



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA IMAGEM EM AÇO SUPER DUPLEX UTILIZANDO RADIOGRAFIA DIGITAL

Diego Pinto de Almeida Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalurgista.

Orientadores: Gabriela Pereira Ribeiro

Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro

Setembro 2016

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA IMAGEM EM AÇO SUPER DUPLEX
UTILIZANDO RADIOGRAFIA DIGITAL**

Diego Pinto de Almeida Santos

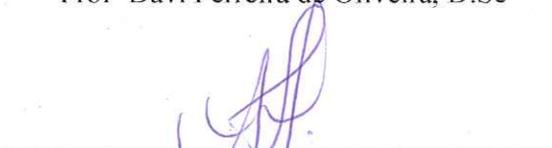
PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
METALURGISTA.

Examinado por:


Prof^a Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc


Prof^o Luiz Carlos Pereira, D.Sc


Prof^o Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc


Alessandra Silveira Machado, D.Sc

Santos, Diego Pinto de Almeida

Avaliação da qualidade da imagem em aço super duplex utilizando radiografia digital / Diego Pinto de Almeida Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

xi, 67 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Gabriela Pereira Ribeiro e Davi Ferreira de Oliveira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2016

Referências bibliográficas: p. 64- 67

1. Processo Radiográfico. 2. Radiografia Digital Direta. 3. Imagem Digital. 4. Aços Inoxidáveis Duplex

I. Pereira, Gabriela Ribeiro; Oliveira, Davi Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III. Avaliação da qualidade da imagem em aço super duplex utilizando radiografia digital.

Dedico este trabalho aos meus pais, Celso e
Ruth, à minha esposa Vanessa e ao meu
filho, Samuel.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Celso e Ruth, e minha irmã Fernanda, pelo amor incondicional.

À minha esposa Vanessa, pelo amor, companheirismo e apoio em todos os momentos, e também ao meu filho Samuel, que embora não tenha conhecimento disto, me inspira a cada vez mais buscar novos desafios e aprimorar meus conhecimentos.

Aos professores Gabriela Ribeiro Pereira e Davi Ferreira de Oliveira, pela orientação, paciência e grande apoio que tornaram possível a conclusão deste projeto de graduação.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, que contribuíram para minha formação.

À engenheira Mariana Burrowes M. Guimarães, pela amizade e imensa colaboração para conclusão deste trabalho.

Aos amigos de faculdade, por todos os momentos que passamos juntos.

E a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu alcançasse este momento.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalurgista

Avaliação da qualidade da imagem em aço super duplex utilizando radiografia digital.

Diego Pinto de Almeida Santos

Setembro/2016

Orientadores: Gabriela Pereira Ribeiro e Davi Ferreira de Oliveira

Curso: Engenharia Metalúrgica

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da imagem em juntas soldadas do aço inoxidável super duplex 2507 (UNS S32570) utilizando a radiografia digital.

A técnica foi avaliada segundo a norma ISO/FDIS 17636-2, classe A, considerando como parâmetros de qualidade a Sensibilidade ao Contraste (CS), Resolução Espacial Básica (BSR) e Relação Sinal-Ruído Normalizada (SNR_N).

Foram utilizados dois corpos de prova que consistem em chapas soldadas de aço super duplex 2507. Em cada uma das amostras contendo a solda longitudinal sem a presença de defeitos, foram criadas regiões com grupo de descontinuidades.

As amostras foram ensaiadas no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), onde foram executados ensaios radiográficos com a aplicação da técnica de radiografia digital direta, utilizando um detector plano (*Flat Panel*).

Foram obtidas imagens para diferentes tensões e diferentes números de *frames* (quadros), e então os dados foram analisados para que se verificasse o atendimento aos requisitos da norma.

Após a análise dos resultados adquiridos, pode-se constatar que a radiografia digital direta atende adequadamente às exigências da norma ISO/FDIS 17636-2, classe A, e assim pode ser utilizada para a inspeção de tubos para gasodutos e oleodutos, terrestres e marítimos construídos em aço super duplex 2507.

O uso da radiografia digital direta para aços super duplex traz como principais vantagens a exibição em tempo real, armazenamento integrado, benefícios de sensibilidade, redução dos tempos de ciclo de inspeção e das doses recebidas, melhorias, em termos de meio ambiente, radioproteção e aspectos da saúde e segurança.

Palavras chave: Radiografia digital direta, *Flat Panel*, Super duplex, UNS S32570.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment for
the degree of Metallurgical Engineer

Image quality evaluation in super duplex steel using digital radiography.

Diego Pinto de Almeida Santos

September/2016

Advisor: Gabriela Pereira Ribeiro

Davi Ferreira de Oliveira

Course: Metallurgical Engineering

This work regards the image quality in welded Super duplex stainless steel joints 2507 (UNS S32570) using digital radiography.

The technique was evaluated according to ISO/FDIS 17636-2 standard, class A, considering how quality parameters Sensitivity Contrast (CS), Spatial Resolution Basic (BSR) and Normalized Signal to Noise Ratio (SNR_N).

Two specimens which consist of welded steel plates super duplex 2507 were used. In each of the samples containing the longitudinal weld without the presence of defects with a group of discontinuities regions they were created.

The samples were tested at the Nuclear Instrumentation Laboratory (LIN) of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), which were performed radiographic testing with the application of direct digital radiography technique using a flat detector (Flat Panel).

Images were obtained for different voltages and different numbers of *frames*, and then the data were analyzed so that it appeared the compliance with the standard requirements.

After analyzing the results obtained, it can be seen that direct digital radiography adequately meets the requirements of ISO/FDIS 17636-2, class A, and thus can be used for inspection of gas pipes and oil pipelines, land and sea super duplex built in steel.

The use of direct digital radiography for super duplex steels has as main advantages the display in real-time, integrated storage, sensitivity benefits, reducing the inspection cycle times and received doses, improvements in terms of environment, radioprotection and aspects health and safety.

Key Words: Direct digital radiography, *Flat Panel*, Super duplex, UNS S32570.

Sumário do texto

Lista de abreviações	xi
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica.....	4
2.1. Processo Radiográfico	4
2.1.1. Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria	4
2.1.1.1. Efeito Fotoelétrico.....	4
2.1.1.2. Efeito Compton.....	5
2.1.1.3. Formação de Par.....	6
2.1.1.4. Importância relativa dos efeitos: Fotoelétrico, Compton e Formação de Par.....	7
2.1.2. Formação da Imagem radiográfica.....	7
2.2. Termo Fonte	9
2.2.1. Radiação X	9
2.3. Radiografia digital	11
2.3.1. Vantagens.....	12
2.4. Radiografia digital direta	16
2.4.1. Detector direto com conversão direta	17
2.4.2. Detector direto com conversão indireta	19
2.4.2.1. Princípio de operação	19
2.4.2.2. Matriz de sensores de silício amorfo.....	20
2.4.2.3. Métodos de conversão dos Raios X.....	22
2.4.2.4. O método cintilador.....	22
2.4.2.5. Cintilador de fósforo Oxissulfato de Gadolínio.....	23
2.4.2.6. Cintilador de Iodeto de Césio (CsI).....	23
2.4.3. Mecanismo de leitura eletrônica	24
2.5. Aplicações atuais da Radiografia Digital	25
2.6. Imagem Digital.....	25
2.7. Qualidade da Imagem.....	27
2.7.1. Resolução Espacial	27
2.7.2. Relação entre Resolução e Tamanho dos <i>Pixels</i>	27
2.7.3. Contraste	28
2.7.3.1. Contraste do objeto	28
2.7.3.2. Contraste do sujeito.....	28
2.7.3.3. Contraste da imagem	29

2.7.4. Nitidez da Imagem	30
2.8. Razão Sinal-Ruído (SNR)	30
2.9. Relação Sinal-Ruído Normalizado (SNR_N).....	31
2.10. Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI)	31
2.10.1. IQI de arame para sensibilidade ao contraste	32
2.10.2. IQI de arame duplo	33
3. Aços Inoxidáveis	36
3.1. Aços Inoxidáveis Duplex	36
3.1.1. Características do aço inoxidável duplex.....	36
3.1.2. Aços Inoxidáveis Super duplex.....	40
3.1.3. Microestrutura.....	41
3.1.4. Soldagem dos aços inoxidáveis duplex.....	42
3.1.4.1. Técnica de Soldagem	42
3.1.4.2. Processos de Soldagem.....	43
4. Materiais e Métodos	44
4.1. Materiais	44
4.2. Métodos	45
4.3. Esquema Experimental - Radiografia Digital Direta.....	47
4.4. Determinação da sensibilidade ao contraste, IQI de fio	48
4.5. Determinação da Resolução Espacial Básica	50
4.6. Determinação da Relação Sinal Ruído Normalizada, SNR_N	52
4.7. Processamento das imagens.....	54
5. Resultados	57
5.1. Resolução espacial básica, BSR	59
5.2. Relação sinal ruído normalizado, SNR_N	60
5.3. Resumo dos Resultados encontrados.....	61
6. Conclusões	63
7. Referências Bibliográficas	64

Lista de abreviações

AID – Aço Inoxidável Duplex
AISD - Aço Inoxidável Super Duplex
BSR (*Basic Spatial Resolution*) – Resolução Espacial Básica
CP - Corpo de Prova
CR (*Computerized Radiography*) - Radiografia Computadorizada
CS (*Contrast Sensitivity*) – Sensibilidade ao Contraste
DDA (*Digital Detector Array*) – Detetor digital plano
DQE (*Detective Quantum Efficiency*) - Eficiência de detecção quântica
DR (*Digital Radiography*) – Radiografia Digital
END - Ensaio Não Destrutivo
EHP (*Electron-Hole Pair*) – Pares de Elétrons-Lacuna
ESW (*Eletroslag Welding*) - Soldagem por eletroescória
FP (*Flat Panel*) - Detectores de estado sólido
IQI - Indicador de Qualidade de Imagem
MAG (*Metal Active Gas*) - Soldagem por arco elétrico com gás de proteção
MTF (*Modulation Transfer Function*) – Função de Transferência Modular
PMT (*Photomultiplier*) – Fotomultiplicadora
PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) - Índice de resistência à corrosão por pites
PSL (*Photoestimulable Luminescence*) – Luminescência Fotoestimulada
PSP (*Photoestimulable Phosphor*) – Fósforo Fotoestimulável
PSVS - Parede Simples Vista Simples
SAW (*Submerged arc welding*) - Soldagem por arco submerso
SNR – Razão Sinal Ruído
SNR_N – Relação Sinal Ruído Normalizada
TFT - Transistor de Película Fina

1. Introdução

Os Ensaio Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, sendo largamente utilizadas nos setores petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, entre outros. Contribuem para a qualidade dos bens e serviços, redução de custo, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam (ABENDI, 2016).

A radiografia é uma técnica de inspeção não destrutiva usada para detecção de descontinuidades volumétricas.

Nos últimos anos, a radiografia tem passado por uma transição da operação analógica para a digital, já que esta última demonstrou uma conveniência operacional facilitada que não era praticável com o sistema analógico. Atualmente existem diversos tipos de sistemas para aquisição da imagem digital, como, por exemplo, a Radiografia Digital Direta.

Esse sistema possui diversas vantagens em relação ao método convencional, especialmente para a inspeção de solda, detecção de corrosão e avaliação de mecanismos de deterioração em tubulações.

Dentre as vantagens dos sistemas radiográficos digitais, podemos citar: exibição em tempo real, com a possibilidade de melhorar as imagens e fazer medições diretas; armazenamento integrado, fornecendo acesso às imagens por meio de software de gestão de dados; segurança de estratégias de backup; arquivamento externo, ou seja, obtenção de imagens duplicadas para uso por outras estações de trabalho; mecanismos de segurança para identificar imagens originais e diferenciá-las das imagens alteradas; possibilidade de colocar comentários, identificação, parâmetros de exposição utilizados e outros; interoperacionalidade entre diferentes equipamentos e softwares e formatos de imagens; interação remota com outras unidades e acesso pela internet.

Muitos estudos vêm sendo realizados para tentar mensurar e garantir uma qualidade de imagem aceitável.

Além dos pontos citados acima, quando comparado com o filme convencional as características desse sistema são bem superiores, como, por exemplo, alta sensibilidade; maior faixa dinâmica; linearidade superior; elevada relação sinal ruído normalizada; além do fato dos dados digitais serem obtidos diretamente no computador para tratamento de imagens.

Na Radiografia Direta, diferente do sistema convencional, após as interações da radiação com o objeto, esta será detectada através de detectores de estado sólido (*Flat Panels*). Os *Flat Panels*, também conhecidos como DDA's (Digital Detector Array) são essencialmente uma estrutura com uma grande área plana formada por detectores com circuitos integrados, capazes de capturar uma imagem por raios X e convertê-la para uma exibição no formato digital, sem a necessidade de algum tipo de manipulação de filmes. O sistema de radiografia digital além do *Flat Panel* compreende um monitor para visualização da imagem e software para analisá-las e manipulá-las.

Outro grande desafio para atender às necessidades das indústrias atualmente, tem sido a busca por desenvolver novas ligas que possam ser utilizadas em condições extremamente adversas no que diz respeito a níveis de sollicitação mecânica, resistência à corrosão, dificuldade de inspeção e manutenção, entre outros fatores.

A exploração do petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas vem exigindo aprimoramentos dos materiais devido às condições extremas em que estes equipamentos operam. Em condições de operação severas e ambientes agressivos, o uso de materiais com melhores propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão é crucial.

Neste sentido, os aços inoxidáveis super duplex cada vez mais estão sendo utilizados nas indústrias química, petroquímica, nuclear e de óleo e gás, devido à excelente combinação de alta resistência à corrosão e alta resistência mecânica, aliada a uma boa tenacidade e custo satisfatório, permitindo que os equipamentos na indústria do petróleo offshore fiquem mais leves e com maior vida útil.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma avaliação da qualidade da imagem em juntas soldadas de aço super duplex através do ensaio de radiografia digital direta.

Para melhor entendimento, este trabalho está organizado em capítulos. Considerando este o capítulo 1, temos a sequência do trabalho como descrito a seguir:

No capítulo 2 será relatado todo o embasamento teórico necessário para a compreensão do funcionamento do sistema de radiografia digital direta, abordando temas como o processamento da imagem digital, funcionamento do sistema de radiografia digital, características de emissão da radiação X e processos de formação da imagem radiográfica.

No capítulo 3 serão apresentadas a definição de aço inoxidável, as características dos aços inoxidáveis super duplex, sua microestrutura, técnicas de soldagem, bem como suas aplicações nas indústrias químicas, petroquímicas e nuclear.

No capítulo 4 serão descritos os procedimentos experimentais adotados neste estudo, assim como a apresentação dos equipamentos e sistemas utilizados.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados alcançados a partir do estudo proposto, e no capítulo 6 as conclusões.

Por fim, o capítulo 7 contém as referências bibliográficas.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Processo Radiográfico

A radiografia é uma técnica de inspeção não destrutiva de aplicações importantes na área industrial, e que se baseia na atenuação diferenciada da radiação ionizante pela peça que está sendo inspecionada.

Diferentes regiões de uma peça atenuarão quantidades diferentes de radiação ionizante, devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de atenuação provocadas por variações na composição do material (ANDREUCCI, 2016).

2.1.1. Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Quando a radiação eletromagnética interage com qualquer material, alguns destes fótons podem passar direto sem serem afetados ou serem absorvidos (e transferir sua energia ao meio absorvedor), ou serem espalhados (e mudar a sua direção e possivelmente perderem energia). Fatores importantes que afetam essas interações são a energia do fóton incidente e a densidade, espessura e o número atômico (Z) do meio. Os principais modos de interação desta radiação são: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares (TAUHATA, 2003).

2.1.1.1. Efeito Fotoelétrico

No efeito fotoelétrico, a radiação X ou gama transfere toda sua energia a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética E_c bem definida, dada pela equação 2.1. Um esquema representativo deste processo está apresentado na Figura 2.1.

$$E_c = h\nu - Be \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

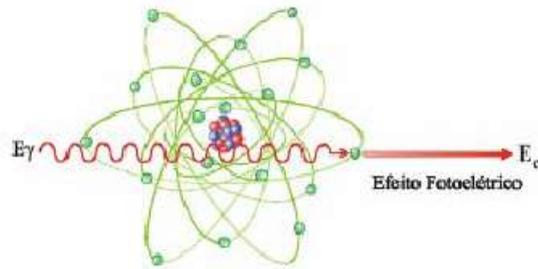


Figura 2.1 - Representação do efeito fotoelétrico (TAUHATA, 2003)

A direção de saída do fotoelétron em relação à de incidência do fóton varia com a energia. Para altas energias (acima de 3 MeV), a probabilidade do elétron sair na direção e sentido do fóton é alta, para baixas energias (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de 70° .

Isto se dá devido a ação dos campos elétrico e magnético que, variando na direção perpendicular à de propagação do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de 90° , e se compõe com o momento angular do elétron (TAUHATA, 2003).

O efeito fotoelétrico é predominante para elementos químicos com valor elevado de número atômico Z e para baixas energias. A probabilidade desta interação ocorrer aumenta com Z^4 e decresce rapidamente com o aumento da energia (TAUHATA, 2003).

2.1.1.2. Efeito Compton

No efeito Compton, o fóton é espalhado por um elétron de baixa energia de ligação, que recebe somente parte de sua energia, continuando sua trajetória dentro do material em outra direção. Um esquema representativo deste processo está apresentado na Figura 2.2. Como a transferência de energia depende da direção do elétron emergente e esta é aleatória, de um fóton de energia fixa podem resultar elétrons com energia variável, com valores de zero até um valor máximo. Assim, a informação associada ao elétron emergente é desinteressante sob o ponto de vista da detecção da energia do fóton

incidente. Sua distribuição no espectro de contagem é aleatória, aproximadamente retangular (TAUHATA, 2003).

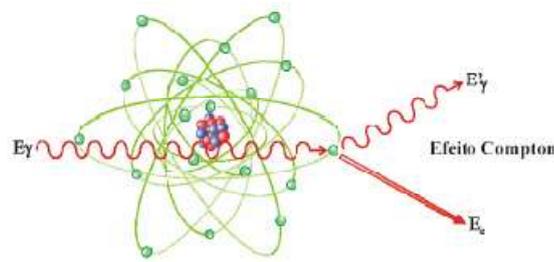


Figura 2.2 - Representação do efeito Compton (TAUHATA, 2003)

Quando a energia de ligação dos elétrons orbitais se torna desprezível face à energia do fóton incidente, a probabilidade de ocorrência de espalhamento Compton aumenta consideravelmente.

2.1.1.3. Formação de Par

A produção de pares ocorre quando um fóton de alta energia interage com o núcleo de um átomo de número atômico elevado. O fóton é absorvido, e a energia é convertida em um elétron e um pósitron que apresentam certa energia cinética (E_c) como mostra a figura 2.3. A produção de pares tem um limiar de energia de 1,022 MeV, que é a energia requerida para produzir um par elétron (511 keV) e pósitron (511 keV). As duas partículas transferem a sua energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a dois fótons, cada um com energia de 511 keV (KNOLL, 2000).

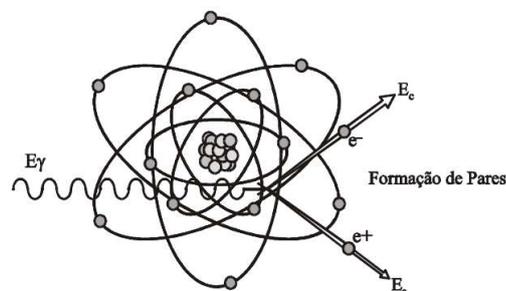


Figura 2.3 - Representação da formação de par (TAUHATA, 2003)

2.1.1.4. Importância relativa dos efeitos: fotoelétrico, compton e formação de par

As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando o efeito predominante (TAUHATA, 2003).

Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico.

Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons. A Figura 2.4 mostra a variação da participação de cada um desses processos para a variação de Z e da energia dos fótons (TAUHATA, 2003).

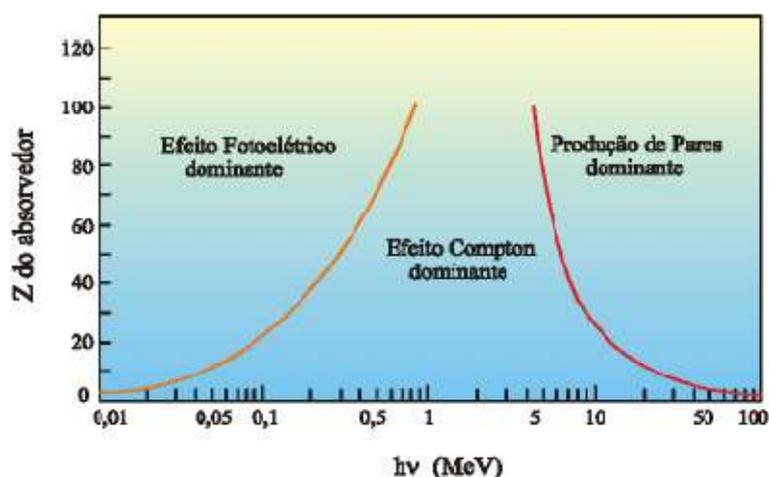


Figura 2.4 - Importância relativa dos efeitos fotoelétrico, Compton e Formação de Par (TAUHATA et al., 2003)

2.1.2. Formação da Imagem Radiográfica

A radiografia é o resultado do uso da radiação para reproduzir a imagem de um objeto em um material fotossensível. Quanto mais denso e espesso for esse objeto, maior será a probabilidade dos fótons do feixe de interagirem com os seus átomos, resultando em um índice menor de transmissão de fótons. Portanto, conforme o feixe emerge do objeto a ser inspecionado, haverá uma variação na intensidade do feixe

transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação (ANDREUCCI, 2008).

Quando um feixe de radiação X ou gama incide sobre um material de espessura x , parte do feixe é espalhada, parte é absorvida pelos processos já descritos no item 2.1.1 e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade I do feixe emergente está associada à intensidade I_0 do feixe incidente, pela equação 2.2 (TAUHATA, 2003).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Onde I_0 é a intensidade da fonte de radiação, I é a intensidade da radiação após atravessar o material de espessura x , e μ é o coeficiente total de absorção do material, definida como a soma dos coeficientes κ , σ e τ , os quais representam a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares, respectivamente.

A Figura 2.5 mostra um esquema de como ocorre o processo radiográfico. A descontinuidade aparece no detector devido à variação entre as intensidades da radiação que passa através da parte homogênea do corpo e através da falha. A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação μ no material e μ_d na falha, aumenta com o aumento entre a diferença das densidades do objeto com e sem descontinuidade.

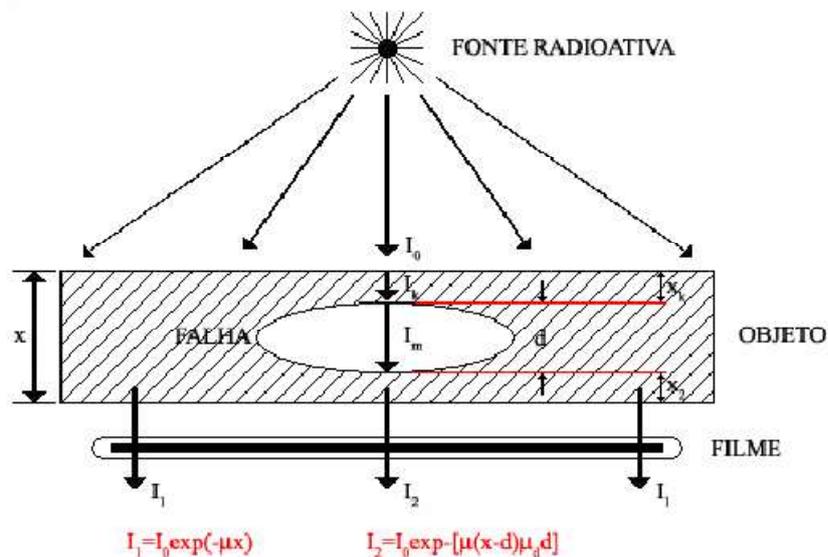


Figura 2.5 - Processo radiográfico (OLIVEIRA, 2010)

2.2. Termo Fonte

2.2.1. Radiação X

Os raios X originam-se da eletrosfera do átomo e são gerados quando elétrons são acelerados por um campo elétrico em direção a um alvo e ao interagirem com o alvo são desacelerados e tem a maior parte da sua energia cinética dissipada em calor, sendo o restante transformado em energia eletromagnética.

Os raios X utilizados em ensaios não destrutivos são produzidos em tubos de raios X. Esse tubo, como mostra a figura 2.6 esquemática abaixo, é basicamente composto por uma ampola de vidro isolada em vácuo, um catodo (filamento) e um anodo (alvo) que pode ser giratório ou não. O tubo fica contido em uma carcaça que o protege e provê blindagem contra radiação. Esta carcaça contém um banho de óleo para fornecer isolamento elétrico e auxiliar a refrigeração do tubo.

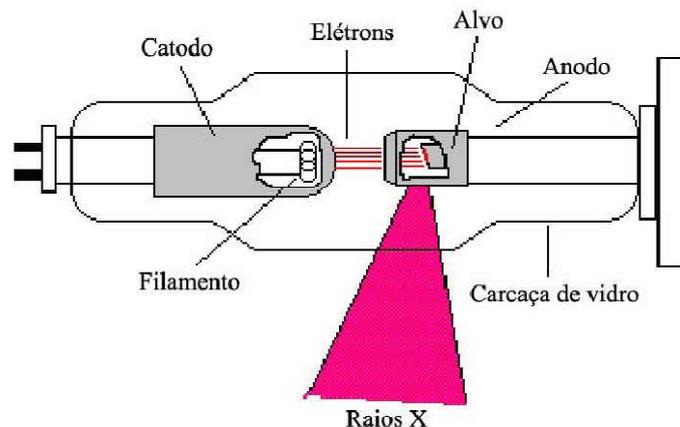


Figura 2-6 – Componentes Básicos de um tubo de raios X (ANDREUCCI, 2003)

O catodo é o lado negativamente carregado contendo o filamento que serve como fonte de elétrons e é usualmente feito de tungstênio enrolado em forma de bobina. A maioria dos tubos tem dois filamentos para permitir a escolha de dois tamanhos de ponto focal. Um copo de foco cerca o filamento e ajuda a direcionar os elétrons em direção ao alvo. A alta resistência no filamento proporciona as temperaturas subirem ($>2200^{\circ}\text{C}$), resultando na emissão termiônica de elétrons (UNESP, 2016).

O anodo é o lado positivo do tubo, é um condutor elétrico e serve de apoio mecânico para o alvo. O anodo deve ser um bom condutor térmico, pois mais de 99% da energia cinética proveniente das interações dos elétrons com o alvo é convertida em calor. Anodos estacionários são usados em unidades de raios X portáteis. Equipamentos maiores usam anodos giratórios o que aumenta bastante a área do alvo e eleva a capacidade de dissipar calor (UNESP, 2016).

Os elétrons acelerados na direção do anodo ganham energia cinética determinada somente pelo valor da tensão aplicada, e ao interagirem com os átomos do material alvo do catodo perdem energia rapidamente por ionização e excitação. Os raios X são gerados por dois processos diferentes conhecidos por bremsstrahlung e produção de raios X característicos.

Os raios X de bremsstrahlung (radiação de frenamento) são produzidos quando os elétrons incidentes com uma energia inicial E_1 passam próximos a um núcleo atômico. A força atrativa do núcleo positivamente carregado obriga o elétron a mudar de direção e perder energia. O elétron agora tem uma energia mais baixa E_2 . A diferença de energia ($E_1 - E_2$) é liberada como um fóton de raios-X. Esses raios X apresentam um espectro contínuo de radiação, até uma energia máxima determinada pela energia cinética máxima do elétron incidente numericamente igual à tensão aplicada ao tubo de raios X (KNOLL, 2000).

Os raios X característicos são produzidos quando um elétron incidente interage com um elétron de uma camada interna do átomo do material alvo e ambos são ejetados. Quando um dos elétrons da camada externa se move para preencher a vacância da camada interna, o excesso de energia é emitido como radiação característica. Esse tipo de raios X apresenta um espectro discreto de energia. Algumas vezes o excesso de energia pode ser emitido na forma de elétrons Auger ao invés de radiação característica (KNOLL, 2000).

Podemos observar que o espectro de raios X é formado por duas partes distintas e combinadas: uma contínua devido aos raios X de bremsstrahlung e outra em linhas discretas. A Figura 2.7 mostra um esquema de um espectro de raios X. Nela, o termo k_α representa a transição do elétron da camada L para a K e k_β a transição do elétron da camada M para a K.

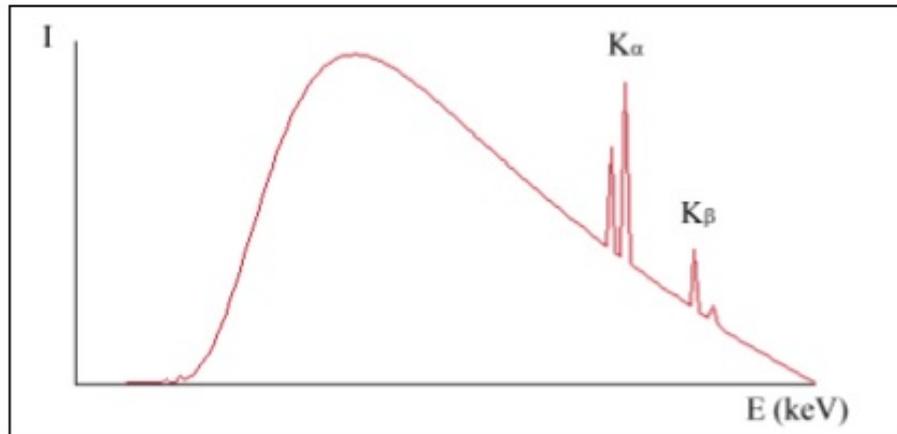


Figura 2-7. Espectro de radiação contínua com os picos característicos (OLIVEIRA 2010)

2.3. Radiografia digital

A descoberta do fenômeno da luminescência fotoestimulável se deu há mais de um século, no entanto, ficou por várias décadas relegada à condição de curiosidade científica pelo fato até então não haver aplicações práticas. Somente na década de 40, quando foram conduzidas várias experiências em busca de aplicações práticas voltadas, principalmente, para interesses militares, o interesse no fenômeno foi renovado, porém não se deu sequência a esse trabalho, possivelmente por não se dispor na época da tecnologia do computador.

A radiografia digital computadorizada teve sua primeira aplicação em 1975, quando George Luckey desenvolveu a placa flexível de fósforo para armazenamento de imagem na Eastman Kodak Company. Ainda em 1975, o primeiro sistema de fósforo de armazenamento escaneado foi patenteado, no que deu origem à moderna radiografia computadorizada. Porém, o primeiro sistema que empregava a tecnologia de fósforo de armazenamento foi comercializado somente em 1983, e desde então sua aceitação passou a ter um crescimento constante, primeiramente na área médica no final da década de 80 e, posteriormente, na comunidade industrial. No ano 2000 a radiografia computadorizada foi utilizada no Brasil em refinarias para avaliar a integridade de tubulações e em trocadores de calor para avaliação do estado de corrosão. Em operações onde o produto transportado passa por tubulações, como é o caso de refinarias, plantas químicas entre outras, é fundamental que seja realizado o monitoramento em serviço destes componentes para se ter um nível de confiança adequado para o bom funcionamento das instalações.

A utilização da radiografia digital abre um leque de oportunidades para aplicações em novos segmentos nos quais, ainda hoje, a radiografia convencional é utilizada, e a procura por sistemas de inspeção totalmente automatizados tem sido cada vez maior, em busca de se aumentar a segurança e a confiabilidade dos laudos emitidos em peças críticas, além do aumento da produtividade.

2.3.1. Vantagens

A radiografia digital apresenta uma série de vantagens quando comparada aos sistemas analógicos. Essas vantagens podem ser divididas em: facilidade de exibição da imagem, redução das doses de raios X, facilidade no processamento de imagem, facilidade de aquisição, armazenamento e recuperação da imagem (**MOREIRA, 2007**).

A primeira vantagem da radiografia digital é que a imagem pode ser mostrada em um monitor, diferentemente do processo tradicional de expor o filme contra a luz. O mapeamento da imagem em níveis de brilho em um monitor pode ser totalmente controlado pelo observador.

Alternativamente, a gama total de intensidade pode ser usada para exibir uma parte dos valores de pixel, aumentando, assim, o contraste na região de interesse. Desta forma, toda a operação é simplificada desde a obtenção da imagem até o tempo de ciclo para se obter, avaliar e arquivar cada imagem em comparação às radiografias convencionais (**MOREIRA, 2007**).

A segunda vantagem da radiografia digital é a redução da exposição a raios X a que o operador fica sujeito, sendo possível usar tanto baixas energias como um tempo menor de exposição. Sendo a relação sinal/ruído satisfatória, qualquer perda em contraste pode ser recuperada usando técnicas digitais de processamento de imagem (**ROCHA, 2003**).

A terceira vantagem da radiografia digital é a possibilidade do processamento digital de imagem. Podem ser utilizadas como técnicas digitais o aumento do contraste ou a equalização por histogramas. Uma maior gama de pesquisas na imagem pode ser realizada resultando em uma diminuição da possibilidade de erros, aumentando a qualidade do laudo que é dado. Muitas vezes, para que pequenos detalhes possam ser vistos, são utilizados filtros que possibilitam a visualização destes que, comparados com

a técnica analógica, poderiam não ser percebidos. Nestes casos, o uso de aplicativos de avaliação automático de imagem podem ser aplicados (ROCHA, 2003).

A quarta vantagem é a possibilidade da obtenção da imagem através do armazenamento em bases de dados eletrônicos, facilitando a pesquisa e permitindo a transmissão para longas distâncias, pela utilização de redes de comunicação de dados, sem a necessidade de espera para o processamento do filme.

A norma ASTM E 2339 “Standard practice for digital imaging and communication in non destructive evaluation” (DICONDE) estabelece as regras para transferências de dados entre sistemas e organização dos dados das imagens sem perda da informação (ASTM E 2339, 2015).

Outro fator importante é a eliminação de processadoras, secadoras, grandes salas para processamento e armazenamento de filmes, assim como a redução do impacto ambiental com a eliminação de produtos químicos e rejeitos, conforme apresentado na Figura 2.8. No caso dos detectores planos há ainda a vantagem de se eliminar a necessidade de o operador entrar na área de risco, devido à automação existente.



(a) Químicos

(b) Embalagens plásticas

Figura 2.8 – Rejeitos da radiografia convencional

Além dessas vantagens pode-se destacar o fator econômico, uma vez que os detectores planos podem ser reutilizados milhares de vezes, desde que sua manipulação seja adequada para que não haja desgaste físico do mesmo, além da associação das vantagens mencionadas com fatores de custo envolvidos dos materiais, processos, etc. Foi demonstrado que com o uso dos detectores planos na aplicação industrial pode-se chegar a uma economia de cerca de 60% do custo total por exposição em relação ao uso de filmes (BOIY, 2006; DIAMOND, 2006).

A Tabela 2.1 apresenta os números comparativos entre as técnicas utilizando filme, CR e DR.

Tabela 2.1 – Custo total entre as técnicas (BOIY, 2006)

RESUMO DOS CUSTOS		FILME - CR - DR		
Item	Filme	CR	DR	
Recursos para RX	1,8	1,0	0,9	
Recursos para diagnósticos	1,8	1,2	0,9	
Equipamentos	2,0	1,0	1,0	
Economia anual, Euro			352.806 - 61%	
Custo por exposição	8,6	3,8	3,3	

A Tabela 2.2 mostra uma comparação típica entre os métodos com o uso de filme, Radiografia Computadorizada (CR) e Radiografia Digital (DR).

Tabela 2.2 – Características técnicas típicas de filmes, CR e DR filmes (BOIY, 2006; DIAMOND, 2006).

CARATERÍSTICAS TÍPICAS ENTRE FILME, CR e DR			
Propriedades	Filme	CR	DR
Velocidade:	Lenta	Média	Rápida
Resolução Espacial:	10-50 μm	50-250 μm	50-400 μm
SNR:	50-250	100-250	250-2.000
Faixa Dinâmica:	256:1	>4.000:1	>4.000:1
Custo do Investimento:	Baixo	Moderado	Moderado para Alto
Custo de operação:	Alto	Moderado	Baixo
Portabilidade:	Alta	Alta	Moderada
Reutilização:	1	1000-10.000	10.000 a 1.000.000
Robustez Mecânica:	Excelente	Média	Média para baixa
Dimensões:	Vários	Vários	Limitados

Outra vantagem desta metodologia é a possibilidade da integração total do ambiente com as imagens das radiografias digitais, e assim agregar melhorias da eficiência dos processos e da gestão de todas as imagens. O sistema pode ser idealizado

de forma a criar uma rede local e com acesso remoto via intranet e internet (FARMAN, 2009).

Um ambiente totalmente digital começa com as aquisições das imagens pelo detector plano, seguido de avaliação e arquivo pelo inspetor nível 2 das imagens das radiografias digitais, incluindo o uso de gráficos estatísticos de controle e imagens fotográficas de irregularidades superficiais visíveis (NBR ISO 9712, 2014). O sistema permite o compartilhamento das imagens para utilização nas análises do progresso de soldagem, pesquisa e desenvolvimento, nas reuniões, palestras e conferência em qualquer parte do mundo, além de um monitoramento remoto pelo inspetor nível 3 responsável. Permite ainda que o engenheiro de solda prepare os planos para reparos e avaliações dos defeitos, além do acesso das imagens pelos inspetores do cliente, auditores, laboratórios, servindo de apoio para discussão dos especialistas.

Um dos resultados mais poderosos da tecnologia integrada e o potencial para organizar as imagens em um formato que está disponível para treinamento e capacitação de inspetores, em tempo real. Com a tecnologia digital, o engenheiro de solda pode ver as imagens e o procedimento de soldagem em qualquer local que tenha uma estação de trabalho. Isso lhe permite o acesso imediato às imagens de defeitos e, se ele estiver conectado a Internet, ele poderá compartilhar as informações, reduzindo significativamente o tempo necessário para discussão com os responsáveis pelo processo, gerentes e mesmo clientes. O tipo de ligação pode ser com ou sem fios usando transmissão de rádio frequência (RF) ou Bluetooth. O monitor deve ser de alta resolução com uma ampla capacidade de contraste de tons de cinza.

A alta sensibilidade radiográfica dos detectores digitais (*Flat Panels*) os permite detectar radiações a baixos níveis, sendo capazes de formar imagem com tempo de exposição inferior ao de filmes convencionais. Este fato, entretanto, os torna altamente vulneráveis a radiações espalhadas, as quais contribuem negativamente na qualidade da imagem (DITABIS, 2016).

As dimensões dos *Flat Panels* estão limitadas a alguns tamanhos específicos disponíveis no mercado, variando de acordo com cada fabricante e tipo da unidade de leitura do Detector Direto. Já com filmes convencionais, é possível a adaptação do seu tamanho às necessidades de cada ensaio.

Os *Flat Panels* têm menor sensibilidade à luz do que os filmes convencionais, podendo inclusive realizar radiografias sem chassis, desde que no local não haja luz excessiva.

Além disso, essas placas podem ser manipuladas antes da exposição em locais iluminados, enquanto que os filmes convencionais só podem ser manipulados em locais totalmente privados de luz.

2.4. Radiografia Digital Direta

Na Radiografia Direta a imagem do objeto inspecionado é formada e apresentada em tempo real na tela de um computador. Os detectores utilizados são comumente reportados na literatura como *Flat Panels*, ou painéis planos (MARINHO, RABELLO, et al, 2011).

A radiografia direta oferece imagem com alta velocidade. São obtidos tempos de exposição típicos de 10-25% dos praticados com filmes e faixas de velocidade de transferência de dados desde em tempo real até poucos segundos (EWERT, 2004).

Com este recurso, um único detector pode tomar o lugar de diversos filmes e ser utilizado com sistemas automáticos de manipulação. A realização de testes vêm demonstrando que os detectores planos têm obtido um desempenho melhor quando comparados a filmes no que se refere a detecção de defeitos finos e volumétricos. A Figura 2.9 apresenta o esquema de um detector plano.

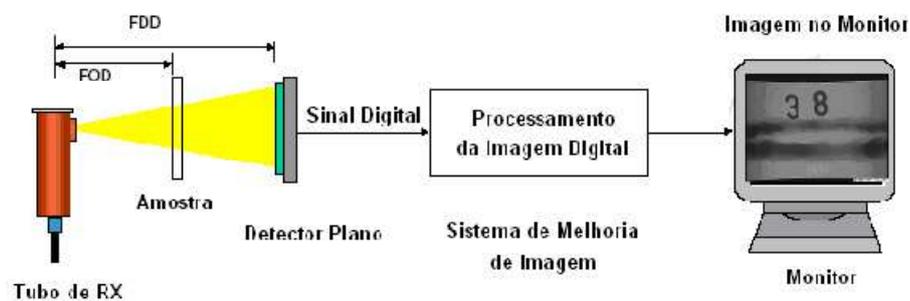


Figura 2.9 – Detector plano semicondutor (ANDREUCCI, 2003)

Os *Flat Panels* são fundamentalmente uma estrutura com uma grande área plana formada por detectores com circuitos integrados, capazes de realizar a captura de uma imagem por raios X e fazer a conversão desta para uma exibição no formato digital, sem a necessidade de algum tipo de manipulação de filmes. Esta matriz de detector é formada por milhões de pixels, e cada um desses atua como um detector individual, através de um tipo de conversão específica para cada material detector, como mostrado esquematicamente na Figura 2.10. A intensidade da radiação incidente é convertida por cada pixel para uma quantidade de carga proporcional à mesma.

Esta carga é responsável pela geração de um sinal, o qual é associado a um valor, dependente do número de bits, utilizado na escala de cinza e definido pelo sistema de imagens na estação de trabalho.

Basicamente a tecnologia da estrutura dos *Flat Panels* pode ser descrita em termos da conversão primária da radiação: conversão indireta (sensores de silício amorfo) e conversão direta (sensores selênio amorfo ou Cd-Te) e do mecanismo de leitura eletrônica: através de CCD's (Charge Coupled Detectors), tecnologia CMOS Complementary Metal Oxide Silicon) e filmes finos de transistores (TFT).

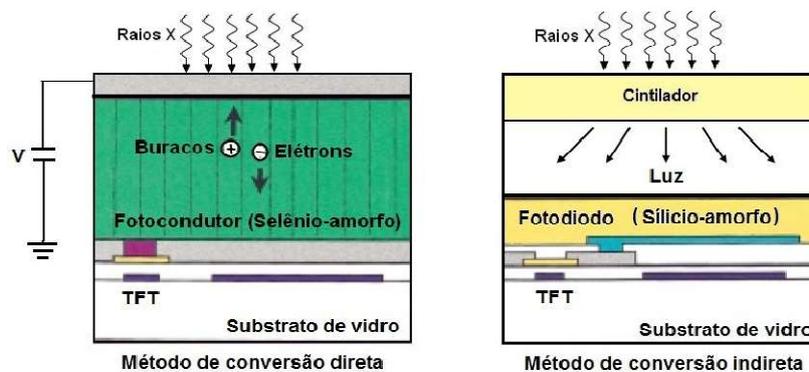


Figura 2.10. Configuração do método de conversão direto e indireto (ASAHINA, 2001)

2.4.1. Detector direto com conversão direta

Em detectores de selênio amorfo (a-Se) a radiação é convertida diretamente em cargas elétricas, sem geração de luz. Uma vantagem óbvia neste caso é que as cargas formadoras da imagem podem ser mais eficientemente direcionadas para a estrutura de eletrodos do que com o processo envolvendo a formação de luz (MARINHO, REBELLO, 2008; SILVA, 2010). O a-Se tem maior eficiência de absorção que a-Si,

requerendo doses menores no “objeto”, o que o torna a escolha ideal para a área médica. No entanto, a camada de selênio tem que ser consideravelmente espessa para garantir uma boa eficiência de absorção. A desvantagem é que o espalhamento da radiação e a divergência do feixe podem prejudicar a resolução espacial da imagem, que se situa em torno de $150\mu\text{m}$. Detectores de Cd-Te como base fotocondutiva apresentam o mesmo conceito dos painéis planos de selênio amorfo, e têm se mostrado a melhor perspectiva de tecnologia de conversão direta para a área industrial.

Isso se deve ao fato de que a espessura do filme de Cd-Te necessária para se obter uma boa eficiência de detecção é inferior à espessura de a-Se nas mesmas condições ($200\mu\text{m}$ vs 1mm).

No detector direto com conversão direta o material fotocondutor possui um número atômico elevado, e com suas características na interação com a radiação, ele não necessita de um cintilador para fazer a conversão da radiação em luz visível. O detector com conversão direta possui uma espessura menor que o detector de conversão indireta e permite trabalhar com médias e altas energias.

A Figura 2.11 mostra a seção transversal de um detector plano com dois pixels vizinhos, chamado Pixel 1 e Pixel 2. Uma radiação de intensidade X_1 incidente em um pixel, gerando uma carga Q_1 no fotocondutor, que é armazenado no capacitor C_1 do pixel. Quando o transistor (TFT) da porta do pixel é ativado, a carga Q_1 é lida e constitui a imagem daquele pixel de acordo com a variação da escala de cinza (número de bits do sistema) que é proporcional a intensidade do campo da radiação incidente.

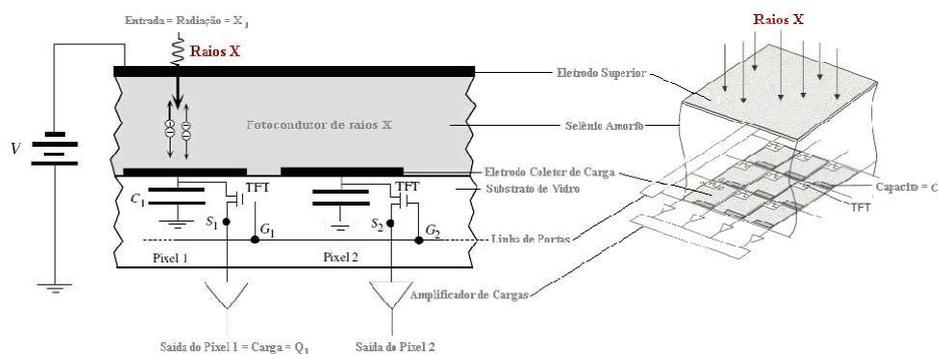


Figura 2.11. Diagrama esquemático simplificado da estrutura transversal de pixels de uma conversão direta com sensor de raios X (KASAP et al., 2006)

A conversão direta em detectores tem sido extensivamente analisada por diversos autores. A tecnologia TFT (Thin Film Transistor) é empregada para fabricação de dispositivos com mais de dois milhões de elementos detectores e neste componente cada elemento detector inclui um capacitor e um TFT. O TFT é um comutador de transistor de película fina, que é ativado quando uma voltagem é aplicada logo após a unidade conversora ser exposta aos raios X. Ao ser ativado pelo endereço do sinal a partir da unidade processadora de alta velocidade, essa carga acumulada é lida e direcionada para fora do capacitor como um sinal elétrico. A unidade de transferência de imagem digital é designada para compensar características inerentes do sinal digital e para transmitir imagens sequencialmente para a estação de trabalho (KASAP et al., 2006).

2.4.2. Detector direto com conversão indireta

O sucesso dessa tecnologia de conversão indireta está no fato do Silício Amorfo (a-Si) e o cintilador serem tecnologias bem entendidas. Neste trabalho utilizamos o detector de conversão indireta e definiremos com maior clareza seu funcionamento.

2.4.2.1. Princípio de operação

Foi utilizado neste trabalho um *Flat Panel* constituído de uma matriz de fotodiodos de silício amorfo com cintilador. De forma básica, o sistema de funcionamento deste tipo de *Flat Panel* tem início quando a película do cintilador recebe o feixe de raios X e, assim, o converte em luz, pelo efeito da fluorescência.

A luz é recebida pelos fotodiodos e convertida em sinal elétrico, que ativa cada pixel, o qual transfere a imagem para o sistema através de uma interface de alta velocidade.

Na Figura 2.12 é ilustrada a estrutura básica e o esquema de funcionamento de um *Flat Panel*.

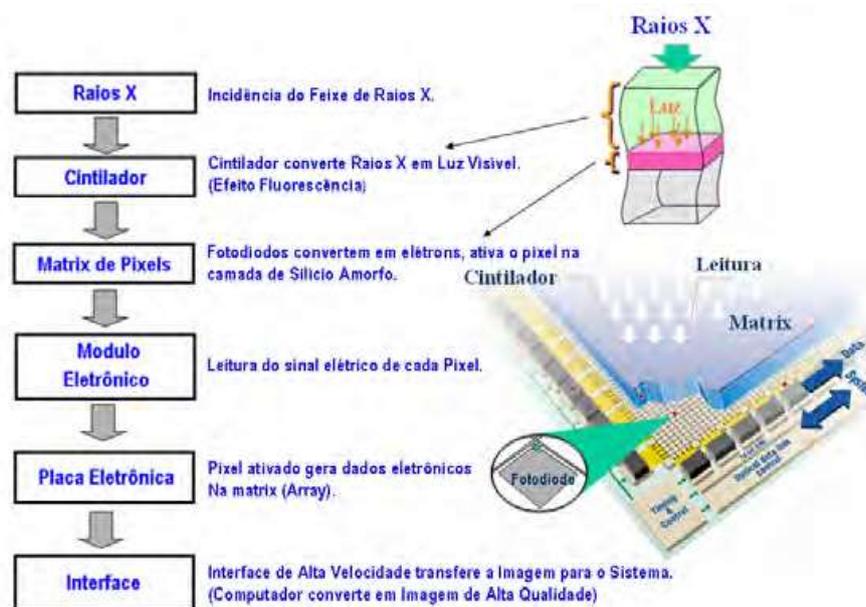
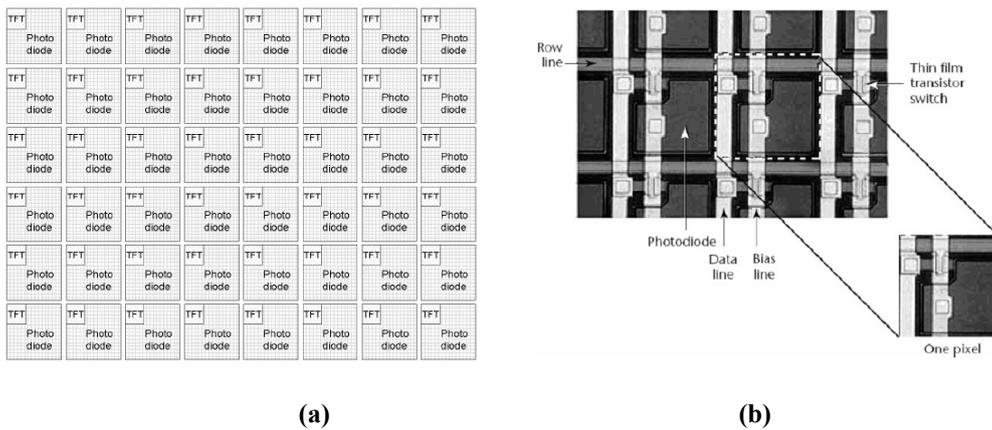


Figura 2.12 – Estrutura e funcionamento de um *Flat Panel* com cintilador (VARIAN, 2008)

2.4.2.2. Matriz de sensores de silício amorfo

Os detectores digitais de silício amorfo (a-Si) são os utilizados nas indústrias de eletrônicos, aeroespacial, automotiva e petroquímicas, pelo fato de apresentarem diversas vantagens sobre os filmes industriais, no que se refere ao ensaio radiográfico, como já visto no item 2.3.1. Esses detectores apresentam bom desempenho da relação sinal-ruído e produzem imagens com alto contraste, mesmo para curtos tempos de exposição.

O objetivo da matriz de sensores é acumular cargas geradas pela absorção de raios X e fornecê-las, linha por linha, durante a varredura, para os amplificadores de cargas. O componente de armazenamento de carga é um capacitor fotocondutor de aquisição de imagem ou uma matriz de fotodiodos usada com uma película de cintilador. A chave usada para permitir que a carga seja descarregada pode ser um diodo, um par de diodos ou um transistor de película fina (TFT). Na matriz mostrada na Figura 2.13, a chave utilizada é um transistor de película fina (TFT ou thin-film transistor). O TFT é feito pelo depósito de lamina finas para os contatos metálicos.



(a)

(b)

Figura 2.13 (VARIAN, 2008)

(a) Matriz de sensores de silício amorfo.

(b) Fotomicrografia identificando um pixel.

Em operação, todos os fotodiodos têm a polaridade revertida pela aplicação de uma tensão externa. Enquanto as chaves TFT são desligadas, a carga gerada pela luz emitida pelo cintilador acumula nos diodos. Quando se necessita a leitura, uma linha de registro e energizada para ligar as chaves nessa linha. As cargas de todos os fotodiodos da linha selecionada são descarregadas simultaneamente por meio das linhas de dados. O esquema dos componentes principais encontra-se apresentado na Figura 2.14. Em grandes matrizes, são produzidos milhares de sinais que devem ser lidos de forma organizada para que a informação de cada um deles represente a posição correta do pixel. Normalmente a varredura é feita de forma progressiva.

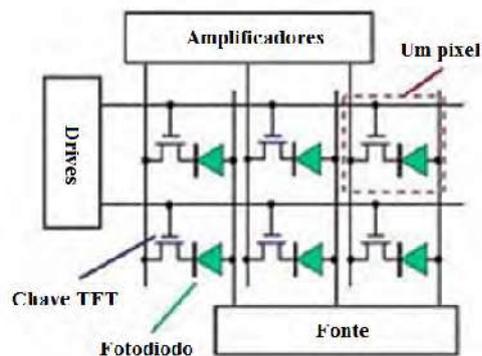


Figura 2.14 - Diagrama do circuito de uma matriz de sensores de silício amorfo (VARIAN SYSTEM, 2010)

Um objetivo importante no projeto da matriz de sensores é maximizar a área da imagem que é detectada pelo fotodiodo (alto "fator de enchimento"), de tal forma que seja perdida somente uma quantidade mínima de luz. Os sinais são transportados por linhas finas de metais.

2.4.2.3. Métodos de conversão dos Raios X

Três métodos para converter os raios X em carga para leitura eletrônica podem ser utilizados nos silícios amorfos. São estes os métodos: intrínseco, fotocondutor e o de cintilador. Em todos os três métodos, a carga é acumulada durante um tempo antes de ser lida. O método mais adequado a área industrial para inspeção de soldas e o método do cintilador devido as suas características.

2.4.2.4. O método cintilador

Um cintilador é um composto que absorve os raios X e converte a energia em luz visível. Um bom cintilador produz muitos fótons de luz para cada fóton de raios X recebido, ou seja, de 20 a 50 fótons visíveis são produzidos por 1 kV de energia de raios X. Cintiladores normalmente são compostos por um material de elevado número atômico, que tem alta absorção de raios X, e um ativador de baixa concentração para facilitar a emissão de fótons visíveis. Cintiladores podem ser granulares como o fósforo ou o iodeto de césio (CsI, Cesium Iodide).

Na Figura 2.15 são mostrados os comportamentos destes cintiladores em termos de quantidade e forma de emissão da luz quando sensibilizados pelos raios X.

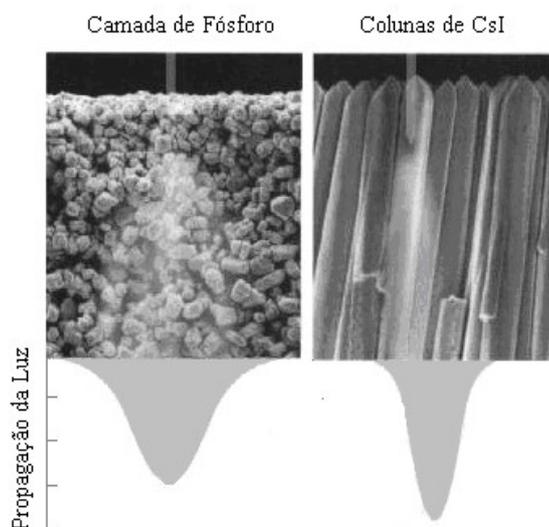


Figura 2.15. Conversão da luz pelos cintiladores de Fósforo e CsI (MOREIRA, 2010)

2.4.2.5. Cintilador de fósforo Oxissulfato de Gadolínio (Gd_2O_2S – “GOS”)

Os fósforos são materiais que emitem fótons em um comprimento de ondas com intensidade de luz visível quando tais compostos são expostos a radiação. Para a intensidade de luz ter o máximo de eficiência, os fósforos utilizados no processamento de imagens de raios X são feitos de oxulfatos de terras raras, dopados com outras Terras Raras, como exemplo o Térbio. Um dos mais comuns é o Oxissulfato de Gadolínio (Gd_2O_2S) dopados com Térbio e emissor de luz verde. Vários tamanhos de grãos, espessuras de material e misturas químicas são utilizados para produzir uma variedade de resolução e de intensidade de luz. Estes materiais foram desenvolvidos para aplicações em filmes radiográficos e atualmente são utilizados em matrizes de fotodiodos de silício amorfo para aumentar a qualidade em sensibilidade assim como nos filmes.

2.4.2.6. Cintilador de Iodeto de Césio (CsI)

Para uma melhor combinação de resolução e brilho é utilizado o iodeto de césio. CsI tem a propriedade de crescer como uma matriz densa de agulhas finas (10 a 20 microm de diâmetro). Isso produz cristais que atuam como tubos de luz para os fótons visíveis, gerados próximos a camada do lado da entrada, aceitando camadas muito

espessas (até 1 mm) para serem utilizadas como uma excelente solução para manter a resolução. Devido ao césio ter um alto número atômico, ele é um excelente absorvedor de raios X. E assim ele se torna muito eficiente a este tipo de radiação. A combinação de CsI e silício amorfo tem a DQE mais alta de todos os materiais produzidos atualmente. O esquema do uso do cintilador de CsI está mostrado na Figura 2.16 (MOREIRA, 2010).

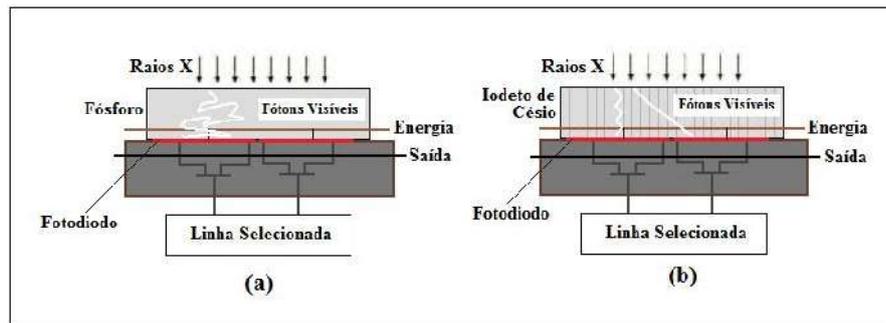


Figura 2.16. Estrutura de um cintilador. (a) de fósforo (b) Iodeto de Césio (CsI) (CHABBAL, 2002)

2.4.3. Mecanismo de leitura eletrônica

Flat Panels baseados na tecnologia CMOS têm cada pixel configurado com seu próprio amplificador, o que representa um enorme ganho sobre a tecnologia CCD, por exemplo, na qual um amplificador é disponível apenas para cada linha de pixels na matriz. Isso quer dizer que, como os CCD's, eles são formados por silício cristalino, mas a estrutura de leitura é individualmente endereçada. O projeto de um sensor CMOS permite, ainda, que o controle eletrônico seja localizado diretamente em cada pixel, ao invés de utilizar um circuito paralelo para executar esta função, como no caso dos *Flat Panels* de a-Si. Estas particularidades trazem vantagens como: maior robustez do detector, melhor resolução espacial básica (atinge-se até 80 μ m), maior capacidade de detecção de fótons e menor probabilidade de ocorrência de bad pixels. CMOS é a melhor tecnologia, mas a fabricação é mais complexa, e com isso apresenta algumas desvantagens como o fato de proporcionar detectores de pequena área comparativamente aos *Flat Panels* de a-Si (BRUNETTI, CESAREO, 2007).

2.5. Aplicações atuais da Radiografia Digital

Atualmente o uso da radiografia digital tem sido adotado por diversas áreas e aplicações. A tecnologia digital vem sendo adaptada dia a dia e tem agregado muitas melhorias, tanto na qualidade da imagem, na rapidez dos laudos, como na redução das doses recebidas pelos pacientes, órgãos, operadores, radiólogos, etc. Na Figura 2.17 são representadas mais aplicações da radiografia digital, nos mais variados segmentos.

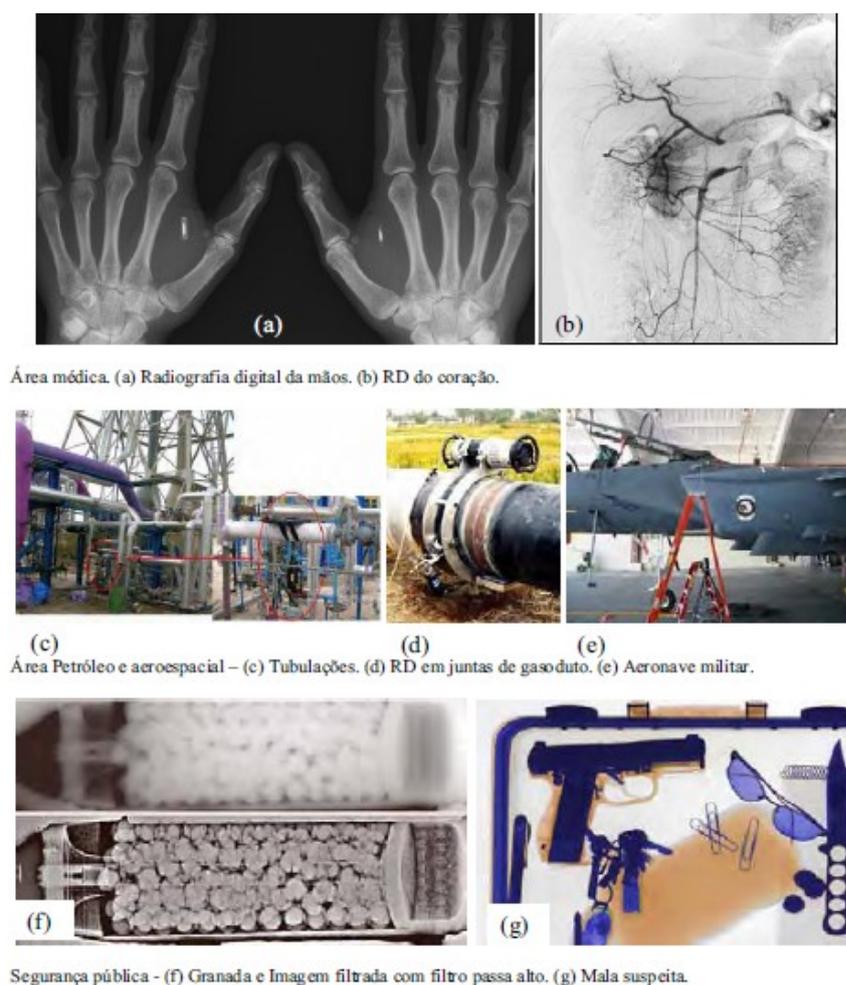


Figura 2.17. Aplicações da radiografia digital (PINCU; JEWELL, 2005)

2.6. Imagem Digital

A imagem digital consiste em uma matriz onde cada elemento, ou pixel, é representado por um valor numérico que simboliza uma tonalidade de cor. A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados bits, que podem assumir

os valores 0 ou 1. Um conjunto de bits chama-se byte. Os bits e bytes são usados para representar os pixels da imagem digital. Diferentes configurações de bytes representam as diversas tonalidades dos pixels (CORREA, 2005).

A Figura 2.18 mostra o relacionamento entre as configurações de bytes, valores de pixel e tonalidades de cinza.

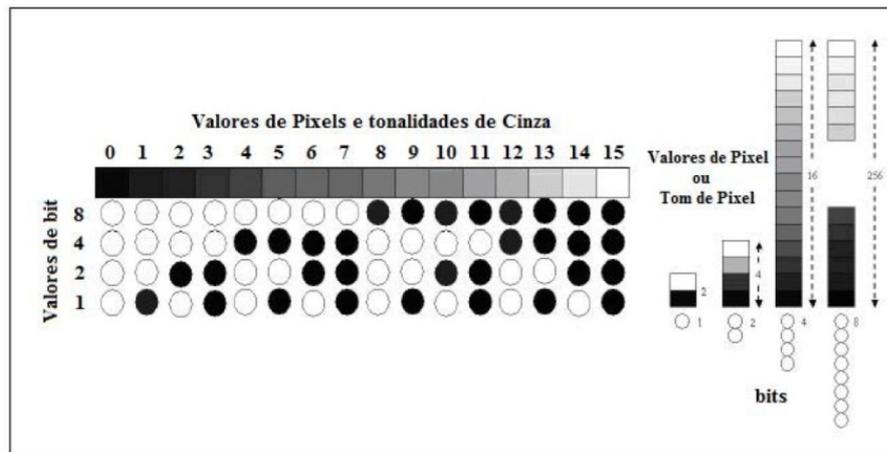


Figura 2.18. Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza (OLIVEIRA, 2010)

Na Figura 2.19 (a) até (d) observa-se uma imagem radiográfica obtida depois da interação do feixe de raios X com um objeto Figura 2.19 (a) e a imagem subdividida em uma grade esquemática de pixels Figura 2.19 (b). Na Figura 2.19 (c) é mostrada a representação numérica dos valores de cada pixel correspondente aos níveis de cinza, conforme intensidades de radiação recebida em cada pixel, e na Figura 2.19 (d) a imagem digital correspondente é mostrada na tela do computador, onde cada pixel do sensor corresponde a um pixel na tela do monitor.

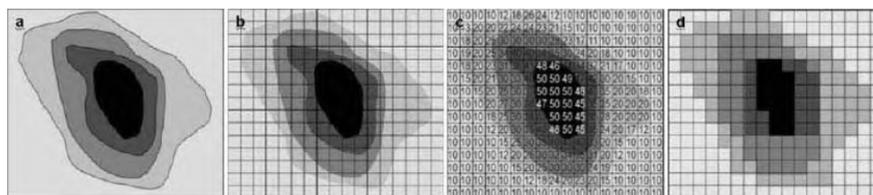


Figura 2.19. Conceito de uma imagem digital (VAN DER STELT, 2005)

O tamanho numérico de uma imagem (número de bytes) determina o espaço no disco ou computador utilizado para guardá-la. A maior parte dos sistemas de aquisição de imagens digitais trabalha com bytes de oito bits.

2.7. Qualidade da Imagem

2.7.1. Resolução Espacial

A resolução espacial é definida como sendo a menor separação entre dois pontos da imagem que podem ser distinguíveis ou visualizados, ou simplesmente o nível de detalhes que se pode ver numa imagem, e é um dos principais parâmetros que afetam a qualidade da imagem digital (OLIVEIRA, 2010).

A resolução espacial depende das propriedades do sistema onde está sendo gerada a imagem, e não apenas da resolução de pixel em pixel por polegada (ppi). Para fins práticos, a “clareza” da imagem é definida pela sua resolução espacial e não pelo número de pixels. De fato, a resolução espacial refere-se ao número de valores de pixel independentes por unidade de comprimento.

A resolução espacial básica, em μm , de um sistema de radiografia digital de matriz de detectores corresponde ao tamanho de pixel efetivo, sendo o menor detalhe resolvido perpendicularmente à direção de incidência do feixe de radiação. Este parâmetro é medido pelo método do IQI de fio duplo devido à sua simplicidade, e que inicialmente determina o valor da penumbra geométrica da imagem (U_g).

Após, o valor da resolução espacial básica BSR é obtido pela equação 2.3.

$$BSR = \frac{1}{2} U_g \quad (\text{Equação 2.3})$$

2.7.2. Relação entre Resolução e Tamanho dos Pixels

O tamanho e a quantidade de pixels de uma imagem são fatores determinantes para a análise de detalhes em uma imagem digital. Desde que cada pixel tenha somente um valor numérico ou escala de cinza, não é possível ver qualquer detalhe com apenas um

pixel, uma vez que todas as estruturas dentro da área coberta por este pixel serão representadas por um único valor numérico ou escala de cinza. Conseqüentemente, boa resolução requer pixels pequenos que são obtidos por selecionar matrizes de grandes dimensões (OLIVEIRA, 2007).

Outro fator importante é o número de bits usados para representar cada pixel.

Este fator afeta o número de escalas de cinza ou níveis de nitidez que podem ser amostrados: quanto maior o número de bits por pixel, maior será a escala de tons de cinza, ou níveis de brilho da imagem (OLIVEIRA, 2007).

A resolução espacial de uma imagem radiográfica está atrelada a uma série de fatores, que contribuem para uma degradação do sinal, causando uma perda de definição na imagem (desfocagem geométrica), como a seguir:

2.7.3. Contraste

Contraste é o grau de diferenciação entre duas estruturas adjacentes, e sua função é tornar visíveis as interfaces e estruturas do objeto inspecionado. O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em três tipos: Contraste do objeto, do sujeito e da imagem (SPRAWLS, 1995; CORREA, 2005).

2.7.3.1. Contraste do objeto

Para um objeto ser visível em uma imagem radiográfica, este objeto deve possuir contraste físico em relação ao meio no qual está inserido. Este contraste, denominado contraste do objeto, é função da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto em relação ao meio. O contraste do objeto é proporcional ao produto de sua densidade e espessura (SPRAWLS, 1995).

2.7.3.2. Contraste do sujeito

Após a interação da radiação com diferentes estruturas do corpo, emerge destas uma radiação cuja distribuição em energia é diferente daquela que penetrou no corpo, devido ao fato de, no trajeto haver estruturas de características diferenciadas. A

essa nova distribuição de energias que compõem o feixe dá-se o nome de imagem área (SILVA, LAMMOGLIA, HERDADE, et al. 2000).

A partir disso, pode-se definir uma grandeza bastante útil quando se trata da produção de uma imagem: o contraste do sujeito. O contraste do sujeito é a diferença na exposição entre vários pontos dentro da imagem área. Este é afetado, além do contraste do objeto, pelos fatores que influem na qualidade da radiação, tais como a tensão aplicada, o material do ânodo, o ripple e a filtração (SPRAWLS, 1995).

2.7.3.3. Contraste da imagem

O contraste da imagem radiográfica depende basicamente das características das estruturas do objeto a ser inspecionado, como densidade e espessura, da distribuição de energia dos fótons, da intensidade de fótons que emergem do objeto, das características do filme e do processamento da imagem. Na Figura 2.20 são mostrados os estágios de formação do contraste da imagem.

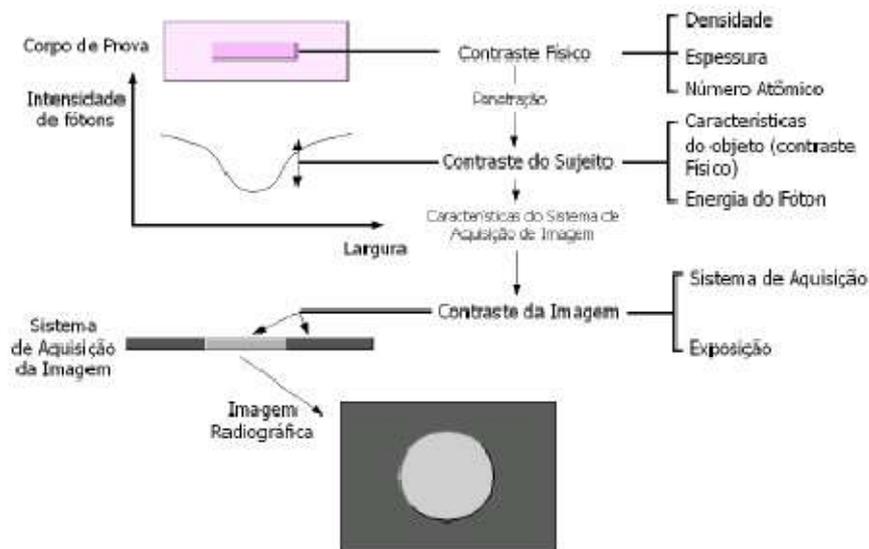


Figura 2.20. Estágios de formação do contraste da imagem (SPRAWLS, 1995)

2.7.4. Nitidez da Imagem

A nitidez da imagem está associada com o grau de visualização de detalhes e é demonstrada pela clareza de linhas estruturais finas e pelas bordas de estruturas visíveis na imagem radiográfica. A insuficiência de detalhes ou definição é conhecida como “borramento” da imagem. Uma imagem é considerada ideal quando cada ponto dentro do objeto inspecionado é representado por um pequeno e bem definido ponto na imagem. No entanto, na prática, isto não acontece. As representações geométricas de estruturas, na imagem, sempre estão associadas a um grau de “borramento” (SPRAWLS, 1995).

2.8. Razão Sinal-Ruído (SNR)

O ruído em um sistema eletrônico ou digital é qualquer sinal indesejado que interfere na detecção ou processamento do sinal desejado.

Este ruído degrada o desempenho do sistema. Então, é importante determinar a razão entre o sinal desejado e o indesejado, ou a relação sinal-ruído. Quanto maior for a razão sinal-ruído, maior qualidade de visualização de detalhes a imagem apresentará.

Em uma imagem digital, a razão sinal-ruído pode ser calculada através razão entre a média de certa região da imagem e seu respectivo desvio padrão, obtidos através dos programas de processamento de imagem. A razão sinal ruído é calculada pela equação 2.4.

$$SNR = S/\sigma \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (\text{Equação 2.5})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_{i,j} - \bar{X})^2}{(ixj) - 1}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

onde i e j são respectivamente o número de linhas e colunas da área utilizada para determinar a SNR, e $X_{i,j}$ são os valores de intensidade de cada ponto.

A eficiência de detecção quântica (DQE – Detective Quantum Efficiency) é um fator que indica a eficiência de como a informação da imagem detectada é transmitida e mostrada como imagem final. Ela é definida como a razão entre o quadrado da relação sinal-ruído da saída sobre o quadrado da relação sinal-ruído da entrada e seu valor é sempre inferior a 100 %, como visualizado na Equação 2.7 (OLIVEIRA, 2010).

$$DQE = \frac{(SNR_{saída})^2}{(SNR_{entrada})^2} \quad \text{(Equação 2.7)}$$

2.9. Relação Sinal-Ruído Normalizado (SNR_N)

A Relação Sinal-Ruído Normalizada pode ser representada como a relação entre o valor médio da intensidade do sinal dividido pelo desvio padrão do ruído do sinal nesta intensidade e está em função da resolução espacial básica. Esta intensidade representa o valor numérico de um pixel na imagem, sendo proporcional à dose de radiação, e é, comumente, referenciado como o nível de cinza. O valor é próximo de zero se a dose de radiação é zero. O máximo que pode atingir corresponde ao limite da faixa dinâmica (2n-1) do sistema, sendo, por exemplo, 255, 4095 e 16383 níveis de cinza para um equipamento de 8, 12 e 14 bits, respectivamente mostrado na Equação 2.8.

$$SNR_N = \frac{SNR_{média} \cdot 88,6}{BSR} \quad \text{(Equação 2.8)}$$

2.10. Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI)

Para que se possa avaliar a qualidade da imagem de uma radiografia e comprovar se o procedimento está sendo eficiente, são empregadas pequenas peças padronizadas, internacionalmente chamadas de indicador de qualidade de imagem, IQI. O tipo ou norma de fabricação do IQI é definido pelas especificações do projeto de construção do equipamento que será radiografado. O IQI é uma peça construída de um material radiograficamente similar ao material da peça ensaiada, com forma geométrica simples e que contém algumas variações de forma bem definidas, tais como furos, entalhes ou arames de diâmetro definidos. Normalmente são colocados sobre o objeto radiografado,

do lado da fonte de radiação. O número que indica a qualidade da imagem é o número do arame ou furo mais fino visível na imagem radiográfica. O número do arame exigido é definido para cada faixa de espessura radiografada de material. No caso de solda geralmente inclui a altura do reforço de solda. A classe de qualidade de imagem é função do rigor com que a inspeção deve ser feita e deve ser especificada pela norma do produto.

2.10.1. IQI de arame para sensibilidade ao contraste

O IQI, 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 indicada, conforme descrito na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. IQI de arame (ISO 19232-1)

Número	Diâmetro mm	Tolerância mm	Número	Diâmetro mm	Tolerância mm
1	3,20	+/- 0,03	11	0,32	+/- 0,01
2	2,50	+/- 0,03	12	0,25	+/- 0,01
3	2,00	+/- 0,03	13	0,20	+/- 0,01
4	1,60	+/- 0,02	14	0,16	+/- 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	0,800	+/- 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. Isto indica que exigências mais rigorosas ou um nível de qualidade maior exigem que sejam visualizados arames mais finos, conforme é apresentado na Figura 2.21.

O IQI, sempre que possível, deve ser colocado sobre a solda de forma que os arames estejam perpendiculares à linha da solda, e é considerado distinguível se aparecer um comprimento mínimo de 10 mm na área de interesse.

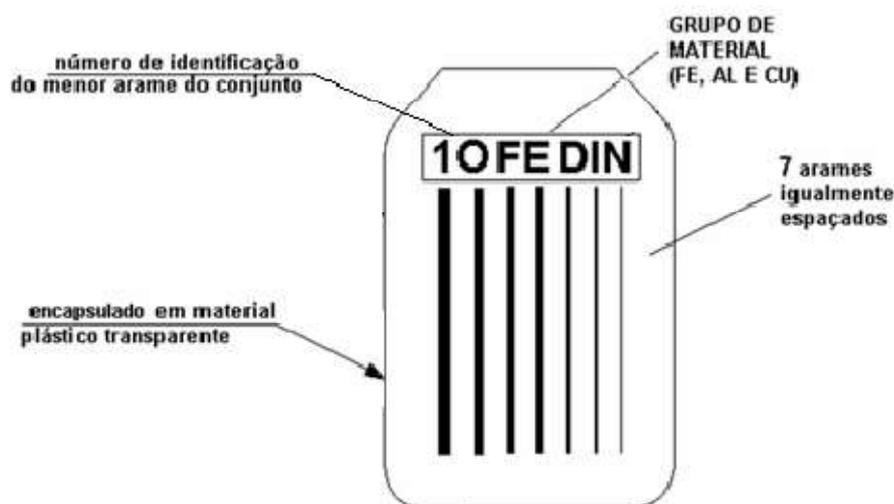


Figura 2.21. IQI de arame (ISO 19232-1, 2004).

2.10.2. IQI de arame duplo

O indicador de qualidade de imagem de arame duplo é fabricado de acordo com a norma ASTM E 2002, conforme mostrado na Figura 2.22. O IQI de fio duplo deve ser usado em conjunto com o IQI de contraste de arame e deve ser colocado pelo lado da fonte, alinhado com o feixe normal da radiação e, no caso da radiografia digital, com uma pequena inclinação de 5° em relação ao alinhamento dos pixels do detector e assim, evitar problemas de visualização dos pixels gerados pela imagem dos fios.

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados. Os pares de fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina, e as dimensões devem corresponder ao especificado em norma. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro do mesmo. A Tabela 2.4 mostra a numeração dos elementos, a penumbra correspondente, o diâmetro dos fios, a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm).

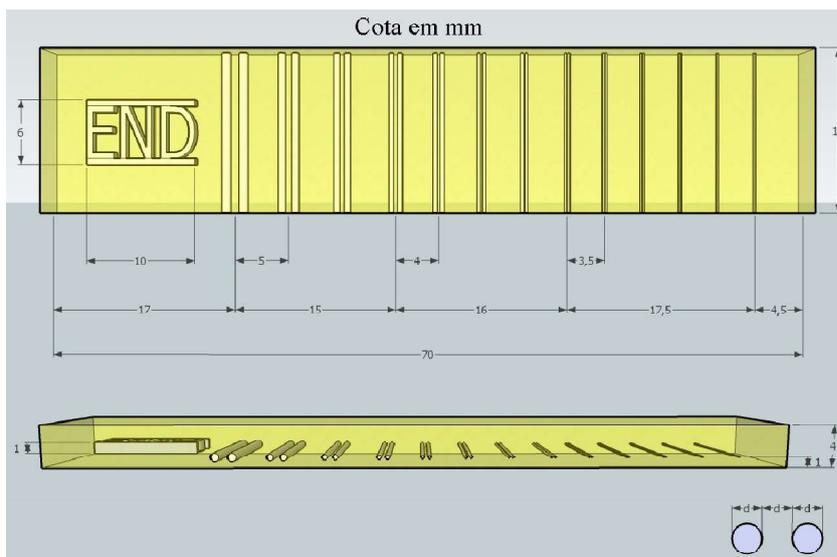


Figura 2.22. Esquema do Indicador de qualidade de fio duplo (OLIVEIRA, 2010)

Tabela 2.4. Parâmetros do Indicador de Qualidade de Imagem (ASTM E 2002, 2003)

Elemento	Desfocagem Geométrica	Diâmetro do fio (mm)	Tolerância	p/mm
13D	0,10	0,050		10,000
12D	0,13	0,063		7,936
11D	0,16	0,080	$\pm 0,005$	6,250
10D	0,20	0,100		5,000
9D	0,26	0,130		3,846
8D	0,32	0,160		3,125
7D	0,40	0,200		2,500
6D	0,50	0,250	$\pm 0,01$	2,000
5D	0,64	0,320		1,563
4D	0,80	0,400		1,250
3D	1,00	0,500		1,000
2D	1,26	0,630	$\pm 0,02$	0,794
1D	1,60	0,800		0,625

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, como pode ser visto na Figura 2.23.

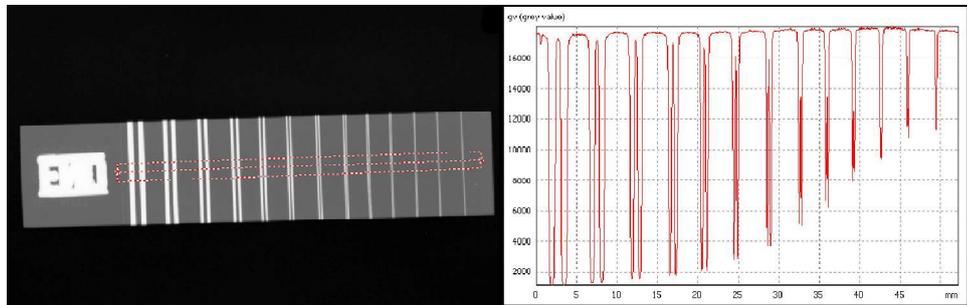


Figura 2.23. Perfil de linha do IQI de fio duplo(OLIVEIRA, 2010)

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 intensidade é menor do que 20% de sua intensidade máxima, conforme a Figura 2.24, sendo este o limite de discernibilidade do sistema.

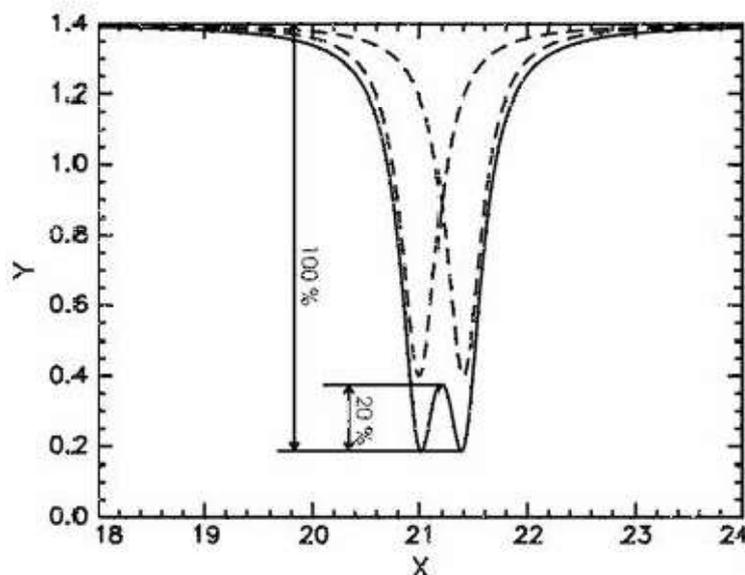


Figura 2.24. Perfil de linha de um par de fios mostrando a diferença de pelo menos 20% dos valores de máximo e mínimo de intensidade entre os dois fios (OLIVEIRA 2010)

3. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas baseadas no sistema ferro-cromo, ferro-cromo-carbono e ferro-cromo-níquel, podendo conter adições de outros elementos de liga tais como molibdênio, manganês, silício, cobre, titânio, nióbio, vanádio e nitrogênio, os quais alteram suas microestruturas e propriedades.

Eles são classificados de acordo com a sua microestrutura: aços austeníticos, aços ferríticos, aços martensíticos, aços duplex e aços endurecidos por precipitação (precipitation-hardenable, PH).

Os tipos mais comuns de aços inoxidáveis como austeníticos, ferríticos e martensíticos foram desenvolvidos na primeira década do século 20.

3.1. Aços Inoxidáveis Duplex

3.1.1. Características do aço inoxidável duplex

Aços inoxidáveis duplex (AID) são ligas Fe-Cr-Ni, e são assim chamados por possuírem uma microestrutura bifásica de ferrita (estrutura cristalina cúbica de corpo centrado) e austenita (estrutura cristalina cúbica de face centrada), e apresentarem estas fases em quantidades aproximadamente iguais, resultando em boas propriedades mecânicas como elevada resistência mecânica, boa ductilidade, boa tenacidade e boa soldabilidade (GUNN, 1997).

Esses aços possuem a habilidade de se apassivar e permanecer no estado passivo em diversos meios em que são expostos, e apresentam alto percentual de elementos de liga, como cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, que devem ser balanceados de forma apropriada a fim de possuírem frações volumétricas similares de todas as fases e conceder à ferrita e austenita resistência à corrosão e resistência mecânica (ALVAREZ-ARMAS, 2008).

Apresenta-se com grande disponibilidade para a fabricação de tubos de transferência de calor ou troca térmica, mas o seu uso nos equipamentos de processamento de hidrocarbonetos é limitado à temperatura de 300 °C devido à

formação de fases intermetálicas que podem comprometer as propriedades mecânicas e ainda a resistência à corrosão do aço duplex em condições acima desse limite.

Com relação à composição química, os aços inoxidáveis duplex podem ser divididos em três grupos (**SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007**):

a) Aços inoxidáveis duplex de baixa liga: apresentam menor teor de elementos de liga e não possuem molibdênio na composição química.

b) Aços inoxidáveis duplex de média liga: se enquadram os duplex mais utilizados, pois apresentam resistência à corrosão intermediária.

c) Aços inoxidáveis duplex de alta liga: são designados por super duplex, pois apresentam elevada resistência à corrosão comparável aos superausteníticos, que possuem entre 5 e 6% de molibdênio.

A elasticidade dos aços duplex é superior a duas vezes a elasticidade de aços de única fase, como aços ferríticos ou austeníticos (**SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007; ALVAREZ-ARMAS, 2008**). Eles possuem também alta tenacidade e ductilidade se comparados com aços ferríticos e martensíticos, e alta resistência à corrosão sob tensão e corrosão intergranular, se comparados a aços austeníticos, assim como limite de escoamento duas vezes maior que para o aço inoxidável austenítico. Além disso, os AID apresentam resistência à corrosão similar a dos aços inoxidáveis austeníticos, porém com a vantagem de ter menos teor de níquel, o que resulta em uma alternativa bastante atraente quando comparado com os tipos austeníticos, especialmente quando o custo do níquel for alto (**ALVAREZ-ARMAS, 2008**).

Comparando-se esses aços com os austeníticos, observa-se que além das vantagens de melhor resistência mecânica e resistência à corrosão, apresentam menor preço devido à baixa porcentagem de níquel e um menor coeficiente de expansão térmica (**SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007**). A maior resistência pode ser aplicada para a redução das espessuras de produtos manufaturados, como tubos, por exemplo, e o menor coeficiente de expansão térmica é uma vantagem que se associa à utilização conjunta dos aços inoxidáveis duplex com os aços ao carbono.

Entretanto, em certos casos a excelente resistência à corrosão (assim como outras propriedades) do aço inoxidável super duplex pode ser maior do que o requerido. Em determinadas aplicações, como em corrosão sob tensão, o aço super duplex pode ser uma solução aceitável, mas pode não ser uma solução econômica de substituição dos

aços inoxidáveis austeníticos do tipo 304, 316 ou 317. Seu maior custo deve-se primeiramente à quantidade de elementos de liga como níquel e molibdênio (OLSSON, LILJAS, 1996).

A Fig. 3.1 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto (Charpy) para aços inoxidáveis duplex (Ligas SAF) em comparação a liga inoxidável austenítica 316L.

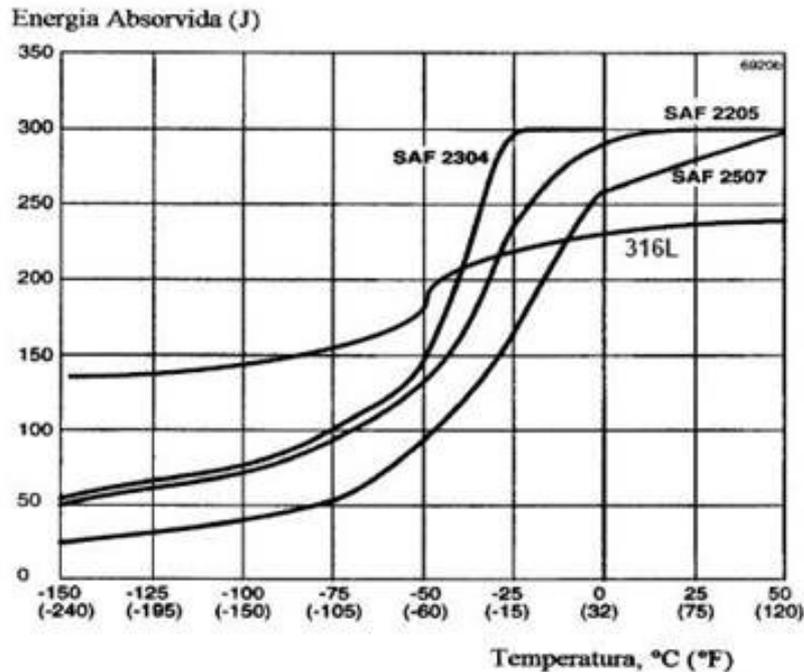


Figura 3.1. Resistência ao impacto dos aços inoxidáveis Duplex e 316L (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007)

Na tabela 3.1 são apresentados alguns tipos de aços inoxidáveis e suas respectivas composições químicas, com destaque para aço superduplex UNS S32750.

Tabela 3.1. Composição química aços inox – (Tabela adaptada de: Walden, Nicholls, 1994).

AISI: American Iron and Steel Institute. UNS: Unifield Numbering System

AISI/UNS	%Cmáx	%Cr	%Mo	%Ni	%N	%Si	%Mn	%Cu	Microestrutura
304L	0.03	18.5	----	10.0	----	0.5	1.3	----	Austenita
316L	0.03	17.5	2.6	13.0	----	0.4	1.7	----	Austenita
S32304	0.03	23.0	----	4.5	0.1	0.5	1.0	----	Duplex
S3183	0.03	22.0	3.2	5.5	0.18	1.0	2.0	----	Duplex
S32750	0.03	25.0	4.0	7.0	0.3	0.8	1.2	----	Duplex

Os aços duplex apresentam comportamento intermediário entre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. Sua condutibilidade térmica é maior do que a dos aços inoxidáveis austeníticos. Devido à presença da fase ferrítica, os aços inoxidáveis duplex possuem menor coeficiente de expansão térmica que os austeníticos, fazendo com que estas ligas apresentem comportamento próximo ao dos aços carbono (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

Cromo e molibdênio são elementos formadores de ferrita e se concentram principalmente nesta fase, enquanto o nitrogênio se concentra principalmente na austenita (SATHIRACHINDA, PETTERSSON, PAN, 2009). Nos passos iniciais do desenvolvimento, o aço duplex possuía baixos níveis de nitrogênio e era suscetível à corrosão por pites. Aços duplex mais modernos possuem níveis maiores de nitrogênio (entre 0,2 e 0,32 %), que dão maiores resistências a corrosão na fase austenita em comparação a fase ferrita (ALVAREZ-ARMAS, 2008).

A Tabela 3.2 mostra algumas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex e super duplex comerciais.

Tabela 3.2. Propriedades mecânicas dos principais AID e AISD comerciais. Tanto o limite de resistência como o limite de escoamento apresentam valores mínimos (High Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute)

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX DE ALTA PERFORMANCE					
Nome	Número UNS	20°C (68°F)	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)
Módulo de Elasticidade Gpa (ksi x 1.000)					
Type 369	S32900	200(29.0)	195(28.0)	185(27.0)	-
3RE60	S31500	200(29.0)	190(27.6)	180(26.1)	170(24.7)
2304	S32304	200(29.0)	190(27.6)	180(26.1)	170(24.7)
2205	S31803	200(29.0)	190(27.6)	180(26.1)	170(24.7)
UR 47N	-	205(29.7)	194(28.1)	181(26.2)	170(24.7)
255	S32550	210(30.5)	200(29.9)	198(28.7)	192(27.8)
2507	S32750	200(29.0)	190(27.6)	180(26.1)	170(24.7)
Coeficiente de Expansão Térmica cm/cm/°C x 10 ⁻⁶ (in./in./°F x 10)					
Type 329	S32900	-	10.9(6.10)	11.0(6.30)	11.6(6.40)
3RE60	S31500	12.6(7.00)	13.0(7.22)	13.5(7.50)	14.0(7.78)
2304	S32304	12.6(7.00)	13.0(7.22)	13.5(7.50)	14.0(7.78)
2205	S31803	12.6(7.00)	13.0(7.22)	13.5(7.50)	14.0(7.78)
7- MO Plus	S32950	9.5(5.27)	10.5(5.83)	11.5(6.39)	12.4(6.89)
UR 47N	-	12.0(6.67)	12.5(6.94)	13.0(7.22)	13.5(7.50)
255	S32550	11.7(6.5)	12.1(6.72)	12.6(7.00)	13.0(7.22)
2507	S32750	12.6(7.00)	13.0(7.22)	13.5(7.50)	14.0(7.78)
Conductividade Térmica - W/m °C (Btu in./hr ft² °F)					
Type 369	S32900	-	-	-	-
3RE60	S31500	16.0(110)	17.0(118)	19.0(132)	20.0(138)
2304	S32304	16.0(110)	17.0(118)	19.0(132)	20.0(138)
2205	S31803	16.0(110)	17.0(118)	19.0(132)	20.0(138)
7- MO Plus	S32950	14.1(97)	16.4(114)	19.0(132)	21.5(149)
UR 47N	-	17.0(118)	18.0(124)	19.0(132)	20.0(138)
255	S32550	13.5(94)	15.1(105)	17.2(119)	19.1(133)
2507	S32750	16.0(110)	17.0(118)	19.0(132)	20.0(138)

A alta resistência mecânica e a dilatação térmica próxima à dos aços carbono colocam os duplex em posição privilegiada do ponto de vista de projeto, pois permitem a utilização de equipamentos mais leves, mais seguros, isento de manutenções, além de propiciar aumento da vida útil (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

O desempenho dos aços inoxidáveis super duplex pode ser seriamente afetado pela soldagem. Devido à importância em manter a microestrutura desses materiais balanceada e evitar a formação de fases intermetálicas indesejáveis, os parâmetros de soldagem e os metais de adição empregados devem ser minuciosamente especificados e controlados (SATHIRACHINDA, PETTERSSON, PAN, 2009). O balanço microestrutural do metal base (iguais proporções de ferrita e austenita) será afetado pelo ciclo térmico de soldagem. Se houver mudança no balanço da microestrutura ao longo do material soldado, a perda das propriedades dos AID pode ser significativa. Esses materiais apresentam propriedades que derivam tanto da fase ferrítica quanto da austenítica em sua microestrutura. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem excelente soldabilidade e tenacidade em baixas temperaturas, ao passo que a resistência à corrosão sob tensão por cloretos é baixa, assim como sua resistência mecânica. Já os aços inoxidáveis ferríticos possuem alta resistência à corrosão sob tensão por cloretos, mas baixa tenacidade. A microestrutura duplex com alta quantidade de fase ferrítica terá então baixa tenacidade ao entalhe, enquanto que uma grande quantidade de fase austenítica levará a uma menor resistência associada à corrosão sob tensão por cloretos (OLSSON, LILJAS, 1996).

3.1.2. Aços Inoxidáveis Super duplex

A diferença básica entre os aços inoxidáveis duplex e super duplex consiste principalmente nas concentrações de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio que essas ligas apresentam, sendo que alguns desses elementos interferem diretamente na resistência à corrosão por pite.

Quando a resistência mecânica e a resistência à corrosão do aço duplex apresentam um comportamento ainda melhor e um número de resistência à corrosão por pites (PREN – Pitting Resistance Equivalent Number) superior a 40, esses aços são chamados de super duplex (SATHIRACHINDA, WESSMAN, KIVISÄKK, 2010).

O índice de resistência à corrosão por pites para os aços inoxidáveis super duplex tem um valor mínimo de 40. Este PRE é definido em função da composição química, sendo:

$$PRE_N = \% Cr + 3,3 \% Mo + 16 \% N$$

$$PRE_W = \% Cr + 3,3(\% Mo + 0,5 \% W) + 16\% N$$

Os aços inoxidáveis super duplex apresentam alta resistência ao impacto na temperatura ambiente, bem como boa tenacidade, conforme resultados de ensaios de impacto. Porém esta tenacidade está limitada à fração volumétrica e à distribuição de ferrita. Quanto maior a quantidade de ferrita, menor a tenacidade e, conseqüentemente, a temperatura de transição dúctil frágil se desloca para temperaturas maiores. Este fato ocorre principalmente quando se tem processos de soldagem mal executados para estes tipos de ligas (NILSSON, 1992).

3.1.3. Microestrutura

Os aços inoxidáveis super duplex possuem uma microestrutura formada por duas fases, em uma mistura de cerca de 50% em volume de ilhas de austenita em 50% de grãos de ferrita (SAHU, J.K., KRUPP, U., GHOSH, R.N., CHRIST, 2009).

A combinação favorável de propriedades no aço super duplex é obtida através da mudança na microestrutura da liga. A mudança na microestrutura e na fração volumétrica de cada fase na liga é função da composição e do tratamento térmico (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

A Fig. 3.2 mostra uma micrografia típica do aço inoxidável duplex na condição comercial mostrando a fase ferrita (cinza escuro) e a fase austenita (cinza claro).

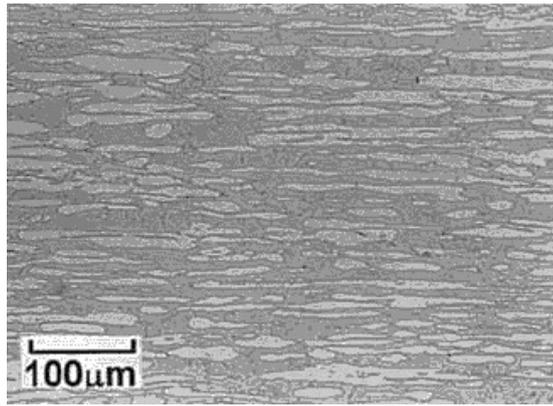


Figura 3.2. Microestrutura típica na condição comercial do aço duplex (CHEN, T.H., YANG, 2001)

A microestrutura pode ser obtida através do balanceamento dos elementos de liga. O balanceamento dos elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex tem como objetivo controlar os teores de elementos estabilizadores de austenita como níquel, carbono, nitrogênio e de elementos estabilizadores de fase ferrita como cromo, molibdênio e silício (SENATORE, FINZETTO, PEREA, 2007).

3.1.4. Soldagem dos aços inoxidáveis duplex

Grande parte das aplicações atuais dos aços super duplex envolve algum processo de soldagem. Por este motivo, a soldabilidade destes aços tem sido objeto de ampla investigação. Os aços super duplex modernos têm sido desenvolvidos para terem uma excelente soldabilidade. No entanto, existem alguns cuidados que devem ser tomados durante a soldagem, para preservar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão que estes materiais possuem.

3.1.4.1. Técnica de Soldagem

As práticas de soldagem usadas com os aços inoxidáveis austeníticos, como limpeza, uso de gás de purga, evitar a contaminação com aço carbono etc., devem ser usadas também com os super duplex (MODENESI, 2008). Além disso, a técnica de soldagem é voltada para manter a microestrutura balanceada na junta soldada e conseqüentemente, manter as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão o

menos alteradas possível. Isso envolve tanto as mudanças de composição química na poça de fusão, como o controle da história térmica da junta (**MODENESI, 2008**).

3.1.4.2. Processos de Soldagem

Praticamente todos os processos de soldagem a arco convencionais podem ser usados na soldagem dos aços super duplex. O uso de processos com uma fonte de calor de alta densidade, como o feixe de elétrons ou o laser, tem a sua aplicação limitada. Nestes casos a formação da austenita é impedida devido as elevadas velocidades de resfriamento da junta. O mesmo acontece na soldagem por resistência e por atrito (**LONDOÑO, 1997**).

SAW (Soldagem por arco submerso) com eletrodo em fita, ESW (Soldagem por Eletroescória) e soldagem por explosão têm sido utilizados para fazer revestimentos com aços super duplex.

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados e descritos os corpos de prova utilizados, o sistema empregado e a técnica aplicada para radiografia direta.

4.1. Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados dois corpos de prova que consistem em chapas soldadas de aço super duplex 2507 (UNS32750).

Pode-se observar na Tabela 4.1 a composição química especificada para o material, de acordo com a norma ASTM / ASME A240 – S32750 .

Tabela 4.1 – Composição química típica do aço inoxidável duplex SAF 2507 (UNS 32750)

%Cr	%Mo	%Ni	%C	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cu	%Si
24 - 26	3 - 5	0,24 - 0,32	0,03	1,2	0,035	0,02	6 - 8	0,5	0,8

Foram preparadas 2 amostras de chapas fabricadas de aço super duplex, ambas medindo 234 mm de comprimento, 180 mm de largura e 20 mm de espessura. A espessura mencionada se refere à espessura do metal base. As chapas foram identificadas como chapa 5 e chapa 8, conforme a figura 4.1 abaixo.



Figura 4.1. Corpos de prova utilizados

Em cada uma das amostras contendo a solda longitudinal sem a presença de defeitos, foram criadas regiões com grupo de descontinuidades.

Os parâmetros de solda utilizados foram os seguintes:

Chanfro: V com ângulo de 60 graus.

Processo de soldagem: MAG – na Raiz / SAW – para o Enchimento.

Energia de Soldagem: 3,2 kJ.

Diâmetro do Eletrodo (Arame): 1,2 mm (MAG) / 2,4 mm (SAW)

4.2. Métodos

Foram executados ensaios radiográficos com a aplicação da técnica de radiografia digital direta, utilizando um detector plano (*Flat Panel*). O método de ensaio utilizado

foi conforme a ISO/FDIS 17636-2, obedecendo às exigências da técnica com sensibilidade menos rigorosa, classe A.

As amostras foram ensaiadas no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Para os ensaios com radiografia digital foi utilizado um *Flat Panel* da empresa GE Inspection Technologies (Figura 4.2).

O detector DXR250V possui sensores do tipo silício amorfo e tela do cintilador de oxissulfato de gadolínio (Gd_2O_2S), com uma matriz contendo mais de seis milhões de pixels (2048 x 2048), de alta resolução com tamanho do pixel de 200 μm e 14 bits. Tem dimensões ativas de 410 x 410 mm, trabalha em uma faixa de energia de 30 kV a 3 MeV (ASTM E 2597, 2007). O sistema de aquisição de imagem instalado no notebook HP para a operação do detector direto é o Rhythm RT (GE) e para visualização e tratamento das imagens possui o Rhythm Review (GE).



Figura 4.2. *Flat Panel* DXR250V da GE IT

As características técnicas deste detector estão descritas na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Características do Detector Direto Digital utilizado.

Tipo de Tela Plana:	Silício Amorfo
Material Cintilador:	Oxisulfato de Gadolínio
Área Ativa (aprox.):	410 x 410 mm (16 x 16 pol.)
Formato da Imagem:	2048 x 2048
Conversão A/D:	14 bits
Tempo Mínimo de Exposição:	285 ms
Faixa Dinâmica:	10,000:1
Dimensões:	585 x 465 x 27 mm
Peso:	6 kg (13 lb)
Temperatura de Operação:	10° a 35° C (50° a 95° F)

Por se tratar de uma matriz de detector direto, é possível executar o ensaio radiográfico sem se preocupar com dispositivos de escaneamento, produtos químicos para revelação, processadoras e outros equipamentos necessários para aquisição de uma radiografia convencional ou computadorizada, o que resulta em grande benefício ao meio ambiente, uma vez que não ocorre geração de rejeitos químicos.

4.3. Esquema Experimental - Radiografia Digital Direta

O arranjo para radiografia digital direta quando comparado às outras técnicas é muito mais simples no que se refere à sua montagem. Uma vez colocado o detector, os corpos de prova são colocados sobrepostos sem mais artefatos como écrans e chassis, como exemplificado na figura 4.3. Todas as exposições foram feitas com o equipamento Yxlon devido a sua potência e ao seu tamanho focal.

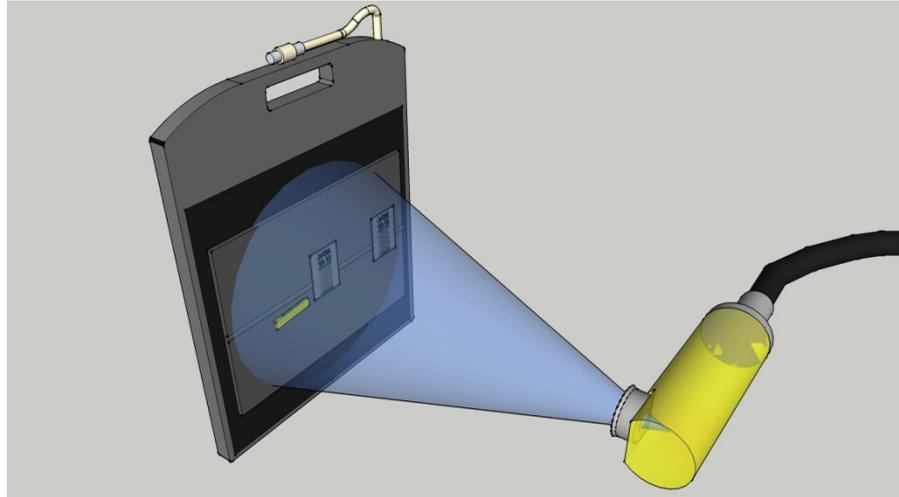


Figura 4.3. Esquema experimental para radiografia digital direta

4.4. Determinação da sensibilidade ao contraste, IQI de fio

O IQI de fio de contraste foi sobreposto com seus fios transversais ao eixo do cordão de solda e deslocado de forma que fosse possível avaliar o aparecimento dos fios tanto na região da solda como no metal base.

O esquema de posicionamento do IQI de contraste do tipo arame está indicado na Figura 4.4.

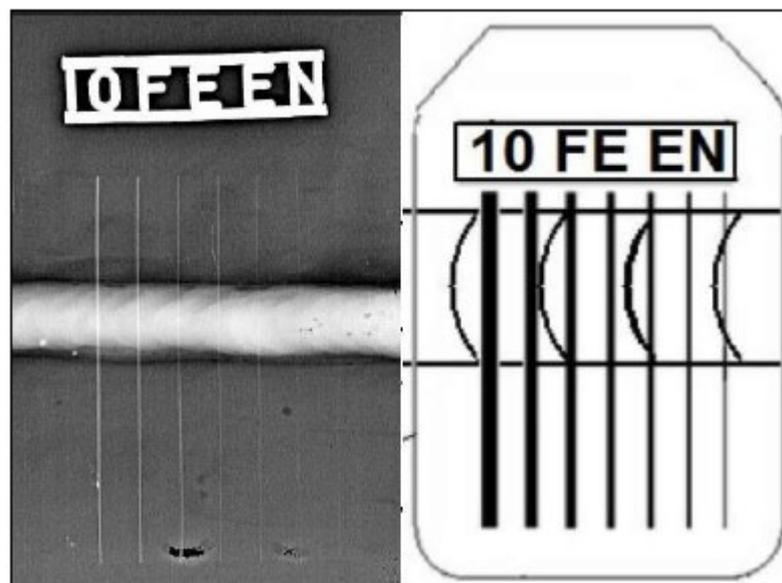


Figura 4.4. Exemplo de uma imagem de corpo de prova com IQI de Fio (NASCIMENTO, 2012)

Deve-se observar que a seleção do IQI é feita pela espessura, ou seja, de acordo com a espessura da chapa, conforme está indicado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Fio essencial proposto por norma (ISO/FDIS 17636-2) – classe A

Espessura do metal Base (mm)		Diâmetro do fio essencial (mm)	Número do fio essencial
Acima de	Até		
0	1,2	0,063	W18
1,2	2,0	0,08	W17
2,0	3,5	0,10	W16
3,5	5,9	0,13	W15
5,0	7,0	0,16	W14
7,0	10,0	0,20	W13
10,0	15,0	0,25	W12
15,0	25,0	0,32	W11
25,0	32,0	0,40	W10
32,0	40,0	0,50	W9
40,0	55,0	0,63	W8
Acima de 55		0,80	W7

4.5. Determinação da Resolução Espacial Básica

Para determinação da Resolução Espacial Básica, foi utilizado o método de perfil de linha utilizando o IQI de Fio Duplo. Este IQI foi posicionado no corpo de prova com um ângulo de 5° da direção do alinhamento dos pixels dos detectores.

Para a análise das imagens, foi utilizado o programa ISee! (versão 10.2), que é um software desenvolvido com a finalidade de análise de imagens radiográficas sob o sistema de operação Microsoft Windows.

Utilizando a opção “Perfil de Linha” colocou-se a ferramenta de medição de perfil sobre a imagem dos arames duplos, identificando aquele par onde não seja possível visualizar um espaçamento entre eles, no exemplo a seguir é o par 7D. Na Figura 4.5 temos um exemplo da medição da resolução espacial básica utilizando ferramentas do programa ISee! para determinar o valor de separação, no perfil de linha, dos fios de modo a determinar qual será o último par de fios discernível.

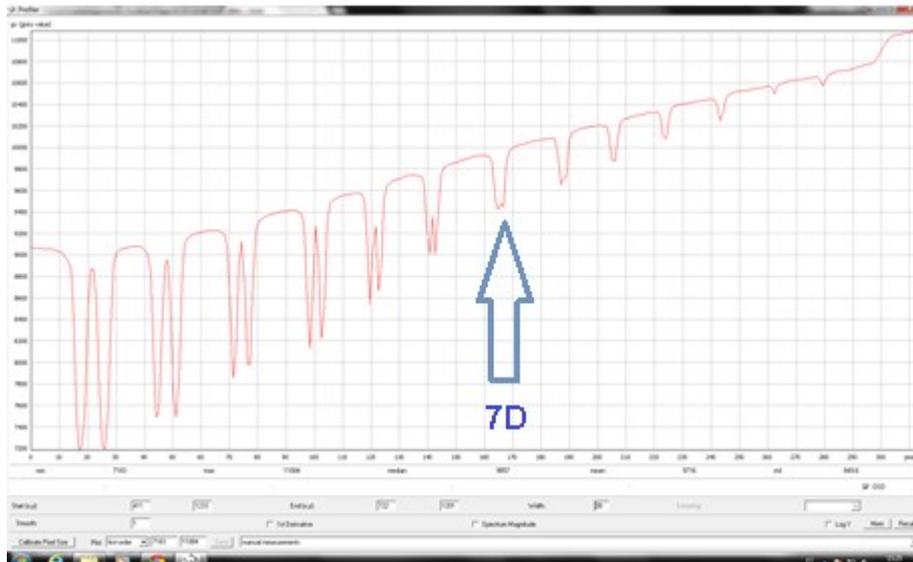
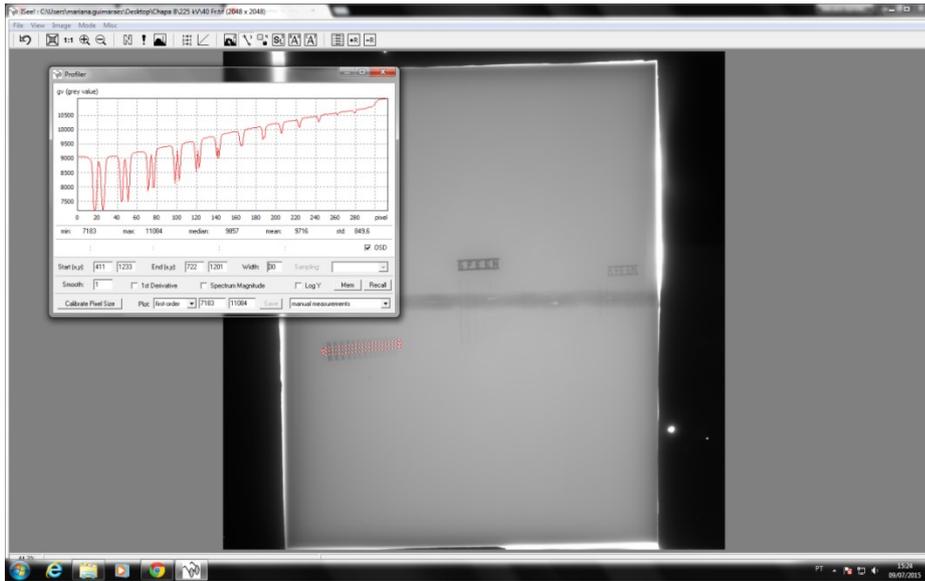


Figura 4.5. Método para medição dos valores de BSR.

Abaixo, a tabela 4.4 mostra os valores do arame duplo e da BSR exigidos pela norma ISO/FDIS 17636-2 para diferentes faixas de espessura.

Tabela 4.4. IQI de arame duplo exigido pela norma ISO/FDIS 17636-2 Classe A

Faixa de Espessura do MB (mm)	Exigido ISO/FDIS 17636-2 Classe A metal base (mm)	BSR (mm)
Abaixo de 2	11D (0,16)	0,08
De 2 a 5	10D (0,20)	0,1
De 5 a 10	9D (0,26)	0,13
De 10 a 25	8D (0,32)	0,16
De 25 a 55	7D (0,40)	0,2
Acima de 55	6D (0,50)	0,25

4.6. Determinação da Relação Sinal Ruído Normalizada, SNR_N

Para medição da relação sinal ruído normalizada das imagens radiográficas, também foi utilizado o software ISee!, e o valor mínimo de SNR_N especificado pela ISO/FDIS 17636-2, medido no metal base, para a classe A é igual a 70. O valor da relação sinal ruído normalizado na região adjacente à solda da imagem é calculado pela equação 2.8, já definido anteriormente no capítulo 2.

Foram medidos 10 pontos na região do metal base localizados próximos ao cordão de solda, sendo que a distribuição das medições em cada uma das imagens está esquematizada na Figura 4.6.

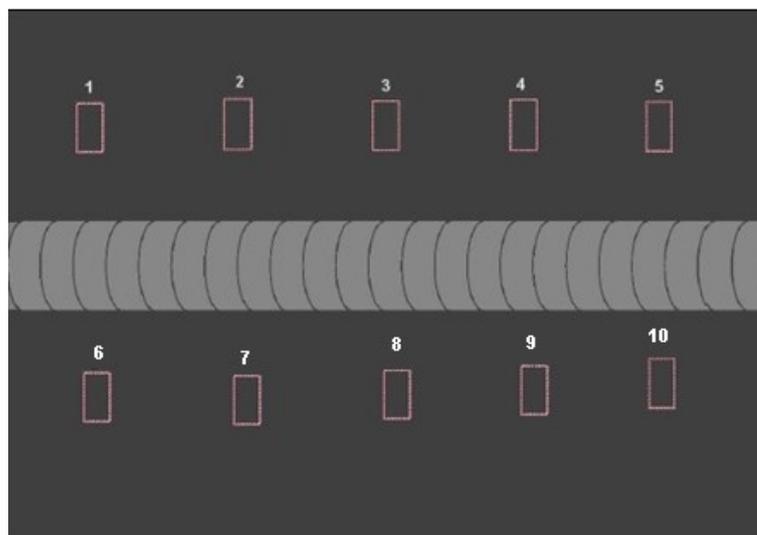


Figura 4.6. Esquema de medição dos valores de SNRN (NASCIMENTO, 2012)

Para medição destes valores, é recomendado que se utilize uma janela de medição de 1100 (20x55) e, para o valor da resolução espacial básica, deve-se utilizar o resultado experimental do diâmetro conseguido do fio duplo pela técnica empregada (EN 14784-1, 2005). Na Figura 4.7 pode ser visualizado um exemplo de medição do valor da relação sinal ruído normalizado (SNR_N) em um local próximo à região da solda, onde na parte experimental se obteve a resolução espacial básica 7D, cujo diâmetro do arame é de 0,200 mm. O valor do SNR_N obtido para o procedimento deste exemplo é de 204.

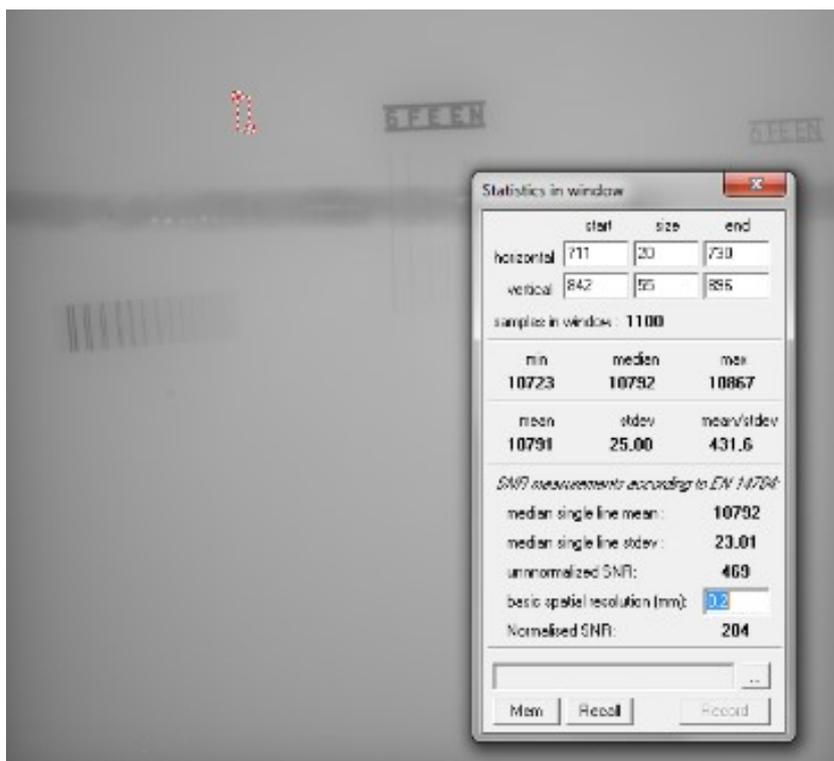


Figura 4.7. Medição dos valores de SNR_N .

4.7. Processamento das imagens

As figuras 4.8 e 4.9 trazem como ilustração imagens das radiografias da chapa 5 com 180 kV e 1 frame, com duas aplicações distintas de um filtro matemático para realçar e melhorar a imagem.

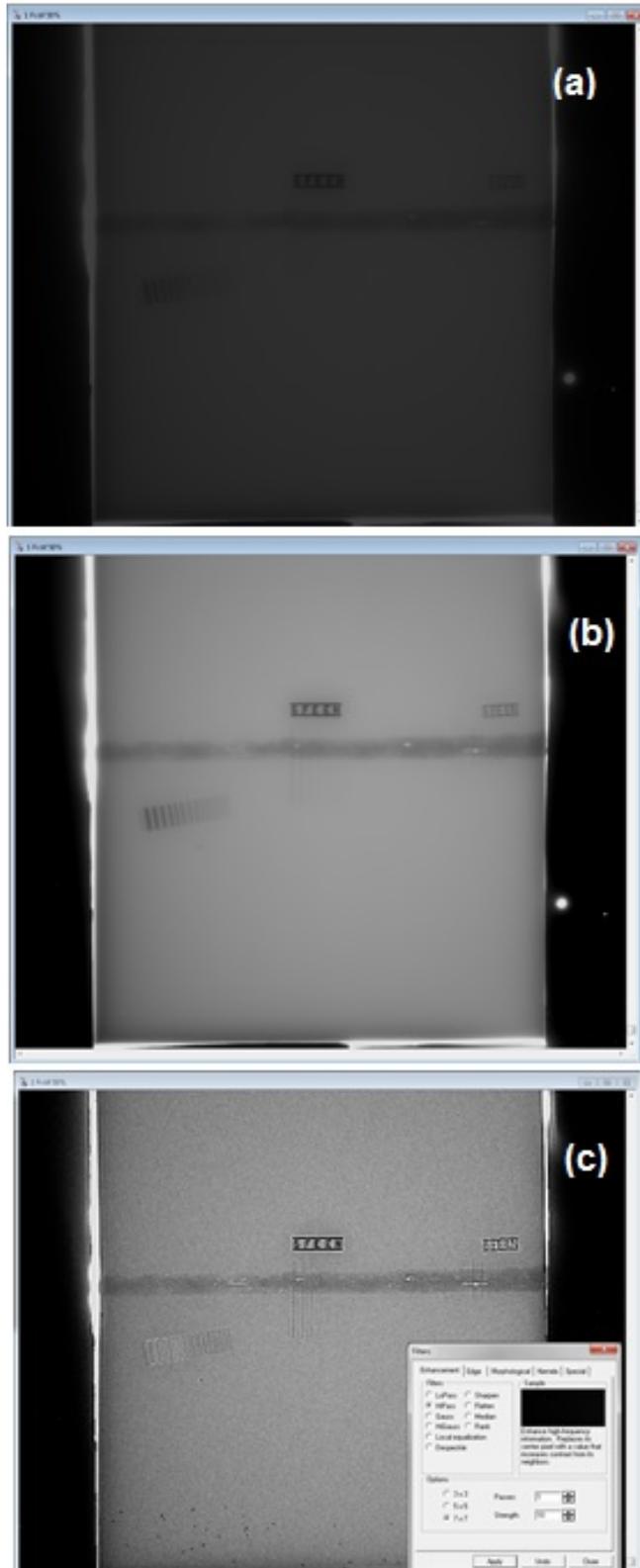


Figura 4.8. Imagem da chapa 5, ensaiada a 180 kV e 1 frame - (a) imagem original - (b) imagem com equalização automática – (c) aplicação de filtro tipo high-pass (aumenta nitidez do defeito)

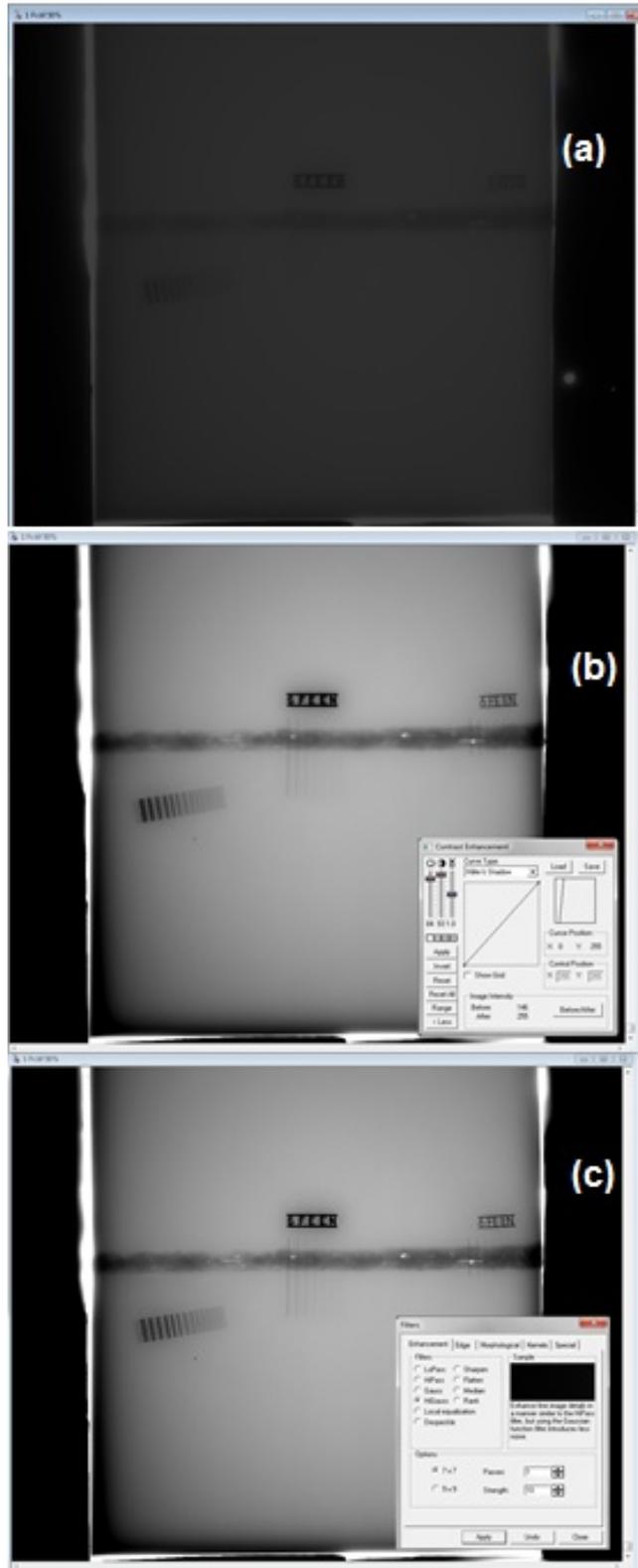


Figura 4.9. Imagem da chapa 5, ensaiada a 180 kV e 1 frame - (a) imagem original - (b) imagem com equalização manual (partindo da mesma imagem original) – (c) Filtro Higauss

5. Resultados e Conclusões

Os testes foram realizados nos corpos de prova aplicando-se a técnica digital, onde as imagens geradas foram arquivadas e os resultados analisados em equipamento atendendo às exigências da norma ISO/FDIS 17636-2.

A técnica foi avaliada no que se refere à sensibilidade do IQI de contraste do tipo arame, resolução espacial básica (BSR) utilizando o método do IQI de arame duplo, assim como em sua Relação sinal ruído normalizada (SNR_N).

A seguir, são apresentados os resultados e as respectivas discussões.

Nas figuras 5.1 e 5.2 é observado o desempenho da radiografia digital direta em termos de sensibilidade ao IQI de contraste do tipo arame, em função dos números de frames de 1, 5, 10, 20, e 40, e em relação ao exigido pela norma ISO/FDIS 17636-2, classe A. As medições foram realizadas no metal base. O resultado obtido mostra que a variação do número de frames não possui influência relevante na sensibilidade ao contraste, uma vez que com exceção do resultado encontrado para a chapa 5 ensaiada com 225 kV e 1 frame (W11), para todas as demais condições ensaiadas nas duas chapas a sensibilidade ao contraste se manteve constante em W12.

A figura 5.3 reproduz a imagem radiográfica da chapa 5, indicando o fio do IQI de arame identificado na radiografia (W12).

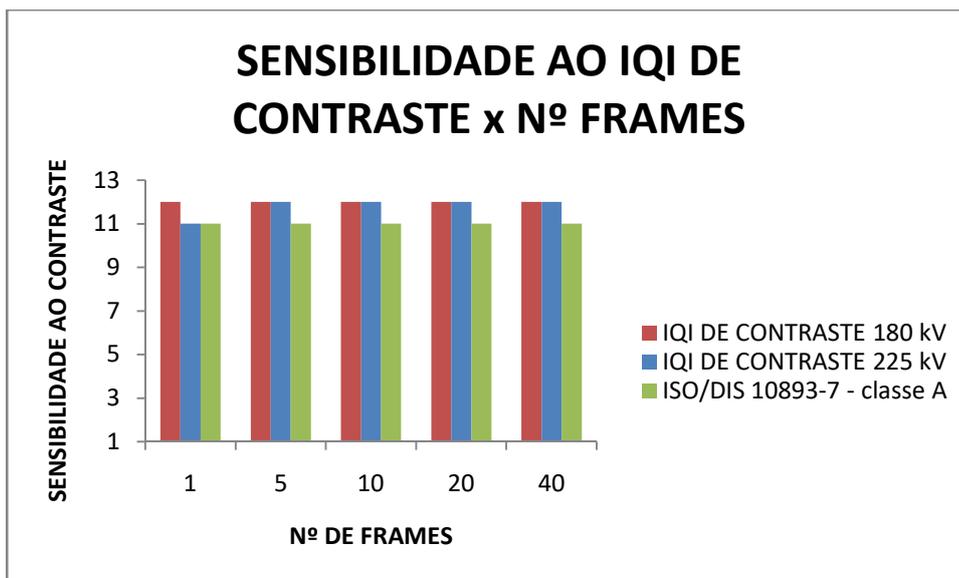


Figura 5.1. Sensibilidade ao contraste em função da variação do número de frames para a chapa 5

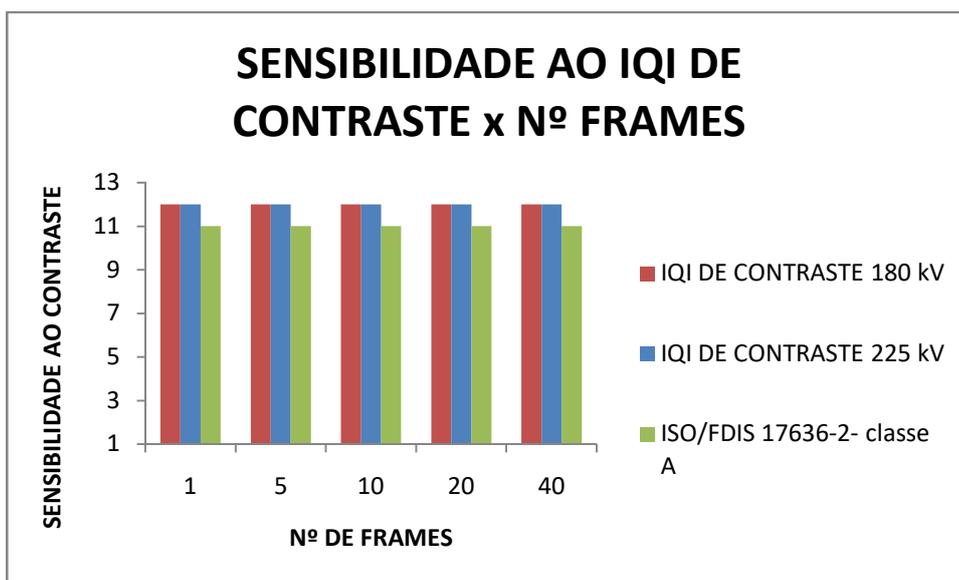


Figura 5.2. Sensibilidade ao contraste em função da variação do número de frames para a chapa 8

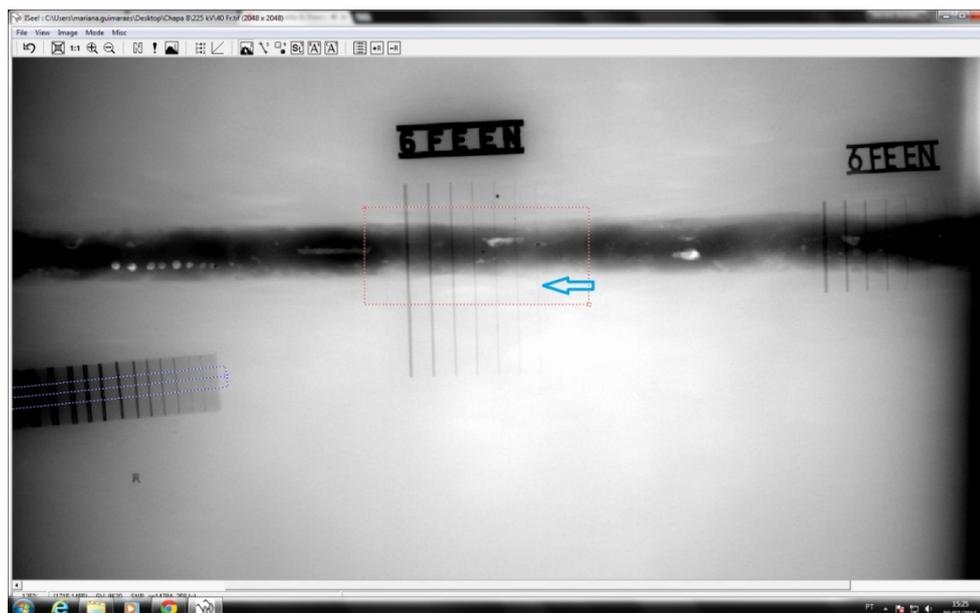


Figura 5.3. Imagem radiográfica da chapa 5. A seta azul indica o fio do IQI de arame identificado na radiografia (W12).

5.1. Resolução espacial básica, BSR

Os valores da resolução espacial básica, BSR e da penumbra, U_g , foram obtidos experimentalmente através das imagens geradas da radiografia digital. Utilizando o IQI de arame duplo colocado do lado da fonte e com o auxílio do perfil de linha de medição do nível de cinza determinou-se o número do arame duplo obtido e assim se obteve valor de penumbra correspondente.

O sistema foi operado de forma que os parâmetros para aquisição da radiografia fossem os menores possíveis para conseguir alcançar os valores de qualidade próximos das outras técnicas. Um dos fatores com principal destaque para este sistema é o tempo de aquisição de imagens, que possuem valores muito inferiores aos utilizados nas radiografias convencionais.

Na tabela 5.1 pode-se observar que o melhor resultado da resolução espacial básica (BSR) obtido experimentalmente para as duas chapas ensaiadas foi de $160 \mu\text{m}$, e o pior $200 \mu\text{m}$. Para a faixa de espessura dos corpos de prova ensaiados (20 mm), a norma ISO/FDIS 17636-2 estabelece como valor mínimo de BSR $160 \mu\text{m}$. Entretanto, a mesma norma prevê a possibilidade de utilizar o “princípio da compensação”, e assim se o IQI de contraste do tipo arame tiver um aumento de visibilidade na mesma proporção dos valores mais baixos da resolução espacial básica é entendido que as

exigências foram atendidas. Desta forma, os requisitos de BSR foram atendidos em todas as imagens analisadas, com exceção da imagem obtida da chapa 5 quando ensaiada a 225 kV e 1 frame.

Na figura 5.4 pode-se observar um exemplo das medições realizadas experimentalmente e o número do arame duplo obtido do IQI que foi colocado no metal base.

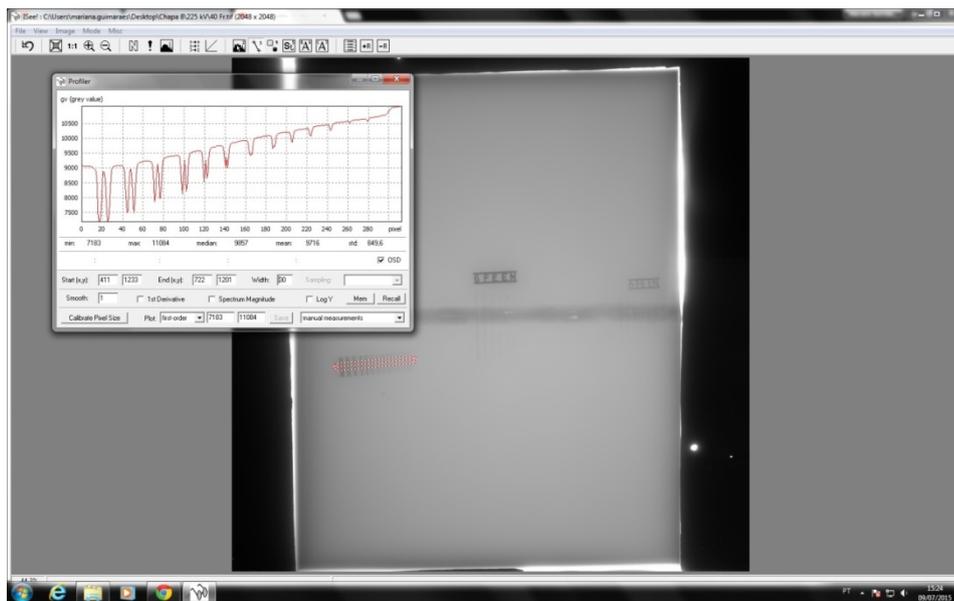


Figura 5.4. Medições da resolução espacial básica para a técnica digital

5.2. Relação sinal ruído normalizada, SNR_N

As figuras 5.5 e 5.6 representam os valores de SNR_N em função do número de frames para as chapas 5 e 8.

Pode-se observar que os valores de SNR_N se mostram crescentes com o aumento do número de frames, o que já era esperado, uma vez que com o aumento do número de quadros obtém-se uma maior amostragem e, conseqüentemente, um menor efeito do ruído, resultando em um maior valor de SNR_N .

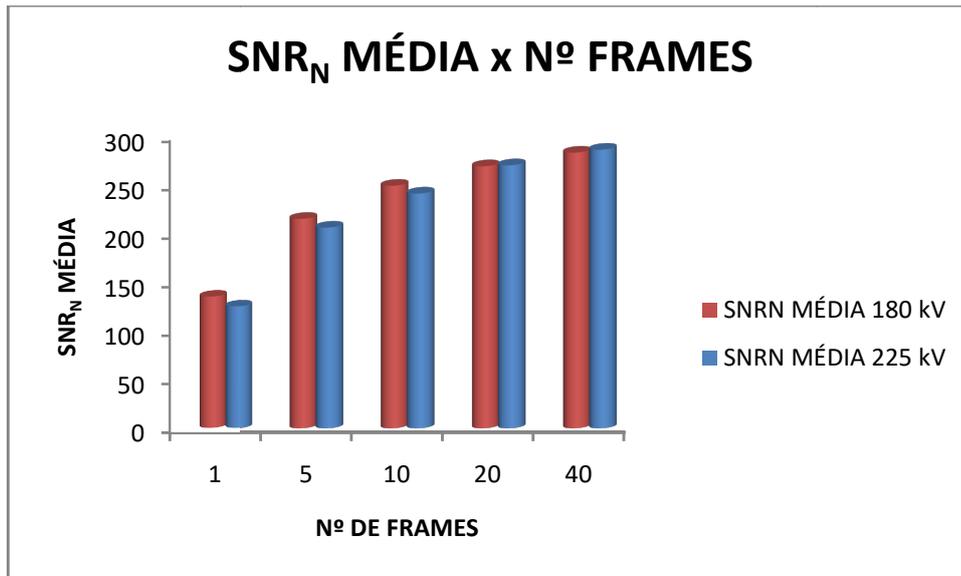


Figura 5.5. Variação da SNR_N em função do número de frames para a chapa 5

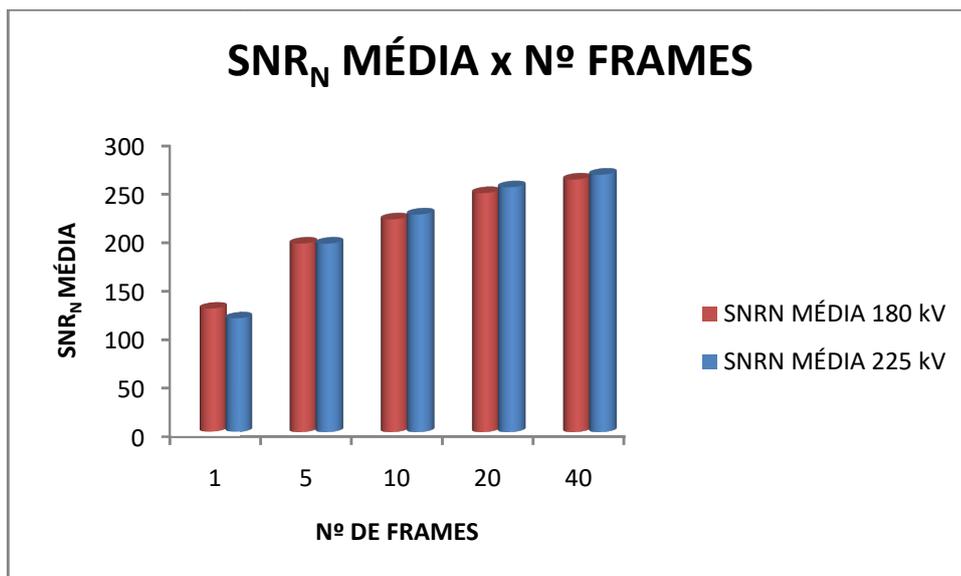


Figura 5.6, Variação da SNR_N em função do número de frames para a chapa 8

5.3. Resumo dos Resultados encontrados

Na tabela 5.1 encontra-se um resumo dos resultados encontrados experimentalmente, incluindo os valores de Resolução Espacial básica (BSR), Contraste

e Relação Sinal-Ruído Normalizada (SNR_N), obtidos na radiografia com a utilização do *Flat Panel*.

Tabela 5.1. Valores obtidos para IQI Contraste, BSR e SNR_N para radiografia Digital Direta

CORPO DE PROVA	TENSÃO (kV)	CORRENTE (mA)	TEMPO DE AQUISIÇÃO (s)	FRAMES	FIO SIMPLES (CONTRASTE)	FIO DUPLO	BSR (mm)	SNR_N
CHAPA 5	180kV	3	6,5	1	12	8D	0,16	135
				5	12	8D	0,16	215
				10	12	8D	0,16	249
				20	12	8D	0,16	269
				40	12	8D	0,16	283
CHAPA 5	225	3	2	1	11	7D	0,20	125
				5	12	8D	0,16	206
				10	12	8D	0,16	241
				20	12	8D	0,16	270
				40	12	8D	0,16	286
CHAPA 8	180	3	6,5	1	12	7D	0,20	127
				5	12	7D	0,20	194
				10	12	8D	0,16	219
				20	12	7D	0,20	246
				40	12	8D	0,16	260
CHAPA 8	225	3	2	1	12	7D	0,20	117
				5	12	8D	0,16	194
				10	12	8D	0,16	224
				20	12	8D	0,16	252
				40	12	7D	0,20	265

6. Conclusões

Baseado nos resultados apresentados e discutidos no Capítulo 5, pode-se listar as seguintes conclusões:

Para todas as imagens analisadas, a técnica digital utilizando o IQI do tipo arame obteve tanto na região do metal base, como na região do cordão de solda, a sensibilidade ao contraste visualizando até 1 arame mais fino do que os valores propostos pela norma ISO/FDIS 17636-2, exceção feita à imagem ensaiada a 225 kV e 1 frame da chapa 5, que obteve exatamente o arame proposto pela norma.

Os valores propostos para a resolução espacial básica, BSR, na norma ISO/FDIS 17636-2, classe A, foram atendidos na maior parte das condições de ensaio para ambas as chapas, e mesmo naquelas onde não foram alcançados, os resultados experimentais da sensibilidade ao contraste apresentaram valores melhores que os propostos, e com a combinação destes resultados (resolução espacial básica versus a sensibilidade ao contraste) foi possível aplicar o “princípio da compensação”, previsto na referida norma e assim atender às exigências. Somente para a chapa 5 ensaiada a 225 kV e 1 frame, não foi possível a utilização deste princípio, não sendo atendido o estabelecido pela norma.

Baseado nos resultados apresentados, para todas as condições de ensaio avaliadas, os valores da relação sinal ruído normalizado, SNR_N ficaram acima do valor mínimo previsto na norma ISO/FDIS 17636-2, que é de 70, e mostraram-se crescentes com o aumento do número de frames.

Em geral, os resultados obtidos através dos experimentos apresentaram valores que atendem ao mínimo exigido pela ISO/FDIS 17636-2, classe A, para tempos de integração muito baixos em comparação aos praticados com a técnica convencional. Com estes resultados, pode-se concluir que a radiografia digital utilizando o *Flat Panel* atende adequadamente às exigências da norma ISO/FDIS 17636-2, classe A, e assim pode ser utilizada para a inspeção de materiais e equipamentos em aço super duplex, obtendo-se imagens radiográficas digitais ricas em detalhes e sensibilidade, devido à garantia de altos valores alcançados de SNR_N .

7. Referências Bibliográficas

ABENDI (2016), Ensaios não destrutivos e inspeção, disponível em <http://www.abendi.org.br/abendi/>. Acessado em 08/06/2016.

ABNT NBR ISO 9712 (2014) **Associação Brasileira De Normas Técnicas, Ensaios Não-Destrutivos - Qualificação e Certificação De Pessoal**, São Paulo, 2014.

ALVAREZ-ARMAS, I., **Duplex Stainless Steels: Brief history and some recent alloys**, Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol. 1, pp. 51-57, 2008.

ANDREUCCI, R., “**Radiologia Industrial**”, disponível em <http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostilaradioprotecao.pdf>. Acessado em 27/04/2016.

ASAHINA, H., “**Selenium-Based Flat Panel X-ray Detector for Digital Fluoroscopy and Radiography**”, Toshiba Medical Systems Research & Development – Center, Tochigi, Japan, 2001.

ASTM A 240 / A 240M (2016) **Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**, West Conshohocken, USA.

ASTM E 2339 (2015) **American Society for Testing and Materials, Standard practice for digital imaging and communication in non destructive evaluation (DICONDE)**, West Conshohocken, USA.

BAM (2016), The BAM radiographic image analysis software; Disponível em: <http://dir.bam.de/ic/>. Acessado em 21/01/2016.

BOIY, L. **Successful conversion to digital X-Ray detectors**, The NDT Database & Journal, ISSN: 1435-4934, ECNDT, November, 2006.

BRUNETTI, A., CESAREO, R., "A **compact X-ray tomograph based on a CMOS Flat Panel**", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 580, 782-784, (2007);

CHEN, T.H., YANG, J.R. **Effects os solution treatment and continuous cooling on sigma phase precipitation in a 2205 duplex stainless steel**. Materials Science and Engineering. Vol. A311, 2001, pp. 28-41.

CORREA, S. C. A, **Avaliação da Correlação de Grandezas Utilizadas para Determinação de kVp com Contraste da Imagem**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

DIAMOND, A. **Stationary & portable use of a-Si Flat Panels in NDT industries**, <http://www.ndt.net>. The NDT Database & Journal, ISSN: 1435-4934, ECNDT November 2006.

DITABIS, “**DITABIS Imaging Plate Tecnology for all Applications in Transmission Eletronic Microscopy**”, disponível: <http://www.ditabis.com>. Acessado em 13/05/2016.

EWERT, U. **Film replacement by digital X-Ray detectors – The correct procedure and equipment**, <http://www.ndt.net>. The NDT Database & Journal, ISSN: 1435-4934, 16th World Conference on Non-Destructive Testing, Montreal, September 2004.

FARMAN A. G.; LEVATO C. M.; GANE D.; SCARFE W. C.; **In practice: How going digital will affect the dental office**, 2008, The Journal of the Dental Association, Disponível em: <http://www.jada.ada.org>, Acesso em: 08 out. 2009.

FERREIRA, C. A. M. **Radiografia Computadorizada Aplicada na Inspeção de Soldas de Tubulações nos Limites da Técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD)**. 105 f. Dissertacao (Mestrado em Engenharia Metalurgica e de Materiais) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GUNN, R.N. (ed.) **Duplex Stainless Steels: Microstructures, Properties and Applications**. Cambridge: Abington Publishing. 204p, 1997.

ISO 17636-2 (2013), **International Organization For Standardization, Non destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X and gamma ray techniques with digital detectors**.

KASAP, S.O., ZAHANGIR KABIR, M., ROWLANDS J.A., et. al. ”**Recent advances in X-ray photoconductors for direct conversion X-ray image detectors**”, 6 288–292, 2006.

KNOLL, G.F., “**Radiation Detection and Measurement**”, 3^a ed., New York, 2000.

LONDOÑO, A. J. R., **Estudo da precipitação de nitreto de cromo e fase sigma por simulação térmica da zona afetada pelo calor na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex**, 1997.

MARINHO, C.A., RABELLO, R.T. Lopes, J.M.A.; **“Film Replacement by Digital Techniques in Weld Inspection”**, Materials Evaluation, pp 529-539, July (2008).

MARINHO, C.A., RABELLO, R.T., Lopes, R.T., OLIVEIRA, D.F., Silva, A.S., **“Radiografia Digital – Evolução De Aplicação Da Técnica Na Indústria”**, Coteq 063, ano IV, 2011.

MODENESI, P.J., **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**, 2008.

MOREIRA, E. V., 2007, **“Aplicação da radiografia digital utilizando detectores planos para inspeção de soldas de gasodutos e oleodutos”**, Dissertação de M.Sc., Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil.

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., **“Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Soldas”**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

NILSSON, J.O. Overview – **“Super duplex stainless steels.”**; Materials Science and Technology, v. 8, p. 685 – 700, august, 1992.

OLIVEIRA, D. F., **“Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas”**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

OLIVEIRA, D. F., 2010, **“Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos”**, Tese de D.Sc., : UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

OLSSON, J. & LILJAS, M. **60 years of Duplex Stainless Steels -Applications**. ANCON; nº 2; p. 17-23, 1996.

ROCHA, J. **Microdetectores de silício baseado em cintiladores para radiografia digital**, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2003.

SAHU, J.K., KRUPP, U., GHOSH, R.N., CHRIST, H.J. **Effect of 475°C embrittlement on the mechanical properties of duplex stainless steel.** Materials Science & Engineering, 2009.

SATHIRACHINDA, N., PETTERSSON, R., PAN, J. **Depletion effects at phase boundaries in duplex stainless steel characterized with SKPFM and TEM/EDS.** Corrosion Science. 2009, Vol. 51, pp. 1850-1860.

SATHIRACHINDA, WESSMAN, S., KIVISÄKK, U., **Scanning Kelvin probe force microscopy study of chromium nitrides in 2507 super duplex stainless steel - Implications and limitations.** PAN, J. 2010, Electrochimica Acta.

SENATORE, M., FINZETTO, L., PEREA, E., **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis duplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L.** 2007, Revista Escola de Minas, Vol. 60.

SILVA, R. R.; **Radiografia Industrial**, ABENDI, São Paulo, Cap X, 1ªEd., (2010)

SILVA, M.C., LAMMOGLIA, P., HERDADE, S.B. et al. **“Determinação da Tensão aplicada a Tubos de Raios X através do Espectro de Bremsstrahlung obtido com Fotodiodo PIN”**, Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v.16, pp.13-20, 2000.

SPRAWLS, P. **“Physical Principles of Medical Imaging**, Madison, Wisconsin: Medical Physics”, 2 ed., Wisconsin, USA, 1995.

TAUHATA, L. et al., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.

UNESP Universidade Estadual Paulista, curso on-line – Show de Física – Ondas Eletromagnéticas, Disponível em: http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20eletromag.htm. Acessado em 12/01/2016

VARIAN SYSTEM, **“DDA Digital Imaging”**, Disponível em: http://www.varian.com/us/xray/products/digital_radiography/technology.html#xrayconversion-methods. Acessado em 11/02/2016.