



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

INSPEÇÃO DE SOLDA DO BOCAL DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL PWR POR RADIOGRAFIA DIGITAL

Marina Ferreira Fonseca Sessim

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

Orientador: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Rio de Janeiro

Julho de 2015

INSPEÇÃO DE SOLDA DO BOCAL DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL PWR POR
RADIOGRAFIA DIGITAL

Marina Ferreira Fonseca Sessim

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

Examinada por:

Prof. Inayá Corrêa Barbosa Lima, D.Sc.

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Aline Saddock de Sá Silva, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2015

Sessim, Marina Ferreira Fonseca

Inspeção de Solda do Bocal do Elemento Combustível
PWR Por Radiografia Digital/ Marina Ferreira Fonseca
Sessim. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

XIV, 51 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de
Engenharia Nuclear, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 49-51.

1. Radiografia Digital. 2. Inspeção de Soldas. 3. Elemento
Combustível PWR. 4. Raios X. I. Lima, Inayá. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Curso de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Aos meus pais David e Márcia
e ao meu irmão Michel.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos e realizações em minha vida.

Aos meus pais, David e Márcia, e ao meu irmão, Michel, por sempre me orientarem, apoiarem e por todo amor e carinho que sempre recebi.

Ao meu namorado Carlos Magno, pelo apoio, compreensão, carinho e por estar sempre ao meu lado.

A Prof. Inayá Lima (PEN/COPPE/UFRJ) pela orientação, disponibilidade e atenção dada neste trabalho.

Ao amigo Célio Simonacci Gomes, pela paciência, atenção e disponibilidade dada ao meu aprendizado.

Aos amigos de graduação em Engenharia Nuclear, por todo o apoio e cumplicidade ao longo do curso.

Ao Departamento de Engenharia Nuclear da POLI/UFRJ, pela oportunidade de realização deste trabalho.

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

INSPEÇÃO DE SOLDA DO BOCAL DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL PWR POR RADIOGRAFIA DIGITAL

Marina Ferreira Fonseca Sessim

Julho/2015

Orientadora: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Departamento: Engenharia Nuclear

Este trabalho objetiva empregar a técnica de radiografia digital como forma de inspeção geral de soldas dos bocais do elemento combustível PWR. A referida solda é produzida por feixe de elétrons e a qualificação deste processo consiste de diversos ensaios destrutivos. Neste contexto, a radiografia digital foi utilizada para avaliar a região soldada. Foram analisados quatro corpos de prova, retirados das laterais de dois bocais superiores do elemento combustível de Angra I. Suas dimensões são de aproximadamente (7,0 x 2,5) cm, (altura x largura) com variações de espessura de 0,5 a 2,5 cm. Os bocais são compostos por aço inoxidável do tipo AISI 321. No ensaio experimental foi utilizado um tubo de raios X do fabricante Yxlon modelo Y.XPO 225 D02 operando a 200 kV e 4 mA com tempo de exposição igual a 2 segundos. Cada radiografia foi obtida com uma média de 10 quadros. A técnica utilizada foi a de radiografia digital direta com o detector modelo DXR250V, conhecido como “Flat Panel”, do fabricante GE&IT. As peças foram posicionadas no aparato experimental lado a lado e também inclinadas. Os resultados revelaram visualizações satisfatórias dos cordões de solda, de forma a serem evidenciadas descontinuidades nas regiões analisadas. Os resultados também demonstram a aplicabilidade da radiografia digital na qualificação do processo de soldagem, pois foi possível observar detalhadamente a região soldada.

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

WELD INSPECTION OF NOZZLE PARTS OF A PWR FUEL ASSEMBLY BY
DIGITAL RADIOGRAPHY

Marina Ferreira Fonseca Sessim

Julho/2015

Advisor: Inayá Corrêa Barbosa Lima

Department: Nuclear Engineering

This work aims to apply digital radiography technique as a way of general weld inspection of nozzle parts of a PWR fuel assembly. The referred weld is made by electron beam and the actual qualification processes consist of several destructive tests. In this context, the digital radiography was used to assess the quality of the welded region. Four specimens were removed from the sides of two top nozzle parts of Angra I's fuel assembly. Their dimensions were approximately (7,0 x 2,5) cm (height x width) with variations in their thickness from 0,5 to 2,5 cm. The mentioned nozzles are fully consisted of AISI 321 stainless steel. The equipment used during the experimental procedure was an X ray tube from the manufacturer Yxlon model Y.XPO 225 D02, operating at 200 kV and 4 mA with an exposure time of 2 seconds. Each radiography was acquired with an average of 10 frames. The technique used was direct digital radiography using the detector model DXR250V, usually known as Flat Panel, from the manufacturer GE&IT. The experimental apparatus consisted of the specimens positioned side by side on the detector and inclined. The results showed satisfactory visualizations of the weld beads, to be highlighted discontinuities across the analyzed regions. The results also support the applicability of digital radiography as part of the qualification process, since it was possible to inspect minutely the welded region.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1 Raios X.....	6
3.2 Sistemas de Radiografia.....	13
3.3 Formação da Imagem Digital	17
3.3.1 Resolução Espacial.....	20
3.3.2 Contraste.....	20
3.3.3 Ruído	22
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Corpos de Prova.....	23
4.2 Aparato Experimental.....	26
4.2.1 Setup #01	28
4.2.2 Setup #02	30
4.3 Indicadores de Qualidade de Imagem	31
4.4 Relação Sinal Ruído Normalizada	33
4.5 Metodologia para Classificação das Descontinuidades.....	33
CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	35
5.1 Imagens Radiográficas	35
5.2 Análise Dimensional das Descontinuidades	37
5.3 Classificação das Descontinuidades	41

5.4 Qualidade da Imagem	44
5.4.1 Resolução Espacial Básica	44
5.4.2 Relação Sinal Ruído Normalizada.....	45
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	48
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de produção de raios X característicos (Fonte: [10])	7
Figura 2: Espectro completo de um tubo de raios X (Fonte: [12])	8
Figura 3: Representação do Efeito Fotoelétrico (Fonte: [10])	9
Figura 4: Representação do Espalhamento Compton (Fonte: [10])	10
Figura 5: Importância relativa dos 3 efeitos (Fonte: [10])	10
Figura 6: Elementos necessários para a produção de raios X num típico tubo (Fonte: [9])	13
Figura 7: Radiografia de Crânio e Joelho (Fonte: [9])	14
Figura 8: Tipos de radiografias e seus respectivos detectores	14
Figura 9: a. Estrutura de FPD por conversão indireta com material cintilador Iodeto de Césio (CsI). b. Vista lateral das camadas, visualizando o refletor de luz visível, o cintilador e a matriz de TFT (Fonte: [7])	16
Figura 10: Estrutura básica de um Flat Panel por conversão indireta	16
Figura 11: Função $f(x,y)$ que representa os valores de nível de cinza em coordenadas espaciais	17
Figura 12: Representação de uma imagem digital que pode ser pensada como um objeto 3D	18
Figura 13: Configurações de bytes, valores de pixel e tons de cinza (Fonte: [15])	19
Figura 14: Foto do bocal superior de Angra I produzido pela INB - Indústrias Nucleares do Brasil, após todo o processo de montagem e acabamento (Fonte: Divulgação INB)	23
Figura 15: Fotografia da amostra 1: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.	24
Figura 16: Fotografia da amostra 2: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.	24
Figura 17: Fotografia da amostra 3: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.	25
Figura 18: Fotografia da amostra 4: (a) vista frontal, (b) lateral e (c) perspectiva isométrica.	25

Figura 19: Tubo de raios X modelo Y.XPO 225 D02 do fabricante Yxlon (Fonte: [18])	26
Figura 20: Detector modelo DXR250V do fabricante GE&IT	27
Figura 21: Exemplificação de instrumentação: (a) tubo de raios X (b) Flat Panel	28
Figura 22: Aparato experimental do Setup #01: (a) placas de chumbo, (b) FPD, (c) CPs, (d) IQI.	29
Figura 23: Detalhe do Setup #01, sendo indicados os cordões de solda e as amostras.....	29
Figura 24: Aparato experimental do Setup #02 com as placas de chumbo	30
Figura 25: Detalhe do Setup #02, sendo indicados os cordões de solda e as amostras.....	30
Figura 26: Ilustração do IQI de fio duplo (Fonte: [18]).....	31
Figura 27: Perfil de linha de um fio duplo mostrando a diferença de pelo menos 20% dos valores máximo e mínimo (Fonte: [18])	32
Figura 28: Tipos de defeitos em solda e suas representações nas radiografias (Fonte: [5])	34
Figura 29: Radiografia do Setup #01 evidenciando os cordões superiores e inferiores	36
Figura 30: Radiografia do Setup #02.....	36
Figura 31: Localização e dimensão das descontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 1, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 07 descontinuidades.	37
Figura 32: Localização e dimensão das descontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 2, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 02 descontinuidades.	38
Figura 33: Localização e dimensão das descontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 3, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 04 descontinuidades.	38
Figura 34: Localização e dimensão das descontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 4, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 03 descontinuidades.	39
Figura 35: Calibração do tamanho do pixel a partir do espaçamento entre o primeiro par de fios do IQI.	39
Figura 36: Exemplificação do método do perfil de linha traçado sobre descontinuidade	40
Figura 37: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 1	42

Figura 38: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 2	42
Figura 39: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 3	43
Figura 40: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 4	43
Figura 41: A linha de perfil traçada sobre o IQI de fio duplo da radiografia do Setup #01	44
Figura 42: Método de cálculo da SNRN utilizando o software “iSee!” com ROI de 20 x 55 pixels	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do aço inoxidável AISI 321 segundo norma ASTM A240 (17).....	25
Tabela 2: Especificações do tubo de raios X utilizado no trabalho	26
Tabela 3: Especificações do detector digital utilizado, modelo DXR250V do fabricante GE&IT.....	27
Tabela 4: Parâmetros do Indicador de Qualidade de Imagem. Extraído de (20).	32
Tabela 5: Dimensões em milímetros das descontinuidades presentes no cordão de solda superior das amostras 1, 2, 3 e 4.	41
Tabela 6: Resolução Espacial do Setup #01 equivalente a 3,125 pl/mm. Tabela extraída de (20).....	45
Tabela 7: Valores da SNR Normalizada para 10 pontos aleatórios da imagem.	46

LISTA DE SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	Bocal Superior
BSR	Basic Spatial Resolution
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CP	Corpo de Prova
DDA	Digital Detector Array
EB	Electron Beam
EC	Elemento Combustível
FPD	Flat Panel Detector
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
MTF	Curva de Transferência de Modulação
PWR	Pressurized Water Reactor
ROI	Região de Interesse
SNR_N	Relação Sinal Ruído Normalizada
TFT	Thin Transistor-Film

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O elemento combustível (EC) de uma usina nuclear do tipo PWR (Pressurized Water Reactor – reator a água pressurizada) requer muita atenção quanto às suas características mecânicas e estruturais. Ao longo da operação da usina, o EC sofre fortes tensões, fadiga, corrosão, além dos efeitos da radiação. Ele é composto por diversas partes, como varetas, tubos guia, grades espaçadoras, luvas, bocais superiores e inferiores, dentre outros. Todos os elementos devem passar por um rigoroso processo de qualidade a fim de manter a integridade do EC durante a operação da usina. No Brasil, os ECs das usinas de Angra I e II são fabricados pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil), que é responsável por verificar a qualidade de seus produtos.

Os componentes que formam os bocais são soldados por feixe de elétrons (EB), uma solda de altíssima qualidade e precisão. Segundo a Norma CNEN NE 1.27 [1], a qualificação do processo de soldagem é imprescindível para a segurança da usina. Sendo assim, o processo de qualificação da solda EB na INB é atualmente composto por 04 (quatro) testes: metalografia, dobramento, corrosão intercrystalina e tração. Durante a produção, 01 (um) em cada 12 (doze) bocais é retirado para análise destrutiva de metalografia, a fim de conferir a penetração da solda. Além disso, todos os bocais são analisados visualmente e passam por um ensaio chamado de líquido penetrante, que é um método de inspeção utilizado para detecção de descontinuidade essencialmente superficial.

O processo radiográfico vem sendo aprimorado desde a descoberta dos raios X por Roentgen em 1895. Desde então, a referida técnica é aplicada tanto na medicina quanto na indústria. A radiografia digital representa um grande avanço tecnológico quando comparada à convencional, principalmente no que diz respeito a natureza da imagem e ao processo de detecção da radiação. Na radiografia digital é utilizado um detector plano conhecido como “Flat Panel” (FPD), podendo ter sua tecnologia baseada na conversão direta ou indireta da radiação X ou γ . No método direto, a radiação é absorvida pelo detector produzindo diretamente um sinal elétrico. No método indireto, a radiação é

previamente convertida, por telas cintiladoras, em fótons visíveis que por sua vez são posteriormente convertidos em sinais eletrônicos. Neste último caso, o detector mencionado possui uma camada de material cintilador, que converte fótons em luz visível. Uma camada de silício amorfo (a-Si) agregada a uma matriz de TFT é capaz de converter a luz incidente em sinais elétricos, que posteriormente serão transformados na imagem digital.

Neste escopo, o objetivo deste estudo foi promover e qualificar as radiografias dos cordões de solda dos bocais do EC a fim de testar a aplicabilidade desta técnica como uma forma de inspeção geral de soldas EB.

Para atingir tal objetivo, foi utilizado um tubo de raios X e um DDA de conversão indireta. Uma investigação prévia foi realizada em laboratório para avaliar as condições necessárias para uma boa visualização da região soldada. Em seguida, as radiografias foram executadas e analisadas em software específico.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica necessária para compreensão do estado da arte atual.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica necessária para compreensão deste trabalho. São abordados temas como a interação da radiação com a matéria, produção de raios X, processo radiográfico e a formação da imagem digital.

No capítulo 4 são apresentados os procedimentos e aparatos experimentais, assim como os métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

Nos capítulos 5 e 6 são apresentados, respectivamente, os resultados e conclusões obtidos a partir do estudo proposto, assim como sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi estudado [2] o comportamento de trincas de fadiga no aço inoxidável do tipo AISI 321, em ambiente corrosivo e com temperatura elevada. O trabalho teve como objetivo determinar a curva de engenharia (“design curve”) baseada em análise estatística de dados medidos experimentalmente e através da lei de Paris-Ergogan. Os testes foram realizados em espécimes em solução aquosa e temperaturas nominais de 100 °C e 300 °C. A técnica utilizada foi a de carga constante, com “stress ratio” $R=0,1$ e frequência $f=20$ Hz. Os testes foram interrompidos com 3 horas. Foi concluído que o Oxigênio presente no meio aquoso teve significativa influência na propagação da trinca de fadiga, ao contrário dos íons que também foram testados no meio. Também se inferiu que as características da propagação da trinca de fadiga são diferentes para cada temperatura testada, e que uma propagação estável foi encontrada com 3h de teste a 300°C.

Foi conduzido um estudo [3] sobre as características mecânicas e metalúrgicas do aço inoxidável tipo AISI 321, soldado por feixe de elétrons. Foram aplicados testes de microdureza ao longo da região afetada pelo calor, além de testes de tensão e impacto nas soldas. Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) e Micro-Fluorescência de Raios X Induzida por Próton (μ -PIXE) foram executados a fim de analisar a microestrutura da região soldada. Foi concluído que a zona termicamente afetada aumentou com a espessura da amostra, e que microrachaduras transversais dendríticas foram encontradas no contorno da região fundida e sólida. Ficou evidente a variação na microdureza através da região soldada, que diminui ao longo do eixo de soldagem. Os testes de tensão se mostraram satisfatórios, com as falhas no material base, e não nas soldas, que se mostraram mais resistentes. Além disso, micro rachaduras apareceram no contorno da região fundida, onde há depleção de Ti.

Foi investigado [4] o comportamento da solda por feixe de elétrons no que diz respeito a correlação dos diferentes parâmetros de processo, tais como profundidade de solda, parâmetro de foco e eficiência térmica. Foram analisados dados experimentais de diversas velocidades de solda, potência do feixe e posição do plano de foco em relação à

superfície da amostra. Foi concluído que a profundidade de solda é um parâmetro mais sensível que a eficiência térmica. Também foi concluído que, no caso de potências maiores, quando esta é maior do que a necessária, as soldas se formam com melhor qualidade. Cordões de solda finos e profundos, obtidos por potências menores, levam a presença de vazios, situados no meio da profundidade de solda.

Foi apresentado um método [5] para detecção e classificação dos defeitos presentes em radiografias de soldas. Este método foi aplicado para detectar e discriminar discontinuidades presentes nas imagens dos cordões de solda que podem corresponder a alarmes falsos ou defeitos como buracos de minhoca (“wormholes”), porosidades, poros de gás, falta de fusão ou rachadura. Um conjunto de 43 descritores correspondentes a medidas de textura e geometria são extraídos de cada objeto segmentado e usados como dados de entrada para o classificador. O classificador é treinado para classificar cada objeto em uma das classes de defeito, ou como não-defeito. 3 diferentes classificadores foram utilizados (“Support Vector Machine”, “Neural Network” e “k-NN”). Os resultados obtidos foram promissores no que diz respeito a detecção multi-classe de defeitos de solda. O trabalho pode servir de base para um futuro banco de dados de detecção de defeitos de solda utilizando características geométricas e de textura.

Foi discutida [6] a importância dos novos detectores denominados “Flat Panels”. Duas maiores tecnologias foram abordadas, baseadas na conversão indireta dos raios X em luz (utilizando um material cintilador) e posterior carga proporcional (utilizando um fotodiodo), ou na conversão direta dos raios X em cargas (utilizando um material semicondutor) para aquisição do sinal e digitalização. Ambos os detectores se mostraram muito bem-sucedidos para altas exposições, mas perdem qualidade de imagem para exposições menores, comuns na Fluoroscopia. Outros benefícios dos FPD incluem quase nenhuma distorção de geometria e uma resposta uniforme ao longo do campo de visão.

Foram avaliadas [7] as características de um detector baseado em conversão indireta. Foi utilizado um FPD de 41 x 41 cm, construído sobre um substrato de vidro monolítico, com uma camada de iodeto de cério como material cintilador e uma matriz de transistores de silício amorfo para leitura da imagem. As imagens adquiridas com esse detector foram avaliadas em linearidade, repetitividade, uniformidade de resposta, sensibilidade de contraste, espalhamento, dentre outros. Os resultados obtidos

demonstraram excelente uniformidade, repetitividade, dentre outros parâmetros que se mostraram superiores ao sistema de Fósforo (P) utilizado na radiografia computadorizada. O contraste e espalhamento foram equivalentes ao sistema de Fósforo (P). Conclui-se que os FPD fornecem uma excelente qualidade de imagem.

Foi estudada [8] a utilização da solda por feixe de elétrons na indústria nuclear, com ênfase na sua aplicação em cilindros de Cobre (Cu) para o armazenamento a longo prazo de rejeitos radioativos. Diversos testes foram realizados para a verificação de todos os possíveis defeitos na solda, inclusive radiografias. Foi concluído que a probabilidade de detecção dos defeitos depende do método utilizado, porém ainda é necessário o corte destrutivo das amostras para uma análise completa [8].

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Raios X

Os raios X são uma radiação eletromagnética, caracterizada por um alto poder de penetração e pequeno comprimento de onda. Por não possuírem carga, são considerados indiretamente ionizantes. Isto é, a formação de íons no meio com o qual a radiação interage é um processo secundário. Os raios X são usualmente classificados em dois tipos distintos: raios X característicos e raios X de frenamento (ou de *Bremsstrahlung*), podendo ser produzidos por diferentes processos, tanto naturais quanto artificiais. A radiação eletromagnética não possui massa nem carga elétrica. Portanto, não é afetada por campos elétricos ou magnéticos. Há duas maneiras corretas de caracterizar uma radiação eletromagnética: como uma onda ou como unidades de energia em forma de partícula chamadas fótons ou quantas [9]. Radiação gama e raios X são formas de radiação eletromagnética.

Em um átomo, quando ocorre a *transição* de um estado mais excitado para um menos excitado, há a liberação de energia na forma de radiação eletromagnética. A energia liberada (E) será a diferença entre as energias do estado inicial (E_i) e final (E_f).

Quando ocorre qualquer processo que retira elétrons da eletrosfera do átomo, a vacância deixada é rapidamente preenchida por outro elétron de camadas superiores. Logo, este elétron passa de um estado menos ligado para um mais ligado, visto que as camadas mais próximas do núcleo sofrem maior força de atração. A diferença de energia daquele elétron é liberada em forma de radiação eletromagnética, conhecida como raios X característicos, de energia equivalente à diferença energética entre os estados inicial e final daquele elétron [10]. O espectro de emissão de raios X característicos é discreto, e o adjetivo “característico” se refere ao fato da energia liberada ser única em cada caso, de forma a caracterizar uma “assinatura” do material emissor. A Figura 1 [10] ilustra o processo de produção de raios X característicos.

As energias dos elétrons da eletrosfera de um átomo são singulares. Desta forma, quando um elétron passa de orbital para outro, pode-se inferir essa transição pela

diferença de energias entre as posições, que é detectada através da energia dos fótons liberados.

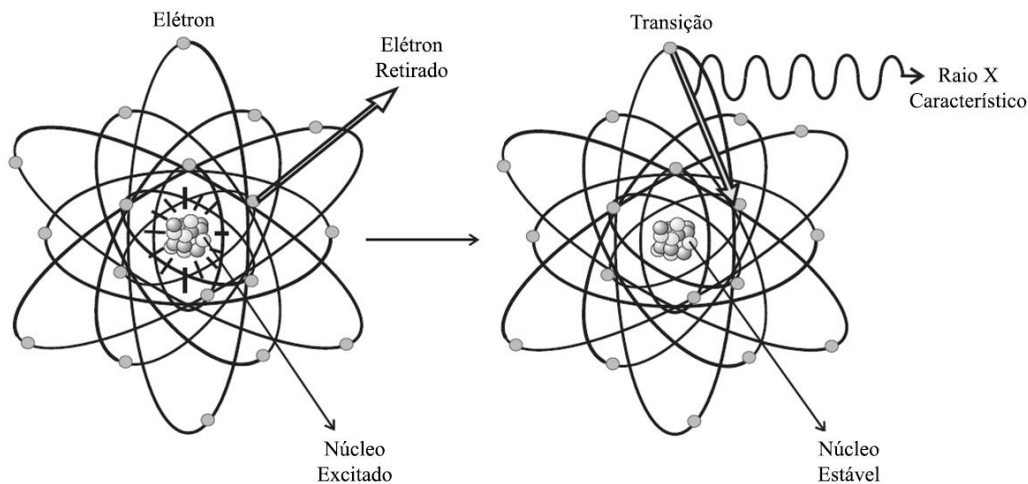


Figura 1: Processo de produção de raios X característicos (Fonte: [10])

Se o elétron retirado pertencer à camada K, e o elétron ocupante pertencer a camada L, um fóton K_{α} será emitido. Porém, se a mesma vacância for ocupada por um elétron proveniente da camada M, será emitido um fóton K_{β} [11]. Suas energias são distintas e revelam detalhes da configuração da eletrosfera daquele átomo.

Por outro lado, elétrons rápidos podem ser “freados” pelo campo elétrico ao interagirem com núcleos de número atômico alto ou com a eletrosfera dos átomos. A diferença de energia cinética do elétron antes e depois da interação é então liberada na forma de radiação eletromagnética, conhecida como raios X de frenamento [9]. A energia dos raios X emitidos depende da energia da partícula incidente e do ângulo aleatório de saída da partícula após a interação. Seu valor exato é imprevisível, um espectro de raios X é emitido variando de zero a um valor máximo, o que caracteriza um espectro contínuo em energia [10].

Sendo assim, o espectro completo de um tubo de raios X, por exemplo, é a combinação da radiação característica (correspondente ao material do alvo) com a radiação de frenamento, fornecendo um espectro tanto com contribuições contínuas quanto discretas em energia (Figura 2).

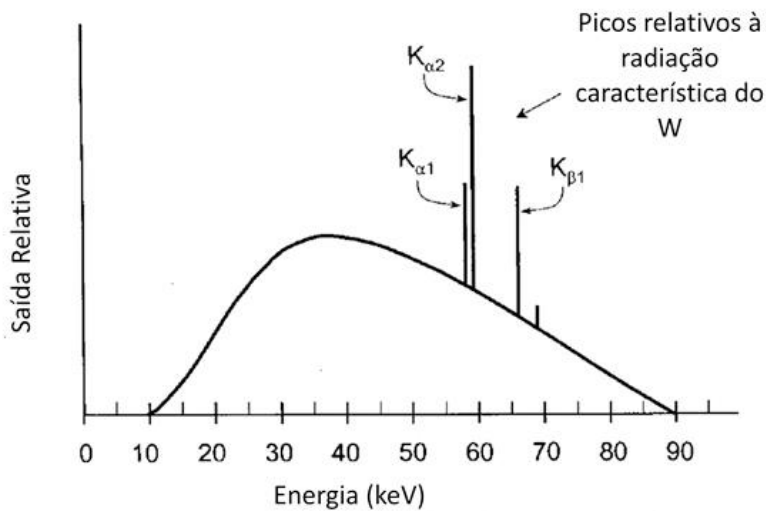


Figura 2: Espectro completo de um tubo de raios X (Fonte: [12])

As radiações eletromagnéticas ionizantes têm um poder de penetração muito maior do que partículas carregadas, justamente por não serem afetadas pelos campos elétricos dos átomos. Diversas reações podem ocorrer, e a probabilidade de interação depende da energia do fóton incidente e do material afetado. Os principais tipos são: Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton e Produção de Pares.

O efeito fotoelétrico consiste na total transferência da energia do fóton incidente para um único elétron da camada orbital. Os raios X desaparecem e o elétron é ejetado com uma energia cinética E_c definida por:

$$E_c = h \nu - B_e \quad (1)$$

Na equação 1, h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação, o produto $h \nu$ representa a energia do fóton incidente e B_e é a energia de ligação do elétron.

A direção da partícula ejetada depende da energia do fóton incidente e é probabilística. Isso se deve ao campo magnético perpendicular à direção do fóton, que exerce força sobre o elétron e se compõe com seu momento angular [10].

O efeito fotoelétrico (Figura 3) é predominante para baixas energias e para materiais de elevado número atômicos. Suas aplicações são vastas, pois os fotoelétrons podem ser usados para identificar o valor da energia da radiação incidente na área de detecção, dentre diversas outras utilidades.

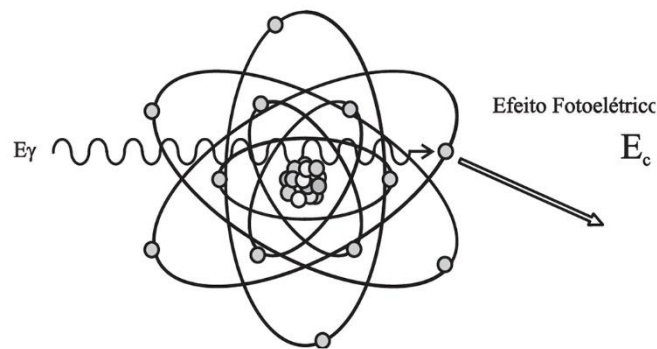


Figura 3: Representação do Efeito Fotoelétrico (Fonte: [10])

No espalhamento Compton (Figura 4), um elétron da camada orbital recebe apenas parte da energia do fóton incidente após a interação. Ambos saem com trajetórias aleatórias, podendo resultar em elétrons e fótons com diversas energias e direções. Logo, a energia do elétron ejetado pode variar de zero até um valor máximo. A energia do fóton espalhado depende da sua energia inicial e do ângulo de espalhamento. Ela é máxima quando sua trajetória não for alterada, ou seja, $\theta = 0^\circ$, e mínima para $\theta = 180^\circ$. Pela lei da conservação, a energia do elétron é máxima para $\theta = 180^\circ$ e mínima para $\theta = 0^\circ$ [10].

Como a energia do elétron ejetado não é um valor preciso, há menos aplicações para o espalhamento Compton. Sua probabilidade de ocorrência é maior para radiações de energias maiores, quando a energia de ligação do elétron se torna desprezível e, portanto, facilmente retirado da camada orbital.

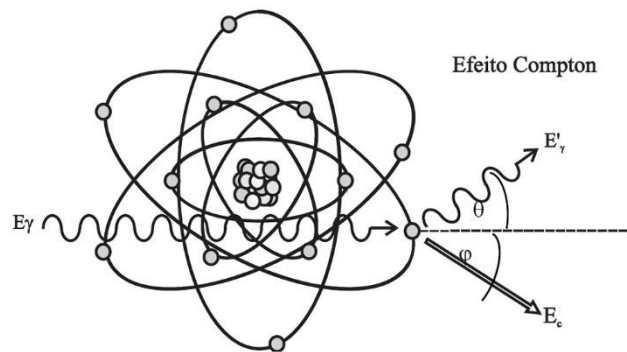


Figura 4: Representação do Espalhamento Compton (Fonte: [10])

A produção de pares se torna um efeito mais observado para altas energias. Ela ocorre quando um fóton de energia superior a 1,022 MeV passa próximo a um núcleo de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação desaparece e dá lugar a um par elétron-pósitron. As duas partículas transferem sua energia cinética para o meio material [10]. Posteriormente, o par elétron-pósitron vai se recombinar dando origem a 2 fótons de energia 511 MeV cada.

Como mencionado anteriormente, o efeito fotoelétrico é predominante para fótons de energias mais baixas. Conforme a energia aumenta, o efeito predominante torna-se o espalhamento Compton. Para altíssimas energias, acima de MeVs, a Produção de Pares é mais observada. A Figura 5 evidencia essas probabilidades de interação baseada no número atômico do material e a energia do fóton incidente:

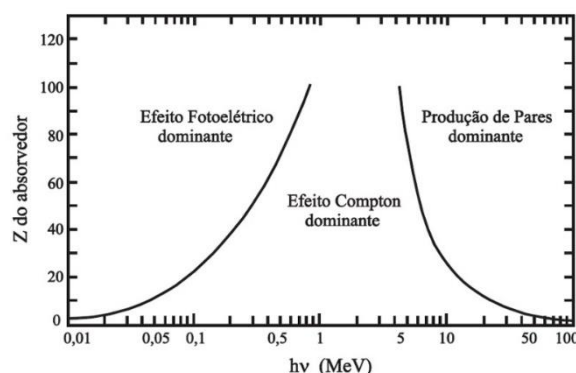


Figura 5: Importância relativa dos 3 efeitos (Fonte: [10])

Ao atravessar um material absorvedor, os raios X são atenuados pelos 03 (três) principais efeitos de interação com a matéria que foram discutidos na seção anterior. A

intensidade dos fótons I que atravessam uma determinada espessura x de certo material absorvedor é definida por (Lei de Lambert-Beer) [11]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

Na equação 2 I_0 é a intensidade antes de atravessar o material, μ representa o coeficiente de atenuação linear e é representado pela soma das probabilidades de ocorrência dos três principais efeitos de interação da radiação com a matéria por unidade de caminho no absorvedor [11], como pode ser visualizado na equação 3.

$$\mu = \tau (\text{Fotoelétrico}) + \sigma (\text{Compton}) + \kappa (\text{Produção de Pares}) \quad (3)$$

Em geral, os coeficientes de atenuação variam com a energia da radiação X e com o número atômico do absorvedor. O coeficiente de atenuação linear também depende da densidade do absorvedor. O coeficiente de atenuação de massa obtido pela divisão do coeficiente de atenuação linear pela densidade pdo meio de atenuação, não varia com a densidade meio, como pode ser visto nas Equações 4-6.

$$\tau_m = \frac{\tau}{\rho} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\rho} \quad (5)$$

$$\kappa_m = \frac{\kappa}{\rho} \quad (6)$$

A formação da imagem radiográfica acontece a partir da interação da radiação X com o material com o qual ela está interagindo, sendo registrado por um receptor de imagem. A radiografia é uma técnica de imagem que pode ter seu início datado desde a descoberta dos raios X por Roentgen em 1895. A partir de então, esse método é aplicado

na indústria como um ensaio não-destrutivo que, pela definição, não compromete as futuras aplicações e integridade da peça. Nesta técnica a peça é posicionada entre a fonte de raios X e um receptor de imagem (filme/detector). Um curto pulso de raios X é então emitido. Parte do feixe de radiação é atenuado ou absorvido pela peça e outra parte passa direto e interage com o filme/detector, formando a imagem. Podem ser evidenciadas técnicas radiográficas convencionais ou digitais. Ambas as técnicas podem abordar um tubo gerador de raios X como sua fonte de radiação, um gerador de alta tensão e um painel de controle.

Nos tubos de raios X (Figura 6) o feixe de elétrons é gerado através da emissão termoiônica num filamento aquecido (colocado no catodo). Os eletrodos (catodo e anodo) são contidos em uma ampola de vidro a vácuo, para evitar sua oxidação. Certa voltagem é aplicada entre eles, que pode variar conforme as dimensões e características da peça a ser analisada. Um alvo estratégico é colocado no anodo para a futura produção de raios X. O catodo se torna negativamente carregado, e será a fonte de elétrons. O anodo é carregado positivamente e é para onde os elétrons se deslocarão. Através da diferença de potencial, os elétrons viajam entre eles adquirindo energia cinética. Esta energia cinética é proporcional à diferença de potencial entre o catodo e o anodo [9].

Ao colidirem com o alvo, os elétrons convertem sua energia cinética em outras formas de energia. Grande parte da energia é transformada em calor devido a pequenas colisões no material. Em menor proporção, ocorre o efeito de raios X de frenamento. Os elétrons acelerados, ao passarem próximos à núcleos carregados positivamente, são atraídos e freados por forças coulombianas entre eles. A diferença de energia dos estados inicial e final do elétron é então liberada na forma de raios X de frenamento, ou efeito *Bremsstrahlung*. Seu espectro é contínuo e probabilístico, podendo chegar a um valor máximo igual a energia cinética total do elétron.

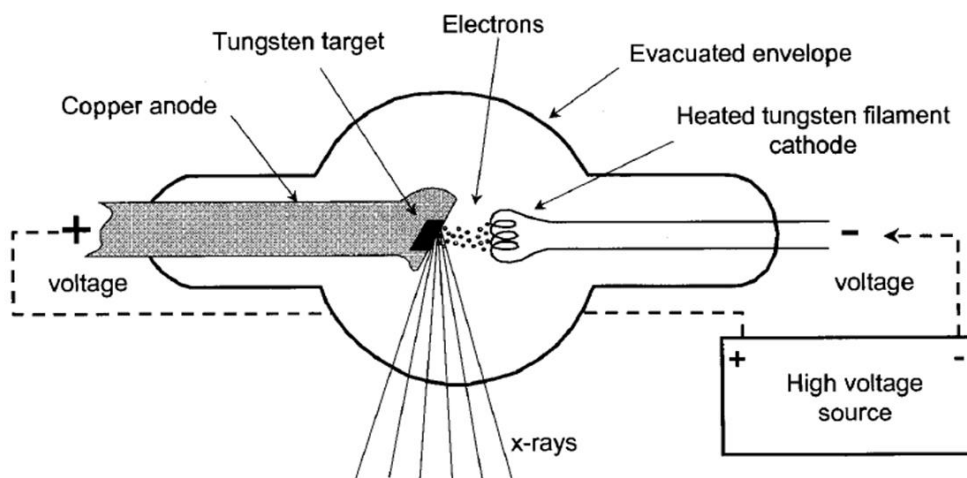


Figura 6: Elementos necessários para a produção de raios X num típico tubo (Fonte: [9])

Após passarem pelo alvo, alguns elétrons continuam viajando e atravessando o anodo. Nesta interação, pode haver a produção de raios X característicos quando a energia cinética do elétron for superior a energia de ligação dos elétrons da camada orbital dos átomos do material. Os raios X característicos são produzidos. Um elétron de energia suficiente colide com um elétron da eletrosfera e este é ejetado. Uma vacância é deixada e rapidamente preenchida por outro elétron de camadas superiores. A diferença de energia deste elétron, que passou de um estado menos ligado para um mais ligado (próximo ao núcleo) é então liberada sob a forma de raios X característicos. O espectro de raios X característicos é discreto devido a energia de ligação das camadas ser única.

3.2 Sistemas de Radiografia

Para obtenção da imagem de uma peça inspecionada ou de qualquer outro corpo de prova, é necessário que este seja colocado entre uma fonte geradora de radiação e um receptor de imagem.

Ao interagir com a peça, os raios X são atenuados pelos diversos materiais e espessuras que a compõe, como visto anteriormente, de forma que quanto maior a espessura do material absorvedor, maior será a atenuação da radiação. A Figura 7 ilustra este comportamento. De fato, é possível verificar que uma grande atenuação na região da

arcada dentária enquanto que uma pequena atenuação na caracterização das regiões moles dos tecidos é observada. Já em relação à imagem do joelho, pode ser observada a produção de imagem com pouco contraste devido à superposição das estruturas.

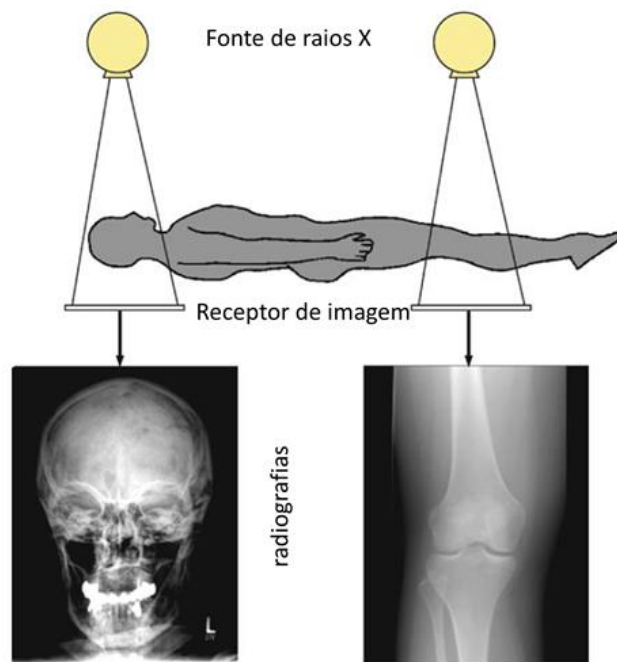


Figura 7: Radiografia de Crânio e Joelho (Fonte: [9])

Diversos métodos de ensaio não destrutivo estão presentes na indústria, podendo ser encontradas técnicas radiográficas convencionais ou digitais (Figura 8).

Radiografia Convencional	Radiografia Computadorizada (Digital Indireta)	Radiografia Digital Direta
<ul style="list-style-type: none"> Filme Radiográfico 	<ul style="list-style-type: none"> Image Plate 	<ul style="list-style-type: none"> Flat Panel (Por Conversão Indireta ou Direta)

Figura 8: Tipos de radiografias e seus respectivos detectores

A técnica de radiografia digital, como o próprio nome já diz, gera uma imagem digital e a envia diretamente a um computador na forma de sinais elétricos e, portanto, se diferencia da convencional pelo método de detecção de imagem. A radiografia digital, de forma geral, oferece algumas vantagens em relação à convencional, a saber: facilidade de exibição das imagens geradas, fatores de exposição menores e facilidade de processamento de imagem. Sendo assim, a diferença básica entre as radiografias convencionais e as digitais está baseada nos métodos de formação da imagem. O objetivo dos detectores é converter os fótons incidentes em sinais eletrônicos que consigam quantificar a intensidade da exposição em diferentes pixels.

De acordo com o método de conversão da radiação em sinais elétricos, a detecção dos raios X pode ser dividida em detecção direta e indireta.

No sistema com conversão direta, o FPD é composto por uma camada de fotocondutor, que é responsável por produzir elétrons ao interagir com os fótons incidentes. Diversos materiais podem ser utilizados para a construção desta primeira camada, dentre eles o Selênio amorfo (a-Se) [9]. Quando os raios X atingem o material fotocondutor, pares elétron-vacância são formados. Um campo elétrico é aplicado para forçar a separação dos dois. Os elétrons, então, por influência do referido campo elétrico, deslocam-se para a base da camada, e as vacâncias, para o topo. Uma subsequente camada de transistores de película fina (TFT) determina a quantidade de cargas elétricas presentes e encaminha essas informações eletronicamente para a futura formação da imagem [12].

Já no sistema por conversão indireta, o FPD é composto primeiramente por uma camada de material cintilador que converte os fótons incidentes em luz visível. O Silício amorfo (a-Si) e o Iodeto de Césio (CsI) são materiais frequentemente utilizados como cintiladores. O padrão de luz visível formado pode ser detectado por um material fotocondutor, fabricado para converter luz visível em sinais eletrônicos. O material fotocondutor mencionado pode incluir o dispositivo CCD e materiais como Silício amorfo (a-Si) agregado a uma matriz de TFT (Figura 9) [12].

Uma típica configuração é evidenciada na Figura 10. Observam-se inúmeros elementos detectores em que cada uma é capaz de armazenar carga em resposta a exposição à radiação. E cada um deles possui uma região sensível à luz e um pequeno canto contendo componentes eletrônicos.

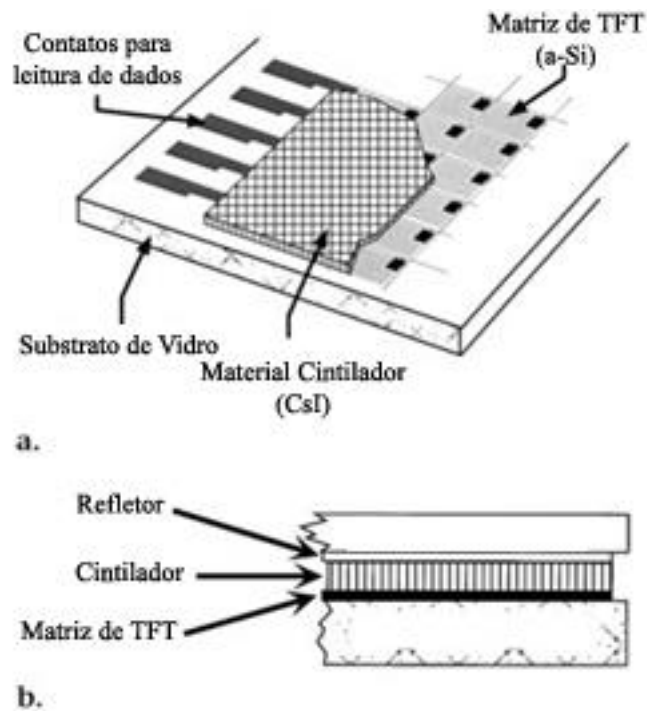


Figura 9: a. Estrutura de FPD por conversão indireta com material cintilador Iodeto de Césio (CsI). b. Vista lateral das camadas, visualizando o refletor de luz visível, o cintilador e a matriz de TFT (Fonte: [7])

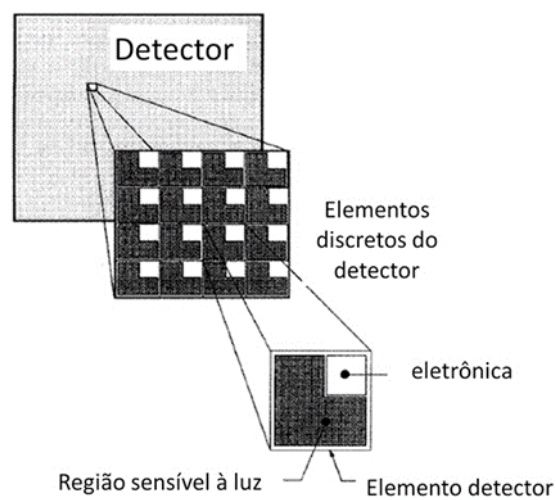


Figura 10: Estrutura básica de um Flat Panel por conversão indireta

3.3 Formação da Imagem Digital

Uma imagem digital é uma matriz e pode ser definida por uma função $f(x,y)$, em que x e y são coordenadas espaciais, e a função f de qualquer conjunto (x,y) representa o valor do nível de cinza daquele ponto (Figura 11). Quando todos os valores de f são finitos e discretos, a imagem pode ser denominada digital. Esta imagem é composta por um número finito de elementos, com localização e valores específicos. Estes elementos são denominados pixels (“picture elements”), com $0 \leq x \leq M-1$ e $0 \leq y \leq N-1$, de forma que cada pixel tem associado um valor $L_{\min} \leq f(x,y) \leq L_{\max}$, tal que o intervalo $[L_{\min}, L_{\max}]$ é denominado de escala de cinza [13].

$$\mathbf{f}(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(1, 0) & \dots & f(M - 1, 0) \\ f(0, 1) & f(1, 1) & \dots & f(M - 1, 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0, N - 1) & f(1, N - 1) & \dots & f(M - 1, N - 1) \end{bmatrix}$$

Figura 11: Função $f(x,y)$ que representa os valores de nível de cinza em coordenadas espaciais

A Figura 12 é a representação de uma imagem digital que pode ser pensada com um objeto 3D composto por um número de cubo pequenos um dos quais contem um código binário. A imagem aparece na superfície frontal do cubo. A profundidade do bloco é o número de bits necessário para descrever o nível de de cinza de cada pixel. O número total de cubos que compoe o bloco é o número de bits requerido para armazenar a imagem. A unidade fundamental de informação é o dígito binário, termo bit, que se refere aos “uns” e “zeros” que compõem o número binário. Neste contexto, o “um” ou o “zero” é considerado como um único bit de informação. Com oito bits tem-se um byte. Neste contexto, um pixel pode ter 8, 16, 24 ou 32 bits de profundidade, de forma que “ler” uma imagem significa acessar seu cabeçalho para descobrir sua profundidade de cor utilizada, quais canais estão presentes, a técnica de compressão utilizada, etc.

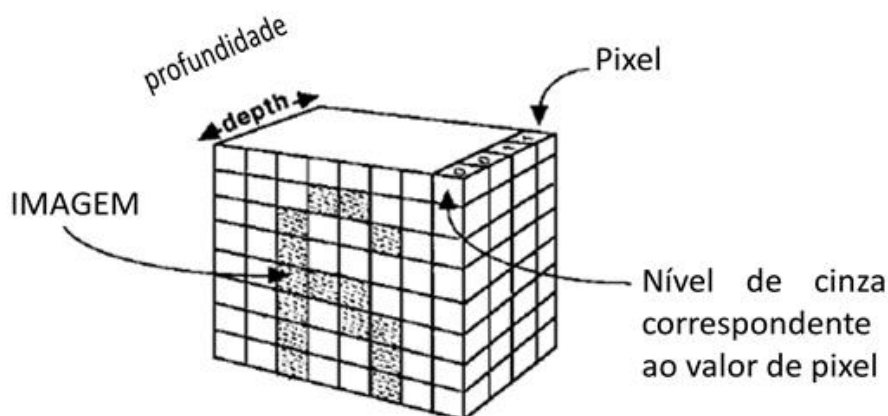


Figura 12: Representação de uma imagem digital que pode ser pensada como um objeto 3D

Os pixels são os blocos básicos de construção das imagens digitais, de modo que no tipo mais simples de imagem gráfica de mapa de bits, existem somente pixels com dois valores possíveis, preto ou branco. Esse tipo de pixel utiliza somente um bit da memória do computador. Desse modo, uma imagem que utilize pixels somente desse tipo pode ser denominada “imagem de 1 bit”. Para criar cores diferentes da cor preta ou da branca, o computador utiliza mais bits de informação. As informações da imagem são então obtidas do detector em forma de cargas e dispostas como uma matriz de valores, que representam os níveis de cinza. Esta imagem digital é armazenada em forma de números binários, com bits compostos por 0 ou 1, proporcionais a intensidade da cada carga que foi recebida.

O espaço de armazenamento é usualmente especificado em bytes, que representam 8 bits, e seus múltiplos [14]. A Figura 13 mostra a relação entre as configurações de bytes, valores de pixel e os tons de cinza: O número de cores ou tons de cinza disponíveis é igual a dois elevado à potência do número de bits, 2^n , em que n representa o número de bits. Sendo assim, com 2 bits pode-se criar quatro níveis de cinza para o pixel. Se o conversor analógico-digital só tiver 8 bits, ele só poderá atribuir valores entre 0 (= 00000000) e 256 (=11111111). Se o conversor tiver 10 bits, ele poderá armazenar valores entre 0 e 1024. Se tiver 16 bits, poderá armazenar valores entre 0 e 65536. A cor de 24 bits é frequentemente chamada de “cor verdadeira”, já que 16 milhões de cores é uma quantidade mais do que suficiente para aproximar-se de todas as cores que o olho humano pode distinguir.

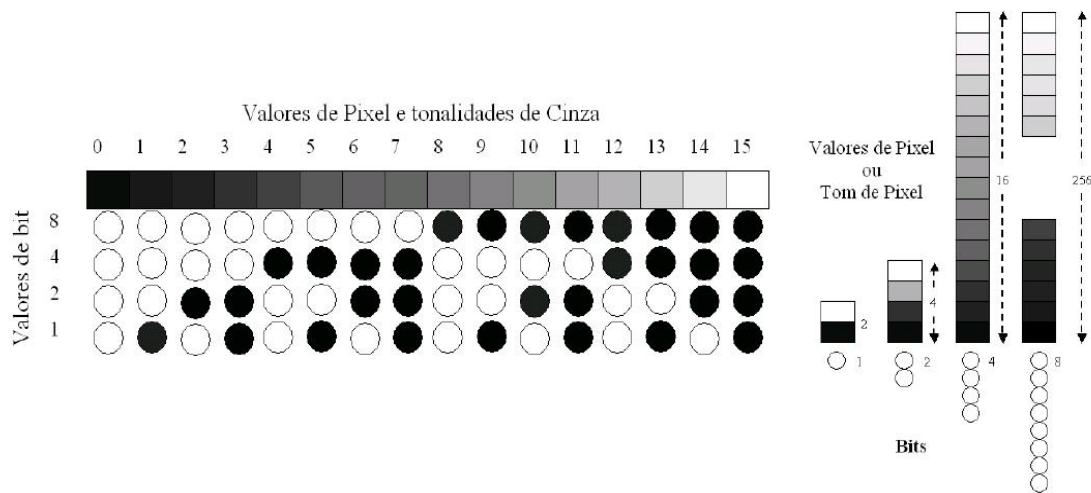


Figura 13: Configurações de bytes, valores de pixel e tons de cinza (Fonte: [15])

Para gerar uma imagem digital, $f(x,y)$ deve ser digitalizada ao longo de x e y e na amplitude $z=f(x,y)$. Para tanto é feita uma amostragem de f nas direções x e y , gerando uma matriz de $M \times N$ amostras, seguida de uma quantização do valor de f em L níveis inteiros de cinza. A amostragem consiste em discretizar o domínio de definição da imagem nas direções x e y , gerando uma matriz de $M \times N$ amostras, respectivamente. A quantização consiste em escolher o número inteiro de níveis de cinza permitidos para cada ponto da imagem.

O que ordinariamente chamamos de imagem é uma imagem digital bidimensional. Em uma imagem digital monocromática, o valor do pixel é um escalar entre 0 e L e em imagens multibandas cada pixel tem associado um valor vetorial, podendo este representar diversas grandezas diferentes, tais como pressão, temperatura e frequência. Uma imagem colorida nada mais é que uma imagem multibandas em que a cor em cada ponto (x,y) é definida através da luminância (associada ao brilho), da matiz (associada ao comprimento de onda dominante) e da saturação (associada a intensidade da matiz).

Considerando que o processo de digitalização envolve parâmetros de amostragem e quantização, uma importante questão é saber quantas amostras $M \times N$ e níveis de cinza são necessários para gerar uma imagem digital de qualidade de diagnóstico. Esta pergunta depende tanto da quantidade de informação contida na imagem quanto do grau de

detalhamento que a informação possui, o que leva as principais características de uma imagem digital: a resolução espacial, o contraste e o ruído.

3.3.1 Resolução Espacial

A Resolução Espacial Básica (BSR) pode ser definida como o menor espaçamento entre dois objetos que podem ser claramente distinguidos. Pode-se dizer que está relacionada a densidade de pixels da imagem. Sua representação quantitativa pode ser feita através da curva de MTF (Curva de Transferência de Modulação), que é definida como a razão das intensidades de saída e entrada das modulações. A MTF descreve a habilidade que os sistemas de aquisição de imagem têm de gerar contraste do objeto em função do detalhe do objeto, ou seja, da resolução espacial do objeto.

Embora a MTF possa ser um parâmetro de medida importante para a radiografia convencional, não é considerada como um fator crítico para imagens digitais, pois o processamento digital permite alcançar a MTF desejada, quando a relação sinal-ruído é suficiente. Especificamente em uma imagem digital com a utilização de Fósforo fotoestimulante, a BSR está atrelada a uma série de fatores que contribuem para a degradação do sinal, o que pode causar uma perda de definição na imagem gerada e, entre eles, podem ser destacadas as limitações físicas impostas pela composição do material, a espessura da placa de Fósforo, o tamanho finito do diâmetro do foco do laser incidente na camada do fósforo, o atraso temporal do processo de luminescência e seu espalhamento no Fósforo.

Na radiografia digital, valores de resolução espacial podem ser levantados com o auxílio de Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI) de fio simples ou duplo.

3.3.2 Contraste

O contraste representa uma medida de diferenciação entre dois pontos da imagem. O contraste radiográfico depende de diversos fatores, como a composição química das amostras, qualidade do detector (filme ou detector digital), o espectro de energia do feixe de raios X, se há ou não radiação de espalhamento, dentre outros. Em suma, a resolução

em contraste descreve a capacidade do sistema em diferenciar duas regiões de coeficientes de atenuação pouco diferentes.

O contraste radiográfico pode ser controlado por alguns fatores e, talvez o mais decisivo, seja a tensão (o kV), pois este controla a energia ou a capacidade de penetração do feixe primário de raios X. Quanto maior o kV, maior a energia do feixe e a sua penetração no corpo, sendo que menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades do corpo inspecionado, produzindo assim menor variação na atenuação. O aumento da tensão provoca, também, aumento da energia e quantidade de raios X que chegam ao detector, causando aumento de densidade radiográfica.

Em imagens digitais, o número de pixels lineares existentes em uma medida padrão define a resolução da imagem. Uma boa resolução requer pixels pequenos. Em sistemas digitais, a menor diferença em um sinal que pode ser representado entre os pixels depende, entre outros fatores, da amplitude do sinal em relação ao background. Na maioria dos sistemas de radiografia digital, os valores de pixel estão relacionados com o logaritmo da luminescência fotoestimulada, o que leva a definição de contraste baseada na diferença numérica entre os valores de pixels. Estes sistemas oferecem um grande intervalo dinâmico de tons de cinza para que se possa capturar um grande intervalo de intensidades de sinal, desde muito baixo até muito alto, ou seja, são capazes de capturar e distinguir milhões de tons de cinza, enquanto que o olho humano só é capaz de distinguir 50 tons de cinza. Este fato apresenta uma vantagem ao sistema digital em relação ao convencional, pois permite o imageamento de áreas que seriam sub ou superexpostas se fosse utilizado o filme convencional.

Como resultado, os sistemas digitais com ruído muito baixo e range dinâmico de tons de cinza muito grande (resolução de contraste muito alta) podem melhorar a visibilidade de objetos de baixo contraste significativamente, comparando-se com a radiografia convencional. Esta visibilidade de objetos de baixo contraste pode ser bem mais aprimorada através de uma sofisticada ferramenta computacional, o processamento digital de imagens, com o aumento de contraste automático, expansão do histograma por normalização ou equalização (linearização).

3.3.3 Ruído

O ruído representa as variações aleatórias na distribuição dos tons de cinza ou cores na imagem. O ruído traz visualizações indesejáveis para a imagem, e principalmente, perda de detalhes da imagem especialmente em regiões de baixo contraste. O ruído pode ser proveniente da forma aleatória que os fótons são distribuídos na formação da imagem, ou dos estágios do processamento eletrônico [15]. O ruído é um fator limitante importante na visibilidade do objeto de interesse, porque permanece constante num dado sistema. O baixo ruído é, portanto, um pré-requisito para imagem de boa qualidade em doses razoáveis, particularmente quando se deseja observar pequenos objetos de baixo contraste. Ele pode ser controlado através da corrente. Para a descrição do ruído ter significado físico, ele geralmente deve ser relacionado ao tamanho (amplitude) do sinal.

O ruído, portanto, deve ser avaliado através da Relação Sinal-Ruído (SNR) fornecendo uma estimativa da proporção do ruído perante o sinal da imagem ($SNR = \text{sinal} / \text{ruído}$). A SNR é então utilizada para descrever a relação entre a amplitude do sinal e o tamanho do ruído. Quanto maior for a razão SNR maior a qualidade de visualização de detalhes na imagem, pois menor será o ruído presente.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os corpos de prova, detalhando seu material e geometria, bem como os equipamentos utilizados neste trabalho e a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo proposto.

4.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova (CPs) utilizados neste trabalho consistem de pequenas amostras coletas dos bocais superiores (BSs) do elemento combustível de Angra I (Figura 14). Foram retiradas duas amostras das laterais de dois BSs diferentes. Os bocais, tanto superiores quanto inferiores, são compostos por placas e quadros, todos fabricados de aço inoxidável AISI 321, especificados pela norma ASTM A240 [16], conforme Tabela 1, soldados por feixe de elétrons. A referida solda foi executada feita na máquina modelo EBW 1501/10-60 CNC do fabricante PTR Präzisionstechnik GmbH. Os bocais foram soldados de acordo com um plano de solda e não passaram por um processo de acabamento. Todo o processo de fabricação e montagem dos elementos combustíveis de Angra I e II foi de responsabilidade da INB.



Figura 14: Foto do bocal superior de Angra I produzido pela INB - Indústrias Nucleares do Brasil, após todo o processo de montagem e acabamento (Fonte: Divulgação INB)

As amostras utilizadas neste trabalho (Figuras 15-18) possuem dimensões irregulares de aproximadamente 7,0 x 2,5 cm (altura x largura), contendo variações de espessura em torno de 0,5 cm em seu ponto mais fino e 2,5 em seu ponto mais espesso. Os bocais dos quais as amostras foram retiradas não passaram pelo processo de acabamento, de forma que uma grande rugosidade é percebida na superfície da região soldada.

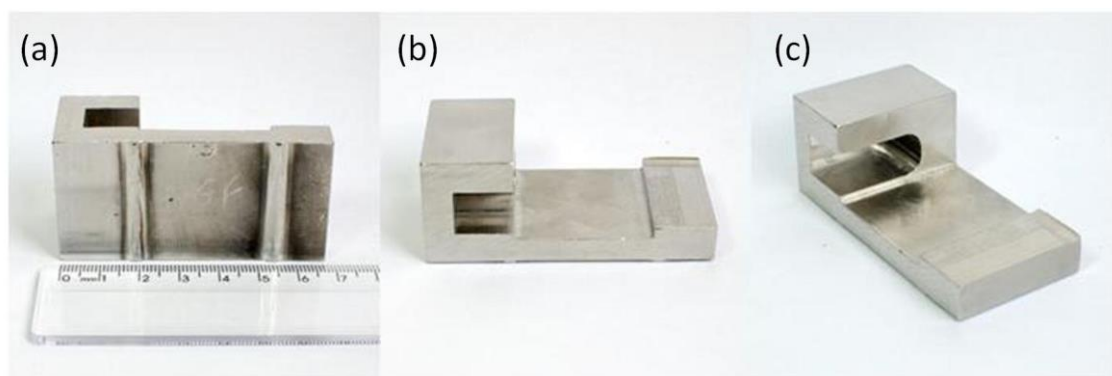


Figura 15: Fotografia da amostra 1: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.

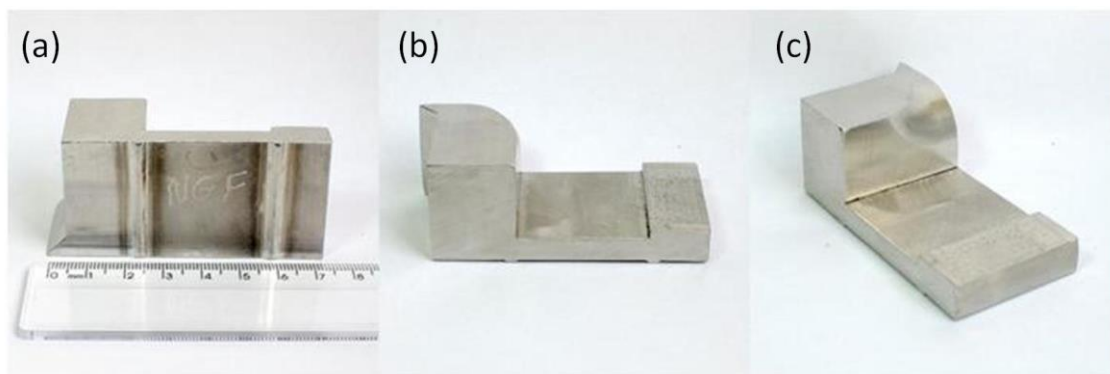


Figura 16: Fotografia da amostra 2: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.

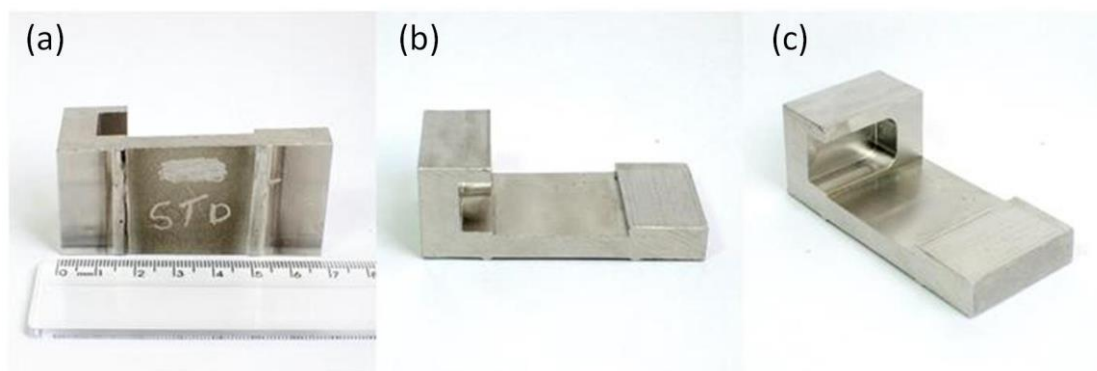


Figura 17: Fotografia da amostra 3: (a) vista frontal, (b) lateral e de (c) perspectiva isométrica.

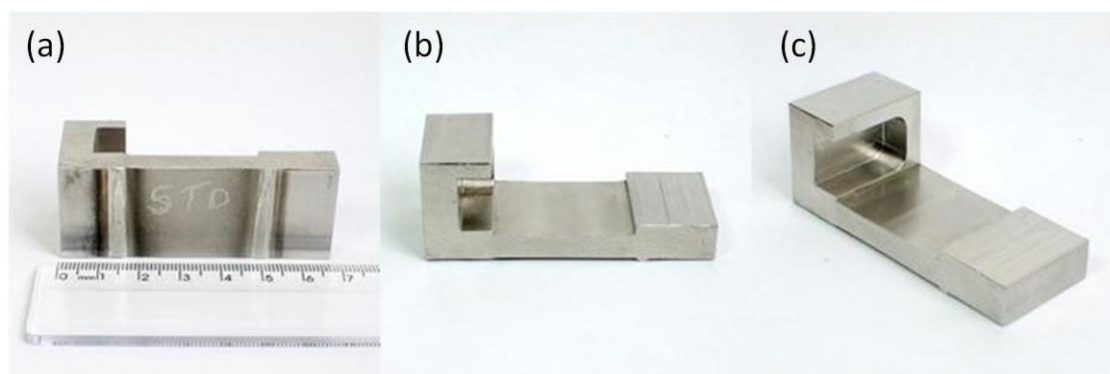


Figura 18: Fotografia da amostra 4: (a) vista frontal, (b) lateral e (c) perspectiva isométrica.

Tabela 1: Especificações do aço inoxidável AISI 321 segundo norma ASTM A240 [16].

Composição Química AISI 321, %*			
Designação UNS	S32100	Cromo	17,0–19,0
Tipo AISI	321	Níquel	9,0–12,0
Carbono	0,08	Molibdênio	...
Manganês	2,00	Nitrogênio	0,10
Fósforo	0,045	Cobre	...
Enxofre	0,030	Outros Elementos	Ti 5 x (C + N) min, 0,70 max
Silício	0,75		
*Porcentagem máxima, a menos que faixa ou mínimo tenham sido estabelecidos			

4.2 Aparato Experimental

A fonte geradora de radiação foi um tubo de raios X modelo Y.XPO 225 D02 do fabricante Yxlon (Figura 19), cujas especificações se encontram listadas na Tabela 2, operando a 200 kV e 4 mA com tempo de exposição igual a 2 segundos. Cada radiografia foi obtida com uma média de 10 quadros.



Figura 19: Tubo de raios X modelo Y.XPO 225 D02 do fabricante Yxlon (Fonte: [17])

Tabela 2: Especificações do tubo de raios X utilizado no trabalho

Tubo de Raios X	
Modelo Y.XPO 225 D02 Fabricante Yxlon	
Ângulo do Feixe	40° x 60°
Comprimento x Diâmetro	808mm x 295mm
Filtração Inerente	0,8mm Be
Filtro Adicional	4mm Al
Max kV	225
Max mA	10
Max Potência	1200 W
Penetração	Até 50mm em Fe
Peso	29 Kg
Tamanho Focal	3mm
Temperatura de Operação	-20°C a +50°C

Foi empregada a técnica de radiografia digital direta, utilizando o detector por conversão indireta, modelo DXR250V do fabricante GE&IT (Figura 20) e suas especificações estão evidenciadas na Tabela 3.



Figura 20: Detector modelo DXR250V do fabricante GE&IT

Tabela 3: Especificações do detector digital utilizado, modelo DXR250V do fabricante GE&IT.

Detector Digital	
Modelo DXR250V Fabricante GE&IT	
Área ativa (próx.)	410 x 410 mm (16 x 16 pol.)
Conversão A/D	14 bits
Dimensões	585x 465 x 27 mm
Faixa Dinâmica	10,000:1
Formato da imagem	2048 x 2048
Material cintilador	Oxisulfito de Gadolínio GOS (Gd_2O_2S)
Peso	6 kg (13 lb)
Temperatura de Operação	10° a 35° C
Tempo mínimo de Exposição	285 ms
Tipo de tela plana	Silício Amorfo

A Figura 21 apresenta um exemplo de instrumentação utilizando a fonte de radiação e o detector supracitados.

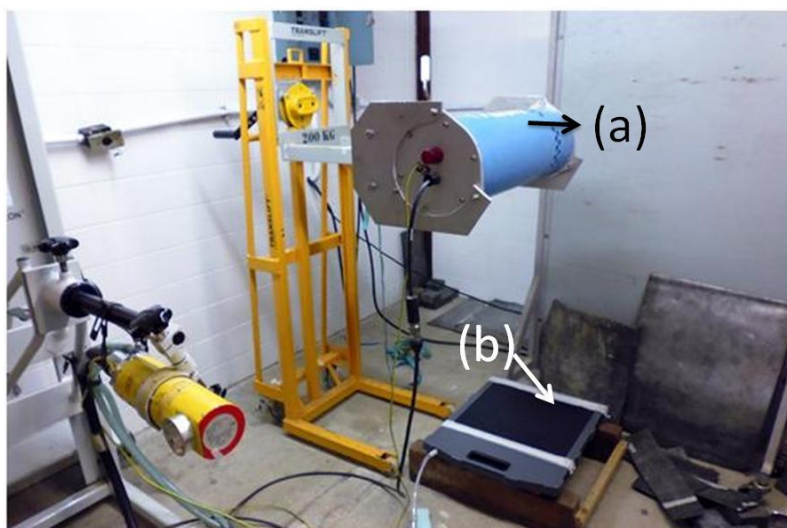


Figura 21: Exemplicação de instrumentação: (a) tubo de raios X (b) Flat Panel

Os ensaios radiográficos foram realizados em dois aparatos experimentais diferentes, designados de Setup #01 e Setup #02, com o objetivo de obter uma imagem de qualidade dos cordões de solda dos CPs. O tubo de raios X foi posicionado a aproximadamente 1 metro do detector.

4.2.1 Setup #01

O primeiro aparato experimental, denominado Setup #01 (Figura 22), consistiu das peças colocadas lado a lado, apoiadas sobre seu lado mais alto e espesso, formando um plano inclinado de aproximadamente 15° . Esta configuração permitiu obter uma imagem do interior do cordão de solda superior, por toda sua extensão e profundidade, sem sobrepôr os defeitos. As placas de chumbo foram colocadas ao redor das peças para evitar que a radiação incidisse no detector, gerando uma imagem altamente sensibilizada e indesejada, que atrapalha a visualização das peças. Além de expor desnecessariamente o detector, diminuindo sua vida útil.

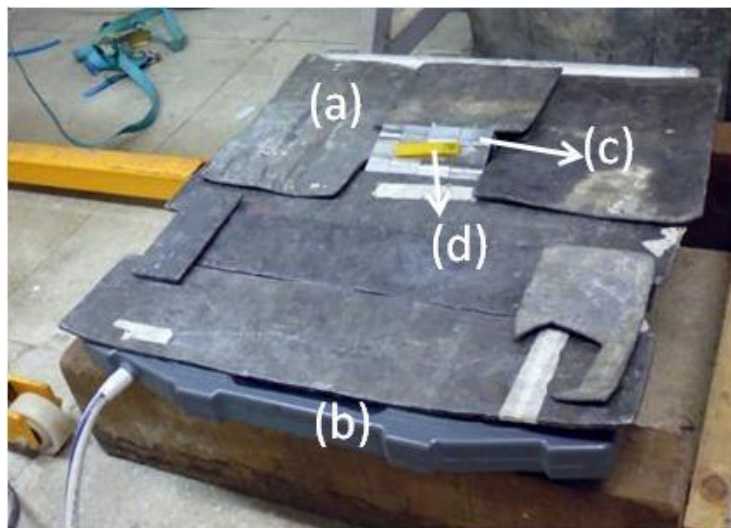


Figura 22: Aparato experimental do Setup #01: (a) placas de chumbo, (b) FPD, (c) CPs, (d) IQI.

O cordão de solda denominado superior encontra-se na parte mais fina das amostras, enquanto o inferior encontra-se na parte mais grossa, como pode ser visualizado na identificação apresentada na Figura 23.

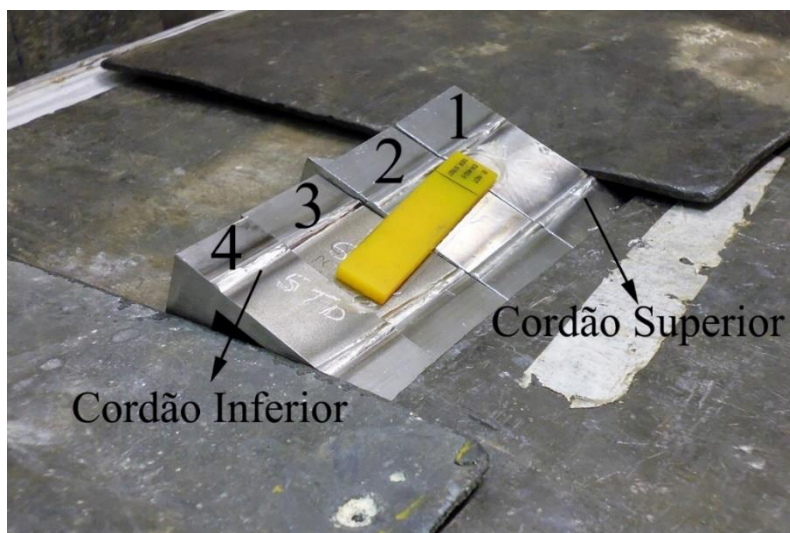


Figura 23: Detalhe do Setup #01, sendo indicados os cordões de solda e as amostras

4.2.2 Setup #02

No segundo aparato experimental, denominado Setup #02 (Figura 24), as peças foram viradas no sentido oposto e inclinadas em aproximadamente 15° , sobre uma espuma de poliuretano de 2,5 cm de altura, a fim de obter uma boa imagem do cordão de solda inferior. O objetivo deste segundo aparato foi conseguir uma visualização mais eficiente do cordão de solda inferior, pois sua imagem estava sendo obstruída pelo lado mais espesso das amostras. As placas de chumbo ao redor das amostras foram mantidas. Uma identificação mais detalhada pode ser encontrada na Figura 25.



Figura 24: Aparato experimental do Setup #02 com as placas de chumbo

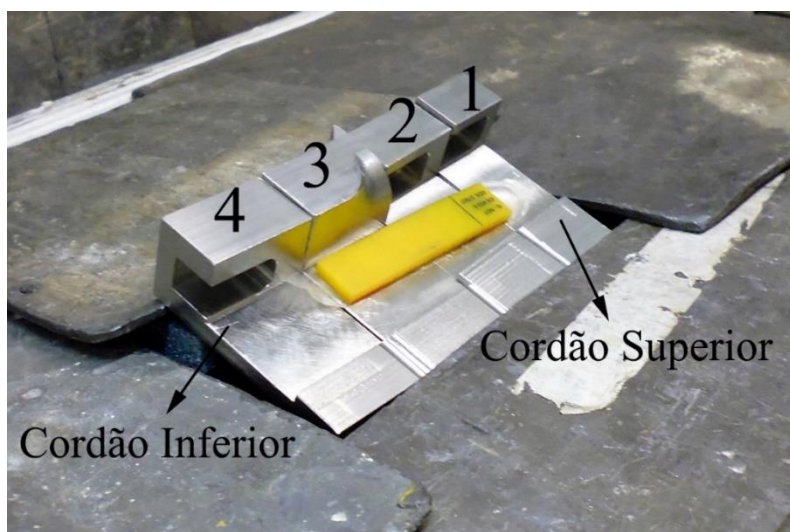


Figura 25: Detalhe do Setup #02, sendo indicados os cordões de solda e as amostras

4.3 Indicadores de Qualidade de Imagem

Para obtenção dos valores de resolução espacial básica é necessário a utilização de indicadores de qualidade de imagem (IQI). O levantamento da resolução espacial básica foi obtido com auxílio do IQI de fio duplo de acordo com a Norma Europeia EM 462-5 [18].

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados (Figura 26). 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 na norma. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro do mesmo [18].

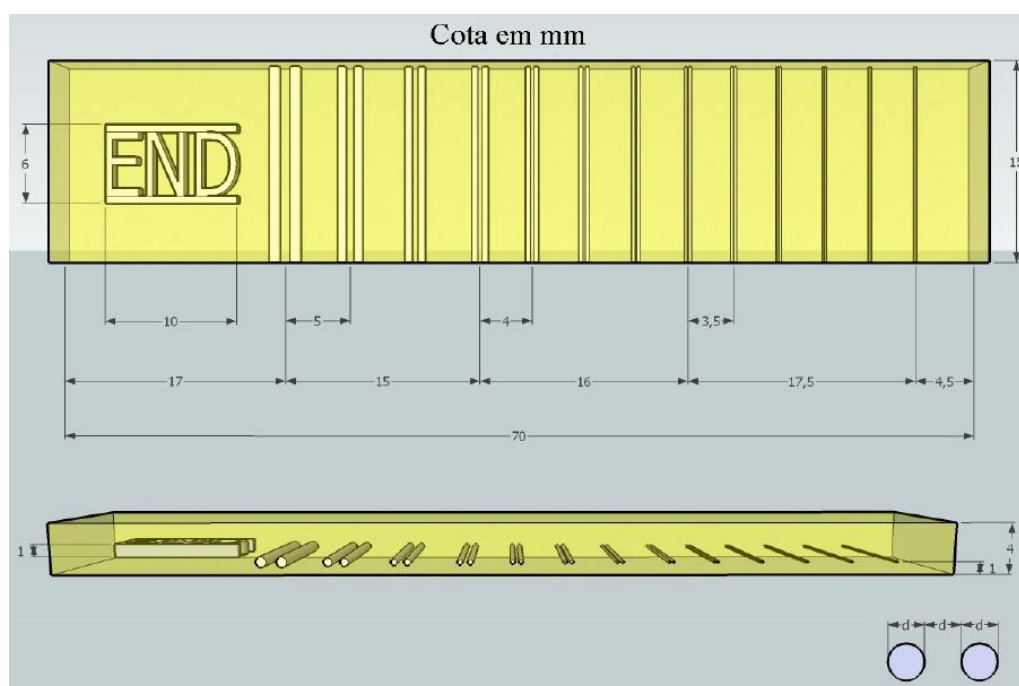


Figura 26: Ilustração do IQI de fio duplo (Fonte: [18])

Para a determinação do valor da resolução espacial básica (BSR) é necessário traçar a linha de perfil sobre o IQI na imagem digital. Para isso foi utilizado o software ISee! (Versão 1.11.1-demo). O valor da BSR é determinado primeiro par de fios não resolvido, isto é, no qual o espaçamento entre os fios não pode ser visualizado.

Matematicamente, o primeiro par não resolvido ocorre quando a diferença entre o valor máximo e mínimo de intensidade é menor que 20 % do valor máximo, conforme a Figura 27. Na Tabela 4 são encontrados os valores da BSR para todos os pares do IQI de fio duplo.

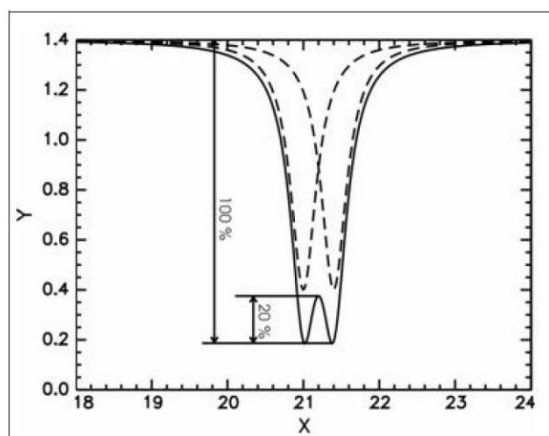


Figura 27: Perfil de linha de um fio duplo mostrando a diferença de pelo menos 20% dos valores máximo e mínimo (Fonte: [18])

Tabela 4: Parâmetros do Indicador de Qualidade de Imagem (Fonte: [19])

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

4.4 Relação Sinal Ruído Normalizada

A SNR_N (“*normalized signal-to-noise ratio*”), Relação Sinal-Ruído Normalizada, foi calculada baseada nas normas ISO 17636-2 [20] e ISO 16371-1 [21]. Dez regiões de interesse (ROI) de 20 x 55 pixels (horizontal x vertical) foram analisadas na imagem radiográfica, no software ISee!, evitando as áreas do IQI de fio duplo e dos cordões de solda. O referido software fornece o valor da SNR_N baseado na Resolução Espacial Básica calculada através do IQI de fio duplo.

A Relação Sinal Ruído Normalizada pode ser calculada através da Resolução Espacial Básica e da Relação Sinal Ruído Medida diretamente da imagem, através da fórmula [20]:

$$SNR_N = SNR_{Medida} \frac{88,6 \mu m}{BSR} \quad (7)$$

A SNR_N deve ser sempre a maior possível, porém um mínimo deve ser respeitado. Na norma ISO 17636-2 [20] pode ser encontrada uma tabela com os valores mínimos para cada caso. Para aços sofrendo irradiação de 200 kV, o mínimo para a SNR_N é de 100.

4.5 Metodologia para Classificação das Descontinuidades

A Figura 28 apresenta alguns dos defeitos mais comuns encontrados na indústria, assim como suas representações em uma radiografia. O método utilizado para classificação das descontinuidades se baseia na semelhança dimensional e física com os defeitos presentes nesta figura.




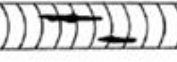

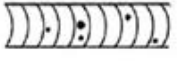

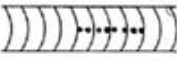



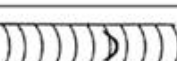

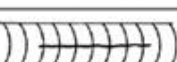

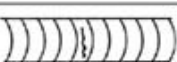

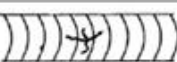
Descrição	Seção Transversal da Solda	Radiografia
“Buraco de Minhoca”		
Inclusão Escória Linear		
Porosidade		
Porosidade (Linear)		
Falta de Fusão na Parade Lateral (ou Base)		
Falta de Fusão no “Inter-run”		
Rachadura Longitudinal		
Rachadura Transversal		
Rachaduras Irradiando		

Figura 28: Tipos de defeitos em solda e suas representações nas radiografias (Fonte: [5])

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das imagens radiográficas digitais dos dois aparatos experimentais utilizados no presente trabalho.

5.1 Imagens Radiográficas

As imagens radiográficas do Setup #01 apresentaram visualizações dos cordões de solda superiores e inferiores (Figura 29). Filtro “enhance” e processamento de imagem chamado de equalização foram aplicados. A equalização tem por objetivo principal utilizar uma função de transformação que torne o histograma da imagem o mais uniforme possível, sendo realizado no domínio espacial. Em outras palavras, se procura redistribuir os valores de tons de cinza dos pixels em uma imagem, de modo a obter um histograma uniforme (equalizado), sendo muito útil para realçar detalhes sutis de pequenas porções da imagem aplicável para aumentar o contraste [14]. A visualização do cordão de solda superior dos CPs, localizado na parte menos espessa, foi projetada para cima. Uma imagem do cordão de solda inferior também foi obtida. Neste caso, contudo, a visualização foi prejudicada pela geometria da peça. A projeção do cordão de solda inferior teve uma parte obstruída pela parte mais espessa da amostra.

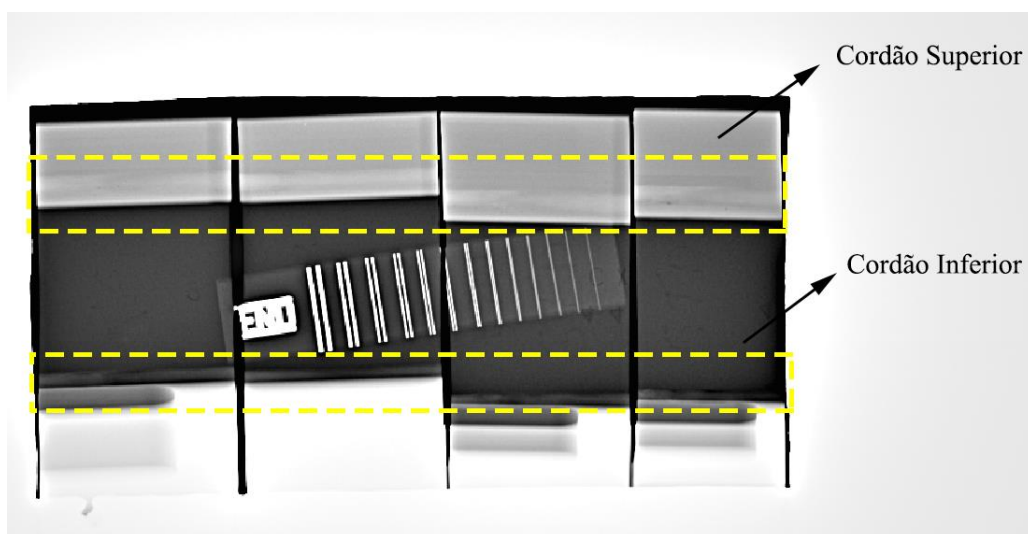


Figura 29: Radiografia do Setup #01 evidenciando os cordões superiores e inferiores

O Setup #02 foi montado a fim de obter melhores imagens do cordão de solda inferior localizado na parte mais espessa dos CPs. As peças foram viradas no sentido opostos e inclinadas em aproximadamente 15° para que a imagem deste cordão de solda fosse projetada para cima, saindo da zona mais espessa, onde não era possível anteriormente sua visualização. O resultado está apresentado na Figura 30. Entretanto, o resultado não foi animador. A imagem do cordão de solda não foi suficientemente projetada para cima a fim de obter a visualização sobre a área mais fina da amostra.

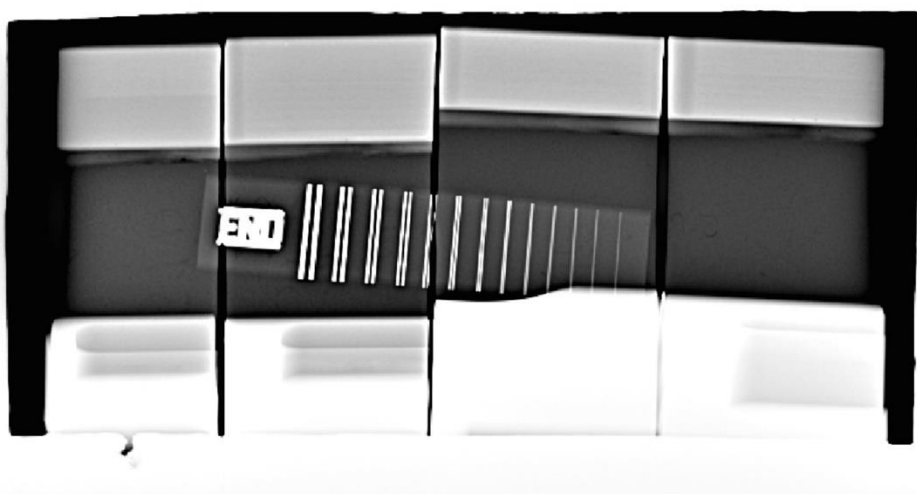


Figura 30: Radiografia do Setup #02

5.2 Análise Dimensional das Descontinuidades

No Setup #01, o resultado foi favorável para apontar descontinuidades mais evidentes nos cordões superiores com o processamento de imagem chamado de equalização aplicado especificamente para cada solda, como demonstrado nas Figuras 31-34. Não foi possível a visualização de descontinuidades nos cordões inferiores em nenhum dos dois Setups.

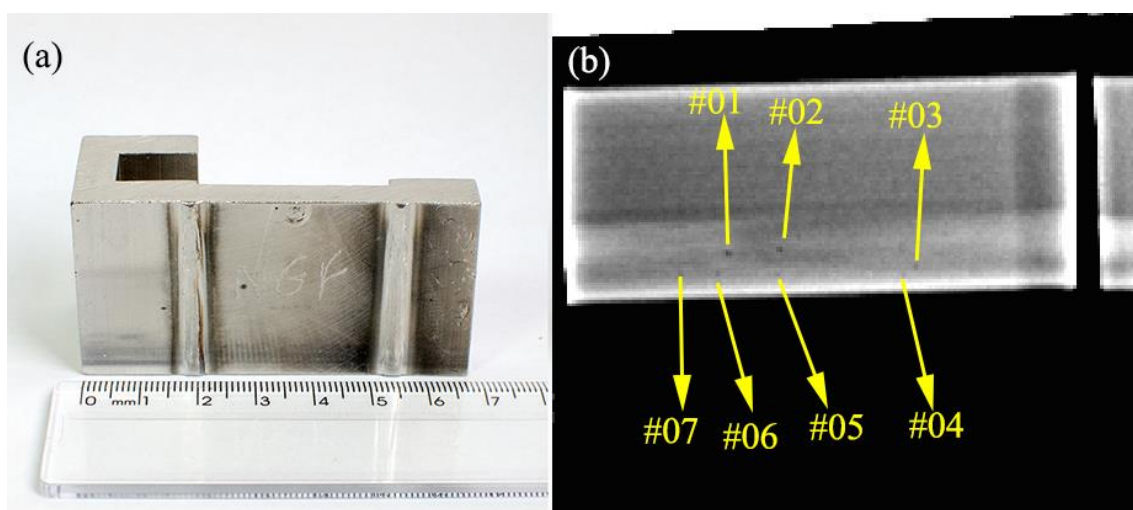


Figura 31: Localização e dimensão das descontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 1, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 07 descontinuidades.

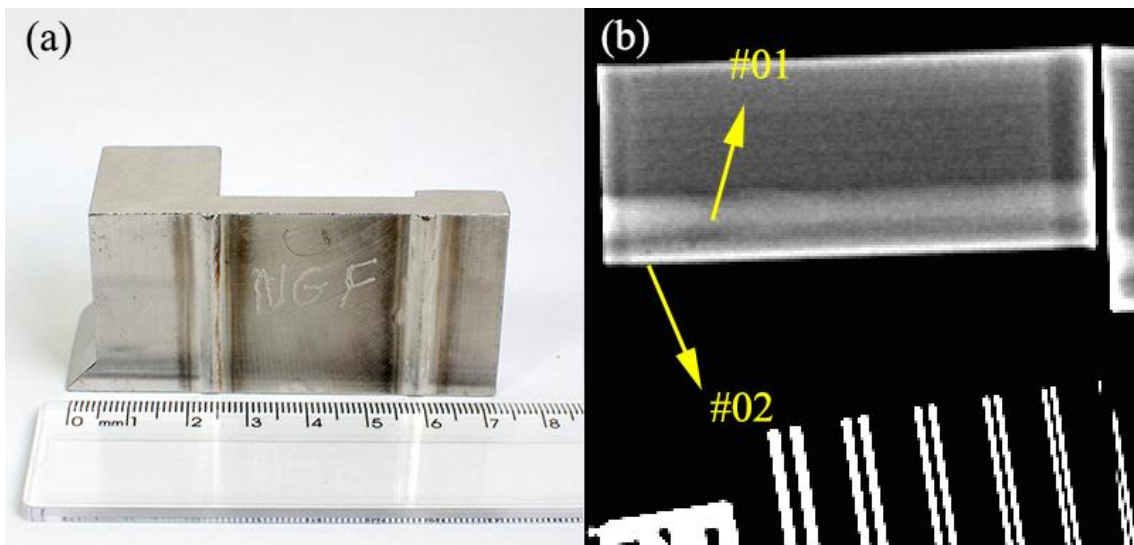


Figura 32: Localização e dimensão das discontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 2, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 02 discontinuidades.

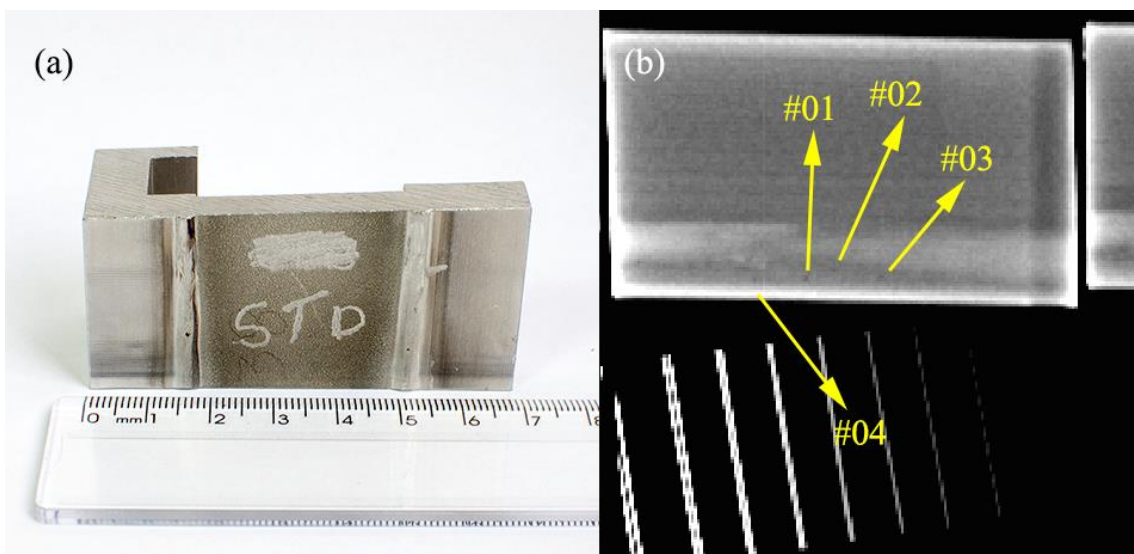


Figura 33: Localização e dimensão das discontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 3, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 04 discontinuidades.

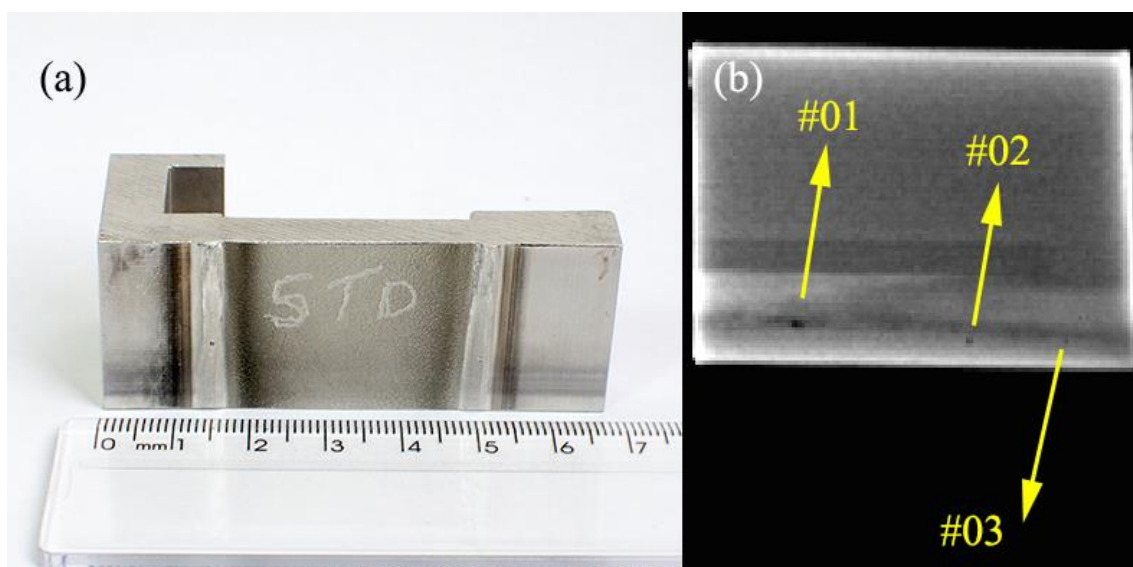


Figura 34: Localização e dimensão das discontinuidades encontradas: (a) fotografia da amostra 4, (b) radiografia digital cordão de solda superior evidenciando 03 discontinuidades.

As referidas discontinuidades foram analisadas no software ISee!. A calibração do tamanho do pixel foi realizada através do diâmetro do fio do primeiro par do IQI de fio duplo, valor conhecido e igual a 0,8 mm (Figura 35). O tamanho do pixel calculado foi de 0,16mm.

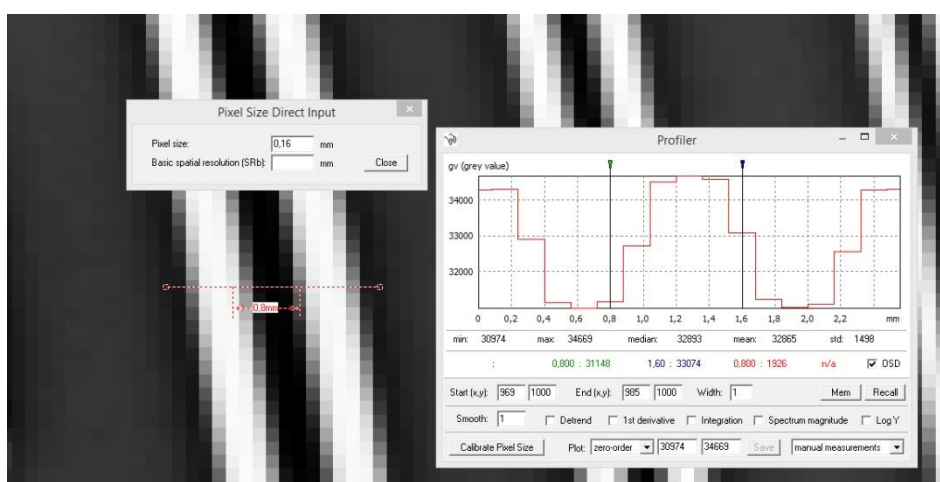


Figura 35: Calibração do tamanho do pixel a partir do espaçamento entre o primeiro par de fios do IQI.

Após a calibração, um perfil de linha foi traçado horizontalmente e verticalmente sobre as descontinuidades, e suas dimensões foram inferidas. O procedimento pode ser visualizado na Figura 36 e a tabela 5 contém os dados da análise. Pode-se inferir uma incerteza de $\pm 0,08$ mm devido ao tamanho do pixel (incerteza = intervalo de confiança/2).

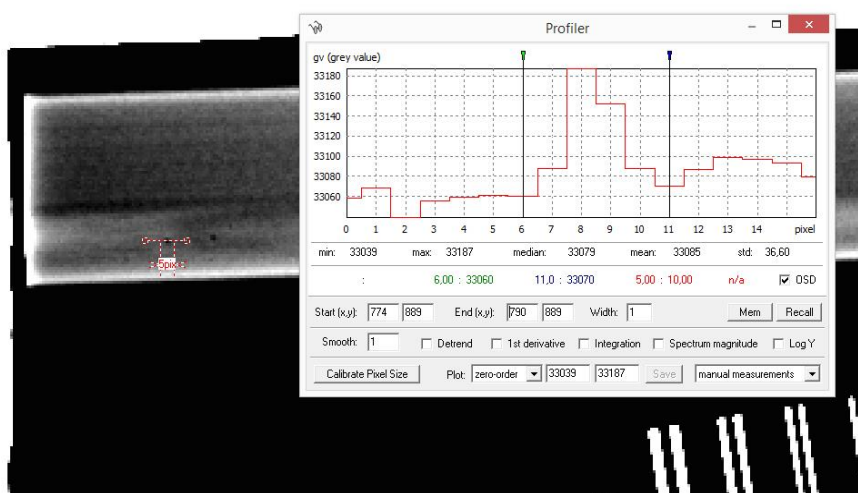


Figura 36: Exemplificação do método do perfil de linha traçado sobre descontinuidade

Tabela 5: Dimensões em milímetros das descontinuidades presentes no cordão de solda superior das amostras 1, 2, 3 e 4.

Descontinuidades no Cordão Superior			
Amostra	Descontinuidade	Dimensões Horizontais (mm)	Dimensões Verticais (mm)
Amostra 1	#01	0,51	0,51
	#02	0,51	0,51
	#03	0,13	0,26
	#04	0,13	0,13
	#05	0,13	0,13
	#06	0,13	0,13
	#07	0,13	0,13
Amostra 2	#01	0,38	0,26
	#02	0,51	0,13
Amostra 3	#01	0,38	0,26
	#02	0,13	0,13
	#03	0,26	0,26
	#04	0,13	0,13
Amostra 4	#01	1,02	0,51
	#02	0,38	0,51
	#03	0,13	0,13

5.3 Classificação das Descontinuidades

As descontinuidades #01 e #02 da Amostra 1 e a descontinuidade #01 da Amostra 4 foram as mais expressivas. Suas dimensões são notáveis, podendo acarretar algum defeito na solda. Diversas descontinuidades bem pequenas foram visualizadas. Porém, não foram perceptíveis no perfil de linha.

É possível inferir que as descontinuidades presentes nos cordões de solda das imagens do Setup #01 são, na sua grande maioria, circulares e pequenos e mais escuros

que o cordão como um todo. Sendo assim, eles podem representar vazios ou poros de gás, que representam possíveis defeitos presentes em solda por feixe de elétrons [8]. Além desse tipo de descontinuidade, é possível inferir que há porosidade presente em algumas soldas. As Figuras (37-40) representam a classificação das descontinuidades presentes nas amostras.

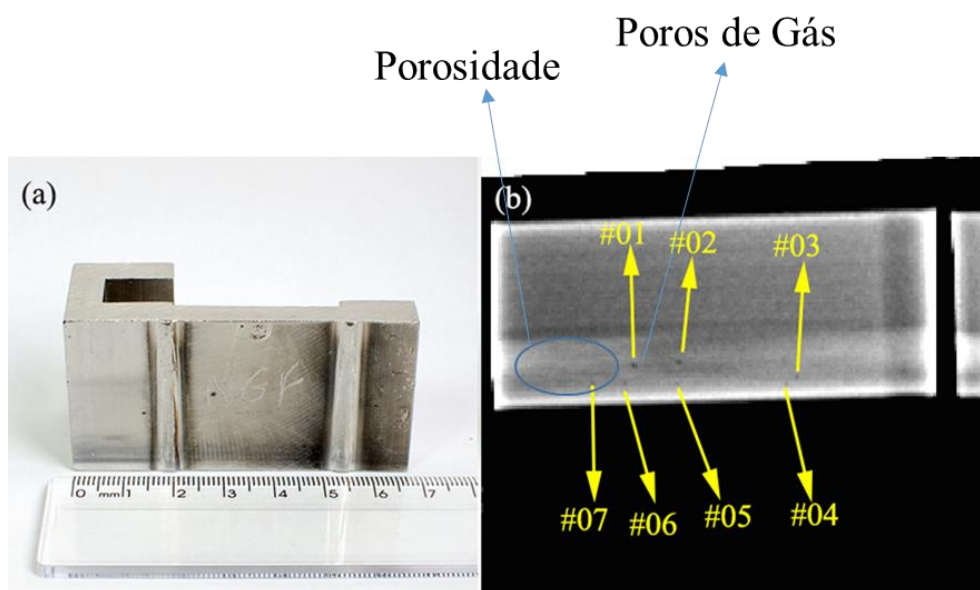


Figura 37: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 1

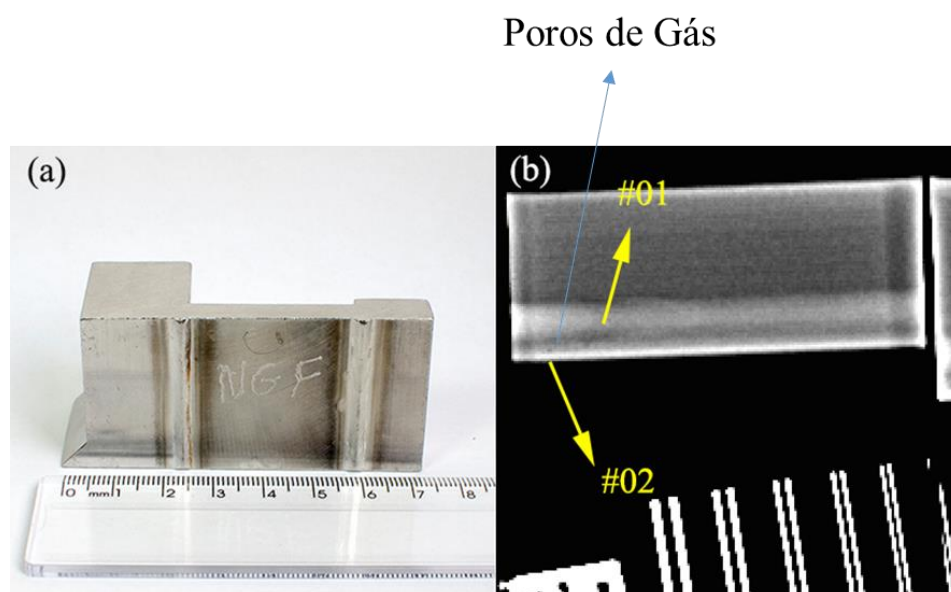


Figura 38: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 2

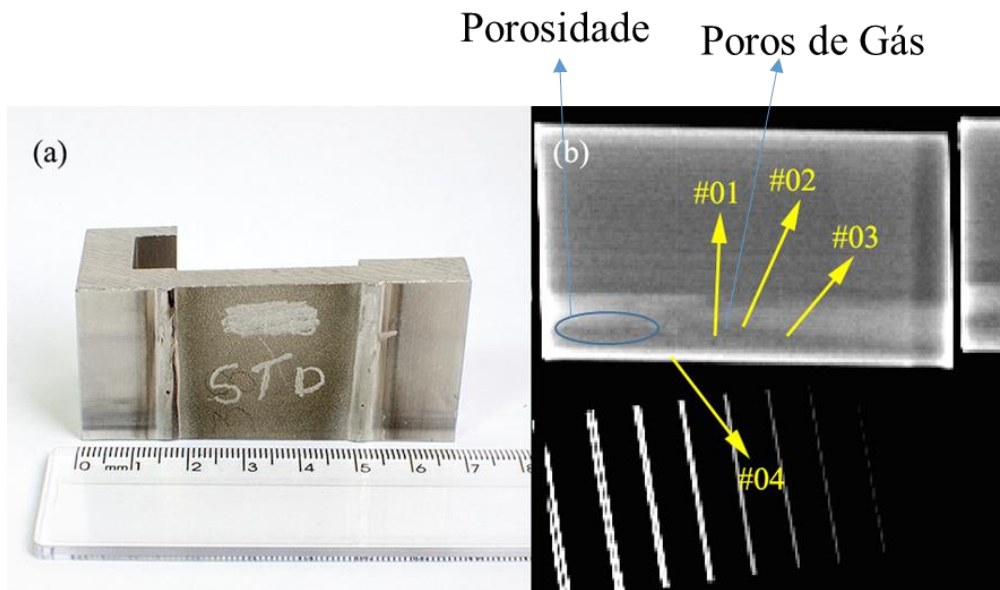


Figura 39: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 3

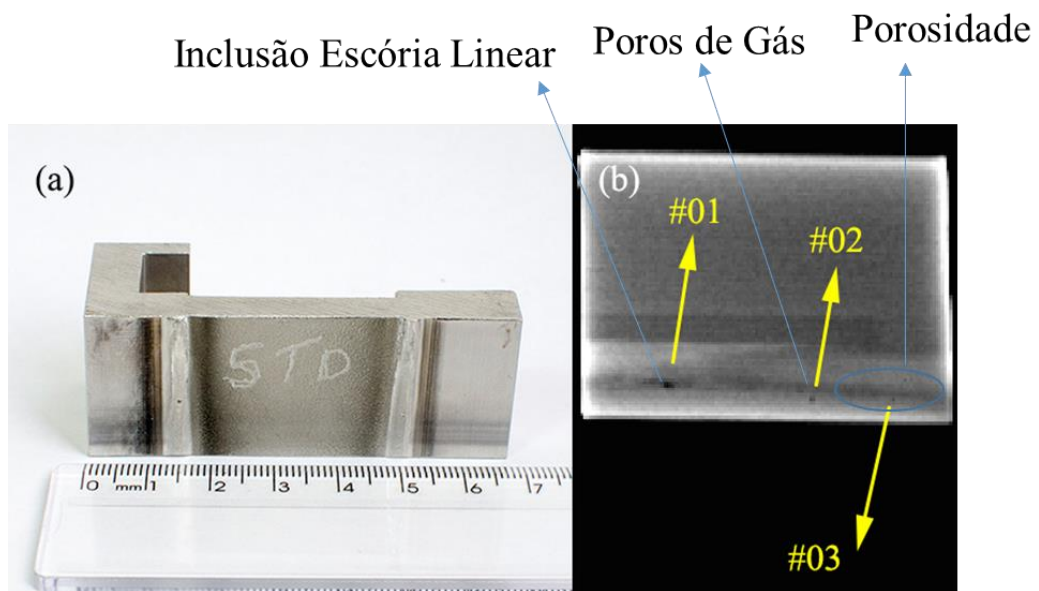


Figura 40: Classificação das descontinuidades presentes da Amostra 4

5.4 Qualidade da Imagem

5.4.1 Resolução Espacial Básica

Para a determinação da Resolução Espacial Básica (BSR), uma imagem radiográfica sem nenhum processamento foi utilizada. Foi traçada uma linha de perfil sobre o IQI de fio duplo na imagem (Figura 41). Nesta figura está evidenciado o par onde a diferença de 20% entre o pico e o vale está mantida. A BSR é determinada a partir do primeiro par não resolvido (Tabela 6).

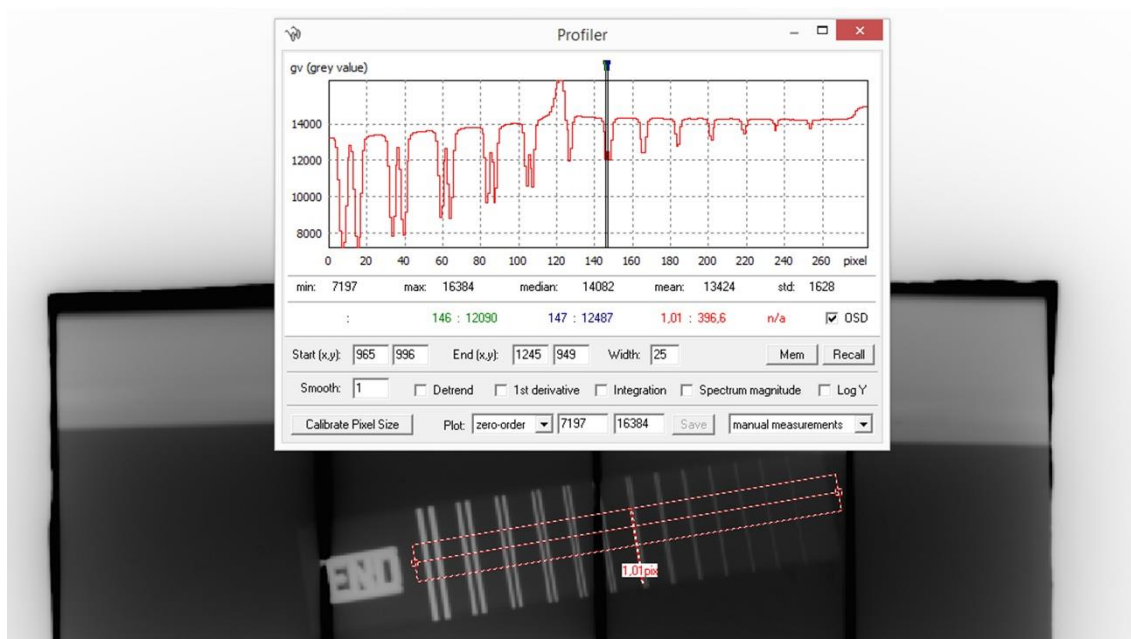


Figura 41: A linha de perfil traçada sobre o IQI de fio duplo da radiografia do Setup #01

Tabela 6: Resolução Espacial do Setup #01 equivalente a 3,125 pl/mm. Tabela extraída de [19].

Elemento	Desfocagem Geométrica	Diâmetro do fio (mm)	Tolerância	pl/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

Sendo assim, como o primeiro par não resolvido é 8D, a BSR da imagem do Setup #01 é de 3,125 pl/mm (pares de linha/milímetro). Seguindo o mesmo protocolo de obtenção, a resolução do Setup #02 foi igual a 2,500 pl/mm (pares de linha/milímetro), sendo que o primeiro par não resolvido foi o 7D.

5.4.2 Relação Sinal Ruído Normalizada

A qualidade da imagem do Setup #01 foi determinada através da relação sinal ruído normalizada, calculada no software ISee!. Foi utilizado uma ROI de 20 x 55 pixels (horizontal x vertical) com 1100 pixels em sua área, localizada em 10 pontos (x,y) aleatórios da imagem. O procedimento pode ser visualizado na Figura 42. A Tabela 7 contém os pontos e seus respectivos valores de SNR_N para o Setup #01.



Figura 42: Método de cálculo da SNR_N utilizando o software “iSee!” com ROI de 20 x 55 pixels

Tabela 7: Valores da SNR Normalizada para 10 pontos aleatórios da imagem

ROI: 20 x 55 pixels	
Pixels na janela: 1100	
Ponto Inicial (x, y)	SNR Normalizada
(811, 923)	133
(974, 838)	278
(1160, 1011)	389
(1276, 836)	106
(1282, 957)	105
(1133, 1088)	190
(976, 1067)	132
(800, 1073)	232
(927, 904)	118
(1110, 835)	221
Média:	190,4

A média dos valores da SNR_N para o Setup #01 foi igual a 190,4. Seguindo o mesmo protocolo de obtenção, a média para o Setup #02 foi igual a 177,5. Estes valores são maiores do que o recomendado pela ISO 17636-2 [20], que é equivalente a 100. Logo se conclui que a qualidade das imagens está adequada para visualização das descontinuidades.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Através da radiografia do Setup #01, foi possível apontar algumas descontinuidades presentes nos cordões de solda superiores. Como a solda por feixe de elétrons é realizada em ambiente à vácuo, estas descontinuidades sugerem a presença de porosidades na região soldada. Deve-se atentar ao fato de que os cordões de solda não passaram pelo processo de polimento, de forma que a superfície estava altamente rugosa. Com isso, é possível que as descontinuidades possam ser eliminadas no pós-tratamento. Por outro lado, não foi possível visualizar descontinuidades dos cordões de solda inferiores. Como um dos lados do CP é muito mais espesso (2,5 cm) que o restante da peça (0,5 cm e 1,0 cm), a intensidade da radiação X é praticamente toda absorvida, impossibilitando a projeção do cordão de solda e, devido à geometria da peça, outras combinações de arranjo experimental se tornaram inalcançáveis.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Analisar corpos de prova com a superfície do cordão de solda polida.
- Cortar e tomografar as soldas, a fim de obter uma visualização em 3 dimensões e poder calcular o volume das descontinuidades.
- Radiografia do bocal completo, sem haver cortes destrutivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CNEN 1.27. "**Garantia da Qualidade na Aquisição, Projeto e Fabricação de Elementos Combustíveis**". Rio de Janeiro, Brasil: CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 15/99, Publicação: DOU 21.09.1999.
2. JÁNOS, L. "Fatigue Crack Growth Tests on Type 321 Austenitic Stainless Steel in Corrosive Environment and at Elevated Temperature". **Procedia Engineering**, v. 2, p. 1201-1210, 2010.
3. YILBAS, B. S. et al. "Introduction into the Electron Beam Welding of Austenitic 321-type Stainless Steel". **Journal of Materials Processing Technology**, v. 82, p. 13-20, 1998.
4. MLADENOV, G.; VUTOVA, K.; WOJCICKIB, S. "Experimental Investigation of the Weld Depth and Thermal Efficiency During Electron Beam Welding". **Vacuum**, v. 51, p. 231-233, 1998.
5. VALAVANIS, I.; KOSMOPOULOS, D. "Multiclass Defect Detection and Classification in Weld Radiographic Images Using Geometric and Texture Features". **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 7606-7614, 2010.
6. SEIBERT, J. A. "Flat-Panel Detectors: How Much Better Are They?" **Pediatr Radiol**, v. 36, p. 173-181, 2006.
7. FLOYD, C. E. et al. "Imaging Characteristics of an Amorphous Silicon Flat-Panel Detector for Digital Chest Radiography". **Radiology**, v. 218, p. 683-688, 2001.
8. PAVLOVICH, M. et al. "The Total Reliability of NDT Methods for Inspection of the EB Weld of the Copper Canister". **Structural Integrity and NDE Reliability II**, 2009.
9. BUSHBERG, J. T. et al. **The Essential Physics of Medical Imaging**. 2. ed. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2002.

10. TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria Fundamentos**. 10. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2014.
11. KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 4. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
12. HENDEE, W. R.; RITENOUR, E. R. **Medical Imaging Physics**. 4. ed. USA: Wiley-Liss, Inc., 2002.
13. GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, Inc., 2002.
14. MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro, Brasil: Brasport, 1999. ISBN 8574520098.
15. CORREA, S. C. A. **Otimização da Dose e da Imagem Radiográfica Digital de Tórax Usando Modelagem Computacional**. Rio de Janeiro, Brasil: Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2009.
16. ASTM A 240/A 240M. **Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. West Conshohocken: ASTM International, 2004.
17. YXLON. "Y.SMART, Y.XPO, Y.XMB Portable and Mobile". Disponível em: <http://www.yxlon.com/Resources/Products/X-ray-tubes-and-generators-en/Y_SMART_XPO_XMB_ProductSheet_LETTER_EN_LD01.pdf>. Acesso em: 08 Julho 2015.
18. OLIVEIRA, D. F. **Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos**. Rio de Janeiro, Brasil: Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2010.
19. NASCIMENTO, J. R. **Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Solda**. Rio de Janeiro, Brasil: Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2012.

20. ISO 17636-2. "**Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2 X and gamma-ray techniques with digital detectors**". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.
21. ISO 16371-1. "**Non-destructive testing - Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates - Part 1 Classification of systems**". Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.