



METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE INSPEÇÃO EM TUBOS POR RADIOGRAFIA DIGITAL DIRETA

Célio Simonacci Gomes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Junho de 2018

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE INSPEÇÃO EM TUBOS POR
RADIOGRAFIA DIGITAL DIRETA

Célio Simonacci Gomes

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

Examinada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. Nilson Costa Roberty, D.Sc.

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2018

Gomes, Célio Simonacci

Metodologia para otimização de inspeção em tubos por radiografia digital direta/Célio Simonacci Gomes – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 87p. : il.; 29,7 cm

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 83-87

1. Detectabilidade 2. Descontinuidade 3. Qualidade da imagem 4. Correções de imagem I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título

Aos meus avós, pais e Irmã.

A minha esposa Carolina.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus avós, meus guias e exemplo, aos meus pais, pela vida, paciência e alegria.

A minha esposa Carolina, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao Prof. Ricardo Tadeu Lopes (PEN/COPPE/UFRJ) pela orientação, disponibilidade, atenção, paciência, indescritível ajuda dada neste trabalho e principalmente, pela amizade e confiança depositada em mim.

Ao Prof. Davi Ferreira de Oliveira (IF/UERJ), grande amigo, por compartilhar seus conhecimentos, me ajudando e participando diretamente de todos os meus trabalhos e, principalmente, pela paciência e amizade todos esses anos.

A todos os colegas e funcionários do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN), em especial, àqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, os amigos Carlos Augusto e Sandro pela ajuda na realização dos ensaios radiográficos e Professor Carlos Roberto pelas dicas e discussões.

Aos demais amigos do LIN, pela amizade e apoio sempre.

Ao Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro.

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

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE INSPEÇÃO EM TUBOS POR RADIOGRAFIA DIGITAL DIRETA

Célio Simonacci Gomes

Junho/2018.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

A busca por novas metodologias e consequente aprimoramento das técnicas existentes de inspeção são prioridades no processo de melhoria da eficiência de produção na indústria. O objetivo deste estudo foi apresentar uma metodologia destinada a correção de distorções em imagens feitas com detectores digitais planos de soldas circunferenciais em tubos. Foram determinadas as condições que impõem as distorções e as geometrias envolvidas foram descritas matematicamente. Para corrigir esses problemas, foram propostos dois algoritmos construídos com o programa MATLAB. As imagens radiográficas de juntas soldadas de tubos de aço com diferentes diâmetros foram adquiridas utilizando radiografia convencional e detectores do tipo *Flat panel*. Os defeitos foram medidos e comparados nas imagens feitas com sistema convencional, digital e nas imagens corrigidas pelo algoritmo, bem como indicadores de qualidade de imagem, onde foi observada uma melhora de até 17 vezes na SNRn relativa à maior uniformidade do sinal após a correção. As deformações de nível de cinza e dos defeitos foram corrigidas atingindo precisão de 98% quando comparadas ao padrão. Foi observada uma diminuição de 50% no número de imagens necessárias para análise completa de um tubo de 10 polegadas de diâmetro.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.).

PROPOSED METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION OF INSPECTION IN TUBES

Célio Simonacci Gomes

June/2018

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Program: Nuclear Engineering

The search for new methodologies and consequent improvement of existing inspection techniques are priorities in the process of increasing production efficiency in the industry. The objective of this study was to present a methodology for the correction of distortions in images made with *Flat panel* detectors of circumferential welds in tubes. The conditions that impose the distortions were determined and the geometries involved were mathematically described. To correct these problems, two algorithms constructed with the MATLAB program were proposed. Radiographic images of welded joints of steel tubes with different diameters were acquired using conventional radiography and *Flat panel* detectors. The defects were measured and compared in the conventional and digital images and in the images corrected by the algorithm, as well as image quality indicators, where an improvement of up to 17 times was observed in the SNRn relative to the higher signal uniformity after correction. The gray level deformations and the defects were corrected reaching 98% accuracy when compared to the standard. A 50% decrease in the number of images required for complete analysis of a 10-inch diameter tube was observed.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
3.1	Formação de imagens	8
3.2	Qualidade de imagem	14
3.2.1	Resolução espacial.....	15
3.2.2	Contraste.....	17
3.2.3	Razão sinal Ruído (SNR)	19
3.3	“Flat Panel”	20
3.3.1	Detector direto com conversão direta.....	21
3.3.2	Detector direto com conversão indireta.....	22
3.4	Técnicas de exposição	23
3.4.1	Fonte de radiação localizada em frente ao objeto com o detector no lado oposto. 23	
3.4.2	Fonte de radiação localizada fora do objeto e detector dentro	24
3.4.3	Fonte de radiação localizada no interior e no centro do objeto, detector no exterior 25	
3.4.4	Fonte de radiação localizada fora do centro dentro do objeto e detector externo 26	
3.4.5	Técnica elíptica.....	27
3.4.6	Técnica perpendicular.....	28
3.4.7	Fonte e detector localizados externamente ao objeto	29
3.5	Número recomendado de exposições	31
3.6	Processamento de imagens digitais.....	33
3.6.1	Imagem digital.....	34
3.6.2	A origem do processamento da imagem digital.....	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1	Materiais	39
4.1.1	Equipamento de raios X	39
4.1.2	Programa de análise das imagens digitais	40
4.1.3	Programa de tratamento das imagens digitais MATLAB®	40
4.1.4	Detectores	40

4.1.5	Corpos de prova.....	42
4.2	Métodos	42
4.2.1	Distorção do nível de cinza em imagens de corpos de prova cilíndricos.	42
4.2.2	Distorção geométrica em imagens de corpos de prova cilíndricos.	44
4.2.3	Construção do algoritmo de correção de níveis de cinza	50
4.2.4	Construção do algoritmo de correção da distorção geométrica.....	56
4.2.5	Obtenção de imagens.....	58
4.2.6	Análise dos defeitos.....	60
5	RESULTADOS	62
5.1	Espessuras atravessadas pelo feixe de raios X.....	62
5.2	Coeficiente de atenuação - Termo μ	64
5.3	Resultado da correção de níveis de cinza	65
5.4	Resultado da correção de distorção geométrica.....	70
5.5	Avaliação dos indicadores de qualidade de imagem	73
5.6	Avaliação do comprimento dos defeitos.....	77
6	CONCLUSÃO.....	80
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de classificação de radiações ionizantes.....	8
Figura 2: Importância relativa dos três principais tipos de interações. As curvas mostram os valores de Z e E para os quais dois tipos de efeitos são iguais(adaptada de KNOLL, 2000).....	10
Figura 3: Exemplo de equipamento de raio X (adaptada de OLIVEIRA, 2010)	11
Figura 4: Espectro de raios X de freamento com raios X característicos para tensão aplicada com pico de 60, 90 e 120 kV.....	12
Figura 5: Quando um feixe de intensidade I_0 passa através de um objeto de espessura x e coeficiente de atenuação μ , I_0 será atenuada em um grau diferente para cada material diferente, proporcionalmente ao μ desse material.	14
Figura 6: : IQI fio duplo (adaptado de OLIVEIRA, 2010).....	15
Figura 7: Análise de perfil da MTF.....	16
Figura 8 MTF padrão (SILVA, 2013).	17
Figura 9: IQI de Fio (ISO 19232-1, 2004)	19
Figura 10: Configuração física de Conversão direta e indireta (LANÇA e SILVA, 2009).	21
Figura 11: Diagrama esquemático da estrutura transversal de um conversor direto com sensor de raios X (adaptado de KASAP, KABIR e ROWLANDS, 2006).....	22
Figura 12: Estrutura de uma matriz de detectores e uma estrutura transversal de um pixel de conversão indireta com Cintilador (adaptado de KIMA, KIMA, <i>et al.</i> , 2003).....	23
Figura 13: Arranjo para soldas planas, parede simples (ISO 17636-2, 2012).....	24
Figura 14: Detectores curvos (ISO 17636-2, 2012).	24
Figura 15: Detectores planos (ISO 17636-2, 2012).....	25
Figura 16: Arranjo para parede simples vista simples em corpos de prova curvos (ISO 17636-2, 2012).	25

Figura 17: Exemplo de radiografia PSVS panorâmica. Junta soldada retilínea com presença de indicadores de qualidade de imagem (IQIs1) na porção superior da imagem (KROETZ, 2012).....	26
Figura 18: Detectores curvos (ISO 17636-2, 2012).	26
Figura 19: Detectores planos (ISO 17636-2, 2012).....	26
Figura 20: Arranjo experimental para parede dupla vista dupla em objetos curvados, técnica elíptica. (ISO 17636-2, 2012).....	27
Figura 21: Exemplo de radiografia PDVD não sobreposta. Junta soldada com formato elipsoidal com indicadores de qualidade de imagem (IQIs) sobre o corpo de prova (KROETZ, 2012).....	28
Figura 22: Arranjo experimental para parede dupla vista dupla em solda circunferencial. (ISO 17636-2, 2012).....	28
Figura 23: Arranjo experimental para técnica parede dupla vista simples em objetos curvos para análise da parede mais próxima do detector com o IQI posicionado entre parede e detector (ISO 17636-2, 2012).	29
Figura 24: Arranjo para parede dupla vista simples (ISO 17636-2, 2012).....	30
Figura 25: Arranjo para parede dupla vista simples em soldas longitudinais.	30
Figura 26 Exemplo de radiografia PDVS com fonte não alinhada. Junta soldada levemente curva com presença de indicadores de qualidade de imagem (IQIs) próximos à solda. (KROETZ, 2012).....	30
Figura 27: Número mínimo de exposições N para penetração descentrada com fonte interior e para penetração de parede dupla, com um aumento máximo admissível da espessura penetrada $\Delta t / t$ devido à penetração inclinada nas áreas avaliadas de 10% (classe B) (ISO 1763-2).....	32
Figura 28: Número mínimo de exposições N para penetração descentrada com fonte interior e para penetração de parede dupla, com um aumento máximo admissível da espessura penetrada $\Delta t / t$ devido à penetração inclinada nas áreas a avaliar de 20% (classe A) (ISO 1763-2)	33
Figura 29: Convenção dos eixos para representação de imagens digitais.	34

Figura 30: Representação da relação entre bits e níveis de cinza (adaptado de AIRD, 1998).....	35
Figura 31: Sistema G (x, y) de Transmissão de imagens em 1921 (GONZALEZ e WOODS, 2002)	36
Figura 32: Primeira foto tirada da lua por um veículo espacial U.S (Ranger 7) (GONZALEZ e WOODS, 2002).....	37
Figura 33: Esquema do equipamento de raios X ERESKO.....	39
Figura 34: Detector Direto Digital DXR250V da GE IT	41
Figura 35: Trajetória de feixe de raios X em um tubo	43
Figura 36: Representação tridimensional de uma imagem de corpo cilíndrico.	43
Figura 37: Variação da SNRn de acordo com a proximidade da extremidade.....	44
Figura 38: Representação das distâncias fonte detector e objeto detector.	45
Figura 39: a) objeto plano e detector plano, b) objeto curvo com detector curvo e c) objeto curvo com detector plano.	46
Figura 40: Ilustração de uma imagem radiográfica de solda - a) nenhuma distorção geométrica e b) distorção geométrica nas bordas.....	47
Figura 41: Simulação de um defeito em uma imagem radiográfica de solda - a) e b) defeito localizado no eixo Y antes e depois da correção e c) e d) defeito localizado no eixo X antes e depois da correção.	48
Figura 42: demonstração esquemática de deslocamento de coordenadas em projeção de feixe cônico.....	49
Figura 43: Demonstração de colinearidade dos pontos, fonte, objeto e imagem.	49
Figura 44: Posicionamento do sistema de coordenadas.	50
Figura 45: Fator de parametrização t.....	52
Figura 46: Representação tridimensional dos pontos do tubo no eixo de coordenadas.	53
Figura 47: Exemplo de determinação das espessuras efetivamente percorridas por um raio.....	54
Figura 48: Espessura atravessada pelos raios em cada pixel.....	55

Figura 49: Comportamento do parâmetro t em função das coordenadas x , y da imagem.	58
Figura 50: Setup de PSVS para mapeamento dos defeitos nas amostras.	59
Figura 51: Posicionamento de descontinuidade nas imagens feitas com o DDA.	59
Figura 52: Aferição de defeitos e comparação entre imagens.	61
Figura 53: Variação de espessura ao longo da área sensível.	63
Figura 54: Visão tridimensional do termo μ	64
Figura 55: Vista Y-Z do termo μ	65
Figura 56: Representação tridimensional dos níveis de cinza de uma imagem radiográfica.	66
Figura 57: Representação tridimensional de uma imagem radiográfica corrigida.	66
Figura 58: Comparação entre os níveis de cinza de imagem sem correção e corrigida. 67	
Figura 59: Comparação visual de imagem sem correção (esquerda) e com correção (direita)	67
Figura 60: Comparação de perfil de linha nas imagens.	68
Figura 61: Comparação da correção em diferentes diâmetros.	69
Figura 62: Comparação de deslocamento de coordenadas.	70
Figura 63: Comparação do deslocamento de coordenadas entre diâmetros diferentes. .	71
Figura 64: Comparação entre imagem sem correção e corrigida.	72
Figura 65: Verificação do IQI de fio simples.	73
Figura 66: Leitura do IQI de fio duplo.	74
Figura 67: Posicionamento das ROIs na imagem corrigida.	76

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

No início da utilização das técnicas radiográficas para inspeção de materiais e equipamentos em ensaios não destrutivos (END), os filmes radiográficos foram os grandes protagonistas. A capacidade de prover imagens da estrutura interna dos objetos sem danificá-los determinou um grande marco para a inspeção e controle de qualidade.

A utilização foi seguida de regulamentação e desenvolvimento dos equipamentos, como também do avanço das pesquisas na área de imagens radiográficas industriais. Estes estudos culminaram no desenvolvimento dos equipamentos de radiografia digital computadorizada, largamente utilizada em inspeções. Posteriormente, foi apresentada a radiografia digital direta e com a inserção dessa nova técnica observou-se o aumento da velocidade de inspeção e maior eficiência dos ensaios não destrutivos com imagens radiográficas (YORKSTON, 2007).

A regulamentação dos ensaios realizados com radiografia digital acompanha o desenvolvimento da norma ISO 17636-2 (2012) (inicialmente proposta em 2003 e revisada em 2012, onde o complemento “part.-2” representa a norma referente à radiografia digital) que visa proporcionar repetibilidade e reprodutibilidade aos processos, como também padrões de qualidade. São apresentadas técnicas direcionadas a aplicações específicas em inspeções de juntas soldadas, sendo elas em corpos de prova planos ou de formato cilíndrico.

As indicações da norma ISO 17636 part.-2 abrangem desde o posicionamento da fonte, corpo de prova e detector, até a padronização de aspectos físicos, como indicação de tensão aplicada e corrente que melhor se aplicam a cada espessura de material inspecionado. Além disso, há a indicação de princípios de compensação que visam alcançar as melhores condições de qualidade de imagem de cada sistema.

Em tempos em que os ensaios com filmes radiográficos ainda representam grande parte das inspeções na indústria, mesmo com o seu desempenho atingindo o seu limite de qualidade, a busca por novas alternativas para maximizar a eficiência, tempo de produção e qualidade de imagem é um compromisso ainda a ser cumprido. A radiografia digital é considerada como uma das mais importantes dessas alternativas e o processamento de

imagens se mostra uma grande ferramenta na busca de melhorias (LANÇA e SILVA, 2009).

O ensaio radiográfico não destrutivo em tubos, ainda é, em sua maioria, realizado com filmes radiográficos ou com a técnica da radiografia computadorizada (RC), porém o *Flat Panel*, um detector digital rígido que captura imagens em tempo real, se mostra mais adequado ao alto grau de automatização de produtos confeccionados em série, já que demanda um menor tempo de exposição, não utiliza filmes, químicos reveladores e fixadores, o que proporciona, em longo prazo, um melhor custo benefício. Os padrões alcançados com a sua utilização em outras áreas, como a médica, odontológica, segurança, etc., atestam o seu potencial na área industrial (MOREIRA, 2007).

Os ganhos com a técnica digital direta são evidentes em termos de qualidade de imagem, redução de dose de exposição em operadores, ganho de produtividade e melhoria na probabilidade de detecção de descontinuidades.

Um problema encontrado na utilização dos painéis de radiografia digital direta é a constituição rígida dos mesmos, em comparação com os filmes radiográficos convencionais e os filmes utilizados na radiografia computadorizada. Os painéis apresentam a desvantagem de não se moldarem ao formato circular, ao contrário dos filmes radiográficos e dos filmes utilizados na radiografia computadorizada. Por isso, quando são utilizados nesse tipo de ensaio, a área útil de análise é limitada e distorções nas imagens radiográficas de tubos são observadas nas extremidades da imagem.

Esse trabalho se concentra em estudar corpos de prova cilíndricos encontrados na norma ISO 17636 -2, mais especificamente em tubos, de forma a propor procedimentos de correção de imagem que visam aumentar a eficiência de inspeção de corpos desta geometria reduzindo o efeito de distorção observado.

O objetivo é propor uma nova metodologia para otimização de inspeção radiográfica em tubos que corrija, as distorções impostas pela geometria do arranjo, possibilitando assim uma inspeção mais rápida e com menor número de imagens cobrindo a circunferência do tubo e promovendo maior confiabilidade ao relatório final ao apresentar defeitos com tamanhos reais. Nesse contexto destacam-se como objetivos específicos:

- a) Definir o impacto qualitativo, na análise de defeitos, da inserção de um algoritmo de correção de deformações geométricas causadas pela diferença de ângulos dos raios do feixe, geometria circular do corpo de prova e formato plano do detector;
- b) Determinar uma função geral de ajuste não linear para deformações geométricas;

- c) Diminuir o número de vistas necessárias para cobrir toda a circunferência de uma solda circunferencial;

No capítulo I foi feita uma introdução e descrito o objetivo do trabalho; No capítulo II apresentou-se a fundamentação teórica e as técnicas de exposição; No capítulo III foram apresentados os materiais e métodos; No capítulo IV estão os resultados e as discussões e no capítulo V estão às conclusões.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

DENG, em 1989, estudou a formação geométrica da imagem radiográfica, teoricamente e experimentalmente, onde propôs um modelo baseado na geometria perspectiva melhorando o método anteriormente proposto para determinar a desfocagem geométrica, considerando o caso de formação da imagem como um caso tridimensional. O presente autor propôs um princípio geral para a imagem tridimensional em um plano, projetando os feixes de radiação de uma fonte sobre um objeto e classificando as imagens como pontual, objetivas e transitórias, de acordo com a fonte e o corpo de prova utilizado, demonstrando que a imagem projetada em um plano por uma fonte retangular através de um elemento transmissivo circular varia com as condições geométricas da fonte, objeto e plano formador da imagem. Foram também propostos novos critérios para a determinação da qualidade da imagem na inspeção radiográfica, como o raio máximo para formação de uma imagem pontual, ao considerar a penumbra e o raio mínimo do corpo de prova para formação de imagem circular.

PRESCOTT e MCLEAN, em 1996, apresentaram um método de correção de distorções radiais e calibração de câmeras digitais. O processo descrito pode ser adaptado em qualquer tipo de imagem digital. A técnica utilizada se baseia na análise de linhas distorcidas, presentes na imagem, essas linhas são detectadas através da comparação de diversas imagens da mesma cena, assim, é possível determinar um padrão de correção não sendo necessário um ponto base para aplicação da mesma. As coordenadas das retas são descritas por polinômios finitos e apresentam-se em um plano cartesiano ortogonal. Uma correção radial é imposta, ainda em coordenadas cartesianas, e a distorção aplicada é determinada em diversas imagens de forma a verificar a eficácia do método. Com isso, a técnica se mostra efetiva em imagens com distorções criadas de forma artificial e em imagens com distorções reais.

JEDLIČKA e POTŮČKOVÁ, em 2003, descreveram um método de correção de distorção radial em imagens digitais obtidas por câmeras digitais com lentes circulares, usando ambiente de computação MATLAB®. O artigo centrou-se em dois problemas. O primeiro foi a implementação de um algoritmo para a correção e a distorção radial, e o segundo foi a construção de uma aplicação simples e fácil de usar com MATLAB® GUI para a correção de distorção radial. O MATLAB® foi escolhido para resolver esta tarefa

porque suporta cálculos complexos em imagens já que utiliza matrizes para representá-las e também contém um conjunto de funções de compilação para interpolação unidimensional e bidimensional. O trabalho resultou em um método de correção de qualquer aberração determinada por lentes não invariantes.

MOREIRA, FRITZ e SIMÕES, em 2007, testaram e avaliaram os resultados encontrados em uma inspeção feita com diferentes metodologias de obtenção de radiografia. Nesse estudo foram utilizados tubos com soldas longitudinais feitas pelo método de soldagem de arco submerso onde foram introduzidos defeitos artificiais de variadas dimensões e foram feitas comparações dos resultados dos diversos equipamentos de aquisição de imagens radiográficas empregados no estudo. Após os experimentos, a metodologia de radiografia digital mostrou maior sensibilidade ao detectar o indicador de qualidade de fio simples, e também na detectabilidade de defeitos. Foi concluído que o equipamento de radiografia digital, que utilizava um detector Perkin Elmer, ofereceu vantagem em termos de tempo de aquisição, dose utilizada, velocidade de produção e detectabilidade.

ZSCHERPEL, EWERT e BAVENDIEK, no ano de 2007, propuseram um novo procedimento de calibração para detectores digitais do tipo *Flat panel*, que explorava a máxima relação sinal ruído possível de alcançar com o equipamento utilizado. O procedimento determinou uma sensibilidade de contraste capaz de distinguir mudanças na espessura do material penetrado da ordem de um milésimo, o que foi demonstrado ser dez vezes maior do que o obtido em filmes radiográficos convencionais, mesmo com a melhor classe de filmes sendo utilizada. A comparação com a radiografia computadorizada demonstrou que a mesma não apresentou nenhuma vantagem em relação ao filme convencional em termos de qualidade de imagem. Todas as comparações foram feitas utilizando os parâmetros de aferição de qualidade de imagem.

PARK, BYUN e LEE, em 2010, propuseram um método de mapeamento rápido e simples para correção de distorção imposta por lentes de baixo custo. Aplicando uma metodologia de definição de distorção usando o método de coordenadas distorcidas. A fim de simplificar o processo de determinação de equações de correção e suas aproximações, foram tomadas em aplicações do modelo de distorção definida nas coordenadas sem distorções ideais, para que fosse possível reduzir o tempo de computação e manter a alta precisão. A eficiência da metodologia foi verificada em dois experimentos, um ideal com pontos igualmente espaçados e uma imagem real obtida por

uma câmera com lentes circulares e a distorção radial foi corrigida com sucesso em ambas aplicações.

CAO, PARK e SHIN, em 2010, propuseram um método de correção de distorções radiais de imagens fotográficas, para sistemas de baixo custo. Esse método consiste em estimar invariantes geométricas nas imagens através de projeções de perspectiva. Essas invariantes foram relatadas como linhas paralelas e pontos colineares, e esses marcos mantiveram proporcionalmente suas distâncias relativas em qualquer transformação de coordenadas se não existir nenhum tipo de distorção. Partindo desse pressuposto foram determinados os coeficientes de distorção, comparando as imagens obtidas com imagens de calibração. No trabalho foram comparadas correções feitas pelo método proposto e correções derivadas de métodos já existentes de forma qualitativa.

EWERT, ZSCHERPEL e JECHOW, em 2012, analisaram os processos de aferição de qualidade de imagem em diferentes equipamentos de aquisição de imagem, desde a radiografia convencional até a radiografia digital e passando pela radiografia computadorizada, de acordo com as normas indicadas para cada caso. Os parâmetros essenciais aferidos foram a resolução espacial básica (SRb), a relação sinal-ruído (SNR) e o contraste específico (μ_{eff}). Os estudos foram realizados relacionados com radiografia computadorizada e matrizes de detectores digitais (DDA) em comparação com radiografias filme digitalizado. Foi determinado que radiografias com sistemas DDAs podem alcançar, tipicamente, melhor visibilidade IQI de contraste que filmes convencionais e radiografia computadorizada, mesmo em curto tempo de exposição e a razão sinal ruído também se mostrou superior nesse sistema. Os resultados das medições apresentados foram recomendados como uma prática padrão para as condições de exposição.

JEUGHT; BUYTAERT e DIRCKX, em 2012, apresentaram a necessidade de correções das distorções geométricas e propuseram como diferencial do processo, realizar a correção em tempo real, permitindo a correção de imagens utilizadas em endoscopias ou qualquer outra técnica que disponha de ângulos de visualização relativamente grandes. A correção imposta não se limita às distorções radiais, o método empregado cria uma segunda imagem, em um plano de coordenadas diferente do original e, partindo de uma interpolação entre as duas imagens, é possível reconhecer qualquer artefato de distorção presente e corrigi-lo. O método utilizado se mostrou eficiente para correções radiais e imagens com distorções desse tipo foram corrigidas, em tempo real, permitindo a

visualização de vídeos de endoscopia sem o erro imposto pelas distorções radiais, comuns a esse método.

WANG et al., em 2005, propôs um novo método de planificação para imagens panorâmicas, baseadas no sistema de imagens panorâmicas catadióptricas. O método é composto de quatro etapas principais. Em primeiro lugar, são determinados os parâmetros do centro de distorção na imagem panorâmica, incluindo o centro de distorção tangencial, utilizando o método de encaixe de mínimos quadrados (LSF) e o centro de distorção radial por extração de pontos característicos. Em segundo lugar, a relação de transformação entre imagem panorâmica anular e imagem panorâmica cilíndrica é construída com base nos parâmetros centrais e nas propriedades geométricas da imagem panorâmica. Em seguida, os pixels anulares da imagem são replicados na imagem panorâmica cilíndrica por meio de interpolação bilinear. Finalmente, a relação de aspecto da moldura para a planificação da imagem final é corrigida. A motivação para desenvolver esta técnica foi resolver o problema de distorção a partir do desvio do centro, e, finalmente, promove a sua adoção em sistemas de ensaios não destrutivos de tubulação. Os resultados experimentais demonstraram a viabilidade, validade e maior precisão do método de planificação proposto.

CAPÍTULO 3

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Formação de imagens

“A radiação é atenuada ao passar através da matéria” (KAPLAN, 1978).

A frase acima determina a base da construção de uma imagem radiográfica, seja em uma radiografia convencional ou em uma radiografia digital. Esse princípio respeita algumas regras impostas pela física da interação da radiação com a matéria.

Antes de entender a interação dessa radiação com a matéria, é importante entender a sua caracterização. KAPLAN (1978) descreveu a radiação pela sua natureza, fonte emitente, carga e massa. A figura 1 resume algumas características das radiações ionizantes.

Tipo	Natureza	$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$	Carga/Massa (x 10 ⁻²⁷ kg)	Origem		
Radiações particuladas com cargas <i>Radiação constituída de um feixe de partículas elementares ou de núcleos atômicos</i>	Pesadas	partícula α	${}^4_2\alpha$	+2e/6,644	Emitidas por núcleos atômicos	
		prótons p	1_1p	+e/1,672		
	Elétrons rápidos	partículas β^-	${}^0_{-1}\beta^-$	-e/0,0009		Emitidos pelas camadas eletrônicas
		pósitrons	${}^0_{+1}\beta^+$	+e/0,0009		
		elétrons	${}^0_{-1}e$	-e/0,0009		
Radiações sem carga	Raios X ($\lambda=10^{-10}$ m)		0/0	Desexcitações atômicas (raios X característicos) e da desaceleração de partículas carregadas (Bremsstrahlung)		
	Raios γ ($\lambda=10^{-12}$ m)			originados de desexcitações nucleares		
	nêutrons	1_0n	0/1,675	Geralmente de reações nucleares como a fissão		

Figura 1: Esquema de classificação de radiações ionizantes

Em termos de formação de imagem, todos os tipos de radiação expostos na figura 1 podem ser utilizados, porém sua interação com a matéria é diferenciada, basicamente pela sua natureza, sendo ela partícula ou onda (KAPLAN, 1978). Na radiografia digital

industrial dois tipos são utilizados, radiação X e gama, esses dois tipos possuem a mesma forma de interação com a matéria.

Embora raios X e raios γ sejam formados por processos diferentes, se compararmos fótons X e γ de mesma energia, eles possuem os mesmos mecanismos de interação com a matéria. E essas interações possuem sua probabilidade de ocorrência relacionada a energia desses fótons, a densidade e número atômico do meio absorvedor. São três os principais processos de interação: Absorção fotoelétrica (ou efeito fotoelétrico), Espalhamento Compton e Formação de Pares (KNOLL, 2000).

No efeito fotoelétrico, acontece a absorção de um fóton após esse transferir toda sua energia para um elétron. Essa energia é transformada em energia cinética e o elétron é ejetado do átomo. A energia cinética (E_c) adquirida por esse elétron é a diferença entre a energia do fóton incidente ($E=hf$) e a energia de ligação (E_b) do elétron na sua camada. Portanto, a condição para ocorrer à absorção fotoelétrica é que $E>E_b$. (KAPLAN, 1978).

No espalhamento Compton o fóton incidente transfere parte de sua energia ($E = hf$) a um dos elétrons, sendo espalhado a um ângulo θ , em relação a sua direção original com energia $E' = hf'$, enquanto o elétron é ejetado do átomo. Em todas as interações há obviamente conservação de energia e de momento. A relação entre E e E' é dado na equação 3.1 (KNOLL, 2000)

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{511keV}(1 - \cos\theta)} \quad (3.1)$$

O elétron de recuo perderá sua energia via ionização ou excitação dos átomos do material e o fóton espalhado poderá atravessar o meio sem interação ou poderá sofrer interações subsequentes tais como absorção fotoelétrica ou espalhamento Compton novamente.

A produção de pares é energeticamente possível se a energia do fóton exceder 1,022 MeV. Neste processo, o fóton interage com o campo elétrico do núcleo do átomo e sua energia é transformada em um par elétron-pósitron com energia equivalente a massa em repouso de cada partícula. A energia limiar para ocorrer essa interação é 1,022 MeV porque a energia equivalente à massa de repouso de cada elétron é de 0,511 MeV. A energia do fóton incidente que excede esse limiar é dividida entre as partículas em forma de energia cinética. O elétron e o fóton perdem suas energias cinéticas por excitação e

ionização. Quando o pósitron perder toda sua energia e retornar ao repouso, ele interage com um elétron negativamente carregado, aniquilando-se, e resultando na formação de dois fótons que são emitidos em direções opostas e de 0,511 MeV cada um (KAPLAN, 1978). A Figura 2 mostra como variam esses mecanismos de interação em função do número atômico e da energia.

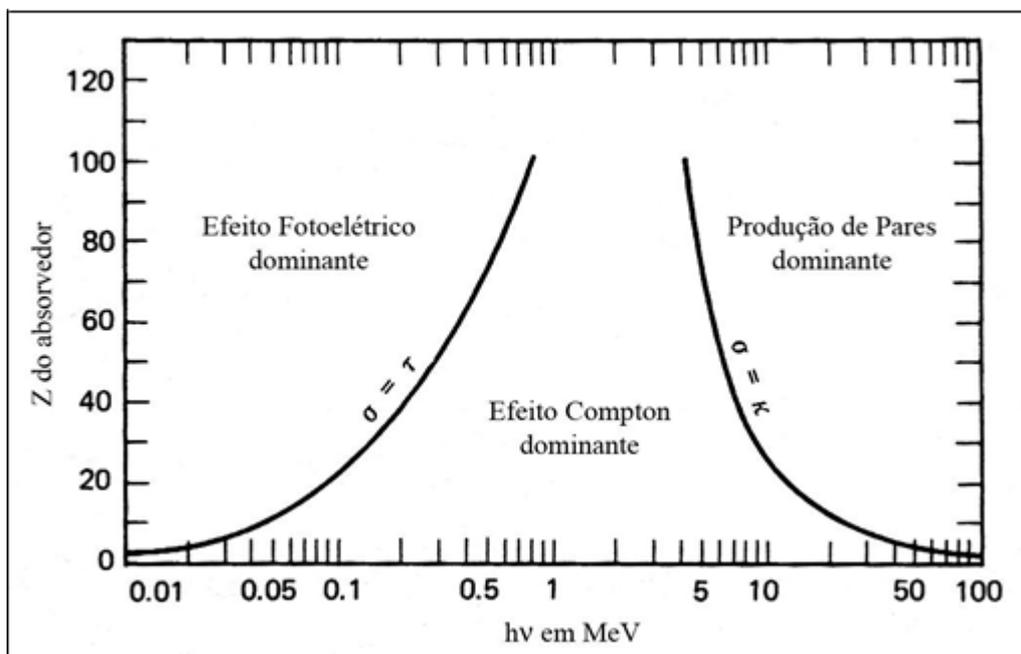


Figura 2: Importância relativa dos três principais tipos de interações. As curvas mostram os valores de Z e E para os quais dois tipos de efeitos são iguais(adaptada de KNOLL, 2000).

Todos esses processos tem o seu grau de importância na formação de imagens radiográficas digitais, assim como as fontes que emitem estas radiações. No caso das radiações gama, as fontes são núcleos excitados e, para a emissão dos raios X são usados equipamentos eletrônicos. Essa é a única diferença entre os raios X e os raios gama, sua fonte emissora.

Em um tubo de raios X, o feixe de elétrons é gerado pela emissão termoiônica em um filamento aquecido. O campo elétrico necessário para movimentar os elétrons até o alvo é obtido aplicando-se uma alta tensão entre os terminais do tubo de raios X, onde o alvo metálico, anodo, é polarizado positivamente e o filamento, catodo, negativamente.

A emissão de raios X só ocorre quando o tubo estiver ligado à alta tensão. Quanto maior a tensão aplicada ao tubo, maior será a energia dos raios X gerados e maior também

o seu poder de penetração. Aumentando-se a corrente, aumenta-se a intensidade do feixe. A figura 3 mostra o esquema básico de uma máquina de raios X.

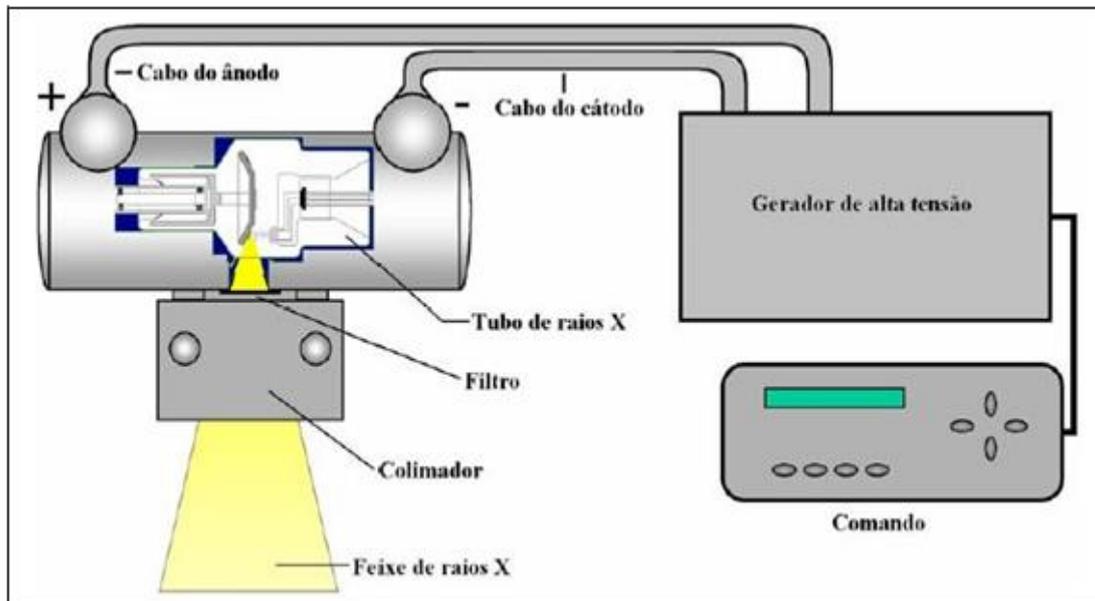


Figura 3: Exemplo de equipamento de raio X (adaptada de OLIVEIRA, 2010)

A energia e a quantidade de raios X, gerados pela colisão dos elétrons com o alvo (*Bremsstrahlung*), são funções da tensão e da corrente aplicadas (KNOLL, 2000).

A variação da tensão no tubo modifica a intensidade do feixe de raios X, e tanto a energia média quanto a energia máxima são alteradas, modificando o espectro contínuo em energia. A variação na corrente elétrica no tubo aumenta o fluxo de raios X, mas não altera o formato do espectro de energia, ou seja, a energia efetiva continua a mesma. A figura 4 ilustra três espectros de raios X gerados em um equipamento, quando esse é alimentado com tensões de 60, 90 e 120kV. Podem ser observadas as energias máximas de emissão, os picos característicos e as energias efetivas para cada tensão aplicada.

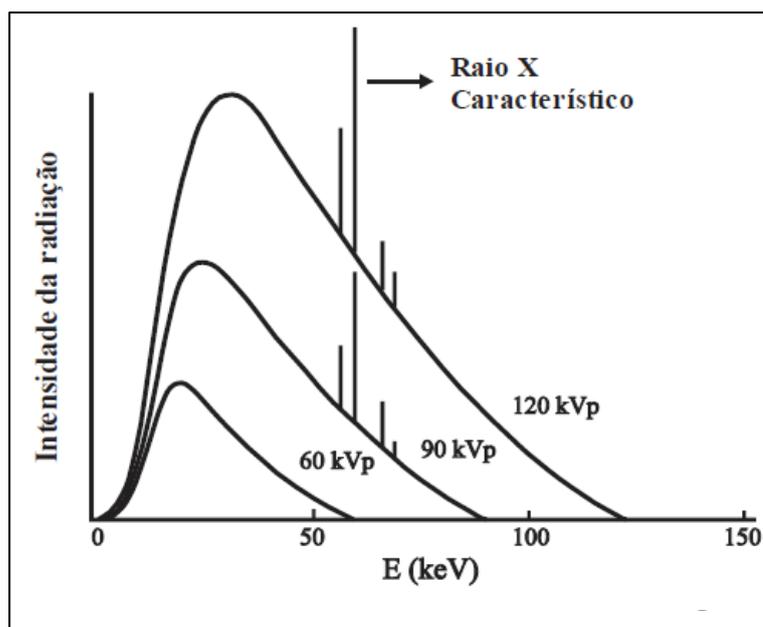


Figura 4: Espectro de raios X de freamento com raios X característicos para tensão aplicada com pico de 60, 90 e 120 kV.

O espectro contínuo, representado pela curva demonstra todas as possíveis energias dos raios X emitidos, que podem ser no máximo iguais à energia do elétron mais energético emitido pelo filamento. Em resumo, a energia do elétron que incide no alvo determina o formato do espectro, em particular seu ponto máximo (energia máxima).

É observada também a emissão de raios X característicos provenientes da interação entre os elétrons incidentes e os núcleos do material que compõe o alvo. Este processo se dá quando um elétron atinge um átomo do alvo e arranca um de seus elétrons mais internos, criando uma vacância que é preenchida por um elétron mais externo, que, nessa transição, emite um fóton com energia determinada pelo número atômico e pela camada em que a vacância se encontrava.

Os métodos existentes para obtenção de imagens radiográficas, por definição, fazem uso da radiação, independente da sua natureza, de nêutrons, raios X ou γ , e são baseados no mesmo princípio geral: “*A radiação é atenuada ao passar através da matéria*”.

No método radiográfico via transmissão, o objeto é posicionado entre a fonte e o detector (dispositivo de captação e registro de imagens). Nesta configuração, a estrutura física interna de um objeto colocado em um feixe de radiação pode ser examinada através da medição da radiação transmitida que passa pelo objeto e chega ao detector. O mesmo

fornece uma imagem, que pode ser entendida como um mapa de atenuação do objeto (CORREA, 2005).

Após atravessar o objeto, o feixe atinge o detector e este registra a fração da intensidade do feixe incidente que foi transmitida através de uma trajetória retilínea que liga a fonte de raios X e o detector. Algumas discontinuidades ou defeitos, na estrutura interna, tais como: vazios, rachaduras, porosidades, interfaces de materiais ou inclusões, serão acentuados na imagem. Isso se dá pela mudança da quantidade de raios X que alcançam o detector. Esse fenômeno se dá pela atenuação oferecida pelo material.

A atenuação da radiação na matéria é governada pela lei de Lambert que afirma que para um material homogêneo e fontes que emitem radiação de apenas uma energia, camadas de mesma espessura absorvem sempre a mesma fração da radiação que a atravessam. Matematicamente, isto pode ser expresso por:

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (3.2)$$

Onde I representa a intensidade da radiação incidente, dI/I a fração de radiação removida do fluxo quando atravessa a espessura dx e μ é o coeficiente de atenuação linear do material.

A equação (1) prediz um decréscimo exponencial na intensidade de transmissão do feixe representado por I , com a espessura x :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.3)$$

Onde I_0 e I são as intensidades da radiação incidente e a transmitida pela espessura x , respectivamente. A representação gráfica da atenuação na matéria está representada na figura abaixo, onde um esquema fonte, objeto detector está representado, bem como atenuação do feixe incidente em função da espessura atravessada.

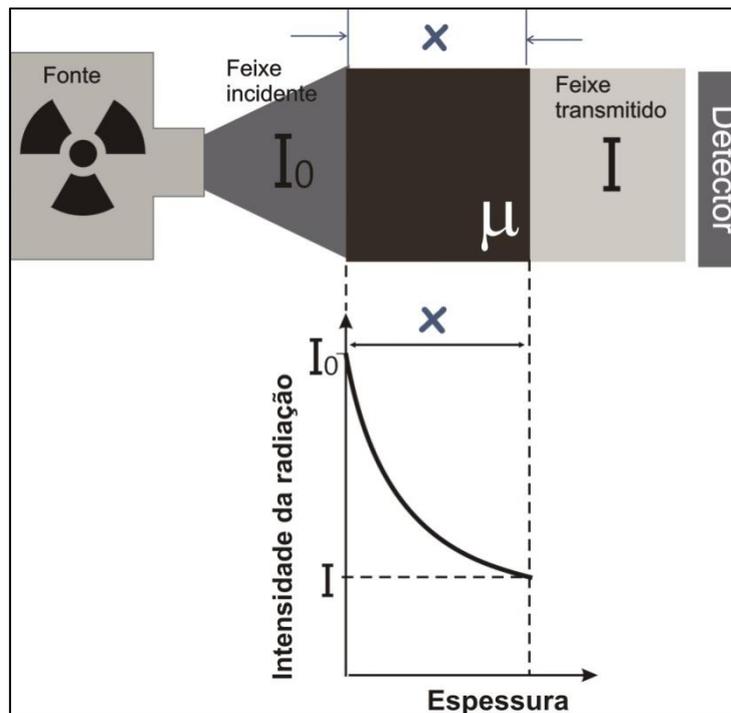


Figura 5: Quando um feixe de intensidade I_0 passa através de um objeto de espessura x e coeficiente de atenuação μ , I_0 será atenuada em um grau diferente para cada material diferente, proporcionalmente ao μ desse material.

Em um material heterogêneo, com o feixe transmitido sendo captado por um detector de radiação, os vazios e a soma dos coeficientes de atenuação multiplicados pela espessura dos diferentes materiais poderão ser observados em função das diferenças nas intensidades de nível de cinza. O fator de atenuação μ final será dado pela participação percentual de todos os elementos que compõem o material estudado. A técnica de radiologia consiste em achar um modo eficiente de detectar e visualizar essas diferenças de intensidade da radiação (MOREIRA, 2007).

3.2 Qualidade de imagem

A qualidade da imagem é determinada por parâmetros técnicos e quantificada por instrumentos de verificação chamados Indicadores de Qualidade de Imagem (IQIs). A boa qualidade da imagem é crucial em termos de análise de defeitos já que as análises são feitas de forma visual e alcançar bons padrões de qualidade é um ponto crucial para uma boa detectabilidade possibilitando a caracterização, visualização e aferição das discontinuidades presentes nas juntas soldadas.

3.2.1 Resolução espacial

Um dos principais parâmetros a ser avaliado em um sistema de radiografia é a resolução espacial. Ela tem relação direta com a qualidade da imagem obtida e pode ser definida como o menor espaço, entre dois objetos, que pode ser identificado claramente. Além de outros fatores a resolução espacial é função do tamanho do pixel do detector, esse parâmetro é definido pelo sistema de detecção em seu projeto (ISO 19232-5, 2004).

O Indicador de qualidade de imagem (IQI) de fio duplo é utilizado para determinar a resolução espacial do sistema. O mesmo é constituído de uma barra de plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados, conforme visto na figura abaixo (ISO 19232-5, 2004).

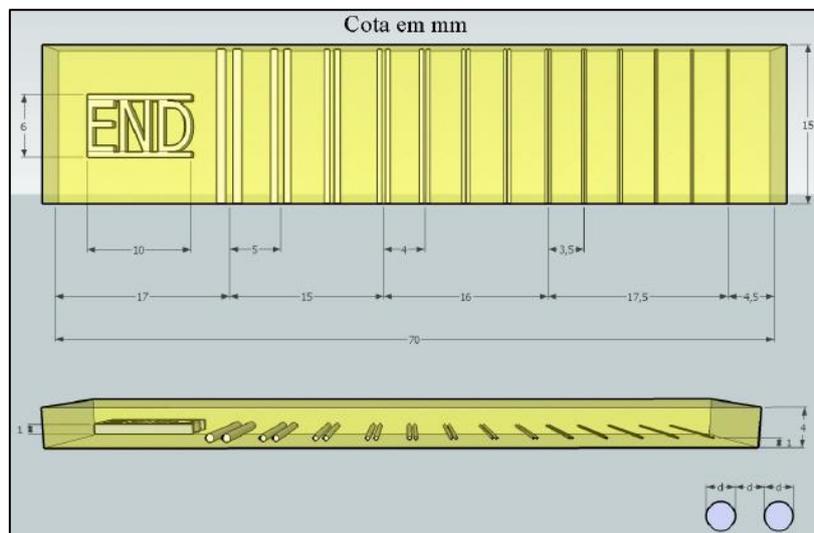


Figura 6: : IQI fio duplo (adaptado de OLIVEIRA, 2010).

Os 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 ISO, similar ou no contrato realizado entre às partes envolvidas na inspeção. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro do mesmo para que seja observado o nível de diferenciação oferecido pelo equipamento formador de imagem.

Na tabela 1 são apresentadas as numerações dos elementos, a desfocagem geométrica correspondente, o espaçamento entre os fios, a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm).

Tabela 1: Parâmetros do Indicador de Qualidade da Imagem de Fio Duplo (ISO 19232-5, 2004).

Elemento	Desfocagem Geométrica (mm)	Diâmetro do Fio (mm)	Tolerância (mm)	PI/mm
13D	0,10	0,050		10,000
12D	0,13	0,063		7,936
11D	0,16	0,080	± 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	± 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	± 0,02	0,794
1D	1,60	0,800		0,625

A resolução espacial do sistema é aferida a partir da Função de Transferência Modular, em inglês *Modulation Transfer Function* (MTF), que é verificada na radiografia do IQI de fio duplo. A partir daí, é determinada uma região de interesse (ROI) que contenha os fios presentes no IQI, e os níveis de cinza serão apresentados em um gráfico, como mostrado na figura abaixo, chamado perfil de linha.

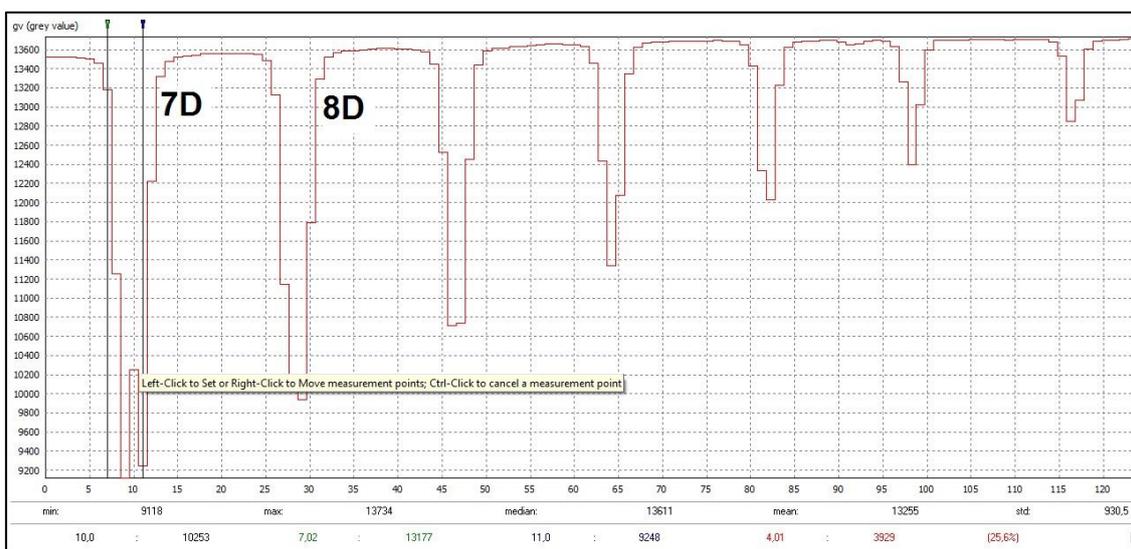


Figura 7: Análise de perfil da MTF.

Com base no perfil de linha, faz-se uma leitura dos valores dos máximos e mínimos de intensidade correspondente a cada par de fios. Como a curva de MTF é uma curva normalizada, utiliza-se a variação do primeiro pulso para a normalização.

Desta forma, o primeiro par de fios corresponde a 1 (100%) e os outros serão menores que um, uma vez que, com o aumento da frequência fica mais difícil se identificar a separação entre os pares de fios. Então, com os valores normalizados correspondentes a cada par de fios, é plotada uma curva do número do par de fio (pl/mm) em função da MTF. Na figura 8, pode ser observada uma curva de MTF.

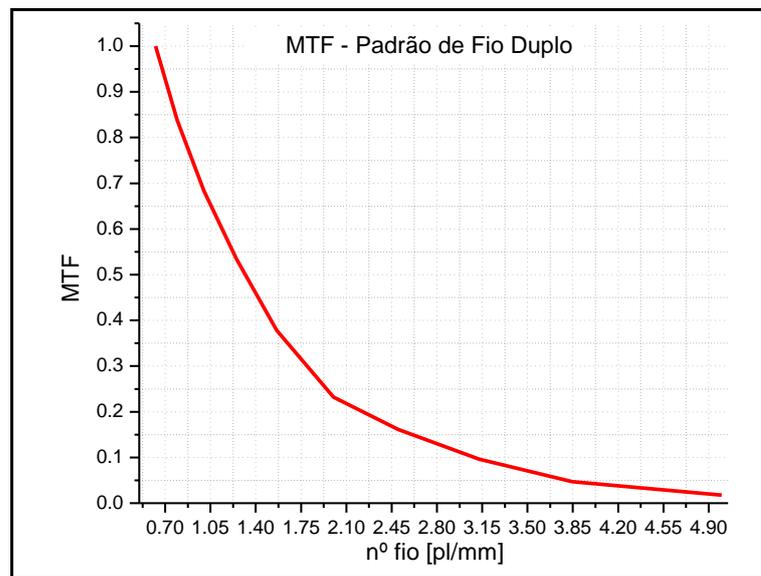


Figura 8 MTF padrão (SILVA, 2013).

A partir desta curva é lido o correspondente em pares de linhas por milímetro para uma MTF de 0,2 (20%). Então, o valor obtido é finalmente utilizado na equação apresentada a seguir, obtendo assim o valor da resolução espacial do sistema.

$$SR = \frac{1}{2MTF_{20\%}} \quad (3.4)$$

3.2.2 Contraste

O contraste radiográfico pode ser teoricamente definido como o grau de diferenciação, em níveis de cinza, entre duas estruturas adjacentes que é observado na separação das interfaces e estruturas do objeto inspecionado.

O mesmo se apresentará com diferentes intensidades e todas serão função da espessura do material, da diferença de densidade entre os componentes da estrutura da amostra ou da composição química (número atômico) do material que compõe o objeto, e pode ser tipificado de três formas diferentes: contraste do objeto, do sujeito e da imagem (SPRAWLS, 1995).

Contraste do objeto – para a visualização de um objeto em uma imagem radiográfica é necessário que ele possua uma diferença de densidade ou composição química em relação ao meio que está inserido, ou seja, a diferença de intensidade de níveis de cinza entre o objeto e o meio, em que ele se encontra inserido.

Contraste do sujeito - o contraste do sujeito é a diferença verificada na exposição entre vários pontos dentro da imagem. 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. É relacionado às variáveis do processo de transmissão da radiação.

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 (SPRAWLS, 1995).

O IQI de fios é utilizado para determinar o contraste máximo atingido pela imagem. O mesmo deve ser fabricado respeitando a padronização determinada pela Norma ISO 19232-1.

O IQI é constituído por 7 fios, dispostos paralelamente, que são fabricados em diversos materiais para que, de acordo com a norma que regulamenta sua utilização, seja escolhido o que possua sua constituição química mais similar ao material do corpo de prova. A relação entre o diâmetro do fio e seu número correspondente é descrito na norma citada acima. O número a ser observado na análise é função da espessura do objeto a ser analisado ou da solda nele presente e para tal existem divisões de grupos de diâmetro de fio presentes no IQI: 1 a 7, 6 a 12, 10 a 16 e 13 a 19 (ISO 19232-1, 2004).

Quanto maior o número, menor seu diâmetro, o que determina os níveis de qualidade especificados, conforme é apresentado na tabela 2. O posicionamento dos fios também é especificado nas normas.

Uma representação de um IQI de fio é apresentada abaixo. Pode-se observar todos

os elementos constituintes do mesmo, bem como, na tabela 2, os índices de contraste oferecidos pela visualização de cada fio presente.

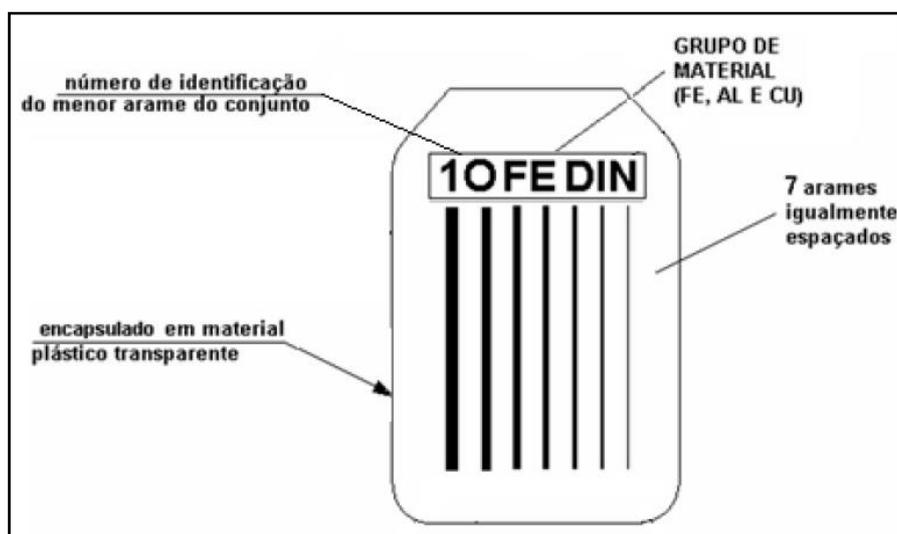


Figura 9: IQI de Fio (ISO 19232-1, 2004)

Tabela 2: Parâmetros do IQI de fios (ISO 19232-1, 2004)

Número	Diâmetro (mm)	Número	Diâmetro (mm)
1	3,20	11	0,32
2	2,50	12	0,25
3	2,00	13	0,20
4	1,60	14	0,16
5	1,25	15	0,125
6	1,00	16	0,100
7	0,80	17	0,080
8	0,63	18	0,063
9	0,50	19	0,050
10	0,40	-	-

O número atribuído a qualidade de imagem é o número do fio mais fino visível na radiografia. O valor requerido é definido para cada faixa de espessura de material. 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.

3.2.3 Razão sinal Ruído (SNR)

O ruído é entendido como resultado das variações aleatórias na intensidade do sinal que representa a imagem. Essas variações contribuem para a redução da qualidade

desta representação e visualização de detalhes, especialmente de objetos pequenos e de baixo contraste. O ruído da imagem possui diversas origens. A própria maneira aleatória que os fótons de radiação são distribuídos pela fonte no processo de formação da imagem é uma fonte de ruído, denominado ruído quântico (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Das fontes de ruído mais significativas se destacam: Ruído de Quanta nos Raios X, Ruídos da Estrutura do detector, Ruídos de luminescência e Ruídos de quantização (SPRAWLS, 1995).

A relação de sinal-ruído (SNR), utilizada como referência de qualidade da imagem pode ser obtida pela razão entre o sinal e o seu desvio padrão. Tipicamente o sinal é definido como a diferença entre um objeto e seu background e o ruído é representado como o desvio padrão desse sinal.

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma} \quad (3.5)$$

3.3 “Flat Panel”

A técnica de radiografia digital (radiografia direta) usa propriedades de detecção de radiação dos materiais semicondutores que, combinados com equipamentos adequados, permitem fazer a conversão analógico-digital de maneira direta e com maior eficiência. O detector direto (DD) usado na radiografia digital é conhecido como *Flat panel*.

O *Flat panel*, também chamado de matriz de detector digital (DDA), é essencialmente uma estrutura com uma grande área plana formada por detectores com circuitos integrados, que podem capturar uma imagem de raios X e convertê-la a um formato digital, sem necessidade de manipulação de filmes. Esta matriz possui milhões de pixels e cada um deles atua como um detector individual, como é mostrado na figura 10.

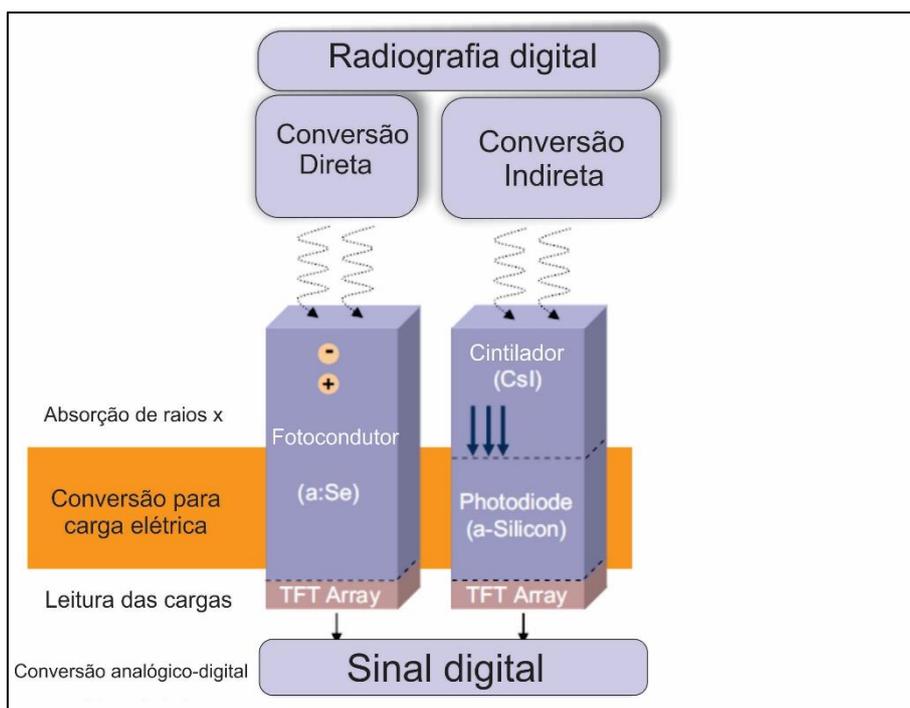


Figura 10: Configuração física de Conversão direta e indireta (LANÇA e SILVA, 2009).

Existem basicamente dois tipos de detector direto, o detector direto com conversão direta e o detector direto com conversão indireta. Suas diferenças e propriedades serão abordadas posteriormente.

3.3.1 Detector direto com conversão direta

Na conversão direta um fotomultiplicador de selênio amorfo (a-Se) é usado como elemento absorvedor, que irá captar a radiação incidente para logo convertê-la em carga, e essa carga coletada será armazenada em um capacitor. Um transistor de película fina (TFT) libera a carga coletada, varrendo a matriz do detector linha por linha enviando essa carga em forma de sinal digital.

Como o fotocondutor tem um número atômico alto não necessita de um cintilador para a conversão da radiação em luz visível. Este detector possui uma espessura menor que o indireto, o que permite trabalhar com energias medias e altas.

Nos pixels do fotocondutor, os pares elétrons-buracos são gerados e espalhados sob a ação de um campo eletromagnético aplicado entre o eletrodo de entrada e o eletrodo do pixel. Cada pixel tem a capacidade de receber e armazenar cargas geradas pela radiação.

A tecnologia TFT (Thin Film Transistor) é empregada para a 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 que sofre ativação quando uma tensão é aplicada logo após a unidade ser exposta aos raios X. Na figura 11 é apresentado um diagrama da estrutura transversal de um conversor (KASAP, KABIR e ROWLANDS, 2006).

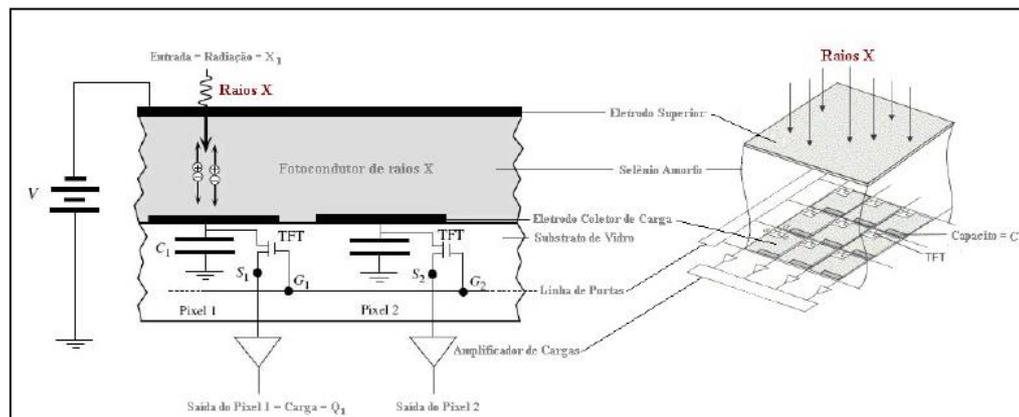


Figura 11: Diagrama esquemático da estrutura transversal de um conversor direto com sensor de raios X (adaptado de KASAP, KABIR e ROWLANDS, 2006).

3.3.2 Detector direto com conversão indireta

Na conversão indireta, um fotodiodo é acoplado a cada pixel e toda a matriz é coberta com um material cintilador, onde a interação dos raios X com esse cintilador produz luz visível com alta eficiência. Esses fótons de luz interagem com um fotodiodo que os converte em elétrons para ativar os pixels da camada de silício amorfo (a-Si). Esta carga produzida no fotodiodo é armazenada num capacitor e liberada após a ativação do pixel pelo TFT. Na figura 12 é apresentada a estrutura básica de um detector com conversão indireta.

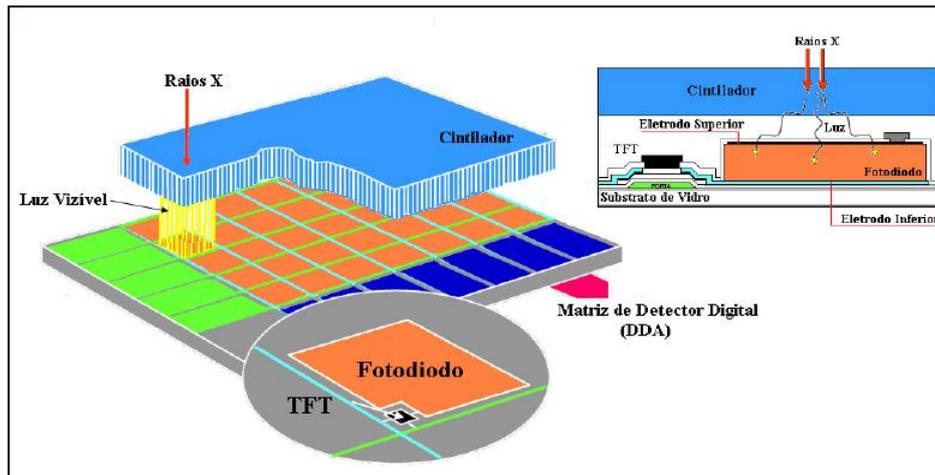


Figura 12: Estrutura de uma matriz de detectores e uma estrutura transversal de um pixel de conversão indireta com Cintilador (adaptado de KIMA, KIMA, *et al.*, 2003)

3.4 Técnicas de exposição

Com o intuito de tornar os ensaios padronizados com a técnica mais eficiente, algumas normas indicam como devem ser os procedimentos para aquisição de imagens radiográficas. Esse trabalho se propõe a analisar imagens feitas com um detector do tipo Flat Panel baseado na norma ISO 17636 – 2. As técnicas de exposição radiográfica se apresentam da seguinte forma:

3.4.1 Fonte de radiação localizada em frente ao objeto com o detector no lado oposto.

Essa técnica é conhecida como Parede Simples Vista Simples (PSVS) e com ela é formada a imagem radiográfica da solda, sem sobreposição ou interferência de qualquer parte do corpo de prova estudado. A fonte fica localizada a uma distância f do objeto de espessura t .

Essa é a técnica utilizada em corpos de prova planos e pode ser observada na figura 13.

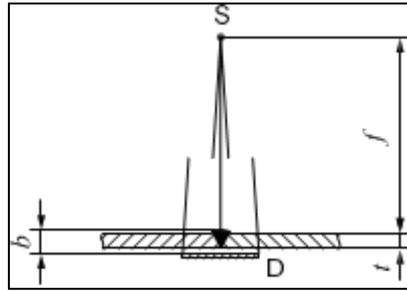


Figura 13: Arranjo para soldas planas, parede simples (ISO 17636-2, 2012).

3.4.2 Fonte de radiação localizada fora do objeto e detector dentro

Na figura 14 temos a representação de detectores maleáveis posicionados no interior de um corpo de prova, seja ele de formato cilíndrico (direita) ou plano (esquerda), obtendo uma imagem sem sobreposição de informações com a técnica PSVS.

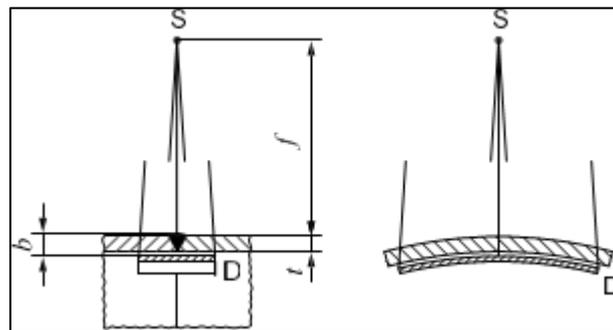


Figura 14: Detectores curvos (ISO 17636-2, 2012).

A representação da figura 15 é referente ao uso de detectores planos, como por exemplo, o *Flat panel*. Na execução da técnica PSVS, em se tratando de corpos de prova com formato cilíndrico, é possível observar que os raios provenientes da fonte irão percorrer trajetórias em que a espessura atravessada é diferente para cada um deles, causando assim as deformações geométricas e de nível de cinza abordadas nesse trabalho.

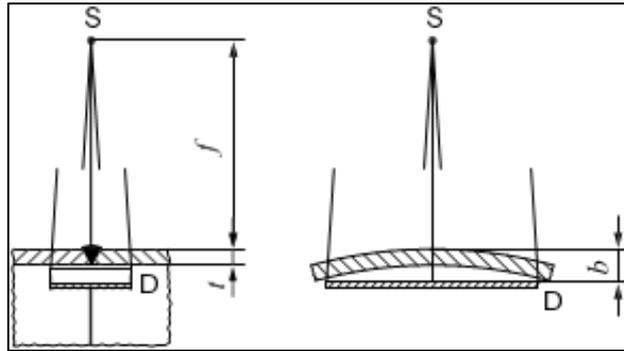


Figura 15: Detectores planos (ISO 17636-2, 2012).

3.4.3 Fonte de radiação localizada no interior e no centro do objeto, detector no exterior

No arranjo da figura 16 são usados detectores curvos no exterior do objeto e a fonte de radiação se encontra no interior do mesmo, exatamente posicionada em seu centro. Essa técnica PSVS é denominada panorâmica e para a execução da mesma a norma ISO 17636-2 (2012) não recomenda a utilização de detectores planos, já que os mesmos não teriam a capacidade de se moldar ao formato circular do corpo de prova e as deformações impostas pela geometria do arranjo impossibilitariam uma inspeção.

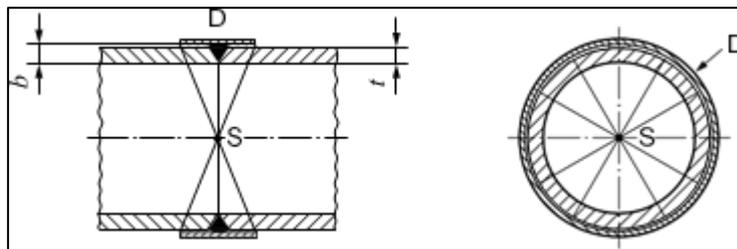


Figura 16: Arranjo para parede simples vista simples em corpos de prova curvos (ISO 17636-2, 2012).

Na figura 17 pode ser observado um exemplo de imagem adquirida com o uso da técnica demonstrada acima, com a fonte no interior do corpo de prova circular. Pode ser observado também o efeito de deformação da imagem da solda devido a geometria fonte-corpo de prova-detector:

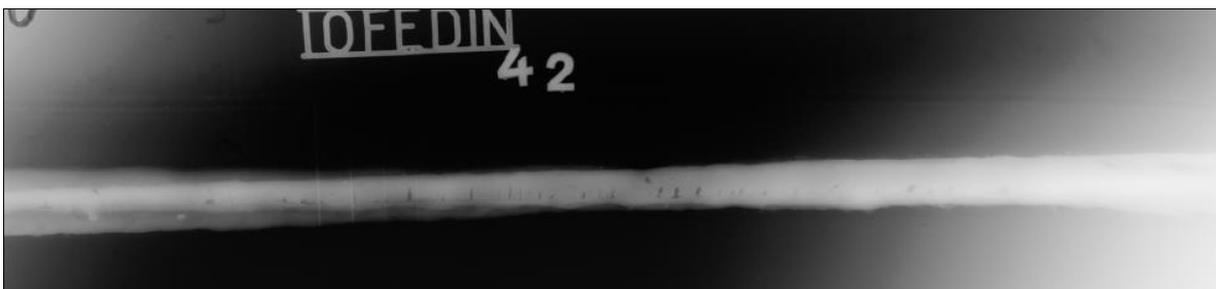


Figura 17: Exemplo de radiografia PSVS panorâmica. Junta soldada retilínea com presença de indicadores de qualidade de imagem (IQIs1) na porção superior da imagem (KROETZ, 2012).

3.4.4 Fonte de radiação localizada fora do centro dentro do objeto e detector externo

Com a fonte de radiação ainda no interior do objeto inspecionado, seja ele plano ou cilíndrico, a técnica PSVS ainda pode ser executada, tanto com detectores curvos (figura 18) quanto com detectores planos e rígidos.

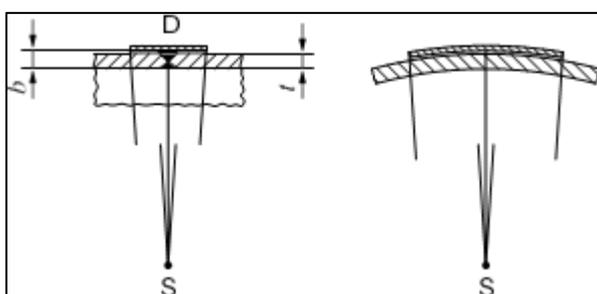


Figura 18: Detectores curvos (ISO 17636-2, 2012).

Na figura 19 temos um esquema representando a aplicação da técnica PSVS com fonte interna e com a utilização de detectores planos e rígidos.

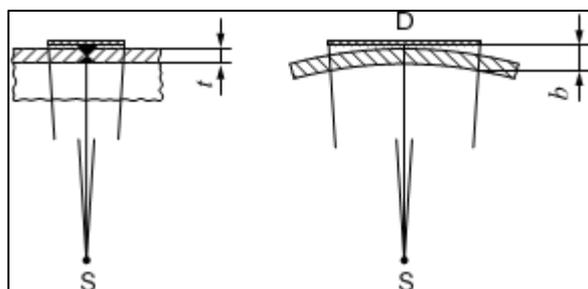


Figura 19: Detectores planos (ISO 17636-2, 2012).

3.4.5 Técnica elíptica

A técnica elíptica proporciona uma imagem radiográfica com sobreposição de informações, utilizada para tubos ou corpos de formato cilíndrico. É também conhecida como parede dupla vista dupla (PDVD).

Segundo a norma ISO 17636-2 (2012) essa técnica não deve ser utilizada em corpos de prova com diâmetro externo $D_e > 100$ mm ou espessura de parede $t > 8$ mm ou largura de solda $> \frac{D_e}{4}$.

Para cobrir toda a circunferência de solda são necessárias duas imagens deslocadas a 90° se a razão entre a espessura e o diâmetro externo for menor que 0,12, caso contrário, três imagens são necessárias. A distância entre as duas imagens de solda projetadas deve ser de cerca de uma largura de solda. Na figura 20, é visualizado um esquema representando o posicionamento da fonte, detector e corpo de prova.

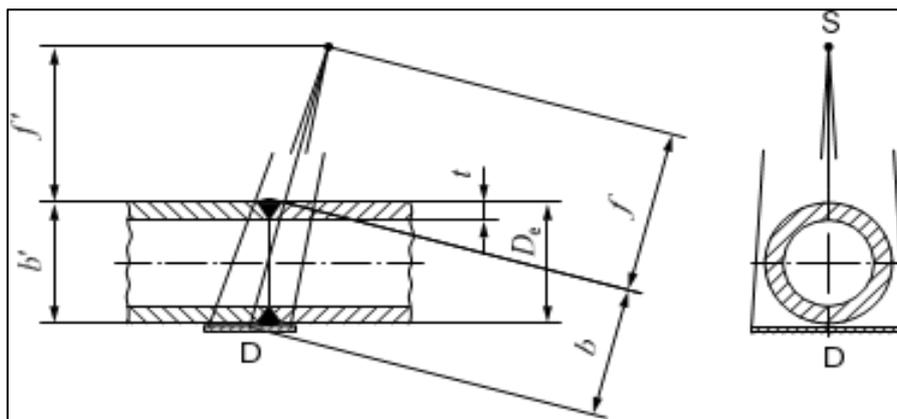


Figura 20: Arranjo experimental para parede dupla vista dupla em objetos curvados, técnica elíptica. (ISO 17636-2, 2012).

A figura 21 mostra um exemplo real de imagem digital utilizando a técnica perpendicular.

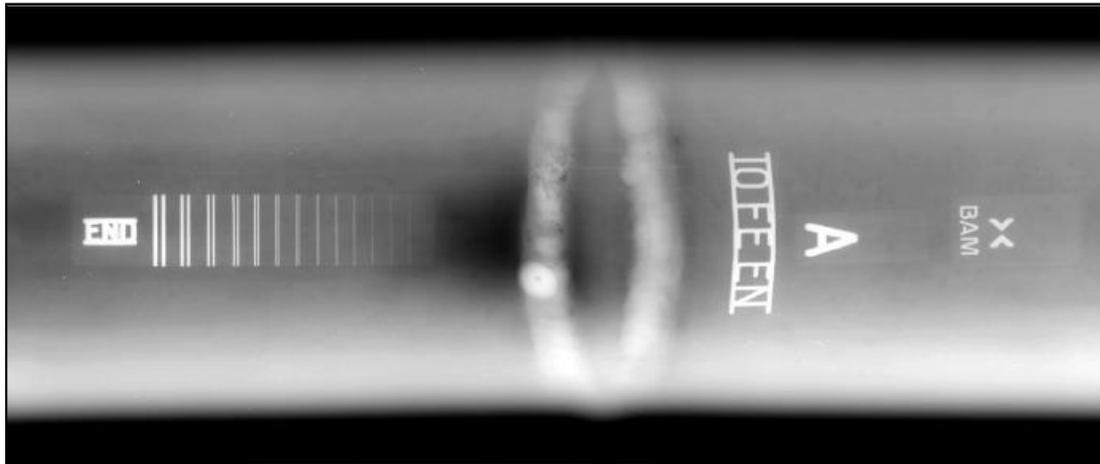


Figura 21:Exemplo de radiografia PDVD não sobreposta. Junta soldada com formato elipsoidal com indicadores de qualidade de imagem (IQIs) sobre o corpo de prova (KROETZ, 2012).

3.4.6 Técnica perpendicular

Quando não é possível utilizar a técnica elíptica demonstrada acima em diâmetros externos $D_e \leq 100$ mm, pode ser utilizada a técnica perpendicular de acordo com o esquema representado pela figura 22. Neste caso, são necessárias três exposições de passo 120° ou 60° .

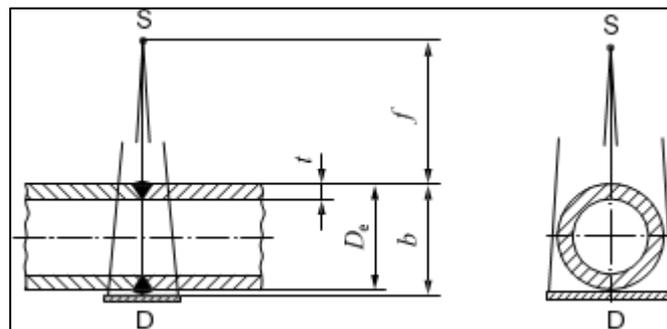


Figura 22:Arranjo experimental para parede dupla vista dupla em solda circular. (ISO 17636-2, 2012).

3.4.7 Fonte e detector localizados externamente ao objeto

Para os arranjos experimentais da técnica elíptica, a inclinação da fonte em relação a solda deve ser mantida tão pequena quanto possível e ser tal que evite a sobreposição das duas imagens. O objetivo dessa técnica é obter, em uma mesma imagem radiográfica, informações sobre as duas paredes localizadas no segmento de reta que tem origem na fonte e segue até o detector.

A distância de origem para objeto, f , deve ser mantida o menor possível para a técnica mostrada na figura 23 e, para esse caso, IQI deve ser colocado próximo do detector com uma letra de chumbo.

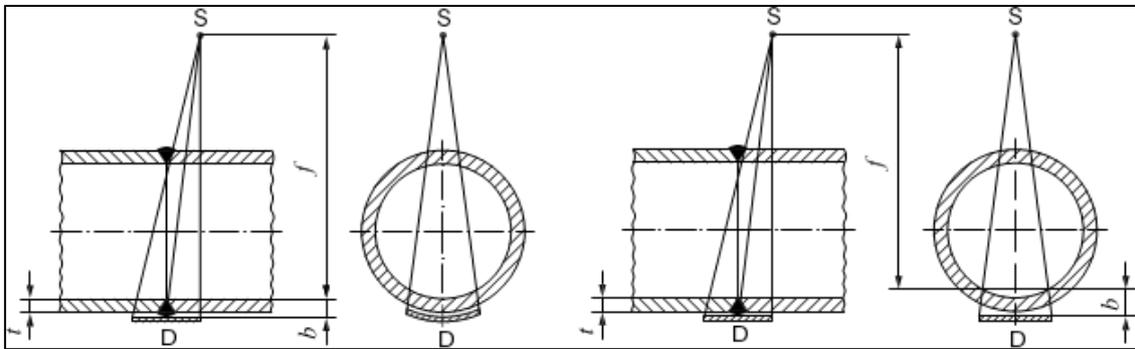


Figura 23: Arranjo experimental para técnica parede dupla vista simples em objetos curvos para análise da parede mais próxima do detector com o IQI posicionado entre parede e detector (ISO 17636-2, 2012).

Essa técnica também pode ser executada com a fonte tangente ao corpo de prova, como pode ser observado na imagem abaixo. Nesse caso, a imagem radiográfica apresenta apenas a informação de uma parede, a mais próxima ao detector. A parede que se encontra mais próxima à fonte funcionará como um filtro para os raios emitidos pela fonte, técnica conhecida como parede dupla vista simples (PDVS) que é representada pelo esquema da figura 24.

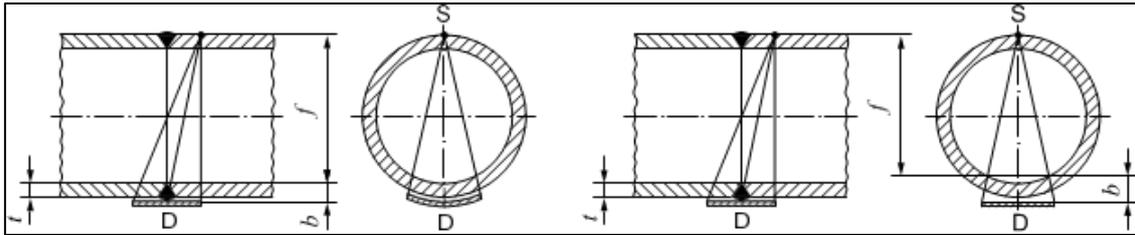


Figura 24: Arranjo para parede dupla vista simples (ISO 17636-2, 2012).

Em cordões de solda longitudinais a técnica é a mesma. A figura 25 demonstra um arranjo em que a fonte se localiza fora do corpo de prova e com pouca distância do mesmo e o detector utilizado é plano e rígido.

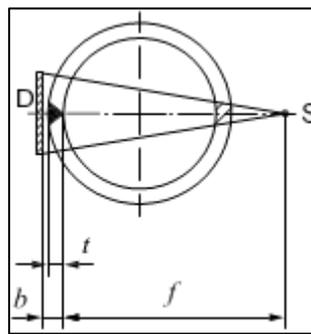


Figura 25: Arranjo para parede dupla vista simples em soldas longitudinais.

Uma imagem adquirida com o uso da técnica parede dupla vista simples é visualizada na figura 26. Pode-se perceber a deformação geométrica determinada pelas diferenças de distância dos diferentes pontos da circunferência da solda até o detector.

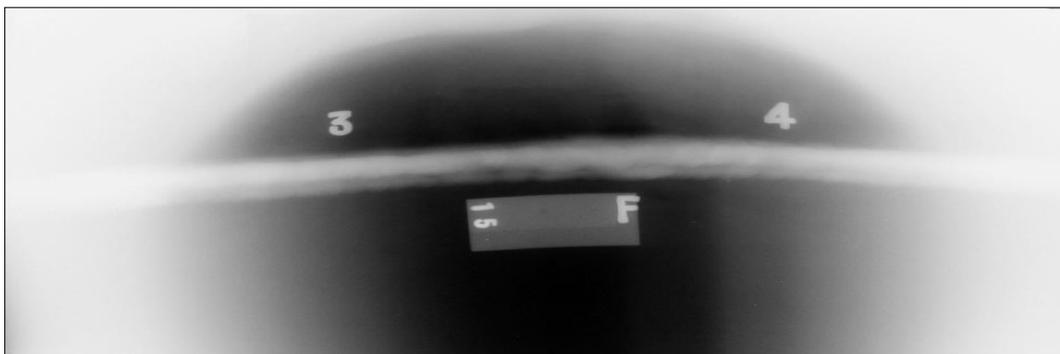


Figura 26 Exemplo de radiografia PDVS com fonte não alinhada. Junta soldada levemente curva com presença de indicadores de qualidade de imagem (IQIs) próximos à solda. (KROETZ, 2012).

3.5 Número recomendado de exposições

O número mínimo de imagens a ser realizado em um ensaio radiográfico de uma solda circunferencial deve proporcionar imagens de toda a circunferência do tubo em questão. Para tal, a norma 17636-2 determina alguns parâmetros de acordo com a relação entre distância fonte objeto (f), diâmetro externo (D_e), espessura nominal do tubo (t) e distância fonte detector (SDD) para que o máximo de área sensível do detector possa ser utilizada sem comprometer a qualidade da imagem.

As figuras que seguem são uma representação gráfica das relações dessas grandezas aplicadas e a base teórica das recomendações presentes, na referida norma, com relação ao número de imagens necessárias para ensaios de tubos com um diâmetro externo superior a 100mm. São apresentadas nas duas figuras 27 e 28 um quadro de consulta rápida para determinação desse número mínimo de imagens para ensaios radiográficos (ISO 17636-2, 2012).

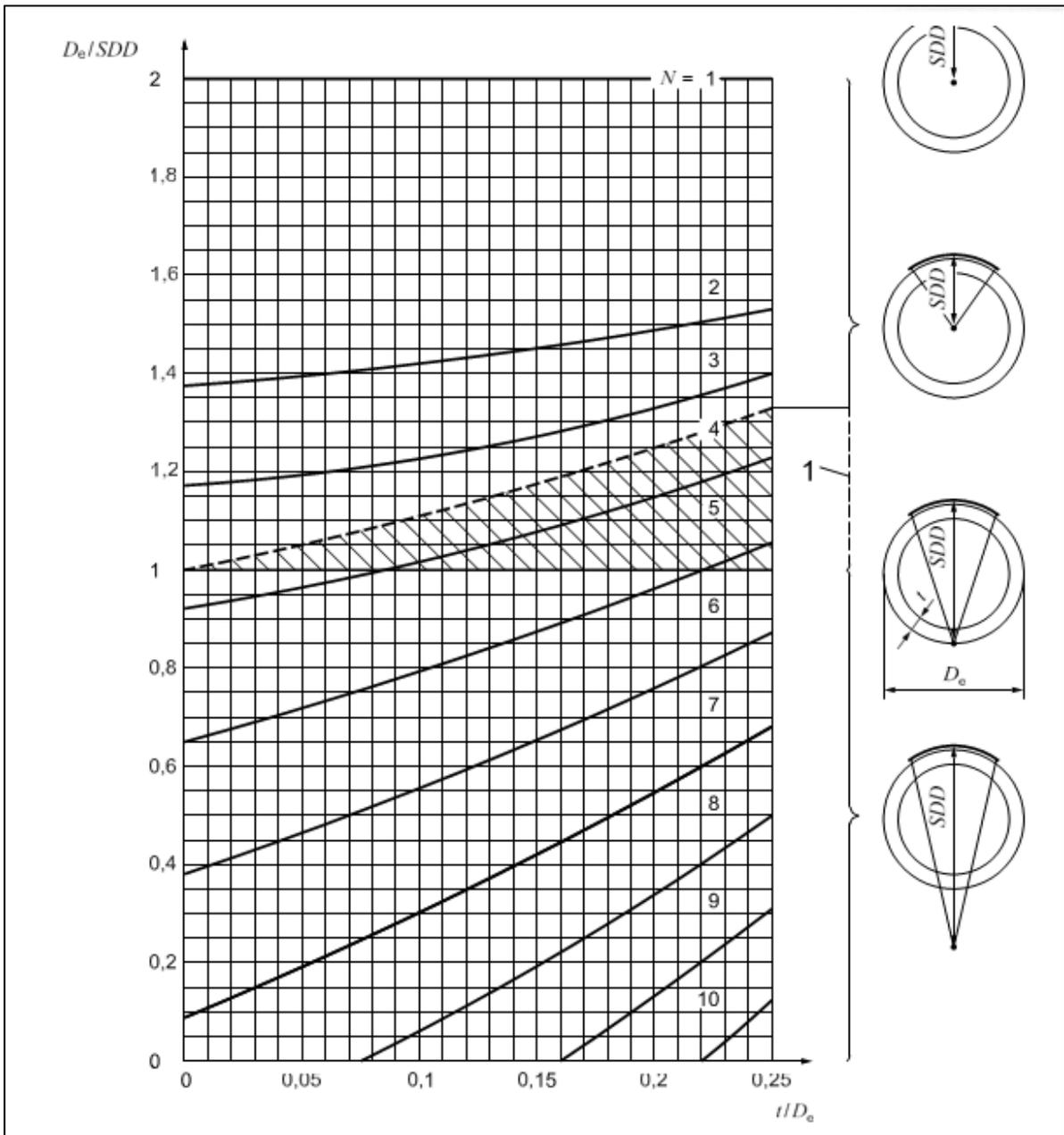


Figura 27: Número mínimo de exposições N para penetração descentrada com fonte interior e para penetração de parede dupla, com um aumento máximo admissível da espessura penetrada $\Delta t / t$ devido à penetração inclinada nas áreas avaliadas de 10% (classe B) (ISO 1763-2)

Quando o desvio da espessura da parede da junta ($\Delta t/t$) a ser examinada não excede 20%, são utilizadas as figuras 27 e 28. Esta técnica é recomendada somente quando a possibilidade de ter descontinuidades transversais é pequena ou a solda é examinada para tais imperfeições por outros métodos de ensaios não destrutivos.

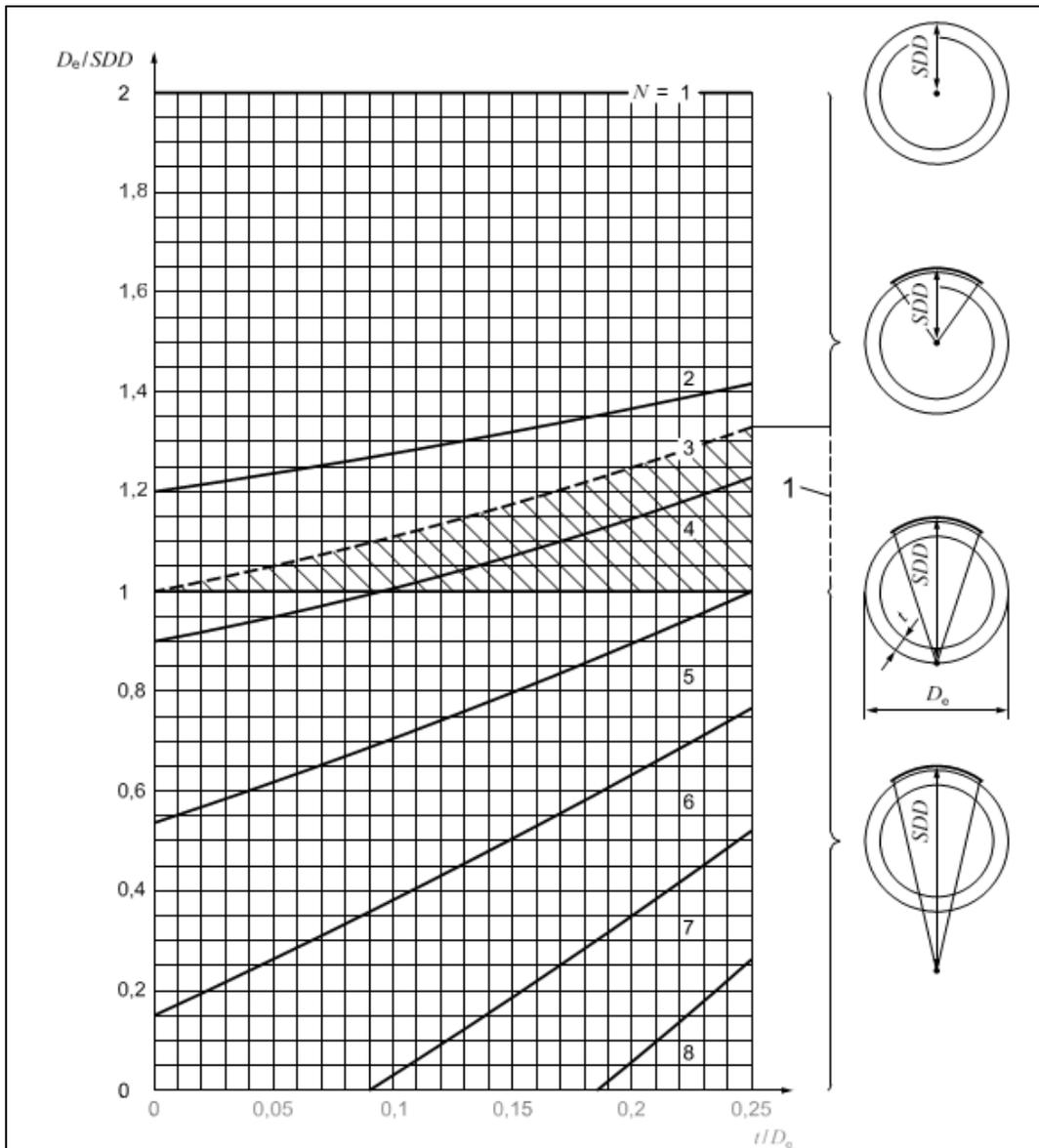


Figura 28: Número mínimo de exposições N para penetração descentrada com fonte interior e para penetração de parede dupla, com um aumento máximo admissível da espessura penetrada $\Delta t / t$ devido à penetração inclinada nas áreas a avaliar de 20% (classe A) (ISO 1763-2)

3.6 Processamento de imagens digitais

O processamento de imagens digitais é uma poderosa ferramenta de melhoria de qualidade de imagem, que pode aumentar a detectabilidade, já que melhora a informação visual para a interpretação humana, e a confiabilidade de uma imagem radiográfica digital. Seu emprego é variado se fazendo presente em diversas áreas como medicina, cinema e na indústria.

3.6.1 Imagem digital

Uma possibilidade de definição de uma imagem digital é como uma função $f(x, y)$ bidimensional, p, com x e y representando as coordenadas espaciais em um sistema cartesiano e a função f representando a intensidade do pixel. Esse valor, nas radiografias digitais, é conhecido como nível de cinza de um determinado pixel. A figura abaixo demonstra essa representação bidimensional (GONZALEZ e WOODS, 2002).

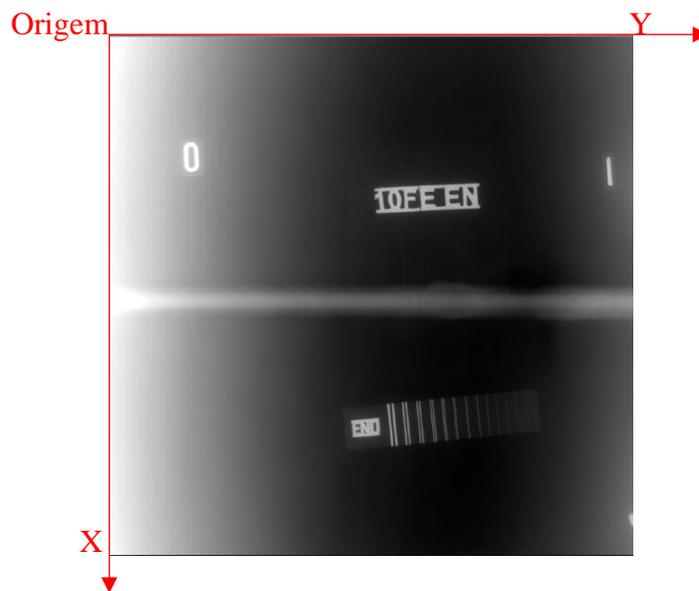


Figura 29: Convenção dos eixos para representação de imagens digitais.

É interessante evidenciar a representação de uma imagem também como uma matriz $M \times N$, onde M representa o número de linhas de pixels e N o número de colunas e o termo $f(x, y)$ representa um pixel qualquer e os valores contidos em cada termo determinam o nível de cinza correspondente a esse pixel na imagem. A matriz abaixo é uma representação matemática de uma imagem qualquer:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & \dots & f(0, N - 1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M - 1, 0) & \dots & f(M - 1, N - 1) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A imagem digital é armazenada através de valores que podem ser 0 ou 1, dígitos binários denominados bits, onde um conjunto de bits é chamado de *byte*. Os pixels da imagem digital são representados pelos bytes, através de configurações que representam

as tonalidades de grau de cinza. Pode-se ver na figura 30 a relação entre as tonalidades de cinza e os valores apresentados nos pixels.

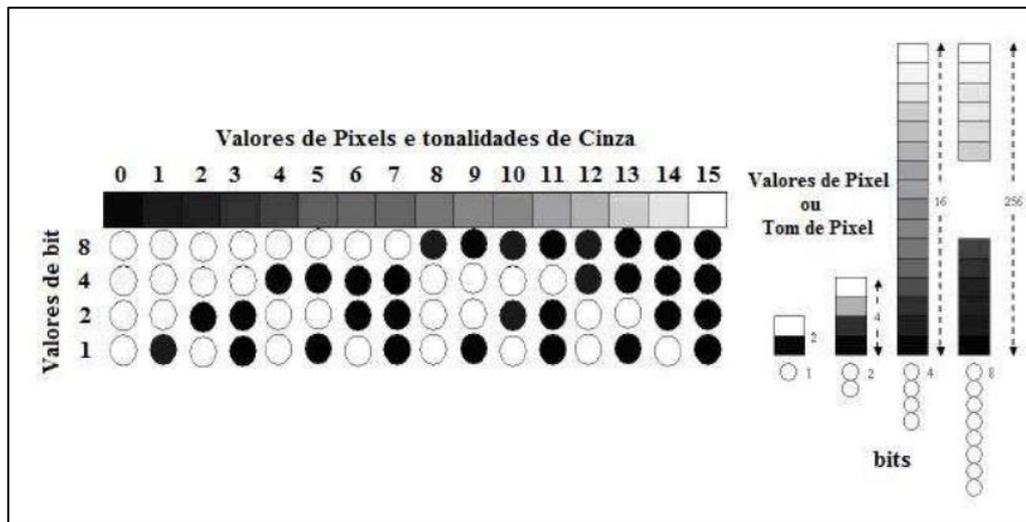


Figura 30: Representação da relação entre bits e níveis de cinza (adaptado de AIRD, 1998).

3.6.2 A origem do processamento da imagem digital

Uma das primeiras aplicações do processamento de imagens, segundo GONZALEZ e WOODS (2002), foi no envio de imagens digitalizadas de Londres para jornais Norte Americanos, na cidade de Nova York, através de um cabo submarino.

Com essa nova forma de envio de imagens, o tempo de transmissão dessas informações caiu de uma semana para menos de três horas. Já nos anos 1920, as imagens viajavam por todo o Oceano Atlântico em cabos submarinos, e quando recebidas eram codificadas e impressas por um equipamento conhecido como impressora telegráfica. A figura 31 representa uma das primeiras imagens a ser enviada, no ano de 1921, pelo sistema de cabos submersos.



Figura 31: Sistema G (x, y) de Transmissão de imagens em 1921 (GONZALEZ e WOODS, 2002)

Os primeiros sistemas de envio e reconstrução de imagens, conhecidos como *Bartlane cable picture transmission systems*, eram capazes de codificar imagens em até 5 níveis de cinza distintos. Em alguns anos já se conseguiam enviar imagens com até 15 níveis de cinza distintos.

No início dos anos 60, surgiram os primeiros computadores mais potentes com capacidade de realizar as tarefas de processamento de imagem. A combinação dessas máquinas com o início do programa espacial resultou no desenvolvimento do processamento digital de imagem e foi o pontapé inicial para os avanços observados nos dias de hoje.

Em 1964, imagens da lua foram transmitidas pelo *Ranger 7*, um veículo espacial lançado para o espaço, e na terra foram processadas por um computador para corrigir as suas distorções. A Figura 32 mostra a imagem transmitida pelo *Ranger 7* que apresenta qualidade de resolução de níveis de cinza centenas de vezes maior que a imagem enviada em 1921, apenas 43 anos antes.



Figura 32: Primeira foto tirada da lua por um veículo espacial U.S (Ranger 7) (GONZALEZ e WOODS, 2002)

No final dos anos 60, acompanhando os avanços do processamento de imagens digitais alcançados no programa espacial e o desenvolvimento das técnicas de melhoria de imagem ocorreram os avanços na área médica. Um notável marco é a criação da técnica de tomografia computadorizada de inexpressável importância em toda área da saúde.

De 1960 até os dias de hoje, o campo de processamento de imagem tem tido acelerado progresso, usando mais técnicas além das aplicações utilizadas no campo espacial e na medicina, como por exemplo, procedimentos para aumentar o contraste da imagem. Uma aplicação é o uso por geógrafos de técnicas de processamento de imagens para estudar padrões de poluição, a partir de imagens aéreas e de satélite (SALDANHA e ALVES, 2005). Este é um exemplo onde pode-se relacionar o tratamento das imagens com a melhora da interpretação humana.

Em função da gama de possibilidades provida pela manipulação da informação contida nas imagens digitalizadas e a facilidade de armazenamento e aquisição de fotografias digitais, grande parte da população mundial usa cotidianamente algum tipo de sistema para aquisição de imagens.

Esta tendência mundial tem estimulado o crescimento da indústria mundial de programa especializado em processamento de imagens. Em geral, os programas criados para esta função contêm uma ampla gama de algoritmos matemáticos, programados em diferentes tipos de linguagem de computador e permitem transformar a informação contida nas imagens de alguma das seguintes formas:

- 1) Selecionar algum tipo de informação especial;
- 2) Realçar características de interesse particular;
- 3) Transformar o formato;
- 4) Reconstruir características não visíveis;
- 5) Comprimir o conteúdo das imagens.

CAPÍTULO 4

4 MATERIAIS E MÉTODOS

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

4.1 Materiais

4.1.1 Equipamento de raios X

O equipamento de raios X utilizado é fabricado pela empresa General Electric (GE), o seu modelo é o ERESKO 300 MF4-R, com tamanho focal de 1mm, inclinação do alvo de 15° e abertura de feixe de 30° x 60° como observado no esquema da figura 33. O intervalo de tensão do equipamento vai de 10 até 300 kV com potência máxima de 900W.

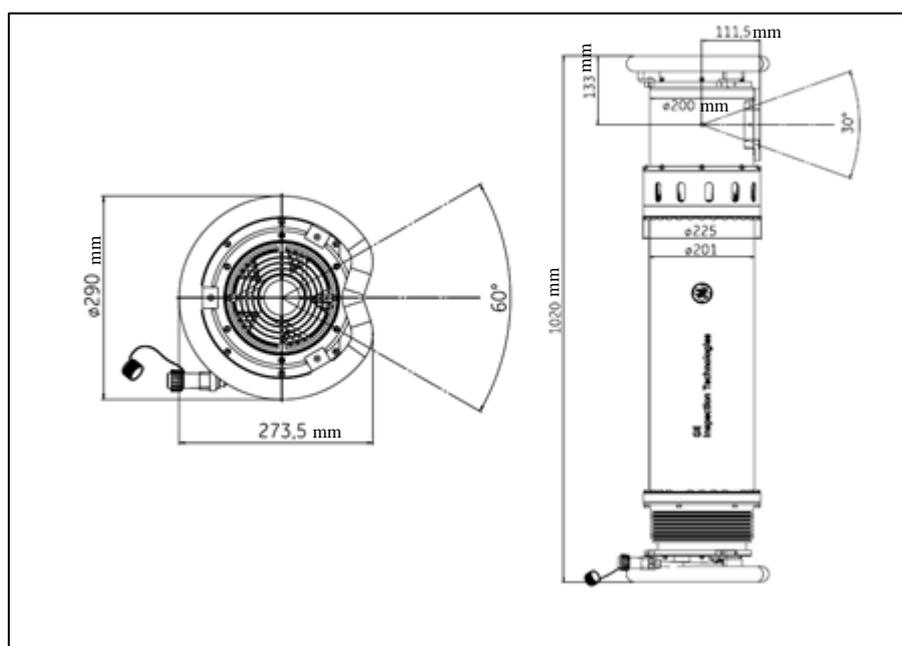


Figura 33: Esquema do equipamento de raios X ERESKO

4.1.2 Programa de análise das imagens digitais

O programa ISEE! foi utilizado para análise dos tipos e quantificação dos comprimentos das descontinuidades observadas nas imagens digitais geradas nos ensaios. Esse programa tem como propósito a análise de imagens radiográficas possibilitando a identificação e classificação visual e também aferições de comprimento ou área, suportado por sistema operacional Microsoft Windows, desenvolvido pela BAM (Federal Institute for Research and Material Testing, Berlim, *Alemanha*).

4.1.3 Programa de tratamento das imagens digitais MATLAB®

O sistema MATLAB® consiste em uma linguagem de computação de alto-nível e ambiente de desenvolvimento de algoritmos, análise e visualização de dados, e computação numérica. Este programa pode ser utilizado para: programação; desenvolvimento de algoritmos; aquisição de dados; simulação; modelação; análise de dados e visualização (THE MATHWORKS, 2000).

A sua estrutura de dados fundamental é a matriz que pode ter elementos reais ou complexos e que não requer dimensionamento. O nome de MATLAB® derivou da contração das palavras "MATrix LABORatory" e foi inicialmente concebido para proporcionar fácil acesso às bibliotecas mais importantes em computação e cálculo matricial. O MATLAB® é um sistema de trabalho interativo baseado na representação matricial. O programa permite efetuar, de um modo rápido, a resolução numérica de problemas em um tempo muito menor do que com linguagens de programação tradicionais como Fortran, Basic ou C.

4.1.4 Detectores

Os detectores apresentados na figura 34 (DXR250V a esquerda e DXR250CW a direita) são conhecidos como "*Flat Panel*", os mesmos possuem sensores do tipo silício amorfo e tela do cintilador de Oxissulfato de gadolínio. São formados por uma matriz de detecção digital composta por detectores com circuitos integrados, que podem capturar uma imagem de raios X e convertê-la a um formato digital. O equipamento DXR250V possui mais de 4 milhões de pixels (2048 x 2048), de alta resolução com tamanho do pixel de 200 µm e 14 bits. Tem dimensões ativas de 410 por 410 mm e opera em uma faixa de

energia de 30 kV a 3 MeV enquanto o detector DXR250CW possui uma matriz de pixels menor (1024x1024) e dimensões de área sensível de aproximadamente 200x200mm. A tabela 3 mostra as características dos detectores utilizados.



Figura 34: Detector Direto Digital DXR250V da GE IT

Tabela 3: Características do Detectores digitais diretos utilizados

	DXR 250V	DXR 250CW
Tipo de tela plana	Silício Amorfo	Silício Amorfo
Material cintilador	Oxisulfito de Gadolínio	Oxisulfito de Gadolínio
Área ativa (próx.)	410 x 410 mm	200 x 200 mm
Formato da imagem	2048 x 2048	1024 x 1024
Conversão A/D	14 bits	14 bits
Tempo mínimo de Exposição	285 ms	285 ms
Pixel	200µm	200µm
Dimensões	585 x 465 x 27 mm	408 x 257 x 25 mm
Peso	6 kg	3,5 kg
Temperatura de Operação	10° a 35° C	-20°C até 50°C

4.1.5 Corpos de prova

Como corpos de prova foram utilizados seis tubos de aço com solda circunferencial com diâmetros e espessuras variados, representados na tabela 4. Foram escolhidos 4 diâmetros e espessuras diferentes para que fosse avaliada a deformação imposta por variados diâmetros e espessuras e a eficácia da correção proposta em diferentes casos.

Tabela 4: Descrição dos corpos de prova

Diâmetro (pol.)	Espessura (mm)	Nomenclatura dos CPs	Chanfro	Processo de Soldagem
10	13,02	CP 10-1270A	U	TIG (raiz) e ER nos demais
	18,95	CP 10-1826D	V	TIG (raiz) e ER nos demais
12	13,50	CP 12-1270B	U	TIG (raiz) e ER nos demais
	14,40	CP 12-1427A	V	TIG (raiz) e ER nos demais
16	12,60	CP 16-1270A	V	TIG (raiz) e ER nos demais
20	14,20	CP 20-1510B	V	TIG (raiz) e ER nos demais

4.2 Métodos

4.2.1 Distorção do nível de cinza em imagens de corpos de prova cilíndricos.

Para formação de uma imagem radiográfica, os raios provenientes da fonte de radiação são atenuados no corpo de prova, e ao incidirem no detector, os mesmos irão gerar uma representação das atenuações impostas por esse corpo de prova, evidenciando o contraste entre partes de densidades ou espessuras diferentes.

A figura 35 demonstra a trajetória de três raios emitidos por uma fonte pontual localizada externamente a um corpo de prova cilíndrico sobre um detector plano. Pode-se observar que as trajetórias dos três diferentes raios apresentados atravessam o tubo percorrendo diferentes espessuras do mesmo, espessuras essas que possuem grande variação quando comparada entre elas, causando grandes divergências nos níveis de cinza da imagem adquirida.

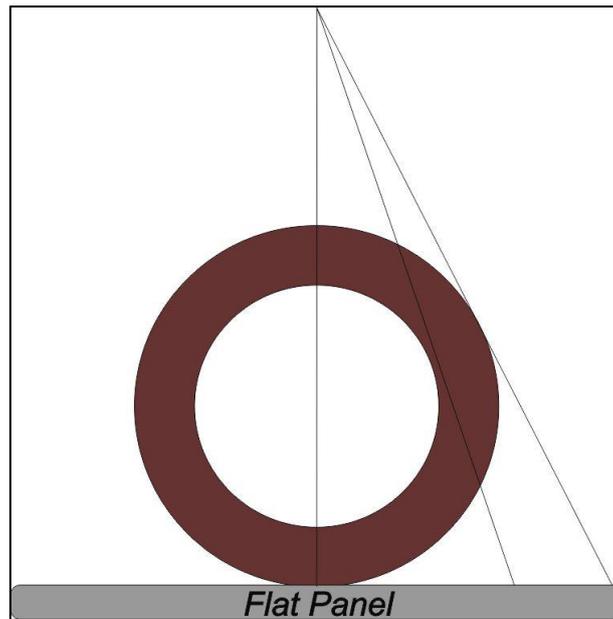


Figura 35: Trajetória de feixe de raios X em um tubo.

A figura 36 é uma representação tridimensional dos níveis de cinza de uma imagem digital de um corpo de prova cilíndrico de diâmetro 254mm e que possui uma solda circunferencial. A imagem foi adquirida com um detector digital direto com área sensível de 200x200mm. Pode-se observar que a parte central apresenta níveis de cinza mais altos que os da extremidade por conta das diferentes espessuras atravessadas pelos raios emitidos. Com solda

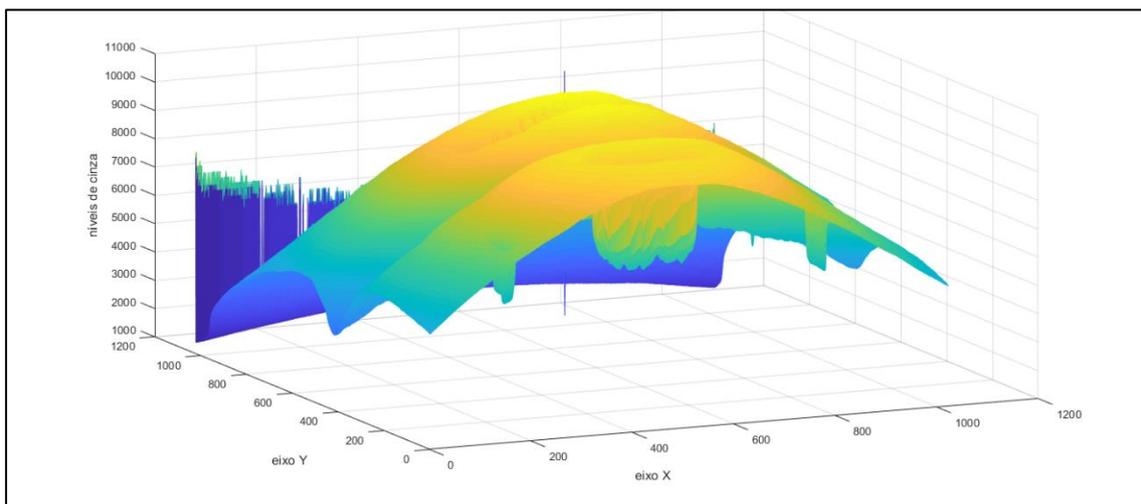


Figura 36: Representação tridimensional de uma imagem de corpo cilíndrico.

Apesar do material base ser homogêneo, as diferentes espessuras determinam uma grande variação nos níveis de cinza, levando a diminuição substancial da razão sinal ruído

normalizada, resolução de contraste e detectabilidade de descontinuidades de acordo com a proximidade da extremidade.

De forma mais pronunciada do que ocorre na análise de imagens de corpos de prova planos, os fatores de qualidade de imagem nas extremidades são afetados pela grande variação de nível de cinza, que levam a um aumento no desvio padrão dos mesmos e consequentemente na diminuição drástica da SNRn, que é a razão sinal ruído normalizada pela resolução espacial medida.

A figura 37 apresenta a aferição da SNRn em dois pontos distintos de uma imagem, na esquerda a medida é feita na região central da imagem, onde o desvio padrão dos níveis de cinza é menor, na direita a medida é realizada na extremidade da imagem, apresentando valor 7 vezes menor.

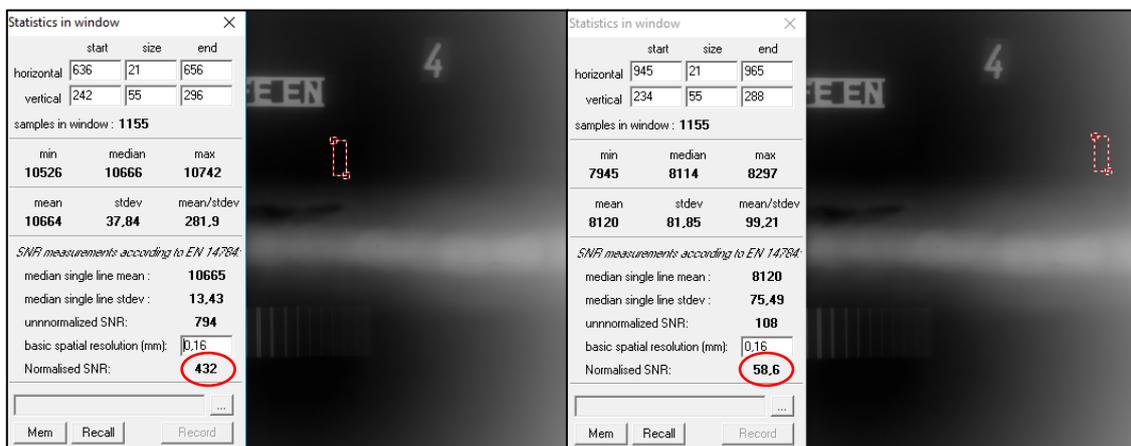


Figura 37: Variação da SNRn de acordo com a proximidade da extremidade.

4.2.2 Distorção geométrica em imagens de corpos de prova cilíndricos.

As imagens radiográficas digitais consistem na captura da radiação emitida por uma fonte após a sua transmissão por um objeto. Assim, como em qualquer projeção, observa-se uma diferença de tamanho entre o objeto e a imagem obtida. Essa diferença é chamada de magnificação e sua intensidade depende das distâncias entre a fonte de raios X e o detector (DFD) e a distância entre o objeto e o detector (DOD) e sua intensidade pode ser entendida como a razão entre essas duas grandezas. Essas distâncias podem ser observadas na figura 38 para melhor entendimento.

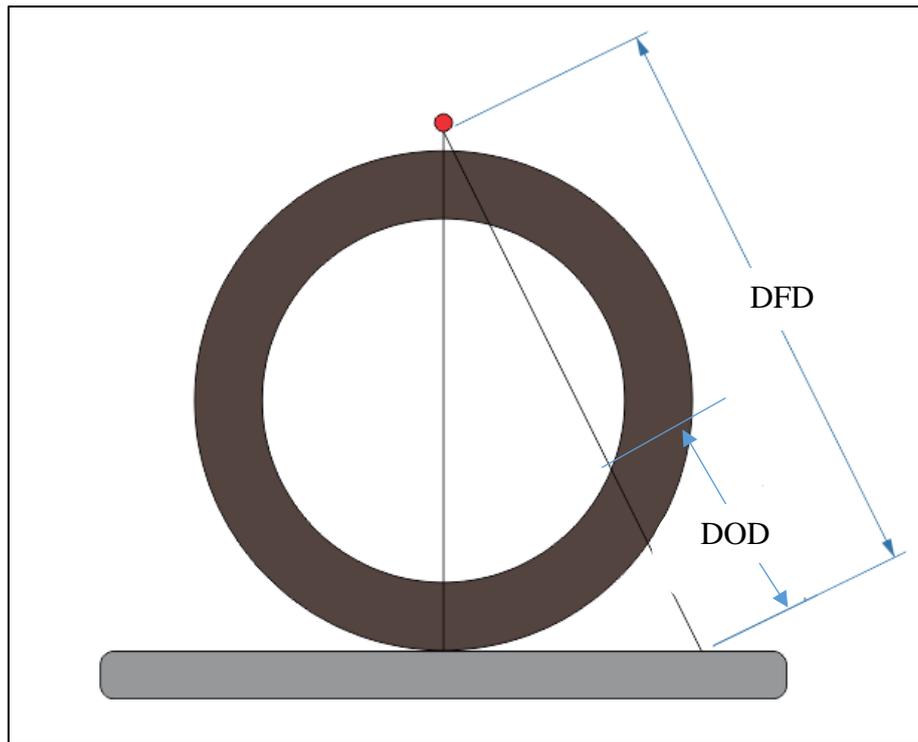


Figura 38: Representação das distâncias fonte detector e objeto detector.

Para a inspeção radiográfica de soldas planas, quando se utiliza qualquer tipo de detector, a distorção geométrica não é observada nas imagens resultantes, uma vez que a ampliação é a mesma em qualquer ponto do detector. O mesmo comportamento pode ser observado na inspeção de soldas circunferenciais com filmes convencionais ou placas de imagem. Esse fato ocorre porque estes podem se adaptar à forma circular da amostra analisada, mantendo assim a distância do objeto e o detector em todo o seu comprimento. Portanto, as imagens obtidas por essas técnicas não apresentam distorções espaciais na solda circunferencial (EDWARD, 1993).

No entanto, o problema da distorção espacial é observado quando o objeto tem uma forma cilíndrica e um detector plano é usado. Essa geometria determina diferentes distâncias entre o objeto analisado e o detector. Como essa diferença aumenta nas extremidades da imagem, o efeito de distorção nas suas bordas é intensificado, e se torna mais perceptível nas extremidades do objeto. A Figura 39 mostra uma ilustração que representa diferentes configurações para aquisição de imagens com detectores planos e curvos.

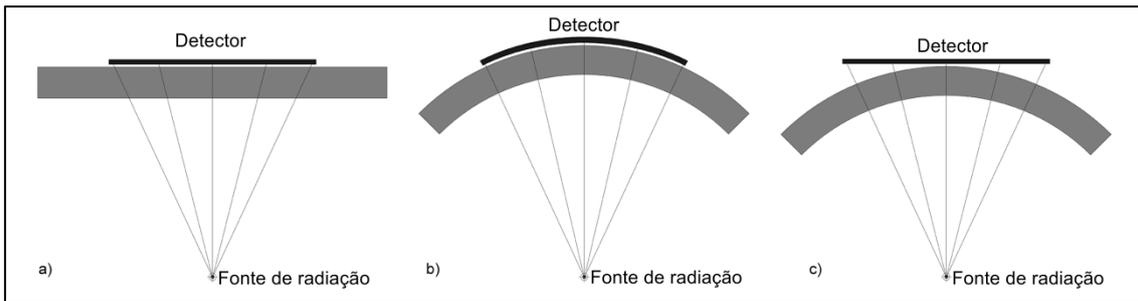


Figura 39: a) objeto plano e detector plano, b) objeto curvo com detector curvo e c) objeto curvo com detector plano.

As diversas configurações existem para diferentes tipos de arranjo entre detectores e corpos de prova e dependem tanto da aplicação quanto das normas utilizadas para inspeção dos corpos de prova. Nos arranjos 41 a) e b), pode-se notar que a distância objeto detector se mantém constante, diferente do arranjo 41 c), onde é notável o aumento da DOD com o deslocamento para a extremidade do detector plano, acarretando no problema da distorção geométrica.

A Figura 42 mostra um esquema ilustrativo de uma solda exemplificando a influência da distorção geométrica devida à diferentes distâncias objeto detector (DOD) em um detector plano. A Figura 42 a) representa uma imagem ideal, como as observadas em soldas planas ou soldas circunferenciais, quando obtidas com detectores maleáveis, nela não se observa qualquer diferença de ampliação entre as bordas e o centro.

A Figura 40b ilustra uma imagem de uma solda circunferencial obtida com a utilização de detectores planos, onde um aumento na largura da projeção de solda pode ser visto de acordo com a proximidade das bordas da imagem, esse aumento é caracterizado nesse trabalho como distorção geométrica, evidenciando o fato de ser proveniente da geometria fonte-corpo de prova cilíndrico-detector plano.

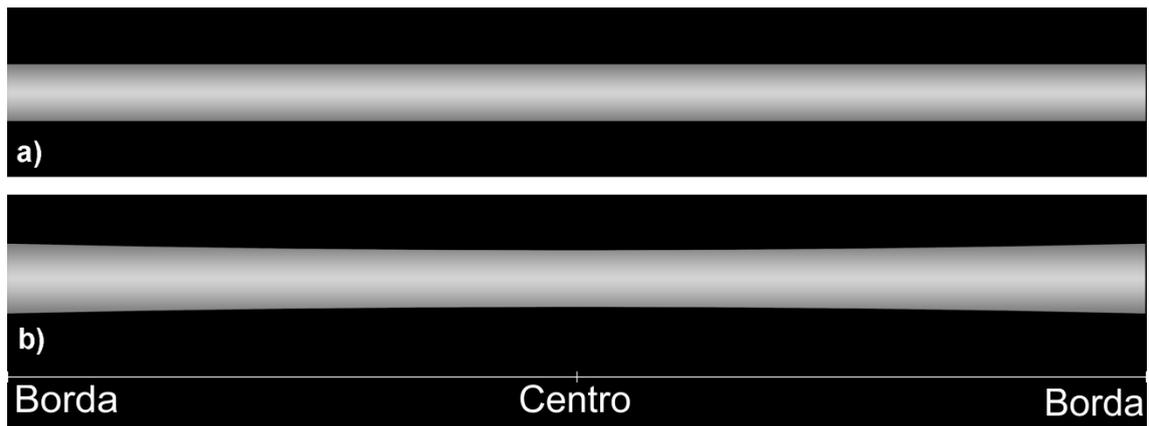


Figura 40: Ilustração de uma imagem radiográfica de solda - a) nenhuma distorção geométrica e b) distorção geométrica nas bordas.

Na figura 40, pode-se observar que as extremidades da imagem sofrem um aumento no tamanho real quando comparado à uma imagem padrão, adquirida com um detector maleável. Nota-se que os defeitos, quando submetidos a distorção terão, também, seu comprimento aumentado, levando o analista a um possível erro de interpretação com relação ao tamanho e gravidade do defeito observado. A Figura 41 mostra um exemplo ilustrativo de um defeito simulado localizado nas coordenadas x e y.

A figura 41 a) e c) representa um defeito vertical em uma imagem de junta soldada de uma solda circunferencial adquirida com detector plano e a figura 41 b) e d) o mesmo defeito em uma imagem adquirida com um detector maleável, que se adaptou ao formato circular do corpo de prova.

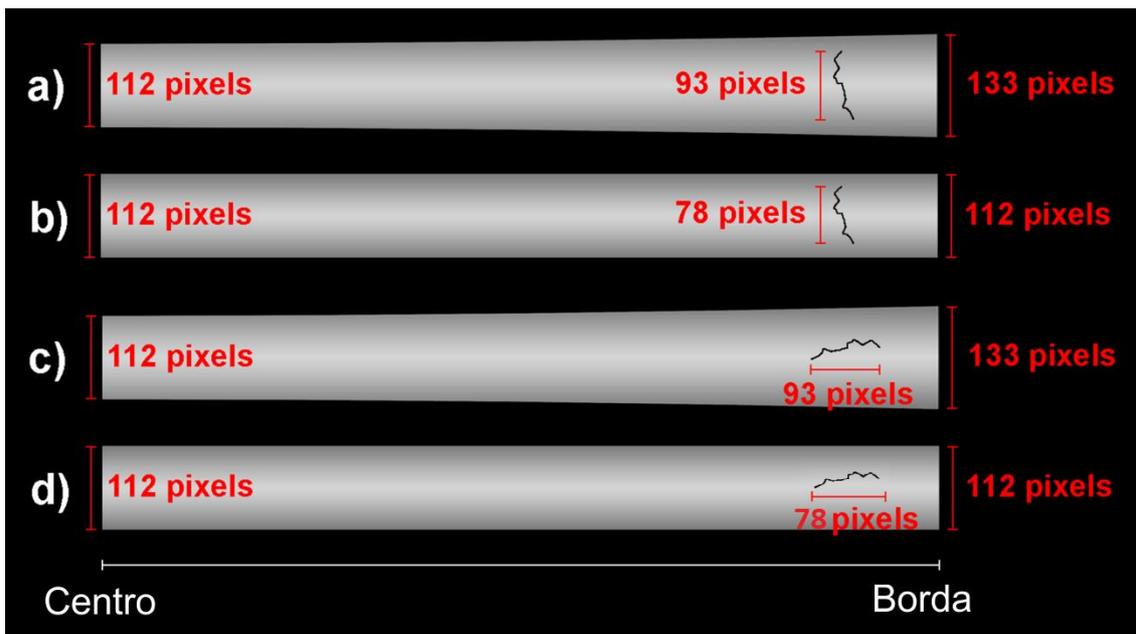


Figura 41: Simulação de um defeito em uma imagem radiográfica de solda - a) e b) defeito localizado no eixo Y antes e depois da correção e c) e d) defeito localizado no eixo X antes e depois da correção.

Para propor uma forma de correção da distorção geométrica das imagens radiográficas de corpos cilíndricos é necessário descrever matematicamente o problema e desenvolver uma caracterização onde seja possível determinar a relação entre a posição dos pontos do objeto (O) e seus respectivos pixels na imagem radiográfica, que são representados pela imagem (I). Para tal, a geometria plana não atende ao requisito tridimensional imposto pelo formato cônico do feixe de radiação e cilíndrico do tubo, então a geometria analítica foi a ferramenta escolhida para tal descrição.

Inicialmente localiza-se a imagem radiográfica em um plano cartesiano, sendo a posição $I(x, y, z)$ de um pixel correspondente a um ponto qualquer da imagem, em condições ideais onde o feixe de radiação é paralelo e o corpo de prova plano o ponto I deveria apresentar as mesmas coordenadas (x, y) de seu respectivo ponto formador objeto $I_o(x, y, z)$. No entanto, em tratando-se de um feixe cônico as coordenadas de cada ponto são ligeiramente alteradas, como pode se observar na representação da figura 42.

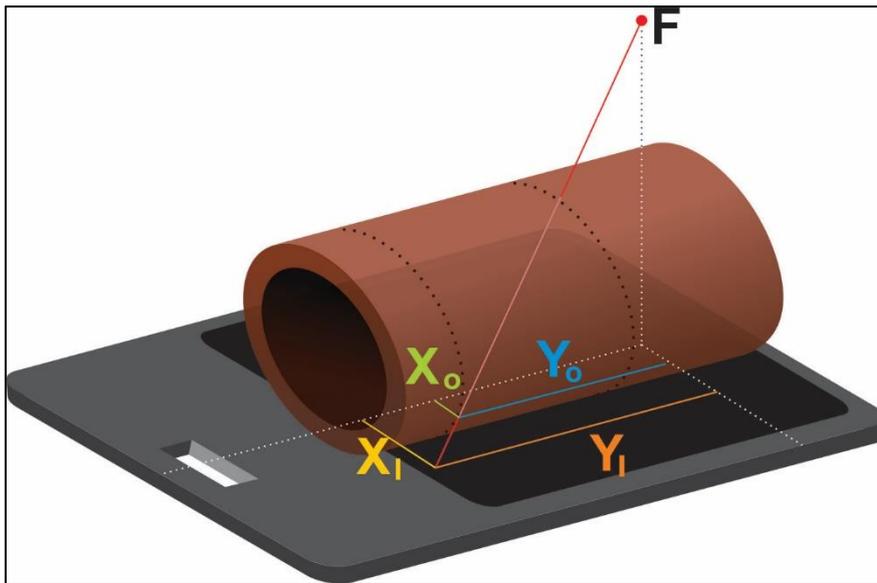


Figura 42: demonstração esquemática de deslocamento de coordenadas em projeção de feixe cônico.

A distância objeto detector (DOD) impõe uma ampliação diferente em cada ponto da imagem I, obtida pela transmissão do feixe de raios X e emitida a partir de uma distância fonte objeto (DFO) através do objeto O com o raio R. Essa ampliação gera uma distorção espacial nas coordenadas x e y. Conforme demonstrado na Figura 43, pode-se observar o deslocamento da imagem de O onde $X_I > X_o$.

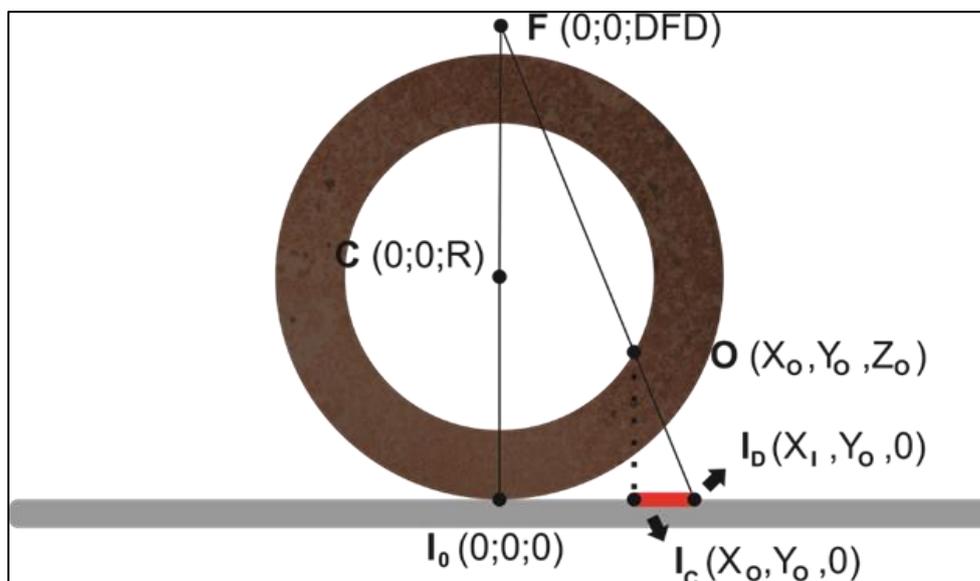


Figura 43: Demonstração de colinearidade dos pontos, fonte, objeto e imagem.

Qualquer ponto da projeção radiográfica pode ser representado de acordo com a posição dos pixels do detector no plano por $I(x,y,z)$. O ponto do objeto formador de imagem desse pixel também pode ser localizado no mesmo sistema de coordenadas.

4.2.3 Construção do algoritmo de correção de níveis de cinza

Conhecendo as dimensões do corpo de prova (diâmetro e espessura), posição da fonte e detector, bem como as suas dimensões é possível explicitar, com o uso da geometria analítica, suas posições, ponto a ponto, em um sistema de coordenadas tridimensional.

O primeiro passo para determinar as posições de cada componente do arranjo é criar um sistema de coordenadas onde o centro da superfície do detector está localizado na origem dos eixos.

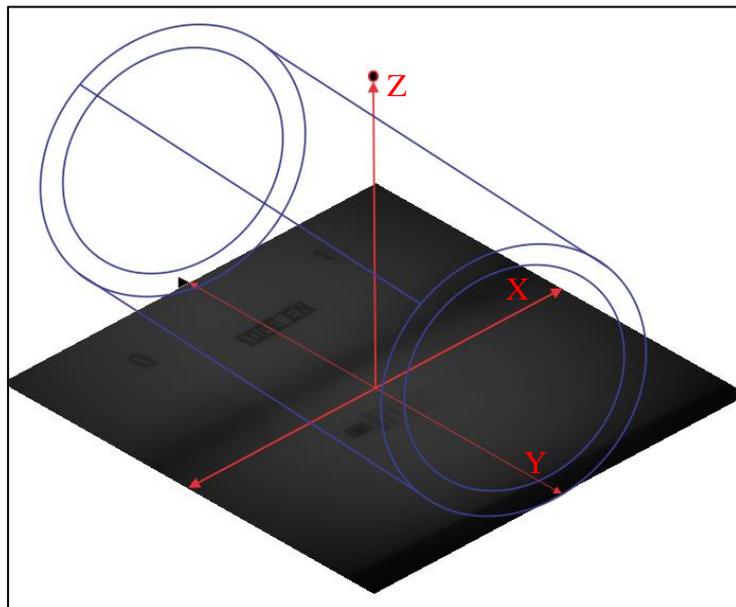


Figura 44: Posicionamento do sistema de coordenadas.

A figura 44 representa o posicionamento da imagem, com seus pontos distribuídos pelo plano formado pelos eixos X e Y e genericamente representados por $I(x_i; y_i; 0)$, tubo que pode ser representado pelos pontos $T(x_o; y_o; z_o)$, e fonte, que está localizada em $F(0; 0; DFD)$. Considerando um ponto genérico da imagem, pode ser definido um segmento de reta que tem como origem a fonte de radiação e destino um pixel da imagem.

Para cada pixel pode ser determinada um segmento de reta que representará um raio emitido pela fonte no ponto F, atravessa o tubo em um ponto T e impressiona o detector no ponto I. Para determinar a relação entre a coordenada da imagem e as coordenadas do tubo que se encontram no mesmo segmento de reta é utilizada a condição de colinearidade, de acordo com a equação 1.

$$\frac{x_i - x_o}{x_f - x_o} = \frac{y_i - y_o}{y_f - y_o} = \frac{z_i - z_o}{z_f - z_o} = t \quad (4.1)$$

Nesse ponto é determinada a relação entre as coordenadas da imagem e do tubo pela parametrização do segmento de reta que representa o raio emitido pela fonte e o fator t definirá qual dos quatro pontos do tubo, cortados pelo segmento, será representado.

A equação 4.2 representa a relação entre essas coordenadas e pode ser obtida com a substituição das já conhecidas coordenadas dos pontos Fonte, e Imagem, essas coordenadas estão apresentadas na figura 43.

$$\begin{cases} x_o = x_i(1 - t) \\ y_o = y_i(1 - t) \\ Z_o = DFD \cdot t \end{cases} \quad (4.2)$$

Ainda indeterminado, o fator t deve ser definido em função de termos já conhecidos. Para tal, pode-se utilizar a função do cilindro que descreve o tubo com seu centro localizado em : $C_T (0; 0; R_e)$, onde R_e é o raio do cilindro determinado pela circunferência externa do tubo.

Utilizando dois cilindros como base, um cilindro chamado interno de raio R_i e um cilindro chamado externo de raio R_e , uma função genérica para esses dois cilindros pode ser expressa na forma da equação 4.3, onde R representa a possibilidade de utilização do raio interno e externo.

$$(Z - R)^2 + y^2 = R^2 \quad (4.3)$$

Então, inserindo:

$$Z_o = DFD \cdot t$$

Encontra-se a função que determina o parâmetro t para cada pixel da imagem em função das coordenadas da imagem, distância fonte detector e raio do tubo, demonstrada na função abaixo.

$$t = \frac{2DFD(DFD-R) + \sqrt{[2(DFD)^2 - 2(DFD)R]^2 - 4(DFD^2 + Y^2) \times (DFD^2 - 2DFDR)}}{2(DFD^2 + Y^2)} \quad (4.4)$$

A Figura 45 demonstra o comportamento do parâmetro t ao longo do sistema de coordenadas utilizado. As raízes dos deltas encontrados para o diâmetro interno e diâmetro externo geram dois valores de t para cada raio utilizado.

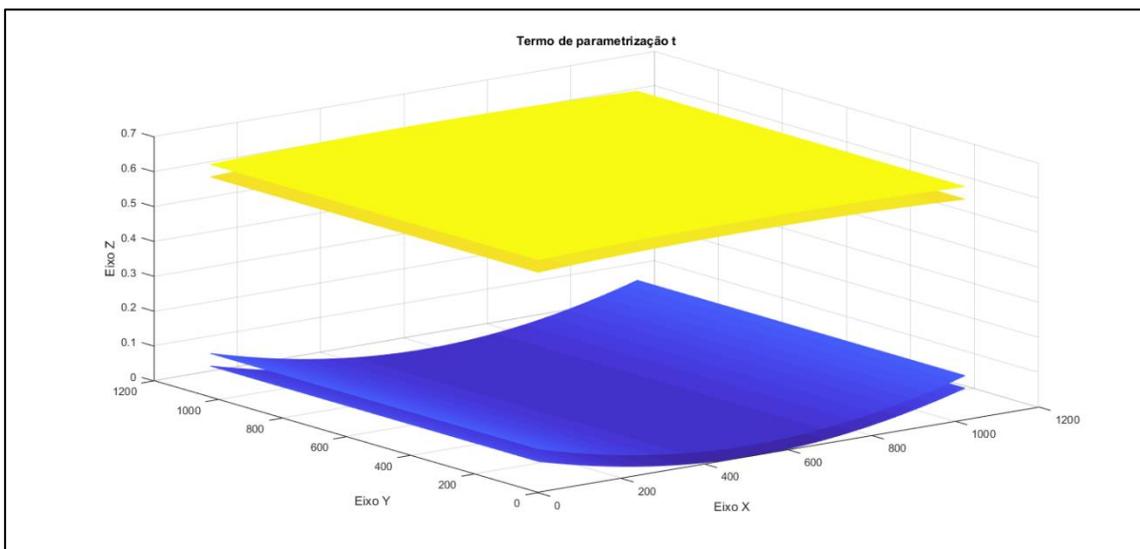


Figura 45: Fator de parametrização t

Nesse ponto são aplicados os quatro valores de t encontrados para cada pixel na função 2, o que determina as coordenadas do objeto formador da imagem, tanto os pontos da parte superior do cilindro quanto os pontos da parte inferior. A figura 46 representa o agrupamento desses pontos no eixo de coordenadas, à esquerda, uma representação tridimensional e à direita, uma visão bidimensional dos pontos.

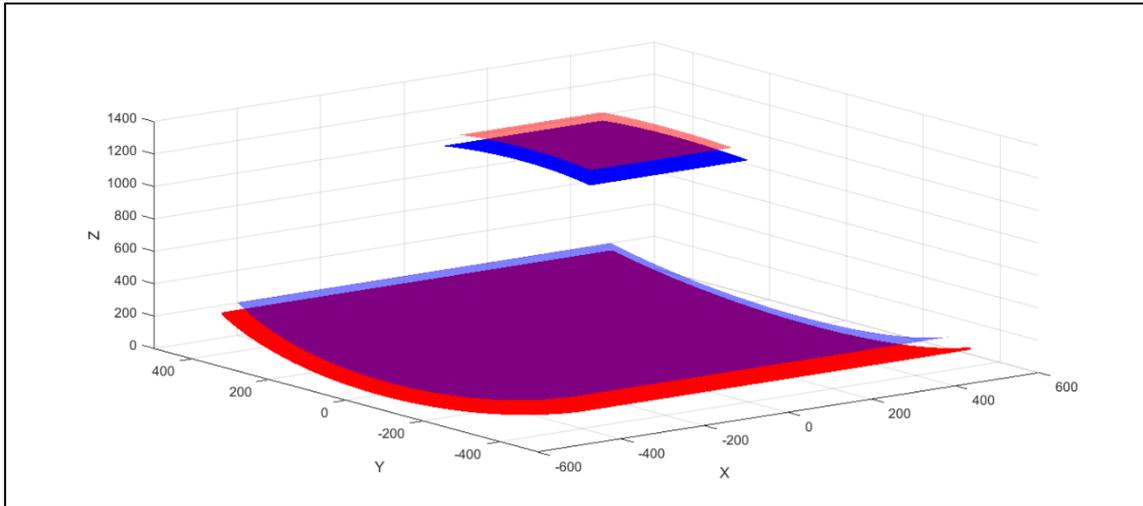


Figura 46: Representação tridimensional dos pontos do tubo no eixo de coordenadas.

Conhecendo as coordenadas de todos os pontos do círculo interno e do círculo externo do tubo, as espessuras percorridas pelos raios que atingiram cada pixel podem ser determinadas utilizando a função da distância entre dois pontos, observada na equação 4.5:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4.5)$$

A função é aplicada determinando a distância entre os dois pontos da parte superior e entre os dois pontos da parte inferior do tubo, onde as espessuras efetivamente percorridas por cada raio incidente é a soma entre essas duas distâncias. A figura 47 demonstra em uma visão frontal do tubo as distâncias d_1 , relativa à parte superior do tubo e d_2 , relativa a parte inferior do tubo, em vermelho está representada a circunferência externa do tubo e em azul a circunferência interna.

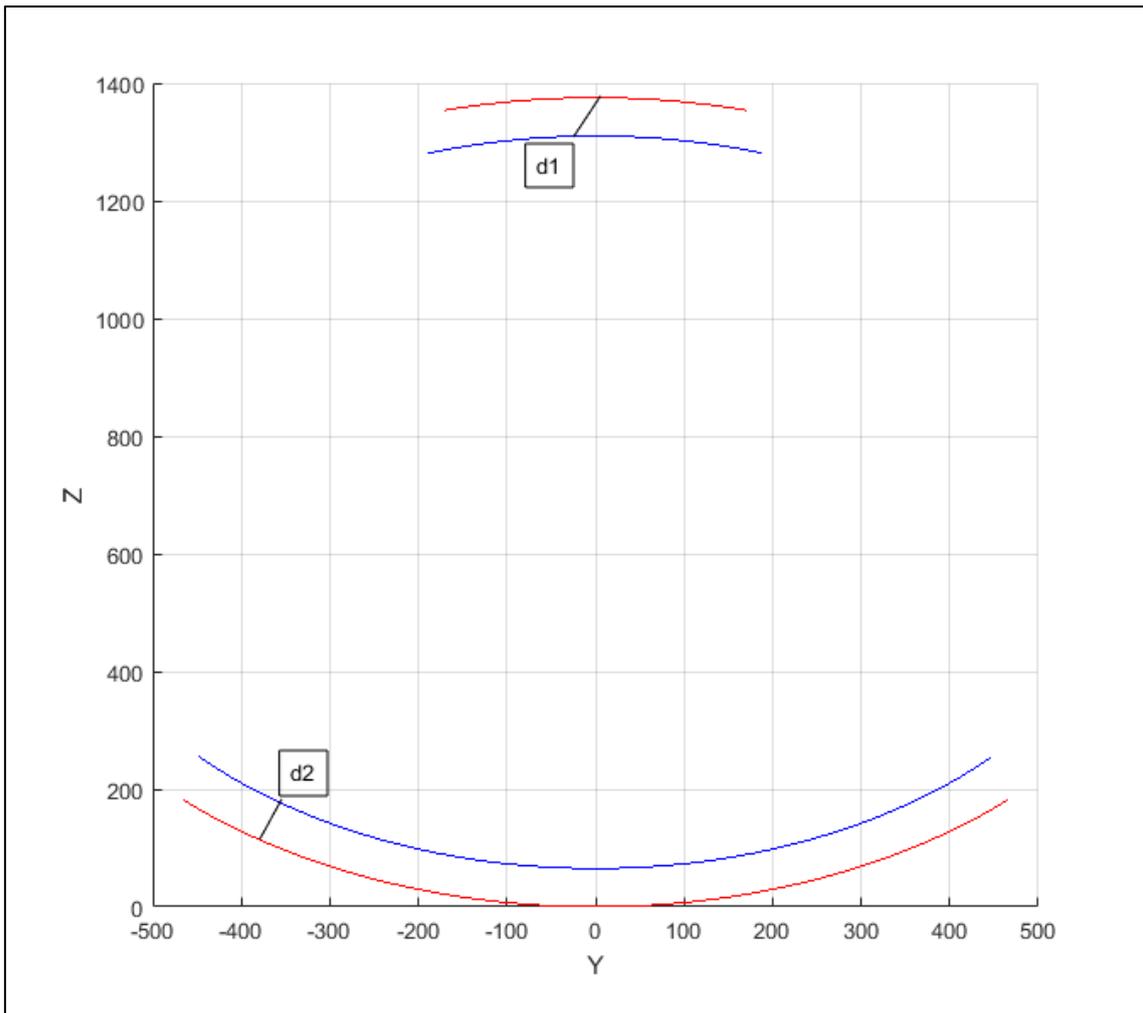


Figura 47: Exemplo de determinação das espessuras efetivamente percorridas por um raio.

A espessura efetivamente atravessada pelo raio(D) pode ser definida então como o somatório de d1 e d2:

$$D = d1 + d2$$

A figura 48 representa as espessuras efetivamente atravessadas pelos raios em um tubo de espessura 13,02mm. Percebe-se que no centro a espessura indicada é o dobro da parede do tubo e esse valor aumenta de acordo com o deslocamento para as extremidades da área sensível do detector.

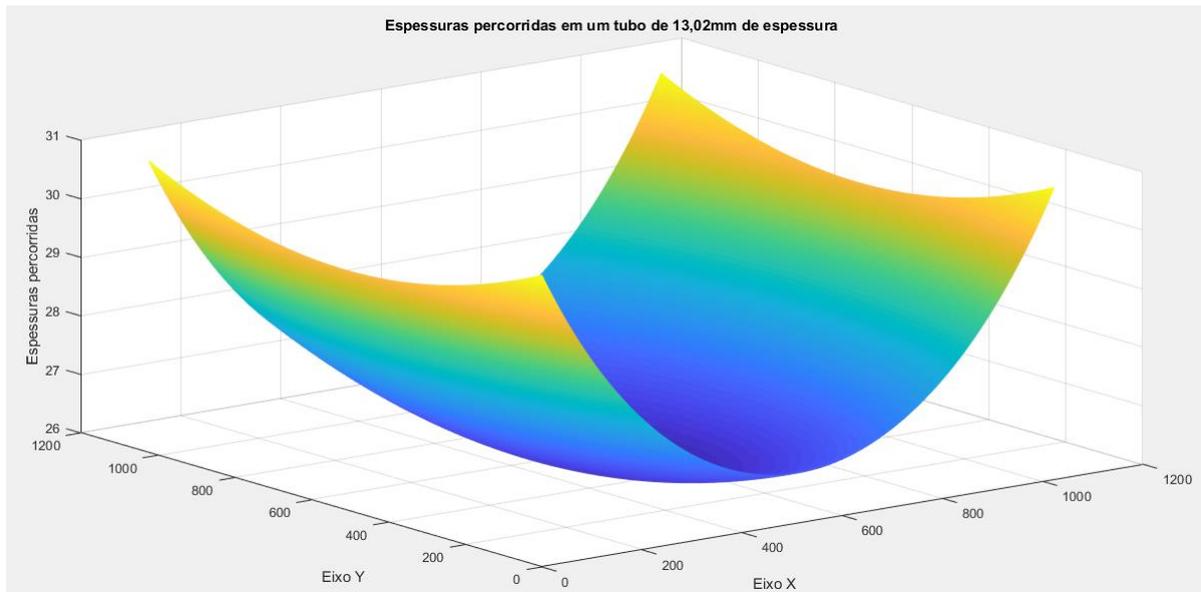


Figura 48: Espessura atravessada pelos raios em cada pixel.

Nesse ponto o algoritmo possui as informações sobre a espessura percorrida por cada raio emitido pela fonte, em cada pixel da imagem formada, tornando possível a determinação da diferença de espessura de cada pixel para o pixel central (ΔD), onde somente o dobro da parede do tubo é percorrida. Como a origem da distorção dos níveis de cinza é proveniente das diferentes espessuras percorridas pode-se determinar a influência dessa variação nos níveis de cinza.

Para tal é necessário analisar a equação 3.3, que representa a atenuação exponencial dos raios incidentes:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Já que x representa a espessura atravessada pela intensidade I_0 , pode-se dizer que:

$$x = D + \Delta D \quad (4.6)$$

Onde D representa o dobro da espessura da parede do tubo e ΔD a diferença entre a espessura total percorrida pelo raio, em um pixel, e o dobro da espessura da parede do tubo. Aplicando 4.6 em 3.3, podemos observar que:

$$I = I_0 e^{-\mu D} \times e^{-\mu \Delta D}$$

O termo $I_0 e^{-\mu D}$ representa a informação determinada pela espessura D do material base do tubo e o termo $e^{-\mu \Delta D}$, a porção de atenuação imposta pela variação de

espessura do tubo. Logo, a ideia central do algoritmo é tirar proveito do aspecto matemático que permite isolar a influência da variação de espessura ΔD , em cada pixel, com isso pode-se realizar a remoção de informação desnecessária para a análise da imagem, que é causadora do aumento do desvio padrão dos níveis de cinza e consequente diminuição da relação sinal ruído.

Para isso, é utilizada a expressão:

$$\frac{I}{e^{-\mu\Delta D}} = \text{Imagem corrigida} \quad (4.7)$$

Onde I é o nível de cinza da imagem e o coeficiente μ carrega informação tanto do coeficiente de atenuação linear quando da intensidade I_0 e é determinado pixel a pixel pela relação entre o pixel analisado e um referente ao material base, em que:

$$I_{01} = I_{02}$$

Então:

$$\frac{I_1}{e^{-\mu D_1}} = \frac{I_2}{e^{-\mu D_2}}$$

Determinando, para cada pixel, um coeficiente de atenuação em função das intensidades de nível de cinza apresentadas e as espessuras atravessadas pelos raios nesses pontos, de forma que isolando μ obtém-se:

$$\mu = \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \cdot \frac{1}{D_2 - D_1} \quad (4.8)$$

Aplicando 4.8 em 4.7 é determinada a imagem com os níveis de cinza sem a influência da variação espessura.

4.2.4 Construção do algoritmo de correção da distorção geométrica

A mesma forma de descrição dos componentes do arranjo em um eixo tridimensional de coordenadas, usada na correção de níveis de cinza, é utilizada nesse módulo do algoritmo de correção da distorção geométrica.

Operando sob o pressuposto de que a fonte é pontual, que será representada pelo ponto $S(0,0, DFD)$, e que este ponto é colinear aos pontos $IO(0,0, R)$, centro do tubo, e $I(0,0, 0)$, imagem referente ao ponto do tubo que toca o detector plano, pode-se concluir

que esses pontos se enquadram na regra da colinearidade, conforme mostrado na equação 4.1

$$\frac{x_i - x_o}{x_f - x_o} = \frac{y_i - y_o}{y_f - y_o} = \frac{z_i - z_o}{z_f - z_o} = t$$

Sendo o fator t , o fator de parametrização, é determinada a primeira parte da solução encontrada para o problema, onde os segmentos de reta oriundos do ponto S , são usados para representar um grupo de fótons de raios X a partir da fonte emissora, que atinge o plano que representa a área sensível do DDA. Assim, podem ser representados os raios emitidos pela fonte em agrupamentos que sensibilizam apenas um pixel do detector, como visto na equação 4.2.

O segundo passo da descrição consiste em inserir a geometria cilíndrica do tubo no problema e determinar os pontos da circunferência que são atravessados por esses segmentos de reta, relacionando assim os pontos imagem com seus respectivos pontos formadores do objeto.

Para isso, um cilindro de raio R é representado com seu ponto central localizado no eixo Z , em um segmento de reta que parte da fonte S e se estende até a origem dos eixos. Esses pontos são obtidos ao aplicar a relação de colinearidade na função geral do cilindro, centrada no ponto $C(0,0,R)$, a relação entre o fator t e as coordenadas do ponto de imagem $I(x,y,z)$ e o objeto $O(x,y,z)$. A equação utilizada é a 4.3 onde R representa agora apenas o raio externo do cilindro.

O fator t representa a relação de parametrização dos segmentos de reta formados entre os pontos da imagem e os pontos do objeto e será responsável pela correção das coordenadas da imagem, pixel a pixel, de acordo com o ângulo do segmento que representa a trajetória do conjunto de fotos, em relação ao centro dos eixos, posicionando os níveis de cinza do ponto I nas coordenadas (x,y) do seu respectivo ponto objeto. Na figura 49 pode-se observar que a correção será mais intensa nas bordas da imagem. Na região central, que é também a origem dos eixos, o fator de correção é igual a zero.

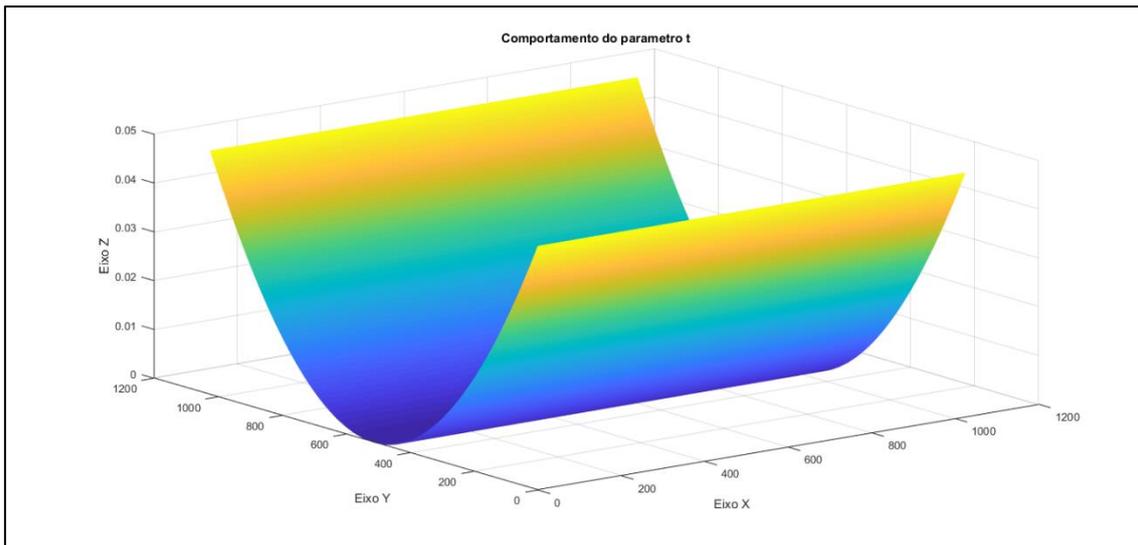


Figura 49: Comportamento do parâmetro t em função das coordenadas x, y da imagem.

O algoritmo resultante determina a correção das coordenadas através de uma transformação espacial das coordenadas (X;Y) da imagem que são substituídas pelas coordenadas encontradas para o cilindro na circunferência inferior, determinando um formato cilíndrico para a imagem:

$$I(x_i; y_i) \rightarrow I_o(x_o; y_o)$$

As coordenadas (x,y) da imagem distorcida são obtidas no plano determinado pela área sensível do DDA e as coordenadas do objeto provem da relação explicitada acima. Nesse ponto então as coordenadas da imagem são realocadas nos respectivos pontos $I_o(x;y)$ das coordenadas do objeto cilíndrico formador da imagem, obtendo assim a imagem corrigida.

4.2.5 Obtenção de imagens

Inicialmente foram adquiridas imagens das juntas soldadas dos 6 tubos indicados na tabela 4 utilizando filmes radiográficos convencionais. Nesse estágio do trabalho foram produzidas as imagens padrão para medida dos defeitos. Essas imagens provenientes de detectores maleáveis, como dito anteriormente, não possuem qualquer divergência imposta pela geometria do tubo, ou seja, foram adquiridas imagens onde os tamanhos dos defeitos presentes na junta soldada não foram alterados.

Essas imagens proveram a base de comparação das aferições de todos os defeitos observados, sendo consideradas a imagem padrão.

As imagens obtidas com radiografia convencional foram feitas utilizando a técnica parede simples vista simples (PSVS). A Figura 50 mostra o setup utilizado para aquisição das mesmas.

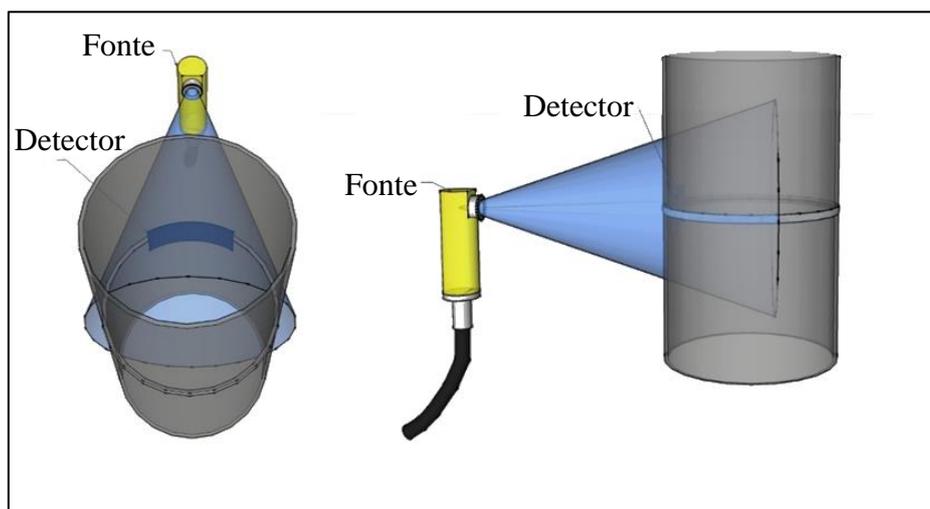


Figura 50: Setup de PSVS para mapeamento dos defeitos nas amostras.

Após a obtenção das imagens padrão, os defeitos encontrados em cada junta soldada foram avaliados, aferidos e posicionados. Alguns defeitos foram selecionados para que fossem adquiridas imagens dos mesmos corpos de prova, com esses mesmos defeitos, utilizando o detector *Flat panel*. Essas descontinuidades foram posicionadas de forma que ficassem localizadas nas extremidades da imagem formada, tornando assim mais evidente a sua variação de comprimento, como indicado na figura 51, que é uma imagem real, feita com o detector *Flat panel*. O programa ISee! é utilizado para visualizar, aferir e classificar a descontinuidade.



Figura 51: Posicionamento de descontinuidade nas imagens feitas com o DDA.

4.2.6 Análise dos defeitos

Duas imagens de cada corpo de prova foram escolhidas devido a presença de descontinuidades acentuadas. Após a caracterização dos defeitos e aferição horizontal e vertical dos mesmos nas imagens radiográficas adquiridas com a filmes radiográficos convencionais, foram obtidos os padrões de medida sem distorção nas imagens padrão.

Após essa etapa foram analisadas as imagens digitais adquiridas com o detector *Flat Panel*. Tanto na imagem original quanto na corrigida foram aferidas as descontinuidades da mesma forma em que foram aferidas as imagens padrão.

As comparações de comprimentos das descontinuidades foram feitas na imagem padrão, imagem distorcida e imagem corrigida.



Na figura 52 pode ser observado o método utilizado para realizar a aferição com a ferramenta de medida de comprimentos, presente no programa ISee!. Os defeitos do tubo foram identificados com filmes radiográficos convencionais, nessa imagem os defeitos tiveram seu comprimento aferido.

Após essa localização foram adquiridas imagens utilizando o detector *flat panel* da região onde os defeitos encontrados estavam posicionados, foram feitas aferições dos comprimentos e verificadas diferenças com relação a imagem padrão, devido a distorção geométrica.

Foram aplicadas as correções propostas nesse trabalho nas imagens digitais e comparados os comprimentos dos defeitos, tanto com a imagem padrão quanto com a imagem sem correção.

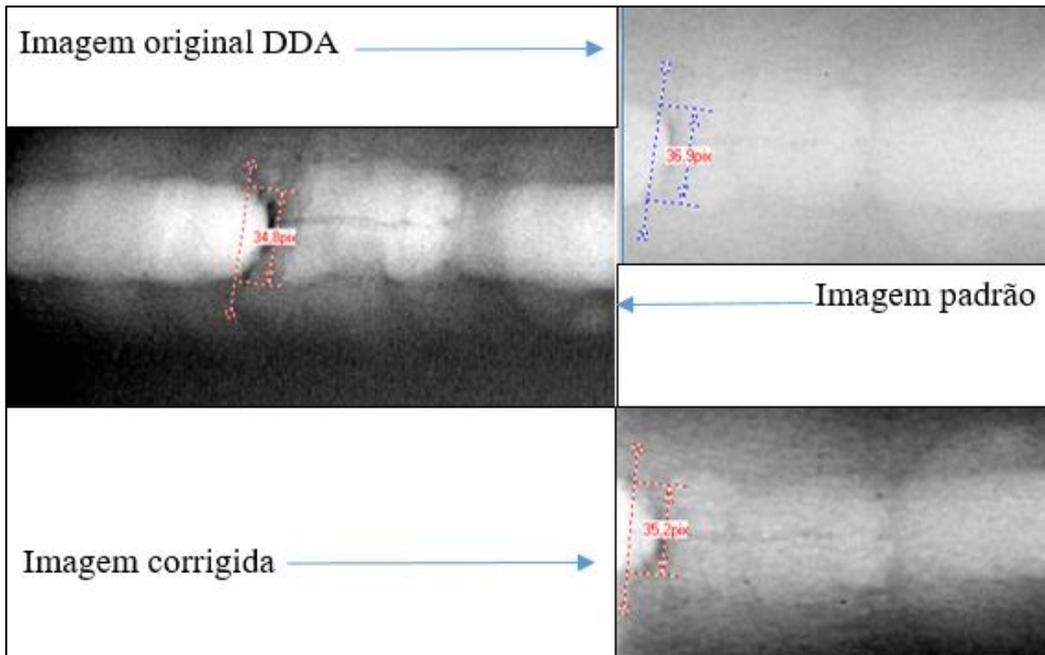


Figura 52: Aferição de defeitos e comparação entre imagens.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS

5.1 Espessuras atravessadas pelo feixe de raios X.

Nessa etapa foram verificadas as variações de espessura determinadas para cada pixel com o algoritmo de correção de níveis de cinza. Foi observado que na origem dos eixos, em todos os diâmetros utilizados, o valor de variação de espessura para o pixel central foi exatamente igual a zero.

A tabela 5 apresenta os valores de espessura total percorrida pelo raio central (que acompanha o eixo Z), que é o dobro da espessura média da parede do tubo, bem como a variação máxima de espessura observada na área sensível do detector em quatro tubos de diferentes diâmetros. As imagens foram adquiridas com um detector de área sensível de 204,8x204,8mm.

Tabela 5: Espessura mínima e variação máxima de espessuras.

CP	Espessura central (mm)	Variação máxima (mm)
10-1270B	26,04	4,94
12-1427A	28,80	3,59
16-1270B	25,20	1,84
20-1510B	28,40	1,26

Os valores de variação indicam que o maior acréscimo de espessuras acontece no tubo de parede média 13,02 mm, onde chega ao máximo de 38% do raio da parede média. O valor mínimo observado é para o tubo de maior diâmetro, onde um acréscimo de 9% de espessura ocorre nas extremidades da área sensível.

As figuras 53 demonstra como se distribui a variação de espessura sobre a área sensível do detector para cada tubo de diferentes diâmetros.

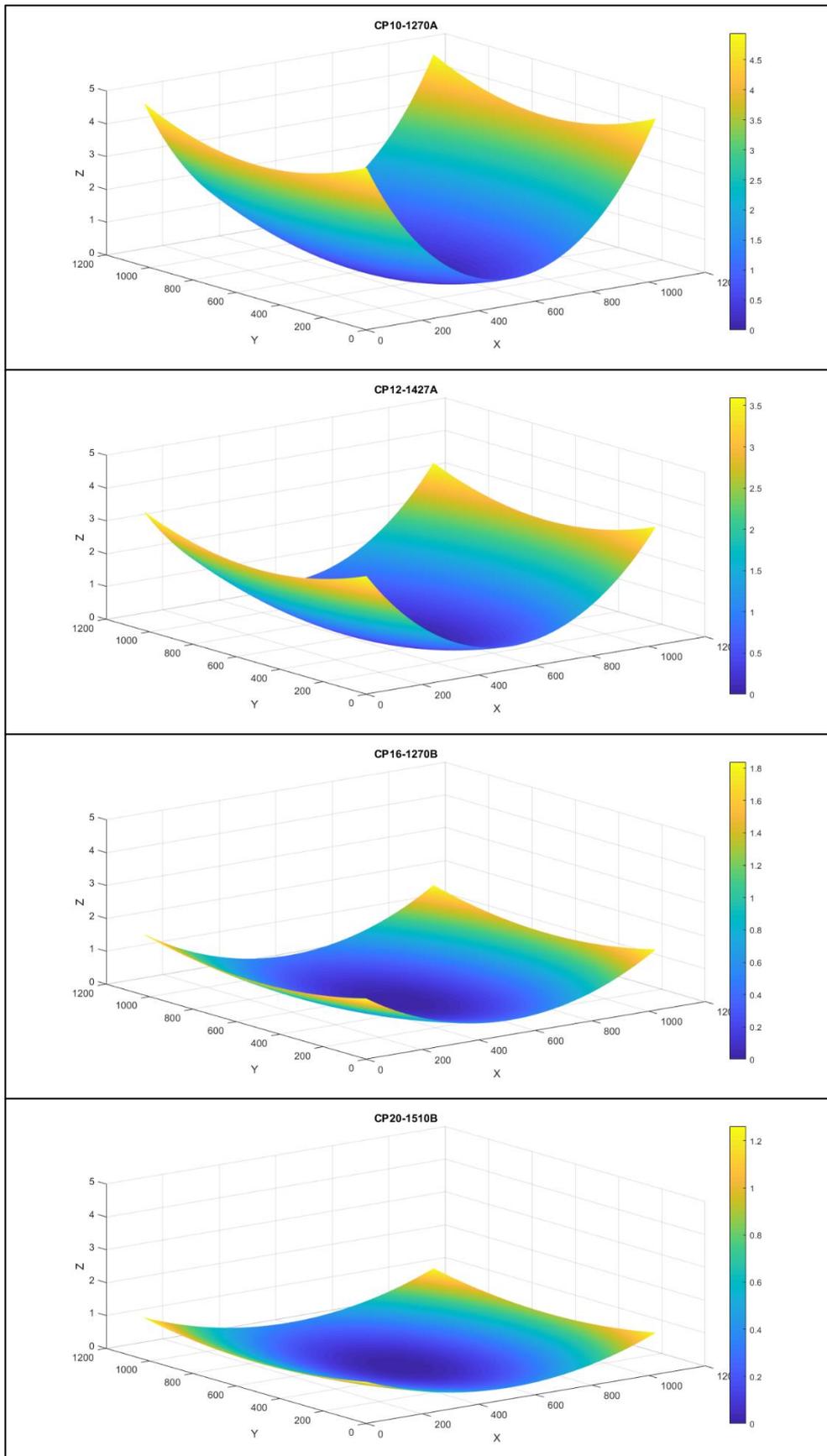


Figura 53: Variação de espessura ao longo da área sensível.

5.2 Coeficiente de atenuação - Termo μ

Para cada pixel de cada imagem foi determinado um valor de μ que corresponde a informação do coeficiente de atenuação do material e carrega informações sobre a intensidade dos raios incidentes no ponto, nessa etapa foi examinado o comportamento desse termo e sua relação com os materiais componentes do corpo de prova. A figura 54 é uma representação tridimensional dos valores obtidos para o termo ao longo da área sensível do detector.

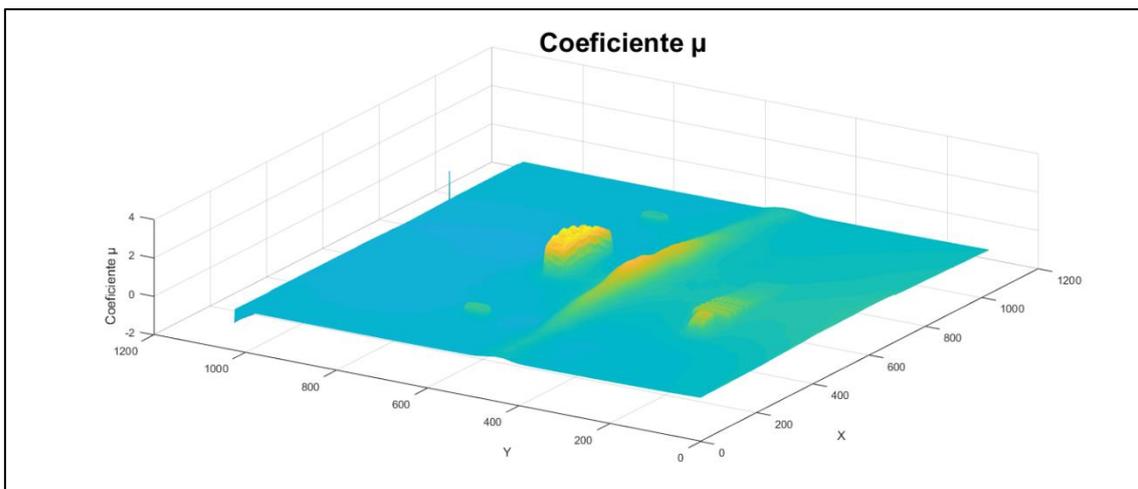


Figura 54: Visão tridimensional do termo μ .

Os resultados obtidos nessa etapa indicam que, para o material base, os valores encontrados apresentam apenas pequenas variações, ela pode ser observada na figura 55, que é uma visão dos eixos Y e Z da figura 54. A variação de valores para o metal base é explicada pela não uniformidade da espessura do tubo e os níveis de cinza apresentados em cada pixel, bem como a não centralização exata do mesmo com a fonte e o detector.

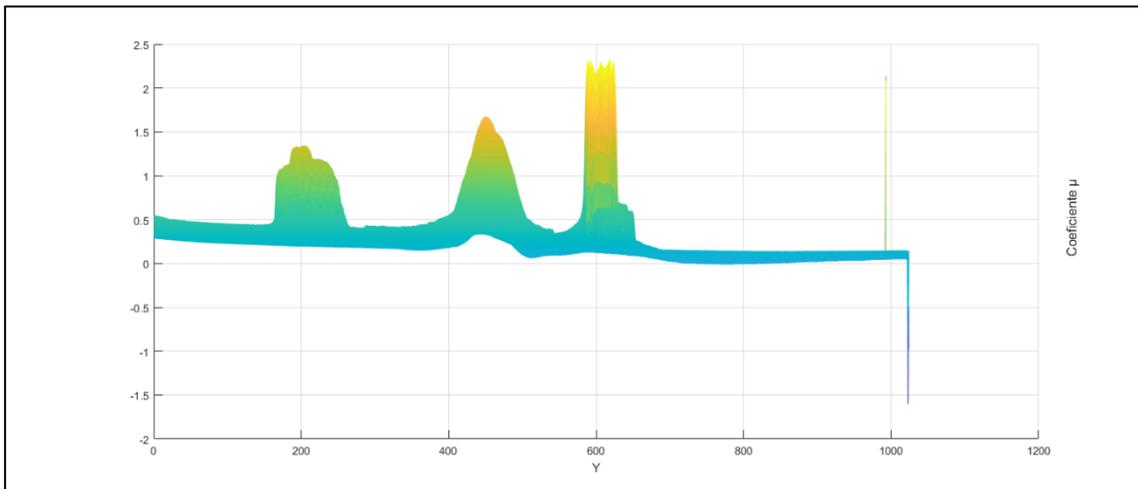


Figura 55: Vista Y-Z do termo μ .

Os pontos que possuem grande variação nos valores são referentes às posições dos indicadores de qualidade de imagem, bem como os marcadores e a solda. Como o termo μ carrega informações de todos os tipos de atenuação presentes na interação dos raios X com o corpo de prova, e também a proporcionalidade à intensidade do raio incidente, suas intensidades se apresentam maiores que a média dos valores encontrados para o material base.

Os valores observados na parte direita da imagem, em sua extremidade, são referentes à alguns pixels defeituosos e que não foram corrigidos pela calibração. Esses valores podem ser considerados como ruído e ignorados nas análises finais, já que estão fora da área de interesse, onde está presente a solda e são paralelos a ela.

5.3 Resultado da correção de níveis de cinza

Nessa etapa foi realizada uma análise da uniformidade dos níveis de cinza da imagem antes da correção e após a correção. A figura 56 é uma representação dos níveis de cinza, no eixo Z, ao longo da área sensível de 2048x2048 do detector.

Essa imagem não possui nenhum tipo de correção. Alguns pixels defeituosos podem ser observados nas extremidades da imagem e uma grande variação dos níveis de cinza se dá no deslocamento partindo da origem dos eixos X-Y até as extremidades.

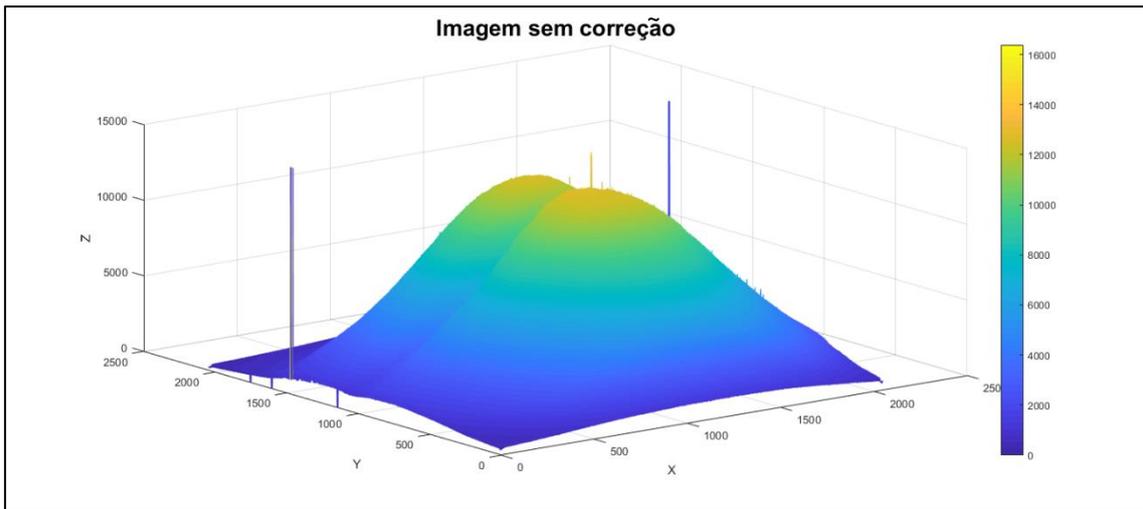


Figura 56: Representação tridimensional dos níveis de cinza de uma imagem radiográfica.

A figura 57 é a representação dos níveis de cinza da mesma imagem após a correção com algoritmo de correção de níveis de cinza. A imagem corrigida apresenta variação dos níveis de cinza entre o seu centro e a extremidade aproximadamente 7 vezes menor para esta imagem, apesar da maior homogeneidade da imagem a solda continua visivelmente evidenciada.

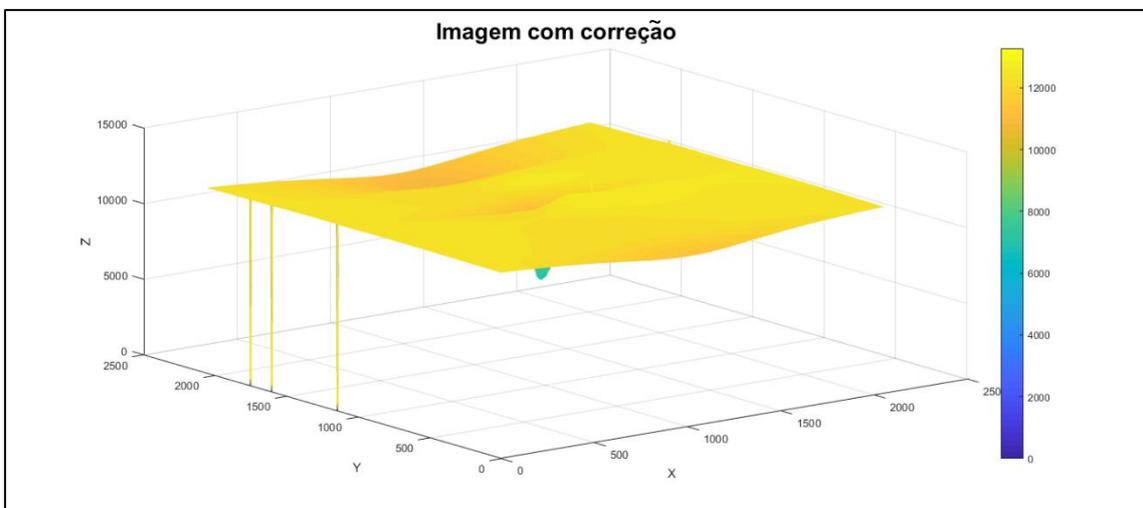


Figura 57: Representação tridimensional de uma imagem radiográfica corrigida.

A figura 58 apresenta uma comparação entre os níveis de cinza da imagem sem correção e da imagem corrigida com o algoritmo. Pode-se perceber que os valores centrais de nível de cinza não foram alterados e que os valores de nível de cinza que se encontram

na extremidade da imagem se aproximaram dos valores observados no centro sem que fosse afetada a visibilidade da solda.

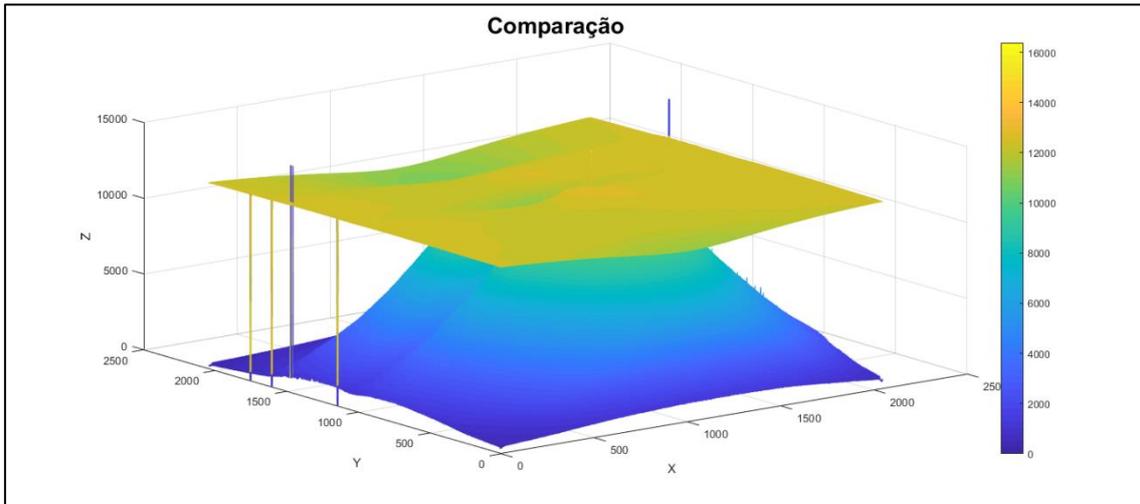


Figura 58: Comparação entre os níveis de cinza de imagem sem correção e corrigida.

Uma representação qualitativa da visualização de uma imagem corrigida é exibida na figura 59, onde na esquerda uma imagem sem correção apresenta níveis de cinza menores na sua extremidade e na esquerda a imagem corrigida com o algoritmo de correção de níveis de cinza exibe uma melhor visualização das extremidades da solda.

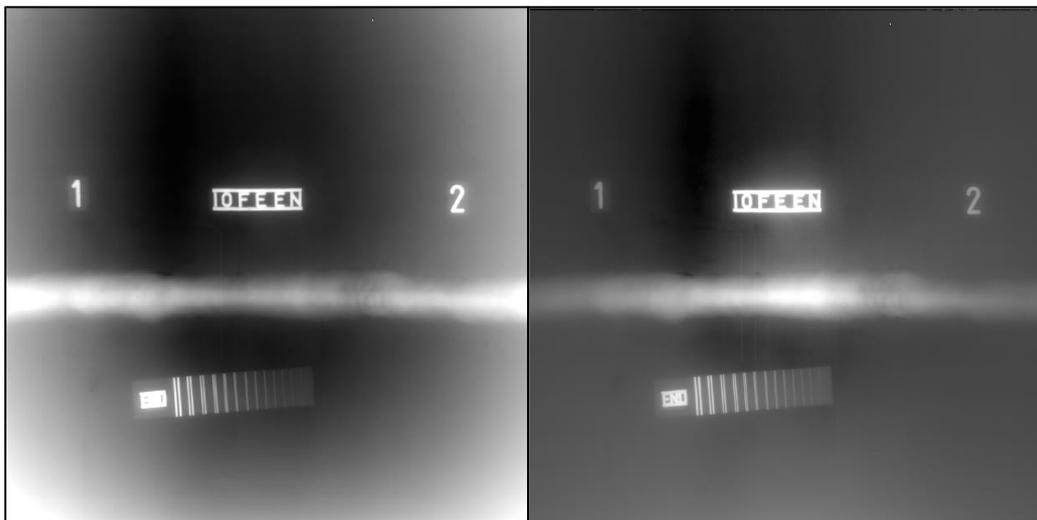


Figura 59: Comparação visual de imagem sem correção (esquerda) e com correção (direita)

A região central da imagem também apresenta melhora na visualização de contrastes e melhor equalização, além da maior uniformidade nos níveis de cinza em todo o material base sem utilização dos filtros presentes no programa ISEE!. A figura 60

apresenta a comparação entre dois perfis de linha, com espessura de 1 pixel, traçados na mesma posição das duas imagens.

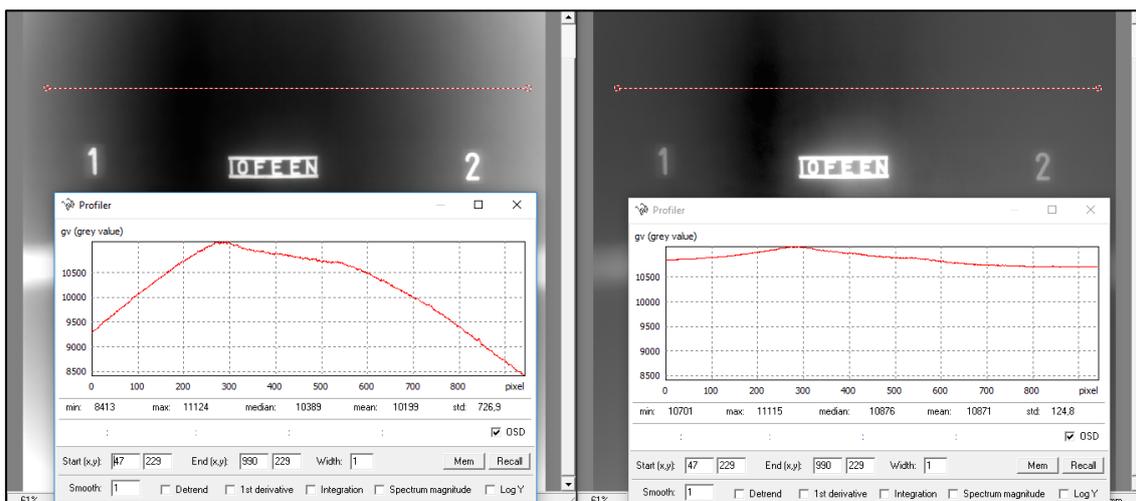


Figura 60: Comparação de perfil de linha nas imagens.

Em uma análise complementar da figura 58, a figura 60 apresenta o comportamento de uma linha da imagem. Ambos os gráficos se encontram na mesma escala. A imagem da esquerda demonstra a variação dos níveis de cinza entre a região central e a extremidade da imagem de aproximadamente 3000 níveis de cinza, o que representa 18% do nível de cinza máximo oferecido pelo detector, enquanto a imagem da direita, com a correção, apresenta variação máxima de 7% do nível de cinza máximo.

Em um arranjo com perfeito alinhamento entre os componentes, a região central exibiria os maiores níveis de cinza da imagem. Nota-se na figura 60, que essa região com maiores níveis de cinza se encontra deslocada para a esquerda, tanto na imagem sem correção quanto na imagem corrigida. Até em imagens adquiridas em ensaios laboratoriais controlados o perfeito alinhamento é um grande desafio e nas imagens de campo o desalinhamento é uma constante.

Esse desalinhamento não apresentou grande influência na correção de níveis de cinza, porém explica algumas anormalidades na centralização dos níveis de cinza mais altos observados nos perfis de linha. A imagem 61 é um agrupamento de comparações tridimensionais dos níveis de cinza das imagens sem correção e com correção geométrica em tubos de quatro diâmetros e espessuras diferentes de imagens adquiridas em um detector de área sensível 204,8x204,8 mm.

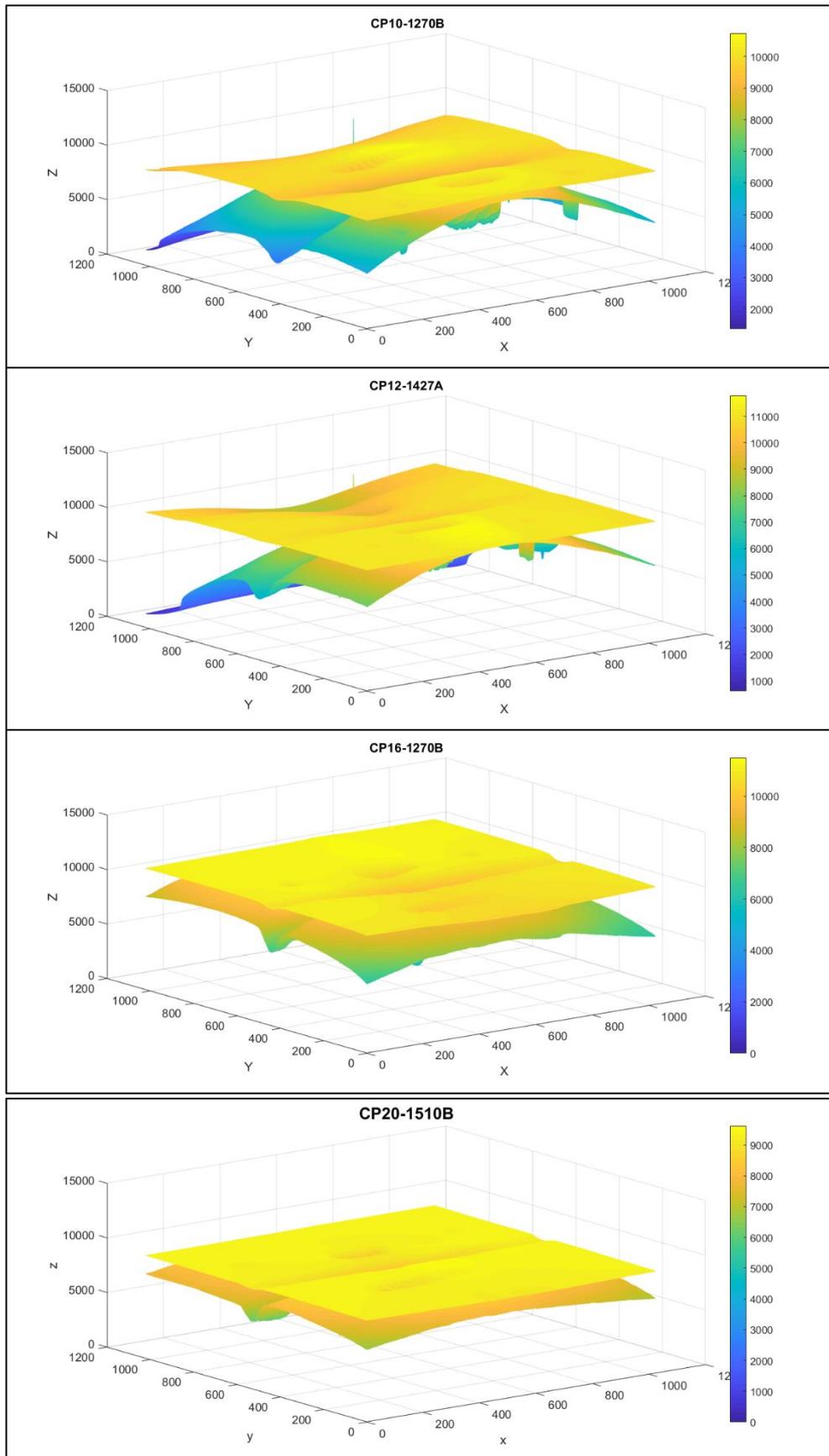


Figura 61: Comparação da correção em diferentes diâmetros.

A primeira imagem reflete os níveis de cinza de um corpo de prova com diâmetro nominal de 10 polegadas, onde a intensidade da distorção dos níveis de cinza é mais acentuada, já que possui um diâmetro menor e a área sensível do detector é capaz de capturar a imagem das áreas onde a variação de espessura é maior, em comparação com tubos de diâmetros maiores.

Em todas as imagens da figura 61, é possível perceber que a correção dos níveis de cinza, oferecida pelo algoritmo, aumentou sensivelmente a uniformidade dos níveis de cinza, não importando a influência do diâmetro do corpo de prova, intensidade média dos níveis de cinza da imagem original e espessura de parede.

5.4 Resultado da correção de distorção geométrica

Após a aplicação do algoritmo de correção geométrica, as coordenadas X e Y sofreram um deslocamento, de acordo com as coordenadas do corpo de prova utilizado. Essas coordenadas foram determinadas da mesma forma utilizada para determinação no algoritmo de correção de níveis de cinza.

A figura 62 apresenta uma comparação entre as coordenadas da imagem de um tubo de diâmetro nominal de 20 polegadas sem correção e as coordenadas após a correção geométrica. As bordas em azul da imagem corrigida representam os pontos que não contém informação após a transformação.

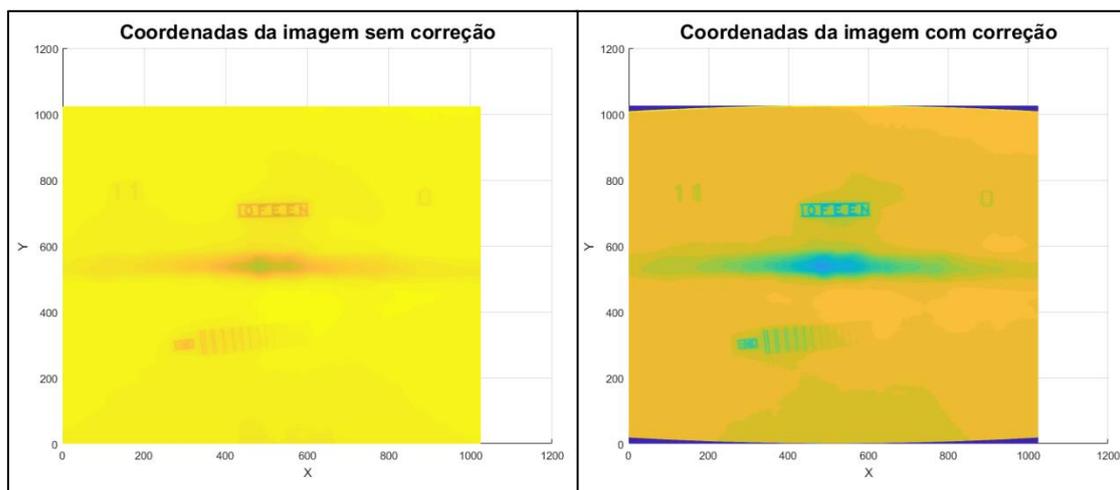


Figura 62: Comparação de deslocamento de coordenadas.

A figura 63 apresenta a transformação espacial aplicada pela correção geométrica em imagens de campo, adquiridas com detector de área sensível de medidas 204,8x204,8 mm e 1024x1024 pixels. Os corpos de prova utilizados são tubos de quatro diâmetros diferentes.

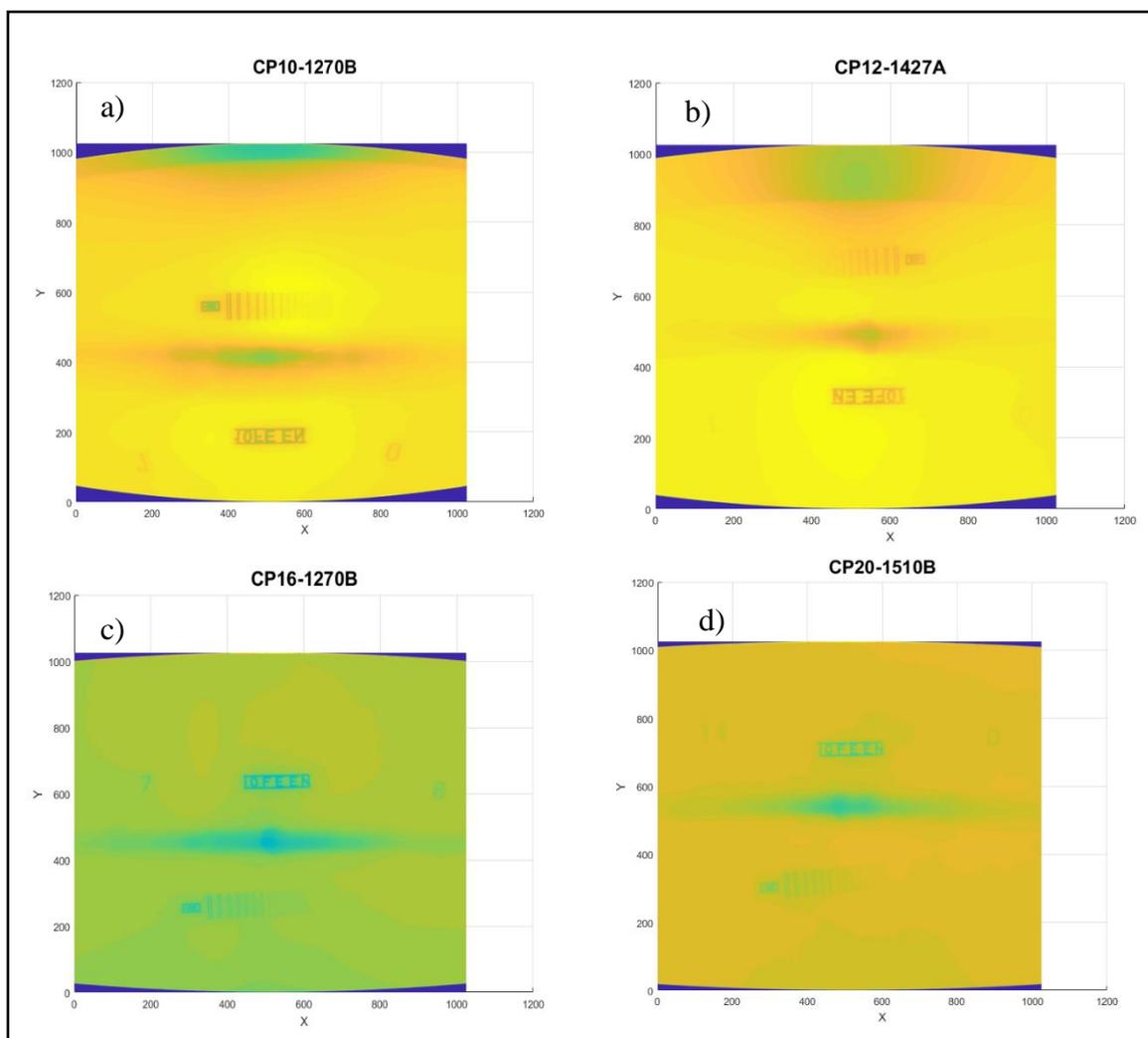


Figura 63: Comparação do deslocamento de coordenadas entre diâmetros diferentes.

As cores das figuras representam os níveis de cinza presentes na imagem radiográfica e não refletem nenhum tipo de influência do algoritmo nas imagens. O que deve ser considerado na análise dessa figura é a região em azul, que representa a intensidade da transformação espacial aplicada. Com o aumento do diâmetro do tubo utilizado, a correção se mostra menos intensa, já que o deslocamento necessário para alocar as coordenadas em suas novas posições é menor.

O centro da imagem permanece com o mesmo comprimento enquanto as coordenadas das extremidades sofrem um deslocamento mais intenso, dependendo sempre do diâmetro do tubo utilizado para aquisição da imagem. Esse deslocamento proporciona um dimensionamento da imagem mais próximo da realidade, já que os efeitos da distorção geométrica que são impostos pelas diferentes distâncias entre objeto e detector, ao longo da circunferência do tubo, são mitigados.

A figura 64 demonstra a comparação visual entre uma imagem sem correção, de um tubo de diâmetro nominal de 16 polegadas, e uma imagem corrigida, onde foram aplicados os algoritmos de correção de níveis de cinza e o algoritmo de correção geométrica.

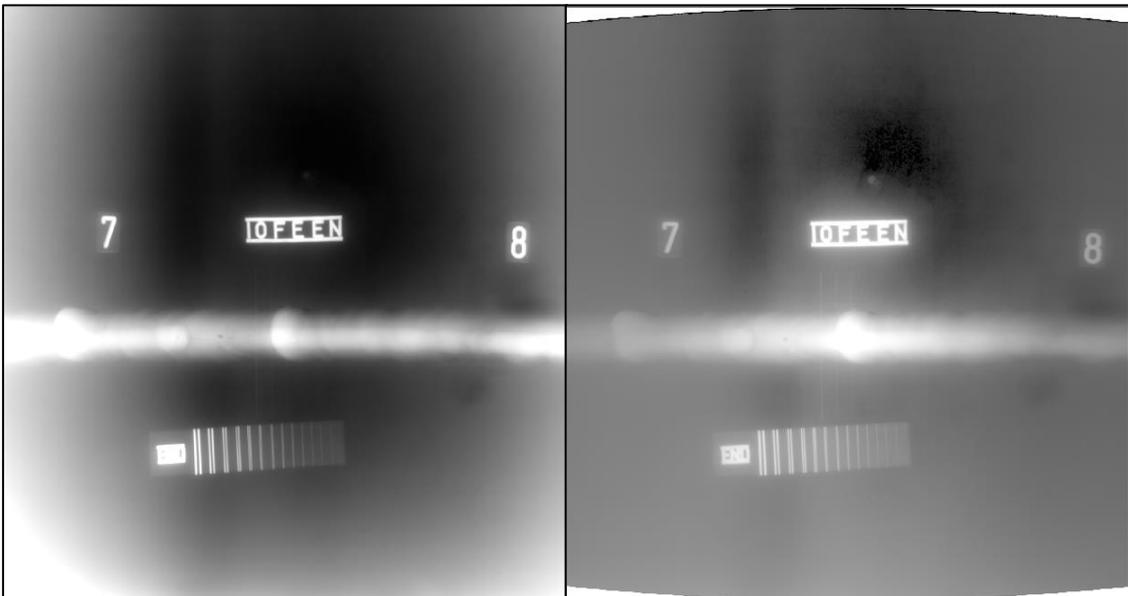


Figura 64: Comparação entre imagem sem correção e corrigida.

Após a aplicação das correções, os níveis de cinza da imagem se tornaram mais uniformes, as extremidades da imagem corrigida apresentam contraste visual mais favorável à identificação de discontinuidades, quando comparadas à imagem sem correção, ao mesmo tempo em que a região central, menos influenciada pela correção, não sofre nenhuma perda de qualidade.

5.5 Avaliação dos indicadores de qualidade de imagem

Para atestar a eficácia dos códigos foram verificados os indicadores de qualidade da imagem em aquisições feitas em condições de campo. Foram avaliados quatro tubos de diâmetros e espessuras diferentes e, de cada tubo, três imagens, nelas foram verificados a resolução espacial, com auxílio do IQI de fio duplo, contraste, com o IQI de fio e SNRn, comparando os resultados com as imagens não corrigidas.

A figura 65 apresenta um exemplo da leitura do IQI de fio realizada nas imagens. Todas as avaliações seguiram o indicativo da norma de radiografia digital ISO17636-2, onde a indicação para aceitação de um fio é que no mínimo 10mm do mesmo seja visível no material base.



Figura 65: Verificação do IQI de fio simples.

Os resultados encontrados estão dispostos na tabela 6. Todas as imagens alcançaram, no mínimo, o IQI requerido pela norma ISO17636-2 para classe B (Fio 13). Duas imagens do tubo de 10 polegadas apresentaram melhora na visualização após a correção, sendo possível a observação de um fio a mais devido a melhora do contraste oferecida pelo algoritmo de correção de níveis de cinza.

Tabela 6: Número do IQI de fio observado na imagem.

CP	Posição	Sem correção	Com correção
10-1270B	0-1	13	14
	3-4	13	14
	7-0	14	14
12-1427A	0-1	14	14
	3-4	14	14
	6-0	14	14
16-1270B	0-1	14	14
	3-4	14	14
	8-0	14	14
20-1510B	0-1	14	14
	3-4	14	14
	8-9	14	14

A verificação da resolução espacial foi realizada com a leitura do IQI de fio duplo. A figura 66 demonstra como foi realizada a leitura em uma imagem onde foram aplicadas as duas correções propostas no trabalho utilizando o programa ISEE!

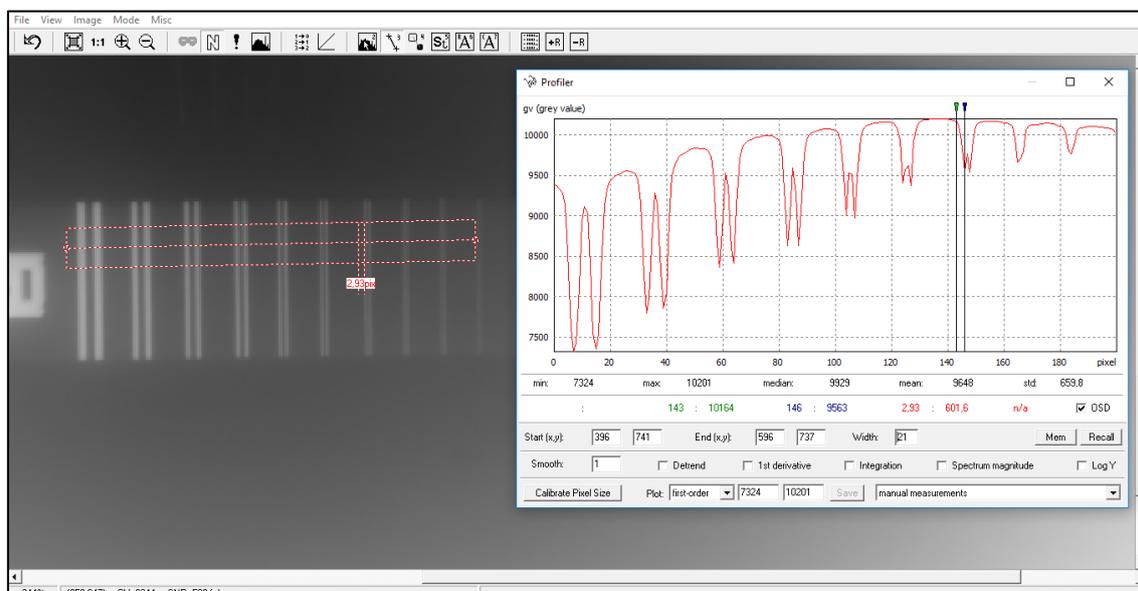


Figura 66: Leitura do IQI de fio duplo.

A tabela 7 apresenta uma comparação entre os resultados observados de resolução espacial entre as imagens com e sem correção. Todas as imagens sem correção atingiram a mesma resolução espacial $160\mu\text{m}$, que é menor que o tamanho de pixel (200μ) e só é possível ser alcançada quando a imagem apresenta alta SNRn.

Como o posicionamento do IQI, por resolução de norma, se dá no centro da imagem esse valor de resolução pode ser alcançado, já que a região central das imagens é a que apresenta melhor SNRn. Não foi observada nenhuma alteração na resolução espacial das imagens corrigidas pelos algoritmos.

Tabela 7: Comparação dos resultados da resolução espacial.

CP	Posição	Sem correção	Com correção
10-1270B	0-1	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	3-4	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	7-0	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
12-1427A	0-1	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	3-4	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	7-0	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
16-1270B	0-1	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	3-4	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	8-0	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
20-1510B	0-1	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	3-4	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$
	8-9	$160\mu\text{m}$	$160\mu\text{m}$

Para análise da razão sinal ruído normalizada foram utilizadas oito regiões de interesse, em áreas de nível de cinza homogêneo. O posicionamento seguiu um padrão onde, para as imagens sem correção, todas as regiões de interesse (ROIs) se encontram dentro da área analisável da imagem, onde a SNRn é maior devido ao maior nível de sinal e menor variação do mesmo. Para as imagens corrigidas, foram utilizadas quatro ROIs dentro da área de interesse e quatro posicionadas fora, com o objetivo de atestar a melhora concedida pelos algoritmos.

A figura 67 apresenta esse posicionamento em uma imagem corrigida.

Com áreas de 21x55 pixels, de acordo com o indicado pela norma ISO17636-2, todas foram normalizadas pela resolução espacial aferida anteriormente.

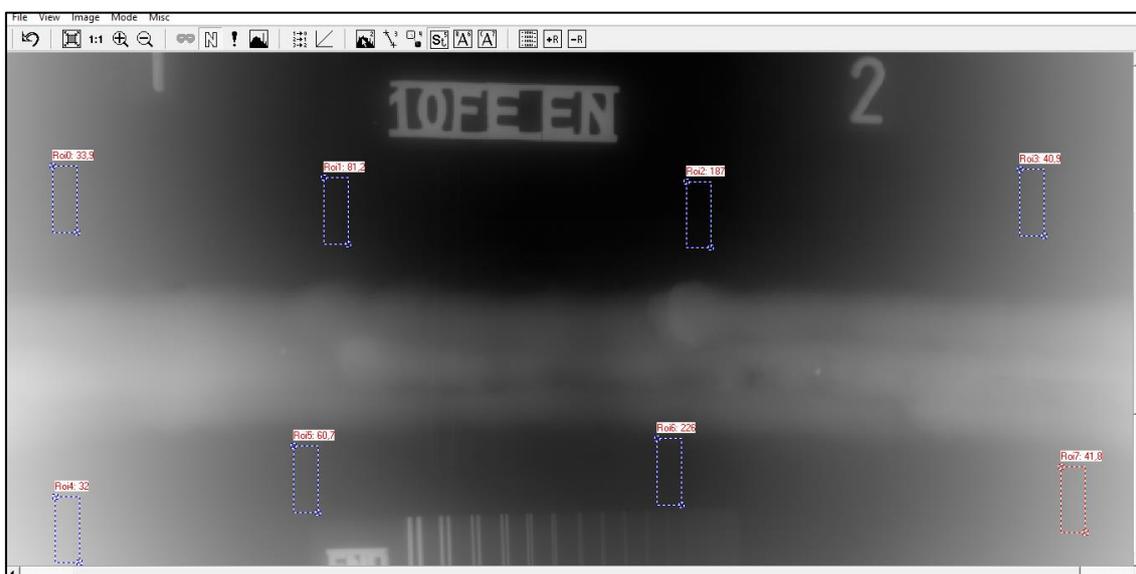


Figura 67: Posicionamento das ROIs na imagem corrigida.

A tabela 8 apresenta os valores médios de SNRn aferidos em cada imagem. Todas as imagens sem correção atingiram o valor mínimo aceitável pela norma ISO17636-2 para enquadramento na classe B, sem nenhum tipo de compensação.

Tabela 8: Comparação da SNRn média entre imagem sem correção e com correção.

CP	Posição	Sem correção	Com correção
10-1270B	0-1	164	1391
	3-4	130	894
	7-0	147	898
12-1427A	0-1	172	2654
	3-4	134	2409
	6-0	142	2589
16-1270B	0-1	206	1412
	3-4	188	1378
	8-0	312	1672
20-1510B	0-1	210	1816
	3-4	278	1996
	8-9	339	2198

Os maiores valores observados, para as imagens corrigidas, foram nas radiografias dos tubos com maior diâmetro, esse fato pode ser explicado pela menor curvatura observada nos tubos menores e maior variação de espessura, como observado na tabela 5. Como as espessuras atravessadas variam mais intensamente os níveis de cinza também possuem um maior desvio padrão, influenciando diretamente nos valores de SNRn.

As imagens corrigidas atingiram valores condizentes com a maior homogeneidade dos níveis de cinza observados após a correção, como observado na figura 61. A variação, mesmo nas extremidades da imagem, sofre uma diminuição substancial proporcionando um menor desvio padrão e consequentemente uma melhoria na SNRn.

Das imagens verificadas, a que apresentou melhores resultados foram às imagens referentes ao tubo 12-1427A, tubo com a relação entre diâmetro e espessura mais desfavorável para esse indicador de qualidade. Após a correção, os valores foram em média 17 vezes maiores, e nos outros corpos de prova, com espessuras semelhantes, a SNRn observada foi em média 7 vezes maior.

5.6 Avaliação do comprimento dos defeitos

Foram avaliados defeitos de vários tamanhos, todos localizados nas bordas das imagens. A Tabela 9 mostra os comprimentos medidos para defeitos com orientação vertical. Para todas as imagens obtidas com o detector plano, antes da correção, os tamanhos de defeito apresentaram valores mais altos do que nas imagens padrão feitas com filmes radiográficos, uma vez que essas imagens não apresentam distorção geométrica.

Em média, a diferença entre os valores aferidos na imagem padrão e aqueles medidos na imagem corrigida é de 2,0% e a maior diferença é 3,7%, o que indica a precisão da correção no eixo vertical da imagem.

Tabela 9: Comparação de defeitos verticais medidos nas imagens padrão, distorcidas e corrigidas.

Diâmetro Nominal (pol.)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)			Diferença final (%)
		Imagem filme	Imagem FP	Imagem FP corrigida	
10	13,02	7,24	8,36	7,46	3,0%
		7,22	8,30	7,40	2,5%
		7,30	8,06	7,56	3,6%
		4,80	5,76	4,90	2,1%
	18,95	3,08	4,16	3,16	2,6%
		5,88	6,90	6,10	3,7%
12	13,5	3,18	3,64	3,20	0,6%
	14,4	4,92	5,60	5,00	1,6%
		3,98	4,68	4,02	1,0%
16	12,6	11,88	12,66	11,98	0,8%
		5,90	6,76	6,02	2,0%
		10,00	12,32	10,24	2,4%
		5,26	5,72	5,34	1,5%
20	14,6	3,42	3,82	3,50	2,3%
		6,30	7,02	6,40	1,6%
		6,96	7,38	7,04	1,1%
		7,38	8,50	7,44	0,8%

A Tabela 10 apresenta um comparativo entre os comprimentos dos defeitos das imagens sem correção e as corrigidas nos defeitos orientados horizontalmente. É possível observar que os defeitos nas imagens adquiridas com o detector plano apresentaram valores de tamanho maior do que os encontrados nas imagens padrão feitas com filmes radiográficos convencionais. Após a aplicação do algoritmo de correção, foi possível observar que a diferença de tamanho entre as imagens corrigidas e as imagens tidas como padrão variou de 0,5% a 1,9%, mostrando que a metodologia proposta é adequada para corrigir a distorção geométrica em imagens adquiridas com detectores planos.

Tabela 10: Comparação de defeitos horizontais medidos nas imagens padrão, distorcidas e corrigidas.

Diâmetro Nominal (Pol.)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)			Diferença final (%)
		Imagem filme	Imagem FP	Imagem FP corrigida	
10	13,02	25,04	25,56	25,22	0,7%
	18,95	11,72	11,88	11,94	1,9%
12	13,5	14,64	15,02	14,84	1,4%
		3,86	4,06	3,88	0,5%
		6,16	6,50	6,28	1,9%
		5,92	6,28	5,96	0,7%
16	12,6	6,40	6,66	6,48	1,2%
		6,00	6,38	6,08	1,3%
20	14,6	13,16	13,28	13,30	1,1%

Todas as discontinuidades detectadas nas imagens padrão foram observadas nas imagens corrigidas com os dois algoritmos. Os defeitos não apresentaram diminuição de contraste visual e perda de detectabilidade não foi observada nas análises das imagens, o que também demonstra a viabilidade dos algoritmos propostos.

Foram determinados o número de imagens necessárias para cobrir toda a circunferência do tubo, considerando a nova área analisável da imagem, desconsiderando a limitação imposta por norma e corrigida pelo algoritmo.

Tabela 11: Comparação de número de vistas de acordo com a norma e após a correção

Diâmetro Nominal (Pol.)	Sem correção	Com correção
10	8 imagens	4 imagens
12	8 imagens	4 imagens
16	9 imagens	5 imagens
20	12 imagens	8 imagens

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados mostraram a viabilidade da utilização dos algoritmos propostos, na qualidade de imagem, atestada pelos indicadores de qualidade, e na detectabilidade, demonstrada pela comparação e detecção de defeitos.

Todas as correções propostas tratam de aspectos físicos da aquisição da imagem e os ganhos obtidos foram através de processos matemáticos baseados nesses aspectos e nas propriedades de cada ponto da imagem. Não foram utilizadas matrizes de filtragem que explorem suavização ou realce dos níveis de cinza, nem mesmo os domínios de frequência foram trabalhados.

A área analisável de uma imagem radiográfica é limitada pela diferença de espessura atravessada pelos raios nas extremidades. De acordo com a norma ISO17636-2 essa diferença deve ser de no máximo 20% da espessura do tubo. Após a utilização do algoritmo de correção, essa limitação não existe mais já que a atenuação imposta pelas diferenças de espessura foi corrigida na imagem final.

Para a realização da inspeção do tubo CP10-1270B pela norma ISO17636-2 são necessárias 8 vistas, o que indica que para cobrir toda a circunferência do tubo, a área analisável de cada imagem possui comprimento horizontal de aproximadamente 540 pixels. Para o tubo CP20-1510B são necessárias 12 imagens, logo, um comprimento horizontal de aproximadamente 660 pixels. Após a utilização do algoritmo, com o uso de toda área do detector, o primeiro tubo pode ser inspecionado com apenas 4 imagens e o segundo tubo com 8 imagens adquiridas com o detector de área sensível 1024x1024 pixels.

Os fatores que limitam o número de imagens utilizadas após a correção do algoritmo são a desfocagem geométrica, e a região onde os raios emitidos pela fonte não atravessam a circunferência interna do tubo, em todos os casos analisados esses fatores não influenciaram o uso total da área do detector.

O termo que carrega informações sobre o coeficiente de atenuação linear também carrega as informações do feixe de radiação incidente, que se demonstrou pouco influente devido à uniformidade dos resultados, mas que ainda oferece pequenas variações. Estudos posteriores podem considerar a sua inserção na correção.

O algoritmo de correção dos níveis de cinza proporcionou melhoria significativa na uniformidade dos níveis de cinza observados nas imagens radiográficas de corpos de prova de diferentes diâmetros e espessuras, tornando possível o aumento da SNRn sem prejudicar os outros padrões de qualidade de imagem ou a detectabilidade da imagem, oferecendo até melhoria no contraste visual e maior facilidade de equalização dos níveis de cinza.

A dificuldade em encontrar um perfeito alinhamento para o arranjo ainda determina variações de nível de cinza que ainda podem ser verificadas em estudos posteriores que considerem a não centralização do feixe com todo os outros componentes.

A distorção geométrica de imagens radiográficas nos detectores planos apresentou diferenças de até 2,3 mm com relação a imagem padrão, o que torna imprecisa a análise das descontinuidades nas extremidades da imagem sem que exista uma correção dessa variação, esse fato diminui a área útil do detector limitando a área analisável do mesmo, o algoritmo de correção geométrica diminuiu essa diferença para 0,24mm.

Considerando as imagens geradas através do detector de tela plana, foi possível observar que os defeitos apresentados aumentam, devido a magnificação, de acordo com a proximidade da extremidade do tubo. Após a aplicação do algoritmo de correção, os tamanhos medidos tornaram-se mais próximos dos valores padrão, atingindo uma precisão de cerca de 98% em ambos os sentidos aferidos.

Uma vez que a descrição matemática do problema parte do alinhamento perfeito entre a fonte, o centro do objeto e o detector, a correção não atingirá a precisão total, uma vez que essas condições, mesmo em laboratório, são complexas de serem alcançadas. Imagens adquiridas com técnicas de exposição diferentes da parede dupla vista simples,

também não serão corrigidas com a utilização do algoritmo. Essas podem ser consideradas limitações do método de correção.

Esta metodologia apresenta uma alternativa prática para reduzir o número de radiografias necessárias para analisar uma junta soldada circunferencial, permitindo que toda a área sensível do detector seja usada de maneira confiável. Este refinamento metodológico permite um menor tempo de inspeção e uma análise mais eficiente e rápida, adicionando precisão e maior confiabilidade ao relatório final.

Como sugestão de trabalhos futuros fica a indicação de estudos sobre a centralização e distribuição do feixe incidente, bem como o aprimoramento do algoritmo para utilização em outras técnicas de aquisição diferentes da parede dupla vista simples.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI. **Curso de inspetor de fabricação – Modulo de Ensaio Não Destrutivos**. São Paulo: [s.n.], 2005.

AIRD, G. A. **Basic physics for medical imaging**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 1998.

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

CAO, V.-T.; PARK, Y.-Y.; SHIN, J.-H. A Simple Method for Correcting Lens Distortion in Low-Cost Camera Using Geometric Invariability. **Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence**, 2010. 325-333.

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

DENG, Y. S. Study of geometric imaging in radiography. **NDT International** , v. 22, p. 353-358, 1989.

DESPRÉS, P.; BARBER, W. C.; FUNK, T. Modeling and Correction of Spatial Distortion in Position-Sensitive Avalanche Photodiodes. **IEEE Transactions on nuclear science**, v. 54, p. 23-29, 2007.

EDWARD, G. Inspection of welded joints. **ASM handbook, welding, brazing and soldering**, Materials Park, OH: ASM International, v. 6, p. 1081–1088, 1993.

EN 462-1. - **Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1: Image quality Indicators (wire type) - Determination of image quality value**, 1994.

EN 462-5 - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value. **Non-destructive testing - Image quality of radiographs**, 1994.

EVANS, R. D. **The Atomic Nucleus**. 2. ed. Florida: Krieger Publishing Company, 1982.

EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; JECHOW, M. **Essential Parameters and Conditions for Optimum Image Quality in Digital Radiology**. 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban, South Africa: [s.n.]. 2012.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. 2°. ed. New Jersey: Prentice, 2002.

H, K. et al. Welding defect detection from radiography images with a cepstral approach. **NDT&E Int**, p. 44:226–231, 2011.

HAITH MI, E. U. H. S. B. C. D. A. H. P. L. M. Z. U. Radiographic modelling for NDE of subsea pipelines. **NDT & E International**, 2017. 86:113-122.

HAMMERSLEY, A. P.; SVENSSON, S. O.; B, A. T. Calibration and correction of spatial distortions in 2D detector systems. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research** , v. 346, p. 312-321, 1994.

HOH HJ, L. P. J. T. K. Stress intensity factors for fatigue analysis of weld toe cracks in a girth-welded pipe. **International Journal of Fatigue**, 2016. 87:279-287.

III, W. J. P. **Introdução ao MATLAB para engenheiros**. 3°. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

ISO 17636-2. Non-destructive testing of welds — Radiographic testing —Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. **International Organization for Standardization**, Genebra, Suíça, 2012.

ISO 19232-1. Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 1: Image quality indicators (wire type) - Determination of image quality value. **International Organization for Standardization**, Genebra, Suíça, 2004.

ISO 19232-5. Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type) - Determination of image unsharpness value. **International Organization for Standardization**, Genebra, Suíça, 2004.

J.JEDLIČKA, M. P. CORRECTION OF RADIAL DISTORTION IN DIGITAL IMAGES. **Charles University in Prague**, 2003.

JEUGHT, S. V. D.; BUYTAERT, J. A. N.; DIRCKX, J. J. J. Real-time geometric lens distortion correction using a graphics processing unit. **Optical Engineering**, v. 51, p. 1-5, 2012.

KAPLAN, I. **Física Nuclear**. 3º. ed. Rio de Janeiro, RJ.: Guanabara Dois, 1978.

KASAP, S. O.; KABIR, M. Z.; ROWLANDS, J. A. "Recent advances in X-ray photoconductors for direct conversion X-ray image detectors", Second International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, v. 6, p. 288–292, 2006.

KIMA, H. J. et al. Construction and characterization of an amorphous silicon flat-panel detector based on ion-shower. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 505, p. 155–158, 2003.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 3rd. ed. Universidade de Michigan: Wiley, 2000.

KROETZ, M. G. **Sistema de apoio na inspeção radiográfica computadorizada de juntas de soldas de tubulações de petróleo**. Dissertação de M.Sc.: Universidade tecnológica federal do Paraná, Paraná, 2012.

LANÇA, L.; SILVA, A. Digital radiography detectors e A technical overview: Part 1. **The College of Radiographers. Published by Elsevier Ltd**, v. 15, p. 58-62, 2009.

MCANDREW, A. **An Introduction to Digital Image Processing with Matlab**. [S.l.]: Victoria University of Technology.

MIRZAEI-SISANA. Welding residual stresses in a strip of a pipe. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2018. 159:28-34.

MOREIRA, E. V. **Aplicação da radiografia digital utilizando detectores planos para inspeção de soldas de gasodutos e oleodutos**. Dissertação de M.Sc.: Universidade de Taubaté, São Paulo, 2007.

MOREIRA, E. V.; FRITZ, M. C.; SIMÕES, H. R. **Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection**. IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires: [s.n.]. 2007. p. 1-13.

NASCIMENTO, J. **Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Solda**. Dissertação de M.Sc.: UFRJ/COPPE Rio de Janeiro, 2012.

OBEID, O. et al. A parametric study of thermal and residual stress fields in lined pipe welding. **Thermal Science and Engineering Progress** **4**, 2017. 205-218.

OLIVEIRA, D. F. **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, 2010.

PARK, J.; BYUN, S.-C.; LEE, B.-U. Lens Distortion Correction Using Ideal Image Coordinates. **IEEE Transactions on consumers electronics**, v. 55, p. 987-991, 2009.

PRESCOTT, B.; MCLEAN, G. F. Line-Based Correction of Radial Lens Distortion. **Graphical models and image processing**, v. 59, p. 39-47, 1997.

RAAD, J. A. **Radiografia Industrial, Técnica de Formação de Imagem**. [S.l.]: General Electric Company - GE IT, 2007.

SALDANHA, C. B.; ALVES, R. D. C. M. Utilização de imagens de satélite e modelagem numérica para determinação de dias. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, 2005. 3301-3308.

SILVA, A. S. **Avaliação dos Procedimentos para Inspeção de Soldas com Radiografia Computadorizada Utilizando a Técnica PSVS**. Tese de D.Sc.: COPPE/UFRJ, 2013.

SILVANI, M. I. et al. Improving the quality of radiographic images acquired with conical radiation beams through divergence correction and filtering. **Journal of Physics Conference Series**, v. 630, p. 1-9, Julho 2015.

SILVANI, M. I. et al. Improving the quality of radiographic images acquired with conical radiation beams through divergence correction and filtering. **Journal of Physics: Conference Series** **630**, 2015. 1-10.

SOIMU, D.; BADEA, C.; PALLIKARAKIS, N. A novel approach for distortion correction for X-ray image intensifiers. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, v. 27, p. 79-85, 2003.

SPRAWLS, P. **Physical Principles of Medical Imaging**. 2°. ed. Wisconsin, USA.: Medical Physics Pub Corp, 1995.

SUYAMA, F. M. **Detecção de defeitos em juntas soldadas de tubulações de petróleo em radiografias computadorizadas parede dupla vista dupla usando redes neurais**. Dissertação de M.Sc. : Universidade Tecnológica do Paraná, Paraná, 2015.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. **Radioproteção e dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, v. 5, 2003.

THE MATHWORKS. **Getting Started with MATLAB®7**. 4°. ed. Massachusetts: [s.n.], 2000.

WANG, G.; LIAO, T. Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images. **NDT&E Int**, p. 35:519–528, 2002.

WANG, X. et al. Corrected unwrapping method based on the tangential and radial distortion center for the panoramic annular image. **IET Image Process**, v. 9, p. 127-133, 2005.

YORKSTON, J. Recent developments in digital radiography detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 580, p. 974–985, 2007.

ZSCHERPEL, U.; EWERT, U.; BAVENDIEK, K. Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique Examples and system theoretical analysis. **International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography**, p. 1-17, 2007.