



ANÁLISE DE SISTEMAS DE RADIOGRAFIA DIRETA EM CONDIÇÕES SUBMARINAS

Carlos Alexandre Pereira Patusco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira
Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Maio de 2013

ANÁLISE DE SISTEMAS DE RADIOGRAFIA DIRETA EM CONDIÇÕES
SUBMARINAS

Carlos Alexandre Pereira Patusco

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof^ª. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2013

Patusco, Carlos Alexandre Pereira

Análise de Sistemas de Radiografia Direta em
Condições Submarinas/ Carlos Alexandre Pereira Patusco.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 127 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira

Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 123-127.

1. Radiografia Digital. 2. Detectores Planos. 3.
Inspeção Submarina. I. Pereira, Gabriela Ribeiro *et al.* II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III.
Título.

*Este trabalho é dedicado aos meus pais,
Aos meus irmãos, Luiz e Cynthia,
À minha namorada, Anna Erika*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Gabriela Ribeiro Pereira e Ricardo Tadeu Lopes, pela orientação.

Aos colegas do BAM, Uwe Zscherpel e Uwe Ewert, pelo apoio técnico e disponibilização de equipamentos e laboratórios nos experimentos realizados na Alemanha.

Aos colegas do CENPES, especialmente Carla Marinho e Claudio Camerini pelo apoio técnico e no processo de intercâmbio.

À PETROBRAS, pelo apoio ao mestrado e pela oportunidade de intercâmbio.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ANÁLISE DE SISTEMAS DE RADIOGRAFIA DIRETA EM CONDIÇÕES SUBMARINAS

Carlos Alexandre Pereira Patusco

Maio/2013

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira
Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Neste trabalho, foi avaliada a possibilidade de uso de sistemas de radiografia direta na inspeção de soldas de dutos rígidos submarinos. Para isso, foram utilizados tubos de raios X de 225 a 600 kV e dois modelos de detectores diretos ou DDAs: o DXR 250V, da *General Electrics* e o XRD 0822, da *Perkin Elmer*. As amostras utilizadas foram tubos de 10 e 16 polegadas, com defeitos. Parte dos experimentos foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) da UFRJ e outra parte na Alemanha, no instituto de pesquisas BAM. Os requisitos normativos foram especificados segundo a ISO 17636. Os experimentos foram realizados simulando a condição de campo, com água e com as chapas de aço simulando os vasos de pressão. Os resultados permitiram determinar as condições necessárias para o atendimento aos critérios normativos em diferentes condições de inspeção submarina.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIRECT RADIOGRAPHY SYSTEMS ANALYSIS IN UNDERWATER CONDITIONS

Carlos Alexandre Pereira Patusco

May/2013

Advisors: Gabriela Ribeiro Pereira
Ricardo Tadeu Lopes

Department: Metallurgical and Materials Engineering

In this work, the possibility of using direct radiography systems in welding inspection of underwater pipelines was evaluated. Several X-rays tubes were used with the voltage range varying between 225 and 600 kV. Two DDAs models were used: DXR 250V, from General Electrics and XRD 0822, from Perkin Elmer. The samples were 10 and 16 inches nominal diameter pipes with defects. Some experiments were performed in the Laboratory of Nuclear Instrumentation (LIN) in the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) and other were done in the *Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung* (BAM). The standard requirements were based on the ISO 17636 standard. The experiments were carried out simulating the field condition. A pipe was placed in a basket with water and steel sheets simulated the pressure vessels. The results allowed the establishment of the necessary parameters for the achievement of standard requirements in different subsea inspection conditions.

ÍNDICE

I	Introdução.....	1
II	Fundamentos Teóricos	4
II.1	O Processo Radiográfico	4
II.2	A Interação da Radiação com a Matéria.....	5
II.2.1	Efeito Fotoelétrico	6
II.2.2	O Efeito Compton.....	7
II.2.3	Criação de Pares	9
II.2.4	A Probabilidade Relativa de Cada Modo de Interação.....	10
II.3	O Equipamento de Raios X	10
II.3.1	Componentes e Princípio de Funcionamento	11
II.3.2	O Espectro Contínuo	11
II.3.3	Os Picos Característicos	12
II.4	O Equipamento de Gamagrafia.....	13
II.5	Qualidade de Imagem	15
II.5.1	Sensibilidade ao Contraste.....	15
II.5.2	Resolução Espacial Básica (SR_b)	17
II.5.3	Posicionamento dos IQIs	19
II.5.4	A Relação Sinal-Ruído	20
II.5.4.1	Conceitos Básicos de SNR.....	20
II.5.4.2	Cálculo da SNR para DDAs.....	22
II.5.5	A Penumbra Geométrica	26
II.5.5.1	Fundamentos Teóricos	26
II.5.5.2	Normas	27
II.5.6	Erros de <i>Aliasing</i>	32
II.6	O Detector.....	33
II.6.1	A Radiografia Convencional	33
II.6.2	A Radiografia Computadorizada.....	36

II.6.3	A Radiografia Direta	37
II.6.3.1	DDAs de Conversão Direta.....	38
II.6.3.2	DDAs de Conversão Indireta	39
II.6.4	Comparação entre Radiografia Convencional, Computadorizada e Direta.....	42
II.7	Técnicas de Exposição Radiográfica	44
II.7.1	Parede Simples Vista Simples - PSVS	45
II.7.2	Parede Dupla Vista Simples - PDVS.....	45
II.7.3	Parede Dupla Vista Dupla - PDVD	46
II.8	Processamento de Imagens Digitais	48
II.8.1	Fidelidade e Inteligibilidade	48
II.8.2	Restauração.....	48
II.8.3	Segmentação	49
II.8.4	Extração de Atributos	49
II.8.5	Classificação.....	49
II.8.6	Operações Pontuais	50
II.8.7	Operações Locais.....	51
II.8.8	Operações Globais	52
II.9	Calibração de DDAs	52
II.9.1	Ganho e <i>Offset</i> de um DDA.....	52
II.9.2	Pixels Defeituosos em um DDA.....	53
II.9.3	Procedimento de Calibração	55
II.9.4	Artefatos e Ruído Provenientes da Calibração	58
II.10	Influência da <i>Dark Image</i>	66
III	Materiais e Métodos	68
III.1	Amostras	68
III.2	Tubos de Raios X.....	69
III.3	Fontes de Gamagrafia	72
III.4	DDAs	73

III.5	Arranjos Experimentais	74
III.5.1	Avaliação da calibração com ou sem água.....	74
III.5.2	Avaliação da espessura de calibração e da SNR	76
III.5.3	Avaliação da Qualidade da Imagem com Isótopo.....	78
III.5.4	Avaliação da condição de campo com a influência dos vasos de pressão usando tubos de raios X	79
IV	Resultados e Discussões	82
IV.1	Influência da Calibração	82
IV.2	Padrões de Calibração Com e Sem Água	84
IV.3	Padrões de Calibração de Diferentes Espessuras.....	85
IV.4	Constatações Sobre a SNR	88
IV.5	Constatações Sobre a Penumbra	93
IV.6	Arranjo Completo	101
IV.6.1	Água Por Fora (Gasodutos).....	102
IV.6.1.1	Controle de Tensão e Colimação	102
IV.6.1.2	Influência da Espessura dos Vasos de Pressão.....	105
IV.6.1.3	Influência do Uso de Fibra de Carbono	107
IV.6.1.4	Influência da Distância Fonte-Detector.....	108
IV.6.1.5	Aumento da Coluna D'Água.....	110
IV.6.1.6	Experimentos com Isótopo.....	110
IV.6.1.7	Experimentos com Tubo de Raios X Compacto	112
IV.6.2	Água Por Fora e Dentro (Oleodutos, Dutos de Injeção).....	116
IV.6.2.1	Influência da Espessura dos Vasos de Pressão.....	116
IV.6.2.2	Influência do Uso de Fibra de Carbono	118
IV.6.2.3	Influência da Distância Fonte-Detector.....	118
V	Conclusão	120
VI	Trabalhos Futuros	122
	Referências Bibliográficas.....	123

Índice de Figuras

Figura II.1 - O processo radiográfico	4
Figura II.2 - O Efeito Fotoelétrico	7
Figura II.3 - Efeito Compton	8
Figura II.4 - Seção de Choque Diferencial do Espalhamento por Efeito Compton	9
Figura II.5 - Formação de Pares	9
Figura II.6 - Predominância de cada modo de interação da radiação com a matéria ...	10
Figura II.7 - Equipamento de raios X	11
Figura II.8 - Radiação de <i>Bremsstrahlung</i>	12
Figura II.9 - Espectro característico de um equipamento de raios X	13
Figura II.10 – Fonte radioativa com encapsulamento e engate	14
Figura II.11 – Equipamento de gamagrafia com fonte, blindagem, tubo guia e colimador	14
Figura II.12 - IQI de arame	17
Figura II.13 - Perfil de linha traçado para determinação da resolução espacial básica	19
Figura II.14 - Limite para determinação da resolução espacial básica	19
Figura II.15 - Posicionamento dos IQIs sobre o material a ser inspecionado (NASCIMENTO, 2012)	20
Figura II.16 – Varredura por linhas para cálculo da SNR	23
Figura II.17 – Região de interesse ao lado de um <i>bad</i> pixel.....	24
Figura II.18 – Região de interesse contendo um <i>bad</i> pixel.....	24
Figura II.19 – Evolução do desvio-padrão com a área da região de interesse.....	25
Figura II.20 - Penumbra geométrica em torno de um entalhe	26
Figura II.21 - Composição de um filme radiográfico	34
Figura II.22 - Exemplo de Curva Sensitométrica para diversos filmes	35
Figura II.23 - Camadas de uma placa de fósforo	36
Figura II.24 - Esquema de funcionamento de uma placa de fósforo	37

Figura II.25 - DDA de conversão direta	38
Figura II.26 - DDA de conversão indireta	40
Figura II.27 - Exemplo de espectro de emissão luminosa de um cintilador e o espectro de absorção dos fotodiodos usados em um sensor CMOS	41
Figura II.28 - Relação entre densidade óptica e dose para filme e IP.....	43
Figura II.29 - Técnica de Exposição Parede Simples Vista Simples.....	45
Figura II.30 - Técnica de exposição Parede Dupla Vista Simples.....	46
Figura II.31 - Técnica de exposição Parede Dupla Vista Dupla.....	47
Figura II.32 - (a) - Imagem de solda elíptica obtida pela técnica PDVD e (b) - Imagem obtida pela técnica PDVS	47
Figura II.33 - Operações Pontuais	50
Figura II.34 - Representação gráfica de Operações pontuais de mudança de tonalidade	50
Figura II.35 - Operações locais usando kernel 3x3.....	51
Figura II.36 – (a) Pixels de um mesmo DDA com respostas diferentes; (b) – Processo de calibração	53
Figura II.37 – Linha de pixels defeituosos e pixels defeituosos devido à vizinhança ..	54
Figura II.38 – Obtenção da “ <i>dark image</i> ”	55
Figura II.39 – Subtração do <i>offset</i> na imagem adquirida	55
Figura II.40 – Imagens obtidas com diferentes ganhos	56
Figura II.41 – Imagem de DDA calibrado	56
Figura II.42 - (a) – Padrão de calibração adequado – (b) – Padrão de calibração gerando artefatos na imagem calibrada	58
Figura II.43 – Exemplo de artefato introduzido por padrão de calibração	59
Figura II.44 – Artefato de calibração “escondido” pelo ruído da imagem em imagem com baixa SNR (a) e evidente em imagem de alta SNR (b)	60
Figura II.45 – Exemplos de curvas de desvio-padrão em função do número de quadros obtida para uma determinada calibração	63
Figura II.46 - SNR em função da raiz quadrada do produto entre número de quadros e nível de cinza - à esquerda, ajustes lineares para cada corrente e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)	64
Figura II.47 – Variação do desvio-padrão com o número de quadros para <i>dark images</i> com 66ms (cima) e 2s (baixo) de tempo de exposição.....	66

Figura II.48 - Imagem sem atualização de dark frame - (a), arame 11 - e com "dark frame refresh" - (b), arame 13	67
Figura III.1 – Introdução de defeitos durante soldagem de tubo de 16" - (a) - arame de cobre para introdução de trincas a quente e (b) - introdução de poros.....	69
Figura III.2 – Tubo de 16" por 10 mm de espessura	69
Figura III.3 – Tubos de raios X sem controle de colimação utilizados no LIN (a) e no BAM (b, c).....	70
Figura III.4 – Tubo de 600 kV (a), colimador (b) e controle do colimador (c).....	71
Figura III.5 – Tubo de raios X compacto da GE – 280 kV.....	71
Figura III.6 – Fonte de Se-75.....	72
Figura III.7 – DDA GE DXR 250V.....	73
Figura III.8 – DDA Perkin Elmer modelo XRD 0822CO15	74
Figura III.9 - Avaliação da influência da água	75
Figura III.10 – Arranjo experimental – Determinação da influência da água ao redor do tubo e posteriormente do arranjo de calibração mais adequado.....	77
Figura III.11 – Arranjo utilizado para avaliar a qualidade da imagem com Se-75.....	78
Figura III.12 – Esquema do arranjo experimental utilizado para avaliar radiografias submarinas.....	79
Figura III.13 – Arranjo experimental utilizado no LIN.....	80
Figura III.14 – Exemplo de simulação por elementos finitos do vaso de pressão do detector (a) e tampa do vaso de pressão após teste hidrostático (b).....	81
Figura III.15 - (a) - Simulação de falha por colapso, campo de deslocamentos e (b) - Simulação de falha por compressão, tensão de Von Mises.....	82
Figura IV.1 – Comparação entre imagem com dados brutos (a) e imagem calibrada (b)	83
Figura IV.2 – Comparação entre padrões de calibração sem água (a) e com água (b) .	85
Figura IV.3 – Visibilidade de trinca usando calibração com padrão de 20 mm (a) e de 35 mm (b)	86
Figura IV.4 – Sensibilidade ao contraste com padrões de 20 mm (a) e 35 mm (b).....	87
Figura IV.5 - Formação do <i>shading</i> devido à radiação atravessando diferentes espessuras de material	89
Figura IV.6 – Comparação da SNR sem água (a) e com água (b).....	90
Figura IV.7 – Amostragem tomada na direção horizontal para medir desvio-padrão ..	91

Figura IV.8 – Amostragem tomada em direção aproximadamente perpendicular ao <i>shading</i> para medir desvio-padrão.....	92
Figura IV.9 – Aspectos práticos da penumbra geométrica	93
Figura IV.10 - Mínima distância fonte-objeto em função do tamanho focal para espessura de 20 mm e distância objeto-detector de 50 mm – Norma ISO/FDIS 17636-2:2012.....	95
Figura IV.11 - Mínima distância fonte-objeto em função do tamanho focal para espessura de 10 mm e distância objeto-detector de 50 mm – Norma 17636-2	95
Figura IV.12 – Perfil de linha inicial (a) e novo perfil de linha após uso de filtro de alumínio para endurecer o feixe e chapa de cobre para absorver radiação espalhada (b)	97
Figura IV.13 – Feixe do tubo de 420 kV colimado com placas de chumbo	97
Figura IV.14 – Perda de resolução ao aumentar a potência às custas de aumento no tamanho focal - Primeiro par de fios não distinguível é o oitavo para tamanho focal de 3 mm (a) e o quinto para 6 mm (b).....	98
Figura IV.15 – Comparação da sensibilidade ao contraste usando tamanhos focais de 3 mm (a) e 6 mm (b) - manteve-se o 11º arame no IQI de contraste	99
Figura IV.16 – Aumento de tensão e corrente no tubo de 420 kV.....	100
Figura IV.17 – Controle eletrônico da colimação levando a ganho em contraste - Comparação entre imagens fracamente (a) e fortemente (b) colimadas	103
Figura IV.18 - Espalhamento em arranjo com colimador.....	104
Figura IV.19 - Espalhamento em arranjo sem colimador	104
Figura IV.20 – Imagens obtidas com Selênio sem colimação (a) e com colimação grosseira (b).....	111
Figura IV.21 – Comparação entre imagens obtidas com 16 quadros (a) e 100 quadros (b) usando Selênio	112

I INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no Brasil vem exigindo o emprego de dutos rígidos submarinos em condições cada vez mais agressivas. Notoriamente a exploração do Pré-Sal exigirá aplicações em lâminas d'água da ordem de até 3000 metros, exposição interna a fluidos extremamente agressivos e solicitações de fadiga no caso do uso de *risers* rígidos e de vibração induzida por vórtices em trechos horizontais no leito marinho (*flowlines*).

Em virtude deste cenário, torna-se necessário que se disponha de ferramentas de inspeção confiáveis para dutos submarinos, especialmente para exame de juntas soldadas em dutos rígidos, as quais são pontos concentradores de tensões, representando os elos críticos para garantia da integridade estrutural de todo o duto. Atualmente, o método de inspeção mais utilizado é a passagem de pigs instrumentados. Esses pigs podem possuir diferentes princípios de funcionamento, baseados por exemplo em métodos eletromagnéticos, ultrassônicos ou ainda em sensores geométricos de alta resolução, como o pig palito. No entanto, estes pigs são ferramentas majoritariamente empregadas para medição de espessura e não para detecção de trincas. Apesar do mercado disponibilizar pigs capazes de realizar inspeção de solda em dutos rígidos, a Petrobras não tem um histórico bem sucedido de aplicação de tais ferramentas.

Na Petrobras, 40 a 50% dos dutos rígidos em operação não são pigáveis. Adicionalmente, grande parte dos dutos que ainda serão lançados, principalmente como SCRs (*Steel Catenary Risers*), não serão pigáveis. Mesmo no que se refere aos dutos pigáveis, muitas vezes o laudo do pig pode ser dúbio e gerar incertezas na inspeção. Seja como for, faz-se necessário o uso de uma técnica complementar de inspeção, geralmente empregada para medições localizadas por razões práticas.

O objetivo deste trabalho é avaliar o emprego da técnica de radiografia direta para a realização de medições pontuais objetivando a detecção de trincas. A radiografia é uma técnica historicamente empregada na inspeção de juntas soldadas, produtos fundidos e laminados.

No Brasil existe um histórico, pioneiro a nível mundial, do emprego de radiografia na inspeção de dutos submarinos com apoio de mergulhador usando filmes convencionais e placas de fósforo (MARINHO, 2006). O interesse em avaliar o uso de detectores planos ou DDAs (*Digital Detector Arrays*) reside no fato de que esse tipo de detector dispensa a fase de extração da imagem latente, representada pela revelação radiográfica ou pelo escaneamento/varredura de placas de fósforo, permitindo o acompanhamento da imagem obtida em tempo real.

No caso de inspeções submarinas, a possibilidade do uso da radiografia direta traria grandes benefícios, tais como: eliminação do retrabalho, pois a imagem poderia ser acompanhada em tempo real através do envio do sinal por um cabo umbilical; menor tempo de exposição, o que implica em ganho de produtividade e menores doses. Além de tudo, mantêm-se os ganhos da radiografia computadorizada, como a possibilidade de execução do tratamento digital das imagens, facilidade de arquivamento, envio e processamento das imagens através de software adequado. A resolução espacial, apesar de não ser tão boa quanto a conseguida com filmes convencionais ou placas de fósforo, pode ser compensada através de uma alta relação sinal-ruído obtida por meio de um procedimento de calibração adequado e um número de quadros suficientemente alto (MARINHO, 2011).

Ao mesmo tempo, a substituição do filme convencional ou placas de fósforo por um DDA traz complicadores, como: o fato de ser um detector plano, que por não poder acompanhar a curvatura do tubo, gera problemas de magnificação; a necessidade de um vaso de pressão para o DDA, já que este não pode ser submetido à pressão externa como um filme convencional, o que acarreta atenuação e espalhamento da radiação na parede do vaso e na camada de água entre o vaso de pressão e o tubo ou estrutura a ser inspecionada.

Nesse trabalho, será avaliada a qualidade da imagem de DDAs com o uso de diferentes fontes em um arranjo experimental que simula a condição submarina. Para isso, foram avaliadas as resoluções espacial e ao contraste de diferentes corpos de prova pela técnica PDVS (Parede Dupla Vista Simples). Além disso, avaliou-se a detectabilidade de alguns defeitos, como poros e trincas presentes nos corpos de prova e os valores de relação sinal-ruído obtidos. Os ensaios foram realizados em condição emersa e submersa, com e sem água no interior das amostras, simulando oleodutos e gasodutos.

Adicionalmente, chapas de aço e de fibra de carbono simulando os vasos de pressão da fonte e do detector também foram utilizados.

No capítulo II, será dado um breve histórico do uso de DDAs e do seu princípio de funcionamento. Será dada também a base teórica envolvendo: a interação da radiação com a matéria, o espectro típico de radiação de uma fonte de raios X, o processamento digital de imagens, a qualidade da imagem radiográfica e os fatores que afetam a qualidade da imagem num sistema de radiografia direta, inclusive seu procedimento típico de calibração.

No capítulo III, descreve-se todo o arranjo experimental; incluindo: fontes, detectores e corpos de prova utilizados; parâmetros selecionados nos equipamentos, distâncias relativas entre foco, detector e objeto; assim como o procedimento de calibração utilizado.

No capítulo IV, são apresentados os resultados dos experimentos e são tecidos comentários sobre os mesmos, enquanto no capítulo V faz-se a conclusão do estudo.

Finalmente, vale ressaltar que o presente trabalho tem caráter pioneiro na investigação do uso de DDAs para aplicações submarinas. Além disso, o processo de calibração desse tipo de detector, que aqui é exaustivamente tratado, tem também poucas referências na literatura. Essa falta de referências motivou a criação de um procedimento adequado para calibração de DDAs, abrangente também para configurações de inspeção diferentes das que foram escopo deste trabalho.

II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em um primeiro momento, será dado um embasamento teórico genérico referente aos processos radiográficos para em seguida detalhar a radiografia direta, explicando o princípio de funcionamento dos DDAs.

II.1 O PROCESSO RADIOGRÁFICO

A radiografia, seja ela convencional, computadorizada ou direta, baseia-se sempre na atenuação diferenciada da radiação pelas partes da estrutura a ser inspecionada. Essa atenuação diferente pode se dar devido a diferenças de densidade (número atômico) e geometria para uma dada faixa de energia (ANDREUCCI, 2010). A Figura II.1 ilustra esse fenômeno.

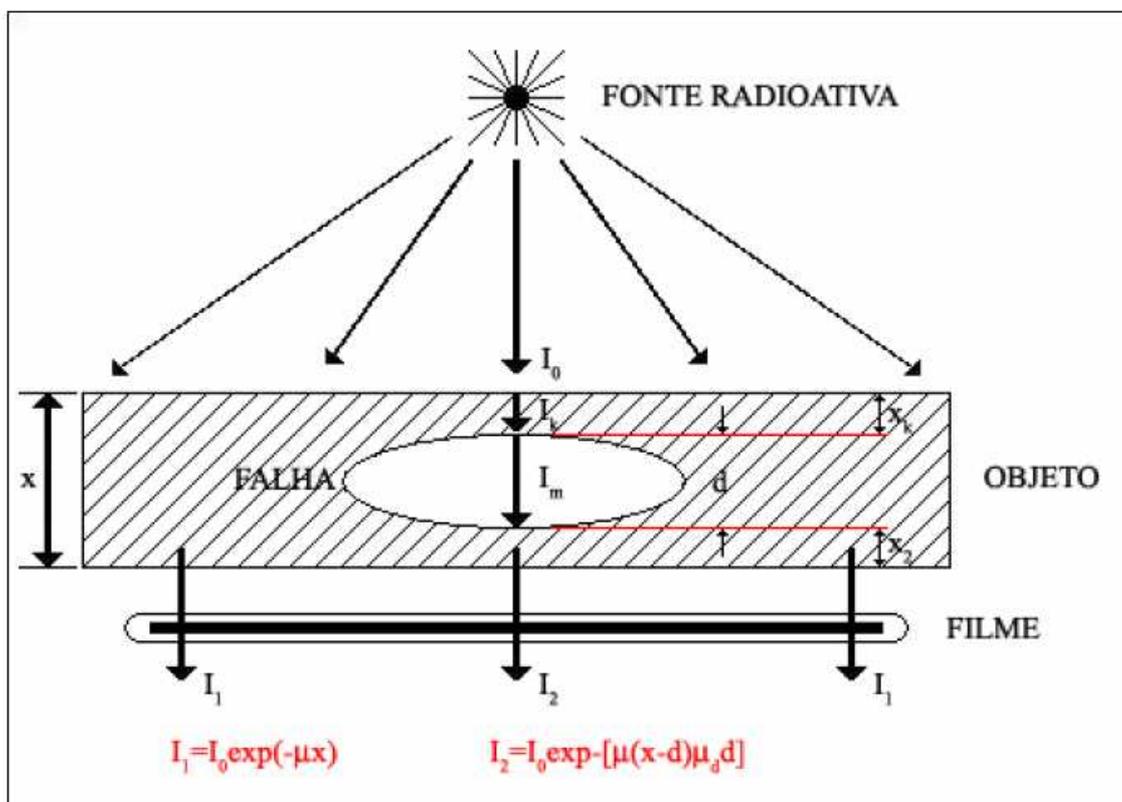


Figura II.1 - O processo radiográfico (OLIVEIRA, 2007)

De um modo geral, o decaimento da intensidade da radiação com a espessura é exponencial para uma dada energia, conforme a equação:

$$I = I_0(E).e^{-\mu(E).x} \quad (\text{II.1})$$

onde,

I_0 é a intensidade da energia radioativa que sai da fonte;

E é a energia da radiação;

μ é o coeficiente total de absorção do material, compreendendo a absorção pelos efeitos Fotoelétrico, Compton e Criação de Pares;

x é a espessura atravessada do material;

Ou seja, no caso da $I = I_0(E).e^{-\mu(E).x}$ (II.1)

), as intensidades de radiação I_1 e I_2 incidentes no detector serão diferentes porque os coeficientes de absorção da radiação no objeto - μ e na falha μ_d são diferentes para cada faixa de energia (ANDREUCCI, 2010).

Entretanto, quando se fala em coeficiente de absorção de energia radioativa, o " μ " da $I = I_0(E).e^{-\mu(E).x}$ (II.1)

$$)I = I_0(E).e^{-\mu(E).x} \quad (\text{II.1})$$

refere-se na verdade a uma soma de diferentes coeficientes de absorção, cada um relacionado com um modo diferente de interação da radiação com a matéria.

II.2 A INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Serão descritas sucintamente as três formas de interação da radiação com a matéria que combinadas compõem o coeficiente total de atenuação, quais sejam: Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton e Criação de Pares.

II.2.1 EFEITO FOTOELÉTRICO

No efeito fotoelétrico, a radiação incidente, seja ela X ou γ , é completamente absorvida por um elétron orbital do átomo. Esse elétron é então expulso do átomo com uma energia bem conhecida, que é dada por (KNOLL, 2000):

$$E_c = h\nu - E_b \quad (\text{II.2})$$

onde,

h é a constante de Planck, que vale $4,13 \cdot 10^{-15}$ eV.s

ν é a frequência da radiação incidente

E_b é a energia de ligação do átomo que é expulso

A Figura II.2 ilustra o efeito fotoelétrico.

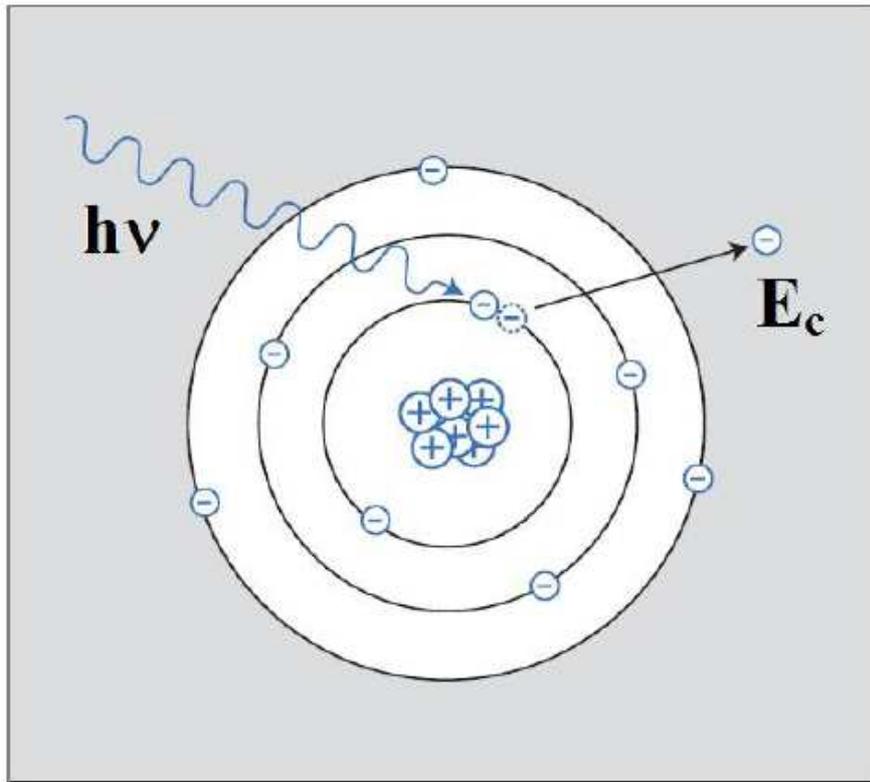


Figura II.2 - O Efeito Fotoelétrico (RAAD, 2007)

O efeito fotoelétrico é predominante para baixas energias e elevados números atômicos. Embora não se tenha uma expressão analítica que relacione a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico com o número atômico e a energia do fóton incidente, pode-se aproximar com razoável precisão através da (II.3 de cunho empírico (KNOLL, 2000).

$$\tau \cong cte. \frac{Z^n}{E^{3,5}} \quad (II.3)$$

onde,

Z é o número atômico do material penetrado

n é um expoente que varia entre 4 e 5

E é a energia de da radiação

II.2.2 O EFEITO COMPTON

No Efeito Compton, o fóton cede não toda, mas apenas parte de sua energia a um elétron periférico do átomo. Por esse motivo, o elétron retirado de sua órbita pode seguir sua trajetória tanto com pequenas energias quanto com quase toda a energia incidente do fóton (KNOLL, 2000). Isso vai depender do ângulo entre a trajetória do fóton e a tangente à trajetória do elétron no momento da colisão. A Figura II.3 ilustra o Efeito Compton.

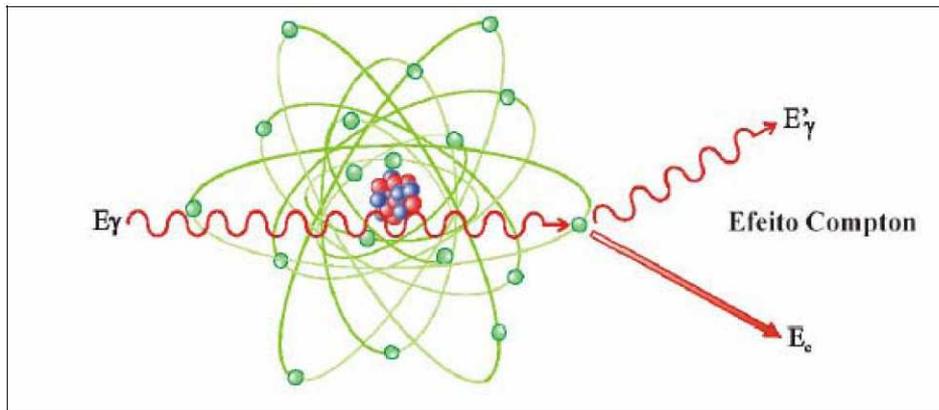


Figura II.3 - Efeito Compton (OLIVEIRA, 2007)

O Efeito Compton é mais provável que o Efeito Fotoelétrico para valores de energia maiores, como os tipicamente empregados em fontes de raios X. A seção de choque diferencial do espalhamento por efeito Compton pode ser dada pela distribuição de Klein-Nishina (Equação II.4) ou representada graficamente, conforme a Figura II.4 (KNOLL, 2000).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (\text{II.4})$$

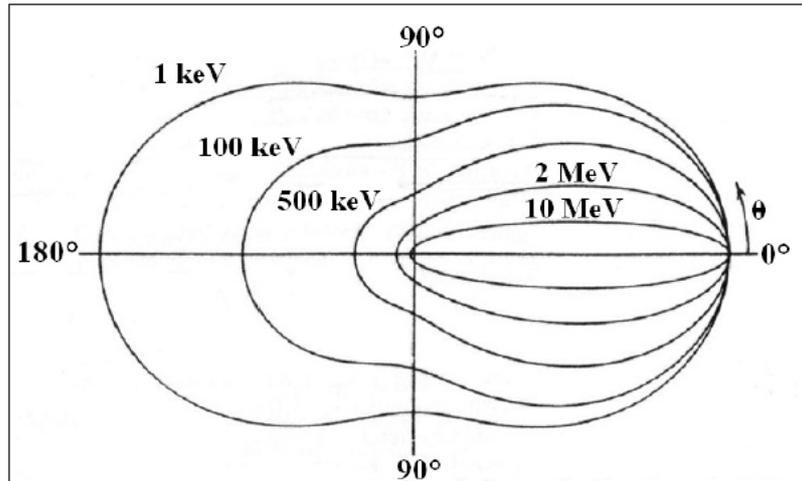


Figura II.4 - Seção de Choque Diferencial do Espalhamento por Efeito Compton (KNOLL, 2000)

II.2.3 CRIAÇÃO DE PARES

É a forma predominante de interação da radiação com a matéria para altas energias (acima de 2 MeV). Ocorre quando fótons de energia igual ou superior a 1,022 MeV ($2mc^2$) interagem com o núcleo de um material normalmente de número atômico elevado, produzindo um par pósitron-elétron. A energia excedente aos 1,022 MeV é convertida em energia cinética para o pósitron e o elétron criados. O pósitron formado, posteriormente se combina com um elétron do meio e dá origem a um par de fótons de 511 keV cada. A Figura II.5 apresenta esquematicamente o fenômeno (KNOLL, 2000).

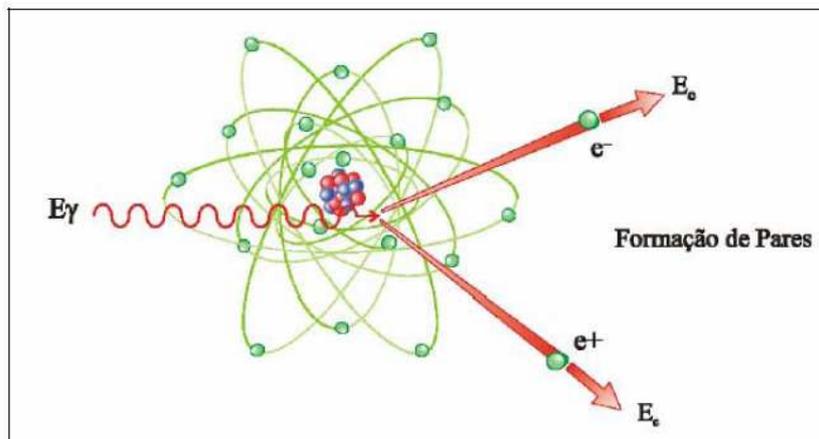


Figura II.5 - Formação de Pares (TAUHATA *et al.*, 2003)

II.2.4 A PROBABILIDADE RELATIVA DE CADA MODO DE INTERAÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, o Efeito Fotoelétrico é predominante para baixas energias, enquanto o Efeito Compton predomina para energias maiores, da ordem de grandeza das normalmente usadas em radiografias industriais. Para energias entre 100 e 500 keV, entretanto, o efeito fotoelétrico ainda predomina em elementos de número atômico elevado. A formação de pares só é relevante para energias muito grandes, da ordem de alguns MeV (KNOLL, 2000). A Figura II.6 mostra a predominância de cada modo de interação da radiação com a matéria em função do número atômico e da energia.

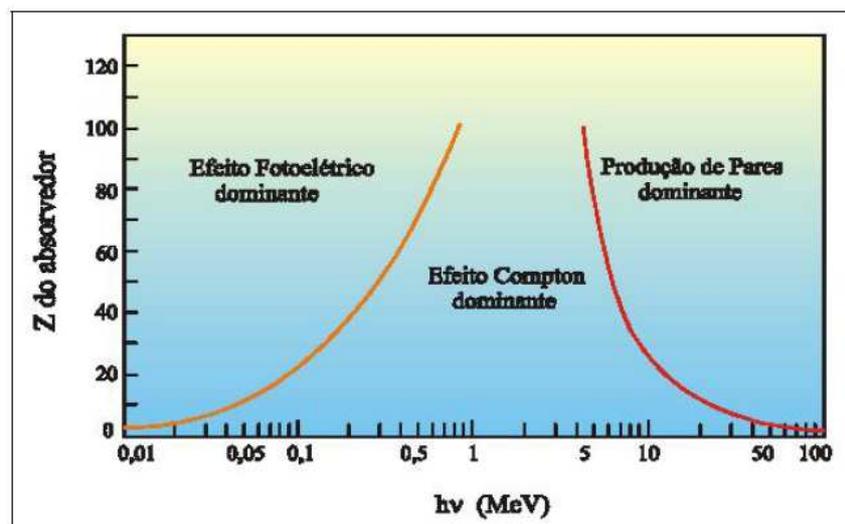


Figura II.6 - Predominância de cada modo de interação da radiação com a matéria (TAUHATA *et al.*, 2003)

II.3 O EQUIPAMENTO DE RAIOS X

Os experimentos foram realizados utilizando diversos tipos de equipamentos de raios X. O princípio básico de funcionamento desses equipamentos será brevemente explicado neste capítulo.

II.3.1 COMPONENTES E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A Figura II.7 mostra o princípio de funcionamento de um tubo de raios X. A radiação é produzida quando uma determinada corrente e uma diferença de potencial definidas pelo usuário são aplicadas. O catodo possui uma espiral, normalmente de Tungstênio. Quando passa corrente elétrica por esse filamento, ocorre um grande aquecimento do mesmo, atingindo temperaturas superiores a 3000 graus Celsius. Por efeito termoiônico, é gerada então uma nuvem eletrônica na região em torno do catodo. Quando se aplica uma diferença de potencial entre o catodo e o anodo, essa nuvem eletrônica é então acelerada em direção ao anodo. Em função da interação da radiação com o material do anodo (normalmente de Tungstênio), dois tipos de radiação podem ser criados a partir dos fenômenos de freamento e colisão do elétrons, gerando respectivamente um espectro contínuo e picos característicos (ANDREUCCI, 2010).

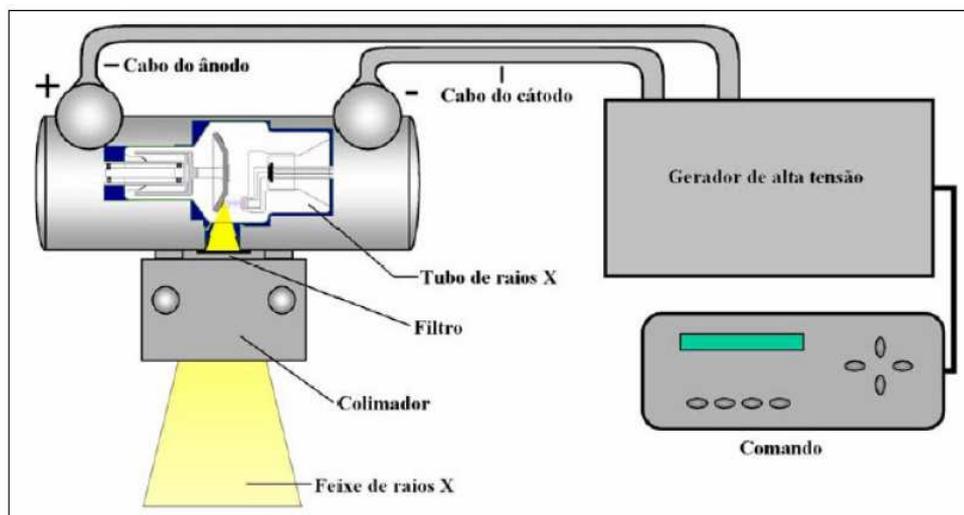


Figura II.7 - Equipamento de raios X (OLIVEIRA, 2007)

II.3.2 O ESPECTRO CONTÍNUO

Sabe-se que uma partícula carregada livre emite radiação eletromagnética quando tem a sua trajetória alterada. No espectro da radiação de Bremsstrahlung ou contínuo, a energia da radiação é tanto maior quanto maior for a deflexão dos elétrons

emitidos pelo catodo em direção ao anodo durante o freamento. Essa deflexão ocorre devido à interação do elétron gerado pelo efeito termoiônico com as cargas positivas dos núcleos atômicos do anodo. A Figura II.8 mostra o espectro típico da radiação de *Bremsstrahlung* (ANDREUCCI, 2010)

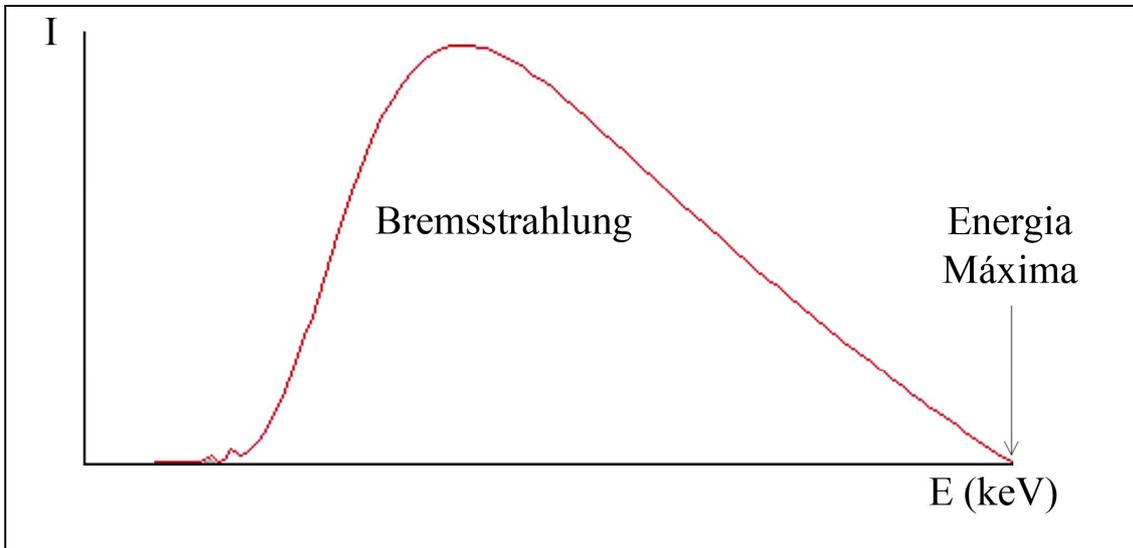


Figura II.8 - Radiação de *Bremsstrahlung* (OLIVEIRA, 2010)

II.3.3 OS PICOS CARACTERÍSTICOS

Se um elétron que é acelerado do catodo para o anodo interage com um átomo do alvo, arrancando deste um elétron de uma camada interna, como K ou L, cria-se uma vacância. Essa vacância é preenchida por um átomo de uma camada mais externa. Ao fazer essa transição para uma camada mais interna, o átomo libera fótons de raios X com uma energia característica, correspondente à diferença entre as energias de ligação do elétron ao átomo em cada camada.

Esses raios X característicos somam-se àqueles originados pela radiação de *Bremsstrahlung*, fazendo com que o espectro típico de um equipamento de raios X tenha o formato indicado na Figura II.9 (ANDREUCCI, 2010).

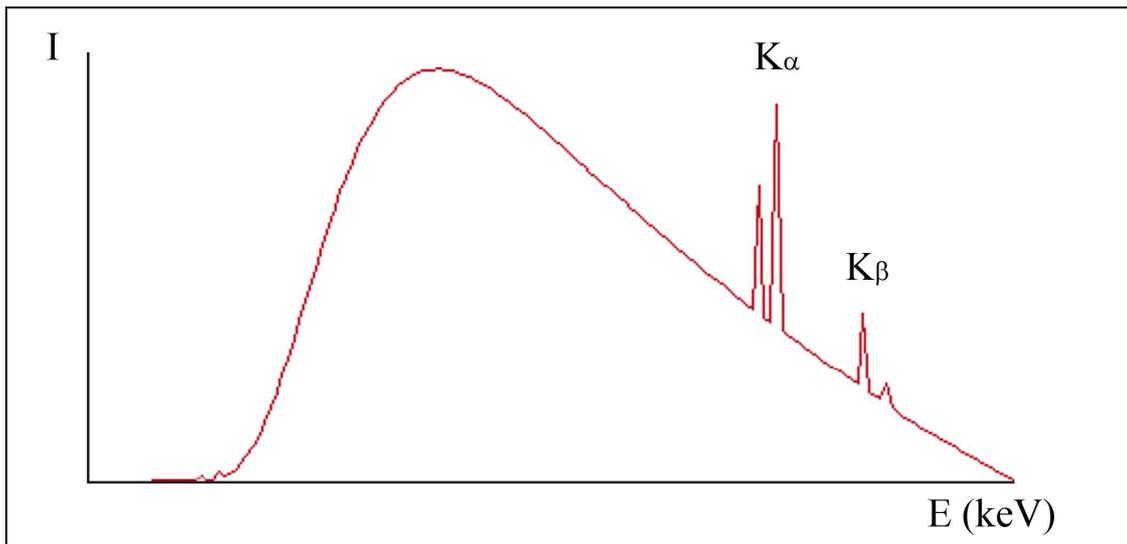


Figura II.9 - Espectro característico de um equipamento de raios X (OLIVEIRA, 2010)

II.4 O EQUIPAMENTO DE GAMAGRAFIA

Equipamentos de gamagrafia são amplamente utilizados em inspeções de campo, por possuírem vantagens em relação aos tubos de raios X como: não precisarem de energia elétrica, serem capazes de penetrar grandes espessuras de aço e serem portáteis. Entretanto, o uso de isótopos apresenta a desvantagem da constante preocupação com a segurança, já que os isótopos emitem constantemente radiação e devem portanto ser adequadamente blindados, assim como protegidos contra choques mecânicos, inundação e explosão.

A Figura II.10 mostra como o isótopo é armazenado em um equipamento de gamagrafia. No exemplo, dois discos de Irídio com 3 mm de diâmetro por 0,25 mm de espessura são colocados em uma cápsula de aço inoxidável austenítico que fica em uma ponta de um cabo de aço. Na outra ponta, fica um engate utilizado para transporte e exposição da fonte (ANDREUCCI, 2010).

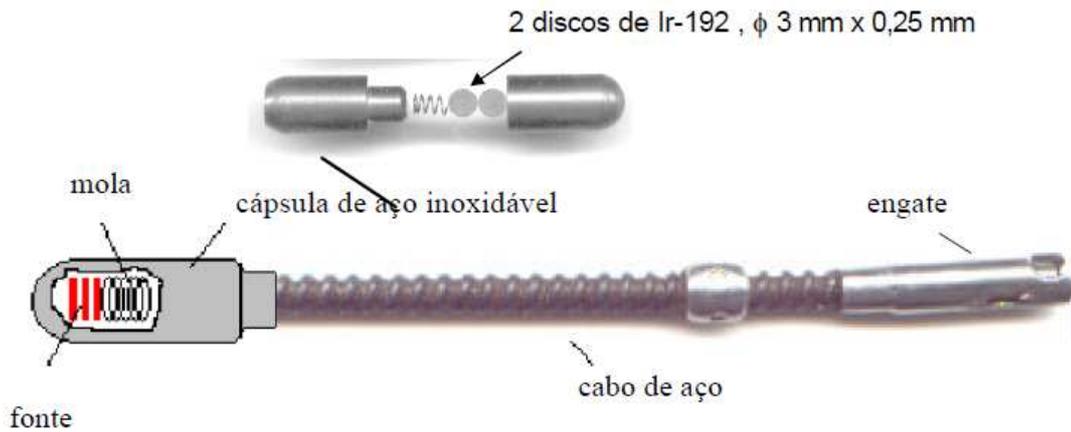


Figura II.10 – Fonte radioativa com encapsulamento e engate (ANDREUCCI, 2010)

A Figura II.11 mostra a fonte encapsulada numa blindagem de urânio exaurido. Normalmente, por fora dessa blindagem há ainda uma camada de aço para proteger a blindagem contra danos mecânicos. Com o operador afastado do equipamento, o cabo de comando é acionado (manualmente, pneumaticamente ou hidraulicamente) para transportar a fonte para fora da blindagem. A fonte é então transportada através do tubo guia e um colimador é utilizado para que a radiação só se propague na região de interesse. Após a exposição, a fonte é transportada através do cabo de comando de volta para a blindagem (ANDREUCCI, 2010).

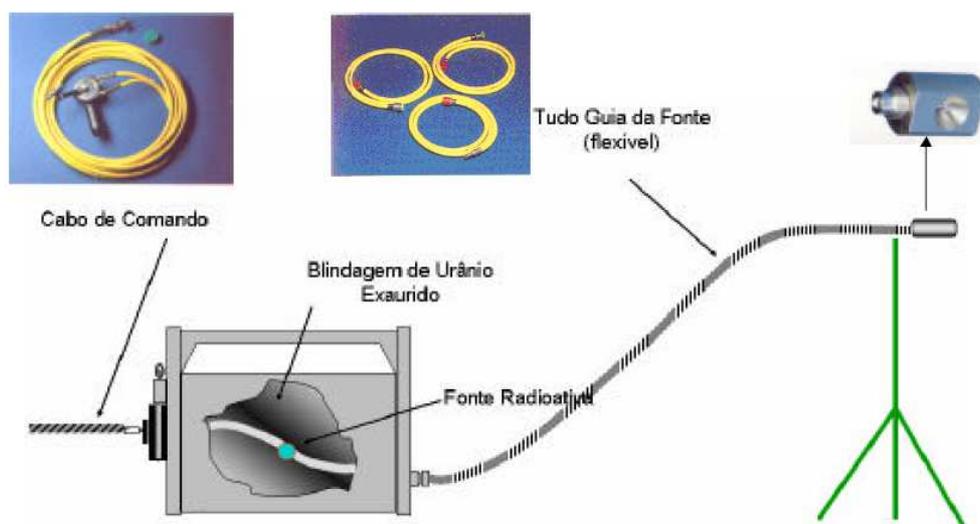


Figura II.11 – Equipamento de gamagrafia com fonte, blindagem, tubo guia e colimador (ANDREUCCI, 2010)

Diversos isótopos podem ser utilizados na radiografia industrial, sendo que entre os mais comuns estão o Iridio-192, o Cobalto-60 e o Selênio-75. No presente trabalho, foi utilizada uma fonte de Selênio, por isso esse tipo de fonte será descrito a seguir com maiores detalhes.

Fontes de Selênio são obtidas através do bombardeamento por nêutrons do Se-74, levando à formação do isótopo radioativo Se-75. A meia-vida desse isótopo é de 119,78 dias e os picos característicos de seu espectro possuem energias entre 6 e 405 keV. Para inspeção de aços, sua faixa de utilização mais efetiva se dá para espessuras entre 4 e 30 mm. Seu uso na indústria é relativamente recente, mas proporciona uma boa qualidade de imagem, comparável à obtida com raios X (ANDREUCCI, 2010).

II.5 QUALIDADE DE IMAGEM

II.5.1 SENSIBILIDADE AO CONTRASTE

A sensibilidade ao contraste indica a menor diferença entre dois níveis de radiação que podem ser distinguidos em uma imagem radiográfica. Na radiografia digital, essa resolução depende não somente da quantidade de níveis de cinza que o sistema é capaz de representar como também de fatores físicos, como a radiação espalhada.

De uma forma geral, o contraste pode ser dividido em dois tipos: contraste do sujeito e contraste da imagem (OLIVEIRA, 2007).

O contraste do sujeito é a variação dos níveis de cinza na imagem em função de diferenças na espessura e composição química da peça sendo inspecionada. Ou seja, um feixe homogêneo de raios X que incide sobre uma peça que é não homogênea, seja por fatores geométricos ou por sua composição, emergirá da peça com uma distribuição heterogênea dos níveis de radiação.

Já o contraste da imagem é o grau de diferenciação em tons de cinza de duas estruturas adjacentes. Ele depende basicamente das características do corpo a ser inspecionado, da intensidade do feixe de raios X e do sistema de detecção.

Em uma imagem radiográfica, o contraste é medido através do uso de IQIs de arames. Este, conforme a norma ISO 19232-1, é fabricado com 7 arames dispostos paralelamente, cujo material é radiograficamente similar ao material ensaiado. A relação entre o diâmetro do arame e seu número respectivo é descrito na norma anteriormente indicada. A Tabela II.1 apresenta esses parâmetros.

Tabela II.1 - IQI de Fio – (ISO 19232-1)

Número	Diâmetro (mm)	Tolerância (mm)	Número	Diâmetro (mm)	Tolerância (mm)
1	3,20	±0,03	11	0,320	±0,01
2	2,50	±0,03	12	0,250	±0,01
3	2,00	±0,03	13	0,250	±0,01
4	1,60	±0,02	14	0,160	±0,01
5	1,25	±0,02	15	0,125	±0,005
6	1,00	±0,02	16	0,100	±0,005
7	0,80	±0,02	17	0,080	±0,005
8	0,63	±0,02	18	0,063	±0,005
9	0,50	±0,01	19	0,050	±0,005
10	0,40	±0,01	X	X	X

Quanto maior o número do arame, menor é o seu diâmetro. Assim, para exigências mais rigorosas ou um nível de qualidade maior, exige-se que sejam visualizados arames mais finos. A Figura II.12 mostra os componentes principais de um IQI de arame. O IQI, sempre que possível, deve ser colocado sobre o cordão de solda, de forma que os arames estejam perpendiculares à linha da solda. Segundo a norma ISO 19232-1, para se determinar o valor da qualidade da imagem, o número de fio mais fino visível na radiografia deve ser tomado como o valor de qualidade da imagem, sempre e quando o fio tiver um comprimento visível contínuo de pelo menos 10 mm.

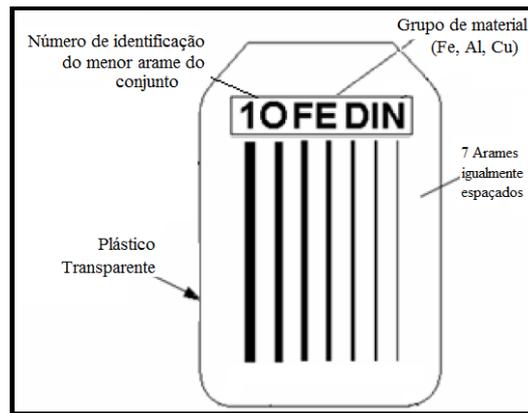


Figura II.12 - IQI de arame (ISO 19232-1)

II.5.2 RESOLUÇÃO ESPACIAL BÁSICA (SR_B)

A resolução espacial indica a menor distância entre dois pontos de modo que eles possam ser distintos em uma imagem radiográfica. Dependendo do tipo de radiografia, diferentes fatores podem influenciar na resolução espacial, tais como (OLIVEIRA, 2007):

- No caso da radiografia convencional, a classe do filme, ou seja, o tamanho dos grãos de prata dispersos na emulsão;
- No caso da radiografia computadorizada, o tamanho do foco do laser, a espessura da placa de fósforo e a radiação espalhada na placa;
- No caso da radiografia direta, o tamanho do pixel do DDA;

Para o levantamento da resolução espacial, utiliza-se o IQI de fio duplo, que consiste em uma barra fabricada em plástico com treze pares de fios metálicos inseridos, cujo espaçamento entre estes é igual ao diâmetro dos mesmos. O arame duplo é fabricado de acordo com a norma ASTM E 2002, onde os pares de fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina, as dimensões devem corresponder ao especificado em norma. A Tabela II.2 mostra a numeração dos elementos, a desfocagem geométrica correspondente ($2d$), o espaçamento entre os fios (d), a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm).

Tabela II.2 - Parâmetros do IQI de Fio Duplo (ASTM E 2002)

Elemento	Desfocagem Geométrica (mm)	Diâmetro do fio (mm)	Tolerância	pl/mm
13D	0.10	0.050	±0.005	10.000
12D	0.13	0.063		7.936
11D	0.16	0.080		6.250
10D	0.20	0.100		5.000
9D	0.26	0.130		3.846
8D	0.32	0.160	±0.01	3.125
7D	0.40	0.200		2.500
6D	0.50	0.250		2.000
5D	0.64	0.320		1.563
4D	0.80	0.400		1.250
3D	1.00	0.500	±0.02	1.000
2D	1.26	0.630		0.794
1D	1.60	0.800		0.625

No caso de inspeções de soldas, o IQI de fio duplo deve preferencialmente ser orientado a 5° da perpendicular à solda, para assim evitar problemas de visualização dos pixels gerados pela imagem dos fios. Para obter a resolução espacial do sistema, primeiramente deve ser traçado o perfil de linha na imagem do IQI. O perfil de linha gera um gráfico dos valores de cinza em função da distância. O valor da resolução espacial básica é definido como a metade do valor da penumbra do primeiro par de fios que não pode ser resolvido, ou seja, quando a separação entre os fios não pode ser visualizada. O primeiro par de fios não resolvido é determinado quando a diferença entre os valores de máximo e mínimo de intensidades é menor do que 20% da sua intensidade máxima, sendo este o limite discernível do sistema. A Figura II.13 mostra um exemplo de um perfil de linha traçado sobre uma imagem de um IQI de fio duplo (OLIVEIRA, 2007) com o objetivo de determinação da resolução espacial básica, enquanto a Figura II.14 ilustra o critério dado pela norma EN 14784-1 para identificar o primeiro par de arames não discernível do IQI.

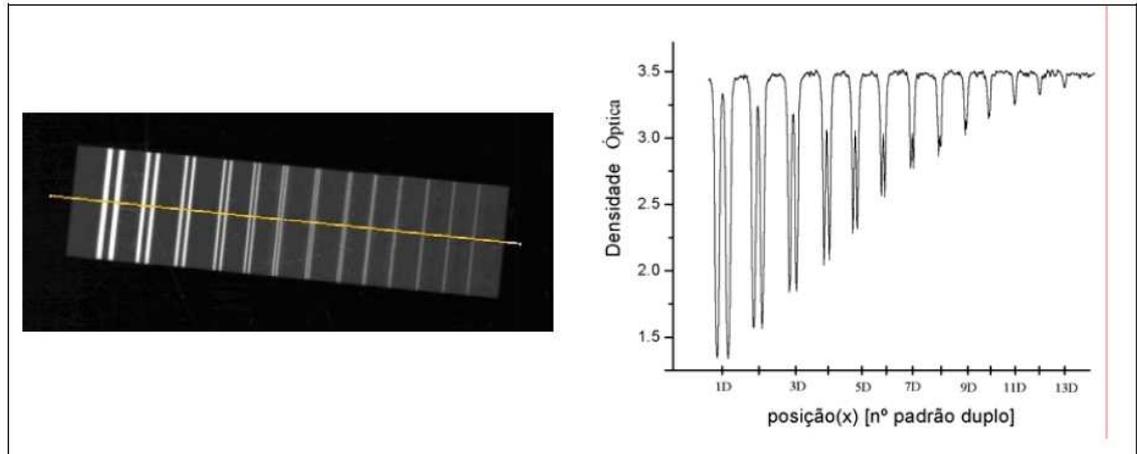


Figura II.13 - Perfil de linha traçado para determinação da resolução espacial básica (OLIVEIRA, 2007)

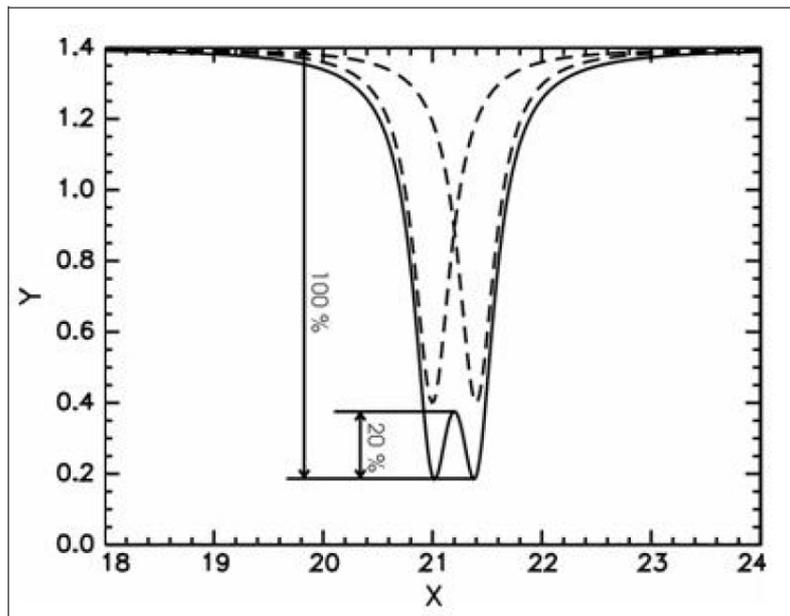


Figura II.14 - Limite para determinação da resolução espacial básica (EN 14784 - 1)

II.5.3 POSICIONAMENTO DOS IQIS

O esquema de posicionamento dos IQIs para a execução das imagens digitais é mostrado na Figura II.15 . O IQI de Fio utilizado foi fabricado de acordo com a ISO 19232-1 e o IQI de Fio Duplo de acordo com a ISO 19232-5.

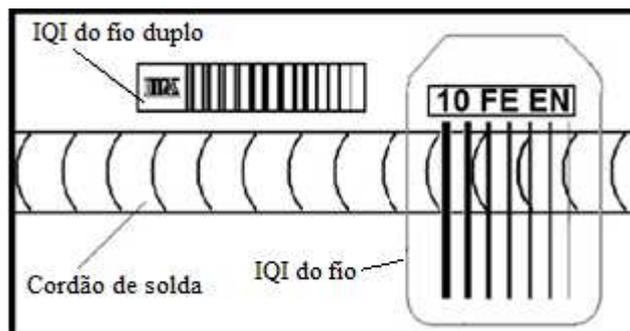


Figura II.15 - Posicionamento dos IQIs sobre o material a ser inspecionado
(NASCIMENTO, 2012)

II.5.4 A RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Neste item, serão descritos tanto o conceito de relação sinal-ruído quanto a forma como ela é calculada no caso específico de DDAs, conforme a norma EN 14784.

II.5.4.1 CONCEITOS BÁSICOS DE SNR

Quando se tem uma peça de espessura e constituição completamente homogênea, a sua imagem radiográfica também deveria ser completamente homogênea, ou seja, apresentar sempre o mesmo nível de cinza. No entanto, não é isso o que acontece. Flutuações no nível de cinza da imagem sempre acontecerão devido aos ruídos, que podem ser de diversas naturezas, tais como (OLIVEIRA, 2007):

- o ruído de quanta, associado a não uniformidades no feixe de raios X ou a não uniformidades na parte do feixe efetivamente absorvida pelo detector
- ruídos eletrônicos, no caso da radiografia direta e computadorizada, que ocorrem entre a conversão da radiação em sinal elétrico e a sua digitalização
- o ruído de quantização, associado à quantidade de bits utilizado no processo de conversão analógico-digital

É importante, portanto, determinar a razão entre o sinal realmente desejável e o ruído contido na imagem. Esta razão, conhecida como relação sinal-ruído ou SNR (*Signal to Noise Ratio*) é dada matematicamente como a razão entre a média do sinal em

uma determinada região da imagem, supostamente homogênea e o desvio-padrão do sinal nessa região, ou seja:

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{II.5})$$

onde,

S é o nível médio do sinal em uma determinada região da imagem, ou seja:

$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (\text{II.6})$$

σ é o desvio-padrão da intensidade do sinal na região de interesse:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_{i,j} - \bar{X})^2}{(ixj) - 1}} \quad (\text{II.7})$$

Nas Equações II.6 e II.7, os índices i e j são respectivos ao número de linhas e colunas da área utilizada para determinar a SNR e $X_{i,j}$ são os valores de intensidade em cada ponto (**OLIVEIRA, 2007**).

Já a relação Sinal-Ruído Normalizada, a SNR_n , leva em conta também a resolução espacial básica e é dada pela Equação II.8.

$$SNR_n = \frac{SNR_{m\u00e9dia} \cdot 88,6}{SR_b} \quad (\text{II.8})$$

Nota-se que para uma mesma SNR medida, quanto menor for a resolução espacial básica, maior será a SNR normalizada. A constante de 88,6 está relacionada com uma tentativa de correlacionar a classe de filmes convencionais com a SNR de imagens digitais. Uma lupa com abertura de 100 μm é usada para medir a densidade óptica em filmes convencionais e um círculo de diâmetro 100 μm tem a mesma área que um quadrado de diâmetro 88,6 μm . Como em um feixe uniforme, o ruído quântico

diminui à medida que o tamanho do pixel aumenta, uma comparação entre SNRs de radiografias convencionais e digitais deveria levar em conta o tamanho do pixel. A SNR da radiografia convencional era obtida em função do gradiente de densidade óptica e da granulometria do filme, utilizando uma correlação estatística. A comparação entre as SNRs das radiografias convencional e digital não se mostrou efetiva, entretanto (EWERT, 2004). Ainda assim, a ideia de normalizar a SNR se mostrou válida para comparação de imagens radiográficas digitais entre si.

II.5.4.2 CÁLCULO DA SNR PARA DDAS

No caso de DDAs e placas de fósforo, a norma EN14784 recomenda um procedimento específico para determinação da SNR. Essa metodologia foi elaborada para placas de fósforo e extrapolada para DDAs. Ela visa dar uma resposta mais estável ao cálculo da SNR, usando um valor de desvio-padrão baseado em uma mediana de vários desvios-padrão ao invés de usar o desvio-padrão da região de interesse.

A Figura II.16 representa esse procedimento. A medida da SNR em uma determinada região de interesse deve ser feita a partir de uma área de 20 x 55 pixels. Deve-se então tomar, linha a linha, a média e o desvio-padrão do nível de cinza. O desvio-padrão que é utilizado então para o cálculo da SNR é a mediana dos desvios-padrão encontrados linha a linha.

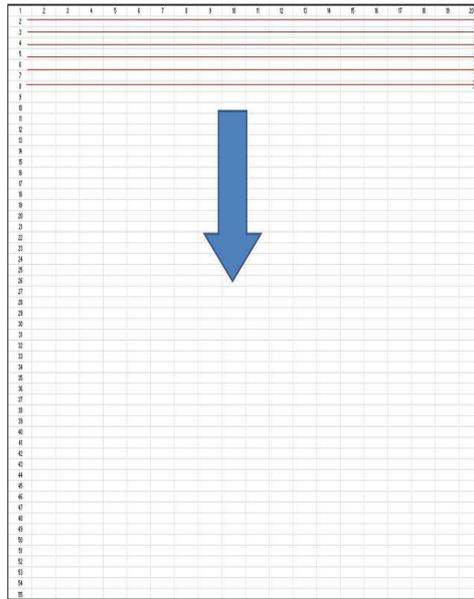


Figura II.16 – Varredura por linhas para cálculo da SNR

Esse procedimento, elaborado para placas de fósforo, visa diminuir a influência de riscos ou irregularidades na placa de fósforo, que poderiam elevar demasiadamente o desvio-padrão e conseqüentemente diminuir a SNR da imagem, sem que estes elementos estejam associados de fato ao nível de ruído da imagem.

No caso de DDAs, esse procedimento também é válido. Em primeiro lugar, porque ele diminui a influência de *bad pixels*. Pode-se observar na Figura II.17 um *bad pixel* ao lado de uma região de 20 x 55 pixels, conforme a norma recomenda para calcular a SNR. Nessa região, o desvio-padrão da área é 71,02 enquanto a mediana dos desvios-padrão em cada uma das 55 linhas é 16,18.

Já na Figura II.18, a região de interesse contém o *bad pixel*, ou seja, ela foi movida para a esquerda com um deslocamento de apenas um pixel. Ao fazer isso, o desvio-padrão da região de interesse mudou de 71,02 para 1372, enquanto o desvio-padrão mediano das linhas mudou de 16,18 para 16,06, mostrando-se muito mais estável.

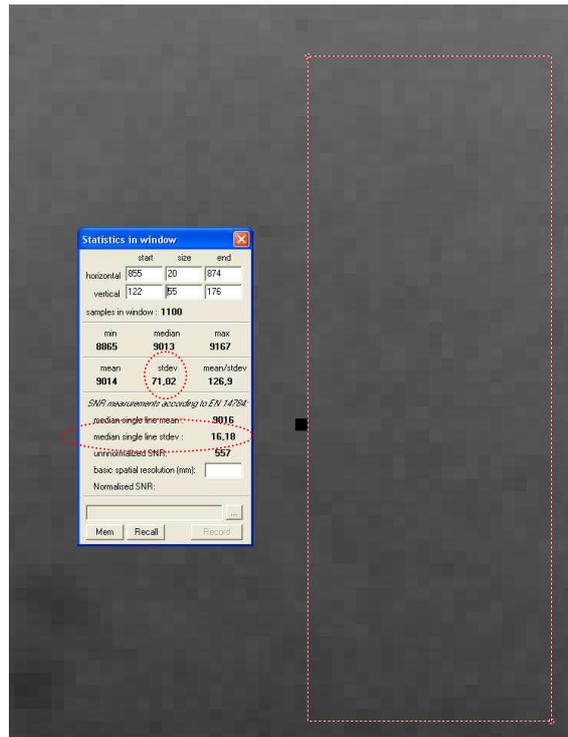


Figura II.17 – Região de interesse ao lado de um *bad* pixel

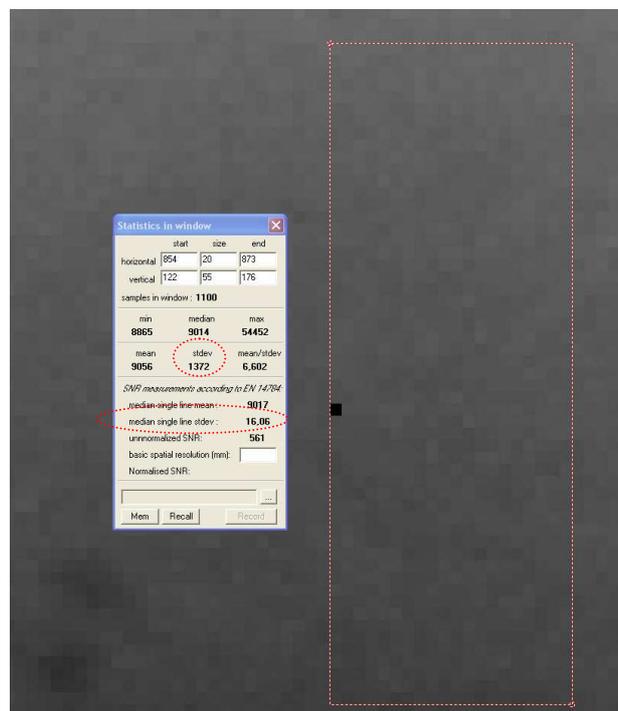


Figura II.18 – Região de interesse contendo um *bad* pixel

Outro motivo é que o desvio-padrão mediano, como é usado, mantém-se praticamente constante numa região uniforme para um intervalo entre 20 e 100 linhas

horizontais de pixel, aproximadamente. Já o desvio-padrão de toda a área é extremamente dependente do tamanho da janela e essa instabilidade na resposta pode levar a erros na avaliação da SNR. A Figura II.19 mostra um exemplo do que foi explicado. Toma-se o desvio-padrão da área e a mediana dos desvios-padrão em cada linha em uma região inicialmente com 20 x 20 pixels, depois 20 x 40, 20 x 60 e 20 x 80 pixels. Na região de 20 x 20 pixels, o desvio-padrão da área é de 48,39 e da mediana das linhas é de 14,53. À medida que se avança para áreas maiores, o desvio-padrão da área vai aumentando respectivamente para: 83,11; 116,7 e 147,1. Já o desvio-padrão da mediana das linhas assume os valores 15,16; 14,97 e 14,80, mostrando-se, portanto, muito mais estável para o cálculo da SNR.

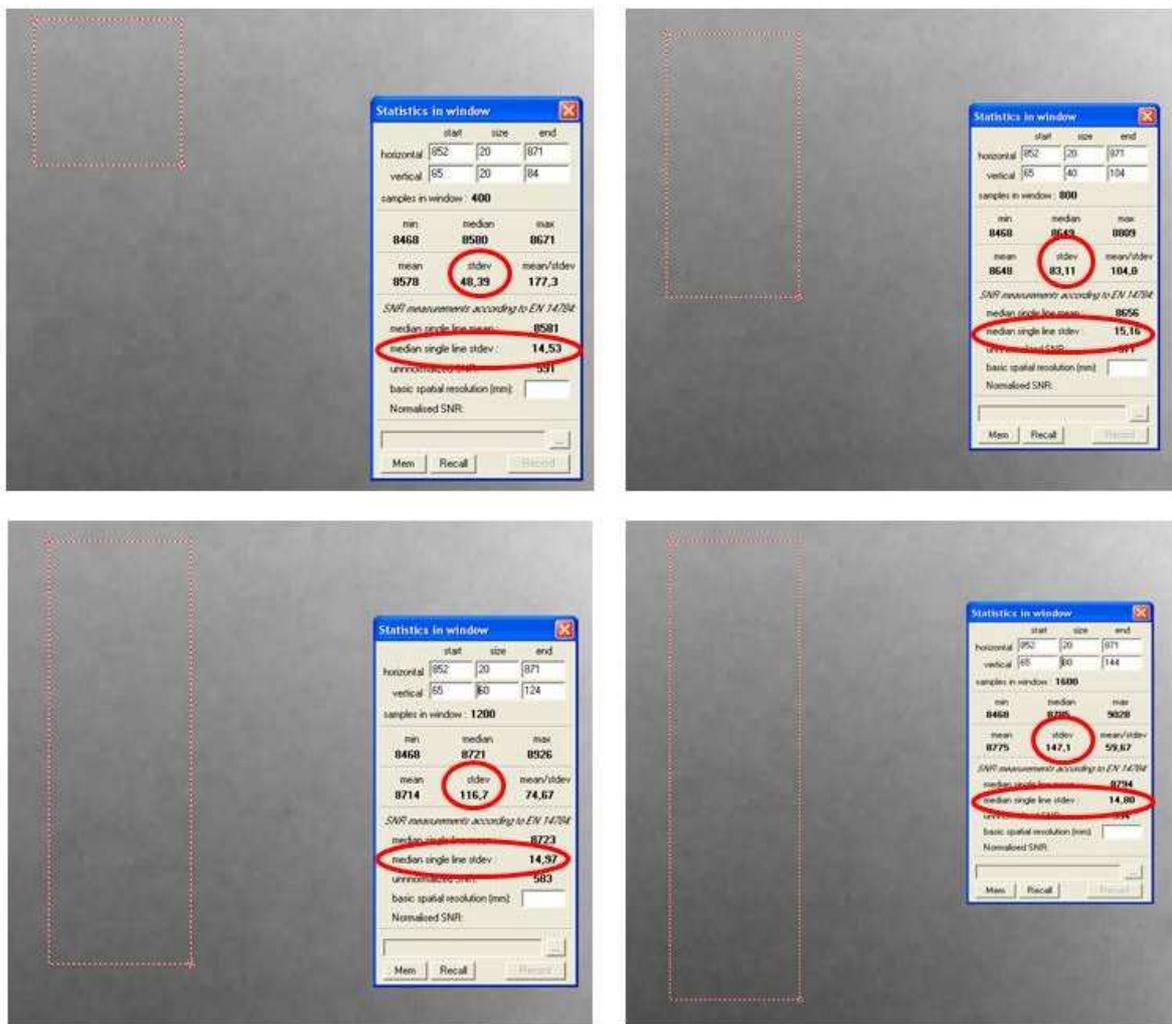


Figura II.19 – Evolução do desvio-padrão com a área da região de interesse

Apesar da robustez do método proposto pela norma, ele pode não ser adequado para determinadas situações, como será visto na seção IV.4.

II.5.5 A PENUMBRA GEOMÉTRICA

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos da penumbra geométrica e normas que definem seus limites aceitáveis.

II.5.5.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Independentemente da técnica radiográfica utilizada, em virtude do tamanho finito do foco da fonte, toda inspeção radiográfica está sujeita a ter a qualidade da sua imagem prejudicada pela penumbra geométrica. A Figura II.20 ilustra a formação de penumbra em torno de um entalhe numa imagem radiográfica.

Na imagem da esquerda, como o tamanho do foco é muito pequeno, praticamente não se forma penumbra em torno da imagem no entalhe. Já na imagem da direita, como o foco da fonte tem um tamanho considerável, forma-se uma sombra em torno do entalhe que prejudica a qualidade da imagem.

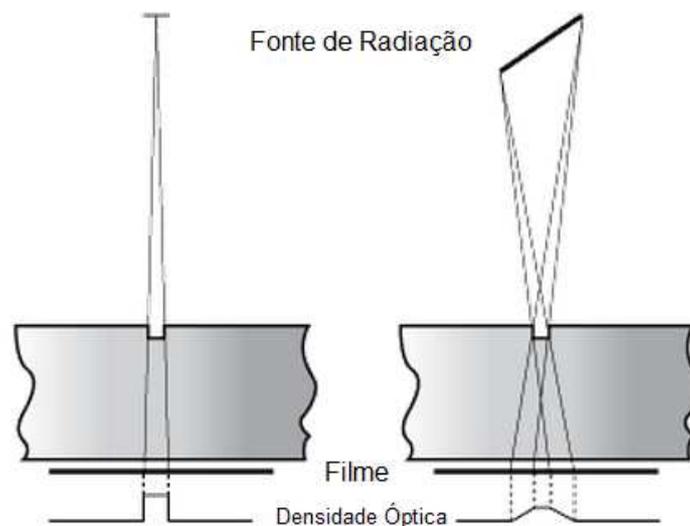


Figura II.20 - Penumbra geométrica em torno de um entalhe (NDT RESOURCE CENTER, 2013)

De um modo geral, os fatores que influenciam a formação da penumbra geométrica são o tamanho focal e as distâncias fonte-objeto e objeto-detector.

As dimensões de um foco de uma fonte de raios X convencional (que não seja microfoco) normalmente variam entre 1 e 7 mm. O ideal é que o foco seja tão pequeno quanto possível, de modo a minimizar a penumbra.

Uma distância fonte-objeto muito pequena contribui para aumentar a penumbra, assim como uma distância objeto-detector muito grande. Normalmente, em inspeções de tubos usando filmes convencionais ou placas de fósforo, estes são dobrados sobre o tubo, de modo a reduzir problemas de magnificação. No caso do DDA, entretanto, em função de sua rigidez, não é possível dobrá-lo sobre um tubo e portanto sempre ocorre magnificação e a penumbra geométrica tende a ser maior que na radiografia convencional ou na computadorizada.

Ainda, no caso de inspeções submarinas, deve-se atentar ao fato de que numa situação de campo, a ferramenta de inspeção a ser desenvolvida conterá o DDA dentro de um vaso de pressão. Assim, a penumbra geométrica tenderá a ser considerável, pois a distância entre o duto e o detector englobará:

- a distância entre o duto e o vaso de pressão do detector;
- o espaço dentro do vaso de pressão do detector;
- as próprias camadas internas ao DDA antes de atingir os elementos sensores;

além da magnificação citada anteriormente pelo fato de se inspecionar uma superfície curva com um detector plano.

II.5.5.2 NORMAS

A norma ISO 19232-5 padroniza a forma de se quantificar a penumbra geométrica. Os valores aceitáveis para a penumbra geométrica dependem da aplicação e da espessura a ser inspecionada. O código ASME, seção V, artigo 02 especifica uma penumbra máxima aceitável em função da espessura do material a ser inspecionada, conforme a Tabela II.3.

Tabela II.3 - Penumbra máxima aceitável, conforme código ASME sec. V Art.2

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

Já a norma ISO/FDIS 17636-2:2012, que diz respeito especificamente a detectores de radiografia digitais, especifica uma distância mínima entre fonte e objeto para que a penumbra geométrica fique dentro de limites aceitáveis. Para a técnica de exposição Parede Dupla Vista Simples, essa distância mínima é dada pela (II.9 II.9, para uma inspeção Classe A (requisitos menos severos):

$$\frac{f}{d} \geq 7,5 \frac{b}{\sqrt[3]{t}} \quad (\text{II.9})$$

onde,

f é a distância da fonte ao objeto (no caso, distância do ponto focal do tubo de raios X à solda no diâmetro interno, lado do detector);

d é o tamanho focal;

b é a distância do objeto ao detector (no caso, distância da solda no diâmetro interno do tubo, lado do detector, até o elemento sensor do DDA);

t é a espessura nominal

Enquanto na ISO/FDIS 17636-2:2012, os requisitos para máxima penumbra geométrica são função contínua da espessura, no código ASME, seção V, artigo 2, os requisitos são constantes para determinados intervalos de espessura e são menos severos. Por exemplo, para uma peça de 70 mm de espessura, o valor máximo da

penumbra pelo código ASME, seção V, artigo 2 é 0,76 mm, enquanto para atender a ISO/FDIS 17636-2:2012 é 0,55 mm.

Ainda pela norma ISO/FDIS 17636-2:2012, tem-se o critério descrito a seguir para SR_b Classe A, qualquer que seja a técnica de exposição utilizada. Ou seja, conforme a Tabela II.4, para o caso típico de dutos submarinos, com espessuras entre 10 e 25 mm, a norma requer uma SR_b máxima de 0,16 mm, ou seja, o primeiro par de fios não distinguível (utilizando-se o IQI de fio duplo da norma ISO 19232-5) seria o oitavo. Notar no comentário (a) que deve-se considerar a espessura nominal e não a espessura penetrada no caso de exposição do tipo Parede Dupla Vista Simples.

Tabela II.4 – Requisitos de SR_b pela norma ISO/FDIS 17636-2:2012(Tabela B.13 na norma)

Qualidade de imagem Classe A: arame duplo norma ISO 19232-5		
Espessura Penetrada w^a mm	Mínimo valor de IQI e máxima penumbra (ISO 19232-5) mm	Máxima resolução espacial – equivalente ao diâmetro do arame e espaçamento mm
$w \leq 1,0$	D 13 0,10	0,05
$1,0 < w \leq 1,5$	D 12 0,125	0,063
$1,5 < w \leq 2$	D 11 0,16	0,08
$2 < w \leq 5$	D 10 0,20	0,10
$5 < w \leq 10$	D 9 0,26	0,13
$10 < w \leq 25$	D 8 0,32	0,16
$25 < w \leq 55$	D 7 0,40	0,20
$55 < w \leq 150$	D 6 0,50	0,25
$150 < w \leq 250$	D 5 0,64	0,32
$w > 250$	D 4 0,80	0,4
(a) – Para a técnica PDVS, deve-se utilizar a espessura nominal ao invés da espessura penetrada		

Os requisitos de sensibilidade ao contraste estão descritos, para uso do IQI de arame e inspeção Classe A na Tabela II.5. Nota-se que para a faixa de espessuras normalmente utilizadas em dutos submarinos, o requisito de contraste situa-se entre os

arames 10 e 12. Observar que, na Tabela II.5, assim como na Tabela II.4, deve-se utilizar a espessura nominal e não a espessura penetrada.

Tabela II.5 – Requerimentos de sensibilidade ao contraste pela norma ISO/FDIS 17636-2:2012 (Tabela B.1 na norma)

Qualidade de Imagem Classe A			Valor do IQI
Espessura Nominal t mm			
		até 1,2	W 18
Acima de	1,2	até 2,0	W 17
Acima de	2,0	até 3,5	W 16
Acima de	3,5	até 5,0	W 15
Acima de	5,0	até 7	W 14
Acima de	7	até 10	W 13
Acima de	10	até 15	W 12
Acima de	15	até 25	W 11
Acima de	25	até 32	W 10
Acima de	32	até 40	W 9
Acima de	40	até 55	W 8
Acima de	55	até 85	W 7
Acima de	85	até 150	W 6
Acima de	150	até 250	W 5
Acima de	250		W 4

A mesma norma permite ainda, caso não se atenda um dos pré-requisitos de sensibilidade ao contraste ou espacial, que se “compense” um desses pré-requisitos por um rigor maior no outro.

Por exemplo, caso se inspecione um duto de 20 mm de espessura, portanto, espessura penetrada de 40 mm pela técnica de parede dupla vista simples. Os pré-requisitos seriam:

- Oitavo par de fios para SRb, ou 0,16mm
- 11° arame para contraste

Caso só se consiga chegar a uma resolução espacial até o sétimo par de fios, pode-se ainda atender a norma, desde que o contraste atinja o 12° arame. Ou com o sexto par de fios e o 13° arame. Essa “troca” de pré-requisitos só pode ser feita, entretanto, até o limite de dois arames. Se a sensibilidade para detecção de trincas puder ser demonstrada e as duas partes estiverem de acordo, pode-se estender esse limite para três arames compensando três pares de fios não resolvidos.

Como no caso do uso de DDAs, a resolução espacial é sempre um fator crítico, já que está limitada ao tamanho do pixel, esse tipo de compensação se torna importante.

É importante notar que o atendimento a critérios normativos não garante que um detector de radiografia digital obtenha a mesma detectabilidade que um filme convencional, sendo necessária a execução de testes de validação para que a equiparação entre sistemas seja comprovada (MARINHO, 2012).

Não faz parte do escopo desta dissertação, mas se faz importante que um estudo de detectabilidade equivalente como o acima mencionado seja conduzido para o caso específico de DDAs e aplicações de radiografia submarina, de modo a identificar situações nas quais os critérios normativos estabelecidos pela ISO 17636-2 sejam impróprios ou insuficientes.

No âmbito nacional, a Petrobras possui uma norma interna para radiografia computadorizada, ou seja, utilizando placas de fósforo. Trata-se da norma N-2821-B. A empresa não possui, entretanto, uma norma específica para radiografia direta.

A N-2821-B especifica determinados critérios para a radiografia computadorizada que não são tratados em normas internacionais, como a ISO 17636-2, como a comparação com a radiografia convencional em um determinado número de juntas para validação do procedimento de inspeção e requisitos mínimos para o monitor, como tamanho de pixel e luminância. Além disso, ela é mais rigorosa que a ISO 17636-2 em certos aspectos. Por exemplo, quanto à visibilidade do IQI de arame, a ISO 17636-2 solicita a visibilidade do arame essencial em um trecho contínuo de pelo menos 10mm. Já a N-2821-B solicita que o arame essencial seja distinguível em toda a região de interesse para a inspeção.

Será necessário, no futuro, uma normalização específica para a inspeção de soldas por radiografia direta, de forma a se descrever com clareza os requerimentos para se garantir uma qualidade de imagem utilizando DDAs semelhante àquela alcançada com filmes convencionais.

II.5.6 ERROS DE *ALIASING*

O Teorema de Nyquist determina que a frequência de amostragem de um sinal analógico deve ser maior ou igual ao dobro da maior frequência de interesse contida no sinal. No caso da radiografia digital, isso quer dizer que, se a frequência de amostragem for baixa, em função, por exemplo, de um tamanho de pixel muito grande, descontinuidades diferentes podem ser "confundidas" como uma só. Dá-se o nome de *aliasing* a esse tipo de erro oriundo de uma discretização indevida do sinal.

Um pós-processamento e filtragem da imagem digital permite reduzir os erros de *aliasing*, contudo, esse tipo de processamento pode também mascarar a presença de certos detalhes.

O impacto do *aliasing* na qualidade da imagem é dependente do nível de ruído e reduz a eficiência de detecção de quanta do receptor, ou seja, reduz a eficiência com que a informação detectada é transmitida à imagem final (SCURI, 2002).

II.6 O DETECTOR

Conforme o tipo de detector utilizado, a radiografia pode ser classificada como convencional ou digital. A radiografia convencional utiliza filmes. Já a radiografia digital engloba uma série de tecnologias, quais sejam (**MARINHO, 2011**):

- a digitalização de uma radiografia convencional em um escâner apropriado;
- a utilização de placas de fósforo para a detecção, com posterior escaneamento em um equipamento específico para essa finalidade;
- a utilização da radiografia direta, através dos *flat panels* ou DDAs (*Digital Detector Arrays*), que fornecem a imagem em tempo real, sem necessidade de nenhum processo de revelamento ou escaneamento.

A tecnologia utilizada neste trabalho foi a radiografia direta. Para fins de comparação com os DDAs, será dado nesse capítulo um breve fundamento teórico sobre o princípio de funcionamento dos filmes convencionais e das placas de fósforo para em seguida detalhar o funcionamento dos DDAs.

II.6.1 A RADIOGRAFIA CONVENCIONAL

Os filmes radiográficos convencionais são constituídos basicamente de uma emulsão fotográfica e uma base plástica transparente que a sustenta. Diferentemente de um filme fotográfico, a emulsão está presente dos dois lados do filme (**ANDREUCCI, 2010**). A Figura II.21 ilustra esquematicamente os componentes de um filme radiográfico.

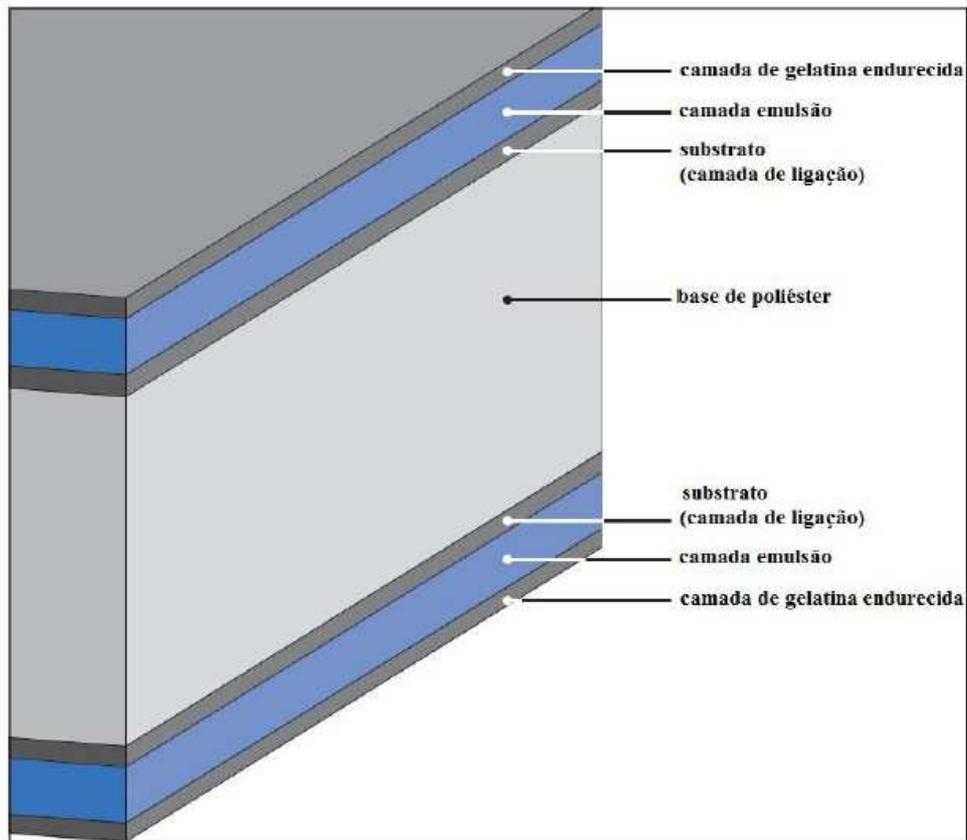


Figura II.21 - Composição de um filme radiográfico (RAAD, 2007)

A emulsão é basicamente uma gelatina que contém minúsculos cristais de brometos de prata. Estes, quando atingidos por luz ou radiação, tornam-se suscetíveis a reagir com um produto químico denominado revelador. Quanto maior for a dose de radiação recebida por cada cristal, maior será o enegrecimento do mesmo ao reagir com o revelador. Dessa forma, a variação da dose de radiação ao longo do filme gera um contraste na imagem radiográfica (PEREIRA, 2006).

Um conceito importante no uso de filmes radiográficos é a densidade óptica obtida, que é definida como o logaritmo da razão entre a intensidade de luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida, conforme a (II.10).

$$D = \log \frac{I_0}{I} \quad (\text{II.10})$$

onde,

I_0 é a intensidade da luz incidente;

I é a intensidade da luz transmitida

Ou seja, quanto maior a densidade óptica, maior o grau de enegrecimento do filme. A informação da densidade óptica é importante para que se trabalhe com o filme numa faixa em que a relação entre a densidade óptica e o logaritmo da exposição relativa seja aproximadamente linear. Essa relação é dada através de uma curva sensitométrica, sendo fornecida pelo fabricante para cada tipo de filme (NASCIMENTO, 2012). A Figura II.22 mostra exemplos de curvas sensitométricas para diversos filmes.

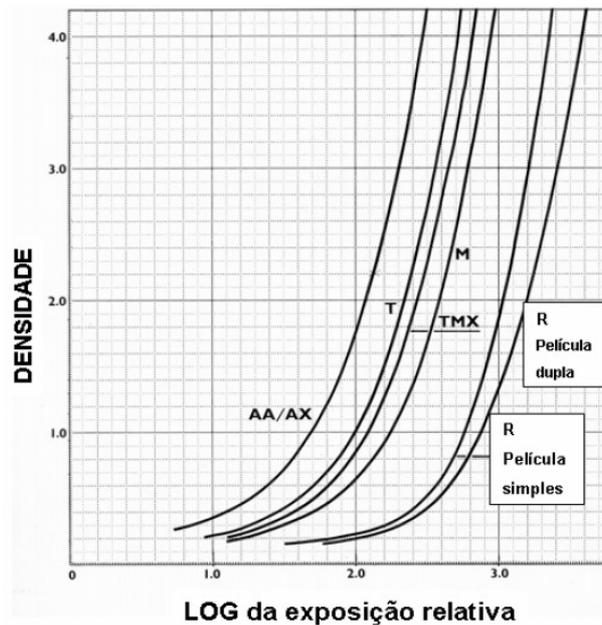


Figura II.22 - Exemplo de Curva Sensitométrica para diversos filmes (NASCIMENTO, 2012)

Normalmente, recomenda-se que a densidade óptica na região de interesse, como por exemplo uma junta soldada a ser inspecionada, esteja entre 2 e 3.

Uma imagem radiográfica convencional pode ser escaneada em um escâner com suficiente resolução para ser tratada digitalmente, ou seja: arquivada, filtrada, transferida, etc. O problema é que frequentemente há uma perda significativa de qualidade de imagem no processo de escaneamento. Essa é a primeira forma de radiografia digital citada no item II.6. A seguir, serão apresentadas a radiografia computadorizada e a radiografia direta.

II.6.2 A RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A radiografia computadorizada é a técnica radiográfica que utiliza como detectores as placas de fósforo (*Imaging Plates*). Aqui, o termo fósforo refere-se não ao elemento químico, mas sim a uma família de compostos destacando-se os haletos de alcalinos terrosos dopados com Európio, notadamente o BaFBr:Eu^{2+} . Além da camada de fósforo, o detector possui uma camada protetora, um suporte de poliéster e um reforço de curvatura, conforme indicado esquematicamente na Figura II.23 (NASCIMENTO, 2012).

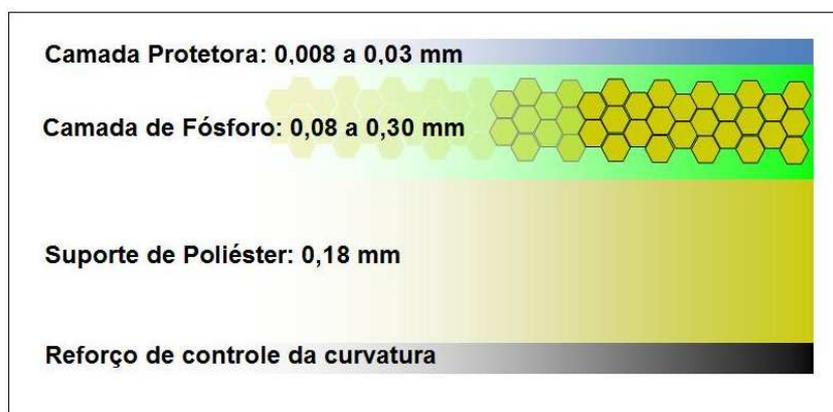


Figura II.23 - Camadas de uma placa de fósforo (OLIVEIRA, 2007)

Quando a radiação X incide nesses fósforos, pares elétron-buraco são criados em quantidade proporcional à radiação incidente. Após serem estimulados por um laser de um comprimento de onda adequado, essas cargas aprisionadas geram, através de um fenômeno conhecido como fotoluminescência estimulada, uma luz de comprimento de onda curto (azul), também proporcional à radiação absorvida. Essa luz azul é então lida por um tubo fotomultiplicador. O sinal do tubo fotomultiplicador é então digitalizado para formar a imagem (SEIBERT, 1999). Eventuais imagens latentes na placa de fósforo devem ser apagadas por uma luz de alta intensidade durante um curto período de tempo, de forma a permitir a reutilização do mesmo. A Figura II.24 mostra

esquemáticamente o processo de aquisição de imagens em um sistema de radiografia computadorizada.

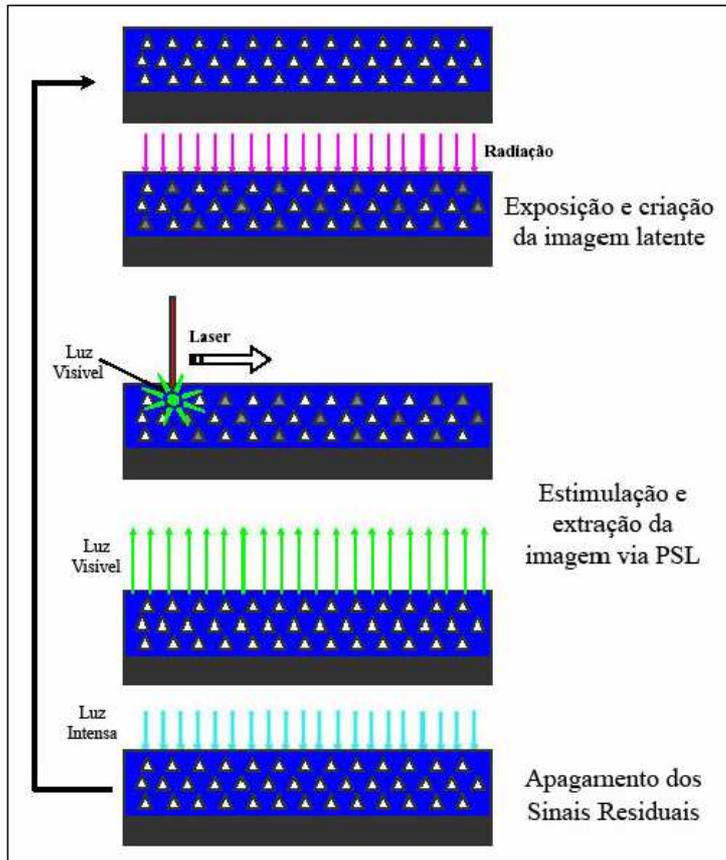


Figura II.24 - Esquema de funcionamento de uma placa de fósforo (OLIVEIRA, 2007)

II.6.3 A RADIOGRAFIA DIRETA

Por se tratar do método de detecção utilizado nesse trabalho, será dada maior ênfase aos fundamentos teóricos da radiografia direta. O grande diferencial da radiografia direta consiste no fato de não ser necessária nenhuma manipulação com filmes ou processo de escaneamento para obtenção das imagens. Isso porque cada um de seus milhões de pixels atua como um detector individual, convertendo a radiação em uma carga elétrica proporcional.

Na literatura, os detectores planos ou *Digital Detector Arrays* (DDAs) normalmente são divididos segundo a forma de conversão de radiação em energia elétrica como detectores de conversão direta e de conversão indireta. Os detectores de conversão indireta possuem basicamente dois tipos de mecanismo de leitura eletrônica CMOS (*Complimentary Metal Oxide Silicon*) e TFT (*Thin Film Transistors*), ambos com um fotodiodo por pixel. Já os DDAs de conversão direta possuem mecanismo de leitura eletrônica baseado em TFTs sem fotodiodos (MARINHO, 2011). Seus princípios de funcionamento estão detalhados a seguir:

II.6.3.1 DDAS DE CONVERSÃO DIRETA

Nesse caso, um fotocondutor, normalmente de Selênio amorfo (a-Se) ou Cd-Te é utilizado como elemento absorvedor da radiação X. Nesse tipo de DDA, não há necessidade de um cintilador, pois o próprio Selênio, devido ao seu elevado número atômico, é capaz de absorver a radiação X e produzir elétrons através de efeito fotoelétrico. Como não há necessidade de cintilador, também não é necessário que cada pixel tenha um fotodiodo. A Figura II.25 ilustra esquematicamente esse tipo de detector.

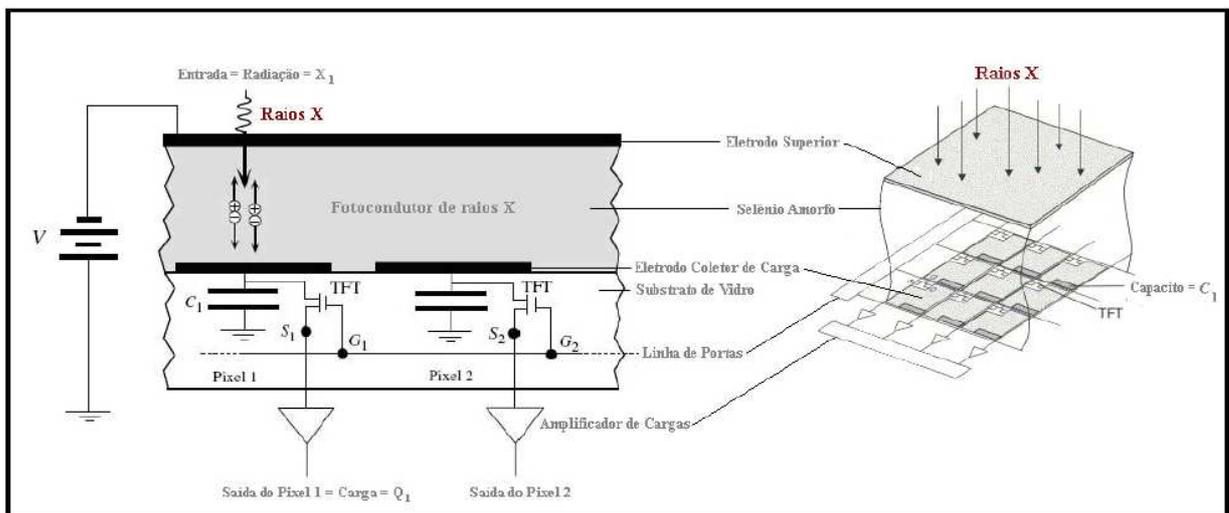


Figura II.25 - DDA de conversão direta (KASAP et al., 2006)

O detector precisa ter um transistor de película fina (TFT) e um capacitor associado a cada um de seus milhões de pixels. Cada pixel tem a capacidade de receber e armazenar em seu capacitor a carga gerada pela radiação X no elemento fotocondutor.

Quando o transistor do pixel é ativado por um diferencial de tensão aplicado entre o eletrodo do pixel e o eletrodo de entrada do detector, a carga do capacitor associada a esse pixel é lida e gera o nível de cinza respectivo de acordo com o número de bits (e conseqüentemente o número de tons de cinza) do sistema (KASAP, 2006).

A vantagem dos detectores de conversão direta é que, por não envolverem a formação de luz como etapa intermediária para a conversão em sinal elétrico, eles possuem uma velocidade de conversão mais alta e maior nitidez. Uma desvantagem, quando comparados com os detectores de conversão indireta, é que o Selênio, por exemplo, não absorve a radiação tão eficientemente quanto os materiais usados como cintiladores nos detectores de conversão indireta, como o Oxisulfato de Gadolínio. Por isso, para absorver radiação de alta energia, torna-se necessário uma camada espessa de Selênio, o que prejudica a resolução espacial devido ao espalhamento e divergência do feixe (MARINHO, 2011).

Recentes avanços no desenvolvimento de detectores de Cd-Te podem contornar esse problema, já que o princípio de funcionamento é o mesmo, mas a espessura necessária é consideravelmente menor que no caso do Selênio, que atualmente é utilizado principalmente na área médica (FUNAKI, 2007).

II.6.3.2 DDAS DE CONVERSÃO INDIRETA

Nesse caso, são utilizados um fotodiodo de Silício amorfo (a-Si) e um material cintilador. A Figura II.26 mostra esquematicamente o seu princípio de funcionamento. O processo físico é muito semelhante ao dos DDAs de conversão direta. A diferença é que a radiação X é convertida em luz visível pelo material cintilador. Esses fótons de luz visível são então convertidos em elétrons pelo fotodiodo de cada pixel.

Assim como no caso anterior, a carga elétrica é armazenada em capacitores e descarregada quando uma diferença de potencial é aplicada entre a porta do pixel e a porta de entrada do detector. Após passar por um conversor analógico/digital, é gerada uma informação em bytes referente ao valor de tom de cinza para aquele pixel.

A associação entre o Silício amorfo e o material cintilador, normalmente o Oxisulfato de Gadolínio ou o Iodeto de Césio produz os DDAs com melhor eficiência

quântica de detecção (DQE), ou seja, que melhor preservam a SNR do campo de radiação absorvido pelo detector para a imagem digital (NASCIMENTO, 2012). Especialmente os cintiladores de Iodeto de Césio, por possuírem uma microestrutura em forma de agulhas finas, que funcionam como tubos de luz, produzem uma excelente DQE.

Apesar da alta eficiência quântica de detecção, os DDAs de conversão indireta apresentam desvantagens, tais como: a necessidade de um fotodiodo por pixel e o comprometimento na resolução espacial devido ao espalhamento óptico entre o cintilador e o fotodiodo (IZUMI, 2001).

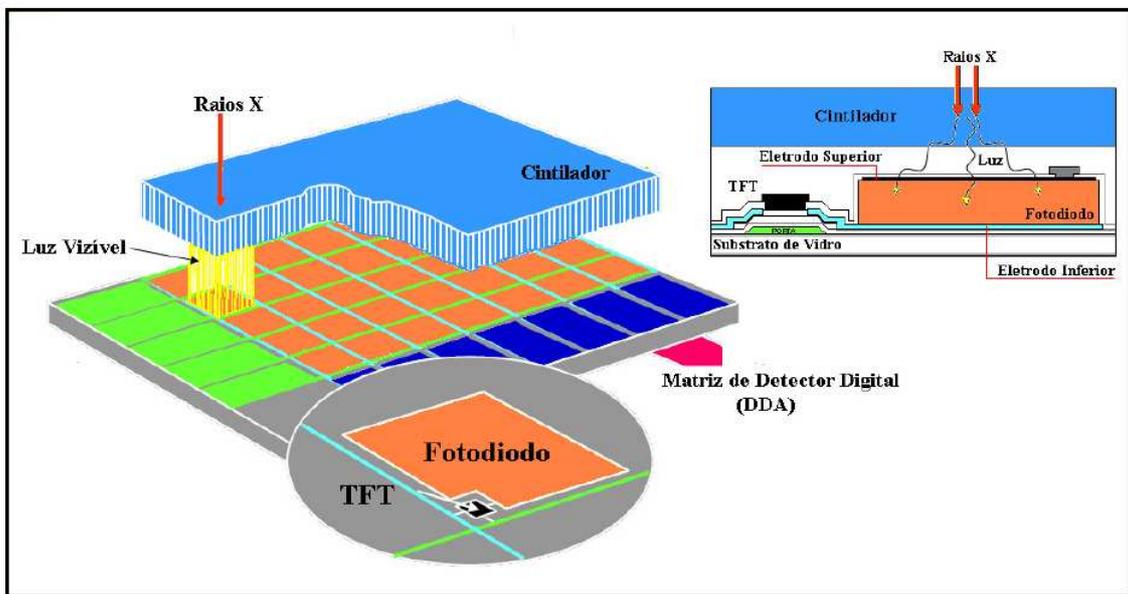


Figura II.26 - DDA de conversão indireta (KIM et al., 2003)

Detectores indiretos com varredura do tipo CMOS, diferentemente dos que usam TFTs, possuem um amplificador e controle eletrônico por pixel - isso faz com que esse tipo de detector possua uma melhor resolução espacial e menor probabilidade de ocorrência de *bad pixels*. A desvantagem é que esse processo de fabricação mais complexo torna o detector mais caro e normalmente inviabiliza o uso de áreas ativas muito grandes (MARINHO, 2011).

É importante que o cintilador possua um espectro de emissão de luz visível otimizado para a recepção do sinal no fotodiodo. Caso contrário, mesmo que a eficiência na conversão de radiação X em luz visível pelo cintilador seja boa, a

conversão de luz visível em sinal elétrico pelo fotodiodo será ineficiente. O controle de elementos ativadores e o processo de fabricação têm forte influência sobre o espectro de emissão do cintilador. A Figura II.27 mostra um exemplo retirado de um catálogo da *Hamamatsu* do espectro de emissão luminosa de um cintilador de CsI e o correspondente espectro de absorção dos fotodiodos usados no DDA. Idealmente, a intersecção das áreas sob as duas curvas deve ser a maior possível (**HAMAMATSU, 2012**).

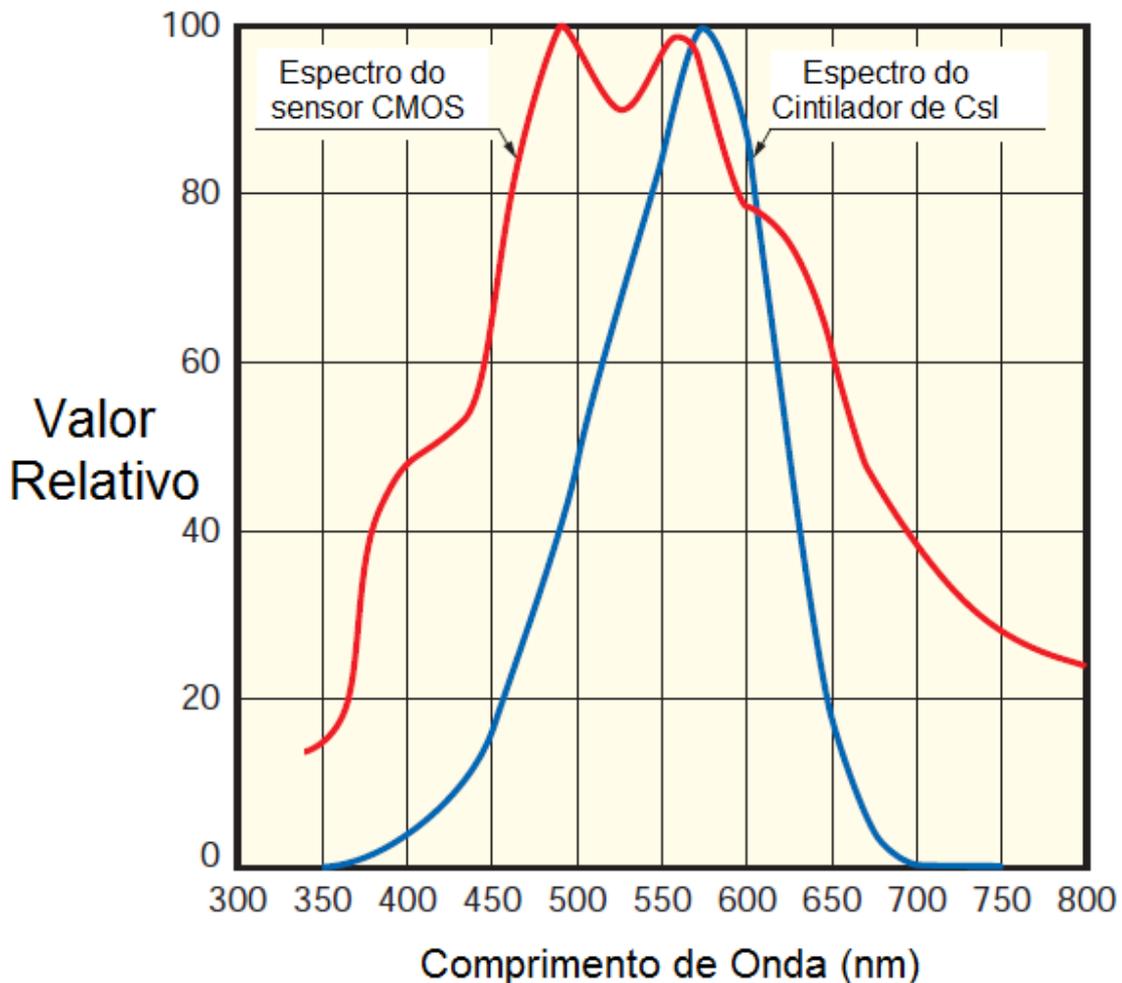


Figura II.27 - Exemplo de espectro de emissão luminosa de um cintilador e o espectro de absorção dos fotodiodos usados em um sensor CMOS - (**HAMAMATSU, 2012**)

II.6.4 COMPARAÇÃO ENTRE RADIOGRAFIA CONVENCIONAL, COMPUTADORIZADA E DIRETA

Não se obtém na radiografia computadorizada ou direta a resolução de um filme. Os melhores sistemas de radiografia computadorizada atingem 40 μm . Um filme pode resolver um quinto disso. Usualmente a resolução espacial básica de uma imagem obtida por radiografia computadorizada é igual ou superior a 100 μm , a menos para baixas espessuras radiografadas com sistemas do tipo alta definição (MARINHO, 2012).

Um filme convencional só pode ser usado uma vez e exige um processo de revelação moroso e custoso. Já uma placa de fósforo pode ser reutilizada muitas vezes, desde que a imagem latente nela contida seja apagada por uma luz de forte intensidade. O número de vezes que uma placa de fósforo pode ser reutilizada depende da sua degradação ao longo do tempo, em função da exposição, manuseio e processo de escaneamento. O tempo de exposição na radiografia computadorizada pode ser maior ou menor que na convencional para se obter a mesma detectabilidade, dependendo da espessura da peça e da técnica de exposição. Mesmo quando o tempo de exposição é maior, o tempo total para obtenção da imagem é inferior na computadorizada, pois o escaneamento de uma placa de fósforo é consideravelmente mais rápido que a revelação de um filme. No caso da radiografia direta, o DDA pode ser reutilizado um número indefinido de vezes, desde que todos os devidos cuidados sejam tomados. Um processo de calibração deve ser realizado conforme recomendação do fabricante, podendo variar de uma frequência diária a uma frequência mensal. Aplicações específicas também podem exigir processos de calibração específicos. Normalmente, com a radiografia direta se obtém os menores tempos de exposição e conseqüentemente menores doses, trazendo ganhos em quesitos de SMS (Segurança, Meio Ambiente e Saúde) e produtividade. Além disso, não exige nenhum processo de revelação ou escaneamento, gerando a imagem em tempo real (MARINHO, 2011).

A Figura II.28 mostra que um filme convencional possui um campo ótimo de trabalho em relação à dose absorvida no detector, que corresponde ao trecho aproximadamente linear de sua curva sensitométrica. Já na radiografia computadorizada, pode-se trabalhar com uma faixa muito maior da dose recebida no

detector, conseguindo-se ainda assim uma resposta extremamente linear. Na radiografia direta, as operações de ajuste de contraste e brilho, bem como ajuste do histograma, permitem que uma ampla faixa de níveis de cinza possa ser analisada em uma mesma imagem.

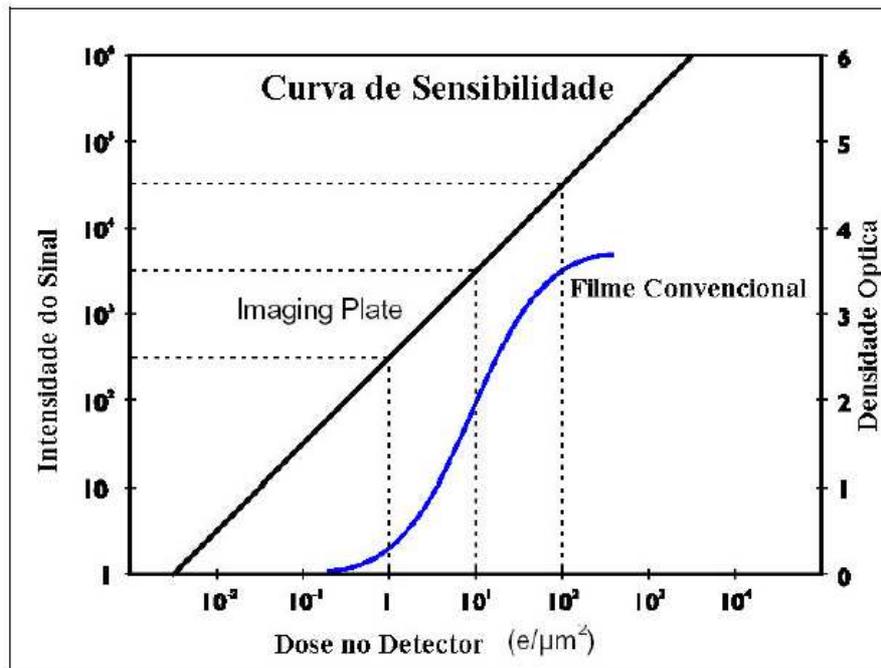


Figura II.28 - Relação entre densidade óptica e dose para filme e IP (DURR, 2011)

Quanto à adaptação à geometria a ser inspecionada, o filme convencional e a placa de fósforo têm a vantagem sobre o DDA de serem extremamente maleáveis e portanto não gerarem problemas de magnificação, como no caso do uso de DDAs na inspeção de dutos e superfícies de revolução em geral.

A deficiência na resolução espacial básica de imagens obtidas com DDAs pode ser compensada através de uma elevada relação sinal-ruído obtida através da média de vários quadros para compor uma imagem radiográfica. Esse processo pode ser feito automaticamente através de comando específico no software do DDA (MARINHO, 2011).

De uma maneira geral, em tudo que concerne o processamento da imagem, envio de arquivos e espaço para armazenamento das imagens, a radiografia digital traz grandes ganhos em relação à radiografia convencional. Por esses motivos e também por

não depender de um espaço e infraestrutura necessários para a revelação de filmes, tanto a radiografia computadorizada como a direta trazem ganhos de custo a longo prazo frente à radiografia convencional.

Do ponto de vista técnico-econômico, entretanto, a decisão de se mudar um sistema de radiografia convencional para um sistema de radiografia digital e a escolha entre radiografia computadorizada ou direta, pode não ser simples. Essa decisão depende de diversos fatores, tais como: o número de radiografias a ser tomada anualmente por uma determinada aplicação, a faixa de tensão normalmente utilizada, o desgaste das placas de fósforo e dos DDAs ao longo do tempo, entre outros.

Alguns parâmetros básicos para ajudar nessa decisão foram reunidos no artigo "Successful conversion to digital x-ray detectors" (BOIY, 2006) e estão reunidos na Tabela II.6.

TABELA II.6 - ALGUNS PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA DECISÃO QUANTO À CONVERSÃO DE UM SISTEMA DE RADIOGRAFIA CONVENCIONAL EM UM DIGITAL (BOIY, 2006)

Propriedade	Filme	Imaging Plate	DDA
Velocidade	baixa	média	alta
Resolução Espacial	10 - 50 μm	50 - 250 μm	50 - 400 μm
SNR	50 - 250	100 - 250	250 - 2000
Faixa Dinâmica	256:1	>4000:1	>4000:1
Custo de Investimento	baixo	moderado	moderado a alto
Custo de Operação	alto	moderado	baixo
Robustez Mecânica	excelente	excelente	dependente da aplicação
Moldável à geometria do objeto	sim	sim	não
Portabilidade	alta	alta	moderada a alta, dependendo do modelo
Espessura	fina	muito fina a fina	melhorando, mas ainda espessa
Área de afastamento durante inspeção	grande	moderada	baixa

II.7 TÉCNICAS DE EXPOSIÇÃO RADIOGRÁFICA

Alguns arranjos geométricos normalizados são tipicamente usados na inspeção radiográfica de dutos e equipamentos. Neste capítulo, esses arranjos são brevemente descritos.

II.7.1 PAREDE SIMPLES VISTA SIMPLES - PSVS

Nesta técnica, a radiação só atravessa uma parede na peça a ser inspecionada e só essa espessura é inspecionada. É a técnica de exposição de operação e interpretação mais simples, portanto, utilizada preferencialmente quando viável. Entretanto, no caso da inspeção de dutos, por exemplo, nem sempre se tem acesso ao interior dos mesmos para posicionar a fonte ou o filme, portanto, nem sempre essa técnica é aplicável para dutos em operação. A Figura II.29 ilustra exemplos de aplicação da técnica PSVS. Em (A), a fonte está dentro do tubo e vários filmes são espalhados ao longo da circunferência do lado externo, de modo que com uma única exposição, inspeciona-se toda a circunferência da solda. Esta é a chamada exposição panorâmica. Em (B), tem-se uma exposição simples com a fonte por dentro e o filme por fora do tubo e em (C) a situação inversa (ANDREUCCI, 2010).

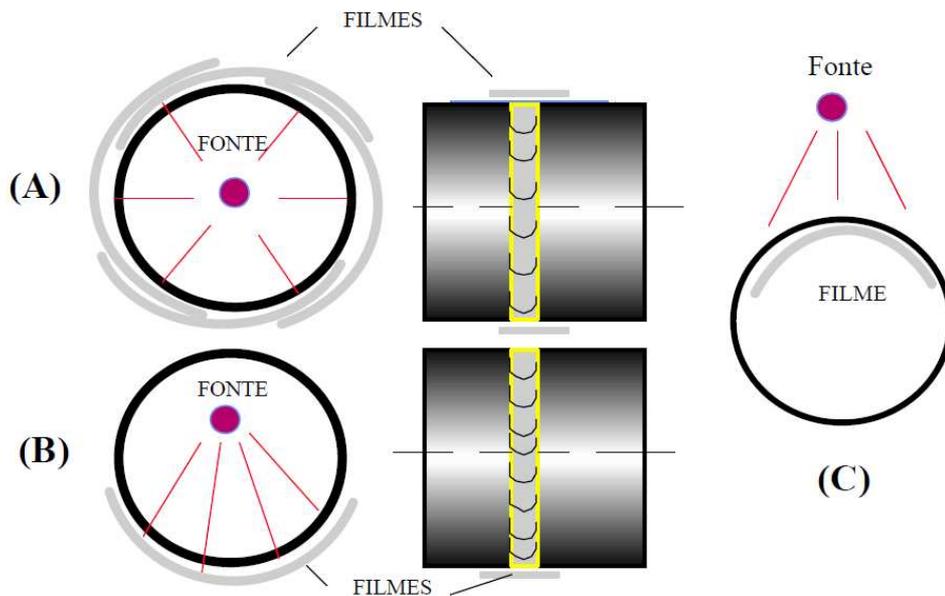


Figura II.29 - Técnica de Exposição Parede Simples Vista Simples (ANDREUCCI, 2010)

II.7.2 PAREDE DUPLA VISTA SIMPLES - PDVS

Nessa técnica, a radiação penetra duas espessuras da estrutura a ser inspecionada, mas somente aquela mais próxima ao filme é projetada na imagem

radiográfica. Por atravessar duas espessuras, essa técnica normalmente exige maiores energias e maiores tempos de exposição, devendo ser utilizada, portanto, quando a técnica PSVS não for aplicável.

No caso do presente trabalho, essa foi a técnica escolhida para os experimentos, pois em situações de campo, na inspeção de oleodutos ou gasodutos, não se tem acesso à parede interna dos mesmos, seja para posicionar a fonte ou o filme. A Figura II.30 ilustra a referida técnica (ANDREUCCI, 2010).

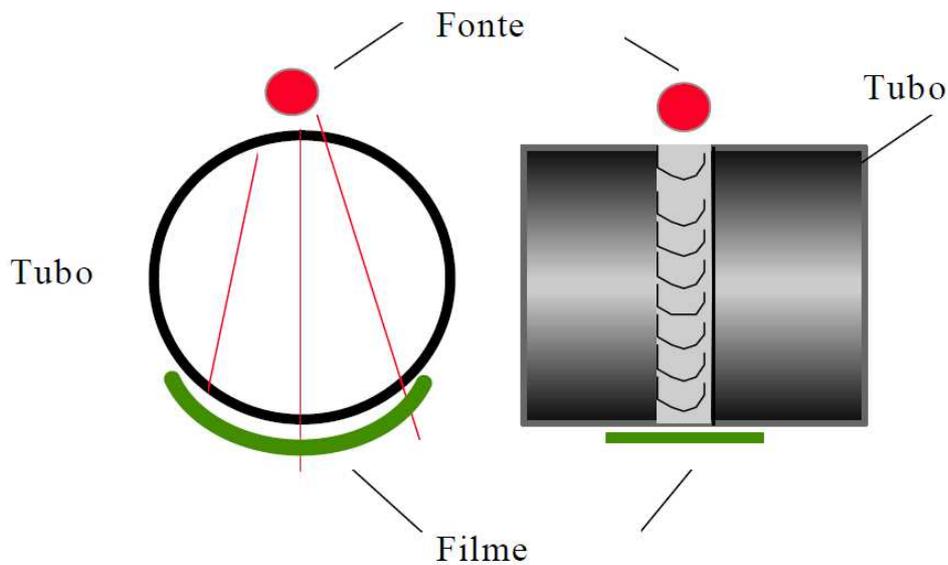


Figura II.30 - Técnica de exposição Parede Dupla Vista Simples (ANDREUCCI, 2010)

II.7.3 PAREDE DUPLA VISTA DUPLA - PDVD

Nessa técnica, a radiação atravessa duas paredes da peça e as duas são projetadas na imagem radiográfica. Nesse caso, a fonte deve ser afastada em relação a peça, conforme representado esquematicamente na Figura II.31. Essa técnica normalmente é utilizada para tubos de pequenos diâmetros, normalmente inferiores a 3,5" (ANDREUCCI, 2010).

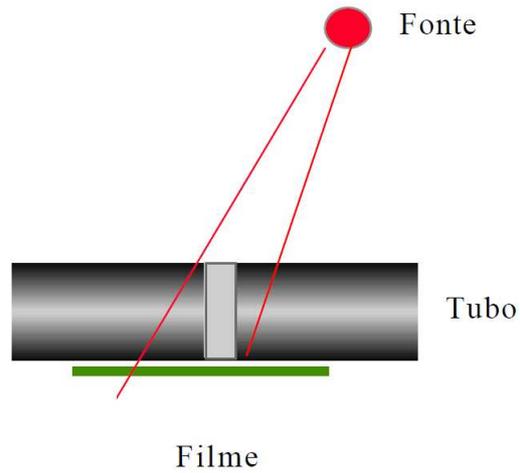


Figura II.31 - Técnica de exposição Parede Dupla Vista Dupla (ANDREUCCI, 2010)

A Figura II.32 mostra à esquerda (MARINHO, 2012) a radiografia de uma solda obtida pela técnica PDVD e à direita uma imagem obtida pela técnica PDVS.

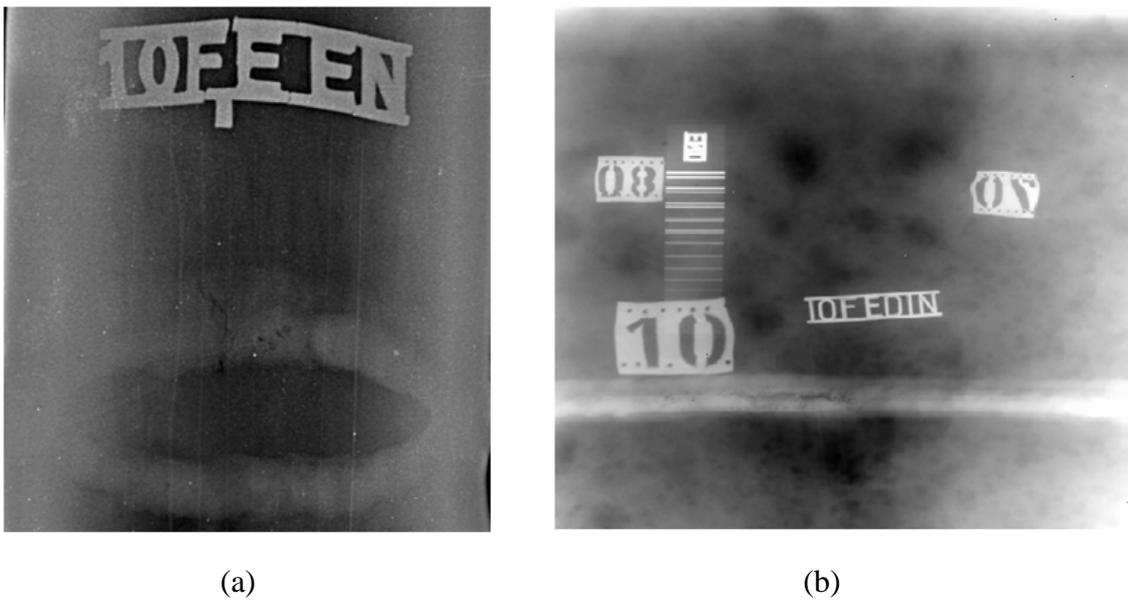


Figura II.32 - (a) - Imagem de solda elíptica obtida pela técnica PDVD (MARINHO, 2012) e (b) - Imagem obtida pela técnica PDVS

II.8 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Neste capítulo, serão abordadas algumas técnicas de processamento de imagem rotineiramente utilizadas em radiografia digital.

II.8.1 FIDELIDADE E INTELIGIBILIDADE

É importante distinguir duas características relacionadas com a qualidade da imagem: fidelidade e inteligibilidade. A fidelidade é um indicador de quão próximo da imagem original está a imagem processada. A inteligibilidade, por sua vez, indica quanta informação pode ser tirada da imagem processada, ou seja, quão bem os detalhes da imagem podem ser distinguidos (SCURI, 2002).

Por exemplo, uma pequena descontinuidade em uma solda, como um poro ou uma inclusão de tungstênio pode gerar uma diferença de tom de cinza muito pequena na imagem radiográfica, tornando difícil sua detecção. A aplicação de filtros que realcem esse contraste vai facilitar a detecção da descontinuidade, ou seja, vai melhorar a inteligibilidade da imagem, embora a fidelidade da imagem seja reduzida, pois uma diferença de absorção de radiação pequena estaria gerando uma diferença de tons de cinza grande.

Assim, nota-se que normalmente, em trabalhos científicos, a prioridade no processamento de imagens é aumentar a sua inteligibilidade, de modo a retirar da mesma a maior quantidade de informações possível.

II.8.2 RESTAURAÇÃO

Busca compensar distorções específicas que acontecem normalmente no momento da aquisição. Se o mecanismo de distorção for conhecido teoricamente ou experimentalmente, pode-se gerar uma função inversa e aplicá-la sobre a imagem. Esse

modelamento matemático, entretanto, normalmente é caro e custoso computacionalmente (SCURI, 2002).

II.8.3 SEGMENTAÇÃO

Consiste em "separar" regiões de pixels da imagem com o objetivo de posteriormente extrair informações relativas a essas imagens. Uma forma comum de segmentação é a binarização da imagem, ou seja: todos os pixels com tons de cinza acima de um determinado valor ficam brancos e todos abaixo ficam pretos (SCURI, 2002).

II.8.4 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Após realizada a segmentação, conforme mencionou-se anteriormente, parte-se para a extração de atributos, que consiste em obter informações da imagem segmentada, tais como: número total de objetos, propriedades geométricas, de forma e de luminância.

Propriedades de luminância como nível médio de tons de cinza e desvio-padrão podem ser obtidas sobre regiões que foram segmentadas no processo de binarização, mas devem para isso usar os dados da imagem original (SCURI, 2002).

II.8.5 CLASSIFICAÇÃO

Uma vez extraídos os dados de cada região segmentada da imagem, pode-se classificar regiões de pixel que tenham características semelhantes. Essa classificação pode tanto ser feita pelo ser humano, quanto por processos automatizados. Evidentemente, quanto mais complexa for a forma de classificação, mais difícil se torna sua automatização (SCURI, 2002).

II.8.6 OPERAÇÕES PONTUAIS

São operações sobre imagens digitais nas quais cada pixel da imagem resultante depende apenas do próprio pixel na imagem original, conforme representado pela Figura II.33.

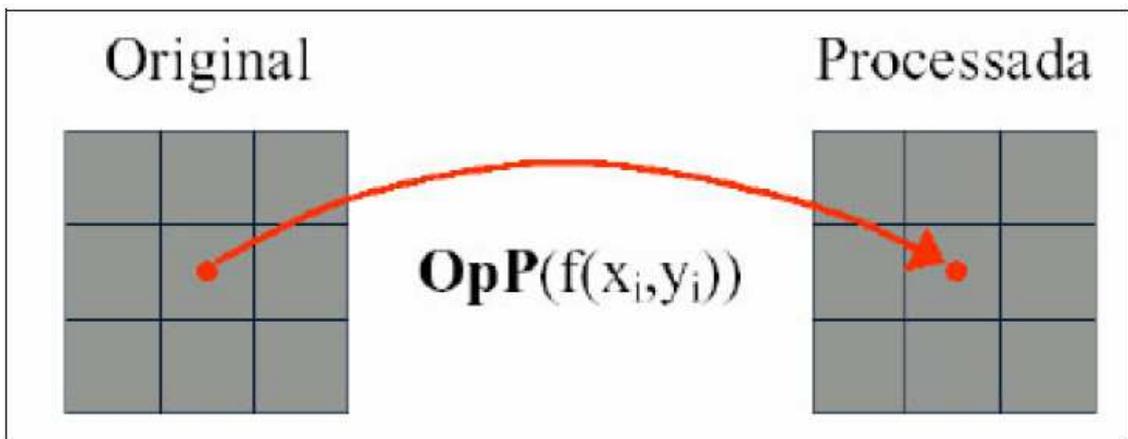


Figura II.33 - Operações Pontuais (SCURI, 2002)

As operações pontuais podem ser representadas através de gráficos que representam a tonalidade dos pixels da imagem processada em função da tonalidade dos pixels da imagem original, conforme representado na Figura II.34 (OLIVEIRA, 2007).

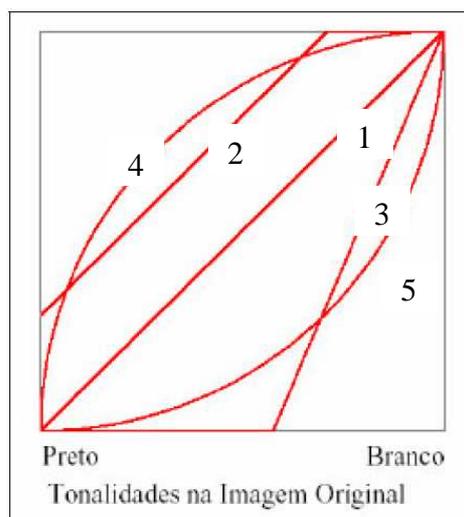


Figura II.34 - Representação gráfica de Operações pontuais de mudança de tonalidade (SCURI, 2002)

No caso, a reta 1 corresponde à função de identidade, ou seja, ela passa para a imagem processada os mesmos tons de cinza da imagem original. Retas paralelas a 1 alteram o brilho da imagem. Retas com diferentes ângulos em relação a 1 alteram o contraste da imagem, como as retas 2 e 3. Pode-se também realçar os tons escuros, através de curvas logarítmicas, como a 4. Ao contrário, pode-se realçar os tons claros, através de curvas exponenciais, como a 5.

Outra operação pontual muito comum, que envolve várias imagens, é a "média de quadros", muito utilizada para melhorar a relação sinal-ruído na radiografia direta.

II.8.7 OPERAÇÕES LOCAIS

Nesse caso, cada pixel da imagem processada depende não somente do mesmo pixel na imagem original e sim de uma determinada vizinhança em torno do pixel. O tamanho da vizinhança é variável e a operação local mais comum é a filtragem através da convolução com um *kernel* de dimensão igual à da vizinhança desejada. A Figura II.35 ilustra esse processo para o caso de um *kernel* 3x3. O tom de cinza de cada pixel da vizinhança é multiplicado por um determinado valor contido nessa matriz do *kernel*. Em seguida, esses valores são somados entre si e dão origem ao tom de cinza do pixel da imagem processada (SCURI, 2002).

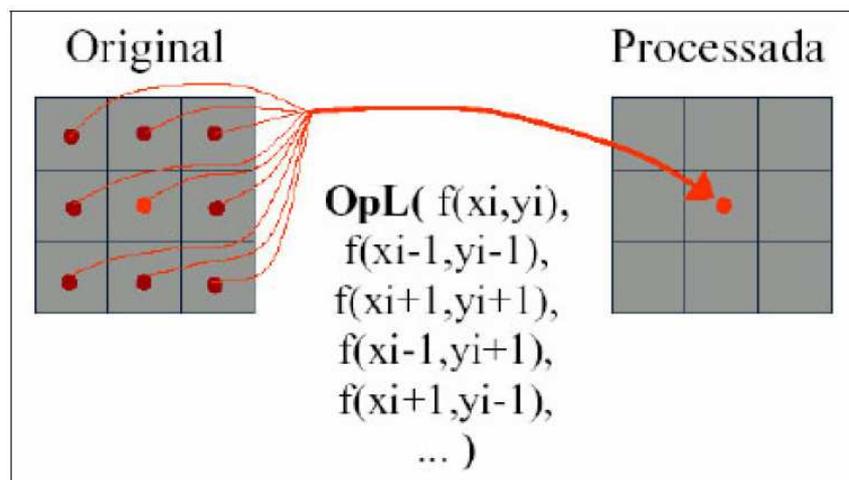


Figura II.35 - Operações locais usando kernel 3x3 (SCURI, 2002)

II.8.8 OPERAÇÕES GLOBAIS

São operações nas quais cada pixel da imagem processada depende de todos os pixels da imagem original. Essa classificação engloba transformadas de domínio, como: Transformada de Fourier, que fornece o espectro de frequências espaciais contidas na imagem; Transformadas de *Wavelets*, utilizadas para compressão de imagens através de decomposições no domínio do espaço e da frequência e Transformada de Hough, utilizada para detectar formas geométricas (SCURI, 2002).

II.9 CALIBRAÇÃO DE DDAS

Nesse capítulo, serão brevemente abordados os conceitos de ganho e *offset* dos pixels de um DDA, pixels defeituosos e o procedimento de calibração de DDAs.

II.9.1 GANHO E *OFFSET* DE UM DDA

Antes da execução de qualquer trabalho de inspeção, a calibração do detector é necessária, já que, em qualquer DDA, todos os pixels têm ganhos e *offsets* diferentes, enquanto que alguns são completamente diferentes dos demais. Calibrar um painel plano seria, então, uniformizar as respostas dos *pixels* ativos e corrigir os *pixels* ruins na imagem gerada.

Aqui, quando se fala em “ganhos diferentes”, refere-se aos diferentes níveis de cinza gerados em cada pixel para uma mesma dose de radiação incidente e quando se fala em “*offsets* diferentes”, refere-se aos níveis de cinza gerados nos diferentes pixels de um detector quando estes são ativados sem serem expostos a radiação (MOREIRA, 2010). A Figura II.36 ilustra as respostas de diferentes pixels de um DDA.

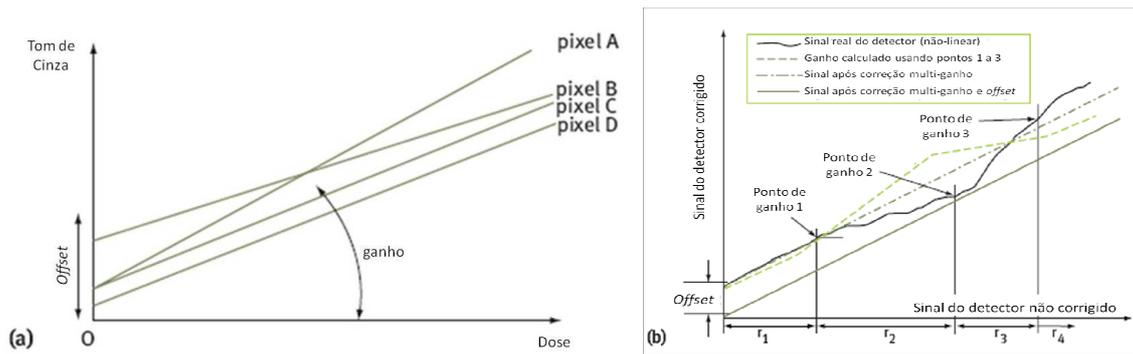


Figura II.36 – (a) Pixels de um mesmo DDA com respostas diferentes; (b) – Processo de calibração

II.9.2 PIXELS DEFEITUOSOS EM UM DDA

Pixels defeituosos de um DDA ou “*bad pixels*” são aqueles que apresentam resposta à radiação acima ou abaixo da média dos pixels do detector ou ainda que apresentam comportamento estatisticamente instável ao longo de várias exposições. Segue abaixo uma descrição de diferentes tipos de *bad pixels* (ASTM E2597). Notar que ainda não existe terminologia definida para os mesmos em português, por isso, não foram traduzidos.

- *dead pixel* – *pixels* sem resposta ou com uma resposta constante independentemente da dose no detector;
- *over responding pixel* – *pixels* cujos níveis de cinza são maiores que 1,3 vezes o valor médio em uma área mínima de 21x21 *pixels*. Este teste é feito em uma imagem de *offset* corrigido;
- *under responding pixel* – *pixels* cujos níveis de cinza são menores que 0,6 vezes o valor médio em uma área mínima de 21x21 *pixels*. Este teste é feito em uma imagem de *offset* corrigido;
- *noisy pixel* – *pixels* cujo desvio-padrão em uma sequência de 30 a 100 imagens sem radiação é 6 vezes maior que o desvio-padrão médio do DDA;

- *non-uniform pixel* – *pixel* cujo nível de cinza tem um desvio de mais de 1% do valor médio de seus 9x9 *pixels* vizinhos. Este teste deve ser realizado em uma imagem onde o valor médio de tons de cinza é igual ou superior a 75% da faixa linear do DDA. Isso é feito com uma imagem *offset* e ganho corrigidas;
- *persistence/lag pixel* – *pixel* cujo valor excede a um desvio de mais que um fator de 2 do valor médio de seus 9x9 *pixels* vizinhos na primeira imagem depois que o aparelho de raios X é desligado;
- *bad neighborhood pixel* – *pixel* onde todos os 8 vizinhos são *bad pixels*. Ele também é considerado um *bad pixel*.

Ainda, pixels que pertencem a uma linha de pixels defeituosos são considerados pixels defeituosos. Pixels que contém em sua vizinhança menos de cinco pixels bons, também são considerados pixels defeituosos, conforme indicado na Figura II.37 (MOREIRA, 2010).

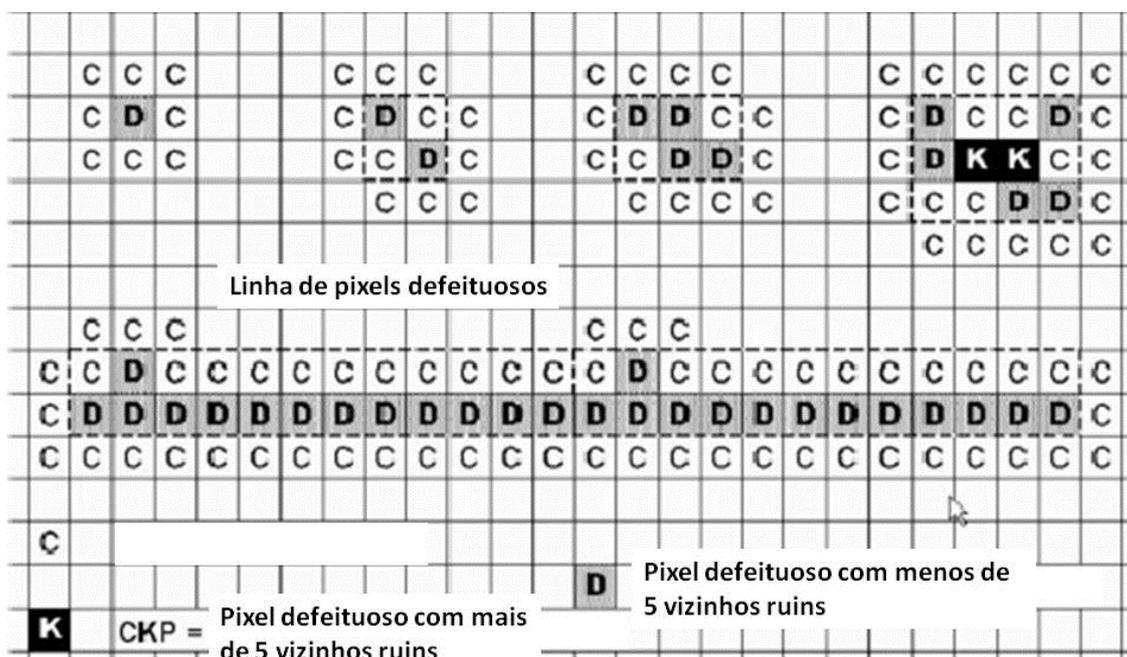


Figura II.37 – Linha de pixels defeituosos e pixels defeituosos devido à vizinhança (ASTM E2597, 2008)

II.9.3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

O primeiro passo no procedimento de calibração é adquirir uma imagem sem emissão de radiação, a chamada “*dark image*”, de forma a fazer o ajuste de *offset* do detector. A Figura II.38 mostra um exemplo de *dark image*. Idealmente, a *dark image* deve ser tomada com mesmo tempo de exposição por quadro que o utilizado na inspeção.

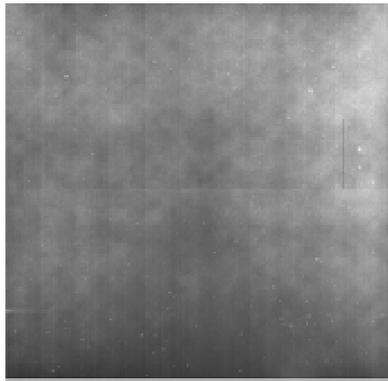


Figura II.38 – Obtenção da “*dark image*”

Em seguida, “subtrai-se” o *offset* da imagem adquirida, conforme a Figura II.39:



Figura II.39 – Subtração do *offset* na imagem adquirida

Depois disso, obtém-se uma série de imagens com a mesma tensão, mas diferentes correntes, de modo a gerar diferentes doses absorvidas no detector, conforme a Figura II.40. Obtém-se assim vários pontos para ajustar o ganho do detector, os chamados pontos de ganho. No mínimo, uma *dark image* e um ponto de ganho são necessários para a calibração do detector, ou seja, no mínimo 2 pontos para um ajuste linear.

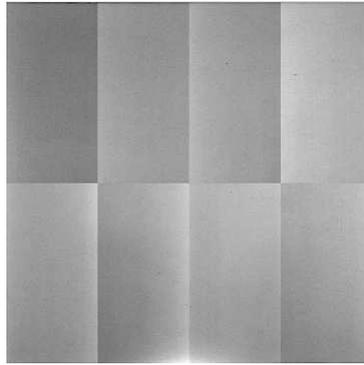


Figura II.40 – Imagens obtidas com diferentes ganhos

Após a multiplicação de cada pixel pelo valor de ganho calculado, obtém-se a imagem calibrada do DDA, conforme a Figura II.41.

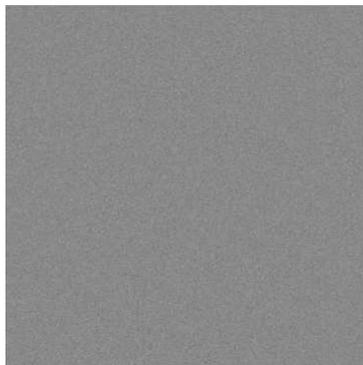


Figura II.41 – Imagem de DDA calibrado

O procedimento de calibração é muito importante para a qualidade final de uma imagem digital. Isso porque os DDAs produzem imagens radiográficas com resolução espacial básica limitada pelo tamanho do pixel. Ou seja, com um DDA que possui pixels de 200 μm não se consegue obter uma resolução espacial próxima à de um filme com grãos de prata da ordem de poucos micrômetros. Ao mesmo tempo, quanto maior for a camada de água que a radiação precisar atravessar, maior será a tensão necessária para essa aplicação, o que reduz a sensibilidade ao contraste. Resta, portanto, para se

obter uma boa qualidade de imagem com DDAs em aplicações submarinas, a alternativa de tentar otimizar a SNR.

A SNR, por sua vez, é fortemente dependente do número de quadros utilizados para se obter a imagem, pois a média desses quadros diminui o ruído, assim como de um procedimento de calibração adequado.

Softwares de fabricantes de DDAs, como GE, Vidisco e Durr, normalmente são pouco flexíveis quanto ao processo de calibração, impedindo assim que uma calibração ótima seja atingida. Por esse motivo, nos experimentos realizados no BAM, utilizou-se para a calibração um software desenvolvido pelo próprio BAM, o iSee!. Dessa forma, pôde-se controlar parâmetros como:

- Número e duração dos quadros adquiridos para a *dark image*;
- Número e duração dos quadros adquiridos para os pontos de ganho, assim como a amperagem e conseqüentemente níveis de cinza (mantida a tensão constante);
- Possibilidade de geração de um mapa de *bad pixels* e de uso do mesmo em diferentes calibrações, economizando tempo;
- Possibilidade de atualizar a calibração realizada para uma *dark image* obtida com diferente tempo de exposição por quadro, através do comando `dark_frame_refresh`;
- Escolha de interpolação linear ou quadrática entre os pontos de calibração; sendo que a linear normalmente é utilizada, por ser de processamento muito mais rápido e dar resultado próximo à interpolação quadrática;
- Escolha de um nível de cinza médio para cada ponto de ganho. Essa escolha é opcional, mas desejável, pois torna o processamento mais rápido;
- Escolha do critério de definição de *bad pixels*, baseado no número de desvios-padrão em que o tom de cinza de cada pixel desvia da sua vizinhança e da imagem completa

Como será visto adiante, uma mesma imagem bruta adquirida pode variar significativamente sua SNR em função apenas da calibração adotada.

II.9.4 ARTEFATOS E RUÍDO PROVENIENTES DA CALIBRAÇÃO

O padrão de calibração utilizado pode possuir heterogeneidades geométricas ou estruturais que gerem artefatos que comprometerão a qualidade da imagem calibrada. A Figura II.42 mostra um exemplo de uma mesma imagem calibrada com dois padrões diferentes. À esquerda, o padrão utilizado era homogêneo e adequado à calibração. À direita, entretanto, o padrão de calibração introduziu na imagem calibrada uma série de artefatos que podem ser confundidos com defeitos como poros ou vazios.



a) Padrão de calibração adequado

b) Padrão de calibração gerando artefatos na imagem

Figura II.42- (a) – Padrão de calibração adequado – (b) – Padrão de calibração gerando artefatos na imagem calibrada

No caso anterior, foi fácil constatar que as indicações não se tratavam de defeitos e sim de artefatos pois a mesma imagem bruta foi calibrada várias vezes com diferentes padrões. Em outras situações, entretanto, esses artefatos poderiam levar a conclusões errôneas, além de comprometer fortemente a qualidade da imagem.

Para verificar se o padrão é adequado para a calibração e assim evitar esse tipo de problema, pode-se fazer uso do seguinte procedimento: após obter os pontos de

ganho com o padrão em uma determinada posição, deve-se mover o mesmo apenas alguns milímetros para um dos lados, mantendo-se a distância em relação à fonte. Após fazer esse pequeno deslocamento, deve-se fazer uma exposição com os mesmos parâmetros (tensão, corrente, tempo de exposição, etc) que um ponto de ganho. Essa nova exposição, caso o padrão seja razoavelmente uniforme, deve gerar uma imagem também uniforme, contendo apenas ruído branco, sem *shading* ou tendências, já que todos os parâmetros foram mantidos constantes e apenas um pequeno deslocamento para um dos lados foi aplicado. Caso essa imagem não se mostre uniforme, isso quer dizer que o padrão introduzirá artefatos nas imagens calibradas.

A Figura II.43 mostra um exemplo. O padrão de calibração consistia de uma chapa de cobre de 5 mm de espessura. Os três pontos de ganho foram obtidos com 400 kV e respectivamente: 0,2 mA, 0,4 mA e 0,8 mA. Após a obtenção dos pontos de ganho e da *dark image*, realizou-se uma nova exposição com 400 kV e 0,4 mA, mas dessa vez com um deslocamento da placa de alguns milímetros em relação à posição anterior. A Figura II.43 mostra a presença de um artefato que será introduzido nas imagens calibradas utilizando esse padrão.

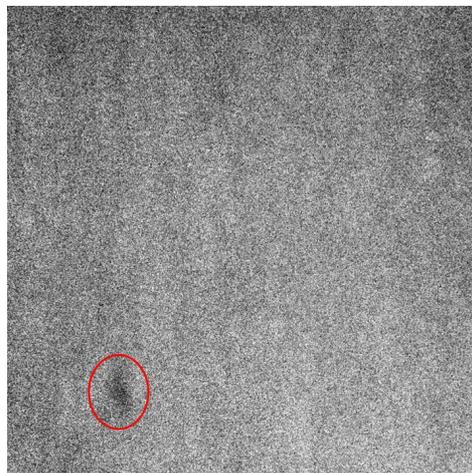
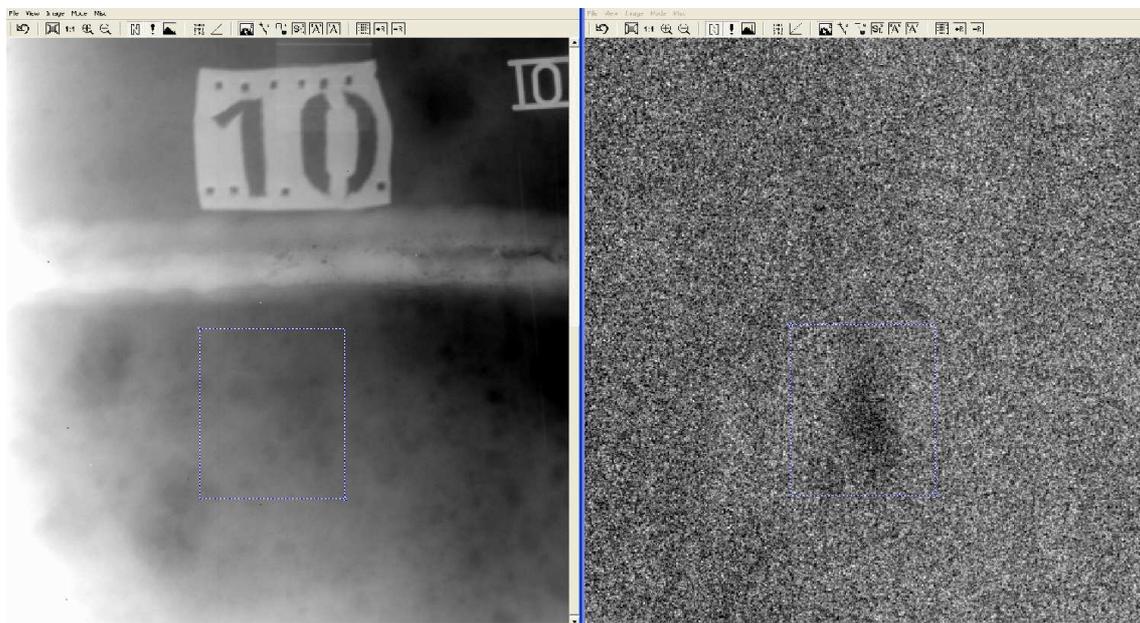


Figura II.43 – Exemplo de artefato introduzido por padrão de calibração

É importante que se saiba avaliar, entretanto, a importância desses artefatos para a imagem final. No exemplo anterior, embora o artefato pareça ser considerável para a qualidade da imagem, a diferença de níveis de cinza na região do artefato é de apenas cerca de 10 tons de cinza num range de 16384 tons de cinza (14 bits). Esse artefato só

aparece claramente nessa imagem porque a SNR da mesma é muito alta, da ordem de 900. Em uma imagem de uma inspeção obtida com uma SNR mais baixa, da ordem de 300, esse artefato seria “escondido” pelo ruído e não apareceria na imagem. Isso pode ser constatado na Figura II.44, onde um zoom é dado sobre a mesma região em uma imagem de um tubo inspecionado e calibrado com esse padrão. Nota-se que o artefato se confunde com o ruído da imagem. Quanto mais alta a SNR da inspeção, entretanto, maior a influência do artefato. Por isso na Figura II.42, por exemplo, o padrão gerou artefatos na imagem calibrada.



(a) Baixa SNR

(b) Alta SNR

Figura II.44 – Artefato de calibração “escondido” pelo ruído da imagem em imagem com baixa SNR (a) e evidente em imagem de alta SNR (b)

Outro estudo que deve ser feito para se avaliar se uma determinada calibração foi adequada diz respeito ao ruído que esta pode introduzir na imagem final. Deve-se assegurar que o número de quadros utilizado em cada ponto de ganho é o suficiente para assegurar uma boa SNR. Um procedimento para se avaliar o ruído nos pontos de ganho é o seguinte:

- Toma-se, em seguida a cada ponto de ganho, uma outra imagem com exatamente os mesmos parâmetros (tensão, corrente, número de quadros, etc) de modo que a única diferença entre as duas imagens seja devido ao ruído;

- Toma-se imagens com os mesmos parâmetros que os pontos de ganho, exceto o número de quadros. Essas imagens também devem ser tomadas duas a duas, de modo que a diferença entre os componentes de cada par de imagens seja apenas o ruído;
- Obtém-se uma imagem subtraindo-se para cada par de imagens os tons de cinza de uma da outra;
- Adiciona-se a esse resultado um determinado *offset*, por exemplo, 10000 níveis de cinza
- Compara-se o desvio-padrão em cada imagem obtida como uma função do número de quadros

Esse procedimento pode ser melhor entendido através do exemplo a seguir. Para uma determinada calibração, utilizou-se os seguintes parâmetros para obter os pontos de ganho:

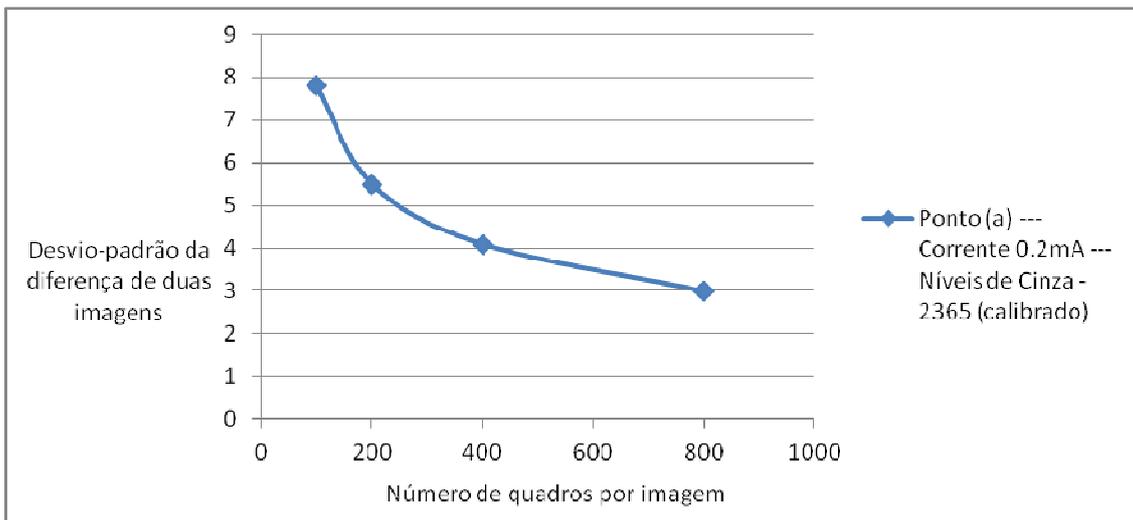
- Tensão de 400 kV;
- Chapa de cobre de 5 mm de espessura;
- Distância fonte-detector de 2 metros;
- 3 pontos de ganho com tempo de exposição por quadro de 2 s, cada;
- O seguinte par corrente-número de quadros: 0,2 mA com 800 quadros, 0,4 mA com 400 quadros, 0,8 mA com 200 quadros, ou seja, à medida que se dobra a corrente para uma tensão constante, reduz-se à metade o número de quadros para que se mantenha aproximadamente constante a quantidade de fótons incidente no detector e conseqüentemente o nível de ruído associado a cada ponto de ganho;

Para cada um desses pontos de ganho, aqui chamados gpa, gpb e gpc (*gain points* a, b, c); foram obtidas imagens com exatamente os mesmos parâmetros logo em seguida, aqui chamadas gpa_r, gpb_re gpc_r, com a letra “r” indicando que é uma repetição do ponto. O desvio-padrão será então analisado sobre cada diferença, por exemplo, gpa-gpa_r. O *offset* proposto de 10000 é utilizado porque o software não

compreende níveis de cinza negativos e portanto, sem *offset*, os valores negativos mudariam para zero e comprometeriam a medida do desvio-padrão da diferença.

Em seguida, obtém-se pontos de variação, aqui chamados vp, para se analisar se o número de quadros utilizado é suficiente ou não. Considerando que utilizemos três pontos de variação para cada ponto de ganho, podemos chamá-los de: vpa1 (primeiro ponto de variação de (a)), vpa2 (segundo ponto de variação de (a)) e vpa3 (terceiro ponto de variação de (a)) para os pontos de variação do primeiro ponto de ganho (ponto (a)), por exemplo. vpa1 pode ser tomado com a metade do número de quadros, vpa2 com um quarto do número de quadros e vpa3 com um oitavo do número de quadros de gpa. Para cada ponto de variação, é preciso também uma imagem repetida para que seja subtraída. Essas imagens seriam, portanto, vpa1_r, vpa2_r e vpa3_r.

A Figura II.45 mostra as curvas de desvio-padrão em função do número de quadros obtidas para cada um desses pontos de ganho (a, b, c) e seus pontos de variação. Nesse procedimento, mais uma vez, utilizou-se um maior número de quadros para os pontos de ganho com menor corrente, de modo a manter aproximadamente constante o número de fótons incidindo no detector para cada ponto de ganho.



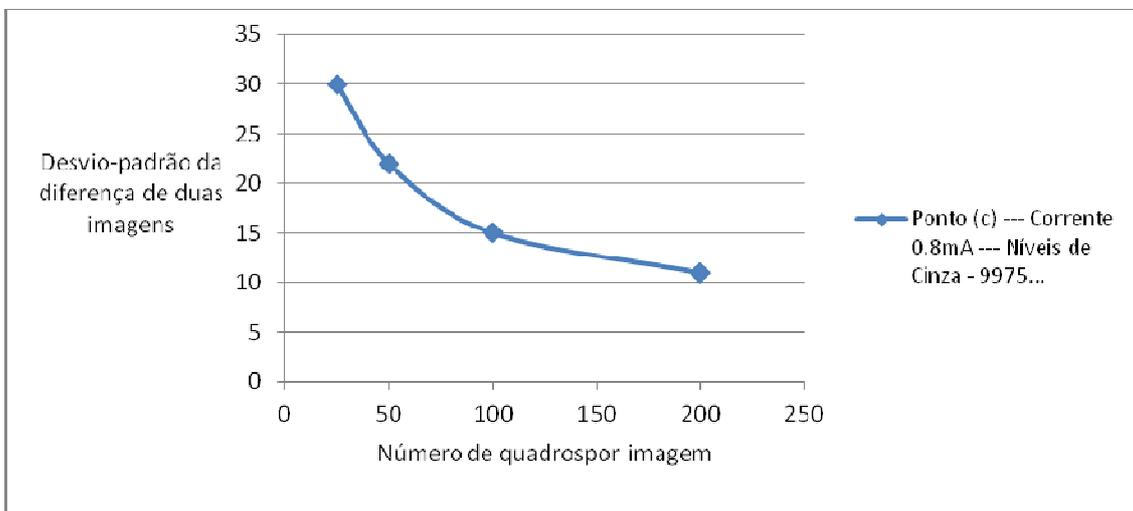
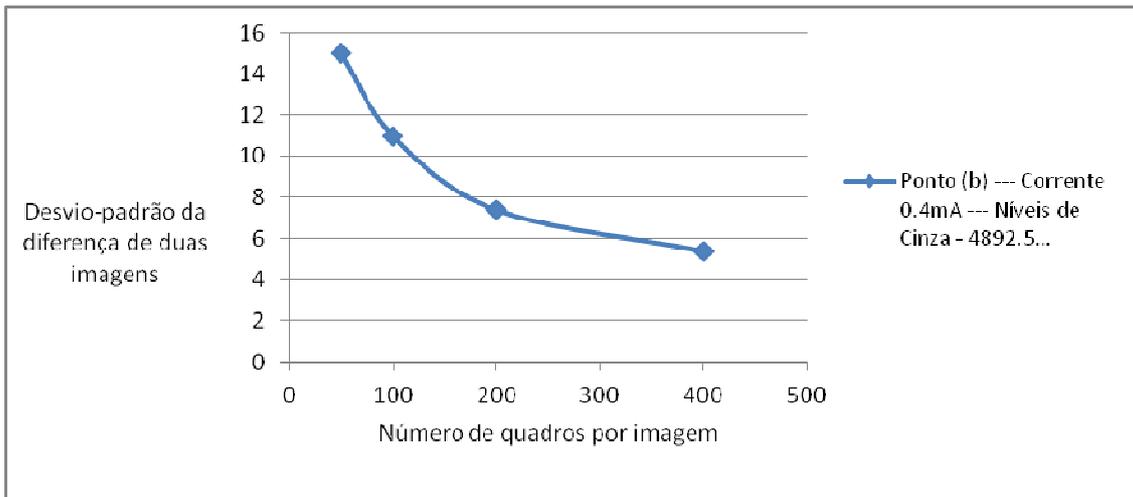


Figura II.45 – Exemplos de curvas de desvio-padrão em função do número de quadros obtida para uma determinada calibração

Através dessas curvas, pode-se observar qual o número de quadros necessário para que cada ponto de ganho tenha um bom nível de ruído, ou seja, deve-se tomar um número de quadros tal que o módulo da derivada da curva nesse ponto seja baixo e qualquer aumento no número de quadros a partir dali traga pouco ganho em relação à queda do desvio-padrão. Nota-se também que as curvas se ajustaram bem ao comportamento previsto teoricamente, que diz que o desvio-padrão deve variar de maneira inversamente proporcional à raiz quadrada do número de quadros. Por exemplo, para o ponto (a), quando comparamos o desvio-padrão com 200 quadros e com 800 quadros por imagens, esperar-se-ia que ao se multiplicar por quatro o número

de quadros, o desvio-padrão cairia pela metade. Nesse caso, o desvio-padrão caiu de 5,5 para 3, ou seja, próximo do esperado.

Os dados dos três gráficos anteriores podem ser combinados em um único, conforme representado na Figura II.46. Este gráfico confirma que a SNR para cada ponto de ganho é aproximadamente a mesma, consequência da estratégia de manter constante o produto entre corrente e número de quadros para cada ponto de ganho, o que leva a uma quantidade de fótons aproximadamente constante para cada ponto.

Mostra ainda que para essa calibração específica a SNR está limitada pela calibração a cerca de 800, pois os pontos de ganho utilizados (aqueles com maior SNR para cada corrente) possuem SNR entre 800 e 900.

Além disso, nota-se que todas as retas tendem ao ponto (0,0), mostrando que o procedimento de calibração é consistente, ou seja, quando o número de quadros tende a zero, a SNR também tende a zero. As equações obtidas pelo método de mínimos quadrados para cada corrente aparecem à esquerda, no gráfico, com a mesma cor de fundo que a respectiva reta. Nota-se pelos elevados coeficientes de determinação (R^2) que o modelo linear é adequado para descrever o fenômeno.

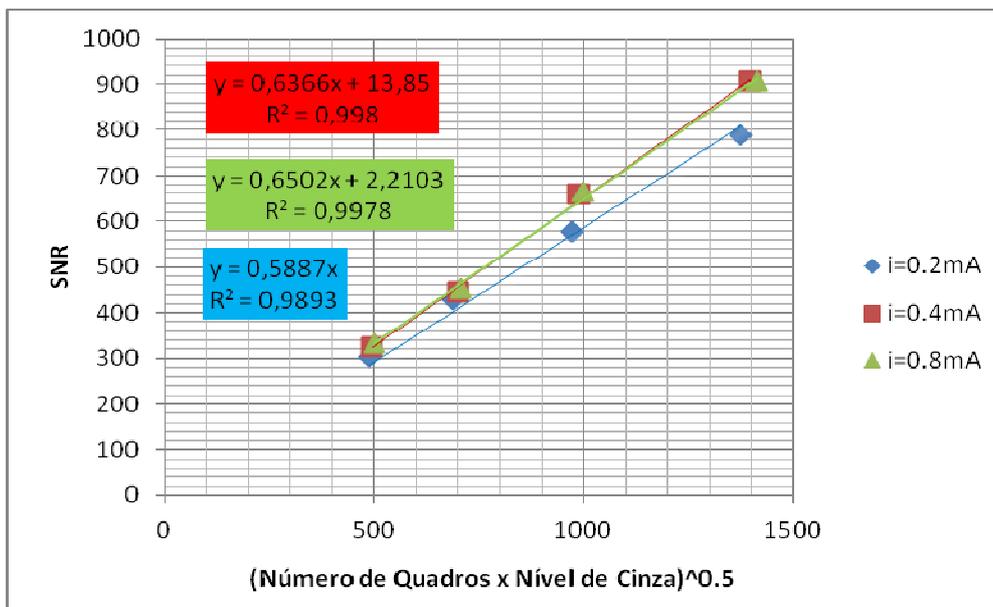
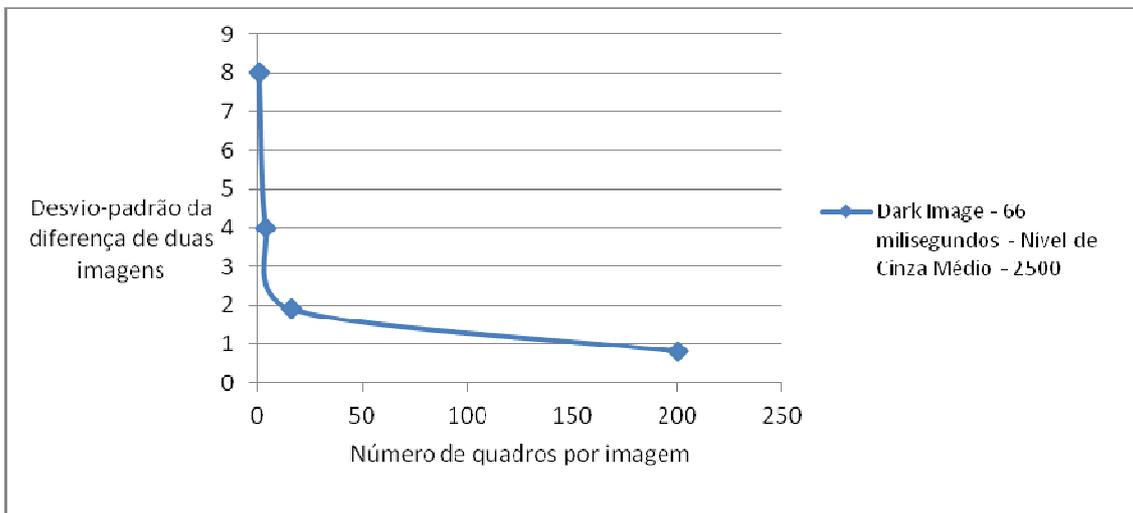


Figura II.46 - SNR em função da raiz quadrada do produto entre número de quadros e nível de cinza - à esquerda, ajustes lineares para cada corrente e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2)

Um raciocínio semelhante (adquirir pares de imagens e então analisar o desvio-padrão da diferença entre elas) pode ser utilizado para analisar o desvio-padrão nas *dark images*. Nesse segundo caso, entretanto, trata-se não mais de ruído quântico, pois as *dark images* são tomadas sem exposição a radiação. Trata-se de ruído eletrônico, influenciado principalmente pela temperatura (ruído térmico) e por ruídos de multiplexação que ocorrem durante a leitura de cada linha de pixels do detector.

A Figura II.47 mostra como varia o desvio-padrão em função do número de quadros para *dark images* com tempos de exposição de 66ms e 2 segundos. A *dark image* deve ser utilizada com o mesmo tempo de exposição por quadro que os pontos de ganho. No caso específico da calibração utilizando o software iSee!, como foi feita nesse trabalho, é possível utilizar um determinado tempo de exposição para calibração e *dark image* e depois aplicar um comando chamado “*dark image refresh*”, que atualiza para a *dark image* com um novo tempo de exposição. Esse tipo de estudo deve ser feito para cada modelo de DDA utilizado e para o intervalo de tempos de exposição por quadro que se deseja utilizar.



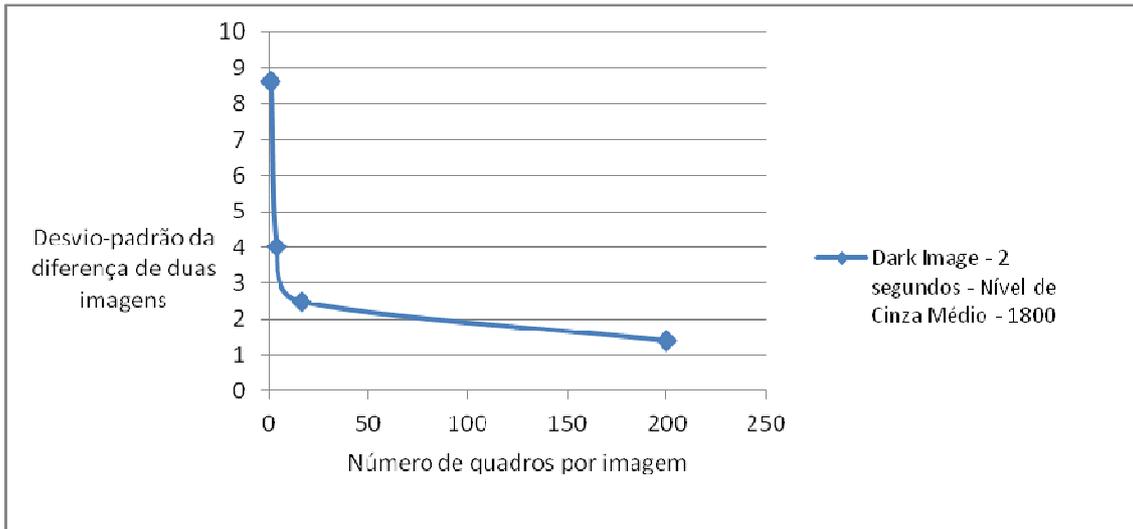


Figura II.47 – Variação do desvio-padrão com o número de quadros para *dark images* com 66ms (cima) e 2s (baixo) de tempo de exposição

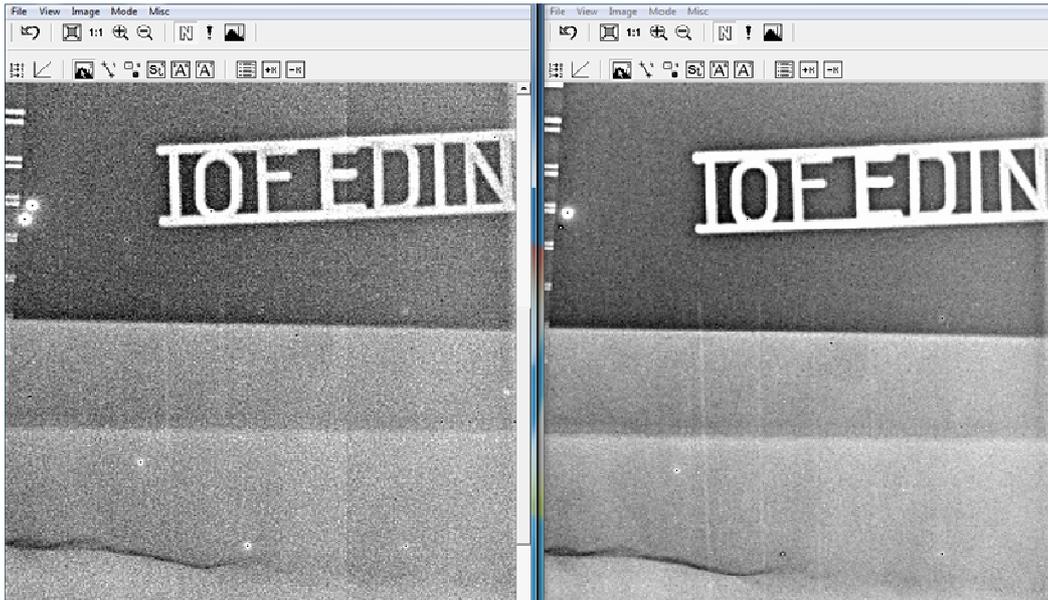
II.10 INFLUÊNCIA DA *DARK IMAGE*

O tempo de cada quadro dos pontos de ganho deveria, idealmente, ser o mesmo utilizado na inspeção. Se a inspeção precisar ser feita com um tempo por quadro diferente, pelo menos a *dark image* deve ser atualizada para esse tempo. Nesse caso, a imagem é então calibrada com uma *dark image* e pontos de ganho que têm o mesmo tempo por quadro entre si (que pode ser diferente daquele usado na inspeção). Após a calibração, entretanto, a *dark image* deve ser atualizada para o novo tempo de quadro.

Esse procedimento foi adotado para todas as imagens de inspeções feitas com tempo de quadro diferente do usado para os pontos de ganho através do comando "dark_frame_refresh" no software iSee! v1.10.3.

A Figura II.48 mostra a influência desse procedimento. Nesse caso, a imagem de um tubo de 10" x 20 mm foi obtida utilizando-se os seguintes parâmetros: 200 kV, 7,5 mA, 20 segundos por quadro, 38 quadros, distância fonte-detector de 900 mm. A mesma imagem bruta foi calibrada com dois arquivos diferentes.

Estes dois arquivos consideravam os mesmos pontos de ganho e *dark images* para calibração, todos usando 2 segundos por quadro. A única diferença entre eles é que um deles atualizou a *dark image* após a calibração (imagem da direita), enquanto o outro não fez essa atualização (imagem da esquerda). Ou seja, na imagem da direita, apesar da calibração ter sido realizada com *dark image* e pontos de ganho de 2 segundos, a *dark image* foi atualizada para uma de 20 segundos através do comando "dark frame refresh".



(a) Sem dark frame refresh

(b) Com dark frame refresh

Figura II.48 - Imagem sem atualização de dark frame - (a), arame 11 - e com "dark frame refresh" - (b), arame 13

A atualização da *dark image* melhorou a sensibilidade ao contraste da imagem do 11° para o 13° arame. Isso mostra que a *dark image* é importante não apenas para evitar a formação de artefatos e reduzir o número de *bad pixels*, mas também para reduzir o nível de ruído e conseqüentemente aumentar a CNR.

III MATERIAIS E MÉTODOS

Parte dos experimentos foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) da UFRJ e outra parte foi realizada no instituto alemão BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung*). Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados neste estudo, essencialmente os tubos de raios X, o isótopo, os DDAs e os corpos de prova, assim como os diferentes arranjos utilizados.

III.1 AMOSTRAS

Para simular as paredes dos vasos de pressão da fonte e do detector, foram usadas três chapas de aço diferentes espessuras: 3; 4,4 e 6,6 mm, assim como uma chapa de fibra de carbono de 10 mm de espessura. Nos arranjos experimentais em que as chapas foram utilizadas, partiu-se do princípio que a parede do lado da fonte seria menos espessa que do lado do detector, pois a “janela” pela qual a radiação deveria se propagar seria menor.

Já para simular os dutos, foram utilizadas duas amostras, ambas em aço carbono e com solda circunferencial. A primeira é um tubo de 10 polegadas por 20 mm de espessura, simulando um duto em águas profundas devido à sua grande espessura, representando dificuldade para inspecionar com a técnica Parede Dupla Vista Simples na presença de água.

O segundo tubo utilizado, com um diâmetro nominal de 16” por 10 mm de espessura, foi soldado no CENPES e uma série de defeitos foram introduzidos no mesmo com o objetivo de avaliar a detectabilidade dos mesmos e compará-la com ou sem a presença de água. A Figura III.1 mostra a solda sendo realizada no tubo. À esquerda, uma região onde foi inserido um arame de cobre com o objetivo de gerar trincas a quente e à direita uma região onde intencionalmente foram produzidos poros durante a soldagem.

As amostras selecionadas representam a dificuldade para inspecionar, em ambiente submarino, um duto desta ordem de grandeza com a técnica Parede Dupla Vista Simples. Sabe-se, no entanto, que no campo existem dutos de diâmetro e espessura ainda maiores.



(a) Arame de cobre

(b) Poros

Figura III.1 – Introdução de defeitos durante soldagem de tubo de 16" - (a) - arame de cobre para introdução de trincas a quente e (b) - introdução de poros

A Figura III.2 mostra o mesmo tubo já soldado e com indicações de defeitos.



Figura III.2 – Tubo de 16" por 10 mm de espessura

III.2 TUBOS DE RAIOS X

Nos experimentos no LIN, foi utilizado um tubo de 450 kV da Comet. No BAM, foi utilizada um tubo de 225kV, modelo YTU225-D04 da Comet/Yxlon, potência de 1800W com corrente limitada a 8 mA para a tensão máxima de operação. Esse tubo possui tamanho focal de 0,4 ou 1 mm, conforme a potência desejada. Nos

experimentos realizados nesse trabalho, utilizou-se sempre 1mm. Nos experimentos com este tubo, não foi usado colimador.

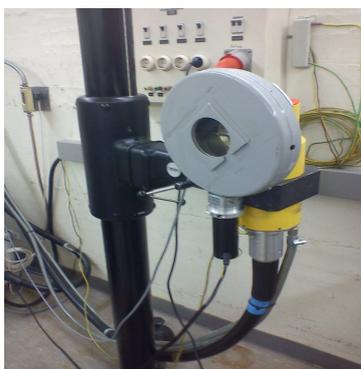
Foi também utilizado no BAM um tubo de 420 kV, modelo MB420/10 com tamanho focal de 3 ou 6 mm, dependendo da potência desejada. Ambos os tamanhos focais foram utilizados e comparados na seção IV.5. Foi utilizada para esse tubo uma colimação grosseira, através de placas de chumbo com orifícios centrais.

Os três tubos citados acima aparecem na Figura III.3.



450kV - LIN

(a)



225 kV - BAM

(b)



420 kV - BAM

(c)

Figura III.3 – Tubos de raios X sem controle de colimação utilizados no LIN (a) e no BAM (b, c)

Por fim, para os experimentos mais complexos, foi utilizado um tubo de 600 kV da Comet, modelo XRS-600 com tamanho focal de 0,4 ou 1 mm e colimador controlado eletronicamente. A Figura III.4 mostra da esquerda para a direita: (a) - o tubo de 600 kV, (b) - o colimador aberto e (c) - o controle do colimador, que permite ajustes na horizontal e na vertical.

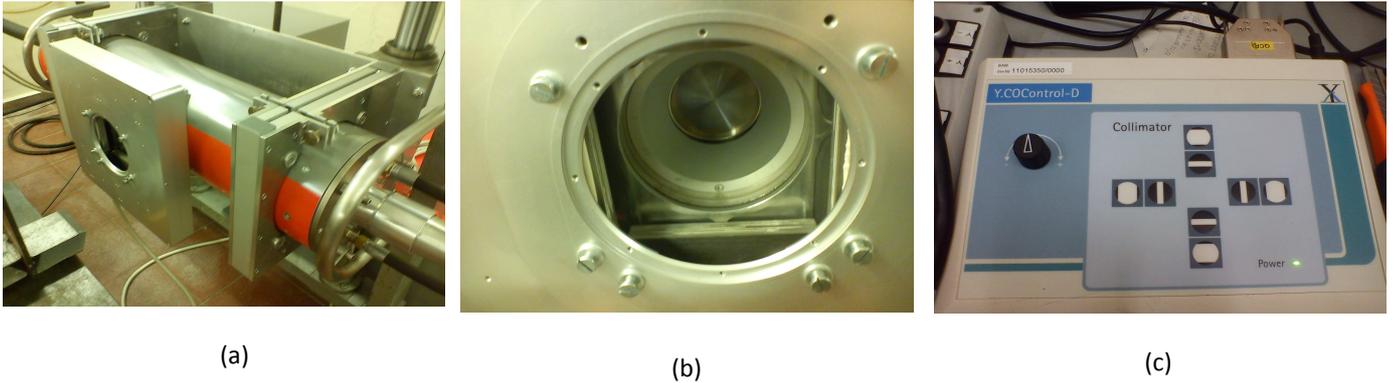


Figura III.4 – Tubo de 600 kV (a), colimador (b) e controle do colimador (c)

Foi também utilizado um tubo de raios X compacto, mostrado na Figura III.5, desenvolvido pela GE, modelo ERESKO 280 MF4-R com as seguintes características: 280 kV, 340 W, tamanho focal de 0,5 mm.



Figura III.5 – Tubo de raios X compacto da GE – 280 kV

O interesse em utilizar esse tubo consiste no mesmo possuir dimensões e peso reduzido (40 kg), assim como ser ventilado a ar e ter o transformador acoplado ao tubo, facilitando o processo de marinização na concepção de um equipamento de radiografia submarina.

III.3 FONTES DE GAMAGRAFIA

Foram realizados também experimentos com uma fonte de Selênio-75, mostrada na Figura II.7, junto a uma placa de chumbo com um furo central usada para colimar o feixe. O objetivo do uso da fonte de Selênio foi avaliar a possibilidade de substituição de tubos de raios X de alta energia por isótopos, caso necessário. Um problema considerável, entretanto, foi o fato da atividade da fonte já estar relativamente baixa (26 Ci) e o seu tamanho focal ser de 3 mm, exigindo grandes distâncias fonte-objeto para realização da inspeção. Uma fonte de Ir-192 também poderia ser utilizada, mas a única disponível no laboratório do BAM estava com atividade ainda mais baixa (cerca de 5 Ci). O uso de Co-60 permitiria um maior poder de penetração, entretanto, do ponto de vista prático, a marinização de tal isótopo seria extremamente difícil em função de seu peso. Além disso, o DDA teria que ser adequado para trabalhar com radiação de alta energia.



Figura III.6 – Fonte de Se-75

III.4 DDAS

No LIN, foi utilizado um DDA da GE, modelo DXR250V (Figura III.7). Esse DDA possui tamanho de pixel de 200 μm , sensores do tipo diodo de silício amorfo e tela do cintilador de oxissulfato de gadolínio, com uma matriz contendo mais de quatro milhões de pixels (2040 x 2048).

Esse DDA trabalha em uma faixa de energia de 30 kV a 3 MeV. O sistema utilizado para a operação e aquisição de imagens foi o software proprietário *Rhythm RT* e para a análise das imagens foi utilizado o programa *iSee!* (versão 10.2 Demo).



Figura III.7 – DDA GE DXR 250V (www.ge-mcs.com)

No BAM, foi utilizado um DDA α -Si Perkin Elmer (Figura IV.9) modelo XRD 0822CO15, com tamanho de pixel também de 200 μm , permitindo trabalhar num range de 20 kV a 15 MeV e cintilador também de oxissulfato de gadolínio. Sua área útil é de 205 x 205 mm. O software de aquisição de imagens utilizado foi o XIS da Perkin Elmer. Os dados brutos foram transferidos para o software *iSee!* versão 1.10.3, onde as imagens foram calibradas e pós-processadas.



Figura III.8 – DDA Perkin Elmer modelo XRD 0822CO15

Ambos os DDAs utilizados possuem 14 bits e portanto 16384 níveis de cinza.

III.5 ARRANJOS EXPERIMENTAIS

III.5.1 AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO COM OU SEM ÁGUA

Em um primeiro momento, avaliou-se o efeito de uma camada de água de 120 mm de espessura sobre a qualidade da imagem obtida com um DDA Perkin Elmer. Esses primeiros experimentos visavam definir quais aspectos da qualidade da imagem seriam mais deteriorados em função da água (SNR, Sensibilidade ao contraste, Resolução Espacial), assim como definir se um padrão de calibração para uma inspeção submarina deveria também conter água ou não. Para isso, foi montado o arranjo experimental representado esquematicamente na Figura III.9.

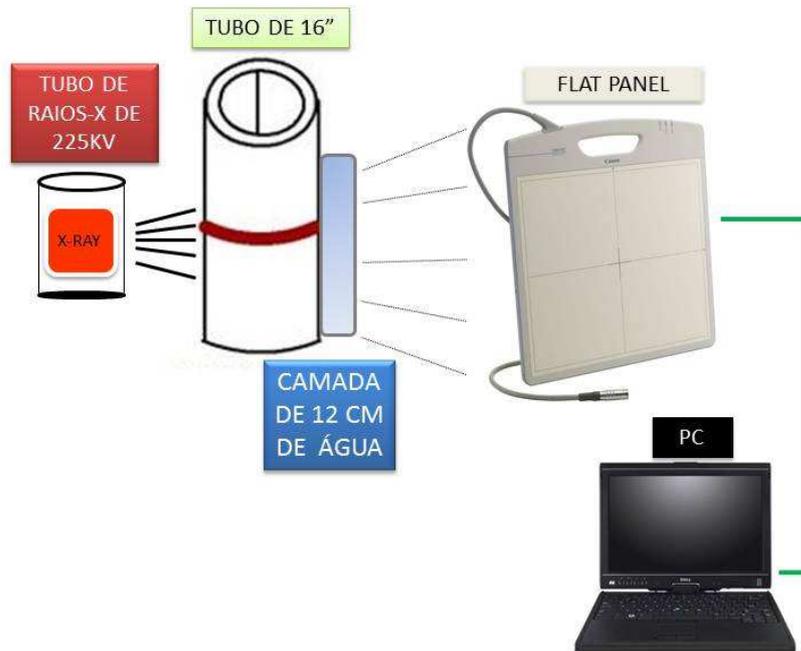


Figura III.9- Avaliação da influência da água

Em um primeiro momento, inspecionou-se o tubo de 16" x 10 mm em uma determinada posição sem a presença de água. Em seguida, uma camada de água foi justaposta ao tubo e ele foi inspecionado novamente para que se observasse a influência da mesma na qualidade da imagem.

Para avaliação do padrão de calibração, entretanto, em um primeiro momento utilizou-se uma chapa de aço de 20 mm de espessura e com essa chapa de aço obtiveram-se vários pontos de ganho para a calibração do DDA, mantendo-se a tensão constante em 200 kV e variando-se a corrente, de modo a se obter pontos de ganho com diferentes níveis de cinza.

Idealmente, nesse processo de calibração, utiliza-se sempre o mesmo tempo de exposição para cada ponto de ganho, mas o produto da corrente pelo número de quadros de cada ponto de ganho deve ser mantido constante, de modo a se obter níveis de SNR similares para cada ponto de ganho. Esses pontos foram obtidos primeiramente com uma simples chapa de aço de 20 mm de espessura, de modo a simular as duas

espessuras do tubo penetradas pela radiação, já que este possui uma espessura de 10 mm.

Em seguida, utilizou-se um padrão com água, ou seja: uma chapa de 20 mm de espessura justaposta a uma camada de 12 cm de água. Obteve-se também para este novo padrão pontos de ganho.

Por fim, as imagens brutas do tubo inspecionado com a camada de água foram calibradas utilizando-se esses dois padrões.

III.5.2 AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DE CALIBRAÇÃO E DA SNR

Verificou-se em um segundo momento, qual deveria ser a espessura utilizada no padrão de calibração. Para isso, foram realizadas inspeções no tubo de 10 polegadas de diâmetro por 20 mm de espessura, em um primeiro momento, sem água. Em seguida, o tubo foi colocado dentro de um reservatório de água, com água apenas ao seu redor e não do lado de dentro, conforme mostrado na Figura III.10.

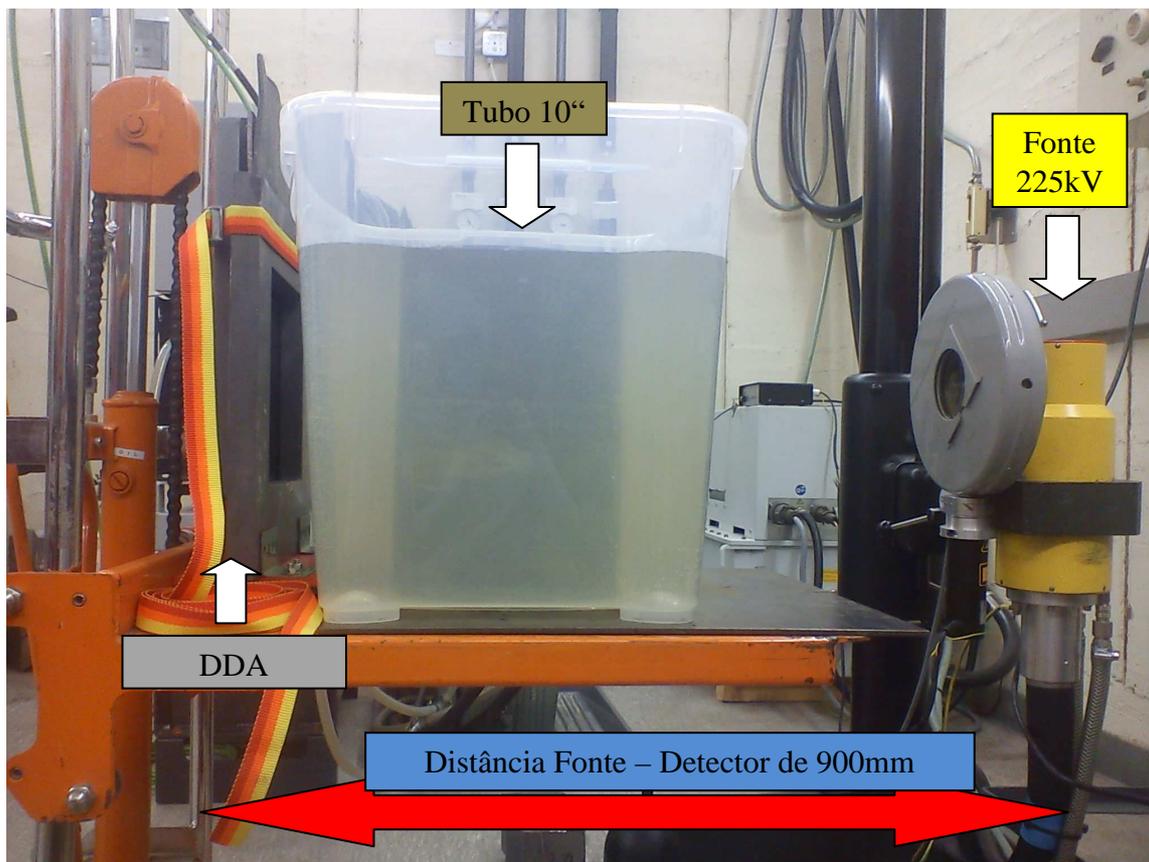


Figura III.10 – Arranjo experimental – Determinação da influência da água ao redor do tubo e posteriormente do arranjo de calibração mais adequado

Comparou-se então duas calibrações: uma realizada com pontos de ganho obtidos a partir de uma chapa de 20 mm e outro com uma chapa de 35 mm (que havia disponível) e que portanto estaria mais próxima da parede dupla ou espessura total penetrada pela radiação de 40 mm. Os resultados desse experimento levaram a conclusões sobre a influência da água em volta do tubo na qualidade da imagem, assim como o procedimento de calibração mais adequado para essa situação.

Com esse mesmo arranjo experimental, também realizou-se experimentos visando verificar a adequação da SNR, calculada conforme a norma EN 14784 para comparação da qualidade de imagens obtidas com e sem água.

III.5.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA IMAGEM COM ISÓTOPO

Para avaliar a qualidade da imagem com Se-75 foi utilizado inicialmente um arranjo com água apenas em volta do tubo de 10", aproximadamente 60 mm do lado da fonte e 70 mm do lado do detector, sem as chapas de aço simulando os vasos de pressão, conforme mostrado na Figura III.11.

Como será descrito no item IV.6.1.6, os resultados obtidos com esse isótopo não foram bons, por isso não foram realizados experimentos posteriores com água por dentro do tubo e com as chapas de aço.

Algumas variações do arranjo mencionado incluem o uso de uma chapa de cobre de 0,5 mm de espessura em frente ao detector para tentar reduzir a radiação espalhada, conforme mostrado na Figura III.11, assim como o uso de uma pequena chapa de chumbo com um furo central para colimar o feixe, conforme mostrado na Figura III.6. Os resultados desses experimentos estão descritos no item IV.6.1.6.

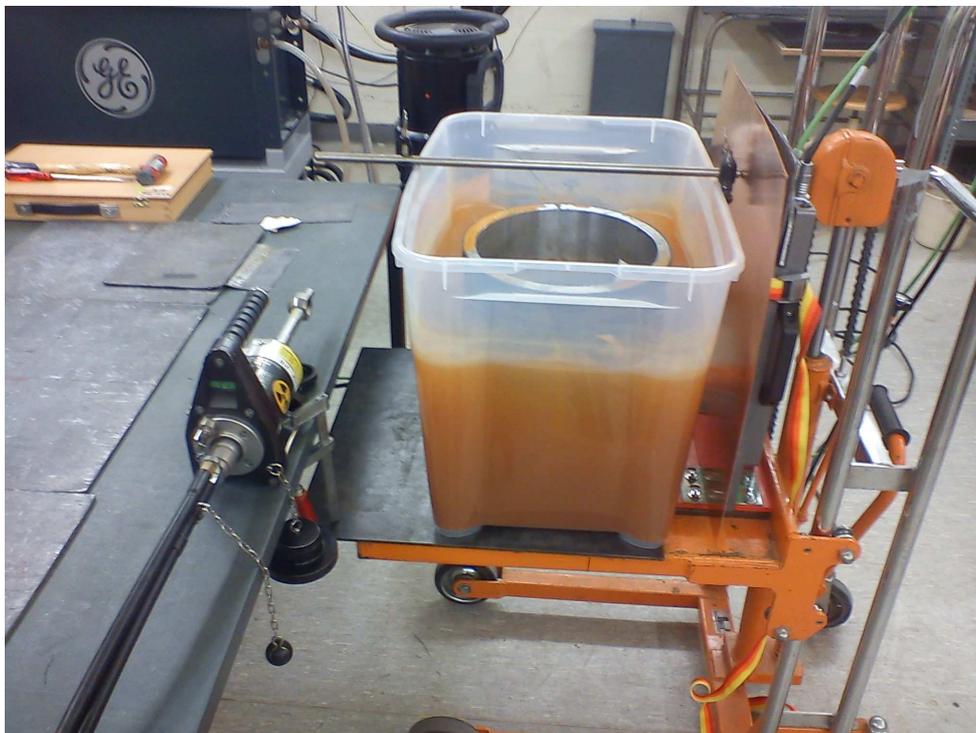


Figura III.11 – Arranjo utilizado para avaliar a qualidade da imagem com Se-75

III.5.4 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CAMPO COM A INFLUÊNCIA DOS VASOS DE PRESSÃO USANDO TUBOS DE RAIOS X

Conhecendo-se a influência da água na qualidade da imagem e determinado qual o padrão de calibração mais adequado para uso, o próximo passo seria analisar um arranjo experimental que reproduzisse da maneira mais fiel possível as condições de campo que a ferramenta de radiografia submarina, que está em desenvolvimento, encontrará durante o trabalho de inspeção.

Nesse caso, faz-se necessário, além da água, adicionar ao arranjo experimental chapas de aço que representariam as “janelas” dos vasos de pressão do tubo de raios X e do detector pelas quais a radiação se propagaria antes de efetivamente atingir o detector.

O arranjo experimental está representado esquematicamente na Figura III.12 e uma foto do mesmo no LIN pode ser vista na Figura III.13.

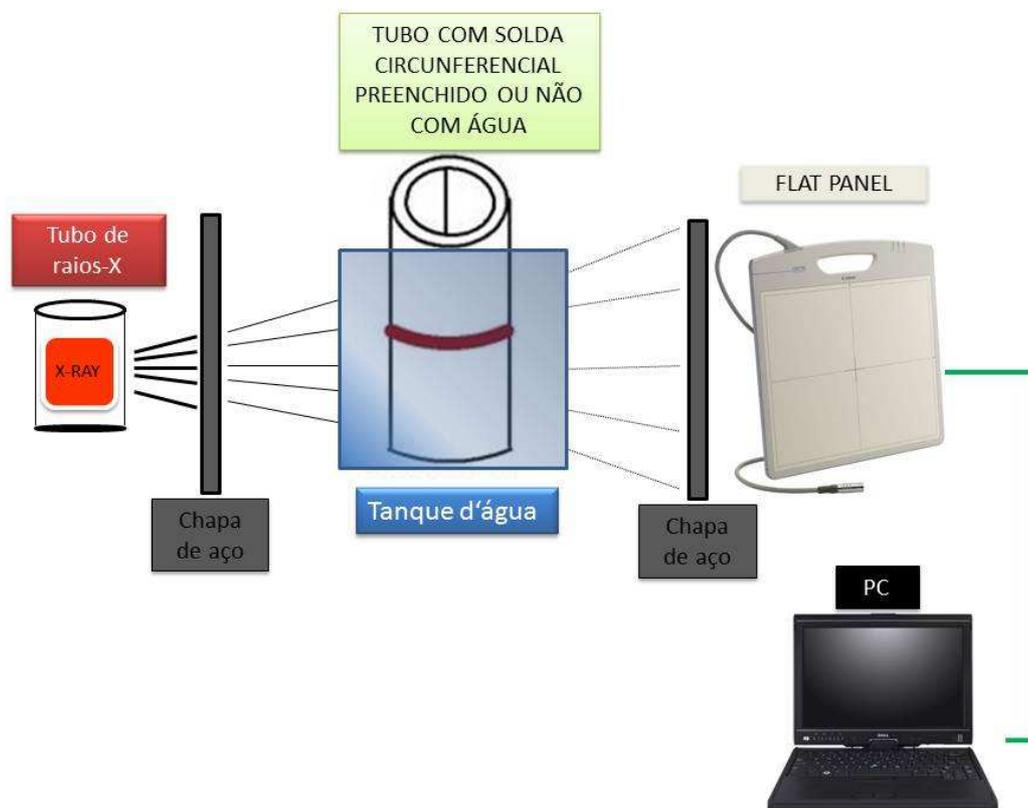


Figura III.12 – Esquema do arranjo experimental utilizado para avaliar radiografias submarinas

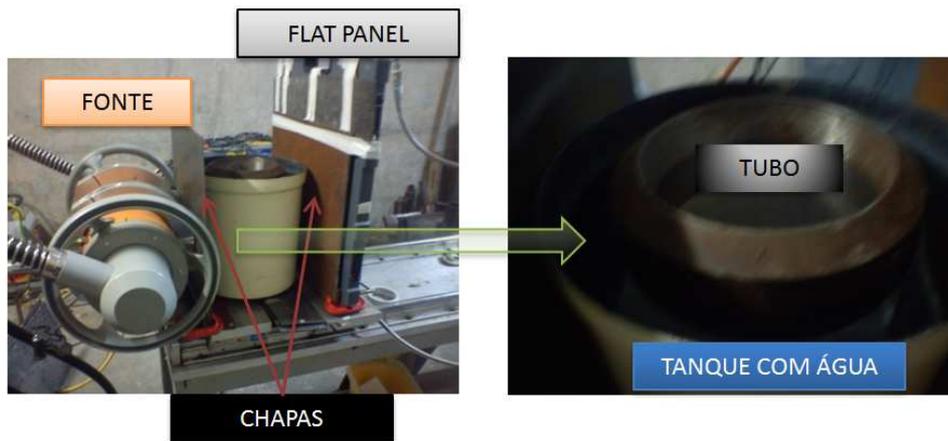
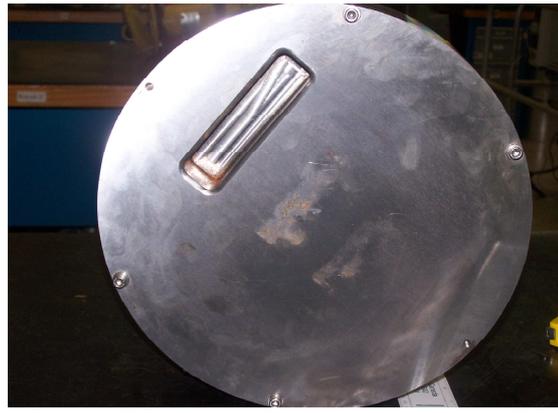
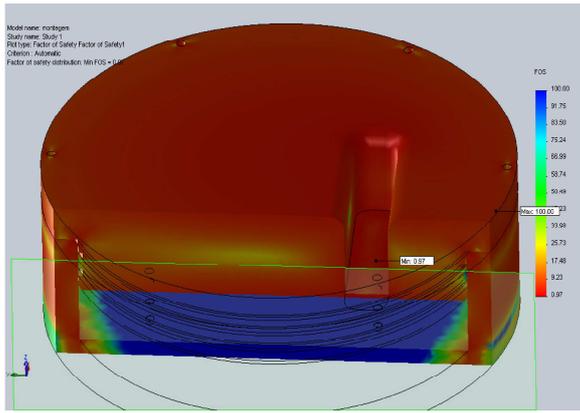


Figura III.13 – Arranjo experimental utilizado no LIN

Esse arranjo foi testado com diferentes tubos e chapas. Partiu-se da premissa de que a janela do vaso de pressão da fonte seria menos espessa que a do detector, pois na fonte, a área da janela exposta a radiação seria apenas o suficiente para contemplar a divergência do feixe logo após ser emitido pelo foco. Já no detector, essa janela de menor espessura em relação ao resto do vaso deveria ter uma área mínima para inspecionar um cordão de solda, ou seja, algo em torno de 30 x 120 mm. Por ter essa área maior, a espessura da mesma deveria ser também maior em relação à da fonte, para suportar a pressão do fundo do mar.

A Figura III.14 mostra um exemplo de simulação em Elementos Finitos realizada para verificar se uma janela de 30 x 120 mm com espessura de 5 mm resistiria a uma pressão de 2×10^7 Pa, ou seja, 2000 metros e à direita a tampa do vaso já fabricado, após teste hidrostático.

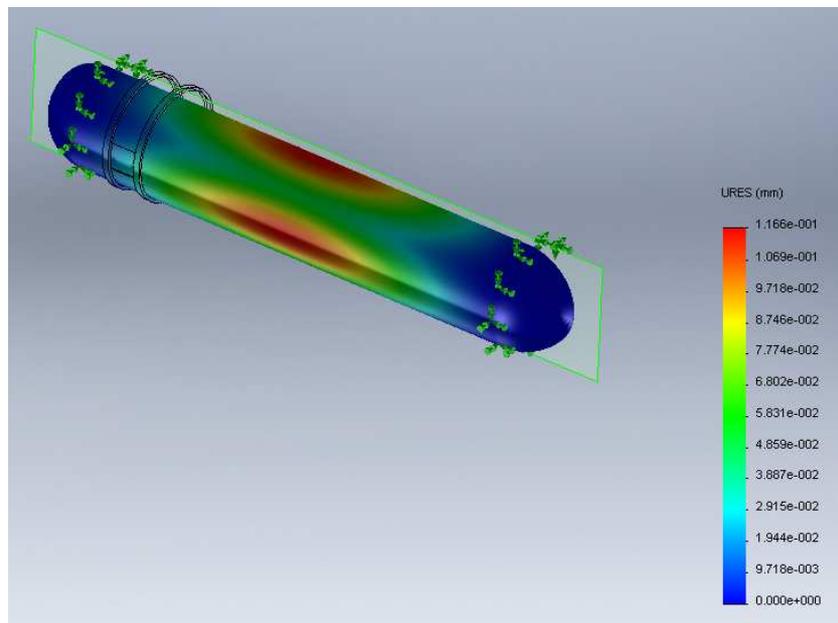


(a) Simulação em Elementos Finitos

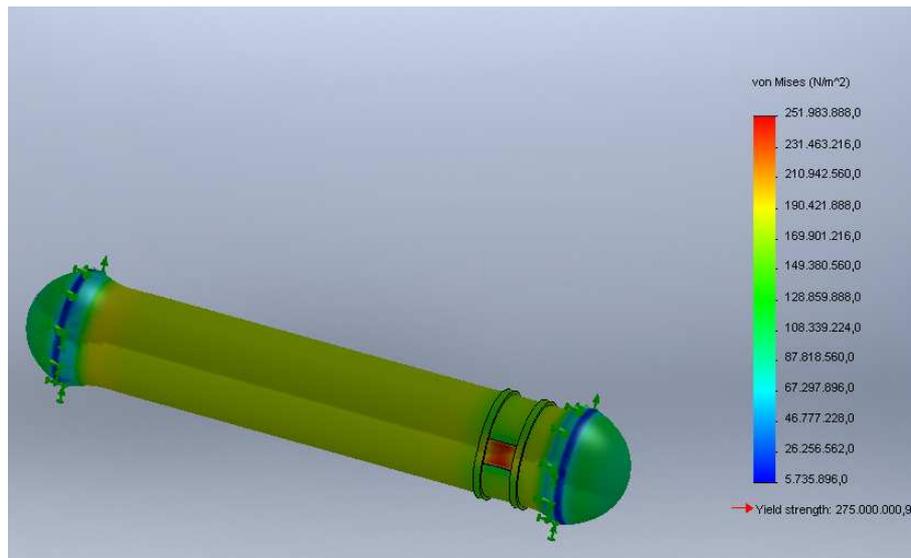
(b) Tampa após teste hidrostático

Figura III.14 – Exemplo de simulação por elementos finitos do vaso de pressão do detector (a) e tampa do vaso de pressão após teste hidrostático (b)

A Figura III.15 mostra duas simulações em Elementos Finitos para um vaso de pressão em Al6351 T6 projetado para o tubo de raios X compacto tratado anteriormente, uma simulando a falha por compressão e a outra a falha por colapso. Assim que o vaso for usinado, testes hidrostáticos semelhantes àqueles já realizados para o vaso do DDA, serão também realizados para o vaso de pressão da fonte.



(a)



(b)

Figura III.15 - (a) - Simulação de falha por colapso, campo de deslocamentos e (b) - Simulação de falha por compressão, tensão de Von Mises

IV RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados conforme o capítulo anterior para em seguida discuti-los.

IV.1 INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO

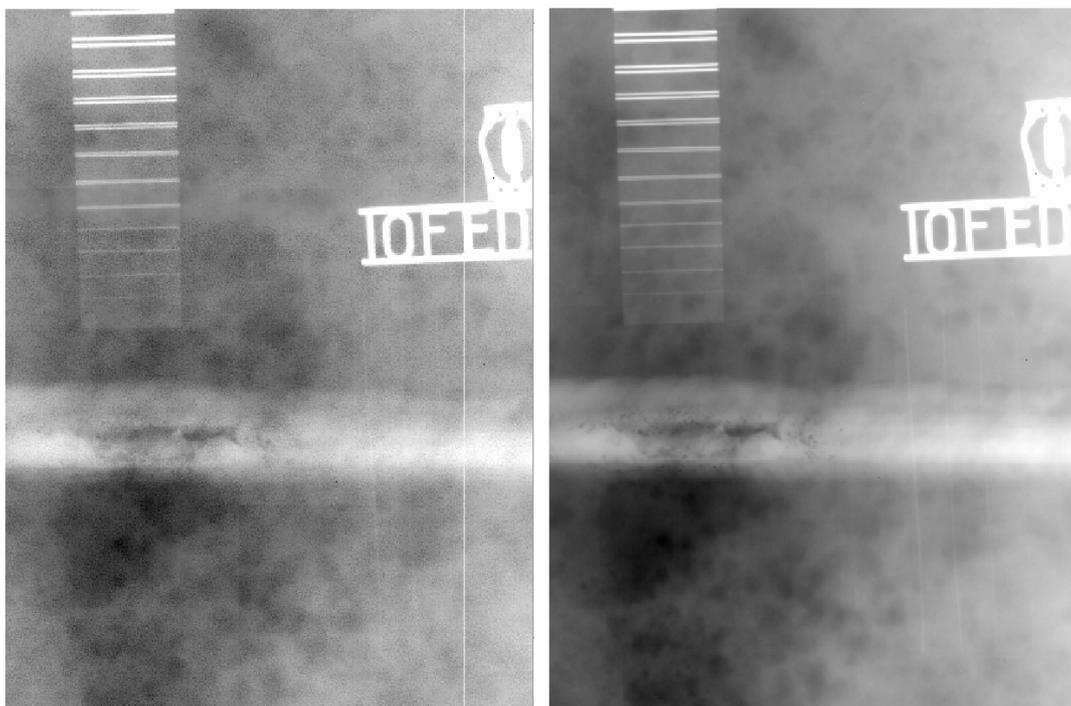
Conforme comentado anteriormente, o procedimento de calibração é extremamente importante para a qualidade de imagens obtidas por DDAs. Um procedimento de calibração adequado é uma condição necessária (embora não suficiente) para atingir elevadas SNRs, compensando, de certa forma, a limitada resolução espacial dos DDAs.

A definição do procedimento de calibração mais adequado para cada situação, entretanto, não é uma tarefa simples. Conforme será visto, nem sempre um padrão de

calibração mais próximo da situação de campo leva a uma melhor qualidade de imagem. Isso porque os padrões usados na calibração podem modificar consideravelmente o espectro do feixe de raios X incidente no detector, assim como gerar uma grande dose de radiação espalhada, deteriorando a qualidade da calibração.

Em um primeiro momento, entretanto, será mostrada simplesmente a diferença entre uma imagem obtida apenas com os seus dados brutos e a mesma imagem após ser calibrada com um determinado padrão.

A Figura IV.1 mostra à esquerda, uma parte de uma imagem radiográfica obtida do tubo de 16" sem água. À direita, observa-se a mesma imagem, após ser calibrada com um padrão de 20 mm de espessura, utilizando uma *dark image* e 2 pontos de ganho, interpolação linear. Nota-se, por exemplo, uma *bad line* que desapareceu após a calibração. Nota-se também a melhor visibilidade dos arames do IQI de sensibilidade ao contraste e uma imagem com muito menos ruído após a calibração. De fato, consegue-se distinguir até o arame 16 na imagem calibrada, enquanto que apenas até o arame 13 na imagem não calibrada. A resolução espacial básica é a mesma nas duas imagens, já que esta é limitada pelo tamanho do pixel de 200 μm do detector. O primeiro par de arames não distinguível é, portanto, o oitavo (160 μm).



(a) Antes de calibrar

(b) Depois de calibrar

Figura IV.1 – Comparação entre imagem com dados brutos (a) e imagem calibrada (b)

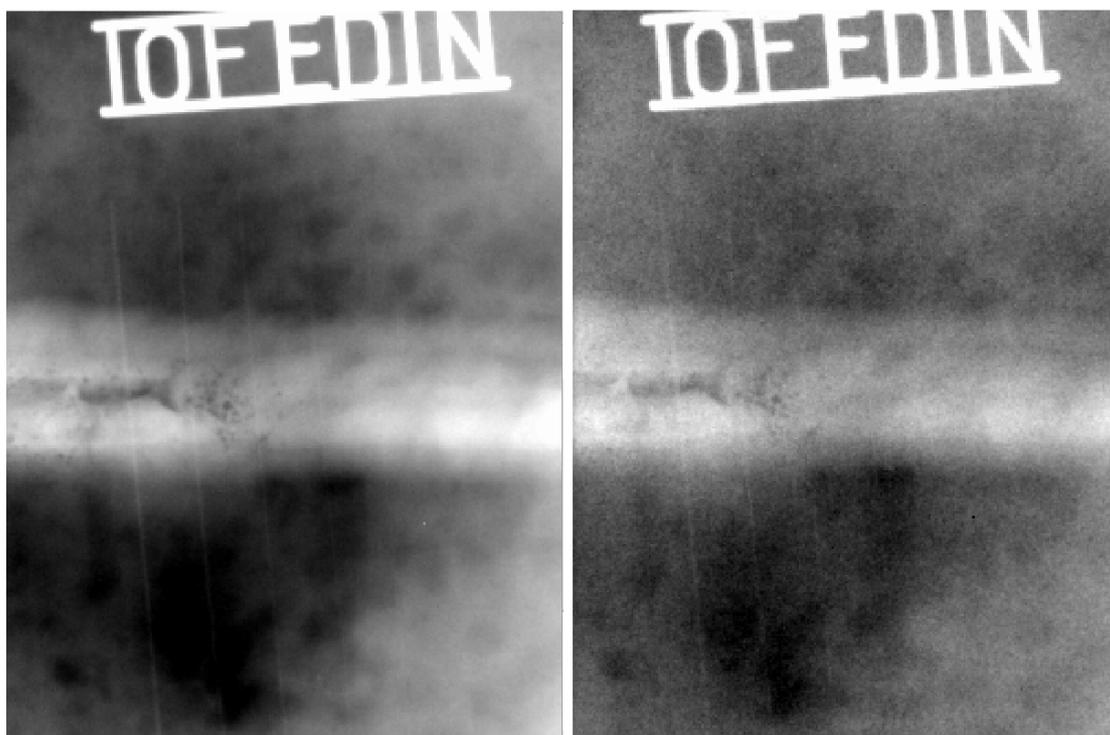
IV.2 PADRÕES DE CALIBRAÇÃO COM E SEM ÁGUA

O passo seguinte foi determinar se um padrão de calibração para uma inspeção submarina deveria também possuir uma camada de água ou não. O arranjo experimental, conforme descrito no item III.5.1, possui uma camada de 12 cm de água, justaposta ao tubo de 16" de diâmetro nominal por 10 mm de espessura. Foram utilizados, entretanto, dois padrões de calibração para obtenção dos pontos de ganho:

- O primeiro foi uma chapa de 20 mm de aço
- O segundo foi a mesma chapa de 20 mm de aço com uma camada de 12 cm de água justaposta, tal como no arranjo de inspeção do tubo

A Figura IV.2 mostra a mesma imagem bruta, calibrada das duas formas diferentes. À esquerda, observa-se a imagem calibrada usando o padrão sem água e à direita a imagem calibrada usando o padrão com água.

Nota-se uma qualidade da imagem muito melhor na calibração sem água, embora não corresponda à realidade do arranjo de inspeção. Isso ocorreu porque a camada de água, quando usada em um padrão de calibração, gera um espalhamento que deteriora a qualidade da calibração. Esse espalhamento dificulta a linearização na resposta dos elementos sensores e incorpora um ruído adicional na imagem bruta da inspeção. O contraste na imagem calibrada com o padrão sem água permite distinguir o arame número 15, enquanto na imagem calibrada com o padrão com água permite distinguir apenas até o arame número 13.



(a) Sem água

(b) Com água

Figura IV.2 – Comparação entre padrões de calibração sem água (a) e com água (b)

IV.3 PADRÕES DE CALIBRAÇÃO DE DIFERENTES ESPESSURAS

O experimento seguinte foi realizado com o tubo de 10” em um cesto com água em volta, conforme descrito no item III.5.2. Observou-se que, embora o tubo de 10” tenha uma espessura de 20 mm e que portanto, a espessura penetrada seja de 40 mm, a calibração utilizando uma chapa de 20 mm proporcionou uma qualidade de imagem melhor do que a calibração utilizando uma chapa de 35 mm.

Mantendo-se uma distância de 1 a 2 metros para calibração do DDA, como é necessário para se ter garantia de um feixe uniforme, uma chapa de espessura de 35 mm não permitirá que se atinja o mesmo nível de cinza no detector que a chapa de 20 mm, fazendo com que a calibração seja comprometida para altos níveis de cinza.

Um padrão de 35 mm pode endurecer muito o feixe, ou seja, fazer prevalecer as radiações de alta energia sobre as de baixa energia. Quando isso acontece, o Efeito Compton, que é caracterizado por um espalhamento, aumenta em relação ao Efeito Fotoelétrico. Essa maior proporção de radiação espalhada pode prejudicar no ajuste de linearidade entre os diferentes elementos sensores do DDA, fazendo com que o padrão calibrado introduza ruído na imagem bruta.

As figuras a seguir mostram uma mesma imagem bruta calibrada com esses dois padrões diferentes. À esquerda, a calibração com o padrão de 20 mm e à direita, a calibração com o padrão de 35 mm. Pode-se notar na Figura IV.3 que a imagem da esquerda é menos ruidosa, permitindo enxergar detalhes da trinca com maior clareza. A comparação quantitativa do ruído através de parâmetros como SNR e CNR, entretanto, não é simples devido aos motivos explicados na seção IV.4.

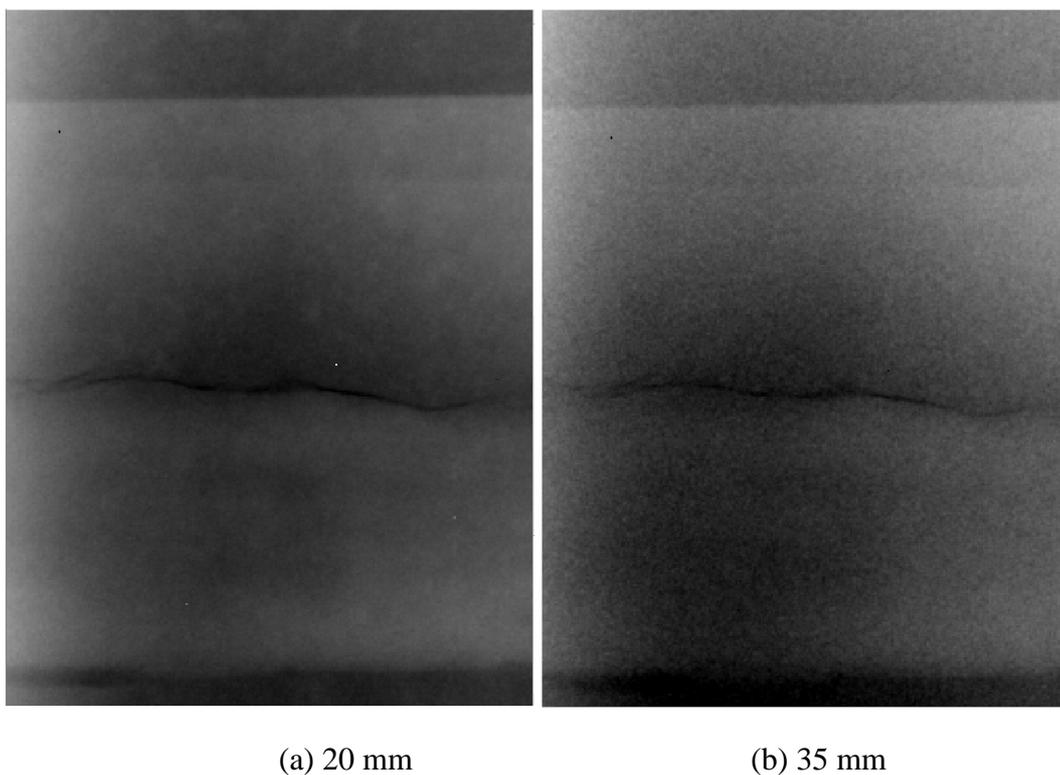


Figura IV.3 – Visibilidade de trinca usando calibração com padrão de 20 mm (a) e de 35 mm (b)

Já quanto à sensibilidade ao contraste, a Figura IV.4 mostra as duas diferentes calibrações, após passarem por um filtro do software iSee!. É possível visualizar, na imagem calibrada com padrão de 20 mm, o arame número 11, enquanto que na imagem

calibrada com padrão de 35 mm, não é possível visualizar nenhum arame. A resolução espacial, limitada pelo tamanho do pixel, manteve-se constante: o primeiro par de fios não distinguível foi o oitavo: 160 μm .

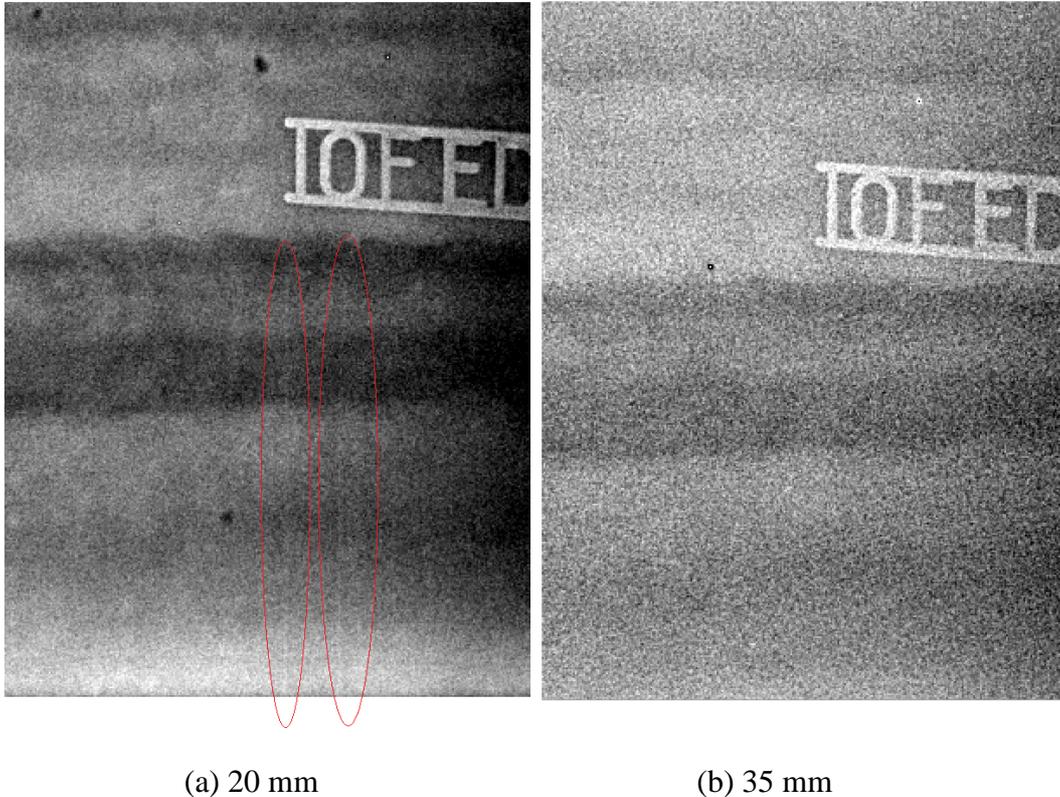


Figura IV.4 – Sensibilidade ao contraste com padrões de 20 mm (a) e 35 mm (b)

Essas observações permitem concluir que o procedimento de calibração não precisa ser similar ao arranjo de inspeção com relação à espessura da peça e à presença de água. O procedimento de calibração deve assegurar linearidade na quantidade de fótons que chega no detector para cada novo ponto de ganho. Para fazê-lo, o DDA deve ser colocado a uma certa distância da fonte tal que o feixe seja uniforme e portanto não gere uma intensidade de sinal maior no centro do que nas bordas do detector. Idealmente, não deveria haver objeto entre a fonte e o detector durante a calibração de forma que o espalhamento da radiação fosse devido apenas ao ar. Obviamente, não é possível fazer a calibração sem nenhum objeto, já que a imagem ficaria saturada. Portanto, uma chapa fina de material tão homogêneo tanto geometricamente quanto microestruturalmente possível deve ser usada próxima à fonte de raios X.

Resumindo, o procedimento de calibração não deve tentar imitar o arranjo de inspeção, mas simplesmente tentar eliminar tanto quanto possível a não linearidade da resposta dos elementos sensores, assim como criar um mapa de *bad pixels* adequado e levar em conta o *offset* de cada elemento sensor.

O procedimento de calibração não é capaz de corrigir o *shading* gerado devido à geometria de revolução, característica do tubo. O procedimento de calibração está relacionado com o detector e não com o arranjo de inspeção.

É importante, entretanto, que a *dark image* tenha o mesmo tempo por quadro que a imagem de inspeção, conforme discussão realizada no capítulo II.10.

IV.4 CONSTATAÇÕES SOBRE A SNR

Esses experimentos foram realizados apenas com água por fora do tubo de 10", ainda sem as chapas simulando os vasos de pressão da fonte e do detector, conforme descrito no item III.5.2. O objetivo foi avaliar a adequação da SNR como parâmetro para comparar as qualidades de imagens obtidas com e sem água, já que muitas vezes os IQIs de arame e de fio duplo usados indicavam qualidades de imagem semelhantes, embora visualmente fosse possível observar um maior nível de ruído nas imagens obtidas com água.

Em um primeiro momento, radiografou-se o tubo sem água. Em seguida, o reservatório foi preenchido com água pelo lado de fora e o tubo foi novamente radiografado. Utilizou-se um tempo de exposição de 1 segundo por quadro e 300 quadros para o tubo sem água. Já para o tubo com água, utilizou-se 3 segundos por quadro e 100 quadros. A camada de água era de aproximadamente 50 mm do lado da fonte e mais 50mm do lado do detector. As imagens foram calibradas utilizando-se um padrão de calibração baseado em uma chapa de aço de 10 mm de espessura.

Após realizadas as radiografias, comparou-se as imagens. O resultado foi, à primeira vista, inesperado. A radiografia do tubo com água apresentava uma SNR muito maior do que a do tubo sem água.

A Figura IV.6 mostra à esquerda uma imagem obtida sem água e à direita uma imagem obtida com água. Nessa comparação, a SNR medida na imagem sem água é de 186, enquanto na imagem com água, em uma região com nível de ruído similar, a SNR medida é de 632. Em função do ajuste de contraste utilizado, nota-se um certo efeito de *shading*, da esquerda para a direita.

O *shading* caracteriza-se por uma variação no nível de cinza da imagem em função da geometria de revolução, isto é, a radiação se propaga por diferentes espessuras de aço em diferentes direções. Essa situação está esquematizada na Figura IV.5, na qual a espessura de aço atravessada pela radiação em três diferentes direções foi marcada em vermelho. Esse efeito sempre ocorre na inspeção de superfícies de revolução. O que se pode fazer, caso a fonte de raios X e o tubo estejam perfeitamente alinhados, é tornar o *shading* simétrico em relação ao centro da imagem, mas ele sempre existirá. Além do efeito das diferentes espessuras de aço penetradas pela radiação, há ainda o efeito da magnificação, que é diferente, conforme o ângulo, pois o detector plano não se ajusta à curvatura do tubo. Ainda, o efeito da atenuação e do espalhamento na água será diferente para cada ângulo, pois a coluna d'água atravessada pela radiação também é diferente para ângulos diferentes.

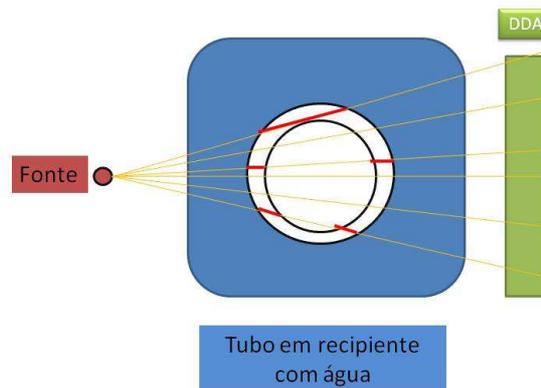
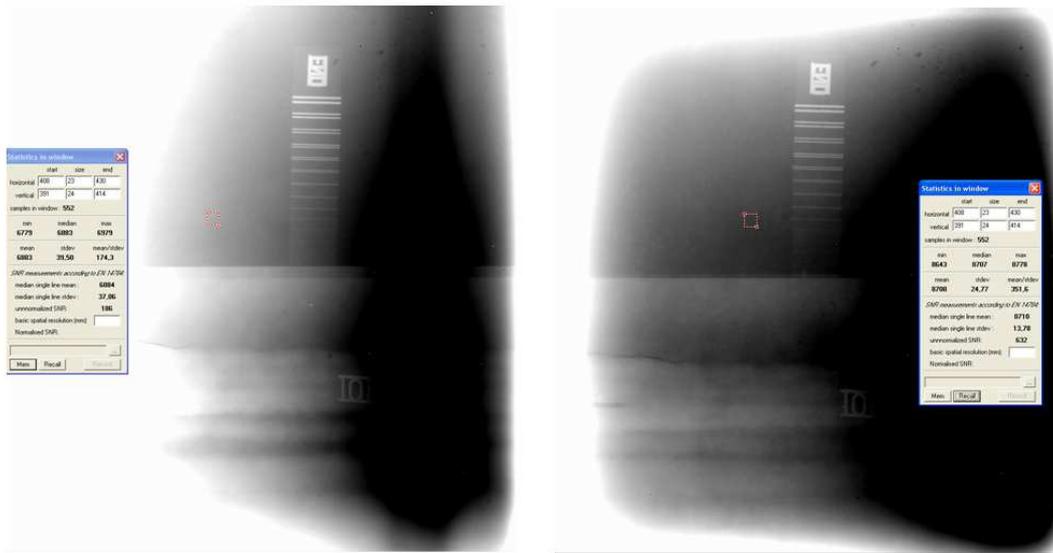


Figura IV.5 - Formação do *shading* devido à radiação atravessando diferentes espessuras de material



(a) SNR = 186

(b) SNR = 632

Figura IV.6 – Comparação da SNR sem água (a) e com água (b)

Para entender como o *shading* afeta a medida da SNR, basta observar a Figura IV.7 e a Figura IV.8. Elas mostram um mesmo ponto a partir do qual é traçado um perfil de linha médio em duas direções diferentes.

Na Figura IV.7, o perfil é traçado na direção horizontal, direção usada para cálculo do desvio-padrão em cada linha e conseqüentemente da SNR, conforme explicado no item II.5.4.2. Nota-se nesta imagem o efeito do *shading*, ou seja, há um aumento do valor dos tons de cinza da esquerda para a direita. Essa variação vai de 6560 a 6650, ou seja, 90 tons de cinza. E o desvio-padrão do valor do tom de cinza calculado nesse intervalo é de 30,35. Nota-se claramente na imagem que a variação de tons de cinza é aproximadamente linear, sem degraus ou variações abruptas, de mais que 5 a 10 tons de cinza. Esse valor elevado de desvio-padrão, portanto, é conseqüência do *shading* e não do ruído presente na imagem.

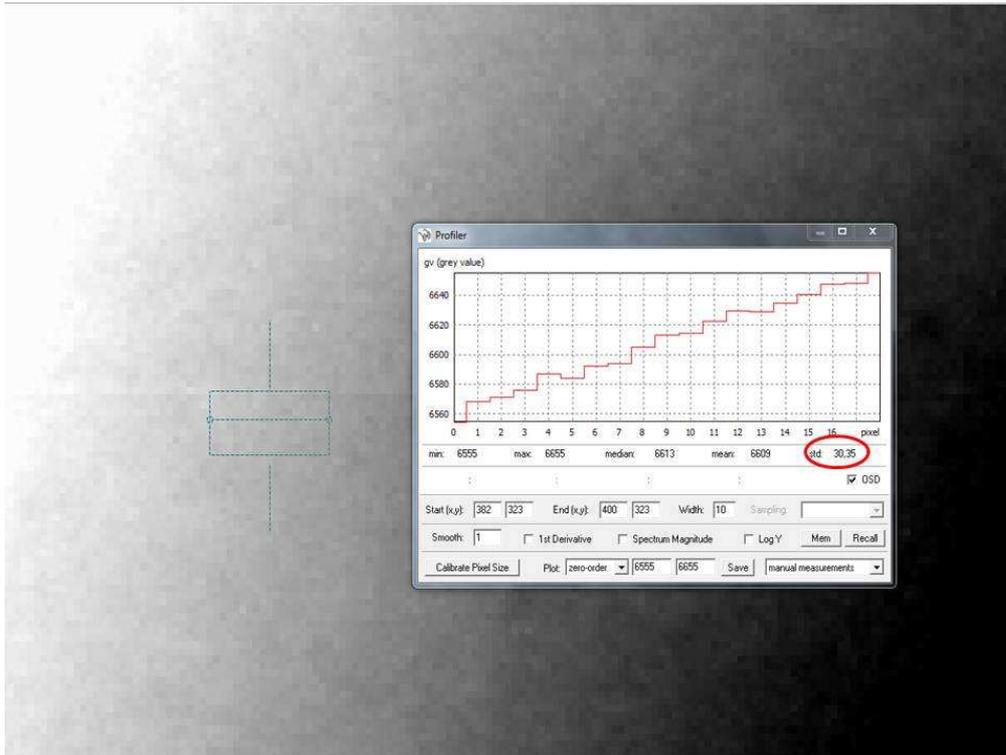


Figura IV.7 – Amostragem tomada na direção horizontal para medir desvio-padrão

Para confirmar, pode-se observar a Figura IV.8, onde o perfil de linha integrado foi tomado a partir do mesmo ponto, mas em uma direção aproximadamente perpendicular ao *shading*. Nesse caso, o desvio-padrão foi de apenas 5. Nota-se que, no intervalo tomado, não há uma tendência de elevação ou redução do nível de cinza, que varia apenas entre 6554 e 6570, uma variação de 16 contra uma variação de 90 anteriormente. O desvio-padrão, portanto, é representativo do nível de ruído neste caso.

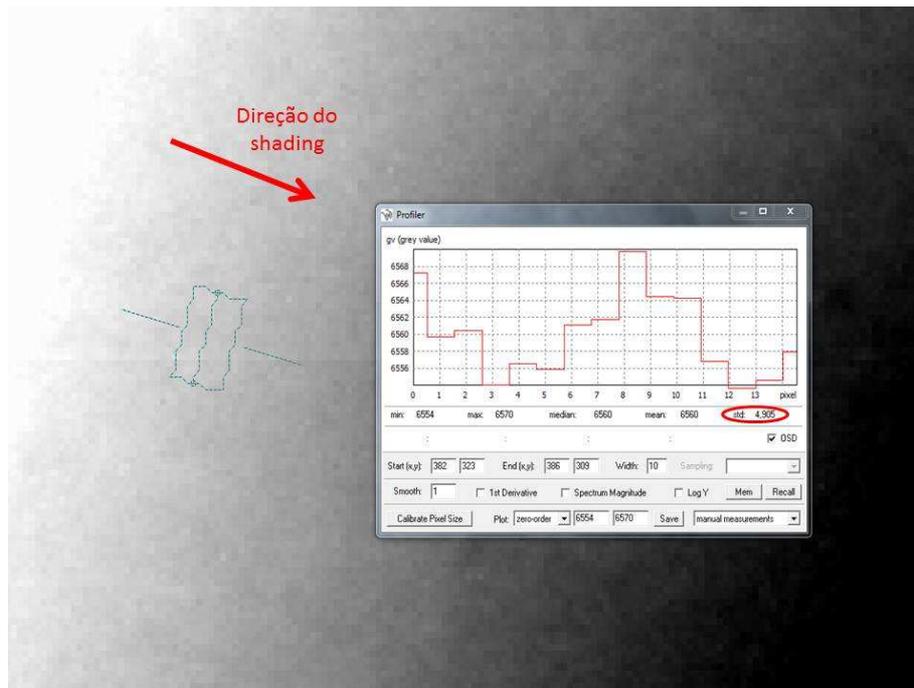


Figura IV.8 – Amostragem tomada em direção aproximadamente perpendicular ao *shading* para medir desvio-padrão

Como o software calcula conforme a norma EN14784, utilizando amostragens na horizontal (ver item II.5.4.2), nota-se que a SNR pode não ser um bom indicador de qualidade de imagem para comparar imagens de tubo sem água e com água adquiridas com DDAs.

O *shading* perturba a medida da SNR, já que o desvio-padrão do nível de cinza em uma determinada região de interesse devido ao *shading* pode ser muito maior que aquele devido ao ruído em si. Uma imagem com água pode apresentar uma SNR melhor que uma imagem sem água porque a água reduz o *shading* e esconde detalhes da corrosão do tubo. Uma avaliação do desvio-padrão em diferentes direções se faz necessária para avaliar em que casos a SNR pode ser utilizada para comparar a qualidade da imagem. O software iSee! possui a opção de calcular concomitantemente as SNRs horizontal e vertical, o que ajuda a verificar se o *shading* está interferindo na avaliação do ruído.

IV.5 CONSTATAÇÕES SOBRE A PENUMBRA

No capítulo II.5.5, foram discutidos aspectos teóricos e normativos referentes à penumbra geométrica. No presente capítulo, serão discutidos aspectos práticos relacionados à penumbra geométrica na tentativa de marinizar um conjunto com DDA e tubo de raios X.

Conforme a Figura IV.9, nota-se, por semelhança de triângulos, que a penumbra (do inglês *geometric unsharpness*) é dada por: $U_g = d \cdot b / f$; ou seja, quanto maior o tamanho focal e a distância do objeto ao detector e quanto menor a distância da fonte ao detector, maior a penumbra geométrica.

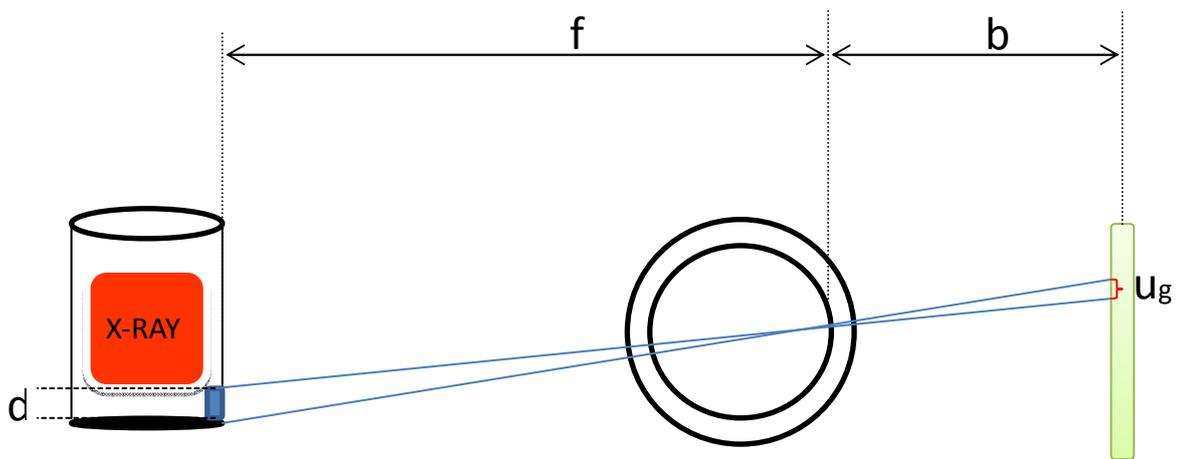


Figura IV.9 – Aspectos práticos da penumbra geométrica

A distância entre o objeto e o detector, entretanto, não pode ser tão pequena quanto se queira. Como se deseja inspecionar a espessura do tubo, então ela já tem esse limite inferior. Como é necessário também, numa aplicação prática, no mínimo uma camada de água entre o vaso de pressão do detector e o tubo, soma-se esse valor. Tem-se ainda a espessura do vaso de pressão do detector na região em frente à área ativa do mesmo e a própria espessura do detector até que a radiação atinja seus elementos sensores.

Sendo assim, não se pode esperar que em uma aplicação prática esse parâmetro “b” assumira um valor menor que 50 mm. Caso se deseje ser conservador, o ideal é adotar valores da ordem de 100 a 200 mm.

O tamanho focal normalmente aumenta com o aumento da potência desejada para a inspeção. Ao mesmo tempo, para tubos espessos e para situações com água dentro e fora do tubo, é preciso usar altas tensões, altas potências e conseqüentemente maiores tamanhos focais, o que deteriora a resolução espacial básica.

Já existem no mercado tubos de raios X de até 600 kV com tamanho focal de 0,4 a 1 mm, conforme a potência. Nem todos os tubos utilizados nos experimentos desse trabalho, entretanto, tinham um tamanho focal tão pequeno.

Nos experimentos realizados com o tubo de 225 kV, foi utilizado um tamanho focal de 1 mm e em todas as imagens obtidas nesses experimentos, com ou sem água, sempre se obteve a melhor resolução espacial possível para um detector com tamanho de pixel de 200 μm , ou seja, o primeiro par de fios não distinguível foi o oitavo.

Quando se passou para o tubo de 420 kV, entretanto, este possuía um tamanho focal de 3mm para menores potências e 6 mm para maiores potências, deteriorando sobremaneira a resolução espacial das imagens.

Para reduzir esse efeito, foram utilizados colimadores de chumbo e filtros de cobre e alumínio, com o objetivo de diminuir a radiação espalhada e assim aumentar o contraste.

Mesmo fazendo uso de colimadores e filtros, a resolução espacial continuou muito ruim quando usando o tamanho focal de 6 mm. Partiu-se então para um estudo quantitativo da penumbra geométrica baseando-se na norma ISO/FDIS 17636-2:2012.

Sendo assim, estipulou-se um valor mínimo de 50 mm para a distância objeto-detector. Considerando-se que se deseja inspecionar um tubo de 20 mm de espessura nominal, utilizando-se a (II.9 para determinação da mínima distância fonte-objeto, obtém-se o gráfico a seguir:

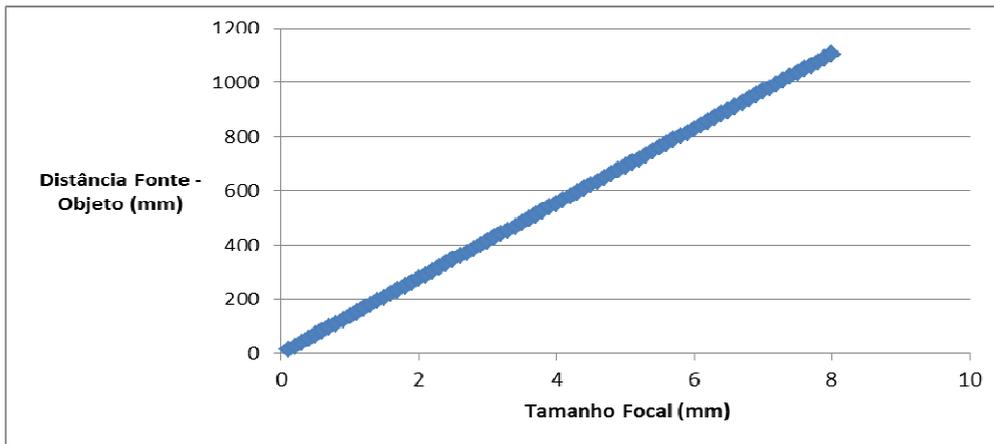


Figura IV.10- Mínima distância fonte-objeto em função do tamanho focal para espessura de 20 mm e distância objeto-detector de 50 mm – Norma ISO/FDIS 17636-2:2012

Ou seja, para que se tenha uma distância fonte-objeto razoável, da ordem de 400 mm (lembrar que nessa distância se inclui o diâmetro externo do tubo menos uma espessura, Figura IV.9), é necessário ter um tamanho focal no máximo da ordem de 3 mm. Como na (II.9, a espessura está elevada a 1/3, a dependência dessa distância fonte-filme com a espessura não é forte, portanto, para espessuras da ordem de 10 mm, um tamanho focal de cerca de 3 mm ainda seria aceitável, conforme mostra a Figura IV.11.

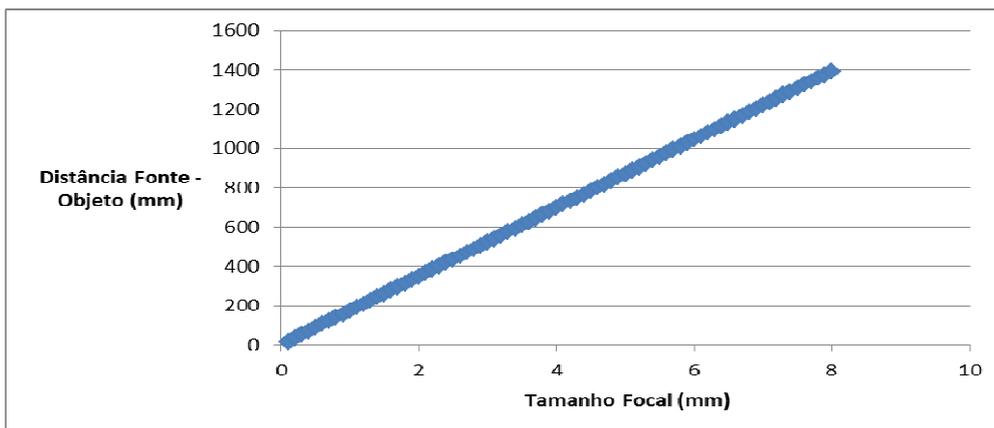


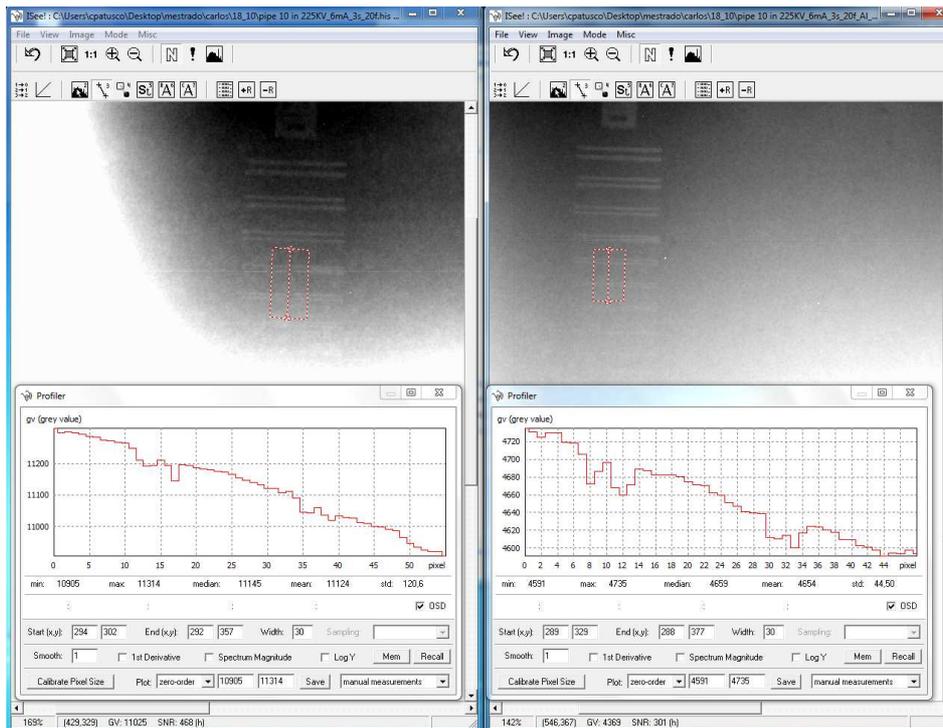
Figura IV.11 - Mínima distância fonte-objeto em função do tamanho focal para espessura de 10 mm e distância objeto-detector de 50 mm – Norma 17636-2

Vale lembrar que a mínima distância fonte-objeto mostrada no gráfico é para uma distância objeto-detector de 50 mm. É possível que, na prática, o projeto da ferramenta de radiografia submarina exija uma maior distância objeto-detector, fazendo com que a mínima distância fonte-objeto cresça na mesma proporção.

Sendo assim, pequenos tamanhos focais devem ser utilizados, preferencialmente entre 1 e 2 mm. Tubos de raios X com tamanho focal menor que 1 mm, como o ERESKO 280 MF4-R da GE utilizado neste trabalho, não são uma solução otimizada para a radiografia submarina, pois a potência do equipamento é de apenas 340 W, em parte devido ao seu pequeno tamanho focal de 0,5 mm. Um tamanho focal entre 1 e 2 mm exigiria uma maior distância entre fonte e objeto, mas essa distância mínima seria respeitada de qualquer maneira em uma situação prática, em virtude das camadas de água, vasos de pressão, colimador e diâmetro do próprio tubo a ser inspecionado. Tamanhos focais muito pequenos permitiriam então uma melhora teórica na resolução espacial que na prática não pode ser atingida, seja pela própria montagem do equipamento, seja porque a resolução espacial de um DDA é limitada pelo tamanho do pixel (200 μm , no caso desse trabalho). Um tamanho focal entre 1 e 2 mm permitiria portanto que o tubo tivesse uma maior potência, sem detrimento da resolução espacial para essa aplicação.

Uma maneira de se reduzir a influência da radiação espalhada e portanto melhorar a sensibilidade ao contraste é através da colimação do feixe. As imagens a seguir foram obtidas utilizando-se o tubo de 420 kV. Nelas, pode-se observar a importância do tamanho focal e do uso de colimadores e filtros na qualidade da imagem.

Na Figura IV.12, observa-se, o perfil de linha integrado no IQI de fio duplo, para dois arranjos com mesma tensão, corrente, tempo de exposição e tamanho focal, porém à direita foi acrescentado um filtro de alumínio junto à fonte para endurecer o feixe e uma chapa de cobre de 0,5 mm de espessura junto ao detector para absorver radiação espalhada. Nota-se que se ganha um par de fios na resolução espacial (do quarto para o quinto), mas esta continua ainda insatisfatória. Esse experimento foi realizado com 225 kV, 6 mA, 3 segundos por quadro, tamanho focal de 3 mm.



(a)

(b)

Figura IV.12 – Perfil de linha inicial (a) e novo perfil de linha após uso de filtro de alumínio para endurecer o feixe e chapa de cobre para absorver radiação espalhada (b)

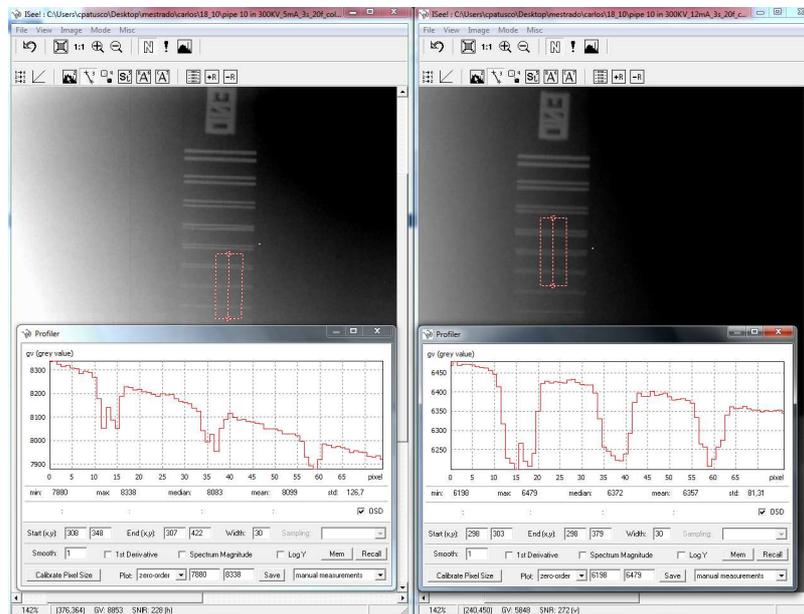
Partiu-se então para o uso de colimadores, conforme mostrado na Figura IV.13. Embora na figura só se observe um colimador, uma placa de chumbo com abertura central circular, foram usados na verdade dois. O segundo, com uma abertura retangular maior, está por trás do primeiro.



Figura IV.13 – Feixe do tubo de 420 kV colimado com placas de chumbo

Foi necessário aumentar a tensão de trabalho, pois com redução da radiação espalhada, o nível de cinza diminuiu. Trabalhando-se com colimadores, foi possível comparar o desempenho dos dois tamanhos focais, mostrando que o tamanho focal de 3 mm, quando colimado, ainda conduz a uma qualidade de imagem satisfatória, mas não o tamanho focal de 6 mm.

A Figura IV.14 mostra, à esquerda, um experimento realizado no tubo de 10" x 20 mm com tamanho focal de 3 mm, 300 kV, 5 mA e 3 s por quadro. Nota-se que o primeiro par de fios não distinguível é o oitavo, atendendo portanto à norma ISO/FDIS 17636-2:2012 quanto à resolução espacial. À direita, o experimento foi realizado com um tamanho focal de 6 mm, 300 kV, 12 mA e 3 s por quadro. O aumento do tamanho focal foi necessário para se elevar a potência, que passou de 1500 W para 3600 W. Conforme será visto adiante, esse aumento de potência não proporcionou uma melhora significativa na sensibilidade ao contraste, sobretudo quando comparado à perda de resolução espacial. Essa perda pode ser observada na Figura IV.14 à direita, onde nota-se que já o quinto par de fios não pôde ser resolvido ao se aumentar o tamanho focal, mesmo utilizando colimadores.

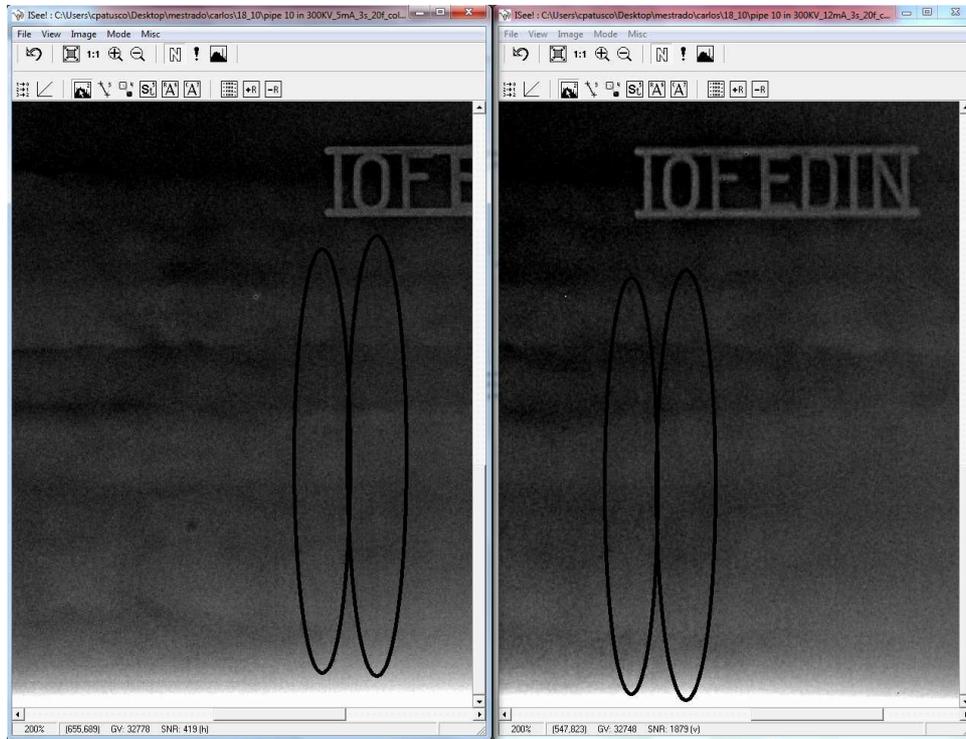


(a)

(b)

Figura IV.14 – Perda de resolução ao aumentar a potência às custas de aumento no tamanho focal - Primeiro par de fios não distinguível é o oitavo para tamanho focal de 3 mm (a) e o quinto para 6 mm (b)

O contraste continuou limitado ao arame número 11 nas duas imagens. Embora a imagem com tamanho focal de 6 mm possibilite visualizar mais claramente o arame 11, frente à norma, as duas imagens possibilitam visualizar o mesmo arame e portanto possuem a mesma sensibilidade ao contraste.



(a)

(b)

Figura IV.15 – Comparação da sensibilidade ao contraste usando tamanhos focais de 3 mm (a) e 6 mm (b) - manteve-se o 11º arame no IQI de contraste

Entretanto, esses dois experimentos foram feitos mantendo-se a tensão constante e mudando-se a potência a partir da mudança de corrente. A Figura IV.16 mostra o mesmo tubo inspecionado com 420 kV (limite do tubo) e 10 mA (limite da corrente para essa tensão). Mesmo nesses limites, consegue-se visualizar apenas até o 12º arame, enquanto a resolução espacial manteve-se a mesma, ou seja, não se distingue o 5º par de fios. O ganho de um arame na sensibilidade ao contraste não compensa a perda de três pares de fio na resolução espacial, mostrando que um foco de 6 mm, mesmo colimado, é inviável para tal aplicação.

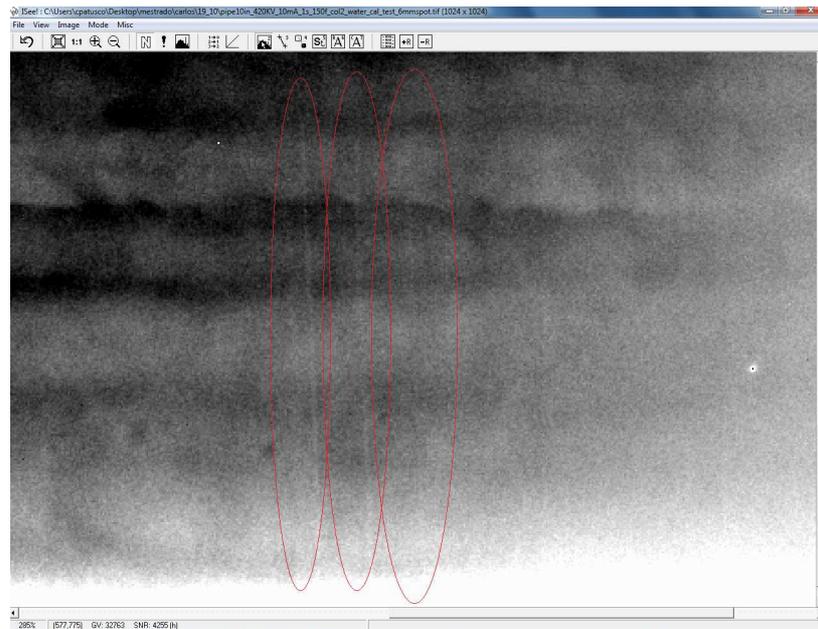


Figura IV.16 – Aumento de tensão e corrente no tubo de 420 kV

É importante notar que embora a avaliação quantitativa do efeito do tamanho focal na qualidade da imagem ainda fosse desconhecida para essa aplicação específica, o comportamento teórico era esperado. Não se deve aumentar o tamanho focal para aumentar a potência, caso esse aumento de tamanho focal requeira um aumento proporcional na distância fonte-objeto. Isso porque quando se dobra o tamanho focal, dobra-se também a potência da fonte, mas a intensidade do feixe de radiação cai quatro vezes ao se dobrar a distância entre fonte e objeto, pela lei do inverso do quadrado da distância.

Dessa forma, o aumento do tamanho focal só é uma alternativa interessante para aumento da potência quando a resolução espacial da imagem final não pode ser otimizada, seja devido ao tamanho de pixel do detector, seja porque a condição de inspeção exija uma certa distância entre objeto e detector, que não poderia ser reduzida, mesmo que se diminua o tamanho focal.

Este é o motivo pelo qual se tem uma faixa ótima de tamanho focal para essa aplicação. Ele não deve ser tão pequeno que gere uma potência muito baixa e nem tão grande que exija uma distância fonte-objeto muito longa. Para a aplicação de radiografia submarina, esta faixa ótima encontra-se entre 1 e 2 mm.

IV.6 Arranjo Completo

Nesse capítulo, são descritos os resultados dos experimentos com o arranjo mais próximo da condição de campo, com o tubo de 10"x20 mm inserido em um recipiente com água, inicialmente apenas por fora, simulando a inspeção de gasodutos ou dutos fora de operação e posteriormente com água por dentro e por fora, simulando uma condição de mais difícil inspeção, como dutos de injeção de água ou de transporte de óleo.

Para facilitar a visualização geral dos resultados, utilizou-se um código de cores em que, quando a imagem atende aos requisitos, utiliza-se cor azul e quando atende sem precisar de compensação, isto é, sem precisar compensar uma pior resolução espacial por uma melhor sensibilidade ao contraste, utiliza-se a cor verde (ver item II.5.5.2). Quando necessário fazer esse tipo de compensação, utilizou-se a cor laranja, como uma forma de alerta. Quando a imagem não atende à norma para uma determinada classe, utilizou-se a cor vermelha. E em branco estão os campos onde a pergunta não se aplica, ou seja, quando a imagem não atende à norma, não faz sentido questionar se ela precisou de compensação para atendê-la.

Nessas tabelas, a tensão utilizada é dada em kV, D é o número do primeiro par de fios não distinguível no IQI de fio duplo, que indica a resolução espacial; W é o número do último fio distinguível no IQI de arame, que indica a sensibilidade ao contraste. No arranjo, a distância entre a solda (lado interno do tubo) e o detector era de 130 mm. Nessas condições, a mínima distância entre a solda e o detector deveria ser de 360 mm quando usando um tamanho focal de 1mm para a classe A da norma ISO/FDIS 17636-2:2012. Na prática, como tem-se o diâmetro do tubo, as colunas d' água, o colimador e as próprias dimensões do tubo de raios X, foi necessário utilizar uma distância maior entre a fonte e a solda, da ordem de 650 mm. Assim a distância fonte-detector era da ordem de 780 mm (650+130).

Em todos os experimentos com o arranjo completo, o tempo total de integração foi de 750 s. O tempo por quadro variou para cada voltagem, de modo a manter o nível de cinza aproximadamente constante em cada imagem (em torno de 10000 níveis de cinza). Como o tempo por quadro foi diferente para cada voltagem e o tempo total de

integração foi mantido constante, o número de quadros utilizado foi variável, ou seja, maior número de quadros para as imagens que tinham menor tempo de exposição por quadro e vice-versa.

IV.6.1 ÁGUA POR FORA (GASODUTOS)

Nesse capítulo, é mostrado passo a passo o estudo experimental de cada parâmetro que influencia a qualidade da imagem e como eles foram otimizados.

IV.6.1.1 CONTROLE DE TENSÃO E COLIMAÇÃO

Nesses experimentos, foi utilizado o tubo de 600 kV que possui um colimador controlado eletronicamente, conforme a Figura III.4. A amostra utilizada foi o tubo de 10" x 20 mm com água em volta e a região inspecionada foi em torno de uma trinca. Diferentemente do tubo de 420 kV, que possuía apenas uma colimação grosseira feita através de placas de chumbo com furos centrais, neste tubo pôde-se otimizar a colimação para regiões de interesse, atingindo-se uma alta sensibilidade ao contraste.

A Figura IV.17 mostra um exemplo em que, no quadro da esquerda, o feixe está fracamente colimado e no quadro da direita ele está fortemente colimado na região de interesse. Sem perda de resolução espacial e com o mesmo tempo de exposição, obteve-se uma sensibilidade ao contraste muito melhor no feixe fortemente colimado, com o IQI de arames apresentando uma melhora do 12° para o 14° fio. Essa melhora na qualidade da imagem pode também ser constatada visualmente através da melhor visualização da trinca e até mesmo a definição do plástico que envolve o IQI de arame na imagem melhor colimada.

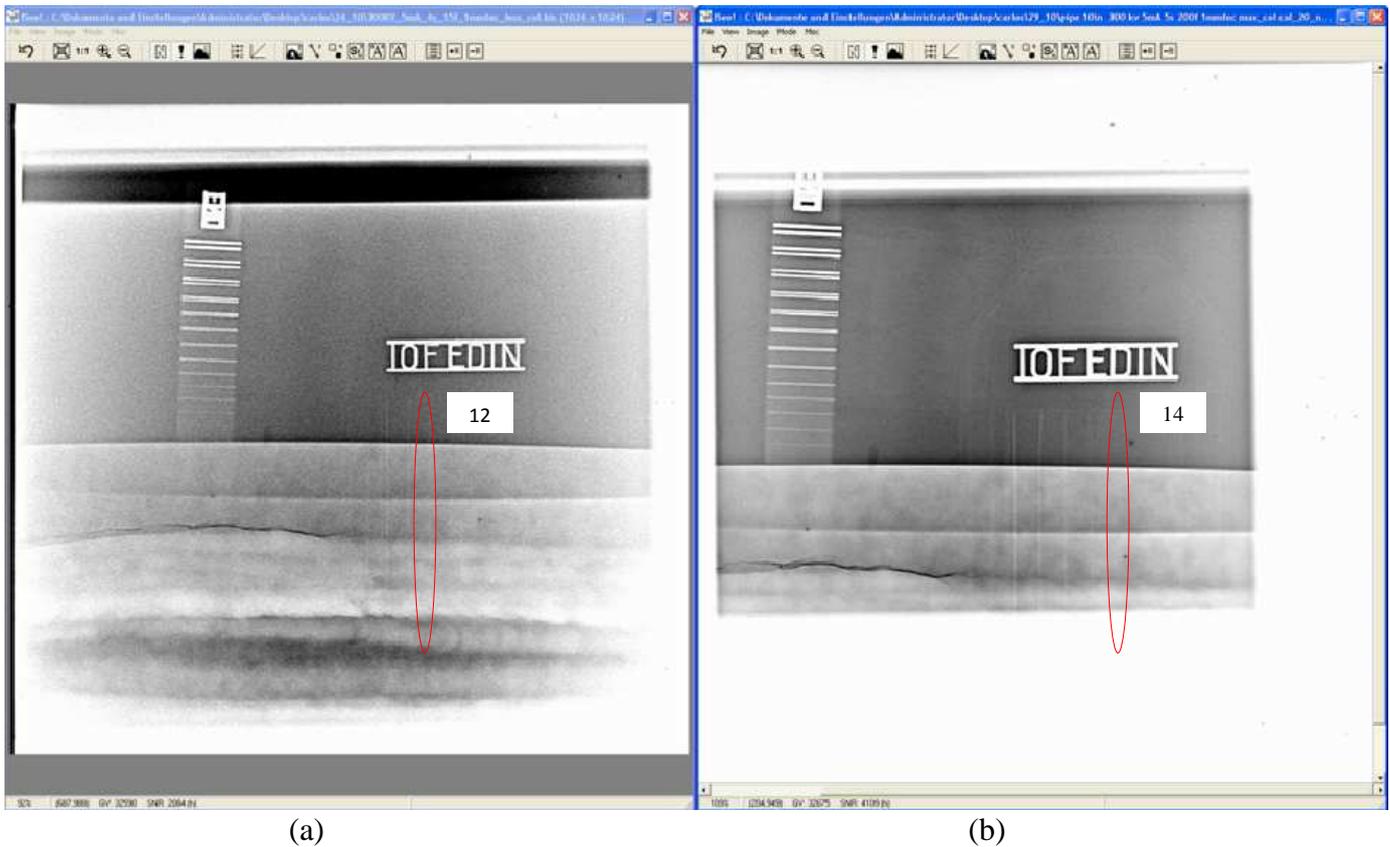


Figura IV.17 – Controle eletrônico da colimação levando a ganho em contraste -
 Comparação entre imagens fracamente (a) e fortemente (b) colimadas

Outra vantagem do uso adequado do colimador é que ele permite, até certo ponto, que mesmo em inspeções com água, não seja necessário o uso de tensões muito elevadas. Quando se parte para tensões menores, tende-se a melhorar a sensibilidade ao contraste, mas ao mesmo tempo tende-se a aumentar o espalhamento. Com o feixe fortemente colimado, o espalhamento na água restringe-se basicamente às espessuras das camadas de água nos dois lados do tubo, ou seja, no lado da fonte e no lado do detector, conforme representado esquematicamente na Figura IV.18. Além disso, a parcela da radiação espalhada do lado da fonte será em grande parte absorvida pelo próprio objeto (tubo) antes de atingir o detector, fazendo com que apenas a radiação espalhada do lado do detector comprometa substancialmente a qualidade da imagem. Quando o feixe não está fortemente colimado, entretanto, sua divergência faz com que toda a água ao redor do tubo contribua para um espalhamento adicional, piorando a qualidade da imagem e requerendo o uso de tensões mais elevadas para frear esse

espalhamento, o que, conforme explicado, compromete a sensibilidade ao contraste. O esquema da Figura IV.19 representa esse espalhamento adicional causado quando não se usa colimador.

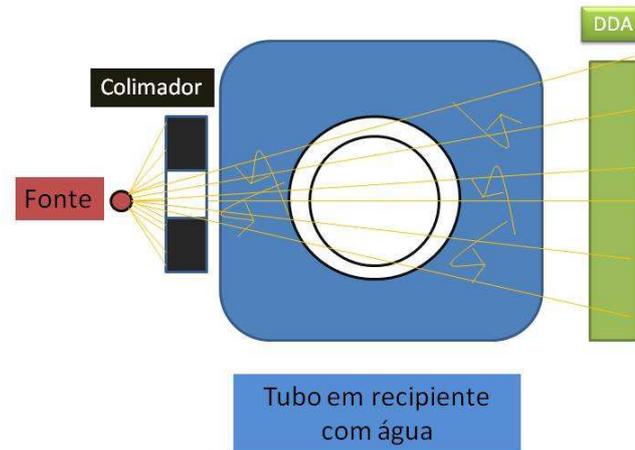


Figura IV.18 - Espalhamento em arranjo com colimador

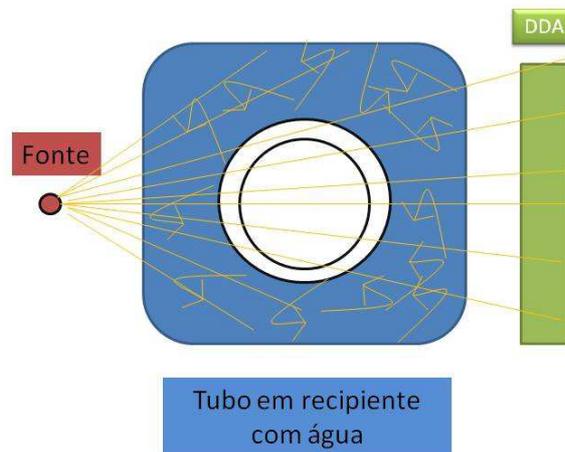


Figura IV.19 - Espalhamento em arranjo sem colimador

Os experimentos demonstraram que a diferença entre um feixe colimado e um não colimado na qualidade da imagem pode chegar a três arames no IQI de contraste, fazendo com que o controle e otimização deste parâmetro seja de fundamental

importância para a obtenção de uma qualidade de imagem satisfatória em condições submarinas.

IV.6.1.2 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DOS VASOS DE PRESSÃO

Os experimentos foram feitos selecionando-se duas das três chapas de aço com 3; 4,4 e 6,6 mm de espessura para representar os vasos de pressão da fonte e do detector. A mais espessa das duas sempre foi utilizada do lado do detector, pois representaria a janela do vaso de pressão do DDA, que por precisar de uma área maior, tende a ser mais espessa. A distância fonte-objeto utilizada foi 700 mm, enquanto a distância fonte-detector era de 830 mm. As camadas de água eram de 60 mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte.

Os resultados estão resumidos na Tabela IV.1 no que tange ao atendimento dos requisitos da norma ISO/FDIS 17636-2:2012 para classes A e B no range de tensões entre 200 e 600 kV, com intervalos de 100 kV, mantendo-se o nível de cinza em torno de 10000.

Tabela IV.1 – Avaliação do cumprimento dos requisitos normativos em cada arranjo experimental – Variação da espessura

Chapas de aço com 3 e 4,4 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200	8	13	Sim	Não	Não	-	20	38
300	7	13	Sim	Sim	Não	-	8	94
400	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	4	188
500	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	3	250
600	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2	375
Chapas de aço com 3 e 6,6 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200	8	12	Sim	Não	Não	-	20	38
300	7	13	Sim	Sim	Não	-	9	84
400	8	13	Sim	Não	Não	-	4	188
500	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	3	250
600	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2	375
Chapas de aço com 4,4 e 6,6 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200	8	12	Sim	Não	Não	-	20	38
300	7	13	Sim	Sim	Não	-	10	75
400	8	13	Sim	Não	Não	-	5	150
500	8	13	Sim	Não	Não	-	3	250
600	7	13	Sim	Sim	Não	-	2	375

Conforme esperado, pode-se observar uma queda na qualidade da imagem à medida que se aumenta a espessura total das paredes dos dois vasos de pressão na região de incidência da radiação. Entretanto, mesmo para o pior caso, ou seja, utilizando-se uma chapa de 4,4 e uma de 6,6 mm, a norma ainda pode ser atendida em todo o range entre 200 kV e 600 kV para classe A. Em alguns casos, pode ser necessário que se faça uso do recurso de compensação de uma pior resolução espacial por uma melhor sensibilidade ao contraste em relação ao mínimo requerido pela norma, mas é possível atendê-la.

Para a classe B, apenas alguns arranjos, utilizando altas tensões, foram capazes de atender aos requisitos. Em todos esses casos, foi necessário fazer a compensação citada anteriormente. Isso porque a resolução espacial é limitada pelo tamanho do pixel e neste DDA seu limite superior é o oitavo arame.

IV.6.1.3 INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE CARBONO

O experimento foi realizado visando avaliar o efeito da substituição do material do vaso de pressão do DDA de aço para fibra de carbono. Procurou-se determinar se haveria ganho em contraste, pela menor atenuação da radiação na fibra de carbono, assim como verificar se seriam gerados artefatos na imagem, em função da estrutura das fibras. Abaixo, a Tabela IV.2 compara o resultado da inspeção usando duas chapas de aço, uma de 3 e uma de 6,6 mm com o resultado obtido em outra inspeção usando uma chapa de aço de 3 mm e outra de fibra de carbono de 10 mm. Os experimentos foram realizados no range de 200 a 600kV.

Em todos os experimentos, a distância fonte-detector foi mantida constante em 830mm e a distância solda-detector em 130 mm. As camadas de água eram de 60 mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte.

Tabela IV.2 – Comparação de desempenho entre aço e fibra de carbono

Chapas de aço com 3 e 6,6 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200	8	12	Sim	Não	Não	-	20	38
300	7	13	Sim	Sim	Não	-	9	84
400	8	13	Sim	Não	Não	-	4	188
500	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	3	250
600	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2	375

Chapas de aço de 3 mm e placa de fibra de carbono de 10 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200	8	12	Sim	Não	Não	-	20	38
300	8	13	Sim	Não	Não	-	6	125
400	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	3	250
500	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2	375
600	8	13	Sim	Não	Não	-	1,5	500

Nota-se, em geral, uma melhora na qualidade da imagem devido à menor atenuação na fibra de carbono. Embora haja alguma melhora, uma mudança desse tipo não é fundamental para viabilizar a inspeção. Pelo menos não sob o ponto de vista exclusivo da técnica radiográfica. É possível, entretanto, que num caso prático seja mandatório o uso de materiais compósitos devido ao peso dos vasos de pressão do DDA e da fonte. Além disso, a fibra de carbono não corrói, o que constitui outra vantagem para a fabricação da ferramenta submarina. Foi importante observar que não houve nas

imagens obtidas com fibra de carbono o aparecimento de nenhum artefato devido à estrutura das fibras, o que poderia comprometer a qualidade da imagem. Não se tem informação, entretanto, se as propriedades mecânicas do compósito podem ser alteradas ao longo do tempo devido às repetidas incidências de radiação.

IV.6.1.4 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA FONTE-DETECTOR

Para avaliar a influência da distância fonte-detector, variou-se a mesma num intervalo entre 780 e 1980 mm, com passos de 400 mm, utilizou-se um arranjo com chapas de aço de 3 e 6,6 mm, as camadas de água eram de 60 mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte e a distância entre a solda e o detector era de 130 mm, requerendo, portanto, uma distância mínima entre a solda e a fonte de 360 mm para atingir a classe A da ISO/FDIS 17636-2:2012, dado que o tubo de raios X possuía tamanho focal de 1 mm. Não foram utilizadas distâncias menores que essa no estudo, pois o arranjo não permitia, tendo em vista que a soma das colunas d'água mais o diâmetro do tubo inspecionado, mais o colimador, chapas de aço e o próprio raio interno do tubo de raios X já resultavam em uma distância fonte-solda muito maior que 360 mm. Isso indica que um tamanho focal de 1 mm é suficiente para a aplicação e mesmo 2 mm seria razoável. Tamanhos focais a partir de 3 mm, entretanto, já exigiriam uma distância considerável entre fonte e detector, comprometendo, portanto, a qualidade da imagem.

A

Tabela IV.3 resume os resultados obtidos. Para 200 kV, distâncias fonte-detector maiores que 1180 mm levam a níveis de cinza muito baixos, tornando inviável a inspeção, pelo menos para o DDA utilizado. É importante notar, porém, que esse modelo de DDA tem um tempo de integração limitado a 20 segundos por quadro, o que comprometeu o nível de cinza alcançado para as menores tensões. No range de 300 a 600 kV, a classe A da norma ISO/FDIS 17636-2:2012 sempre pôde ser atingida, mostrando que a distância fonte-detector não foi um fator limitante. Já a classe B só pôde ser atingida para distâncias menores.

Tabela IV.3 – Influência da distância fonte-detector no arranjo com água apenas por fora do tubo

200 KV									
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
780	8	12	Sim	Não	Não	-	20	38	
1180	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38	
1580	Não factível - nível de cinza muito baixo							20	38
1980	Não factível - nível de cinza muito baixo							20	38
300 KV									
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
780	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	8	94	
1180	8	13	Sim	Não	Não	-	20	38	
1580	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38	
1980	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38	
400 KV									
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
780	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	4	188	
1180	8	13	Sim	Não	Não	-	7	108	
1580	8	12	Sim	Não	Não	-	15	50	
1980	8	12	Sim	Não	Não	-	17	45	
500 KV									
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
780	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2,5	300	
1180	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	3	150	
1580	8	12	Sim	Não	Não	-	10	75	
1980	8	12	Sim	Não	Não	-	12	63	
600 KV									
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
780	8	14	Sim	Não	Sim	Sim	2	375	
1180	8	13	Sim	Não	Não	-	4	188	
1580	8	12	Sim	Não	Não	-	7	108	
1980	8	12	Sim	Não	Não	-	10	75	

É importante notar também que neste estudo paramétrico, à medida que se afastava a fonte do detector, a camada de água era mantida constante. Em uma aplicação real, a camada de água aumentaria junto com a distância fonte-detector e portanto a piora na qualidade da imagem seria mais expressiva que a representada por este estudo.

Apesar disso, como a menor distância fonte-detector utilizada (780 mm) já é considerável, tudo indica que em uma aplicação real este parâmetro não será crítico para o cumprimento de requisitos normativos

IV.6.1.5 AUMENTO DA COLUNA D'ÁGUA

Esse experimento foi realizado com o arranjo descrito na Tabela IV.4. Basicamente, o recipiente de água onde o tubo estava nos outros experimentos foi girado de 90°, fazendo com que as camadas de água do lado da fonte e do detector fossem maiores, cerca de 105 mm do lado da fonte e mais 105 mm do lado do detector. A distância fonte-detector foi mantida em 830 mm, mas a distância solda-detector foi aumentada para 215 mm em função do rearranjo experimental.

Nota-se que, nesse caso, não se atinge a Classe B da norma ISO/FDIS 17636-2:2012, nem mesmo para as maiores tensões. A Classe A foi atingida, exceto para 200 kV, onde o nível de cinza obtido foi extremamente baixo. É possível, entretanto, que em um detector que permita o uso de tempos de integração por quadro maiores que 20 segundos, a classe A seja atingida, mesmo para tensões da ordem de 200kV.

Tabela IV.4 - Influência do aumento da coluna d'água no arranjo com água apenas por fora do tubo

Chapas de aço de 3 e 6,6 mm - Duas camadas de água de 105 mm - Distância solda-detector de 215 mm								
KV	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200				Nível de cinza muito baixo			20	38
300	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38
400	8	13	Sim	Não	Não	-	20	38
500	8	13	Sim	Não	Não	-	20	38
600	8	13	Sim	Não	Não	-	20	38

IV.6.1.6 EXPERIMENTOS COM ISÓTOPO

Não foi possível obter uma boa qualidade de imagem nos experimentos realizados com Selênio. Alguns problemas impossibilitaram que a inspeção fosse realizada em condições ideais. A atividade do isótopo estava baixa, gerando, portanto, um nível de cinza muito baixo, mesmo para elevados tempos de integração. Além disso, o tamanho focal de 3 mm era relativamente grande, requerendo que se utilizasse uma

distância muito grande entre fonte e detector para se atingir a resolução espacial requerida pela norma ISO/FDIS 17636-2:2012 para classe A. Mesmo se aproximando a fonte em relação ao detector para tentar melhorar a intensidade do sinal (aumentar os níveis de cinza), a qualidade da imagem obtida não foi boa. A colimação do feixe trouxe alguma melhora, mas ainda assim insuficiente para se atingir a norma. A Figura IV.20 mostra um exemplo de imagens obtidas com Selênio. À esquerda, sem colimação e à direita com uma colimação grosseira, utilizando uma chapa de chumbo com um furo central. As imagens estão calibradas e filtradas. Nota-se um grande número de *bad pixels* e embora a colimação melhore um pouco a sensibilidade ao contraste, não se pode distinguir além do oitavo fio, ficando muito abaixo dos pré-requisitos normativos. Ainda, essas imagens foram obtidas apenas com água em volta do tubo, sem o uso das chapas de aço representando os vasos de pressão, o que comprometeria ainda mais a qualidade da imagem.

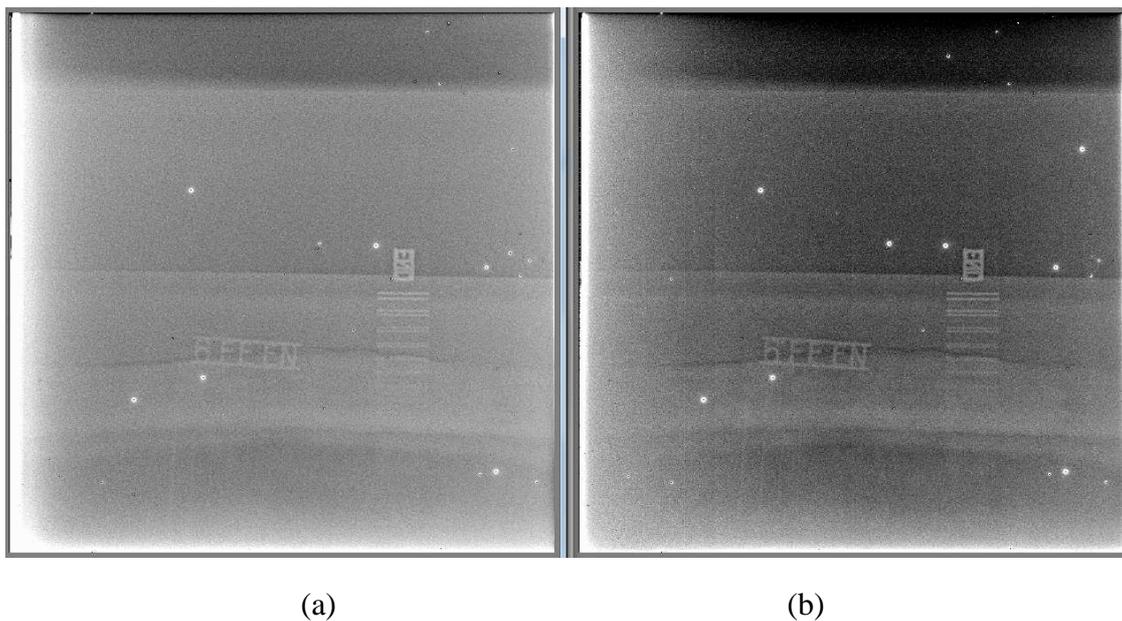


Figura IV.20 – Imagens obtidas com Selênio sem colimação (a) e com colimação grosseira (b)

As imagens da Figura IV.20 foram obtidas com 16 quadros, cada e o tempo máximo de integração por quadro para esse modelo de DDA – 20 segundos. Para avaliar a sensibilidade da qualidade de imagem a uma mudança no número de quadros, pode-se visualizar na Figura IV.21 uma comparação entre uma imagem obtida com 16

quadros (esquerda) e 100 quadros (direita). Apesar da melhora obtida na imagem da direita, não se distingue sequer o 10° arame, mesmo usando um tempo total de aquisição muito longo para um DDA, acima de 30 minutos (20 segundos por quadro – 100 quadros).

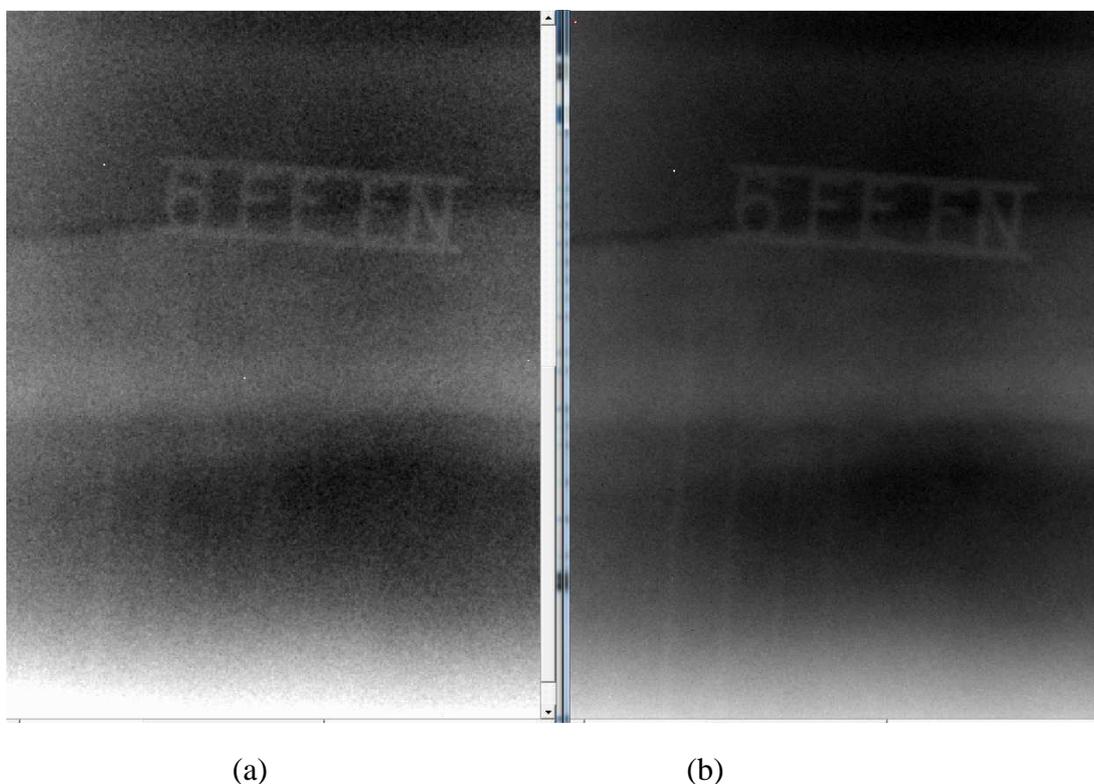


Figura IV.21 – Comparação entre imagens obtidas com 16 quadros (a) e 100 quadros (b) usando Selênio

Maiores investigações são necessárias para avaliar a possibilidade de se utilizar isótopos, já que os experimentos foram realizados com uma fonte de baixa atividade (26 Ci) e relativamente grande tamanho focal (3 mm). As imagens obtidas com essa fonte não proporcionaram uma qualidade de imagem satisfatória. Trabalhos futuros poderiam investigar o uso de Ir-192 ou Co-60 com altas atividades. Principalmente no caso do Co-60, é importante que certa precaução seja tomada, já que nem todo DDA tem a eletrônica preparada para absorver radiações de alta energia.

IV.6.1.7 **EXPERIMENTOS COM TUBO DE RAIOS X COMPACTO**

Os experimentos descritos nos itens anteriores foram realizados, conforme mencionado, em um tubo de 600 kV. Os resultados descritos no presente item, entretanto, foram obtidos utilizando-se um tubo de raios X compacto da GE e seus resultados são importantes para avaliar se tubos de raios X compactos atualmente disponíveis no mercado atendem a demanda para inspeções submarinas ou não.

Basicamente, os mesmos estudos realizados para a fonte de 600 kV foram realizados para essa fonte, mas dessa vez utilizando-se apenas a tensão máxima de 280 kV e corrente de 1,2 mA. Isso porque a potência do tubo é relativamente baixa (340 W), em partes devido ao seu reduzido tamanho focal de 0,5 mm. Assim, tensões menores produziriam piores qualidades de imagem.

Ainda, o tempo por quadro foi mantido constante em 20 segundos, sempre com 38 quadros para que o tempo total de exposição pudesse ser comparado com outros experimentos. O tempo por quadro foi mantido constante e igual ao valor máximo possível para o DDA em questão porque a baixa potência do equipamento precisava ser compensada com um alto tempo de exposição por quadro para obtenção de um nível de cinza satisfatório. Conclui-se, portanto, que um detector usado para aplicações submarinas deve permitir o uso de tempos elevados por quadro, acima de 20 segundos, já que o tempo por quadro foi um fator limitante nessa e em outras situações, especialmente para baixas voltagens (200 a 300 kV).

Em todos os experimentos, a distância da solda ao detector foi mantida constante em 130 mm, exceto no caso em que o cesto com água foi girado de 90° para usar duas camadas de água de 105 mm. Neste caso, a distância solda-detector foi de 215 mm. As camadas de água, exceto neste caso, foram mantidas constantes em 60 mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte.

Como a resolução espacial do DDA é limitada pelo tamanho do pixel (no caso, 200 μm) e como de qualquer maneira a fonte não poderia ser aproximada tanto quanto se queira do objeto por razões práticas, ligadas ao arranjo da inspeção, um tamanho focal entre 1 e 2 mm seria já suficiente para esta aplicação, fazendo com que um menor tamanho focal, como 0,5 mm neste caso, não traga ganhos para a resolução espacial. Um tamanho focal entre 1 e 2 mm permitiria um ganho de potência sem prejuízo à resolução espacial.

Ainda assim, o estudo deste tubo de raios X compacto é interessante, por tratar-se de uma alternativa de mercado que poderia prontamente ser marinizada. As tabelas a seguir mostram a influência respectivamente da distância fonte-detector, da espessura dos vasos de pressão e da coluna d'água para o referido arranjo.

Tabela IV.5 – Influência da distância no arranjo com o tubo de raios X compacto

280 KV - Chapas de aço de 3 e 6,6 mm, camadas de água de 60 mm (lado do detector) + 70 mm (lado da fonte) - Distância solda-detector de 130 mm						
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?
680	8	11	Sim	Não	Não	-
780	8	10	Não	-	Não	-
880	8	-	Não	-	Não	-

Tabela IV.6 - Influência dos vasos de pressão no arranjo com o tubo de raios X compacto

280 KV - Distância fonte-detector de 680 mm - Distância solda-detector de 130 mm, camadas de água de 60 mm (lado do detector) + 70 mm (lado da fonte)						
Espessura das chapas (mm)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?
3 e 4,4 (aço)	8	12	Sim	Não	Não	-
3 e 6,6 (aço)	8	11	Sim	Não	Não	-
4,4 e 6,6 (aço)	8	11	Sim	Não	Não	-
3 (aço) e 10 (Fibra de carbono)	8	12	Sim	Não	Não	-
3 e 6,6 (aço) sem colimação	8	10	Não	-	Não	-

Tabela IV.7 - Influência da coluna d'água no arranjo com o tubo de raios X compacto

Chapas de aço de 3 e 6,6 mm, camadas de água de 105 mm (lado do detector) + 105 mm (lado da fonte), Distância fonte-detector de 830 mm, Distância solda-detector de 215 mm						
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?
280	7	-	Não	-	Não	-

Pode-se notar que para distâncias fonte-detector até 780 mm, a classe A da norma ISO/FDIS 17636-2:2012 pode ser atingida, mas não a classe B. Quanto à espessura dos vasos de pressão de aço ou fibra de carbono, nota-se que em todos os casos a norma foi atingida para Classe A, mas não para classe B. Nota-se ainda que a qualidade da imagem obtida utilizando-se uma chapa de aço de 3 mm do lado da fonte e

uma de 4,4 mm do lado do detector é equivalente à obtida substituindo-se a chapa de 4,4 mm de aço por uma de 10 mm de fibra de Carbono. Nota-se também que sem colimador, a sensibilidade ao contraste diminui, perdendo-se no caso um fio no IQI de arame. É importante notar que a colimação nos experimentos com esse tubo não foi feita através de um colimador controlado eletronicamente, como no caso do tubo de 600 kV e sim com uma simples chapa de chumbo com um furo central. Assim, um controle mais refinado da colimação poderia levar a uma melhor qualidade da imagem.

Quando as colunas d'água foram aumentadas para 105 mm do lado da fonte e mais 105 mm do lado do detector, não foi possível atingir nem mesmo a Classe A da ISO/FDIS 17636-2:2012. Nenhum arame do IQI pôde ser visualizado e mesmo a resolução espacial medida no IQI de fio duplo caiu para o sétimo par de fios, não devido a uma real queda na resolução espacial e sim devido a uma queda no contraste e baixa SNR da imagem. É importante observar, entretanto, que quando se aumentou as colunas d'água nos experimentos com o tubo de 600 kV, mesmo utilizando-se 300 kV, foi possível atingir a classe A da norma ISO/FDIS 17636-2:2012. Isso se deve em parte ao controle eletrônico da colimação e em parte à potência de 1500 W, enquanto o tubo compacto tinha apenas 340 W. Isso reforça a importância de se encontrar uma solução intermediária, ou seja, um tubo de raios X compacto, mas com tamanho focal entre 1 e 2 mm e, portanto, maior potência.

Um outro set de IQI de arames com fios mais grossos (W6) poderia ter sido utilizado para se facilitar a leitura nos casos em que nem o 10° fio era visível, mas de qualquer maneira, a norma nunca poderia ser atingida nesses casos, pois a resolução espacial estava limitada pelo tamanho de pixel do detector a 200 µm e portanto não haveria maneiras de se compensar a pior sensibilidade ao contraste com uma melhor resolução espacial. Deve-se, portanto, evitar o uso de colunas d'água dessa ordem de grandeza na marinização de um tubo de raios X como o que foi utilizado.

Os experimentos com esse equipamento de raios X compacto mostraram que é viável a utilização deste tipo de equipamento na inspeção de gasodutos ou outros dutos fora de operação (vazios). Esse tipo de equipamento não poderia ser utilizado, entretanto, para detecção de trincas em dutos com água ou óleo por dentro. Isso porque a tensão e a potência desse tipo de equipamento são relativamente baixas e o óleo no interior do duto atenuaria muito a radiação, tornando-a impraticável. Vale ressaltar,

entretanto, que com o passar dos anos, equipamentos de raios X de potência e voltagem cada vez maiores são disponibilizados pelo mercado. À medida que se avança nesses limites, as possibilidades de inspeção por radiografia submarina tornam-se também mais abrangentes.

Não fez parte do escopo dessa dissertação a avaliação de perda de espessura, mas como nesse caso os requisitos normativos são mais brandos, é possível que mesmo um tubo de raios X compacto seja suficiente para atender às exigências normativas para oleodutos ou dutos de injeção (com fluido no interior).

IV.6.2 ÁGUA POR FORA E DENTRO (OLEODUTOS, DUTOS DE INJEÇÃO)

Basicamente os mesmos experimentos realizados para o arranjo em que o tubo tinha água apenas em volta foram repetidos para o arranjo com água dentro e fora do tubo, simulando um caso mais difícil para se inspecionar, representativo, por exemplo, de dutos de óleo ou água. A diferença básica foi que passou a ser necessário o uso de tensões mais altas, não se obtendo resultados satisfatórios no intervalo entre 200 e 400 kVs.

IV.6.2.1 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DOS VASOS DE PRESSÃO

Na inspeção com água dentro e fora do tubo, a qualidade da imagem caiu consideravelmente quando comparado ao arranjo com água apenas ao redor do tubo, conforme esperado, devido ao espalhamento causado pela água. Em geral, para as tensões de 200 e 300 kV, o nível de cinza obtido foi tão baixo que inviabilizou a inspeção. Isso se deve em parte à limitação de 20 s no tempo de exposição por quadro do detector utilizado. De qualquer maneira, tempos de exposição muito elevados seriam necessários para que se atingisse um nível de cinza satisfatório nesse intervalo de tensões.

Em todos os experimentos, a distância fonte-detector foi mantida constante em 830mm e a distância solda-detector em 130 mm. As camadas de água eram de 60 mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte.

Entre 400 e 600 kV, foi possível para alguns arranjos atingir a Classe A da norma ISO 1763 ISO/FDIS 17636-2:20126, mas nunca classe B. A espessura das paredes dos vasos de pressão passaram a ter uma importância fundamental no atendimento da norma, fazendo com que a Classe A fosse atingida para todo o intervalo entre 400 e 600 kV quando utilizando chapas de espessura 3 e 4,4 mm, mas não fosse atingida em nenhuma imagem quando as chapas representando o vaso de pressão tinham espessura de 4,4 e 6,6 mm.

Tabela IV.8 - Influência da espessura dos vasos de pressão no arranjo com água por dentro e fora do tubo

Chapas de aço com 3 e 4,4 mm									
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
200	Nível de cinza muito baixo								
300	Nível de cinza muito baixo								
400	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38	
500	8	11	Sim	Não	Não	-	20	38	
600	8	11	Sim	Não	Não	-	12	63	
Chapas de aço com 3 e 6,6 mm									
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
200	Nível de cinza muito baixo								
300	Nível de cinza muito baixo								
400	8	-	Não	-	Não	-	20	38	
500	8	-	Não	-	Não	-	20	38	
600	8	11	Sim	Não	Não	-	12	63	
Chapas de aço com 4,4 e 6,6 mm									
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros	
200	Nível de cinza muito baixo								
300	Nível de cinza muito baixo								
400	8	-	Não	-	Não	-	20	38	
500	8	-	Não	-	Não	-	20	38	
600	8	-	Não	-	Não	-	20	38	

IV.6.2.2 INFLUÊNCIA DO USO DE FIBRA DE CARBONO

O uso de uma chapa de aço de 3 mm do lado da fonte e de 10mm de fibra de carbono do lado do detector proporcionou um bom resultado, parecido com o obtido utilizando-se 3 mm do lado da fonte e 4,4 mm de aço do lado do detector. Ainda assim, o intervalo de tensões em que se atingiu os pré-requisitos para Classe A da norma ISO 17636 continuou entre 400 e 600 kV.

Em todos os experimentos, a distância fonte-detector foi mantida constante em 830 mm e a distância solda-detector em 130 mm. As camadas de água eram de 60mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte.

Tabela IV.9 - Influência do uso de fibra de carbono no arranjo com água por dentro e por fora do tubo

Chapas de aço com 3mm e chapa de fibra de carbono com 10 mm								
Tensão (KV)	D	W	Atende Classe A?	Requer compensação?	Atende Classe B?	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
200								
300	8	-	Não	-	Não	-	20	38
400	8	10	Não	-	Não	-	20	38
500	8	11	Sim	Não	Não	-	10	75
600	8	11	Sim	Não	Não	-	8	94

IV.6.2.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA FONTE-DETECTOR

A Tabela IV.10 mostra a influência da distância fonte-detector no arranjo com água por dentro e fora do tubo. Os experimentos foram realizados com as chapas de 3 e 6,6 mm. Para tensões até 400 kV, a qualidade da imagem foi muito ruim e o nível de cinza muito baixo, em parte devido à limitação do detector de ter um tempo máximo de integração por quadro de 20 segundos, que se mostrou insuficiente. A influência da distância foi muito mais marcante que no arranjo com água apenas por fora do tubo.

Nas medidas com 980 e 1180 mm, não foi possível identificar sequer o 10° fio do IQI, mesmo para as tensões de 500 e 600 kV. Novamente, valem os comentários do último parágrafo do item IV.6.1.7.

Em todos os experimentos, a distância solda-detector foi mantida constante em 130 mm. As camadas de água eram de 60mm do lado do detector e 70 mm do lado da fonte. Aqui também vale o comentário que neste estudo paramétrico, à medida que se afastava a fonte do objeto, a coluna d'água era sempre a mesma. Na realidade, uma maior distância fonte-detector implicará em uma maior coluna d'água e portanto também maior espalhamento e atenuação. Essa observação é válida especialmente para este arranjo com água dentro do tubo, pois o sistema se encontra neste caso no limite para cumprimento de requisitos normativos.

Tabela IV.10 – Influência da distância no arranjo com água por dentro e por fora do tubo

500KV								
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A	Requer compensação?	Atende Classe B	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
780	8	11	Sim	Não	Não	-	18	42
980	8	-	Não	-	Não	-	20	38
1180	8	-	Não	-	Não	-	20	38
600KV								
Distância Fonte-Detector (mm)	D	W	Atende Classe A	Requer compensação?	Atende Classe B	Requer compensação?	Tempo por quadro (s)	Número de quadros
780	8	11	Sim	Não	Não	-	12	63
980	8	-	Não	-	Não	-	20	38
1180	8	-	Não	-	Não	-	20	38

De forma geral, os diferentes estudos paramétricos para a condição com água no interior do tubo só resultaram em uma boa qualidade de imagem para energias entre 400 e 600 kV. Não existe atualmente no mercado nenhum tubo de raios X compacto que atenda a esses pré-requisitos e os tubos de 400 a 600 kV convencionais representam uma grande dificuldade no processo de marinização, o que pode inviabilizar no curto prazo esse tipo de inspeção. A médio prazo, porém, tubos cada vez mais potentes e de maior energia são fabricados em versões portáteis e a médio prazo esse tipo de inspeção pode ser viabilizado. Ainda, embora não seja escopo desta dissertação, é possível que o uso da radiografia para detecção de perda de espessura seja possível nesses casos, pois os requisitos normativos são mais brandos. Vale lembrar também que para situações com água apenas ao redor do tubo (simulando gasodutos ou dutos fora de operação), o uso de energias menores mostrou-se viável e portanto tubos de raios X compactos atualmente disponíveis no mercado seriam eficazes para essas inspeções.

V CONCLUSÃO

As seguintes conclusões puderam ser tiradas após análise dos resultados dos experimentos:

- O procedimento de calibração do DDA deve usar uma chapa fina de material tão homogêneo quanto possível, tipicamente cobre ou aço
- A espessura da chapa utilizada para calibração não precisa ser a mesma da peça que se pretende inspecionar. ;
- A chapa utilizada na calibração deve ser colocada justaposta à fonte de raios X e o DDA deve ser afastado de um a dois metros da fonte, de modo a receber um feixe de radiação tão uniforme quanto possível;
- O arranjo de calibração não deve conter água. Foi mostrado no item IV.2 que a água introduz ruído na calibração, além de atenuar o sinal;
- Um estudo como o mencionado no item II.9.4 deve sempre ser realizado para avaliar se a chapa de calibração vai gerar ou não artefatos na imagem calibrada e se o número de quadros é suficiente para obter um baixo nível de ruído;
- Atenção deve ser dada ao fato de que o *shading*, conforme descrito no item IV.4, sempre estará presente em radiografias de tubos utilizando DDAs e seu efeito sobre a SNR deve ser avaliado caso a caso;
- O uso de um equipamento de raios X compacto possibilita a inspeção de gasodutos ou outros dutos fora de operação (vazios);
- A colimação do feixe é um dos parâmetros mais importantes a se otimizar para a melhoria da qualidade da imagem em condições submarinas;
- Bons resultados para dutos com água no interior (simulando dutos de injeção de água e oleodutos) puderam ser obtidos apenas no range entre 400 e 600 kV.
- A distância fonte-objeto e as espessuras das paredes dos vasos de pressão não foram parâmetros considerados críticos para atingir a Classe A da norma ISO

17636-2 com água por fora do tubo. Com água em seu interior, entretanto, esses parâmetros adquirem uma maior importância;

- Embora o uso da fibra de carbono traga vantagens para a qualidade da imagem quando comparada com o aço, seu uso não se faz mandatório do ponto de vista da qualidade da imagem, mas talvez seja mandatório por aspectos relacionados a projeto mecânico;
- O detector usado para aplicações submarinas deve permitir o uso de tempos elevados por quadro, acima de 20 segundos;
- Pequenos tamanhos focais devem ser utilizados, preferencialmente entre 1 e 2 mm, de forma a otimizar o compromisso entre potência e resolução espacial.

VI TRABALHOS FUTUROS

É importante notar que apesar do presente trabalho ter fornecido uma série de informações importantes a respeito da radiografia digital em condições submarinas, há ainda uma série de estudos futuros que devem ser realizados para construção de tal ferramenta. Além dos que já foram citados na Conclusão, uma série de dificuldades relacionadas à marinização do tubo de raios X e do detector, que não são parte do escopo deste trabalho, deverão ser superadas. Entre estas dificuldades, incluem-se: o fornecimento de energia, o posicionamento da ferramenta em relação à solda, o desenvolvimento de vasos de pressão com janelas de pequena espessura pra propagação da radiação ou manufaturados em material de baixo coeficiente de atenuação, entre outras. Também não fez parte do escopo do presente trabalho a avaliação da detectabilidade de perda de espessura em radiografias submarinas. Uma boa detectabilidade de perda de espessura pode ser atingida em situações nas quais não se consegue uma boa detectabilidade para trincas. Maiores investigações são necessárias para avaliar a possibilidade de se utilizar isótopos, já que os experimentos foram realizados com uma fonte de Se-75 de baixa atividade e relativamente grande tamanho focal. Recomenda-se que em trabalhos futuros sejam utilizados Ir-192 e Co-60. Uma avaliação da detectabilidade equivalente também deve ser conduzida, pois como foi citado, há diversas situações em que o atendimento a pré-requisitos normativos não é suficiente para assegurar que a detectabilidade de um sistema digital equivalha à alcançável pela radiografia convencional. Apesar de 10" ser um diâmetro típico para dutos submarinos e 20 mm ser uma espessura considerável, há casos de dutos com diâmetros e espessuras maiores, nos quais o cumprimento de requisitos normativos pode ser dificultado, mesmo no caso de gasodutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, R., "**Radiologia Industrial**", ed. Março 2010, disponível em http://www.abende.org.br/down2/radiologia_ind.pdf - Acesso em 13/01/2013.

ASME BPVC - Section V -, **Non-Destructive Examination**, Article 2 - Radiographic Examination; Three Park Avenue, July, New York, NY, 2007.

ASTM E2597 (2008) - American Society for Testing and Materials - **Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays** - West Conshohocken, USA.

BAM (2007) - **User manual for the measuring program iSee!** - version 10.2. Berlin. Alemanha.

BOIY, L. - "**Successful conversion to digital X-Ray detectors**" - <http://www.ndt.net>. The NDT Database & Journal, ISSN: 1435-4934, European Conference of NDT, Berlin, 2006.

DURR NDT, "HD-CR 35 NDT Datasheet" - Disponível em www.duerr-ndt.de/_pdfs/HD-CR_35_NDT_GB.pdf. Acesso em 02/01/2011.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K., - "**Film replacement by digital x-ray detectors - The correct procedure and equipment**". Proceedings of 16th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2004.

EWERT, U., BAVENDIEK, K., ROBBINS, J., ZSCHERPEL, U., BUENO, C., GORDON, T., et al. - **New compensation principles for enhanced image quality in industrial radiology with digital detector arrays**. Materials evaluation. 2010;68(2):163–8.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K.. - "**Strategies for Film Replacement in Radiography-Films and Digital Detectors in Comparison**". Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2005. [Internet]. 2008 [citado 13 de janeiro de 2013]. Recuperado de: <http://ndt.net/article/wcndt2008/papers/68.pdf>

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K. - "**Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality**". Annual conference of Indian NDT society, Kalkutta. 2005.

EUROPEAN STANDARD, EN 14784-1 - "**Non-destructive testing. Industrial computed radiography with storage phosphor *Imaging Plates* – Part 1: Classification of systems**" - Bruxelles, 2005.

EUROPEAN STANDARD, EN 14784-2 - "**Non-destructive testing. Industrial computed radiography with storage phosphor *Imaging Plates* – Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays**" - Bruxelles, 2005.

FUNAKI, M., ANDO, Y., JINNAI, R., TACHIBANA, A., OHNO, R., - "**Development of CdTe detectors in Acrorad**" - International Workshop on Semiconductor PET [Internet]. 2007 [citado 22 de janeiro de 2013]. Recuperado de: http://www.acrorad.co.jp/_skin/pdf/Development_of_CdTe_detectors.pdf

HAMAMATSU - ***Flat Panel Sensors - Selection Guide*** - Disponível em http://www.sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/flat_panel_koth0008e08.pdf - Acesso em 18/01/2012.

ISO/FDIS 17636-1(2012), International Organization for Standardization, **Non-Destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 1 - X and gamma ray techniques with film**, Geneva, Switzerland.

ISO/FDIS 17636-2(2012), International Organization for Standardization, **Non-Destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2 - X and gamma ray techniques with digital detectors**, Geneva, Switzerland.

ISO 19232-1 - International Organization for Standardization, **Non-Destructive Testing - Image Quality of Radiographs - Part 1: Image Quality Indicators (wire type) - Determination of Image Quality Value** - Geneva, Switzerland, 2004.

ISO 19232-5- International Organization for Standardization, **Non-Destructive Testing - Image Quality of Radiographs - Part 1: Image Quality Indicators (duplex wire type) - Determination of Image Quality Value** - Geneva, Switzerland,

2004.

IZUMI, Y., TERANUMA, O., SATO, T., UEHARA, K., OKADA, H., TOKUDA, S.; "**Development of Flat-Panel X-ray Image Sensors**", <http://sharp-world.com/corporate/info/rd/tj3/pdf/6.pdf>, maio 2001

KASAP, S.O., ZAHANGIR KABIR, M., ROWLANDS, J.A. -" **RECENT ADVANCES IN X-RAY PHOTOCONDUCTORS FOR DIRECT CONVERSION X-RAY IMAGE DETECTORS**". CURRENT APPLIED PHYSICS. JUNHO DE 2006;6(3):288–92.

KIM, H.J., HO HIM, K., GYUSEONG CHO, JOONHOO CHOI, et. al., "**Construction and Characterization of an amorphous silicon flat panel detector based on ion shower**". Nuclear Instrumentation and Methods in Physics Research. A 505, pág. 155-158. 2003

KNOLL, G.F., "**Radiation Detection and Measurement**", 3 ed., New York, Wiley, 2000.

MARINHO, C.A., CAMERINI, C., LOPES, R.T. et al., "**Novas Aplicações da Técnica de Radiografia Computadorizada em Ambiente Offshore**" - XXIV CONAEND - Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, Brasil - 2006.

MARINHO,C.A., CAMERINI, C., MAIA, C. et al., "**Gamma Ray System Operated by Robots for Underwater Pipeline Inspection**" - 9th ECNDT - European Conference on NDT - September 2006- Berlin, Germany.

MARINHO, C.A., RABELLO , J.M.A., AIUB, M., IGUCHI, E., LOPES, R.T., et al., "**Qualification Process and Inspection Validation of Computed Radiography Technique for DWDI Weld Inspection**", Proceedings of 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012.

MARINHO, C.A., LOPES, R.T., RABELLO , J.M.A., "**Film Replacement at Digital Techniques in Weld Inspection**", Materials Evaluation, July. 2008;

MARINHO, C.A., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D., SILVA, A.S., - "**RADIOGRAFIA DIGITAL - EVOLUÇÃO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA**

NA INDÚSTRIA", Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Porto de Galinhas, Brasil, 2011.

MOREIRA, E.V., 2010, "**Determinação da Qualidade da Radiografia Digital Aplicada às Soldas de Gasodutos e Oleodutos Terrestres e Marítimos**", Tese de D.Sc., Guaratinguetá, SP, Brasil.

NASCIMENTO, J.R., 2012, "**Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Soldas**", Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

NDT Resource Center - Disponível em http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/cc_rad_index.htm. Acesso em 01/01/2013

OLIVEIRA, D. F., 2007, "**Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas**", Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, D. F., 2010, "Desenvolvimento de Sistemas de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos", Tese de D.Sc., UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, Brasil.

PEREIRA, R., "Filmes e Processamento Radiográfico". ebah, disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABMB8QAJ/apostila-filme-processamento-radiografia#>. Acesso em 10/10/2011.

PETROBRAS N-2821-B (2007) - "**Ensaio Não Destrutivo - Radiografia Computadorizada em Juntas Soldadas**"

RAAD, J.A., "**Radiografia Industrial**", Técnica de Formação de Imagem, General Electric Company - GE IT, 2007

SCURI, A. E., ed. Setembro de 2002, "**Fundamentos da Imagem Digital**", disponível na internet no site <http://www.tecgraf.puc-rio.br/~scuri/download/fid.pdf> em 09/04/2013.

TAHUATA, L. et al., "**Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**", Instituto de

Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão,
Rio de Janeiro, 2003.