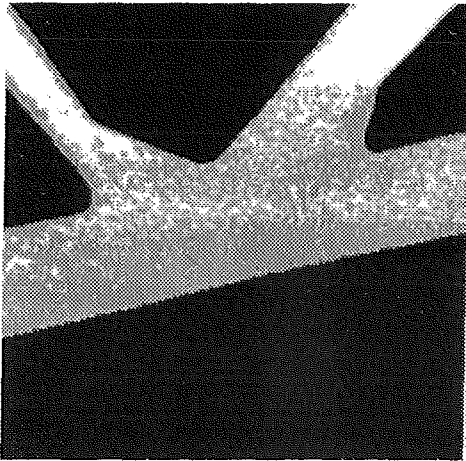


FIGURA 7.3.5: COMEÇO DA SOLIDIFICAÇÃO

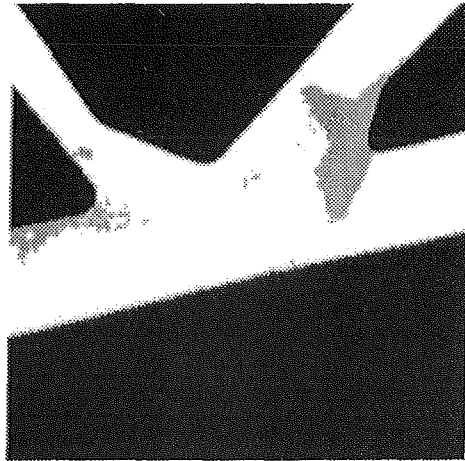


FIGURA 7.3.6: FIM DA SOLIDIFICAÇÃO

Na FIGURA 7.3.7 (imagem detalhada), pode-se reconhecer facilmente a formação de falhas na zona do ângulo de 30° . As falhas que surgem servem como origem ou ponto de partida do defeito para os défices volumétricos que vão surgir por cima e por baixo do ângulo de 30° .

A FIGURA 7.3.8 (imagem detalhada) mostra que, nos centros dos ângulos de 30° , trata-se de um defeito ramificado e contínuo. Este surge cerca de 5 segundos após a fundição e está completamente formado passados mais 13 segundos.

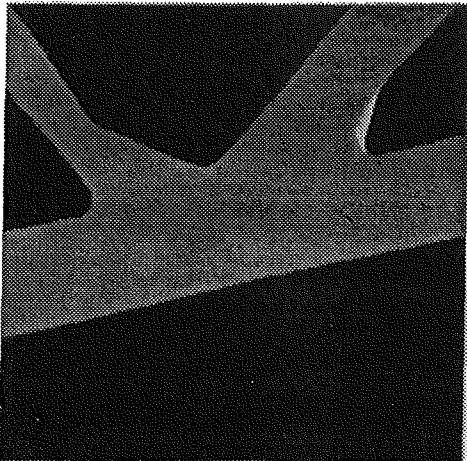


FIGURA 7.3.7: PONTO DA FALHA

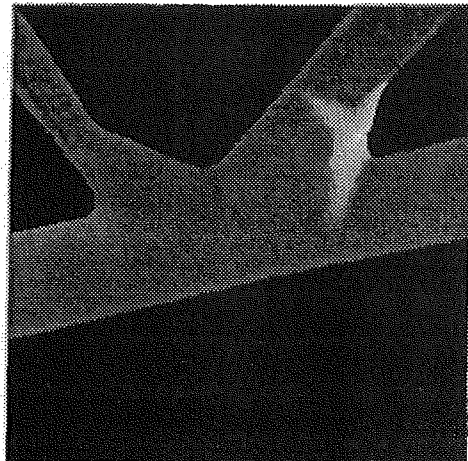


FIGURA 7.3.8: ORFÍCIO ANGULAR DE ESCOAMENTO

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

A formação de defeitos tem agora múltiplas causas. Uma das mais importantes é a distribuição da temperatura na coquilha, a qual é determinante quando e onde se dá a solidificação, o que pode ser impedida a continuação do fornecimento de material. Com o aquecimento ou o resfriamento da coquilha, pode ser obtida uma regulagem da temperatura. Por este meio, é possível produzir peças fundidas perfeitas.

Estes exames são um bom exemplo de que, com a ajuda da micro-radioscopia, podem ser determinados processos em função do tempo com boa resolução local, os quais fornecem uma importante ajuda para evitar defeitos.

Soldar

Outro campo de aplicação muito interessante para a microradioscopia é a análise das costuras de solda. Uma vez que, em casos normais, o número de imagens radiográficas é muito grande, existe, de acordo com a natureza, um grande interesse numa vasta interpretação automatizada. Neste campo, há uma série de estudos. W. DAUM, P. ROSE, H. HEIDT e J.M. BUILTJES usam algoritmos de segmentação para reconhecer os defeitos, depois de ter sido deduzido o plano de fundo da imagem radiográfica original. A imagem de fundo é deduzida de uma alimentação "SPLINE". Um modo semelhante de proceder é utilizado por B. ECKELT, N. MEYENDORF, W. MORGNER e U. RICHTER, no entanto, a imagem de fundo é gerada, neste caso, pela utilização de diferentes filtros de passo largo.

Os autores A. GAYER, A. SAYA e A. SHILOH usam um sistema de raios X por microfoco para o exame automatizado da costura de solda. O motivo é, sobretudo, aproveitar a alta qualidade da imagem que pode ser obtida com este sistema, para, assim então, também com sistemas de radioscopia, obterem um resultado comparável ao das outras imagens normais fornecidas pelos filmes. Com o fator de ampliação 10, foram interpretadas imagens de raios X de acordo com diversos algoritmos. Partindo do princípio que o defeito na costura de solda possui um aspecto irregular, foi realizado um tipo de análise local de frequências, continuando a trabalhar com as funções deduzidas para detectar os pontos defeituosos. Os defeitos assim detectados foram interpretados então por meio de uma análise por analogia, para a qual os defeitos de solda constituem a base. Os resultados práticos que foram obtidos nas costuras de solda com alumínio, permitem afirmar que o processo promete êxito.

Soldadura por pontos

A aplicação de ligações soldadas por pontos na construção de meios de transporte representa uma alternativa muito econômica e de grande qualidade em relação a outros processos de costuras (p. ex, rebitagem, colagem). Um exame seguro por ensaio não destrutivo tem, por isso, muita importância.

A possibilidade de garantir a qualidade ao proceder à soldadura de pontos de resistência de materiais de alumínio, usando a técnica radioscópica de microfoco, foi estudada por L. LEHMANN. Um conhecimento da qualidade obtida nos pontos só pode ser melhorado por meio de um processo de teste como este, o qual, durante a solidificação e o resfriamento, permite ver claramente os processos de cristalização e de liquação. A radioscopia por microfoco oferece todas as condições para permitir ver rapidamente imagens de

7.4 CERÂMICA

estruturas e de solidificações de uma lente de solda e com grande resolução, e, assim, a partir daí, estabelecer critérios para interpretar a qualidade dos pontos. A base para isso é o fato de que, ao surgir uma lente de solda, após atingir o estado líquido, desenvolvem-se zonas de estruturas características. A uma zona interna solidificada de forma globulítica, juntam-se outras zonas externas de forma dendrítica, as quais são limitadas pela linha aberta por fusão e pelas zonas do material básico influenciadas pelo calor. A FIGURA 7.3.9 mostra uma imagem de radioscopia por microfoco (positiva) de um ponto de solda perfeito, o qual foi feita com uma chapa de 1,6 mm de espessura de material 7475, ampliada cerca de 16 vezes.

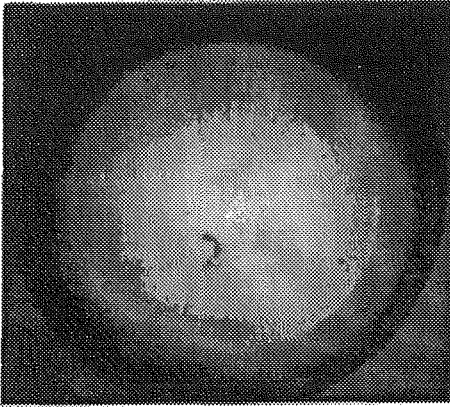


FIGURA 7.3.9: PONTO DE SOLDA PERFEITO
(Fonte LEHMANN)

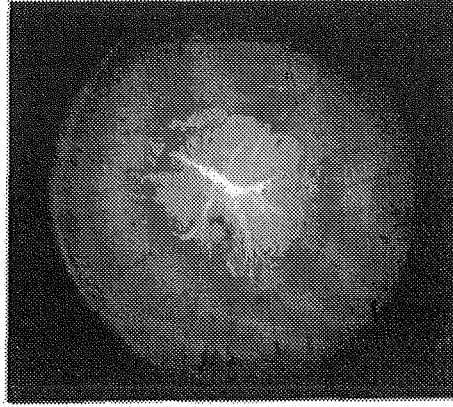


FIGURA 7.3.10: PONTO DE SOLDA COM RUPTURA
(Fonte LEHMANN)

Se podem reconhecer as zonas características da estrutura. A FIGURA 7.3.10 mostra, contrariamente a isto, um ponto de solda com rupturas. A imagem foi obtida com o mesmo material e também ampliada 16 vezes.

Estes são dois exemplos extremos. Em geral, pode-se dizer que a diferença claro/escuro na linha de abertura por fusão do diâmetro da lente pode ser determinada, daí podendo-se tirar conclusões relativamente à força de cisalhamento do ponto, de acordo com o estado de resistência do material-base. Os exemplos apresentados nas figuras mostram também que há aqui uma boa possibilidade de utilizar uma interpretação automática de imagens.

7.4 CERÂMICA

Os materiais cerâmicos são desenvolvidos, sobretudo, para aplicações a altas temperaturas. O objetivo de conseguir uma resistência à ruptura tão grande quanto possível é de importância. Por este motivo, devem ser evitadas frações pequenas (10-200 microns) e distribuições não uniformes de espessura (0,1 - 2%) devido a zonas porosas. Por isso, para a detecção de defeitos, são necessários processos de análise de alta resolução de forma que temos aqui mais um outro campo de aplicação da técnica de microfoco. Além de materiais puramente cerâmicos, os materiais compostos (metal-cerâmica, etc.) têm naturalmente uma enorme importância para obter análises não destrutivas. Uma vez que é precisamente nos materiais cerâmicos que, devido à sua pequena resistência à fração, a forma do defeito é muito importante para proceder à avaliação e, para fazer os cálculos relativamente à fração

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

mecânica, a tomografia computadorizada (CT) tem neste campo uma importância especial. Os autores H. RIESEMEIER, J. GOEBBELS, B. ILLERHAUS; Y. ONEL e P. REIMERS, nas suas aplicações de CT, ocuparam-se também particularmente com a representação esquemática, usando a micro-radioscopia. A FIGURA 7.4.1 mostra uma representação esquemática do aparelho de micro-tomografia em 3D com tubo de raios X com microfoco, o qual fornece uma tensão de 20 - 200 KV com um foco de raios X < 10 microns. O manipulador de precisão de 5 eixos tem uma exatidão relativa de posicionamento de 1 ou 5 microns e suporta provas até 10 kg. Pode-se ampliar 50 vezes o diâmetro do objeto até este atingir 3 mm. O sistema dispõe de um sistema de aquisição de imagem, que é composto pelo conversor de imagem, de uma óptica angular e de um sensor CCD com Pixel (1024x1024) com um tamanho de 19x19 microns.

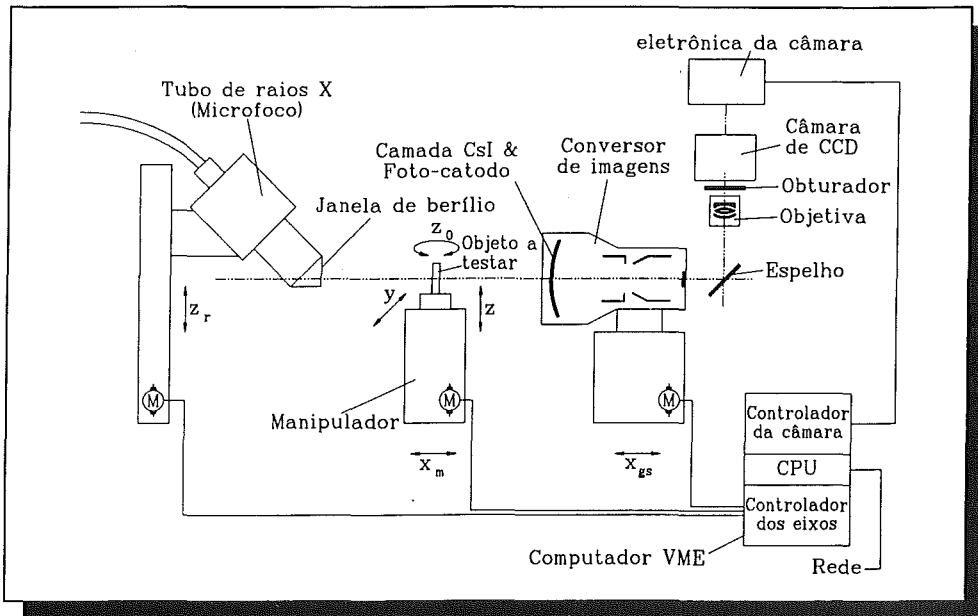


FIGURA 7.4.1: TOMÓGRAFO COMPUTORIZADO 3D (Fonte BAM)

Os exemplos seguintes de aplicação baseam-se exclusivamente em medições com elementos detectores de 511x511. Estes provêm das cerâmicas reforçadas com fibra de carbono. Este material caracteriza-se por ter um peso reduzido e alta estabilidade de temperatura, assim como por ter alta resistência e, como revestimento isolador de calor, aplicado em veículos espaciais. Na fabricação destes materiais complexos, a tomografia computadorizada pode constituir uma alta contribuição para a caracterização dos produtos parciais e totais.

Na FIGURA 7.4.2, são mostradas imagens de um corte transversal de três fases diferentes de produção de cerâmica C/SiC. Para obter a matéria-prima, um corpo moldado de material sintético de fibra de carbono (CFK) é carbonizado a 900° C com fechamento de ar (figura acima). Aqui, a matriz do polímero é completamente transformada em carbono puro. Em seguida, este corpo moldado C-C (figura central) é misturado com silício líquido a 1600° C numa atmosfera de argônio. O silício pouco viscoso penetra no corpo de CC através do

7.4 CERÂMICA

efeito capilar nos canais surgidos durante a pirólise dentro de poucos minutos. Paralelamente a isto, dá-se a reação química relativa a SiC, a qual executa a função de um protetor contra oxidação para a fibra de carbono que suporta a carga (figura a baixo).

A distribuição e tamanho dos poros formados durante a pirólise é decisiva para a qualidade do produto acabado, uma vez que poros demasiadamente pequenos podem ter como consequência um fechamento dos mesmos antes da completa impregnação, e poros demasiado grandes, por outro lado, impedem uma infiltração rápida. A microtomografia computadorizada (MCT) pode ser aproveitada para uma demonstração sem problemas da distribuição e tamanho dos poros e, assim, para a otimização do processo de fabricação.

A FIGURA 7.4.3 mostra uma representação espacial da cerâmica de C/SiC.

A forma e o trajeto dos canais cheios com SiC são facilmente reconhecíveis. O mesmo acontece quando a imagem do corte se processa como consta da FIGURA 7.4.4. Os canais

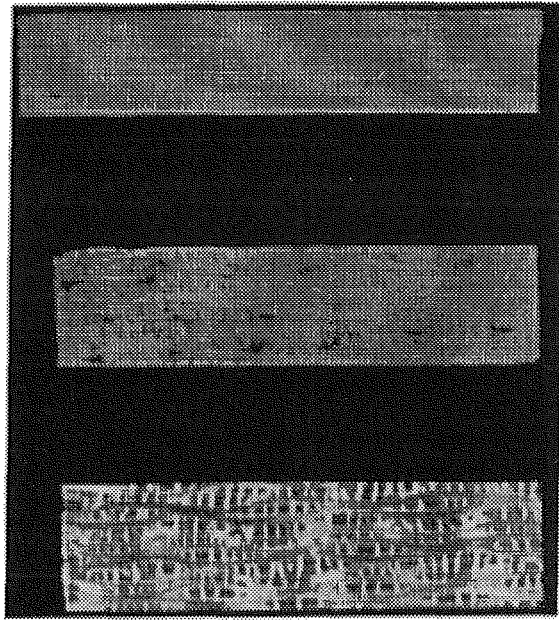


FIGURA 7.4.2: IMAGENS DE UM CORTE TRANSVERSAL DE CERÂMICA SiC (Fonte BAM)

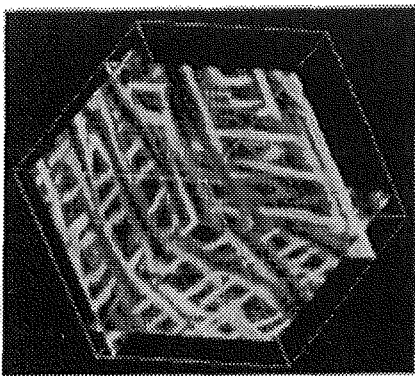


FIGURA 7.4.3: REPRESENTAÇÃO 3D DE CERÂMICA C/SiC (Fonte BAM)

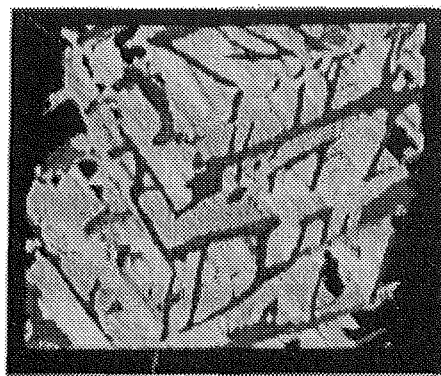
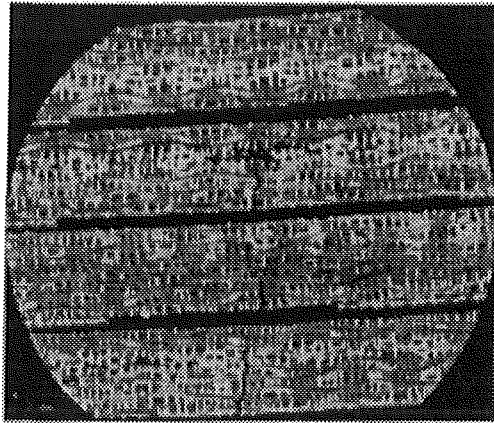


FIGURA 7.4.4: IMAGEM DE UM CORTE CT TRANSVERSAL DE CERÂMICA DE C/SiC

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

da amostra aqui examinada têm uma largura média de cerca de 30 microns e um comprimento de cerca de 300 microns. As amostras de material são expostas a esforços de flexão para assim se testar a resistência do material. Com estas experiências, tenta-se testar em que medida os danos surgidos por delaminação no material, composto por camadas sobrepostas, estão caracterizados. A FIGURA 7.4.5 mostra as imagens do corte transversal da CT de quanto amostras referentes, a diferentes esforços de flexão. Surgem delaminações e são evidentes rupturas verticais às camadas.

Os exemplos aqui referidos são prova da grande capacidade de atuação da tomografia computadorizada 3D na caracterização de materiais e na detecção de rupturas e delaminações. Para examinar um volume de amostras de 511^3 de elementos, são necessárias cerca de 1 a 2 horas, utilizando uma amplitude de passo angular de 1 ou 0,5 graus. Estes tempos são comparáveis às demoras de exames de destruição nos quais se pretende obter a mesma informação através da feitura de polimentos e de posteriores exames microscópicos. Sob este aspecto, o processo 3D-MCT pode ser considerado inovador.



**FIGURA 7.4.5: AMOSTRAS C/SiC
APÓS ESFORÇO DE FLEXÃO
(Fonte BAM)**

7.5 MATERIAIS COMPOSTOS

A composição perfeita de todos os materiais envolvidos é uma das condições para a obtenção de materiais compostos de boa qualidade. É por isso necessário que seja possível testar o grau de porosidade dos materiais utilizados, assim como o grau de delaminação. Os menores defeitos podem trazer consequências muito nefastas. Por isso, é necessário analisar todos os defeitos com a ajuda da micro-tomografia computadorizada, método este que poderá contribuir para a otimização da produção e para o controle dos parâmetros de produção.

Os autores M. MÜNKER e H.-A. CROSTACK utilizam a microtomografia computadorizada (MCT) para a análise dos materiais compostos. O respetivo equipamento é composto de um tubo de microfocos (160 KV, 3 mA, foco de raios X de 10 microns) e um conversor de imagens (comparar capítulo 6.2), cuja resolução lateral é de 0,1 mm/pixel com a mínima área de entrada. Os objetos foram representados com ampliações geometricamente de até 20, dependendo do seu diâmetro. A cada quantidade de dados medidos compostos por 720 projeções de 1024 pontos de medição, eles são reconstituídos através de uma retro-projeção filtrada sobre uma matriz de 1024 x 1024 pontos de imagem. O equipamento MCT foi utilizado para medir o grau de danificação de compostos metálicos em amostras de MCCs injectados termicamente. Para isso, são utilizadas fibras de tungstênio numa matriz de NiCrAl injetada termicamente. Amostras de material não preparadas são expostas a radiações antes da prova de esforço para verificar a existência de danificações anteriores. Um outro exame radioscópico do material é feito em estado de iniciação da oscilação

7.6 TÉCNICA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

(começo da formação de ruptura), com o objetivo de detectar eventuais danificações. O resultado da imagem é mostrado na FIGURA 7.5.1. A posição das camadas de fibra na imagem radioscópica poderá assim ser avaliada em materiais de uma camada ou mesmo de duas.

Como complemento, foram feitas imagens tomográficas. Os respectivos resultados são mostrados na FIGURA 7.5.2. A imagem do corte CT foi feita na proximidade do entalhe, o que se poderá verificar na FIGURA 7.5.1. Como se pode ver, para além da distribuição de fibras, as diferenças de espessura também podem ser mostradas na matriz. Em especial, são evidentes grandes faltas de homogeneidade (espessura reduzida) logo nas fibras. O alto teor de porosidade é provado através das imagens de polimento, uma das quais é mostrada na FIGURA 7.5.3. Poderão, através das medições tomográficas, ser obtidas mais informações concernentes à aderência matriz-fibra, à formação e alastramento de rupturas na matriz e mesmo concernentes a fratura de fibras. Outro resultado é a possibilidade de mostrar separadamente as fibras e a matriz, por ex., fibras de titânio em matriz de cerâmica.

Uma representação separada é dependente das relações de grandeza de fibra e matriz (resolução local) e também das propriedades de absorção dos materiais (resolução de contraste). A FIGURA 7.5.4 mostra uma imagem de corte CT de fibras de titânio em matriz de cerâmica. Nesta amostra de material relativamente grande (superfície de corte de 2 mm x 12 mm), conseguiu-se uma resolução de 15 microns/pixel. Pode-se ver a falta de algumas fibras, assim como falta de homogeneidade na matriz. Os exemplos referidos evidenciam o grande potencial da microtomografia no campo dos materiais compostos, utilizando tubos de microfoco, conversores de imagem e sistemas de tratamento de imagem.

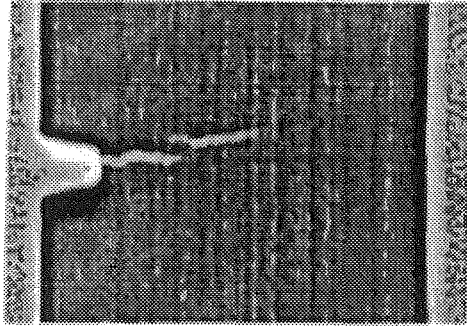


FIGURA 7.5.1: IMAGEM RADIOSCÓPICA DE UMA AMOSTRA DE DUAS CAMADAS
(Fonte CROSTACK)

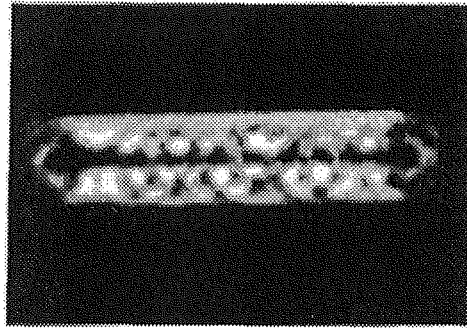


FIGURA 7.5.2: IMAGEM TOMOGRÁFICA
(Fonte CROSTACK)

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

7.6 TÉCNICA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

O tubo de raios X com microfoco tem uma grande vantagem em relação aos sistemas fechados, pois podem ser usados ânodos de barra (comparar capítulo 5.1). Na FIGURA 7.6.1, são mostrados dois exemplos de ânodos de barra que são utilizados como emissores panorâmicos. Assim, existe a possibilidade de posicionar a fonte de radiação no interior da peça do equipamento, permitindo examinar sítios normalmente inacessíveis. Os ânodos de barra mostrados na FIGURA 7.6.1 foram colocados especialmente para imagens panorâmicas, o que permite uma imagem circular com boa nitidez para fins de verificação.

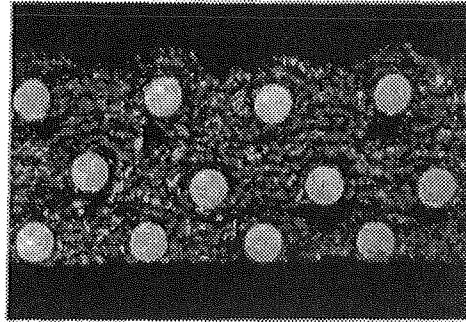


FIGURA 7.5.3: IMAGEM DE POLIMENTO
(Fonte CROSTACK)

Foi assim que P. R. VAIDYA, B. K. GAUR e P. G. KULKARNY examinaram tubos geradores de vapor somente acessíveis por um lado das costuras de solda com a ajuda da técnica de microfoco. O problema do exame está descrito na FIGURA 7.6.2. A construção do permutador térmico poderá ser vista na FIGURA 7.6.2. Os canos são de Inconel e têm uma espessura de parede de 1 mm e um diâmetro interior de 14 mm. A camada de solda tem uma largura de 3 mm e a sua espessura varia entre 1 e 2 mm. O ânodo de barra tem um diâmetro de 11 mm e o seu comprimento é de 400 mm. A sua forma está representada na FIGURA 7.6.1, tendo um ângulo de 48° .

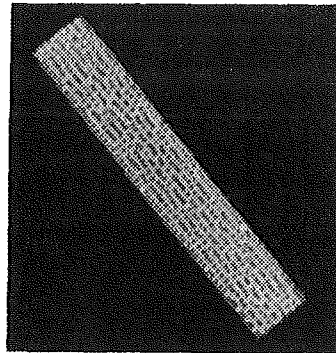


FIGURA 7.5.4: IMAGEM DE CORTE CT EM FIBRAS DE TITÂNIO EM MATRIZ CERÂMICA

A distância ótima entre o alvo (target) e o canto superior do tubo é de 13 mm, o que determinou a geometria de exposição à radiação e, conseqüentemente, o posicionamento do ânodo de barra. Nesta geometria, a tensão ótima de serviço do tubo de microfoco é de 105 KV. Para a imagem panorâmica, foi construído, propositadamente, um cassete de filme com um buraco, pelo qual foi introduzido o ânodo de barra. A determinação da qualidade de imagem foi efetuada com fios de cobre de 26 a 100 microns de espessura, dado que não se dispunha de fios de Inconel. Os referidos fios foram colocados na parte interior do tubo por cima da

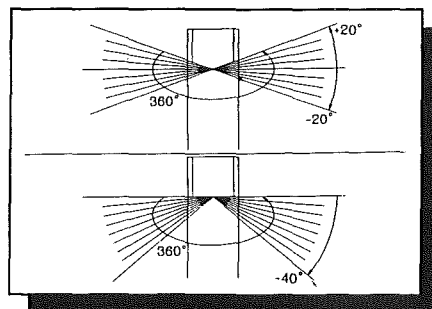


FIGURA 7.6.1: ÂNODOS DE BARRA

7.6 TÉCNICA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

costura de solda.

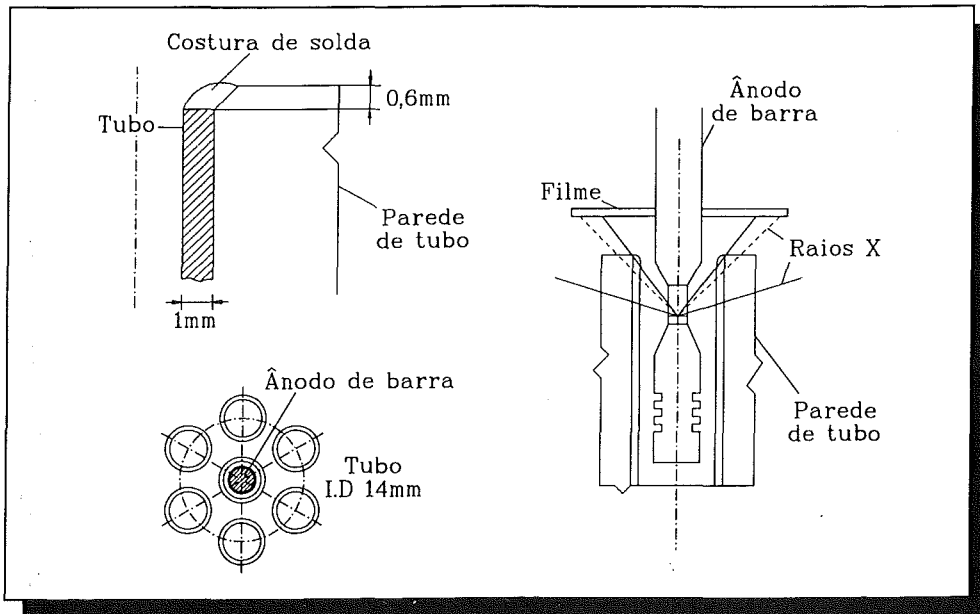


FIGURA 7.6.2: POSICIONAMENTO DE ANÁLISE COM ÂNODO DE BARRA
(Fonte VAIDYA)

A espessura dos fios era de, pelo menos, 44 microns com uma ampliação de cerca de 2,5. E. SPERLICH utilizou na microrradioscopia, em tempo real, ânodos de barra extremamente longos em ligação com um tratamento de imagem para analisar costuras de solda em depósitos. Os depósitos testados são os depósitos de combustível de classe superior (Depósitos EPS), utilizados no míssil portador do Ariane 5. Todos os depósitos têm um diâmetro idêntico de 1415 mm, sendo as diferenças do volume obtidas mediante anéis equatoriais cilíndricos de alturas diversas. Um exemplo é mostrado na FIGURA 7.6.3. Os depósitos são compostos pelos seguintes elementos que são soldados uns aos outros com quatro costuras de solda:

- duas calotas esféricas
- uma tampa de pólos em cima e em baixo
- um anel cilíndrico, diferente de depósito para depósito

Para manter o peso do depósito tanto menor quanto possível, os depósitos são de Al 2219, com uma liga de alumínio de alta resistência, com um limite aparente de elasticidade de 345 MPa e uma resistência à fractura de 450 MPa. A pressão de serviço do depósito é de 21,3 bárias.

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

Devido aos grandes esforços a que estão sujeitos por causa da minimização de seus pesos, os depósitos foram montados de forma que as cargas de serviço ficassem 10% abaixo do limite aparente de elasticidade, isto é, foram utilizados fatores de segurança contra o limite aparente de elasticidade de 1,1 e 1,25 contra rupturas.

Para corresponder às mais altas exigências de segurança com estas margens de segurança tão pequenas, é exigido um grande poder de detecção de defeitos, como, p. ex., rupturas no material ou defeitos volumétricos nas costuras de solda. Métodos de ensaios não destrutivos são, por isso, utilizados nos procedimentos de controle a 100%, tanto na análise de componentes, como também nas costuras de solda. Para determinar defeitos volumétricos nas costuras de solda, utiliza-se a técnica de raios X por microfoco. As grandezas que se seguem foram previamente dadas através da análise da mecânica da ruptura e terão que ser encontradas com uma probabilidade de 95% e um grau de confiabilidade de 90%:

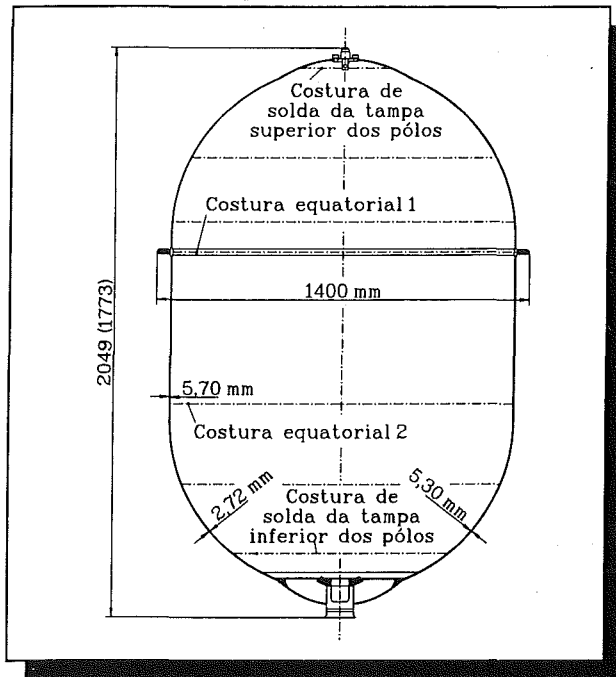


FIGURA 7.6.3: DEPÓSITO DE COMBUSTÍVEL
(Fonte SPERLICH)

- rupturas com uma profundidade de 0,6 mm abertas na direção da superfície do depósito
- defeitos volumétricos surgidos nas costuras de solda com um diâmetro de mais de 0,2 mm logo após a solda
- defeitos volumétricos surgidos nas costuras de solda com um diâmetro de mais de 0,5 mm depois dos testes finais de pressão

Na escolha do método de ensaio, teve que se levar em conta o fato de o depósito, após a solda, ser apenas acessível através de um furo de 52 mm de diâmetro. Por este motivo, foi aplicado um ânodo de barras especial de 2100 mm, o qual, por entre a abertura, se aproxima da costura de solda até 40 mm da distância do alvo.

7.6 TÉCNICA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL

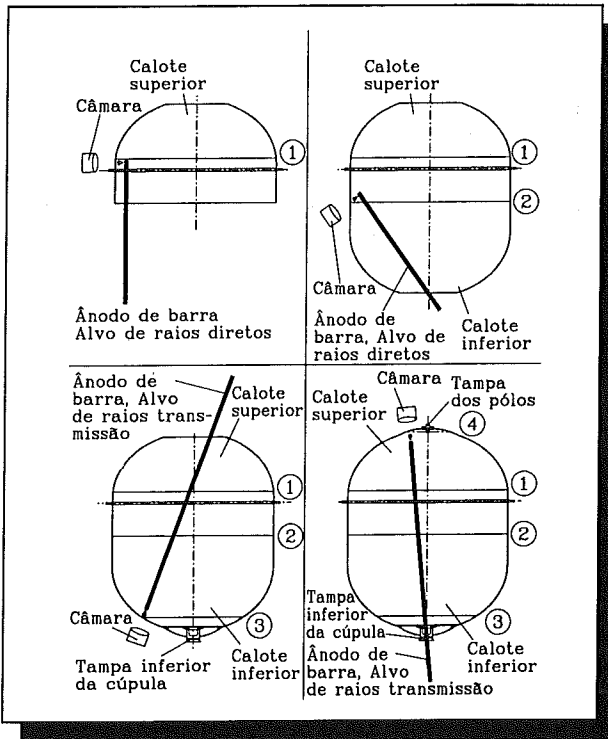


FIGURA 7.6.4: DISPOSIÇÃO DE TESTE DOS ÂNODOS DE BARRA (Fonte SPERLICH)

manipulador. Também o amplificador de imagem (câmara) deverá ser colocado neste dispositivo móvel e poderá ser deslocado no sentido longitudinal do móvel. Assim, poder-se-á alterar a distância entre a câmara e o depósito e aumentar, deste modo, a costura de solda a ser examinada no ecrã de controle.

Depois da colocação devida do depósito e do equipamento de análise, efetua-se o teste da respetiva costura em tempo real. A costura de solda do depósito é deslocada através de rotação telecomandada do depósito no manipulador entre o alvo e o amplificador de imagem. A posição do depósito é permanentemente registrada e mostrada num display durante a fase de análise. Assim, poderá ser ligada, em qualquer altura, mediante visualização no ecrã, a imagem de raios X à respetiva costura de solda. Qualquer alteração da posição do depósito poderá ser reproduzida com uma exatidão de até 0,02 mm.

Durante a análise, é possível alterar a dimensão da costura através de um processo telecomandado. Um tratamento posterior da imagem possibilita reagir a defeitos mediante consulta do ecrã de controle (ver capítulo 6.3), melhorando, assim, as possibilidades de deteção de defeitos. Os defeitos detectados são documentados em uma fita de vídeo.

O posicionamento do ânodo de barra para a análise das diferentes costuras de solda é descrito na FIGURA 7.6.4. Mediante os ânodos de barra, é também possível evitar a radiação das duas paredes durante a análise. O teste de radiação é efetuado depois da solda de cada uma das costuras do depósito. Para isso, a peça do depósito acabada até o momento é instalada num manipulador no anel equatorial. Através do manipulador do depósito, este depósito poderá ser colocado em uma posição vertical para assim se proceder ao exame e para se introduzir o ânodo de barra. Com a ajuda do manipulador, poder-se-á telecomandar o depósito a uma velocidade de 0-6 rotações/min. Para analisar as costuras do depósito, é introduzido um ânodo de barra de 1600 ou 2100 mm, o qual é posicionado numa armação móvel que deverá ser colocada numa posição horizontal de

7 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MICROFOCO

Para a qualificação do método através da análise do depósito EPS com a técnica de microfoco, são colocados fios de alumínio de 0,25 mm de diâmetro e de cerca de 2 a 5 mm de comprimento por cima da costura original do depósito, os quais deverão ser detectados pelos examinadores com uma probabilidade de 95%. A aplicação da micro-radioscopia no depósito EPS é bem mais rápida do que a aplicação do raios X convencional, além das vantagens técnicas na análise da costura de solda das tampas dos pólos. Estas vantagens devem-se ao fato da interpretação e da documentação serem feitas imediatamente após do alinhamento dos elementos construtivos dos ânodos e conversores de imagem, o que evita perda de tempo na colagem e revelação dos filmes de raios X.

8 LITERATURA

ANDERSON, W.L.; ONG, P.S.; COOK, B.D.

Compton Scattered X-Rays for NDE of Steel Corrosion Under Thermal Insulation
Nondestructive Evaluation, (1993), Vol 11, S 43-47

ASTM STANDARDS E 1000-84

Standards Guide for Radiologic Real Time Imaging

ASTM STANDARDS E 1165-87

Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-ray Tubes by
Pinhole Imaging

BOERNER, H.; STRECKER, H.

Automated Y-Ray Inspection of Aluminium Castings
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Maschine Intelligence
Vol 10, No 1., 1988

BRAGG, W.H. und W.L.

The Crystalline State
Proc. Roy. Soc. 88A (1913), 428

BRIDGE, B.

A Theoretical Feasibility Study of the Use of Compton-Backscatter Gamma-Ray
Tomography (CBGT) for Underwater Offshore NDT
British Journal of NDT (1985), S 357-363

BRUNNER, A.; NORDSTROM, R.; FLÜELER, P.

Untersuchungen zur Mode-I-Rißausbreitung in faserverstärkten Kunststoffen mit
Echtzeit-Röntgen-Durchstrahlungsprüfung und simultaner Schallemissionsanalyse
DGZfP-Tagung 1992, Fulda, Berichtsband 33, S 230-237

BURCH, S.F.; LAWRENCE, P.F.

Recent Advances in Computerized X-Ray Tomography
Using Real-Time Radiography Equipment
British Journal of Non-Destructive Testing, (1992), 34, S. 129-133

DAUM, W.; ROSE, P.; HEIDT, H.; BUILTJES, J.H.

Automatic recognition of weld defects in X-Ray inspection
British Journal of NDT, 29 (2), (1987), S. 79-82

DIN 54116

Betrachtung von Durchstrahlungsaufnahmen, Deutsches Institut für Normung, 1973

DIN EN 584

Industrielle Filme für die Durchstrahlung
DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.
Normenausschuß Materialprüfung (NMP)

DIN 54109

Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen
DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.

DÖLLE, H.; LEMMER, K.

Comparison of Codes and Standards for Radiographic Inspection and Experimental and Theoretical Studies on Unsharpness and Sensitivity Requirements
Materials Evaluation, 43 (1985), S. 188-195

DORNER, R.; VOGT, H.G.

Physik Daten Nr. 28: Schwächung der Photonenstrahlung von Radionukliden
Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH,
Eggenstein-Leopoldshafen, 1976

ECKELT, B.; MEYENDORF, N.; MORGNER, W.; RICHTER, U.

Use of automatic image processing for monitoring of welding process and weld inspection
Proceedings 12th World Conference on NDT, (1989), S. 37-41

FEISTE, K.; STEGEMANN, D.; REIMCHE, W.

Mikrofokus-Radioskopie beim Leichtmetallkokillenguß
DGZfP-Tagung, 1993, Garmisch-Partenkirchen, Berichtsband 37, Teil 2, S. 801-807

FILBERT, D.; KLATTE, R.; HEINRICH, H.; PURSCHKE, M.

Computer Aided Inspection of Castings
IEEE IAS, Annual Meeting, Atlanta 1987

GAYER, A.; SAYA, A.; SHILON, A.

Automatic Recognition of Welding Defects in Real-Time Radiography
NDT International, (1990), 23 (3), S. 131-136

GEBUREK, D.; PETERMANN, D.; STEGEMANN, D.

Determination of the Focal Spot Size of Microfocus
X-Ray Sources
Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference), Vol 1, S. 42-47,
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989

GLOCKNER, R.

Materialprüfung mit Röntgenstrahlen
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

GOEBBELS, J.

Mikro-Computertomografie in der industriellen Anwendung
4. FEINFOKUS-SYMPOSIUM, Garbsen, April 1993

GOEBBELS, K.; REINHOLD, A.

Advances in Mikrofocus X-ray Equipment and State of the Art in High Resolution

8 Literatura

Defect Detection in Ceramics with X-rays
Ceramic Materials and Components for Engines
Proc. of the 2nd International Symposium, Lübeck, Travemünde, 1986

GRIDER, D.E.; AUSBURN, P.K.
An Investigation of the Focal Spot Size in a Microfocus X-ray Tube
British Journal of NDT (1987), 1, S. 15-17

HABERÄCKER, P.
Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen
Carl Hanser Verlag, 1987

HALMSHAW, R.
Industrial Radiology, Theory and Practice
Applied Science Publishers, London, New Jersey, 1982

HARDING, G.
X-Ray Scatter Imaging in Non-Destructive Testing
International Advances in Nondestructive Testing (1985), Vol 11, S. 271-295

HAUK, V.; MACHERAUCH, E.
Eigenspannungen und Lastspannungen
HTM-Beiheft
Carl Hanser Verlag, München

HECKER, H.; FILBERT, D.
Fehlerdetektion in industriellen Durchleuchtungsaufnahmen durch Strukturerkennung
DGZfP-Tagung 1993, Garmisch-Partenkirchen, Teil 2, S. 772-777

HEIDT, H.; NABEL, E.
Übersicht über Mikrofokus-Röntgenanlagen, Vergleichsuntersuchungen und
Meßmethoden/Stichproben
Materialprüfung 28 (1986), 10, S. 320-325

ICRP: Schutz gegen ionisierende Strahlung aus äußeren Quellen-Daten
International Commission on Radiological Protection
Hefte 15 und 21, Fischer Verlag Stuttgart, 1976

JÄNCHEN, L.; FILBERT, D.
Schnelle Computertomographie durch algebraische Rekonstruktionsverfahren
DGZfP-Tagung, 1992, Fulda, S. 843-850

KEHOE, A.
IKB defect classification system for "automated" industrial radiographic inspection
Expert System, (1991), Vol 8, No 3, S. 149-157

KLATTE, R.

Automatic Detection of Defects in Castings by Processing the Context Information of X-Ray Images
Acta Imeko (1985), Prag

KOLB, K.

Grundlagen u. Methodik der Gamma-Radiographie in der Zerstörungsfreien Werkstück- und Werkstoffprüfung
Band 243, Kontakt & Studium, Werkstoffe, Expert Verlag, 1988

KRISCHNER, H.

Einführung in die Röntgen-Feinstruktur-Analyse
Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden

LAUE, M. von

Röntgenstrahl Interferenzen
Akadem. Verlagsgesellsch. Leipzig, 1960, 476 S

LEHMANN, K.

Möglichkeiten der Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumwerkstoffen durch Einsatz der Mikrofokus-Durchstrahlungstechnik
4. FEINFOCUS-SYMPOSIUM, April 1993, Garbsen

LINK, R.; GRIMM, R.; NUDZIG, W.; GOTTWALD, R.; WIACKER, H.

Computertomografie mit Bildverstärkern. Möglichkeiten, Anwendungen und Grenzen
DGZfP-Jahrestagung (1991), Luzern, Berichtsband 28, S. 23-26

LÜTHI, T.

Möglichkeiten der dreidimensionalen Computertomographie
DGZfP-Jahrestagung (1991), Luzern, Berichtsband 28, S. 27-32

MAISL, M.; REITER, H.; HOELLER, P.

Micro-radiography and tomography for high resolution
NDT of advanced materials and microstructural components
Journ. Eng. Mater. Technol. Trans ASHME 112 (2), (1990), S. 223-226

MANDOUR, A.M; GHANEM, E.

New X-Ray bildup factors including the effect of bremsstrahlung
KERNTECHNIK 52, (1988), S. 57-62

MATTIS, A.; WINTERBERG, K.-H.; REININGER, J.

Digitale Radiographie-Umsetzung in die Prüfpraxis
DGZfP-Tagung 1993, Garmisch-Partenkirchen, Teil 1, S. 305-311

MÜNKER, M.; CROSTACK, H.-A.

Mikro-CT an Verbundwerkstoffen

8 Literatura

DGZfP-Tagung Garmisch-Partenkirchen 1993, Berichtsband 37, S. 786-792

NABEL, E.; HEIDT, H.
Schnelle Methoden für die Überwachung von Mikrobrennflecken
DGZfP-Jahrestagung, Lindau, 1987

NIEMANN, W.; ROYE, W.
Neuartige Anwendungen der Compton-Rückstreutechnik "CamScan" in der Archäologie
und Denkmalpflege
DGZfP-Tagung, 1993, Garmisch-Partenkirchen, Berichtsband 37, S. 157-164

NOTEA, A.
Film-based industrial tomography
NDT International, Vol 16 (1985), No 4, S. 179-184

PURSCHKE, M.
Vollautomatisches Röntgenprüfsystem
Erfahrungen mit der Gußteilprüfung
Bild und Ton, Bd. 44 (1991), Heft 5/6, S. 177-182

RIESEMEIER, H.; GOEBBELS, J.; ILLERHAUS, B.; ONEL, Y.; REIMERS, P.
3-D-Mikrocomputertomograf für die Werkstoffentwicklung und Bauteilprüfung
DGZfP-Tagung, 1993, Garmisch-Partenkirchen, Berichtsband 37, Teil 1, S. 280-287

RÖNTGEN, W.C.
Entstehung von X-Strahlen
Ann. Phys., Leipzig, 64,(1898), 1

RÖNTGENVERORDNUNG
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen
Stand: 1.5.1990
R. König, Verlags-GmbH, München

ROYE, W.
The Compton Backscatter Technique
Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference),(1989), Vol 1, S. 31-36
Elsevier

SCHRÖDER, G.; PAULY, F., FELDEN, P., LINK, R.; GRIMM, R.; NUDING, W.,
WIACKER, H.
X-Ray Examination of Aircraft Turbine Blades with Microfocus Radiography and High-
Resolution Image Processing
Proc. 13th World Conference NDT, Sao Paulo, (1992), Vol 2, S. 669-673
Elsevier

SPERLICH, E.

Echtzeit-Mikroradioskopie in der Fertigung von Ariane 5 - Treibstofftanks
4. Feinfocus-Symposium, Garbsen, (1993)

STEGEMANN, D.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (Ensaio Não Destrutivos)
Radiografie und Radioskopie (Radiografia e Radioscopia)
B.G. Teubner, Stuttgart, (1995), ISBN 3-519-06355-7

STEGEMANN, D.; SCHMIDBAUER, J.; REIMCHE, W.; CAMERINI, C.;
SPERANDIO, A.; FONTOLAN, M.R.; MOURA NETO, R.J.

Microfocus-Radiography, Uses and Perspectives
Proceeding of the 13th World Conference on NDT (1992), Vol 1, S. 674-678
Elsevier

STEGEMANN, D.; RUNKEL, J.; FIEDLER, J.; NEUNDORF, B., OSTERMEYER, H.
Prüftechnik und Sensorik

SFB 264 "Automatisierte Fertigung unter Wasser"
Universität Hannover
Arbeits- und Ergebnisbericht 1994

STEGEMANN, D.; REIMCHE, W.; SCHMIDBAUER, J.

Investigation of Light Metal Casting Process by Realtime Microfocus Radioscopy
European Journal of NDT (1992), Vol 1, No 3, S. 107-117

STOKES, J.A.; ALVAR, K.R.; COREY, R.L.; COSTELLO, D.G.; JOHN, J.;
KOCINSKI, S.; LURIE, N.A.; THAYER, D.D.; TRIPPE, A.P.; YOUNG, J.C.

Some New Applications of Collimated Photon Scattering For Nondestructive
Examination
Nuclear Instruments and Methods 193, (1982), S. 261-267

VAIDYA, P.P.; GAUR, B.K.; KULKARNI, P.G.

Radiography of single-side-access heat exchanger welds using microfocal rod anode
Proc. 13th World Conference NDT, Sao Paulo, (1992), Vol 2, S. 684-688
Elsevier

VOGT, H.-G.; SCHULTZ, H.

Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes
2. Auflage 1992
Carl Hanser Verlag, München-Wien

9 ÍNDICE DE TERMOS TÉCNICOS

- Acelerador circular 109
 Acelerador de elétrons 107
 Acelerador linear 107
 Alimentação de alta tensão 103
 Ampliação da imagem 52
 Análise de difração 78
 Aparelhos de medição 71
 Aparelhos de raios X 101
 Atenuação da radiação 13
 Atividade 9
- Becquerel 9
 Betatron 109
 Caneta dosimétrica 72
 Canhão de elétrons 87
 Características da radiação 1
 Cerâmica 149
 Césio-137 11
- Circuito de Villard 104
 Circuito de Greinacher 105
 Circuito de Graetz 104
 Cobalto-60 11
 Coeficiente da massa 17
 Coeficiente de atenuação total 18
 Coeficiente de atenuação linear 17
 Coeficiente de absorção total 18
 Colimadores 21
 Comparação de imagens 130
 Comprimento da onda 1
 Constante de Planck 2
 Contraste da imagem 57
 Conversor de imagem 46
 Curva dose-distância 26
 Curva sensibilidade 33
 Curvas características 34
- Densidade óptica 30
 Desaceleração de elétrons 5
 Desfocagem interna 55
 Desfocagem total 54
 Desfocagem geométrica 50
 Desvio quadrático 121
 Detecção de radiação 28
 Detector de radiação 42
- Detector de fluorescência 44
 Detector de cintilação 45
 Diagramas de exposição 39
 Difração de raios X 74
 Digitalização do filme 114
 Dose equivalente 27
 Dose da idade 70
 Dose absorvida 25
 Dose natural 64
 Dose de radiação 24
 Dosímetro de filme 73
- Efeito fotoelétrico 13
 Efeito Compton 14
 Efeitos da radiação 63
 Eletronvolt 2
 Emissores Gama 11
 Enegrecimento do filme 29
 Energia máxima da radiação 6
 Equações de Laue 75
 Equipamento de Microfoco 87
 Escalonamento 124
 Espectro combinado 8
 Espectro contínuo 6
 Espectro de desaceleração 6
 Espessura de semi-atenuação 20
 Estado fundamental 8
 Estados excitados 9
 Exposição do filme 29
 Exposição 40
- Fator de atenuação 66
 Fator de acréscimo da dose 22
 Fator RBW 27
 Fator de exposição 40
 Fator intensificador 37
 Filamento incandescente 88
 Filme sensível à radiação 28
 Filtragem da radiação 106
 Filtros de raios X 106
 Fixação do filme 29
 Focalização da radiação 49
 Folhas fluorescentes 38
 Folhas intensificadoras 36
 Fontes de radiação 87

9 Índice de termos técnicos

- Fontes radioativas 110
Fotoelétron 13
Frequência 1
Função de transmissão 98
- Geometria do alvo 102
Geração de raios X 5
Gigabequerel 10
Gradiente linear 30
Gradiente logarítmico 35
Granulação 32
Gray 25
- Histograma 121
- Interpretação óptica 113
Interpretação automatizada 129
Iridio-192 11
- Laminografia 136
Lei da distância 69
Lei da atenuação 16
Lei da desintegração 10
Lente eletromagnética 88
Linac 108
- Máscara de ouro 97
Materiais fluorescentes 45
Materiais compostos 152
Matriz da imagem 118
Mecanismo de difração 75
Média da imagem 119
Medidas de proteção 65
Megabequerel 10
Megaeletronvolt 2
Método do fio 94
Método de transmissão 12
Microdensitômetro 115
Modelo atômico 4
- Nitidez 49
Número atômico 4
- Operações lógicas 125
- Pás de turbinas 143
Período de semi-desintegração 10
- Processamento da imagem 123
Processo de exposição 39
Processos de atenuação 13
Produção de pares 15
Proteção radiológica 63
- Qualidade da imagem 59
Quilobequerel 10
Quiloeletronvolt 2
- Rad 25
Radiação Gama 8
Radiação característica 7
Radiação de Roentgen 6
Radiação eletromagnética 1
Radiação secundária 21
Recipientes de trabalho 110
Reconhecimento da estrutura 130
Reflexão de Bragg 77
Rem 27
Retoespalhamento 79
Retroprojeção 134
Revelação do filme 29
Roentgen 25
- Sensibilidade do filme 32
Sievert 27
Sistema Comscan 82
Sistema de filme 28
Sistema Aidecs 81
- Tabela Look-Up 124
Taxa de dose equivalente 27
Taxa de dose absorvida 26
Técnica de Semicondutores 138
Tomografia 132
Tomógrafo 3D 150
Tratamento digital 118
Tubos de Raios X 101
Túlio-170 11
- Velocidade do filme 33
Velocidade da luz 1
- Zona de proteção 70

previously published in this series

**Climatic Zones and Rural Housing
in India**

Editors: N.K. Bansal, G. Minke
GERMAN-INDIAN COOPERATION
ISBN 3-89336-008-5

Titanium Nitride Coatings

Preparations, Characteristics and
Applications
S. Marinković, Z. Marinković and
H. Kötter
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-010-7

**The Nappe Structure of the North
Sporades in Greece**

The Glossa Unit of Skopelos
V. Jacobshagen and D. Matarangas
GERMAN-GREEK COOPERATION
ISBN 3-89336-015-8

**Impact of Green on the Urban
Atmosphere in Athens**

M. Horbert, A. Kirchgeorg,
A. Chronopoulou-Sereli,
J. Chronopoulous
GERMAN-GREEK COOPERATION
ISBN 3-89336-016-6

**Development and Improvement of
Identification Methods for Time Varying
and Nonlinear Industrial Processes**

Bilateral Cooperation between
Technische Hochschule Darmstadt and
Univerza "Edvarda Kardelja" Ljubljana
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-022-0

Digital Adaptive Control

edited by: K. Schwamberger,
A. Schumann and D. Matko, B. Zupančić
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-021-2

Boron Nitride Coatings

Preparation, Characteristics and
Applications
S. Marinković and Z. Marinković
with collaboration of H. Kötter and
Ch. Meixner
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-024-7

**A Test Method for Solar Water Heaters
Characterisation**

by M. Bosanac
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-032-8

**Selected Studies of Adsorption on
Metal and Semiconductor Surfaces**

by B. Gumhalter, M. Milun and
K. Wandelt
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-034-4

**Osnovi nauke o materijalima
(neue Werkstoffe)**

by G. Ondracek and I. Stamenković
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
ISBN 3-89336-036-0



Scientific Series of the International Bureau

- 1 Fundamentos do Método de Correntes Parasitas
S. Stegemann (1990)
GERMAN-BRASILIAN COOPERATION
- 2 Diamond and Diamondlike Coatings
S. Marinković and Z. Marinković with S. Krawczynski (1990)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 3 Environmental Research in Aquatic Systems
M. Branica (1990)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 4 Volcanic Tremor and Magma Flow
edited by R. Schick and R. Mugiono (1991)
GERMAN-INDONESIAN COOPERATION
- 5 Petrography, Geochemistry and Petrogenesis of the MIGIF-HAFAPIT GNEISSES
at HAFAPIT MINE Area, South Eastern Desert, Egypt
Abdelazeem Ahmed Rashwan (1991)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 6 Terpene in Nadeln und Zweigen von *Picea abies* (L.) Karst
Projektleitung: H. Ziegler, V. Tišler (1991)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 7 Titanium Nitride Coatings
Preparations, Characteristics and Applications (2nd edition)
S. Marinković, Z. Marinković and H. Kötter (1991)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 8 The Thermal Degradation of Poly(2-Mono-, 2,2-Di and 2,2,2-Trichloroethyl
Methacrylate) – Kinetics and Mechanisms –
I. Popović, L. Katsikas, J. Veličković, W. Schnabel (1991)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 9 New Developments in Diamond and Diamondlike Coatings
Preparation, properties and application
S. Marinković and Z. Marinković with S. Krawczynski (1991)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 10 Integral Methods for the Calculation of Electric Fields
For Application in High Voltage Engineering (1992)
GERMAN-YUGOSLAV COOPERATION
- 11 Rechnerunterstützte Montageablaufplanung
M. Rabe, Y. Wang, I. Veza (1992)
GERMAN-CROATIAN COOPERATION
- 12 Reference Materials and Methods in Environmental and Biological Research
M. Rossbach (1992)
GERMAN-SLOVENIAN COOPERATION
- 13 Photoacoustic Spectroscopy with Emphasis to
Application on Solid and Powdered Samples
A. Alebić-Juretić, C. Zetzsch (1992)
GERMAN-CROATIAN COOPERATION

Scientific Series of the International Bureau

- 14 Fracture Mechanics and Mechanical Testing Laboratory at Inchass
M.M. Ghoneim, A.M. Nasreldin, A.A. Elsayed, D. Pachur (1992)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 15 Analysis Methods and Techniques for Hard Thin Layer Coatings Characterization –
in particular on Titanium Nitride –
B. Bliznakovska, M. Miloševski
in cooperation with S. Krawczynski, Ch. Meixner, H.-R. Kötter (1993)
GERMAN COOPERATION with the University "Kiril i Metodij", Skopje
- 16 Biomaterials
edited by J. Krawczynski, G. Ondracek (1993)
GERMAN COOPERATION with the University of Skopje
- 17 CVD – Main Concepts, Applications and Restrictions
B. Bliznakovska, M. Miloševski
in cooperation with S. Krawczynski, Ch. Meixner, H.-R. Kötter (1993)
GERMAN COOPERATION with the University "Sv. Kiril i Metodij", Skopje
- 18 Thessaloniki '91 Field Measurement Campaign
edited by N. Moussiopoulos, G. Kaiser (1993)
GERMAN-GREEK COOPERATION
- 19 Geochemistry and Tectonic Significance of the
Pan-African El Sibai Window, Central Eastern Desert, Egypt
Gamal Mohamed Kamal El Din Saber (1993)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 20 A Transect from a Tectonic Mélange to an Island-Arc in the
Pan-African of SE Egypt (Wadi Ghadir Area)
Hani El-Akhal (1993)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 21 Coding Theory and Bilinear Complexity
S. Shokranian, M.A. Shokrollahi (1993)
GERMAN-BRASILIAN COOPERATION
- 22 Experimental Design and Analysis
R. Kiprijanova, L. Markovska in cooperation with S. Krawczynski (1993)
GERMAN COOPERATION with the University "Sv. Kiril i Metodij", Skopje
- 23 Progress in Diamond and Diamondlike Coatings Processing
B. Bliznakovska, Ch. Meixner in cooperation with S. Krawczynski (1994)
GERMAN COOPERATION with the University "Sv. Kiril i Metodij", Skopje
- 24 Reference Materials on the Project Improvement of Transmission Capability
edited by J. Krawczynski, D. Povh (1994)
GERMAN-SLOVENIAN-COOPERATION
- 25 Ino-German Project on Alternatives to CFCS for Refrigeration Applications.
Technical Status Report
L.R. Oellrich, S. Srinivasa Murthy (1994)
GERMAN-INDIAN COOPERATION

Scientific Series of the International Bureau

- 26 Untersuchungen im ternären System $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ zur Herstellung biokeramischer Phasen
T.K. Khalil (1994)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 27 Materials Research for Information Technology
edited by G. Kaiser, N. Constantopoulos (1994)
GERMAN-GREEK COOPERATION
- 28 Greek and German Tobacco Varieties
Chemical Methods for the Identification of of Tobacco Cultivars
P. Range, S. Divanidis (1995)
GERMAN-GREEK COOPERATION
- 29 PACVD of TIN
B. Bliznakovska, H.-R. Kötter, Ch. Meixner (1995)
GERMAN COOPERATION with the University "Kiril i Metodij", Skopje
- 30 Greek-German Workshop
Management of Municipal Waste
edited by N. Moussiopoulos, A. Karagiannidis, G. Kaiser (1995)
GERMAN-GREEK COOPERATION
- 31 The Application of Nuclear Track Detectors for Alpha Energy Discrimination and Radon Measurement in Egyptian Dwellings
edited by G. M. Hassib, H. A. Amer, M. I. Hussien, E. Piesch (1995)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 32 Geology, Geochemistry and Structure of Gabal Muqsim Area and Environs, South Eastern Desert, Egypt
M. F. S. Mouhamed (1995)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 33 Fracture Mechanics and Mechanical Testing Laboratory at Inshas
Report No. 2t
M. M. Ghoneim, A. M. Nasreldin, A. A. Elsayed, G. Pott (1995)
GERMAN-EGYPTIAN COOPERATION
- 34 Total diet survey in goiter endemic areas in Indonesia
M. Roszbach, P. Ostapczuk, H. Emons,
W. Susetyo, L. E. J. Trisnowo, Iswani, Suining, F. Lahagu (1995)
GERMAN-INDONESIAN COOPERATION
- 35 Climatic Zones and Rural Housing in India
Part I of the Indo-German Projekt on
Passive Space Conditioning
edited by N. K. Bansal, G. Minke (1995)
vorherige Auflage erschien unter d. T. Jül-Spez-473 (1988)
GERMAN-INDIAN COOPERATION
- 36 Radiografia e Radioscopie
Técnica de Microfoco
D. Stegemann (1995)
GERMAN-BRAZILIAN COOPERATION

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that proper record-keeping is essential for transparency and accountability, particularly in financial matters. This section outlines the various methods and tools used to collect and store data, ensuring that information is readily accessible and secure.

2. The second part of the document focuses on the analysis and interpretation of the collected data. It describes the process of identifying trends, patterns, and anomalies within the dataset. This involves the use of statistical techniques and data visualization tools to present the information in a clear and understandable manner. The goal is to derive meaningful insights from the data that can inform decision-making and strategic planning.

3. The third part of the document addresses the challenges and limitations associated with data collection and analysis. It highlights the potential for errors, biases, and incomplete information, and discusses strategies to mitigate these risks. This section also touches upon the ethical considerations surrounding data use, such as privacy and data protection, and provides guidance on how to handle sensitive information responsibly.

4. The final part of the document provides a summary of the key findings and conclusions. It reiterates the importance of a systematic and rigorous approach to data management and analysis, and offers recommendations for future research and practice. The document concludes by emphasizing the value of data in driving progress and innovation, and the need for continued investment in data infrastructure and capabilities.



ISBN 3-89336-167-7