



METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL

Marcela Tatiana Fernandes Beserra

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.

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Claudio de Carvalho Conti

Rio de Janeiro
Setembro de 2018

METODOLOGIA PARA QUALIFICAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL

Marcela Tatiana Fernandes Beserra

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. Claudio de Carvalho Conti, D.Sc.

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc

Prof. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2018

Beserra, Marcela Tatiana Fernandes

Metodologia para Qualificação de Equipamentos de Radioscopia Industrial/ Marcela Tatiana Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 166 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Claudio de Carvalho Conti

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

Referências Bibliográficas: p. 160 -166

1. Radioscopia Industrial. 2. Qualificação. 3. Ponto Focal 4. Sistemas Cinemáticos 5. Raios X I. Lopes, Ricardo Tadeu *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedicatória

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Tadeu Lopes agradeço pelos ensinamentos, pela oportunidade de realizar o Doutorado e compreensão nos momentos de dificuldade.

Ao meu eterno mestre Prof. Me. Mauro Otto de Cavalcanti Mello Filho por estar ao meu lado em todos os momentos, sua sabedoria e conselhos foram essenciais para que eu pudesse seguir um melhor caminho na busca pela minha qualificação.

Para concluir dedico a vocês:

*"O professor medíocre conta. O bom professor explica.
O professor superior demonstra. O grande professor inspira."*

William Arthur Ward

Muito Obrigada!

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Claudio de Carvalho Conti pelos ensinamentos adquiridos no mestrado que nortearam o aumento da minha percepção para pesquisa e pelo incentivo no prosseguimento dos meus estudos no doutorado.

Ao Prof. Dr. Davi Ferreira de Oliveira sou muito grata pelos ensinamentos e por me auxiliar na elaboração dos artigos científicos.

Aos Professores Doutores Edgar Francisco Oliveira de Jesus e Gabriela Ribeiro Pereira pelo aceite em fazer parte da banca examinadora.

Ao Sr. Davide Baratto por compartilhar seus conhecimentos e pelo incentivo a minha pesquisa.

Ao Sr. Ivan da Silva Britto pelo apoio e por compartilhar seus conhecimentos na área de Radiografia Industrial.

Ao físico Marcio Daniel, diretor da empresa MRA, pela disponibilização de materiais que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, assim como interface junto a empresa britânica LEEDS OBJECTS.

Ao Eng. Ronaldo Coimbra, gerente de negócios da RENISHAW, pelo apoio e por disponibilizar o Interferômetro Laser XL-80 para o planejamento dos experimentos.

Ao Prof. Dr. André R. Sousa do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) por compartilhar seus conhecimentos na área de Sistemas Cinemáticos.

Ao Dr. Daniel Weiß pelo apoio na área de Processamento Digital de Imagens.

Ao Prof. Dr. Domingo Mery, Professor Titular da Pontifícia Universidade Católica do Chile pela atenção e ajuda com MATLAB na área de Processamento Digital de Imagens.

Aos profissionais do LabProSaud do Instituto Federal da Bahia (IFBA), agradeço nas pessoas do Prof. Dr. Marcus Navarro e ao pesquisador Igor Garcia pelo suporte e receptividade no uso dos laboratórios.

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 QUALIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL

Marcela Tatiana Fernandes Beserra

Setembro/2018

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes
Claudio Carvalho Conti

Programa: Engenharia Nuclear

A Radioscopia Industrial é um ensaio não destrutivo empregando radiação ionizante, principalmente do tipo X, que fornece informações em tempo real sobre imperfeições de um corpo de prova, apresentando-se como potencial solução para detectabilidade de falhas na melhoria dos produtos e processos de produção. O objetivo deste estudo multidisciplinar foi apresentar uma metodologia para avaliação da performance das partes componentes de um equipamento de Radioscopia Industrial. Foram empregados algoritmos de Visão Computacional desenvolvidos em MATLAB, proposto o uso de padrões de teste alternativos, desenvolvidos phantoms para avaliação da performance dos sistemas, assim como uso de padrões corporificados e equipamentos de medição rastreáveis. A metodologia foi aplicada a equipamentos de Radioscopia Industrial contendo Intesificador de Imagem e Flat Panel. Foram realizados ensaios experimentais, sendo possível a avaliação de desempenho destes sistemas segundo critérios definidos de acordo com normas e especificações. Os resultados da validação da performance dos subsistemas permitiram avaliações mais objetivas e robustas, contribuindo com as orientações sugeridas pela norma ASTM E1411-16 relacionadas a qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial.

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

METHODOLOGY FOR THE QUALIFICATION OF
INDUSTRIAL RADIOSCOPY EQUIPMENT

Marcela Tatiana Fernandes Beserra

September /2018

Advisors: Ricardo Tadeu Lopes
Claudio Carvalho Conti

Departament: Nuclear Engineering

Industrial Radioscopy is a non-destructive testing method that employ ionizing radiation mainly X-rays. It provides real-time information on any imperfections found on a given specimen, thus offering a potential solution for the detection of failures and the improvement of products and production processes. The objective of this multidisciplinary study is to present a methodology for evaluating the performance of the component parts of Industrial Radioscopy equipment. The Computational Vision algorithms were developed in MATLAB, proposed the use of alternative testing standards, developed phantoms to evaluate systems performance, employed standards and traceable measurement equipment. The methodology was applied to Industrial Radioscopy equipment with Image Intensifier and Flat Panel detectors. Experimental tests were performed and were able to evaluate the performance of these systems under several criteria defined according to standards and specifications. The subsystem performance validation results enabled a more objective and robust evaluation, thus contributing to the guidelines suggested by ASTM E1411-16 related to the qualification of Industrial Radioscopy equipment.

INDICE

Capítulo 1

1.Introdução	1
1.1 Objetivo.....	6
1.2 Estrutura da Tese.....	6

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica	7
--------------------------------	---

Capítulo 3

3. Fundamentação Teórica.....	35
3.1 Gerador de Raios X.....	35
3.2 Processamento Digital de Imagem.....	37
3.3 Detectores utilizados em Sistemas de Radioscopia Industrial.....	41

Capítulo 4

4. Materiais e Métodos.....	46
4.1 Materiais.....	49
4.2 Métodos.....	54

Capítulo 5

5. Resultados	105
5.1 Gerador de Raios X.....	105
5.2 Detector de Raios X.....	115
5.3 Sistema de Visualização	139
5.4 Sistema de Cinemático	146
5.5 Sistema de Segurança e Radioproteção.....	151
5.6 Resultados Consolidados.....	153

Capítulo 6

6. Conclusões e Sugestões	155
Referências Bibliográficas	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Máquinas de Radioscopia Industrial	2
Figura 1.2: Sistema de Radioscopia Industrial	2
Figura 1.3: Imagem magnificada.....	4
Figura 2.1: IQI de fio e furo.	14
Figura 2.2: Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de fio duplo.....	15
Figura 2.3: <i>Phantom Step Wedge</i>	22
Figura 2.4: <i>Five Groove Wedge</i> conforme norma ASTM 2737 -18 (cotas em mm).....	22
Figura 2.5: Desenho e foto do <i>Phantom Duplex Plate</i> com IQIs posicionados: um IQI de furo em cada degrau e um IQI de fio duplo no degrau de menor espessura	23
Figura 2.6: <i>Phantom Kit – ASTM E2445</i>	26
Figura 2.7: Medição da distorção geométrica de um IP	27
Figura 2.8: Alinhamento do Sistema Cinemático de um equipamento de Radioscopia Industrial.....	31
Figura 2.9: Tipos de arranjos de montagem entre a fonte de raios X e o detector.	32
Figura 2.10: Erros Geométricos no eixo de rotação de um equipamento de Radioscopia Industrial.....	32
Figura 2.11: Dispositivos de testes (<i>phantom</i>) de referência para avaliação dos erros geométricos por imagem,	33
Figura 3.1: Representação esquemática de um tubo de raios X,	35
Figura 3.2: Espectro de Raios X - Bremsstrahlung e Raios X Característicos.....	37
Figura 3.3: Imagem Digital gerada por Radioscopia e as tonalidades de cinza	38
Figura 3.4: Processamento Digital de Imagem (PDI) de um Sistema de Radioscopia Industrial.....	39
Figura 3.5: Estrutura de um FPD.....	41
Figura 3.6: Exemplo de um Intensificador de Imagens.....	43
Figura 3.7: Comparação dos FOV	44
Figura 4.1: Proposta de Parâmetros para qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial.....	46
Figura 4.2: Exemplos de Padrões de Ensaio TG18 para avaliação dos parâmetros nos dispositivos de exibição de imagem.	50
Figura 4.3: Medidor de tensão não invasivo de um Sistema de Raios X (Cobia Flex)..	55

Figura 4.4: Arranjo Experimental do medidor de tensão não invasivo para o equipamento de radioscopia industrial RA	56
Figura 4.5: Fluxograma da metodologia desenvolvida para qualificação da exatidão, reprodutibilidade e da variação da tensão em função do tempo de exposição de um equipamento de radioscopia industrial.	59
Figura 4.6: Modelos de <i>Star Pattern</i> com com ângulo de 2 °.	60
Figura 4.7: Comparação das penumbras geradas no <i>Star Pattern</i> no sistema de Radioscopia Industrial RB para diferentes pontos focais.....	62
Figura 4.8: Arranjo experimental para avaliação do ponto focal com <i>Star Pattern</i> do equipamento de radioscopia industrial RA.....	63
Figura 4.9: Fluxograma do planejamento experimental para avaliação do ponto focal.	64
Figura 4.10: Diagrama em blocos do algoritmo para detecção das bordas das regiões de penumbra do <i>Star Pattern</i>	67
Figura 4.11: Mapa de Contraste de um Star Pattern Tipo 2° para um ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD.....	68
Figura 4.12: Mapa de Contorno com $\sigma = 4$, num Star Pattern Tipo 2° para um ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD.	68
Figura 4.13: Mapas de Contorno das regiões de contraste do Star Pattern Tipo 2 °. Ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD, com $\sigma=1$ e $\sigma=8$	69
Figura 4.14: Análise de imagens de pares de fios para o cálculo da resolução espacial básica	73
Figura 4.15: Tipos de IQI <i>Bar Pattern</i>	73
Figura 4.16 : Esferas para avaliação da resolução espacial em função da magnificação (esquerda) e a região ISO 50% dada como referência ao Isee! para o cálculo da MTF.	75
Figura 4.17: Arranjo experimental para obtenção da CSa.....	76
Figura 4.18: Especificação das áreas no <i>Step Wedge</i>	78
Figura 4.19: Arranjo Experimental com <i>Step Wedge</i> ,.....	79
Figura 4.20: Comparação entre os FOV e distorção geométrica de um intensificador..	83
Figura 4.21: Tipos de Distorção : (a) Imagem sem distorção; (b) Distorção Radial Positiva (<i>Pincushion</i>); (c) Distorção Radial Negativo (<i>Barrel</i>).	83

Figura 4.22: Montagem do Arranjo Experimental para Avaliação da Distorção Geométrica com TOR IQ e do <i>Grid Pattern</i> para o equipamento RA.....	84
Figura 4.23: Seleção da ROI para o cálculo da não-uniformidade do intensificador de imagem e do flat panel.....	86
Figura 4.24: Monitor LA1951g.....	88
Figura 4.25: Equipamentos e Ferramentas utilizados na avaliação do sistema de visualização.....	89
Figura 4.26: Gráfico de Luminância de um Monitor LCD.....	90
Figura 4.27: Ajuste da posição do monitor	91
Figura 4.28: Curvas de Resposta de Luminância e contraste	93
Figura 4.29: Representação do Sistema Cinemático do equipamento RA.....	98
Figura 4.30: Visualização e Registro com a câmera GoPro, das medidas de erro de posicionamento linear.....	99
Figura 4.31: Ensaio Experimental com Interferômetro Laser num equipamento de Radioscopia Industrial.....	100
Figura 4.32: Avaliação dos erros de posicionamento linear.....	101
Figura 4.33: Erro de Perpendicularidade para os eixos z_1 e z_2	102
Figura 4.34: Erro de Retilidade para os eixos z_1 e z_2	103
Figura 4.35: Erro de posicionamento angular	103
Figura 4.36: Erro de Batimento Radial e Axial.....	104
Figura 5.1: Avaliação da Reprodutibilidade das medidas de tensão do equipamento de Radioscopia Industrial RA.....	107
Figura 5.2: Avaliação da variação da tensão em função do tempo de exposição.....	107
Figura 5.3: Comparação dos desvios médios e padrão entre o <i>Star Pattern</i> com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (<i>integrated line profile</i>) para os equipamentos RA e RB.	109
Figura 5.4: Erros Médios do ponto focal na direção vertical para os equipamentos RA e RB, comparando o <i>Star Pattern</i> com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (<i>integrated line profile</i>)	110
Figura 5.5: Erros Médios do ponto focal na direção horizontal para os equipamentos RA e RB, comparando o <i>Star Pattern</i> com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (<i>integrated line profile</i>)	111
Figura 5.6: Imagens radioscópicas do <i>Star Pattern</i> para diferentes potências.....	111

Figura 5.7: Imagem radioscópica de um IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RA com ponto focal de 0,4 mm no campo de 9 polegadas	116
Figura 5.8: Imagem radioscópica do <i>Bar Pattern</i> e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RA com ponto focal de 0,4 mm no campo de 9 polegadas	116
Figura 5.9: Imagem radioscópica do IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RB com ponto focal de 0,4 mm	117
Figura 5.10: Imagem radioscópica do <i>Bar Pattern</i> e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RB com ponto focal de 0,4 mm	117
Figura 5.11: Medidas das Esferas de Tungstênio para os cinco níveis de magnificação para o equipamento RA	119
Figura 5.12: Medidas das Esferas de Tungstênio para os cinco níveis de magnificação para o equipamento RB	120
Figura 5.13: Resultado consolidado da MTF versus a magnificação e da resolução espacial versus a magnificação para os equipamentos RA e RB, considerando os materiais alumina, aço e carbeto de tungstênio.....	122
Figura 5.14: Imagens Radioscópicas utilizadas na avaliação da CSa para o equipamento de radioscopia industrial RA	126
Figura 5.15: Imagens Radioscópicas utilizadas na avaliação da CSa para o equipamento de radioscopia industrial RB.....	126
Figura 5.16: Imagens Radioscópicas dos equipamentos RA e RB para a máxima espessura alcançada.	130
Figura 5.17: Extração dos pontos de intersecção do <i>grid pattern</i> da <i>Leeds Objects</i>	133
Figura 5.18: Exemplo de uma das matrizes de intersecção de pontos para a imagem radioscópica do <i>grid pattern</i>	134
Figura 5.19: Medidas de não uniformidades calculadas por algoritmo em MATLAB para o equipamento RA	136
Figura 5.20: Medidas de Não Uniformidades calculadas por algoritmo em MATLAB para o equipamento RB.	137
Figura 5.21: Estimativa da eficiência para o equipamento RA, pela relação da SNR em função da variação da tensão	138
Figura 5.22: Estimativa da eficiência para o equipamento RB, pela relação da dSNRn em função da variação da tensão	138

Figura 5.23: Curva Luminância versus DDL	141
Figura 5.24: Curva Luminância versus JND	141
Figura 5.25 : Resposta ao contraste em relação ao padrão DICOM GSDF para o monitor avaliado.....	143
Figura 5.26: Parâmetros para avaliação da Cromaticidade e Diagrama CIE obtido através do miniespectrômetro óptico	145
Figura 5.27: Distribuição das Medidas de Repetitividade do Posicionamento para os eixos X e Y.....	146
Figura 5.28: Distribuição das Medidas de Repetitividade para os eixos z_1 e z_2	147
Figura 5.29: Distribuição das medidas de repetitividade da perpendicularidade para os eixos z_1 e z_2	147
Figura 5.30: Erro de retilidade para os eixos z_1 e z_2	148
Figura 5.31: Erro de Repetitividade do Posicionamento Angular.....	148
Figura 5.32: Erro de Repetitividade para o Batimento Radial e Axial.....	149
Figura 5.33: Erro de perpendicularidade entre os eixos e a mesa	150
Figura 5.34: Pontos de referência para o levantamento radiométrico dos equipamentos RA e RB.	151

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A Radioscopia é um ensaio não destrutivo empregando radiação ionizante, principalmente do tipo X, que fornece informações em tempo real sobre a natureza, tamanho, localização e distribuição de imperfeições do corpo de prova objeto da inspeção, permitindo a movimentação do corpo de prova e do sistema radiógeno. No campo das tecnologias de Radiografia Industrial, este ensaio é considerado pertencente ao grupo de Radiografia Direta ou Radiografia Digital Direta (DR - Direct Radiography). Em algumas literaturas um sistema de radioscopia também pode ser denominado de Radiografia em Tempo Real (Real-time radiography - RTR) ou (Real Time Radioscopy – RTR) [1].

Na DR uma vez que o corpo de prova é exposto aos Raios X a projeção da imagem no detector é convertida em sinais elétricos correspondentes sem a necessidade de manipulação de filmes, de escâner ou de placa de fósforo. Após o processamento digital das imagens, estas podem ser vistas através de um monitor de vídeo ou dispositivo de exibição de imagens.

O que difere a radioscopia dos demais sistemas inclusos na DR é o sistema de movimentação da peça, do tubo de Raios X e do detector. São as principais partes componentes de um sistema de radioscopia industrial :

1. Sistema de Geração dos Raios X
2. Sistema de Detecção das radiações ionizantes
3. Sistema de Cinemático
4. Sistema de Processamento Digital de Imagens
5. Sistema de Visualização das Imagens (Monitor de Vídeo)
6. Segurança e Radioproteção

Na Figura 1.1 são apresentados marcas e modelos de alguns equipamentos comerciais de Radioscopia Industrial.



Fabricante: GE - Modelo: X-CUBE
Parâmetros Radiológicos: 225 kV/8,0 mA



Fabricante: GILARDONI - Modelo: CST7
Parâmetros Radiológicos: 225 kV/7,0 mA



Fabricante: YXLON - Modelo: Y.MU2000D
Parâmetros Radiológicos: 225 kV/7,0 mA

Figura 1.1: Máquinas de Radioscopia Industrial [2, 3, 4]

Num sistema de radioscopia industrial o processamento digital de imagens (PDI) destaca-se tanto quanto a aquisição da imagem através do Sistema de Raios X. O PDI permite extrair e identificar informações das imagens melhorando a qualidade visual de aspectos estruturais, facilitando a percepção humana, a interpretação automática por meio de dispositivos e a metrologia por imagem.

Na Figura 1.2 é mostrado de forma ilustrativa a parte interna de um Sistema Radioscopia Industrial com sistema de movimentação em arco C.

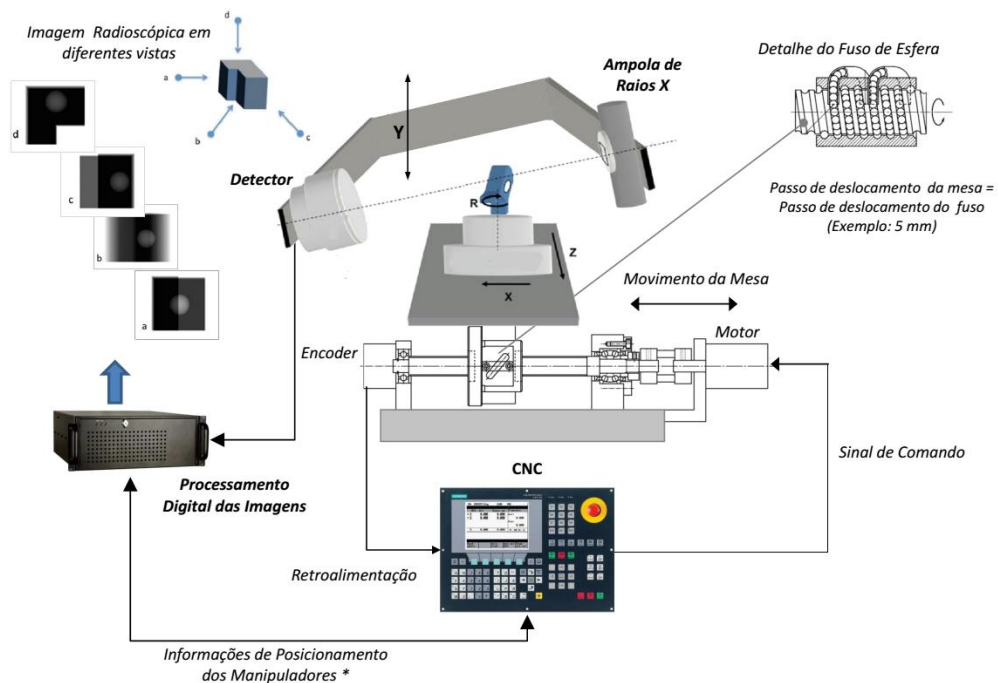


Figura 1.2: Sistema de Radioscopia Industrial adaptado [1]

A metrologia por imagem é a ciência que utiliza conceitos de visão computacional para extrair informações úteis de uma imagem a fim de analisar padrões ao qual se deseja estudar. Neste contexto, o sistema de reconhecimento de defeitos num equipamento de Radioscopia Industrial pode ser manual ou automático. No sistema manual existem limitações, como a subjetividade e a dependência humana, que afeta a produtividade e a confiabilidade [5]. Já o sistema de reconhecimento automático de defeitos (ADR - *Automatic Defect Recognition*) detecta os defeitos e toma a decisão de rejeição ou aceitação, com base em padrões normativos em função da área de aplicação.

A inteligência do sistema é baseada em algoritmos adaptativos ou Redes Neurais Artificiais (ANN - *Artificial Neural Network*) que habilitam o algoritmo continuamente a aprender e evoluir a cada amostra avaliada. Neste sentido, o código requer ser treinado em um determinado número de amostras defeituosas necessitando considerar forma, orientação, localização, dimensões e quantidade defeitos para regiões da amostra [1,5]. Apresenta como vantagem uma maior velocidade no processo de inspeção e menor dependência do operador.

Um outro item que diferencia os equipamentos de Radioscopia é a tecnologia de comando do sistema de manipulação que pode ser manual ou automático.

No controle manual os motores dos eixos dos manipuladores são controlados diretamente por um ou mais joysticks, portanto não há um controle exato e preciso do posicionamento.

Num controle automático, como apresentado na Figura 1.2, o controlador tem como função principal transformar códigos de programação em movimentos coordenados de forma a atuar nos eixos da máquina. Geralmente este controle é feito por Comando Numérico Computadorizado (CNC) [6]. O CNC recebe os códigos de programação, ajusta os parâmetros de velocidade, direção e distância com vista a atender os movimentos necessários para seguir a trajetória de inspeção programada. Os sinais são enviados aos servo-motores ou motores de passo para controlar os movimentos dos eixos da máquina de acordo com a programação estabelecida. Encoders são acoplados aos eixos e correlacionam a rotação do motor com o deslocamento linear por meio de um passo do fuso. Além de limitações de velocidade, fatores de ajustes dos servo-motores podem provocar alterações no comportamento geométrico da máquina, ao fazer com que um eixo responda de forma diferenciada de outros, desequilibrando o sistema.

Erros no sistema de medição angular também provocam erros de controle, já que toda a movimentação da máquina é realimentada pelas informações que os encoders fornecem.

Para garantir que cada posição de endereçamento esteja correta, o CNC verifica continuamente a posição atual e a compara com a programada fazendo ajustes em tempo real, de forma que esta diferença (“*following error*”) seja a menor possível [5]. Idealmente é desejado que o resultado desta comparação seja “zero”, mesmo após a identificação do erro e a sua compensação no sistema. É relevante que esta correção ocorra afim de minimizar que erros devido a alterações na trajetória promovam indefinições nos diagnósticos do reconhecimento dos defeitos e erros de medição na imagem radiológica.

Na última década os fabricantes de equipamentos de Radioscopia Industrial com recursos ADR vem aprimorando cada vez mais os filtros para reconhecimento de defeitos em diversas aplicações, dentre elas os fundidos de alumínio. Em linhas gerais, os filtros precisam ser configurados para cada peça e posição. Se a peça não for colocada exatamente na posição requerida o filtro pode não funcionar corretamente e a detecção dos defeitos falhar, gerando um elevado número de resultados falsos-positivos [1,6,7].

Conforme foi apresentado na Figura 1.2, o PDI para reconhecer e dimensionar os defeitos depende das informações vindas do detector e dos sinais de controle do CNC, que informa para esta etapa de processamento o valor das coordenadas de posição, idealmente, em tempo real. Esta posição irá gerar uma informação para que possa ser calculada a magnificação. A Figura 1.3 mostra de modo objetivo o efeito da magnificação em Sistemas de Radioscopia.

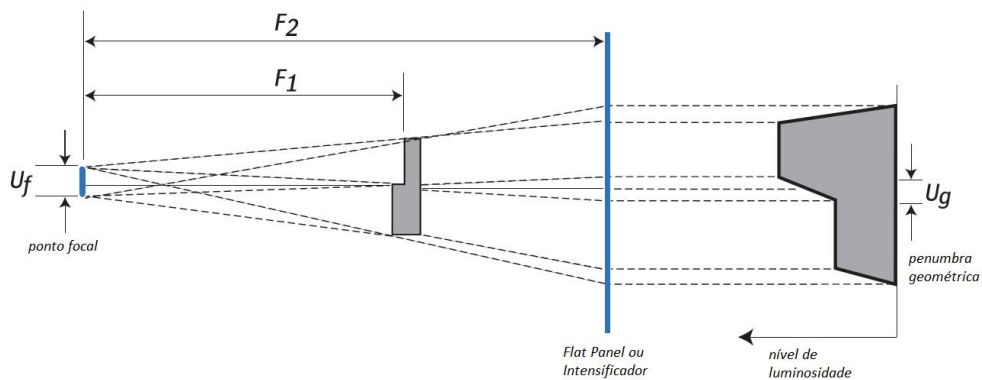


Figura 1.3: Imagem magnificada (ampliada) adaptado [8]

$$U_g = \frac{U_f (F_2 - F_1)}{F_1}$$

Equação 1.1

Onde:

F_1 – distância da fonte ao corpo de prova (FOD)

F_2 – distância da fonte ao detector (FDD)

U_f – tamanho do ponto focal

U_g – tamanho da penumbra geométrica (imagem difusa e com contornos pouco definidos)

O fator de magnificação pode ser calculado pela razão entre FDD e FOD. Portanto, quanto mais próxima a peça estiver do detector menor será a ampliação da imagem do defeito. A magnificação da imagem é definida como a “menor razão entre o tamanho da imagem pelo tamanho do objeto”. No entanto, pela Equação 1.1 conclui-se que o tamanho do ponto focal também é relevante, tendo em vista que o tamanho da penumbra geométrica influencia na discernibilidade dos defeitos. Por este, motivo a validação do tamanho da ponto focal faz parte da verificação da performance do sistema de um equipamento de radioscopia, pois sofrem alterações dimensionais com o aumento da potência [9,10].

Idealmente numa máquina de radioscopia industrial com recursos ADR mesmo que ocorra a ampliação da imagem, para o PDI o valor real do tamanho do defeito não será modificado pois não haverá desvios no valor da magnificação ou até que estes existam serão conhecidos e compensados fornecendo ao usuário o reconhecimento e o tamanho correto dos defeitos. Para tanto, o sistema de imageamento constituído pelo tubo de Raios X e o detector necessitam gerar imagens radioscópicas com qualidade.

Neste contexto, o sistema cinemático é uma parte componente presente em todas as máquinas de Radioscopia Industrial. O controle e a precisão dos manipuladores são de importância vital, já que as informações fornecidas por este sistema têm influência direta na precisão dimensional dos defeitos e certamente colabora para diminuição de resultados falsos-positivos em sistemas ADR.

No processo de aquisição de um equipamento de Radioscopia Industrial o usuário tem um papel importante na seleção e verificação das especificações do sistema. No entanto, esta seleção é baseada principalmente nas declarações de especificações fornecidas pelos fabricantes [12]. Por esta razão, etapas e planejamento dos experimentos necessitam ser bem definidos, pois são essenciais para gerar conhecimento sobre o desempenho do sistema. Segundo CARMIGNATO *et al.* [12] este procedimento chama-se qualificação de equipamentos.

A qualificação deve ser representativa, de forma a consistir num conjunto de ações para atestar e documentar que o equipamento Radioscopia Industrial foi instalado e funciona corretamente. Neste contexto, a qualificação deve documentar o conhecimento de que o equipamento apresenta desempenho com variabilidade conhecida a partir de um estudo de medições de reprodutibilidade e repetitividade de acordo com as especificações, por um período definido [11]. A qualificação de um equipamento ou a validação de um processo devem fazer parte de um sistema de qualidade bem robusto da empresa, sendo que após qualificado e validado deve ser mantido o *status* que caracterizou a sua performance.

1.1 Objetivo

Desenvolver uma metodologia para avaliação do desempenho de equipamentos de radioscopia industrial. Nesse contexto, destacam-se como objetivos específicos:

- a) Investigar procedimentos alternativos para avaliação das partes componentes dos subsistemas visando a melhoria do processo de qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial;
- b) Propor uma metodologia para qualificação de um equipamento de Radioscopia Industrial em apoio as indústrias brasileiras, mais especificamente o segmento das fundições de alumínio, que tenham interesse em melhor conhecer a performance do seu equipamento de inspeção não destrutiva em complemento a norma ASTM E1411-2016.

1.2 Estrutura da Tese

Após a esta introdução será apresentado no capítulo 2 uma revisão bibliográfica baseada em artigos, normas e textos científicos que contribuem para compreensão do tema central da tese. No capítulo 3 são abordados os principais fundamentos teóricos relacionados a aquisição da imagem de um sistema de radioscopia industrial. No capítulo 4 são descritos os materiais, as tecnologias e as metodologias utilizadas para avaliação da performance das partes componentes de um equipamento de radioscopia industrial. No capítulo 5 são disponibilizados os principais resultados acompanhados das devidas análises. Por fim, é apresentado no capítulo 6, a conclusão do trabalho, algumas sugestões de aperfeiçoamento e possíveis pesquisas futuras relacionados ao tema da tese.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão da bibliografia que fundamentou a elaboração do objetivo desta pesquisa. Na seção 2.1 é apresentado um histórico e o estado atual da arte dos Sistemas de Radioscopia Industrial. Na seção 2.2 são apresentadas resenhas de artigos científicos e das principais normas relacionadas a qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial, destacando-se a norma ASTM E1411 (*Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems*).

2.1 Histórico e o estado atual da arte dos Sistemas de Radioscopia Industrial

O uso industrial dos raios X começou na Alemanha apenas duas décadas após sua descoberta, realizados a época através de filmes radiográficos [13,14]. Apesar das telas fluorescentes serem conhecidas desde da descoberta dos raios X, o seu emprego em aplicações industriais se deu no final da década de 1930 e no início da década de 1940, com os primeiros equipamentos de Fluoroscopia Industrial.

Nos anos seguintes, cabines blindadas já estavam sendo usadas para ensaios não destrutivos por raios X de peças fundidas de alumínio na indústria automotiva [1]. Neste sentido, ser esclarecido que a Radioscopia Industrial não é o mesmo que fluoroscopia industrial.

A Fluoroscopia é um tipo de ensaio não destrutivo num arranjo típico de fonte, amostra e detector, onde detector é substituído por uma tela fluorescente que emite luz visível proporcional à radiação incidente. A eficiência luminosa é dependente da composição, da espessura e da granulação do material fluorescente que é depositado sob a tela [13]. A tela que registrava a imagem do corpo de prova, podia ser lida por visualização direta pelo operador através de um vidro plumbífero ou através de uma óptica empregando espelhos, ou ainda por uma imagem capturada por uma câmera.

Na Radioscopia as imagens do corpo de prova necessariamente passam por processamento digital de imagem e são vistas através de um monitor de vídeo ou dispositivo de exibição de imagem [1,15,16,17].

Uma vantagem da utilização de recursos de PDI em Radioscopia é a possibilidade do uso de recursos de configuração do tempo e número de integrações visando a redução do ruído [1, 13,16]. Através do PDI é possível o emprego de filtros específicos a um determinado tipo de material e aplicação permitindo um melhor controle sobre a qualidade da imagem e a melhoria na detecção de defeitos, inclusive, de forma automática [1, 13,16].

O emprego da fluoroscopia era justificado naquela época devido a um menor custo e a possibilidade de inspeção num menor tempo do que a radiografia convencional empregando filmes, mesmo tendo o operador que aguardar cerca de 30 (trinta) minutos para acomodação visual.

No final da década de 1940 e no início da década de 1950 com a advento dos intensificadores de imagem (II), avanço tecnológico na produção de Dispositivos de Carga Acoplada (CCD) e televisores foi possível a completa visualização das imagens estáticas ou em movimento por meios eletrônicos, marcando também o início da visão computacional aplicada a radiografia industrial com a Radioscopia Industrial [13].

Na década de 1960 com o desenvolvimento tecnológico dos computadores, possibilitou que equipamentos de Radioscopia Industrial também fossem dotados de sistemas cinemáticos controlados por comando numérico computadorizado, associados aos sistemas de aquisição de imagem [1].

Na década de 70 os Sistemas de Radioscopia Industrial já eram utilizados na indústria de fundição e inspeção de soldas, tendo emprego mais intensificado na década de 80 [6,7]. O desenvolvimento da tomografia industrial no início da década de 70 foi um marco para que houvesse uma maior empreendimento na área de processamento digital de imagens, associado aos sistemas semi-automáticos e automáticos para identificação de defeitos em corpos de prova [12].

Segundo MERY [1], abordagens para a avaliação automática e restauração de imagens foram utilizados na década de 1980. Os primeiros sistemas de testes de raios X totalmente automáticos foram instalados na indústria no início dos anos 90. Um exemplo pode ser encontrado no controle de qualidade de rodas de alumínio realizado pela Alumental Co. em Nuremberg, em que um reconhecimento automático de fundidos era integrado usando códigos de barras para o ajuste dos algoritmos de análise de imagem para diferentes tipos de rodas [18].

No final da década de 90, os detectores de painel plano de silício amorfo (FPD) eram industrialmente empregados em sistemas de inspeção de DR, incluindo os sistemas Radioscopia. Os FPD apresentam vantagens significativas quanto aos principais parâmetros relacionados a qualidade da imagem em relação aos II [1,12]. No entanto, os FPD ainda apresentam um custo maior quando comparado aos II [1].

Fato que mais de 90% das fundições de alumínio brasileiras, utilizam o II em seus equipamentos de Radioscopia Industrial [18]. Neste sentido, deve ser observado a sensibilidade ao contraste requerida pela aplicação afim de avaliar a viabilidade do uso dos II em equipamentos de Radioscopia Industrial. Além disso, a atualização tecnológica dos detectores de raios X vem sendo desenvolvida com base em novos semicondutores [19,20]. Normalmente, materiais de conversão direta, como o telureto de cádmio (CdTe) ou telureto de cádmio-zinco (CZT), vindo sendo utilizados [12]. Eles podem contar fótons em altas taxas discriminando diferentes canais de energia, deste modo o ruído da imagem pode ser diminuído e o contraste pode ser melhor aprimorado para que materiais específicos sejam visualizados [1,12].

Dentro deste contexto, nas últimas décadas os equipamentos de radioscopia industrial vem sendo utilizados em diversas aplicações na inspeção de fundidos de alumínio, solda, controle de cargas e bagagens, calçados, alimentos, produtos farmacêuticos e circuitos eletrônicos.

Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo de artigos científicos recentes que podem refletir o estado atual da arte nas referidas áreas no que tange a inspeção em tempo real empregando equipamentos de radioscopia industrial.

Tabela 2.1: Aplicações de Radioscopia Industrial (RTR)

Referência	Área	Descrição/Aplicação
ZHAO [21] (2015)	Fundidos	Método ADR em fundidos de alumínio baseado em classificação por representação esparsa. Os resultados foram comparados com o método Máquinas de Vetor Suporte (SVM - Support Vector Machine).
MERY [22] (2017)	Fundidos	Comparação de 24 (vinte quatro) técnicas de visão computacional aplicada a 47.500 imagens radiográficas de componentes automotivos com defeitos e sem defeitos.

Tabela 2.1 (continuação): Aplicações de Radioscopia Industrial (RTR)

Referência	Área	Descrição/Aplicação
HARARA [23] (2015)	Solda	Realizou avaliação de juntas soldadas em placas de alumínio comparando a inspeção de Filmes Radiográficos digitalizados com Radiografia digitais realizadas com Fluoroscopia.
ZOU [24] (2015)	Solda	Inspeção automatizada de soldas em dutos espiralados.
ZHAN [25] (2017)	Solda	Inspeção de junta soldada à laser em materiais a base de liga de Alumínio-Lítio.
CHAUVEAU [26] (2018)	Solda	Revisão de técnicas de ensaios não destrutivos, incluindo a Radioscopia, para avaliação de juntas soldadas e manufatura aditiva.
BESERRA [27] (2014)	Segurança	Equipamentos de Radioscopia utilizados na área de inspeção cargas, bagagens e contêineres; Sistemas de reconhecimento de imagens por Raios X voltado a Computer Based Training (CBT).
MERY [28] (2017)	Segurança	Revisão de métodos de reconhecimento de imagens geradas por equipamentos Radioscopia Industrial.
BESERRA [29] (2014)	Calçados	Uso de equipamentos de Radioscopia na inspeção de calçados de segurança.
FULLADOSA [30] (2018)	Alimentos	Caracterização de textura de presunto empregando detecção e análise de Raios X de múltiplas energias.
RAO [31] (2018)	Farmacêutica	Controle da qualidade quanto a quantidade de pó compactado no interior de blisters empregando Raios X de baixa energia.
DZIURDZIA [32] (2018)	Circuitos Eletrônicos	Uso de Radioscopia nanofoco para avaliação da qualidade de juntas entre componentes e placa de circuito impresso.

Nos sistemas de Radioscopia Industrial dependendo da aplicação, exigências de detectabilidade e da potência da máquina, os tubos de Raios X podem ser minifoco, microfoco e nanofoco, como foco efetivo menores que 1mm, 0,3 mm e 1µm respectivamente [8,33]. Neste sentido, existem outras formas de classificação do ponto focal, BAVIENDIEK et al. [34] já classifica ampolas minifoco com foco efetivo menores que 0,4 mm e microfoco menor que 0,4 µm. Isto irá depender na nomenclatura normativa utilizada para uma dada aplicação.

Na área de fundidos de alumínio a demanda por inspeção radioscópica de peças manufaturadas como blocos de motores, caixas de câmbio, carcaça de motores e rodas para automóveis e veículos pesados são indispensáveis no controle de qualidade na detectabilidade de defeitos devido a problemas de metalurgia. Os principais defeitos são a inclusão de materiais mais densos e menos densos, rechupes, cavidades de contração, trincas, *chaplet*, porosidade e bolhas de gás [35, 36, 22].

Na inspeção de soldas com radioscopia, geralmente, a potência dos sistemas de Raios X não são superiores a 2000 W. No entanto, isto tem muita relação com o tamanho do ponto focal e o tipo de material a ser inspecionado. Na área de inspeção de soldas em recipientes (Gás Liquefeito de Petróleo - GLP) o tamanho do ponto focal são inferiores a 1 mm [3]. Na inspeção de juntas soldadas em placas de circuitos eletrônicos, o emprego da Radioscopia é indispensável para garantia da confiabilidade das montagens, neste caso os sistemas geralmente operam com tubos microfoco ou nanofoco com potências normalmente abaixo de 500W [2,37].

Há mais de 30 anos para todas as áreas de conhecimento citadas na Tabela 2.1, tem havido uma grande quantidade de pesquisas visando aprimorar os sistemas de radioscopia de forma que a inspeção fique mais automática ou semi-automática. Os artigos mais recentes apresentam estudos e o desenvolvimentos de técnicas para o aprimoramento da detecção, assim como classificação de defeitos ou artefatos de interesse.

Neste sentido, existem basicamente dois grandes tipos de áreas de pesquisa neste campo: o processamento digital da imagem e o reconhecimento de padrões.

O processamento digital de imagens consiste na melhoria da qualidade das imagens radioscópicas e na segmentação de regiões de interesse nas imagens. Já o reconhecimento de padrões visa detectar e classificar os defeitos segmentados nas imagens segundo um conjunto de características [33].

Tanto o processamento digital das imagens, quanto o reconhecimento de padrões estão compreendidos num sistema de visão computacional. De modo objetivo, a visão computacional aplicada a um sistema de radioscopia industrial é uma área de estudo que visa dotar estes equipamentos com capacidade adequada em captar as imagens radioscópicas, extrair informações de interesse destas imagens e na sequência classificando-as corretamente segundo um padrão estabelecido [1, 35].

2.2 Estado atual da arte da Avaliação da Performance dos Sistemas de Radioscopia Industrial

A avaliação da performance de um equipamento de radioscopia industrial, é indispensável para definição dos índices de detecção das falhas nos processos de controle de qualidade dos objetos sob inspeção [6,38].

Segundo BARTSCHER et al. [12], para garantir que o sistema funcione de acordo com as especificações (ou seja, o melhor alcance de desempenho), o fabricante e às vezes o usuário conduzem uma série de experimentos nos quais nestas condições específicas de erro são gerados e parâmetros são obtidos para o ajuste fino/correção do sistema.

No contexto normativo, pode ser destacado o papel de organismos de normalização como *British Standards Institution* (BSI), que é um órgão nacional de padrões do Reino Unido e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) que é um órgão estadunidense que desenvolve e publica normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços.

A BSI produz padrões técnicos em uma ampla gama de produtos fornecem serviços relacionados a certificação e padrões para empresas. A norma EN 13068 trata da qualificação de equipamentos de radioscopia, sendo constituída por 3 (três) partes: Parte 1 – Medidas Quantitativas de propriedades da Imagem (última publicação em março 2000); Parte 2- Controles Qualitativos e Estabilidade a Longo Prazo dos dispositivos de Imagem (última publicação em março 2000); Parte 3 - Princípios gerais de testes radioscópicos em materiais metálicos por raios X e gama (última publicação em setembro 2001) [39]. O principal objetivo desta norma é estabelecer parâmetros de qualificação o mais próximo possível da radiografia empregando filmes. No entanto, esta norma faz menção a sistemas radioscópicos operando com intensificadores de imagem.

A norma EN 13068-3 classifica os sistemas de radioscopia em 2(duas) classes, SA e SB. A classe SA são denominadas técnicas básicas e SB são técnicas aprimoradas. O equipamento será enquadrado na classe SA, quando o equipamento não for suficientemente sensível para ser enquadrado na classe SB [39].

Esta avaliação é realizada com auxílio de um Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de fio conforme norma ISO 19232-1 e um IQI de fio duplo de acordo com a norma ISO 19232-5, onde para uma dada espessura de material penetrada deverá ser visualizado pelo menos os fios correspondentes ao indicado na Tabela 2.2. No caso, em questão o material utilizado é o alumínio.

Tabela 2.2: Avaliação da Performance de um Sistema de Radioscopia segundo a norma BS EN 13068, adaptado de [39].

Classe do Sistema de Radioscopia		SA	SB			
Classe do Sistema do Detector		SC3	SC2			
kV (máx)	Espessura de Alumínio (mm)	Nº. do Fio ISO 19232-1	Nº. do Fio Duplo ISO 19232-5	Nº. do Fio ISO 19232-1	Nº. do Fio Duplo ISO 19232-5	
45	5	W 12	8 D	W 16	10 D	
50	10	W 11	7 D	W 14	9 D	
55	15	W 10	7 D	W 13	9 D	
65	25	W 9	7 D	W 12	9 D	
75	35	W 8	7 D	W 10	9 D	
85	45	W 7	7 D	W 9	9 D	
95	55	W 6	7 D	W 9	9 D	
110	70	W 5	7 D	W 8	9 D	
125	85	W 5	7 D	W 8	9 D	
140	100	W 5	7 D	W 8	9 D	
160	120	W 4	7 D	W 7	9 D	

O IQI de fio ISO 19232-1 tem por finalidade a avaliação da sensibilidade ao contraste (CS – *Contrast Sensibility*) que é a capacidade de um sistema para distinguir diferenças de espessuras, de densidades e/ou composição química de um objeto, através de uma diferença de sinal na imagem. A sensibilidade ao contraste do detector é dependente da Relação Sinal Ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) do dispositivo, e esse atua como limiar para detecção de contraste do objeto [40].

Quando o contraste do objeto está abaixo do contraste limite alcançável do detector, informações não estarão disponíveis suficientemente para criar um nível de sinal na imagem digital resultante para a percepção visual [40]. Este IQI pode estar constituído por sete fios com espessuras diferentes dispostos paralelamente, sendo que o material deste IQI deve ser o mesmo do corpo de prova a ser ensaiado, Figura 2.1. Quanto maior o número do fio, menor é o seu diâmetro. Na Tabela 2.2, verifica-se que os sistemas de classe SB para as mesmas energias e faixas de espessuras exigem uma sensibilidade ao contraste superior ao sistema SA, pois é requerido que sejam visualizados os fios mais finos.

A norma ASTM E1025-18 [41] especifica um IQI do tipo furo como uma outra possibilidade para a quantificação da sensibilidade ao contraste de sistemas radiográficos. Este IQI é especificado de acordo com o material e espessura do objeto a ser inspecionado e apresenta três furos de diâmetros T, 2T e 4T, sendo T a espessura do IQI. A análise da CS é realizada pela razão entre a diferença de valor de cinza dentro e fora do furo e o desvio padrão (ruído) de regiões fora do furo da imagem radiográfica, Figura 2.1.

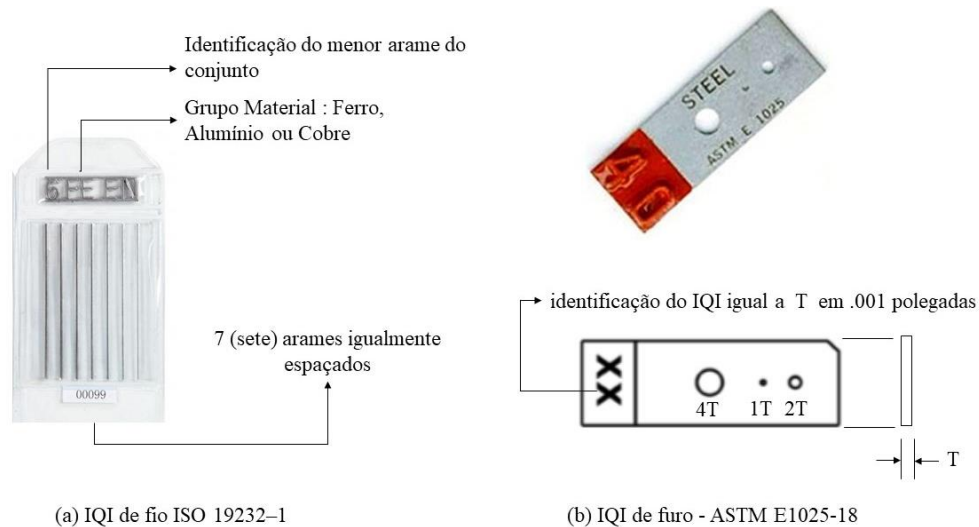


Figura 2.1: IQI de fio e furo, imagens adaptadas de [42].

No IQI de furo o nível de qualidade de imagem são designados por uma expressão: X-YT. A primeira parte da expressão, X, refere-se a espessura do IQI expressa como uma porcentagem da espessura do corpo de prova. A segunda parte da expressão, YT, refere-se ao diâmetro furo exigido no ensaio, que é um múltiplo da espessura T do IQI, conforme apresentado na tabela 2.3 [41].

Tabela 2.3 : Designação padrão do nível de qualidade de imagem para um IQI de furo segundo a norma ASTM E1025 [41].

Níveis de Qualidade de Imagem – IQI Furo ASTM E1025			
Nível de Qualidade de Imagem	Espessura do IQI	Diâmetro do Menor Furo Perceptível	Sensibilidade do IQI (%)
2 - 1T	2% da	1 T	1,4
2 - 2T	Espessura do	2 T	2,0
2 - 4T	corpo de prova	4 T	2,8

Segundo a Tabela 2.3, um nível de qualidade de imagem 2 - 2T significa que a espessura do IQI, T, não é mais do que 2% da espessura do corpo de prova e que o diâmetro exigido no ensaio é de 2 (duas) vezes o valor de T.

O IQI de fio duplo ISO 19232-5, Figura 2.2, tem por finalidade a medida da resolução espacial básica, SRb (Spatial Resolution Basic), que está relacionada com o grau da perda de definição da imagem (penumbra geométrica) e é definida como sendo a capacidade de um sistema de imagem distinguir a separação entre dois pontos adjacentes [43].

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, a qual em seu interior contém 13 pares de fios metálicos de diferentes espessuras numerados de 1D a 13D, conforme (Figura 2.2-a). O espaçamento entre os fios, para cada par, é igual ao diâmetro dos mesmos. Porém, também existe o IQI de fio duplo com 15 pares (Figura 2.2-b), utilizados para práticas que exigem maior resolução de detalhes [40].

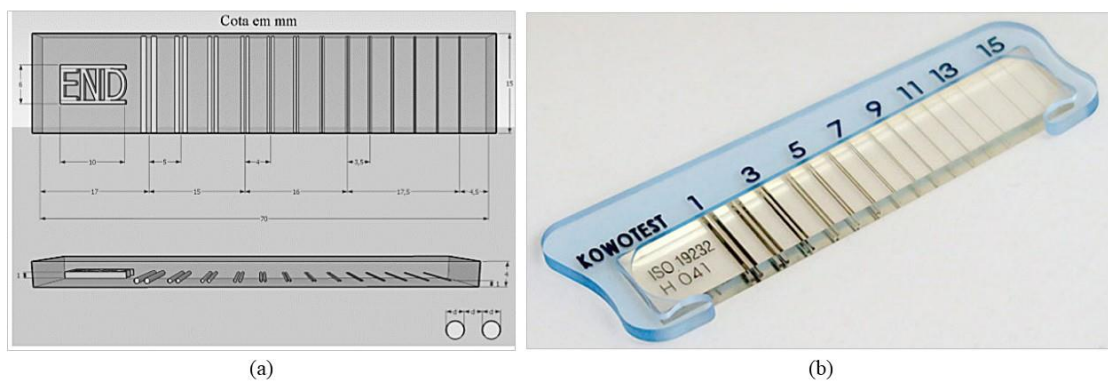


Figura 2.2: Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de fio duplo, [a] com 13 pares de fios [43] e [b] com 15 pares de fios [42].

Os pares de fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina [43] que são materiais de alta densidade. O tungstênio possui densidade de $19,25 \text{ g/cm}^3$, enquanto a platina possui $21,45 \text{ g/cm}^3$. A Tabela 2.4 apresenta os valores dos parâmetros do IQI de fio duplo.

Tabela 2.4: Valores dos Parâmetros do IQI de fio duplo [43]

Nº do Par de Fio	Penumbra Geométrica (mm)	Diâmetro do Fio (mm)	Tolerância (mm)	pl/mm
15D	0,06	0,032	±0,004	15,600
14D	0,08	0,040	±0,004	12,500
13D	0,10	0,050	±0,005	10,000
12D	0,13	0,063	±0,005	7,936
11D	0,16	0,080	±0,005	6,250
10D	0,20	0,100	±0,005	5,000
9D	0,26	0,130	±0,005	3,846
8D	0,32	0,160	±0,010	3,125
7D	0,40	0,200	±0,010	2,500
6D	0,50	0,250	±0,010	2,000
5D	0,64	0,320	±0,010	1,563
4D	0,80	0,400	±0,010	1,250
3D	1,00	0,500	±0,02	1,000
2D	1,26	0,630	±0,02	0,794
1D	1,60	0,800	±0,02	0,625

A SRb pode ser definida também como o menor detalhe geométrico, que pode ser resolvido e segundo a norma ASTM E2597 deve ser medida diretamente sobre a superfície do detector. A SRb da imagem é considerada aqui como resolução espacial básica da imagem, medida com IQI de fio duplo (ASTM E2002) no lado fonte do objeto, com contribuições da ampliação e penumbra do objeto, que também é uma fonte de espalhamento da radiação.

Ao utilizar o IQI de fio duplo a SRb é medida pelo valor da penumbra da imagem, através de um perfil de linha traçado sobre a imagem dos pares de fio. O padrão de medida com mínimo de 20 % de modulação de contraste (relação entre os sinais mínimos e máximos na imagem do perfil de linha) é assumido como o par de fio visível. A metade do valor da penumbra corresponde a resolução espacial básica [40,43].

A resolução espacial, refere-se ao número de valores de pixel por unidade de comprimento. Porém, para fins práticos, a resolução espacial é medida pela quantidade de linhas próximas que podem ser visualizadas (resolvidas) por milímetros e não pelo número de pixels [43].

Analisando as normas ASTM para qualificação de equipamentos de Radioscopia constatou-se que a primeira versão, ASTM E1411- *Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems, data de 1995* [17] e sua última versão foi publicada em 2016 [17]. Esta norma fornece orientações para medição do desempenho de sistemas radiocópicos operando com Raios X ou Gama com energias de até 320 keV.

A norma ASTM E1411, aborda o desempenho de sistemas radioscópicos somente no modo estático [17]. No entanto, deve ser considerado que a radioscopia tem como vantagem ser uma técnica dinâmica, permitindo a movimentação do corpo de prova, afim de obter diversas magnificações, bem como alteração dos parâmetros radiológicos (kV/mA) de modo a obter como resposta imagens radiográficas (radioscópicas) em tempo real. Estes aspectos dinâmicos podem ter efeitos benéficos e prejudiciais sobre o desempenho do sistema, por este motivo foram considerados neste trabalho.

Devido característica multidisciplinar relacionada a um equipamento de Radioscopia, a revisão bibliográfica não se limitou a norma ASTM E1411 -16 e suas normas complementares, mas também buscou-se publicações de outras áreas de conhecimento relacionadas, que pudessem contribuir para avaliação dinâmica do sistema, visando avaliar a performance dos subsistemas : Geração dos Raios X ; Detecção ; Cinemático ; Visualização das Imagens (Monitor de Vídeo) ; Segurança e Radioproteção.

Neste sentido, será apresentado na sequência as principais referências bibliográficas utilizadas para a qualificação destes subsistemas de um equipamento de radioscopia industrial.

2.2.1 Sistema Gerador de Raios X

Na qualificação do Sistema Gerador de Raios X a norma ASTM E1411 sugere que seja realizada a medida da tensão, mas não há sugestão de qual método possa ser utilizado para a obtenção desta medida. A estabilidade e a exatidão da tensão influenciam diretamente a Relação Sinal Ruído (SNR) do detector, o que irá impactar a qualidade da imagem. Se para um dado ensaio é estabelecido os parâmetros radiológicos de um equipamento é importante assegurar que estes valores não irão variar no domínio do tempo.

Em contrapartida, na área médica existem algumas recomendações que orientam sobre medidas que possam ser realizadas na avaliação da tensão, onde podemos citar a NBR IEC 60601 (Equipamento eletromédico Parte 2-7: Prescrições particulares para segurança de geradores de alta tensão de geradores de raio X para diagnóstico médico) publicada em 2011 [44]; *Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications* da Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA (2012) [45].

Um dos principais fatores que diferenciam estas duas normas e/ou recomendações quanto a exatidão da tensão é o valor da tolerância permitida. A referências [44] adota um limite de $\pm 10\%$ e a [45] $\pm 5\%$.

Os métodos de medição da tensão podem ser invasivos ou não-invasivos. A pesquisa irá empregar o método não invasivo, devido a uma maior facilidade de montagem do arranjo. Segundo ROS E CALDAS [46], os monitores não -invasivos são recomendados para avaliação de parâmetros de qualidade dos sistemas geradores de Raios X. Estudos realizados por MACEDO *et al.* [47] comprovaram que a diferença de exatidão dos valores medidos entre os monitores não invasivos comparados aos métodos invasivos, não foram superiores a 4%, para as qualidades de radiação de 50 kV, 70 kV e 90 kV.

Um outro parâmetro avaliado na qualificação do sistema gerador de Raios X de um equipamento de Radioscopia Industrial é o ponto focal. Um método potencial para a qualificação do tamanho do ponto focal passa por colocar um dispositivo com dimensões da ordem de grandeza similar ao foco sob avaliação, contendo elementos de pequeno tamanho diante de uma fonte de Raios X com uma dada magnificação, sendo estabelecidos critérios para variação dos parâmetros radiológicos (kV/mA) [3]. Geralmente os fabricantes fazem esta avaliação através de uma câmara pinhole [48], também há um método variante que é slit câmara [49]. No entanto, os métodos que envolvem uso de câmara não são muito práticos quanto se trata de testes rotineiros para qualificação do tamanho de ponto focal em máquinas de radioscopia, principalmente para os usuários finais.

Estas avaliações também podem ser realizadas por projeções radiográficas através de dispositivos de testes, phantoms ou objetos de referência. Os dispositivos mais comuns para este tipo de avaliação na área industrial são pares de linhas , placa com furos e esferas [50,51,52,53].

A ASTM E1411-16 comparada a anterior que data de 2009, incluiu 2 (duas) referências mais específicas no que tange a avaliação do ponto focal que são as normas ASTM E1165 -12 - *Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging* [51] e a ASTM E2903 - *Test Method for Measurement of the Effective Focal Spot Size of Mini and Micro Focus X-ray Tubes* [52], revisada em 2018. Ambas as normas ASTM fundamentam-se no uso de pares de linhas e esferas.

Uma norma usualmente referenciada, mas que não é citada diretamente na ASTM E1411 é a ISO EN 12543 (Parte 5) - *Measurement of the effective focal spot size of mini and micro focus X-ray tubes* [53], onde o objeto de referência é um esfera de tungstênio que obedece parametrização similar a ASTM E2903.

Uma outra possibilidade que vem sendo utilizada em tomografia industrial e já de uso na área médica é o *Star Pattern* ou Padrão Estrela para avaliação de pontos focais [12,28]. A norma IEC 60336 - *Medical electrical equipment – X-ray tube assemblies for medical diagnosis (Characteristics of focal spots)* [54], descreve emprego do Star Pattern empregando filme radiográfico como detector.

Para pontos focais superiores a 300 μm a norma ASTM E1411 orienta que seja utilizada a norma ASTM E1165 (*Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging*). No anexo A da norma ASTM E1165 há um método alternativo ao uso das câmeras *pinhole*, que está fundamentada na metodologia de borda prevista na EN 12543-5 empregando uma placa de furos como objeto de teste, usinada de acordo com a norma ASTM E1025 (*Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology*). Uma restrição no uso deste método para avaliação do ponto focal é que a tensão do tubo não deve ser superior a 75% da máxima energia de operação do equipamento, respeitando a tensão utilizada nas inspeções, e que nestas condições a corrente deve ser máxima possível.

Foi de entendimento que os métodos indicados pela norma ASTM E1411 apresentavam limitações para o planejamento experimental este trabalho, pois era de interesse qualificar o ponto focal 2 (duas) condições: 1- o aumento da potência, verificando a influência do aumento da tensão e da corrente para faixa de operação do equipamento de radioscopia industrial; 2- Magnificações inferiores a 20.

Diante do exposto foi pensando num dispositivo de teste alternativo aos preconizados na norma ASTM E1411, como também a possibilidade de uso de técnicas computacionais que visem mitigar erros de quantificação da penumbra, para que fosse diminuída a influência dos usuários finais (erros por fatores humanos) na determinação das regiões de contraste na avaliação dos pontos focais.

Isto motivou o emprego do *Star Pattern* para qualificação de pontos focais nesta pesquisa, associado a um método computacional para detecção automática da penumbra, que utiliza um fundamento clássico e bem difundido na área de Processamento Digital de Imagens, conhecida como detecção de bordas [55].

2.2.2 Sistema de Detecção dos Raios X

As normas ISO e ASTM há mais de dez anos descrevem procedimentos no melhor esforço de classificar os sistemas de radiografia nas suas diversas práticas. Neste contexto, a norma ASTM E1411-16 em sua última versão incluiu a norma ASTM E2698 *Practice for Radiological Examination Using Digital Detector Arrays* [47], as normas ISO 19232-2 Step Hole Image Quality Indicator e ISO 19232-5 *Duplex Wire Image Quality Indicator*. A inclusão destas normas, comparada a versão anterior, trouxe uma melhor definição de quais parâmetros de qualidade devem ser avaliados pelos usuários de equipamentos de Radioscopia Industrial no que tange a qualificação, assim como ao longo do tempo de uso do detector do sistema dentro de uma periodicidade estabelecida.

A norma ASTM E6298 estabelece os requisitos mínimos para inspeção de materiais metálicos e não metálicos empregando *Digital Detector Array* (DDA), conhecido também como *flat panel* (FPD), para fontes de Raios X com energia máxima de 450 keV. Esta norma pode ser aplicada a *flat panels* de conversão direta ou indireta, aplicando-se as estruturas de leitura baseadas em detectores de carga acoplada (CCDs - *charge coupled detectors*), detectores a base de metal de óxido de silício complementar (CMOS - *complementary metal oxide silicon*) ou estruturas de leitura de diodo transistor filme fino de silício amorfo [56].

As normas ASTM estabelecem ensaios e dispositivos de teste para avaliação dos parâmetros de qualidade dos detectores sob duas óticas: qualificação e procedimentos de controle que devem ser avaliados periodicamente pelos usuários finais. A norma empregada para a qualificação dos FPDs é a ASTM E2597 - *Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays*. Esta norma estabelece orientações para uma avaliação quantitativa visando a comparação entre FPDs. O foco desta norma não é o controle dos parâmetros de qualidade ao longo da vida útil do detector, mas não há impeditivo de ser utilizada para tal fim por usuários finais.

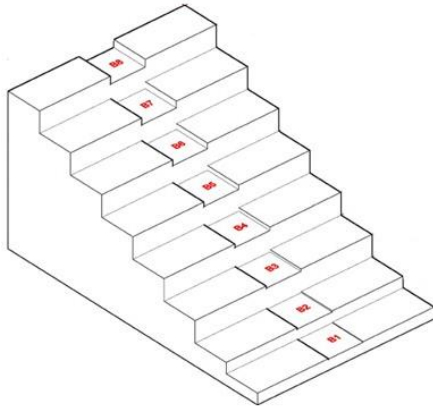
A norma recomendada pela ASTM para os controles de qualidade periódicos do detector é a ASTM 2737 - *Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability*. No entanto, a norma ASTM E6298 recomenda que a linha de base para o estabelecimento do procedimento de avaliação do detector seja realizado em conformidade com as normas ASTM E2597 e ASTM 2737.

Esta recomendação é justificável, tendo que em vista que muitos parâmetros podem influenciar o resultado de uma avaliação de um detector num sistema de radioscopia, mas três parâmetros são essenciais: a resolução espacial básica da imagem (SRb), a Relação Sinal-Ruído (SNR) e o coeficiente de atenuação específico do material incluindo efeitos de espalhamento (μ_{eff} - *Relative specific contrast*), pois influenciam diretamente a sensibilidade ao contraste (CS - *Contrast Sensitivity*) e o nível de visibilidade dos defeitos na imagem radiográfica digital [56, 57, 58].

As condições do ensaio nas quais foram obtidos os parâmetros de entrada devem ser definidas e declaradas no procedimento de avaliação do detector de um sistema de radioscopia. Nesta técnica a tensão, corrente, tempo de integração, a magnificação geométrica, escolha do ponto focal, utilização de filtração, calibração e recursos de processamento digital de imagens influenciam nos resultados. No caso de sistemas de radioscopia que empregam CCD pode ainda haver o uso de recurso de amplificação eletrônica, que igualmente influenciam diretamente na avaliação da resolução espacial. Portanto, uma vez especificado os parâmetros radiológicos e mantidas as condições de repetitividade dos ensaios é possível qualificar e/ou realizar o controle de qualidade periódico do sistema visando avaliar se o detector atende ou mantém as condições requeridas para o ensaio.

As normas ASTM E2597-14 [59] e ASTM 2737-18 [60] possuem metodologias e objetos de testes distintos de avaliação de sensibilidade ao contraste (CS). Na norma ASTM E2597-14 tem como principal objeto de teste um degrau (*step*) com um rebaixo com profundidade correspondente a 5% da espessura do degrau, Figura 2.3.

A norma ASTM 2737-18 admite utilizar um objeto de teste denominado de *five groove-wedge* ou um *Duplex Plate Phantom*. O primeiro *phantom* consiste num objeto metálico com 5 (cinco) ranhuras com profundidades distintas. Este objeto de teste também permite uma avaliação da máxima espessura alcançável pelo sistema de radiografia industrial e deve ser feito do mesmo material dos objetos sob inspeção, Figura 2.4.



(a) Desenho Técnico do Step Wedge

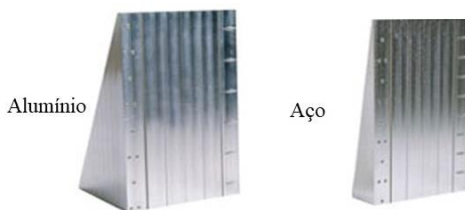


(b) Imagem do Step Wedge

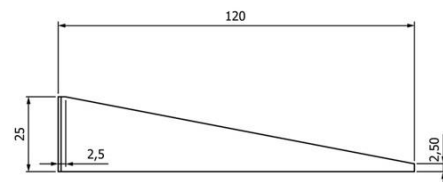
Dimensões do Step Wedge conforme norma ASTM E2597-18

Degrau	Altura do Degrau (mm)	Profundidade do Rebaixo (mm)	Degrau	Altura do Degrau (mm)	Profundidade do Rebaixo (mm)
B1	10	0,5	B5	80	4
B2	20	1	B6	100	5
B3	40	2	B7	120	6
B4	60	3	B8	140	7

Figura 2.3: Phantom Step Wedge - não faz parte do procedimento os IQI's de furo em cada degrau (b) (BESERRA,2018)



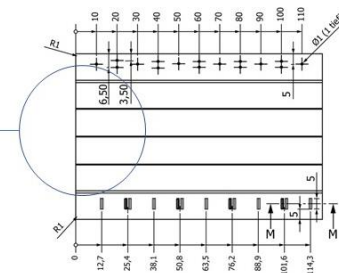
(a) Foto do five groove-wedge



(b) Desenho do five groove-wedge (vista lateral)



(c) Detalhe das ranhuras centrais do five groove-wedge (topo)



(d) Desenho do five groove-wedge (vista de topo)

Figura 2.4: Five Groove Wedge conforme norma ASTM 2737 -18 (cotas em mm), adaptado de [60]

A norma ASTM 2737-18 também admite utilizar um degrau simples, denominado de *simple duplex plate phantom* que deve ser feito do mesmo material de inspeção, onde dois tipos de IQI são utilizados em conjunto com este *phantom*. O IQI de resolução espacial conforme a norma ASTM E2002 e o IQI de furo visando a avaliação da sensibilidade ao contraste, Figura 2.5. As áreas hachuradas são ROI, *Region Of Interest*, com áreas mínimas de 50 x 50 pixels, permitem a quantificação da SNR.

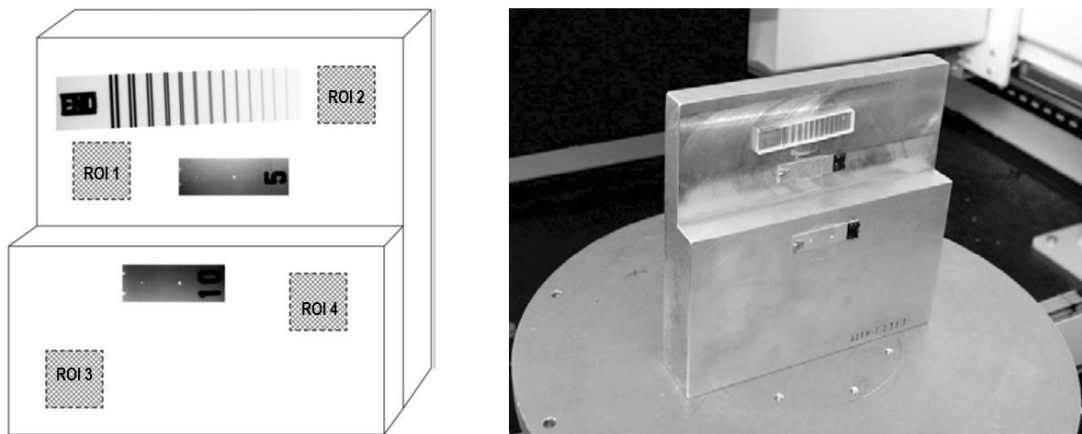


Figura 2.5: Desenho e foto do *Phantom Duplex Plate* com IQIs posicionados: um IQI de furo em cada degrau e um IQI de fio duplo no degrau de menor espessura. Adaptado de [58,60].

Segundo KRAMM e KURFIß [58], o *Phantom Duplex Plate* é mais prático do que o *Five Groove Wedge*. Além disso, a usinagem do *Five Groove Wedge* é de maior complexidade do que o *Phantom Duplex Plate*.

Neste trabalho foi utilizado o dispositivo de teste *Step Wedge*, incluso na norma ASTM 2597-14 por ter uma maior aderência ao processo de qualificação de um detector em Sistema de Radioscopia. Para tanto, foram realizados implementos ao procedimento, incluindo um IQI de furo em cada degrau para diferentes espessuras e qualidades de radiação, tendo em vista que os equipamentos de radioscopia realizam inspeção em tempo real. Isto permite uma análise mais dinâmica da sensibilidade ao contraste, como também das limitações de máxima espessura alcançável pelo sistema. A Figura 2.3 (b) ilustra o *Step Wedge* com os IQI de furo que foi usado neste trabalho.

A realização do mesmo procedimento empregando um *Phantom Duplex Plate* conforme a norma ASTM 2737 levaria a uma avaliação mais limitada, por possuir um número menor de espessuras a serem qualificadas. O uso *five groove-wedge* também levaria a uma avaliação limitada da Cs, a geometria deste *Step Wedge* dificulta a disposição e a parametrização das espessuras dos IQI de furo.

Portanto uso do *Step Wedge* é essencial para qualificação da sensibilidade ao contraste (CS), permitindo também a avaliação da Relação Sinal Ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*), Sensibilidade ao Contraste Alcançável (CSa - *Contrast Sensitivity Achievable*) e da Faixa de espessura de um material específico (SMTR - *specific material thickness range*). Estas definições estão bem descritas em [59] e serão melhor detalhados na metodologia.

Além da sensibilidade ao contraste, a Resolução Espacial Básica (SRb- *Spatial Resolution Basic*) [57, 58,60,61] também é um parâmetro essencial do detector. Pelo fato de ser comum em equipamentos de radioscopia industrial o emprego de recursos de magnificação nos ensaios, deve ser levado em conta a influência deste parâmetro nos procedimentos de qualificação. É esperado que na radioscopia industrial a resolução espacial do sistema seja diretamente dependente do tamanho do ponto focal e do pixel efetivo, que é dependente da função de transferência do detector e da magnificação. Nos equipamentos de tomografia industrial esta dependência foi constatada por RUECKEL *et al.*, [9] e MÜLLER [57].

Há várias formas de medição da resolução espacial, uma destas é através da Função Transferência de Modulação (MTF – *Modulation Transfer Function*). A MTF fornece uma descrição completa e quantitativa das resoluções do sistema sendo amplamente utilizada para avaliar o desempenho da resolução em muitos sistemas de imagem.

A forma mais comum de avaliação é a partir das transformadas de Fourier das funções de espalhamento pontual (PSF), de linha (LSF - *Line Spread Function*) ou de borda (ESF - *Edge Spread Function*). Para tanto, dispositivos de testes como fios finos, fendas estreitas ou a superfície de bloco homogêneos são utilizados para estimar a MTF [62,63].

A MTF relaciona a frequência espacial (indicada pelas coordenadas do objeto) com a perda de contraste correspondente. Uma função perfil de linha normalizada e perpendicular a bordas do referido objeto de teste fornece a ESF.

A transformada de Fourier da derivada primeira da ESF fornece vários valores de MTF para uma dada direção. A MTF do sistema pode ser encontrada pela Equação 2.1, sendo bem descrito em [67].

$$MTF(k_x) = \mathcal{F} \left\{ \frac{d}{dx} ESF(x) \right\}$$

Onde k_x é a frequência espacial na direção x.

Equação 2.1

Se empregado os dispositivos de teste citados [67] para a medida da MTF é muito importante o alinhamento do dispositivo de teste em relação a fonte e o detector. Os dispositivos a base de fios fio fino e fenda necessitam ser inclinados em um pequeno ângulo para evitar *aliasing* nos detectores digitais [40, 43, 39, 62]. Além disso, torna-se uma tarefa complexa garantir a perpendicularidade ao longo do eixo de magnificação e de da mesa rotatória do sistema de radioscopia industrial.

Visando superar esta limitação, estudos recentes vem adotando o uso de phantoms esféricos para avaliação da resolução espacial, tendo em vista que este dispositivo apresenta uma forma simétrica em todas as direções e não sofre influência significativa quanto a pequenas variações alinhamento entre a fonte e o detector [62,63].

Por se tratar de um procedimento de qualificação e visando minimizar as incertezas devido ao alinhamento entre a fonte e o detector ao longo do eixo de magnificação, neste trabalho foi realizada a avaliação da influência da magnificação na resolução espacial do sistema empregando dispositivos de teste esféricos. TAKENAGA *et.al* [64] e SUN *et.al* [65] constataram que a MTF é influenciada pela composição química do corpo de prova. A MTF tende a sofrer uma maior degradação em corpos de prova de menor densidade (baixo contraste), quando comparado a corpos de prova com maior densidade (alto contraste) [64]. Neste sentido, os IQI esféricos desenvolvidos neste trabalho também diferem em tipos de materiais, com vista a investigar a influência da composição química do material na MTF. Outros parâmetros também devem objeto de avaliação nos detectores digitais como a distorção geométrica [57,66] e uniformidade [57,63,65].

Se considerarmos especificamente que o detector seja um FPD também deve ser analisados os parâmetros *Image Lag*, *Burn In*, *Offset Level* e *Bad Pixel Distribution* [59], a definição e os procedimentos para avaliação destes parâmetros é descrita na norma ASTM E2597.

A norma ASTM E2597 não cita diretamente um procedimento para avaliação da distorção geométrica e da uniformidade. No entanto, indica como referência a norma ASTM E2445- *Practice for Qualification and Long-Term Stability of Computed Radiology Systems*, que fundamentalmente avalia a performance de sistemas de radiografia computadorizada [59]. Na Figura 2.6 é apresentado dispositivos de teste utilizados na avaliação da performance dos sistemas de radiografia computadorizada, onde destacaremos aqui os IQI utilizados para avaliação da distorção geométrica e da uniformidade do detector.

O *Image Plate* (IP) é um tipo de detector específico a radiografia computadorizada (CR – *Computer Radiography*), não sendo indicado seu emprego em sistemas de radioscopia industrial pois foge do requisito da inspeção em tempo real. No entanto, os princípios de medição dos parâmetros de qualidade da imagem radiográfica digital podem transportados para equipamentos de radioscopia industrial, quando aplicável.

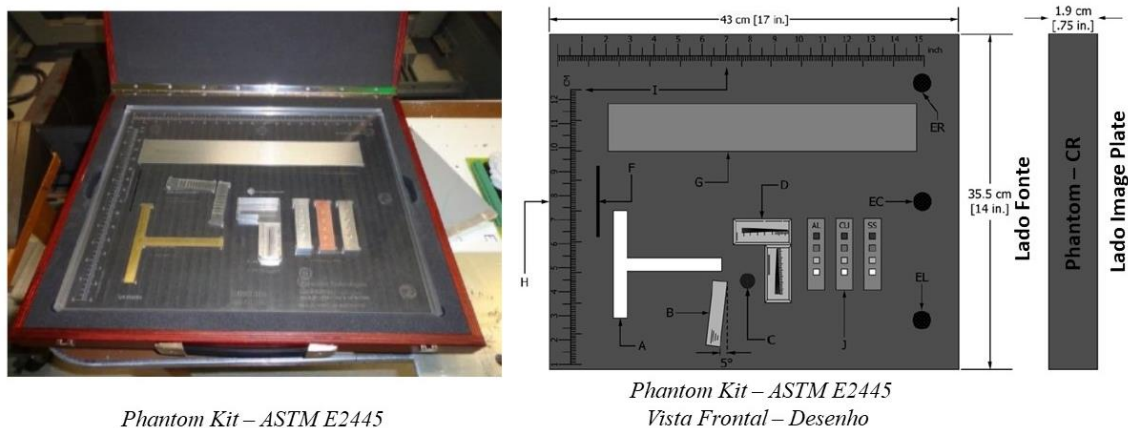


Figura 2.6: Phantom Kit – ASTM E2445, adaptado de [66]

A distorção geométrica numa imagem radioscópica é uma representação diferente do objeto a ser radiografado relacionado ao tamanho ou forma em relação a objeto real [1]. A distorção geométrica prejudica as avaliações quantitativas dos defeitos podendo impedir, dependendo do nível da distorção, o reconhecimento automático de defeitos.

A distorção geométrica na imagem radioscópica está afeta a 5 (cinco) fatores principais: (i) a forma do objeto; (ii) o mecanismo de propagação dos Raios X até o detector; (iii) propriedades intrínsecas do detector; (iv) paralelismo, perpendicularidade e retilineidade entre o tubo de Raios X, mesa e detector; (v) distorções geométricas inerentes ao próprio monitor (sistema de visualização).

Dentre os detectores digitais comumente empregados em Radioscopia Industrial, é esperado que os II's apresentem distorção geométrica superior aos DDA's ou FPD's [1, 68,69]. Neste sentido, é frequente a declaração de que os FPD não possuem distorção geométrica [68,69]. Contudo, é importante ressaltar que os FPD podem apresentar distorções geométricas [70,71,72], isto se deve a forma de construção dos detectores planos. Mesmo nos altos padrões de fabricação, os agrupamentos dos dispositivos sensores apresentam uma inclinação ou uma curvatura em sua superfície.

No *Phantom Kit* ASTM E2445 a medição da distorção geométrica tem por finalidade verificar a linearidade espacial do sistema de CR, verificando se existe alguma distorção provavelmente causada pela inclinação e torção do IP durante a varredura. O IQI são duas régua localizadas na direção vertical e horizontal da placa, conforme indicado na Figura 2.6. A Figura 2.7, mostra um exemplo de uma medição da distorção geométrica para um sistema CR, onde é mostrado um erro inferior a 0,045%.

O critério de aceitação é apresentar um erro menor ou igual a 2%. Neste caso, o sistema de CR mostra-se em conformidade.



Figura 2.7: Medição da distorção geométrica de um IP, adaptado de [66]

Visando uma avaliação da distorção geométrica considerando toda a área útil do detector, para este trabalho foi desenvolvido um dispositivo em forma de *Grid pattern*, este dispositivo permitiu a avaliação da distorção geométrica nos equipamentos de radioscopia analisados nesta pesquisa empregando II e FPD. O algoritmo para o cálculo da distorção foi desenvolvido em MATLAB, baseado em conceitos de visão computacional, tomando como referência MERY[1].

A medição da uniformidade segundo a norma ASTM E2445 é denominado de *shading*, que consiste basicamente em verificar se há uniformidade dos valores de pixels ou *pixel value* (PV) da imagem radiográfica digital. O PV é um valor numérico atribuído a cada elemento da imagem digital, que é proporcional a a dose de radiação. Segunda a norma ASTM E2445, esta avaliação é realizada de duas formas.

A primeira é uma avaliação quantitativa dos PV dos três furos existentes no *Phantom kit* denominados de ER, EL e EC, conforme Figura 2.6. Cada furo possui 19 mm de diâmetro e 0,3 mm de profundidade. A medida dos PV da ROI dentro do furo ER e EL não devem diferir dentro de uma tolerância de $\pm 15\%$ em relação a EC. A segunda forma é uma inspeção visual, onde é verificado se existem se não há saturação no fundo da imagens gerada pelo *phantom*, com regiões livres de artefatos e de gradientes visíveis nas direções horizontais ou verticais.

Segundo EWERT [61], o ruído da imagem depende predominantemente nas estatísticas de fótons e esta avaliação pode ser explorada visando obter uma imagem com alta SNR e melhor sensibilidade ao contraste. Os sistemas de FPD conseguem alcançar uma maior SNR e melhor sensibilidade ao contraste do que os IP's e filmes, se eles estiverem devidamente calibrados.

A avaliação da uniformidade da imagem assegura que não há artefatos e que desvios relacionados a calibração do detector estejam dentro de limites aceitáveis. Na área médica são utilizados detectores digitais que empregam tecnologia similar a área industrial e a avaliação da uniformidade faz parte de protocolos sendo classificados como essenciais no controle de qualidade [45]. Diante do exposto, pode-se constatar que existem limitações relacionadas a avaliação dos parâmetros distorção geométrica e uniformidade para detectores típicos utilizados em Sistemas de Radioscopia Industrial:

1. No que tange aos II a geometria do *Phantom Kit* ASTM E2445 não se mostra adequada, tendo em vista que a área útil destes detectores apresentam forma circular;
2. A norma ASTM E1411-16 apesar de citar os II como uma possibilidade de detector num Sistema de Radioscopia Industrial, não aponta formas assertivas de avaliação da distorção geométrica e da uniformidade, pois diferentemente dos FPDs os II não possuem recursos de calibração de fácil acesso aos usuários. Portanto, a avaliação da uniformidade e da distorção geométrica pode ser significativa para o controle de qualidade deste detector e planejamento dos ensaios, considerando que os II são muito utilizados em sistemas de radioscopia industrial ;

3. A avaliação da distorção geométrica nos FPDs sugerida pela norma ASTM E2445 é limitada ao perímetro da imagem. Não avaliam a imagem de forma integral. Estudos conduzidos por WEIB [70], demonstram a influência deste parâmetro como uma incerteza na quantificação do tamanho de defeitos empregando FPD;
4. A avaliação da uniformidade nos FPDs sugerida pela norma ASTM E2445 não avaliam a imagem de forma integral ou em outras ROIs distribuídas na imagem.

Adicionalmente ao já descrito, para uma dada condição de exposição de um corpo de prova homogêneo, a causa da não-uniformidade da resposta não linear dos pixels também está relacionada a diferença de eficiência nos detectores, diodo ou cintilador, na transformação das radiações ionizantes em sinais elétricos. Além disso, os amplificadores da eletrônica associada do detector podem disponibilizar valores de corrente escura, ganho e linearidade diferentes [65,73]. Neste sentido, foi proposto neste trabalho um método para avaliação da uniformidade de detectores em equipamentos de radioscopia industrial.

O método consiste na exposição de placas homogêneas de alumínio e o cálculo dos PV das ROIs distribuídas em 4 (quatro) regiões na periferia da imagem e 1 (uma) ao centro. Também foi elaborado um algoritmo para o cálculo da uniformidade considerando toda a imagem desenvolvido em MATLAB para fins de comparação, foi possível um imageamento do comportamento deste parâmetro, tomando como referência MERY[1] e OLIVEIRA *et al.* [74].

2.2.3 Sistema de Visualização ou de Exibição de Imagens

A norma ASTM E1411 orienta que o sistema de visualização seja qualificado segundo a norma ASTM E2698, Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays, tendo sua versão mais recente publica em abril de 2018 [56]. As avaliações da performance do sistema de visualização pela norma ASTM E2698-2018 se fundamentam no padrão da Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE) RP 1338, mas permite ao avaliador utilizar padrões de testes alternativos desde que inclua todos os parâmetros de avaliação presentes SMPTE e que são de objeto de interesse na norma.

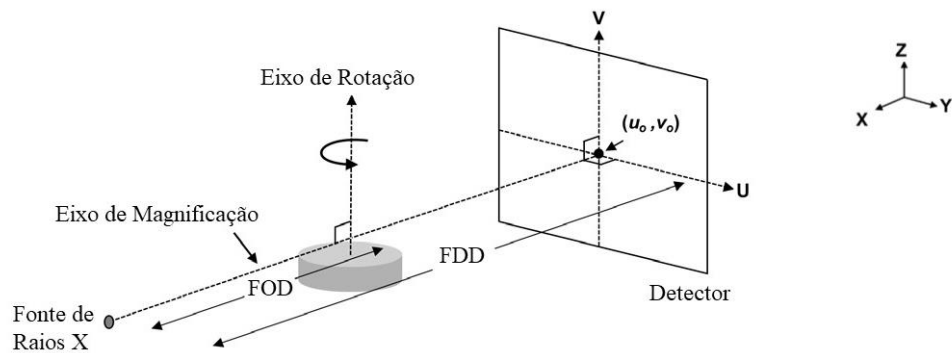
É importante ressaltar que o padrão SMPTE RP 13, quando da sua concepção no início dos anos 80, teve como foco ser um recurso que propiciasse ao usuário avaliar a maior quantidade possível de parâmetros de qualidade de um sistema de visualização de imagens num único padrão de teste, com a finalidade de estabelecer um setup inicial e verificações operacionais diárias. Portanto, o mesmo tem uma essência mais operacional do que propriamente uma avaliação de qualificação.

Os parâmetros Cromaticidade, Resposta de Luminância e Dependência Espacial da Luminância são avaliados de forma qualitativa no padrão SMPTE RP 133, uma vez que os diferentes níveis de cinza não são apresentados de forma distinta e abrangendo toda a área do monitor. Neste contexto, a norma ABNT NBR IEC 62563-1: Equipamento eletromédico - Sistemas de exibição de imagens médicas Parte 1: Métodos de avaliação, publicada em maio de 2017, apesar de ser voltada a avaliação de sistemas de visualização da área médica apresentam avaliações quantitativas mais robustas baseadas nos padrões de teste da AAPM TG18: “*Assessment of display performance for medical imaging systems*”, *American Association of Physicists in Medicine (AAPM)*, publicada em 2005, e no Modelo de Barten.

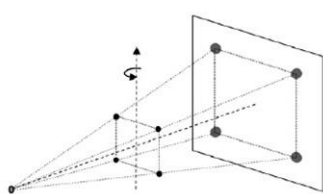
Este modelo desenvolveu-se com base em medidas de sensibilidade do Sistema Visual Humano (HVS, do inglês, Human Visual System) em baixo contraste [75]. Neste sentido, a metodologia para avaliação do sistema de visualização do equipamento de Radioscopia Industrial incluiu as avaliações da ASTM E2698 e da ABNT NBR IEC 62563-1.

2.2.4 Sistema Cinemático

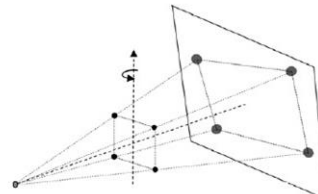
No que tange a qualificação do sistema cinemático a norma ASTM E1411, que é uma das principais referências relacionada a qualificação de equipamentos de radioscopia industrial, não aborda procedimentos para avaliação dos erros geométricos. Neste sentido, foi também objetivo deste trabalho estabelecer uma metodologia para avaliação destes erros. Os erros do sistema cinemático estão relacionados ao desalinhamento entre o eixo de rotação, a fonte de Raios X e o detector, Figura 2.8



(a) Sistemas de coordenadas cartesianas de um equipamento de radioscopia industrial (outras configurações são possíveis)



(b) Projeção com detector alinhado com a fonte de Raios X e o eixo de rotação (mesa)



(c) Projeção com detector desalinhado com a fonte de raios x e o eixo de rotação (mesa)

Figura 3.1: Alinhamento do Sistema Cinemático de um equipamento de Radioscopia Industrial, adaptado de [62].

Na Figura 2.8, o sistema é considerado alinhado quando satisfaz as seguintes condições [76]: a intersecção entre o eixo de magnificação e o detector é coincidente com o centro do detector; o eixo de magnificação é normal ao detector; o eixo de magnificação é perpendicular ao eixo de rotação ; a projeção do eixo de rotação é paralelo ao detector.

Qualquer desvio em relação as essas condições ideais são considerados fatores de influência e podem contribuir para erros nas medições dos defeitos, a Figura 2.8 mostra uma consequência do desalinhamento do detector. Deve ser considerado que pode haver uma inclinação intencional da fonte e do detector visando uma inspeção numa área específica da peça, os fabricantes geralmente chamam de *tilt*.

Na Figura 2.9, vemos 2(dois) sistemas de arranjo para a fonte de Raios X e detector, tipicamente utilizados em Radioscopia, na Figura 2.9 (a) o arranjo chama-se braço C e na Figura 2.9 (b) são colunas verticais. Uma vantagem do braço C é que devido a estrutura de montagem entre a fonte de Raios X e o detector, estes estão idealmente alinhados caso haja a movimentação desta estrutura. No entanto, fatores como tamanho da peça e/ou área de interesse a ser inspecionada, assim como o ângulo de inspeção requerido para visualizar um determinada ROI, podem limitar o uso do braço C.



(a) Movimentação em Braço C da fonte e detector

(b) Movimentação em Colunas Verticais da fonte e do detector

Figura 3.2: Tipos de arranjos de montagem entre a fonte de raios X e o detector. Figura (a) Cinemática - Braço C (b) Cinemática colunas verticais.

O eixo de rotação também podem apresentarem erros geométricos, conforme pode ser visto na Figura 2.10, denominados de erros de inclinação, batimento radial e axial [5,76], o que também podem implicar em erros dimensionais dos defeitos nos sistemas de radioscopia. As publicações relacionadas a avaliação de erros do sistema cinemático, comumente apontam para a área de Tomografia Industrial, tendo como referência a norma VDI/VDE 2630 [12, 76, 77, 78].

No entanto, a publicação VDI/VDE 2630 é uma norma nacional, data de 2011 e segundo PTB (*Physikalisch Technische Bundesanstalt*), Laboratório de Metrologia Primário da Alemanha e centro de referência mundial na área de Medição por Coordenadas, afirma que existe uma “força tarefa” para padronizá-la como uma norma internacional. O estado atual da arte é que não existe até a presente data uma norma internacionalmente aceita que estabeleça uma diretriz para a estimação da influência dos erros geométricos num sistema de tomografia industrial (CT – *Computer Tomography*), tampouco de Radioscopia Industrial [11].

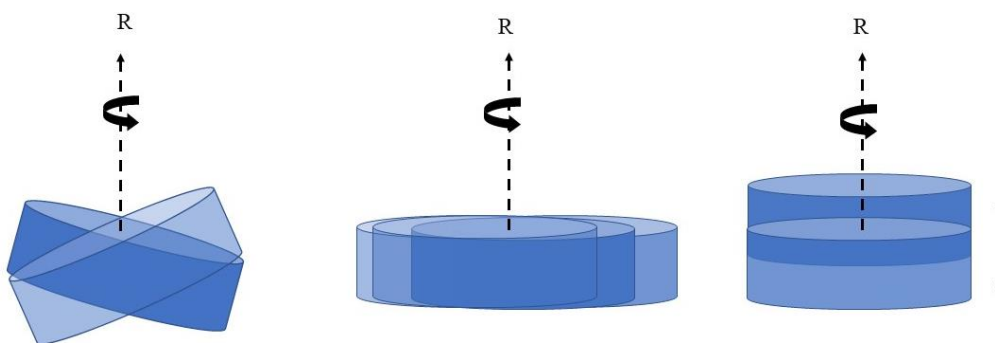


Figura 3.3: Erros Geométricos no eixo de rotação de um equipamento de Radioscopia Industrial

Várias publicações nos últimos anos vem discutindo metodologias e propondo artefatos de testes para qualificação dos sistemas cinemáticos de equipamentos de CT:

- FERRUCCI *et al* [76] realizou uma revisão sobre procedimentos para calibração geométrica dos sistemas CT, sendo revisado métodos medição de erros geométricos. Nesta publicação foram apresentados 2(dois) métodos para avaliação dos erros. O primeiro é baseada em *phantom* (objetos de referência) e os erros são quantificados através de imagens bidirecionais obtidas do sistema CT, Figura 2.11, sendo conhecido como método por imagem. O segundo método é baseado em instrumentos de medida utilizados em metrologia como esquadros, relógios comparadores e interferômetros ópticos.
- BARTSCHER *et al* [78] publicaram um relatório com resultados obtidos através de experiências realizadas num sistema CT do PTB. O objetivo da pesquisa foi avaliar os parâmetros de influência dos erros geométricos que são relevantes para a calibração geométrica dos tomógrafos para fins metrológicos. A pesquisa visa contribuir para uma possível inclusão dos sistemas CT na série ISO 10360, que é a norma que estabelece os testes de aceitação de máquinas de medição de coordenadas (CMSs).
- WELKENHUYZEN *et al* [77] enfoca os erros geométricos gerados pelo sistema cinemático de um tomógrafo de alta potência (450 kV). Estes erros foram avaliados com instrumentos de referência como esquadros, interferômetro óptico e nível eletrônico. Na sequência foram realizados tomografias com um objeto de referência e investigada a influência dos erros geométricos nas medidas dimensionais na imagem gerada pelo sistema de CT.



Figura 3.4: Dispositivos de testes (*phantom*) de referência para avaliação dos erros geométricos por imagem, segundo PTB, adaptado de [78]. 1- Placa de furo, 2 – Cilindro Escalonado, 3- Padrão Multi-Esferas, 4- Placa em fibra de vidro perfurada.

Nesta pesquisa optou-se por realizar a avaliação dos erros geométricos do sistema de radioscopia industrial empregando o método de instrumentos de referência. O que motivou a escolha deveu-se que o foco da pesquisa é a quantificação de erros de posicionamento e de montagem, visando avaliar o comportamento cinemático do sistema com maior rastreabilidade e que não fosse dependente das variações do ponto focal e da resolução espacial do detector, pois estes parâmetros também estão sob investigação e portanto poderiam influenciar as avaliações do sistema cinemático.

Os métodos de imagem encontrados na literatura sofrem influência devido a desvios em relação ao ponto focal, o tipo de material utilizado, além disso a avaliação dos erros no eixo de rotação é limitada [76, 77, 78].

2.2.5 Sistema de Radioproteção

Segundo a norma ASTM E1411 é de responsabilidade do usuário estabelecer práticas de segurança e saúde adequadas, assim como limitações regulatórias aplicáveis a prática daquele país. Portanto, nesta norma não é estabelecido quaisquer critério para estanquidade quanto a contenção das radiações no interior de cabines autoblindadas. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é a autoridade regulatória que legisla sobre o uso seguro das práticas de radiografia industrial.

Na pesquisa, o escopo dos equipamentos sob avaliação são cabines autoblindadas. Neste sentido, estes equipamentos estão classificados pela norma CNEN como instalação de operação tipo I. Na pesquisa foram avaliados os níveis de taxa de dose no em torno da blindagem segundo os critérios estabelecido pelas normas CNEN NN 6.04 (Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radiografia Industrial) publicada em março de 2013 [79].

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Gerador de Raios X

Os raios X são ondas eletromagnética, assim como a luz visível, as ondas de rádio, as microondas e os raios infravermelho e ultravioleta. Possuem comprimentos de onda aproximadamente entre 6 pm e 12 nm, com frequência variando entre cerca de 24 PHz e 50 EHz. Em fontes de origem elétrica, os raios X são produzidos quando elétrons, deslocando-se em alta velocidade, são abruptamente desacelerados ao entrar em contato com o alvo, um metal com elevado número atômico, normalmente o tungstênio. A energia cinética adquirida pelo elétron é convenientemente expressa em elétrons-volts (eV), unidade não pertencente ao SI e definida como [80]:

“O elétron-volt é a energia cinética adquirida por um elétron ao passar por uma diferença de potencial de um volt no vácuo”.

$$E [keV] = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Equação 3.1

onde, h é constante de Planck, λ é o comprimento de onda do fóton e c é a velocidade da luz no vácuo

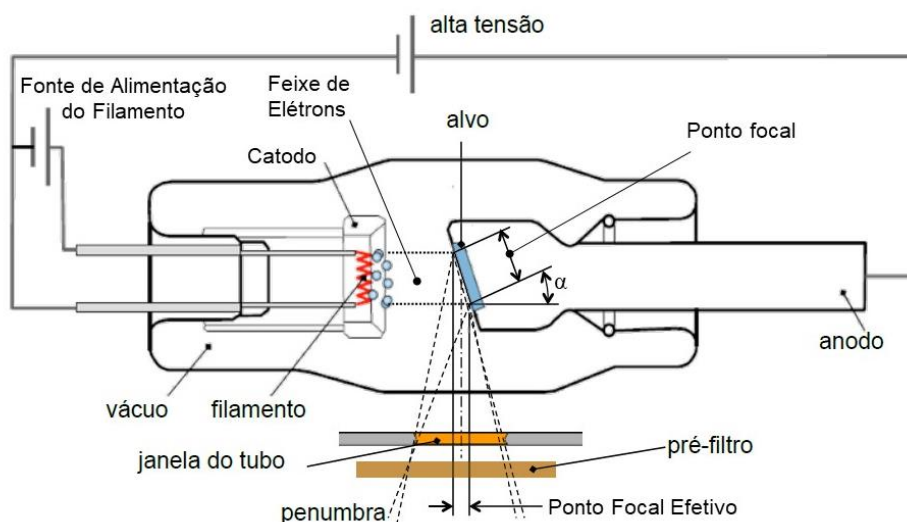


Figura 3.1: Representação esquemática de um tubo de raios X, adaptado de [80].

Um ponto focal menor contribui para que a resolução e a capacidade de detectar detalhes na imagem sejam melhoradas, permitindo menor penumbra geométrica nas imagens radiográficas magnificadas. Na Figura 3.1, constata-se que o tamanho real do ponto focal é diferente do tamanho aparente também conhecido como efetivo ou eletrônico. Os elétrons emitidos a partir do filamento são acelerados pela diferença de potencial aplicada ao tubo atingindo o ânodo e definindo o tamanho real do ponto focal. A inclinação do ânodo define o tamanho do ponto focal efetivo, como apresentado na Figura 3.1. O tamanho real do ponto focal pode ser estimado, multiplicando o tamanho do ponto focal efetivo pelo seno de inclinação do anodo [8,81].

Quando elétrons em alta velocidade interagem com o material do alvo, ocorrem distintas formas de colisão. A maioria destas interações envolve apenas a transferência de pequenos valores de energia conduzindo a ionização dos átomos do alvo e não resultando, portanto, na produção de raios X. Aproximadamente 99% da energia fornecida ao tubo é perdida na forma de calor. Existem, no entanto, dois tipos de interações que resultam na geração de fótons de raios X. Uma é a radiação de *Bremsstrahlung* ou de freamento enquanto a outra irá gerar Raios X Característicos [1, 80,81].

A radiação característica ocorre quando os elétrons vindos do catodo em alta velocidade se chocam com os elétrons de camadas orbitais mais internas dos átomos do anodo. Quando um elétron de um orbital externo ocupa o lugar deixado, a radiação característica é emitida. Os picos observados no espectro correspondem à energia necessária para um determinado elétron deslocar de camada (Figura 3.2 b). Já quando um elétron em alta velocidade atinge diretamente o núcleo do átomo do anodo (Figura 3.2 c), ocorre a conversão ideal de toda energia cinética em *Bremsstrahlung* [80].

O espectro de fótons emitidos por um tubo de Raios X depende de vários parâmetros tal como a tensão, a corrente, o material do anodo (caracterizado pelo número atômico), a geometria do tubo, pré-filtro, assim como o ângulo entre os elétrons incidentes na superfície do anodo e a saída dos fótons [81]. O tipo de objeto que se deseja inspecionar irá influenciar a escolha destes parâmetros.

O uso de filtros é justificado quando é desejado influenciar o efeito dos Raios X visando reduzir ou intensificar o contraste, assim como promover uma monocromatização do espectro [81]. Dependendo da finalidade da aplicação e faixa de energia, filtros sob a forma de placas metálicas com uma espessura definida podem ser inseridos na saída do gerador de raios X ou fixados no detector [8].

Quando é inserida uma placa de chumbo ou cobre entre a janela do tubo e o objeto ocorre um “endurecimento” dos Raios X levando a uma redução do contraste, pois irá promover uma compensação entre a maior probabilidade de interação dos fótons de baixa energia em relação aos de energia mais alta. Isto é conseguido através da atenuação significativa dos fótons de baixa energia do espectro, com pode ser visto na Figura 3.2 (linha vermelha pontilhada). Geralmente este recurso é utilizado quando é desejado inspecionar um objeto com espessuras amplamente variáveis numa única exposição, outros exemplos podem ser vistos em [8,81].

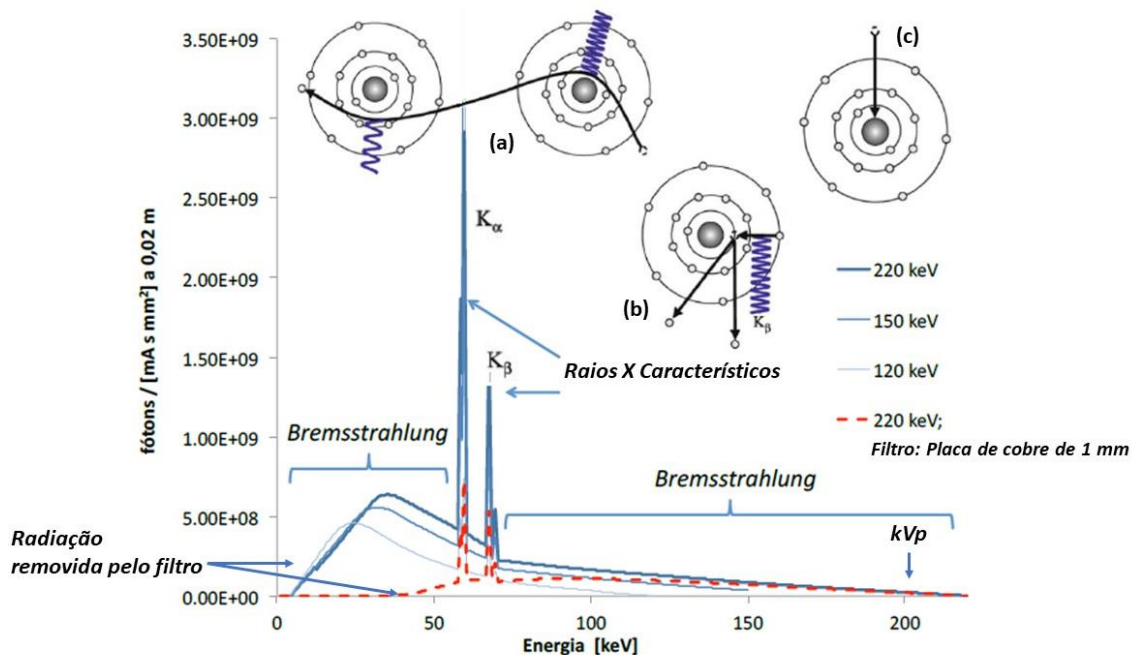


Figura 3.2: Espectro de Raios X - Bremsstrahlung e Raios X Característicos, adaptado de [80]

3.2 Processamento Digital de Imagem

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, em que x e y são coordenadas espaciais (plano), e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando x, y e os valores de intensidade de f são quantidades finitas e discretas, chamamos de imagem digital [82].

Uma imagem digital é composta de um número finito de elementos, cada um com localização e valor específicos. Esses elementos são chamados de elementos pictóricos, elementos de imagem, *pels* e *pixels*. *Pixel* é o termo mais utilizado para representar os elementos de uma imagem digital [82].

A imagem digital é caracterizada por números binários, que são dígitos que assumem os valores de 0 ou 1. Estes dígitos binários são geralmente denominados de bits e o conjunto desses, de bytes. Os bits e bytes são representações de pixels de uma imagem digital [40]. Como uma sequência combinatória dos binários, formam-se diferentes configurações de bytes representando as diversas tonalidades de níveis de cinza nos pixels. A Figura 3.3 mostra uma imagem digital de Raios X e tonalidades de cinza [1].

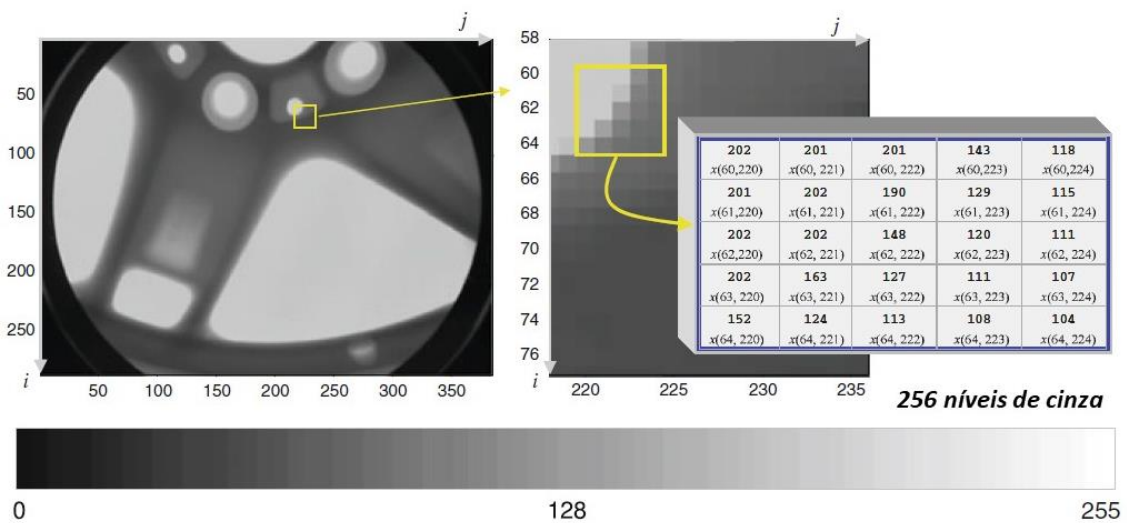


Figura 3.3: Imagem Digital gerada por Radioscopia e as tonalidades de cinza, adaptado de [1]

O número de tons de cinza é determinado por uma potência do tipo 2^n , onde n representa o número de bits. Não necessariamente as imagens digitais atingirão estes valores de cinza, representam somente o máximo que podem atingir.

Na Figura 3.4 é apresentado um diagrama em bloco simplificado de como ocorre o processamento digital de imagens num sistema de radioscopia industrial.

A primeira etapa consiste no processo de formação da imagem digital. Quando um objeto é irradiado por um feixe de Raios X, a matriz de sensores transformam as radiações incidentes em sinais elétricos contínuos cuja a amplitude e comportamento no espaço estão relacionados ao fenômeno físico que está sendo captado pelos sensores.

Para que seja disponibilizado na saída dos detectores uma imagem digital é necessário converter os sinais elétricos de contínuos para digital, para tanto faz-se necessário realizar amostragem e a quantização.

Segundo GONZALEZ [82], uma imagem pode ser contínua em relação às coordenadas x , y e também em relação a amplitude. A amostragem é o processo de digitalização das coordenadas e a quantização é a digitalização dos valores de amplitude. A qualidade da imagem digital é determinada, em grande parte, pelo número de amostras e de níveis discretos de intensidade utilizados na amostragem e na quantização.

Os *flat panels* e os CCD acoplados aos intensificadores de imagem, por exemplo, são estruturados na forma de matriz 2D de sensores, onde cada unidade representa um pixel na imagem digital. A resposta de cada sensor é proporcional a energia da radiação que atinge a sua superfície. Na Figura 3.4 é apresentado um diagrama em bloco do processo de digitalização das imagens radiográficas num sistema de radioscopia industrial empregado um detector digital matricial.

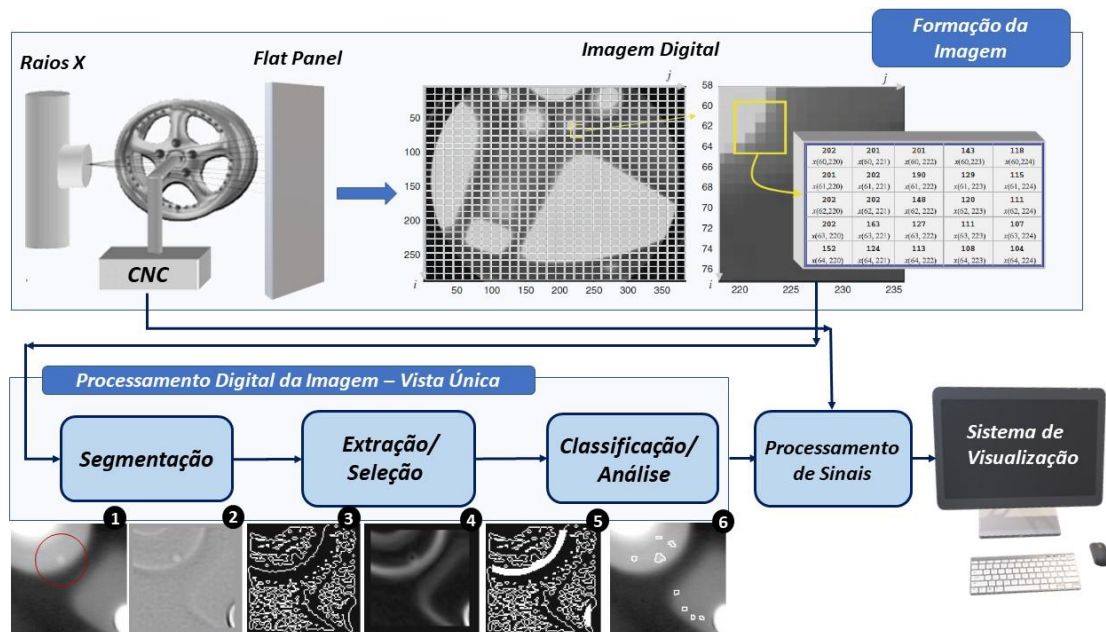


Figura 3.4: Processamento Digital de Imagem (PDI) de um Sistema de Radioscopia Industrial, adaptado de [1]. Exemplos de etapas do PDI para identificação de falhas: 1- Imagem de Raios X (sem processamento) indicando uma falha na borda de um fundido de alumínio; 2- Filtro Laplaciano; 3- Algoritmo cruzamento por zero para detecção de bordas; 4- Aplicação do operador gradiente para detecção de bordas remanescentes; 5- Detecção de borda após a adição de pixels de gradiente; 6- Imagem após PDI com identificação de falhas potenciais [1].

Na Figura 3.4 constata-se que após o processo de aquisição e digitalização das imagens uma série de recursos de PDI podem ser utilizados para a identificação de falhas que não são perceptíveis a visão humana, isto é verificado ao se comparar a imagem 1 com a imagem 6.

Essencialmente o processamento digital de imagens (PDI) envolvem processos cujas entradas e saídas são imagens. O PDI pode ser realizado em diversos níveis de processamento computacional classificados como baixo, médio ou alto [82]. A esta etapa de processamento alguns fabricantes denominam de elaboração de imagens [3].

O processamento em nível baixo envolvem operações primárias como o pré-processamento de imagem para reduzir ruído, o realce de contraste e o aguçamento de imagens. O processamento em nível médio já envolve tarefas como a segmentação (subdivisão de uma imagem em regiões ou objetos), no fundido de alumínio da Figura 3.4 o objeto de interesse é o defeito. A descrição desses objetos para reduzi-los a uma forma adequada para o processamento computacional consiste na classificação (reconhecimento) de objetos individuais. Um processo de nível médio é caracterizado pelo fato de suas entradas, em geral, serem imagens, mas as saídas são atributos extraídos dessas imagens (isto é, bordas, contornos e a identidade de objetos individuais). Por fim, o processamento de nível alto envolve “dar sentido” a um conjunto de objetos reconhecidos, como na análise de imagens e, no extremo dessa linha contínua, realizar as funções cognitivas normalmente associadas à visão [1,82].

Na imagem 6 quando utilizamos o termo “potencial” deve-se que uma região segmentada não implica em necessariamente ser uma etapa final para identificação de um defeito. Como pode ser visto na Figura 3.4, verifica-se que a segmentação é um primeiro passo de um processo de identificação de falhas. Este passo adicional pode incluir a análise da mesma região ou da peça em múltiplas vistas ou recursos voltados a reconhecimentos de padrões. Neste sentido, na Figura 3.4 constata-se que uma série de recursos de PDI foram aplicados para que posteriormente, a etapa de análise e extração pudesse classificar as regiões segmentadas, segundo determinados padrões a fim de verificar se os defeitos (objetos) não consistem numa falsa detecção. Este assunto é bem descrito em [1].

Atualmente, os modernos equipamentos de radioscopia possuem interfaces gráficas que permitem realizar PDI em nível baixo, médio e alto. Geralmente, recursos de PDI de nível alto, são comercializados como opcionais por fabricantes de equipamentos de radioscopia industrial.

Na etapa de processamento de sinais ou de associação de dados, correlaciona a informações de posição vindas do CNC com a imagem. O resultado é então, apresentado num dispositivo de exibição onde medidas podem ser realizadas na imagem.

3.3 Detectores utilizados em Sistemas de Radioscopia Industrial

3.3.1 Flat Panel (Digital Detector Array - DDA)

A base da estrutura de um detector flat panel (FPD) são os sensores discretos, dispostos como uma matriz, onde ocorre a captação de dados de cada uma destas partes discretas, que é ligada a uma estrutura de leitura para formar *pixels* de um arquivo de imagem digital. A Figura 3.5 apresentam características de um FPD.

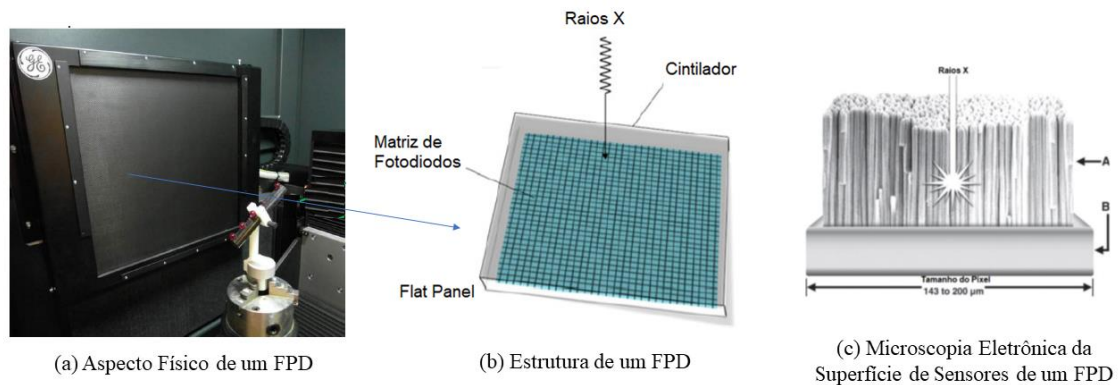


Figura 3.5: Estrutura de um FPD (a) [2], (b) [1], (c) Microscopia Eletrônica da Superfície de Sensores de um Flat Panel (FPD), onde A indica a camada de material cintilador Iodeto de Césio e B representa a camada fotodiodos e dos Transistores de Película Fina (Thin-Film Transistor – TFT) [16].

O funcionamento básico do FPD consiste na captura de raios X ou raios gama, seguidos de uma estrutura de leitura pixelada, ou seja, formada por vários pixels (elemento digital). Há várias opções de construção de um FPD, mas duas características os diferenciam que é a conversão da radiação em sinais elétricos, que pode ser de forma direta ou indireta. Pela forma direta, a radiação é captada diretamente por materiais fotodetectores (semicondutores) e transformada em cargas elétricas. A maneira indireta é caracterizada por apresentar um material cintilador (Figura 3.5-b) sobre a estrutura da matriz fotodetectores, no qual há primeiramente o processo de conversão da radiação (X ou gama) em luz para posterior conversão em sinais elétricos pelos fotodetectores, geralmente são de silício amorfo [40].

Existem algumas tecnologias para este tipo de sistema digital em relação à estrutura de leitura: detectores de carga acoplada (CCDs - charge coupled detectores), detectores a base de metal de óxido de silício complementar (CMOS – complementary metal oxide silicon), estruturas de leitura de diodo transistor filme fino de silício amorfo e estruturas de diodo de silício cristalino linear ou superficial. Outros materiais e estruturas são também possíveis, mas no fim um modelo pixelado é capturado e transferido a um computador para visualização. Nestas estruturas ficam acoplados os materiais de conversão primária, através de uma ampla variedade de meios de acoplamentos, dispositivos ou circuitos. Assim, dessas possíveis combinações, são produzidos diferentes tipos de FPD. Após essas diferentes formas de captura da radiação e conversão do sinal analógico nestes dispositivos de leitura, esse sinal é tipicamente amplificado e, por fim, digitalizado [27].

3.3.2 Intensificador de Imagem

O processo de conversão de Raios X em luz num Intensificador de Imagens (II), parte de uma tela luminescente normalmente composta por uma base plástica, onde é aderida a camada de grãos do material cintilante. A tela fosforescente converte radiação ionizante em luz visível, e o passo seguinte seria amplificar a intensidade deste sinal luminoso a um nível razoável para ser capturado pelo sistema de câmeras ou elemento CCD. Para maior aproveitamento da luz emitida, entre a base e os grãos existe um material refletor de luz; isso intensifica a luz que sai da tela em direção ao elemento CCD [16].

A conversão se dá em três etapas bem distintas: a primeira, onde os raios X se convertem em elétrons de alta energia pela interação destes com as camadas eletrônicas (*Compton* ou efeito fotoelétrico); a segunda onde parte da energia cinética destes elétrons é convertida em estados excitados no material fosforescente (ou fluorescente); a terceira é a emissão de luz, que ocorre quando os estados excitados voltam ao nível fundamental. Os raios X atravessam a base, e colidem com um elétron de um átomo da camada do material, esse elétron, recebendo a energia cinética do fóton faz uma pequena trajetória sofrendo desvios e colisões, e assim excitando camadas eletrônicas dos átomos do material cintilante, essas camadas voltam ao nível fundamental emitindo fótons de luz [16]. A Figura 3.6 apresenta uma ilustração do funcionamento interno de um intensificador de imagens.

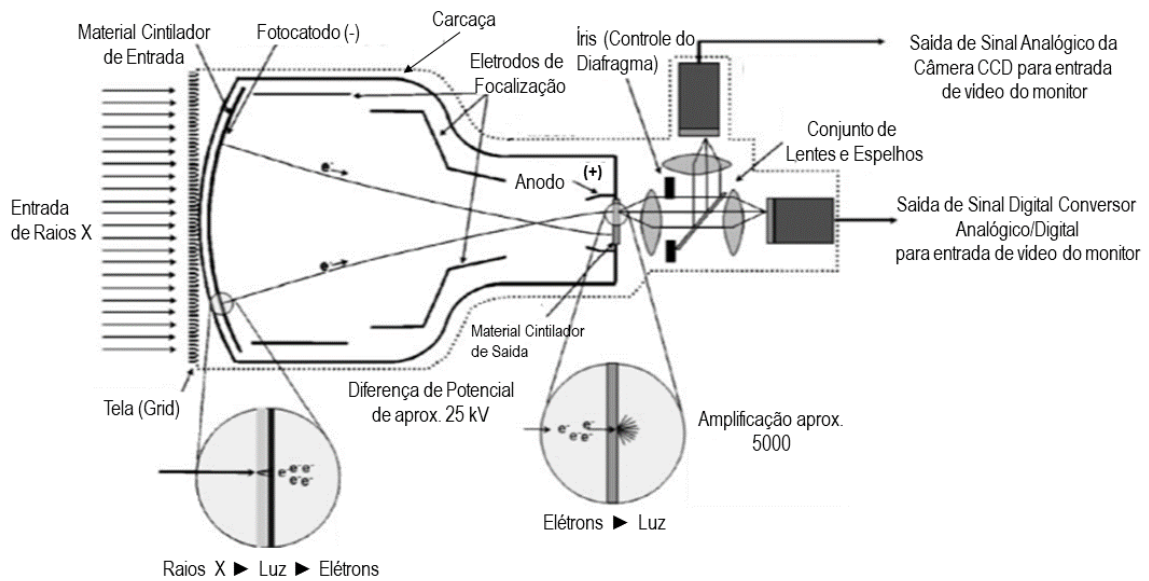


Figura 3.6: Exemplo de um Intensificador de Imagens adaptado de [68]

A Figura 3.6 mostra que a tela de conversão de raios X para luz tem um formato côncavo, o que traz distorções geométricas. Os II possuem um recurso chamado de “zoom eletrônico” que representa um aumento do campo de visão (Field-Of-View – FOV) para o CCD do II.

Quando o FOV é reduzido, uma área menor da tela cintiladora é selecionada e os sinais luminosos correspondentes aos Raios X são mapeados para uma mesma área do fósforo de saída do intensificador que por consequência irá iluminar a mesma área do CCD (a forma como é feito este mapeamento irá depender do intensificador de imagens), como resultado tem-se que esta área do objeto que foi inspecionado será ampliada. Agregado a isto observa-se que devido a uma menor sensibilização desta área de fósforo, para que seja produzida uma imagem com igual contraste faz-se necessário aumentar a tensão e/ou corrente (kV/mA). Portanto, quanto menor a FOV maior será a demanda de se aumentar os parâmetros radiológicos do Sistema de Radioscopia Industrial com II. Por outro lado, observa-se que quanto menor a FOV a resolução espacial e a distorção geométrica são diminuídas, pois estamos selecionado uma região mais próxima do centro do II. A Figura 3.7 mostra uma comparação entre a FOV de II e a distorção geométrica.

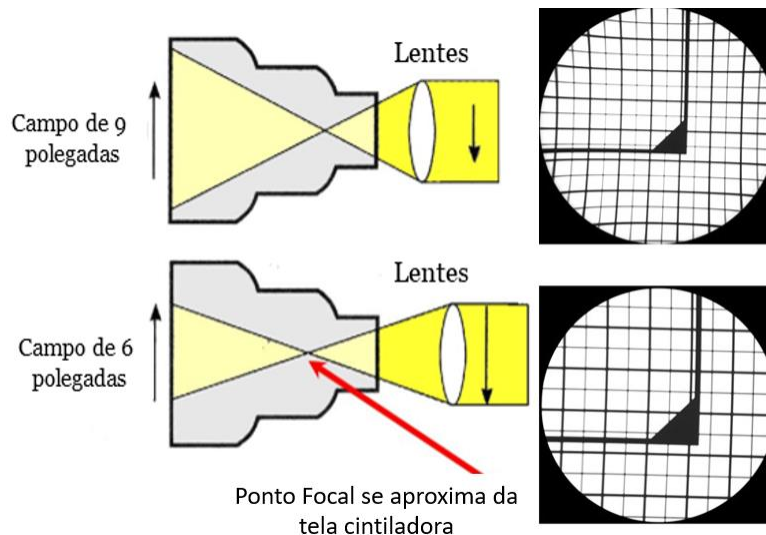


Figura 3.7: Comparação dos FOVs

3.4 Método de digitalização

O princípio básico da técnica de digitalização é tipicamente a conversão do sinal analógico em valores de pixels discretos. A digitalização é determinada por número de bits. Os detectores digitais podem ter geralmente 8 bits (256 valores de cinza), 12 bits (4096 valores de cinza), 14 bits (16384 valores de cinza) ou 16 bits (65536 valores de cinza). Quanto maior o número de bit mais acuradamente o sinal é quantizado (conversão do sinal analógico em sinais discretos).

No entanto, a digitalização está vinculada com o desempenho do dispositivo de leitura. A digitalização não necessariamente define a faixa de nível de cinza do detector. Essa faixa produzida é definida pela habilidade do dispositivo de leitura (CCD, CMOS ou TFT) em capturar o sinal, numa relação linear com o sinal gerado pelo dispositivo de conversão primária (cintilador, onde ocorre a conversão dos raios X em luz visível) [59].

Uma larga faixa de nível de cinza é obtida por um digitalizador de alta quantidade de bit. Porém, se por acaso a digitalização não for alta suficiente (com menor número de bit do que o alcançável pelo detector) para cobrir o conteúdo da informação a partir do dispositivo de leitura, isso pode resultar em sinal de ruído da digitalização. Esse fenômeno pode ser denominado de efeito de posterização (processo de redução do nível de cinza).

Reciprocamente, se a digitalização selecionada for significativamente maior do que a faixa do dispositivo de leitura (maior número de bit do que o alcançável pelo detector), então a quantização (amostragem) adicionada não pode necessariamente melhorar o desempenho. Em outras palavras, se a digitalização for concluída além da faixa linear da estrutura de leitura, estes níveis de cinza adicionais não seriam amostráveis [40,43].

Assim, a faixa útil de um detector é geralmente definida como o máximo nível que pode ser atingido, sem saturação, em relação à faixa de ruído. Isso pode ser referida como faixa dinâmica do detector. Há uma diferença entre a denominação de faixa dinâmica do detector e de faixa de espessura de um material específico (SMTR - specific material thickness range) como definido nesta norma ASTM E2597-14. Esta última é uma faixa prática verdadeira de um FPD, uma faixa mais estreita do que a faixa dinâmica do detector. Representa, para uma determinada espessura de um material específico, o sinal máximo possível alcançado pelo dispositivo. A SMTR é uma das propriedades a se considerar na seleção do FPD, visto que ela afeta a faixa de espessura que pode ser interpretada numa única visualização de uma imagem radiográfica digital. Vai depender da característica do dispositivo de leitura e o nível de digitalização [40, 59].

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho está relacionado a um estudo multidisciplinar visando o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da performance das partes componentes de um equipamento de radioscopia industrial. Para tanto, utilizou-se como referência principal a norma ASTM E1411-16 (*Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems*) onde são sugeridos somente ensaios estáticos. A justificativa para o uso desta norma deve-se que a ASTM E1411-16 é a norma mais atualizada no que tange a qualificação de equipamentos de radioscopia industrial. Foram empregados algoritmos de Visão Computacional desenvolvidos em MATLAB, proposto o uso de padrões de teste alternativos, desenvolvidos *phantoms* para avaliação da performance dos sistemas, assim como uso de padrões corporificados e equipamentos de medição rastreáveis. A metodologia foi aplicada a equipamentos comerciais de Radioscopia Industrial contendo Intensificador de Imagem e Flat Panel.

Após revisão bibliográfica e ensaios preliminares, foram levantados os principais parâmetros que permitem qualificar a performance de um equipamento de Radioscopia Industrial empregando intensificador de imagem ou *flat panel* contemplando seus subsistemas, ilustrada na Figura 4.1.

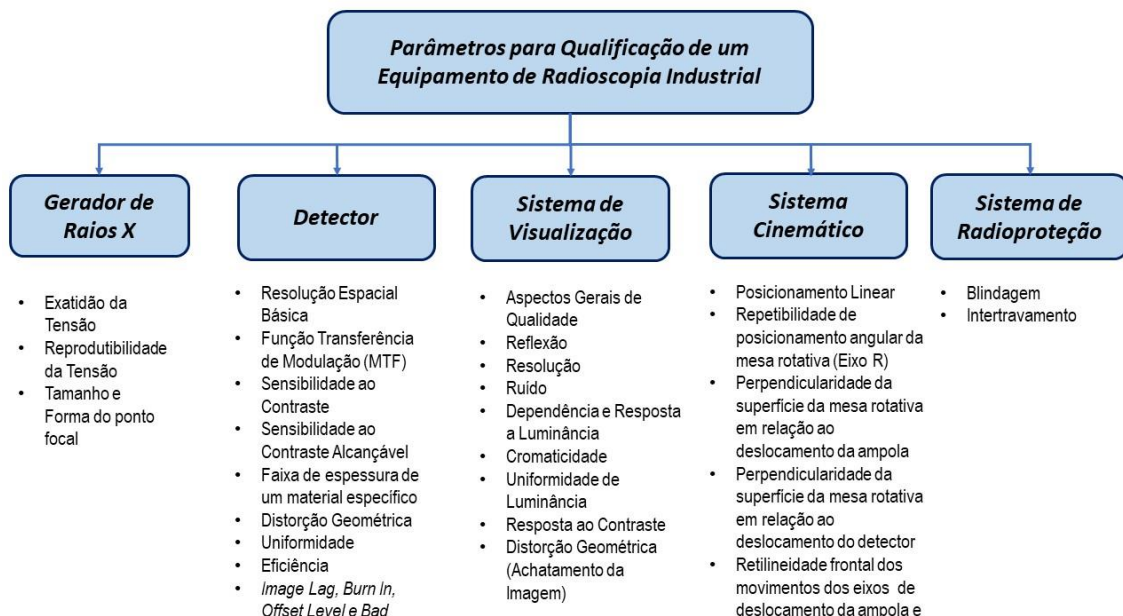


Figura 4.1: Proposta de parâmetros de qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial

Os parâmetros *Image Lag*, *Burn In*, *Offset Level* e *Bad Pixel Distribution* são específicos aos FPD e são bem descritos na norma ASTM E2597, por este motivo não serão aqui explicitados, mas devem ser avaliados caso o sistema de radioscopia em empregue este tipo de detector. A Tabela 4.1 apresenta uma correlação entre os parâmetros a serem avaliados neste trabalho e a norma ASTM E1411-16, destacando-se os implementos que serão propostos nesta pesquisa.

Tabela 4.1: Correlação dos Parâmetros da Metodologia com a norma ASTM E1411-16

Gerador de Raios X				
ID	Parâmetro de Qualificação proposto na Pesquisa	Avaliado na ASTM E1411-16		Limitações /Implementos da Pesquisa
		Sim	Não	
1	Exatidão da Tensão		x	A pesquisa propõe o uso de medidores de tensão não invasivos.
2	Reprodutibilidade da Tensão		x	
3	Estabilidade da Tensão		x	
4	Tamanho e forma do Ponto Focal	x		Não é avaliada a influência do aumento da potência em função do aumento da tensão e da corrente . A avaliação da direcionalidade é limitada. O trabalho propõe o uso do Star Pattern como dispositivo de teste empregando recursos de PDI como método alternativo ao preconizado na ASTM E1411.
Detector de Raios X				
ID	Parâmetro de Qualificação proposto na Pesquisa	Avaliado na ASTM E1411-16		Limitações /Implementos da Pesquisa
		Sim	Não	
5	Resolução Espacial Básica (SRb)	x		A pesquisa propõe a qualificação por objetos esféricos para magnificações distintas. As normas ASTM E2597-14 e ASTM 2737-18 propõe métodos e objetos distintos. O trabalho propõe o uso de um StepWedge associado a IQI's de furo, deste modo é possível numa única imagem extrair informações sobre Cs, CSa, SNR e a máxima espessura alcançável pelo sistema de Radioscopia. A pesquisa propõe a qualificação por um grid pattern empregando métodos de avaliação por PDI com MATLAB. A pesquisa propõe a qualificação por placas uniformes empregando métodos de avaliação por PDI com MATLAB.
6	Função Transferência de Modulação (MTF) para magnificações distintas		x	
7	Sensibilidade ao Contraste (Cs)	x		
8	Sensibilidade ao Contraste Alcançável (Csa)	x		
9	Faixa de espessura de um material específico (SMTR)	x		
10	Distorção Geométrica		x	
11	Uniformidade		x	
12	Eficiência	x		

Tabela 4.1 (continuação): Correlação dos Parâmetros da Metodologia com a norma ASTM E1411-16 (continuação)

Sistema de Visualização				
ID	Parâmetro de Qualificação proposto na Pesquisa	Avaliado na ASTM E1411-16		Limitações /Implementos da Pesquisa
		Sim	Não	
13	Aspectos Gerais de Qualidade	x		
14	Reflexão	x		
15	Resolução	x		
16	Ruído	x		
17	Dependência e Resposta a Luminância		x	Estes parâmetros são avaliados de forma qualitativa segundo a norma ASTM E2698, norma indicada pela ASTM E1411. Como implemento nesta pesquisa, estes parâmetros serão avaliados segundo o modelo de Barten ABNT NBR IEC 62563-1.
18	Cromaticidade		x	
19	Uniformidade de Luminância		x	
20	Resposta ao Contraste		x	
21	Distorção Geométrica (Achatamento da Imagem)	x		
Sistema Cinemático				
ID	Parâmetro de Qualificação proposto na Pesquisa	Avaliado na ASTM E1411-16		Limitações /Implementos da Pesquisa
		Sim	Não	
22	Posicionamento Linear		x	
23	Repetibilidade de posicionamento angular da mesa rotativa (Eixo R)		x	
24	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do tubo de Raios X		x	A norma ASTM E1411 não aborda procedimentos para avaliação dos erros geométricos. Neste sentido, adotou-se como referência para avaliação destes erros instrumentos metrologicamente rastreáveis e padrões corporificados. A metodologia tomou como referência técnicas de medição descritas em SOUSA [7].
25	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do detector		x	
26	Retilineidade frontal dos movimentos dos eixos de deslocamento do tubo de Raios X e detector.		x	
27	Paralelismo entre os eixos		x	
Sistema de Radioproteção				
ID	Parâmetro de Qualificação proposto na Pesquisa	Avaliado na ASTM E1411-16		Limitações /Implementos da Pesquisa
		Sim	Não	
28	Blindagem		x	A norma ASTM E1411 não aborda procedimentos para avaliação de dispositivos de segurança e radioproteção, Não é foco da norma aspecto de radioproteção, mas indica que devem ser seguidas as normas locais.
29	Intertravamentos		x	

Os ensaios se fundamentaram na consagrada técnica de Planejamento Experimental, amplamente utilizada no segmento industrial, tendo sido marcada pelo pioneirismo de Sir Ronald Aylmer Fisher a partir de 1920. A execução de um experimento planejado segundo critérios bem estabelecidos, oferecem ao pesquisador uma base válida para o desenvolvimento de um modelo empírico do sistema que está sendo investigado [83]. O planejamento de experimentos (em inglês *Design of Experiments*, DOE) irá permitir definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados buscando basicamente diminuir o erro experimental ou de medição, para que de forma empírica possa se extrair conclusões válidas e objetivas sobre a qualificação de um equipamento de Radioscopia Industrial.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Programa para desenvolvimento de algoritmos de PDI

Os algoritmos de PDI desenvolvidos neste trabalho utilizou como ferramenta o programa MATLAB versão R2017b. 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. 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 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 [84].

4.1.2 Programa de análise das imagens radioscópicas 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, 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 Padrões de Ensaio do Sistema de Visualização de Imagens

Os padrões de ensaios utilizados na qualificação dos sistemas de visualização são imagens digitais disponibilizada pelo relatório TG18 da *American Association of Physicists in Medicine* (AAPM). Os padrões apresentam uma nomenclatura TG18-xyz, onde x, y e z descrevem o tipo e as variações deste padrão em função do parâmetro a ser avaliado. Nos materiais relacionados na Tabela 4.2 são apresentados os padrões de ensaios utilizados e na Figura 4.2 são apresentados alguns exemplos. A descrição completa destes padrões podem ser encontradas no Anexo III do relatório TG18 [85].

Ao exibir os padrões no monitor de vídeo nenhuma função de processamento deve ser aplicada. Todos os padrões de ensaio possuam uma resolução e janelamento compatível com o número de bits do monitor a ser testado [86].

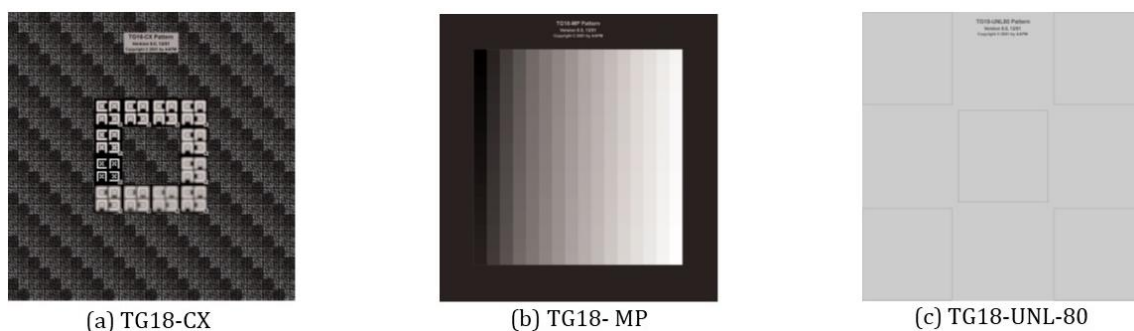


Figura 4.2: Exemplos de Padrões de Ensaio TG18 para avaliação dos parâmetros nos dispositivos de exibição de imagem. (a) Resolução (b) Resposta a Luminância (c) Cromaticidade e Uniformidade da Luminância.

4.1.4 Programa de análise dos Patterns do Sistema de Visualização de Imagens

Na avaliação do Sistema de Visualização das imagens precisa ser considerado principalmente o formato dos padrões das imagens digitais dos *patterns* que serão exibidos no monitor. Um fato que deve ser levado em consideração é que nem todos os Sistemas de Radioscopia geram imagens no formato DICOM.

A maioria dos equipamentos comerciais de Radioscopia Industrial geram imagens no formato JPEG, TIFF e se solicitado previamente, alguns fabricantes também podem disponibilizar imagens no formato DICOM.

Neste sentido, foram avaliados previamente 4 (quatro) visualizadores de imagem: 2 (dois) softwares de código aberto, *Image J* e *MicroView*; 1(um) software *Free Viewer*, *Jive DicomViewer* e por fim 1(um) software comercial, *Viewer* da fabricante RadiAnt.

Dentre estes o *Image J* na sua versão 1.49 foi o escolhido por ser o único capaz de fazer uso de todos os recursos de imagens de visualização 2D, tanto nos padrões de ensaio no formato DICOM quanto TIFF. Como também, dentre os quatro softwares analisados, é o único multiplataforma, ou seja, ele pode ser executado em qualquer sistema operacional desde que o interpretador esteja instalado, pois a base da linguagem de programação do *Image J* é o Java. Além disso, agrega-se ao fato de ser um software *Open Source*. Convém aclarar que parte das imagens objeto de análise não são DICOM, sendo de interesse a visualização 2D. Para um cenário diferente deste, novas avaliações devem ser realizadas não sendo possível afirmar que o *Image J* continuará sendo a solução ótima.

4.1.5 Dispositivos de teste, padrões corporificados e instrumentos de medição utilizados na metodologia

Na Tabela 4.2 são apresentados os dispositivos de teste, padrões corporificados e instrumentos de medição utilizados na metodologia para qualificação de equipamentos de Radioscopia Industrial. Afim de melhor ilustrar a especificação dos materiais, estes serão detalhados juntamente com a descrição da metodologia desenvolvida para a avaliação de cada parâmetro.

Tabela 4.2: Materiais utilizados na qualificação do equipamento de Radioscopia Industrial

Gerador de Raios X		
ID	Parâmetros	Materiais
1	Exatidão da Tensão	Medidor de Tensão Não Invasivo
2	Reprodutibilidade da Tensão	Medidor de Tensão Não Invasivo
3	Estabilidade da Tensão	Medidor de Tensão Não Invasivo com Software de Controle de Qualidade (<i>Waveforms</i>)
4	Tamanho e Forma do Ponto Focal	<i>Star Pattern</i> e Esfera de Tungstênio (1 mm)
Detector (Flat Panel / Intensificador de Imagem)		
ID	Parâmetros	Materiais
5	Resolução Espacial Básica (SRb)	<i>Bar Pattern</i> de Chumbo ou IQI de fio duplo (ASTM E2002)
6	Função Transferência de Modulação (MTF) para ampliações distintas	<i>Ball Pattern</i> de Alumina, Aço e Carvão de Tungstênio
7	Sensibilidade ao Contraste Alcançável (CSa)	<i>Step Wedge</i> Personalizado em Alumínio
8	Sensibilidade ao Contraste (Cs)	<i>Step Wedge</i> Personalizado em Alumínio e IQI de Furos ASTM E1025 em Alumínio
9	Faixa de espessura de um material específico (SMTR)	<i>Step Wedge</i> Personalizado em Alumínio

Tabela 4.2 (continuação): Materiais utilizados na qualificação do equipamento de Radioscopia Industrial

Detector (Flat Panel / Intensificador de Imagem)		
ID	Parâmetros	Materiais
10	Distorção Geométrica	<i>Grid Pattern</i>
11	Uniformidade	Placas Uniformes de Alumínio 20 mm / 6 mm
12	Eficiência	Imagens Digitais sem objeto entre a fonte e o detector
Sistema de Visualização		
ID	Parâmetros	Materiais
13	Aspectos Gerais de Qualidade da Imagem	<i>Patterns</i> TG18 e Lupa
14	Distorção Geométrica	<i>Patterns</i> TG18, Régua e Paquímetro
15	Reflexão da Tela e Iluminação do Ambiente	Fotômetro
16	Resposta de Luminância	<i>Patterns</i> TG18 e Fotômetro
17	Dependância Angular e Espacial da Luminância	<i>Patterns</i> TG18 e Fotômetro
18	Resolução Espacial e de baixo contraste	<i>Pattern</i> TG18 e Lupa
19	Cromaticidade	<i>Patterns</i> TG18 e MiniEspectrômetro Óptico
Sistema Cinemático		
ID	Parâmetros	Materiais
20	Posicionamento Linear	Relógio apalpador, base magnética e blocos padrão.
21	Repetibilidade de posicionamento angular da mesa rotativa (Eixo R)	Relógio apalpador, base magnética e blocos padrão.
22	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do tubo de Raios X	Relógio comparador, esquadro cilíndrico, base magnética.
23	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do detector	Relógio comparador, esquadro cilíndrico, base magnética.
24	Retilineidade frontal dos movimentos dos eixos de deslocamento do tubo de Raios X e detector.	Relógio comparador, esquadro cilíndrico, base magnética.
25	Paralelismo entre os eixos	Relógio comparador, esquadro cilíndrico, base magnética.
Sistema de Radioproteção		
ID	Parâmetros	Materiais
26	Blindagem	Câmara de Ionização e corpo de prova como objeto espalhador
27	Sistemas de Intertravamento	Não aplicável

4.1.6 Equipamentos de Radioscopia Industrial

Na Tabela 4.3 e 4.4 estão descritas as características técnicas dos equipamentos de Radioscopia Industrial A e B, denominados de RA e RB respectivamente, cuja performance serão avaliados segundo a metodologia desenvolvida.

Tabela 4.3: Especificações do equipamento RA

Gerador de Raios X	
Parâmetro	Especificação Técnica
Tensão Máxima	160 kV
Potência Máxima	1800 W (aproximadamente)
Ponto Focal ϕ (mm)	0,4 mm/1,0 mm (EN 12543-2)
Detector	
Parâmetro	Especificação Técnica
Detector	Intensificador de Imagem. telecâmara digital (1000 x1000 pixels), 12 bits e Lentes anti-astigmáticas específicas para imagens planas, possuindo fator de ampliação eletrônica em 9/6/4 polegadas, com os respectivos diâmetros nominais 230, 160 e 120 mm.
Sistema de Visualização	
Parâmetro	Especificação Técnica
Tamanho da Tela	19 polegadas (48,3 cm)
Resolução de Vídeo	1280 x 1024 pixels
Luminância nominal típica	250 cd/m ²
Sistema Cinemático	
Parâmetro	Especificação Técnica
Movimentação Fonte - Detector	Colunas Verticais
Máxima de Movimentação Distância Fonte - Detector	1047 mm
Graus de Liberdade	7
Curso do Eixo Vertical (mm)	900
Curso do Eixo X da Mesa Rotativa (mm)	600
Curso do Eixo Y da Mesa Rotativa (mm)	400
Tilt da do Tubo de Raios X e do Detector	$\pm 30^\circ$
Rotação da Mesa	n x 360 ^o
Sistema de Radioproteção	
Parâmetro	Especificação Técnica
Taxa de dose à 10 cm da superfície	< 1 μ Sv/hora

Quanto ao tubo de Raios X do equipamento RA a filtração inerente é de $0,8 \pm 0,1$ mm de Berílio, sendo acoplado um colimador a estrutura do tubo de Raios X sob a forma de um diafragma motorizado com lâminas verticais e horizontais. O equipamento RB especificado na Tabela 4.4 também possui a mesma estrutura de colimação, sendo a filtração inerente de $1,0 \pm 0,1$ mm berílio.

Tabela 4.4: Especificações do equipamento RB

Gerador de Raios X	
Parâmetro	Especificação Técnica
Tensão Máxima	225 kV
Potência Máxima	1000 W (aproximadamente)
Ponto Focal ϕ (mm)	0,4 mm/1,0 mm (EN 12543-2)
Detector	
Parâmetro	Especificação Técnica
Detector	Flat Panel. Área Ativa: 200 mm x 200 mm; Formato da Imagem: 1024 x 1024; Pixel Pitch: 200 μ m; Conversão A/D: 16 bits
Sistema de Visualização	
Parâmetro	Especificação Técnica
Tamanho da Tela	19 polegadas (48,3 cm)
Resolução de Vídeo	1280 x 1024 pixels
Luminância nominal típica	250 cd/m ²
Sistema Cinemático	
Parâmetro	Especificação Técnica
Movimentação Fonte - Detector	Arco C
Máxima de Movimentação Distância Fonte - Detector	1000 mm
Graus de Liberdade	5
Curso do Eixo Vertical (mm)	900
Curso do Eixo X da Mesa Rotativa (mm)	650
Curso do Eixo Y da Mesa Rotativa (mm)	650
Tilt do tubo de Raios X e do Detector	$\pm 45^\circ$
Rotação da Mesa	n x 360 $^\circ$
Sistema de Radioproteção	
Parâmetro	Especificação Técnica
Taxa de dose à 10 cm da superfície	< 1 μ Sv/hora

4.2 MÉTODOS

4.2.1. Gerador de Raios X

4.2.1.1. Exatidão

Este teste tem como objetivo avaliar se a indicação da tensão do tubo no console de comando do equipamento de Radioscopia está em conformidade com o valor medido, dentro dos padrões de desempenho aceitáveis. Segundo a NBR IEC 60601-2-7 [44] é tolerado um erro de $\pm 10\%$ em relação ao valor da tensão nominal e o registrado pelo medidor. No entanto neste trabalho será adotado um critério mais restritivo, $\pm 5\%$ em consonância com [45].

Para realizar esta medição, utilizou-se um medidor de tensão não invasivo modelo Cobia Flex, da fabricante RTI, Figura 4.3. A incerteza relacionada a medição é de 2% e a faixa de medição de tensão do equipamento é de 38 a 155 kV. O medidor opera com taxas de dose na faixa de 2,5 μ Gy/s à 175 mGy/s, sendo que a máxima dose não deve exceder a 1700 Gy. O medidor possui conexão via *Bluetooth* ou cabo USB (*Universal Serial Bus*) com *tablet* ou computador para transmissão das medidas dos ensaios e exibição dos resultados por interfaces gráficas, como *waveforms* [87].



Figura 4.3: Medidor de tensão não invasivo de um Sistema de Raios X (Cobia Flex), adaptado de [87]

Durante os ensaios experimentais foi mantida a distância, o alinhamento entre a fonte de Raios X e o medidor de tensão, assim como foi garantida que toda a matriz de detectores fosse exposta, respeitando os limites mínimo e máximo de exposição. O medidor possui alarmes que indicam a condição ótima desta medição. A temperatura do ambiente foi mantida controlada em $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$.

A taxa de dose que irá incidir sobre detector depende da tensão, corrente, tempo e distância. Neste sentido, previamente a realização do ensaio experimental estes parâmetros foram estimados tomando como referência a Equação 4.1, cujo os parâmetros são especificados em [88].

$$Dose (mR) = K \cdot kVp^2 \cdot I(mA) \cdot t (s) \cdot (1/d^2)$$

Equação 4.1

Segundo KOTHAN e TUNG [88] na Equação 4.1 o parâmetro K é uma constante no valor de $6,53 \times 10^{-4} \text{ (mR/mAs)(kVp}^2\text{)}^{-1}$, kVp é o valor da tensão nominal ajustada no console de comando, I é a corrente nominal ajustada no console de comando, t é o tempo de exposição e por fim, d é a distância entre a fonte e o detector.

Diante do exposto, a faixa de tensão escolhida para avaliação foi de 40 kV a 150 kV, onde a variação se deu em passos de 10 kV. A corrente foi ajustada e mantida em 3 mA, pois comumente nos equipamentos de radioscopia aplicados a fundidos de alumínio os valores máximos de amperagem não ultrapassam a este valor. Além disso, foi previamente verificado pela Equação 4.1 que se mantido este valor de corrente, durante um tempo de 5 (cinco) segundos e o medidor fixado a uma distância de 10 cm do colimador, os valores mínimos e máximos de taxas de dose para a faixa de tensão escolhida estariam dentro da tolerância do medidor de tensão não invasivo.

Na Figura 4.4, como exemplo, é apresentada o arranjo experimental para o equipamento RA, onde o medidor foi fixado a mesa rotativa.

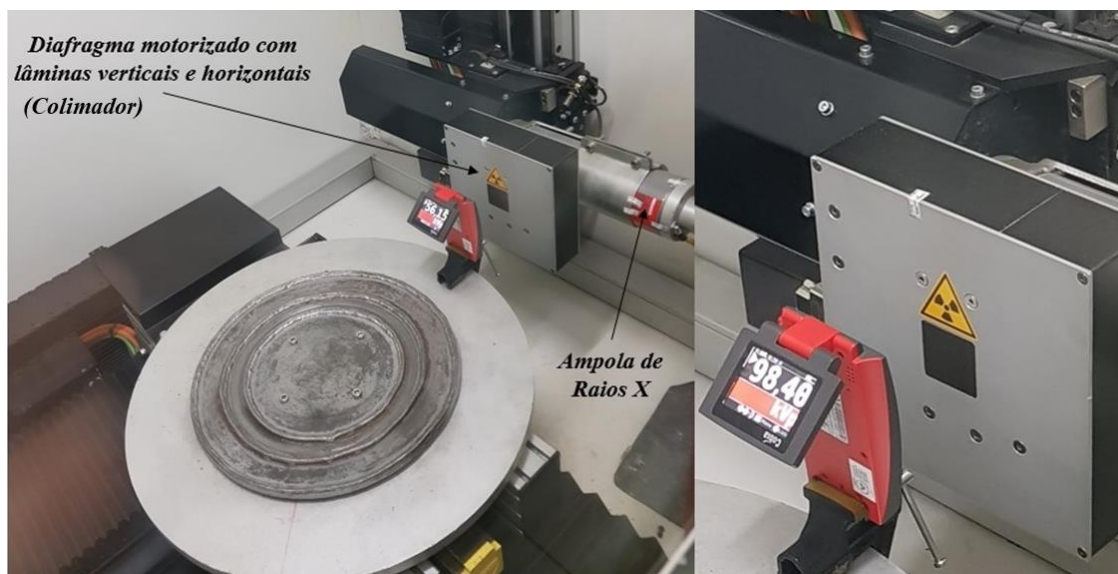


Figura 4.4: Arranjo Experimental do medidor de tensão não invasivo para o equipamento de radioscopia industrial RA

Deste modo o desvio entre os valores nominais e os valores médios, foram calculados utilizando a Equação 4.2:

$$d(\%) = 100 \cdot \frac{|kVp_{nominal} - kVp_{médio}|}{kVp_{nominal}}$$

Equação 4.2

Onde $kVp_{nominal}$ é o valor da tensão ajustada no console de comando e o $kVp_{médio}$ é a média de n medidas obtidas nas mesmas condições de ensaio com o medidor de tensão não invasivo.

A escolha do número de repetições para o cálculo do $kVp_{médio}$ foi fundamentada na inferência estatística para uma única amostra, conforme descrito em MONTGOMERY[83]. Foi realizado um experimento prévio visando estimar a média e o desvio padrão amostral. Na sequência foi verificada a quantidade n repetições necessárias para que o erro relativo k da média μ fosse inferior a 5%. O intervalo de confiança para a média μ **foi obtido** através da Equações 4.2 e a estimativa do número de n repetições para um k menor que 5% foi calculado pela Equação 4.3.

$$\bar{x} - \frac{t_{\alpha/2, n-1} \cdot s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{t_{\alpha/2, n-1} \cdot s}{\sqrt{n}}$$

Equação 4.3

Onde $\alpha = 0,05$, n é número de repetições, \bar{x} é média amostral, s é o desvio padrão amostral, sendo $t_{\alpha/2, n-1}$ obtido através dos valores tabelados de uma distribuição *T-Student* para $n - 1$ graus de liberdade.

$$n \geq \left(\frac{2 \cdot t_{\alpha/2, n-1} \cdot s}{k \cdot \bar{x}} \right)^2$$

Equação 4.4

Conforme já descrito, vários parâmetros podem influenciar a taxa de dose no medidor não invasivo, portanto é conveniente avaliar as incertezas associadas a esta medição visando o conhecimento de fatores que podem ser controlados no processo de medição. Neste sentido, com a Equação 4.5 foi possível realizar uma estimação da avaliação Tipo A da incerteza padrão (μ_A) e com Equação 4.6 a avaliação Tipo B da incerteza padrão (μ_B). Os conceitos e a metodologia para o cálculo destas incertezas estão bem descritos em [54].

$$\mu_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Equação 4.5

$$\mu_B = \frac{kVp_{nominal} \cdot \sigma}{k_p}$$

Equação 4.6

Onde é k_p é o fator de abrangência para o intervalo de confiança. Neste trabalho adotou-se o valor de 1,96 que corresponde a 95% [54]. Na Equação 4.5 a incerteza da medição fornecida pelo fabricante é representada por σ que corresponde ao valor de 2%.

Finalmente, a partir destas avaliações foi possível calcular a incerteza padrão combinada (μ_c) pela Equação 4.7.

$$\mu_c = \sqrt{(\mu_A)^2 + (\mu_B)^2}$$

Equação 4.7

4.2.1.2. Reprodutibilidade

A reprodutibilidade visa avaliar o quanto o valor da tensão ajustada no console de comando se mantém constante para uma série repetida de exposições. Para tanto, foi calculado o coeficiente de variação através da razão entre o desvio padrão e o valor médio para o conjunto de medidas. Um valor aceitável é uma variação inferior a 0,05 [89]. Portanto a reprodutibilidade pode ser calculada pela Equação 4.8.

$$CV_R = \frac{s}{kVp_{m\u00e9dio}}$$

Equação 4.8

4.2.1.3. Variação da tensão em função do tempo de exposição

Este ensaio visa avaliar o quanto o valor da tensão medida se mantém constante ao longo do tempo de exposição. Durante os ensaios foram coletadas as medidas de tensão máxima e mínima em função do tempo de exposição através de *waveforms* disponibilizados pelo sistema, para a faixa de valores de tensão entre 40 kV e 150 kV. A variação percentual foi calculada pela Equação 4.9, estando em conformidade para uma variação inferior a 5%.

$$V (\%) = 100 \cdot \left(\frac{kVp_{m\u00e1ximo}}{kVp_{m\u00ednimo}} - 1 \right)$$

Equação 4.9

A Figura 4.5 apresenta um resumo da metodologia desenvolvida para qualificação da exatidão, reprodutibilidade e da variação da tensão em função do tempo de exposição de um equipamento de radioscopia industrial.

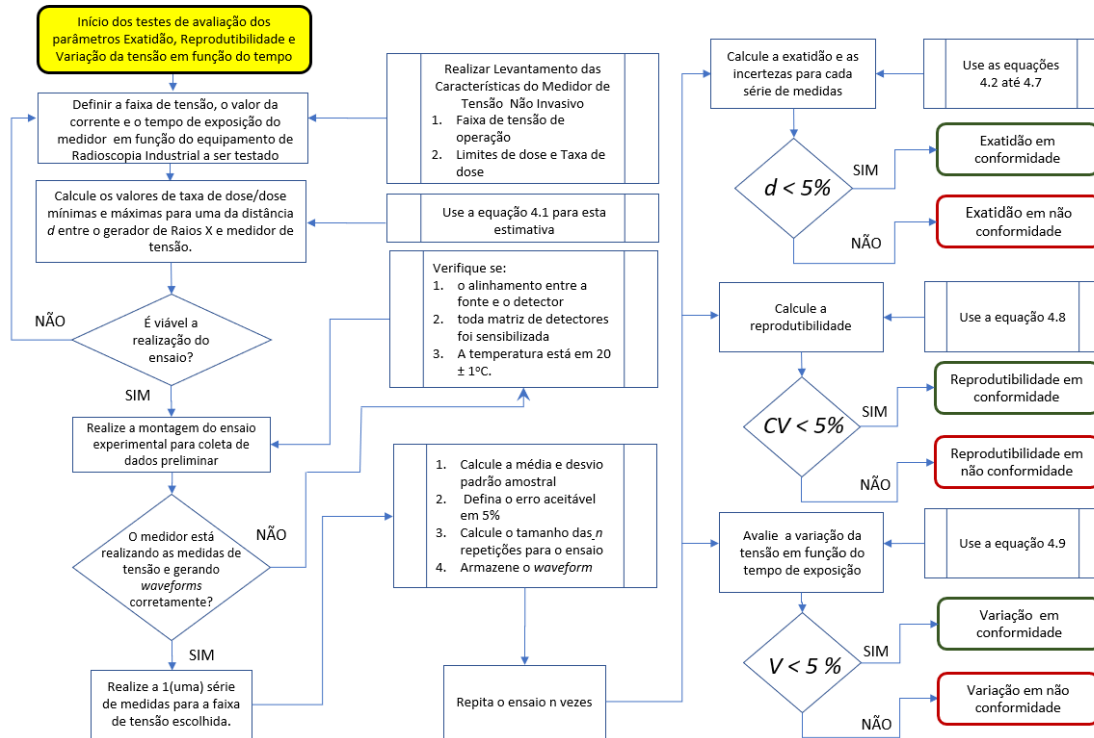


Figura 4.5: Fluxograma da metodologia desenvolvida para qualificação da exatidão, reprodutibilidade e da variação da tensão em função do tempo de exposição de um equipamento de radioscopia industrial.

4.2.2. Tamanho e Forma do Ponto Focal

Neste trabalho foi proposto que a medição do tamanho do ponto focal fosse realizada por um *Star Pattern* ou Padrão Estrela. A validação das medidas foi realizada comparando os resultados obtidos com o *Star Pattern*, com o tradicional método preconizado pela norma EN 12543-5 empregando uma esfera de tungstênio de 1 mm e a metodologia de cálculo IPL. Uma das grandes vantagens do *Star Pattern* comparado aos demais *patterns* deve-se que este é um padrão de teste que permite investigar a avaliação da anisotropia da resolução espacial em magnificação inferior a preconizada pela norma EN 12543-5 [52]. Idealmente a qualidade desta avaliação no *Star Pattern* tende a ser melhor do que os demais dispositivos de testes devido a sua geometria circular, permitindo assim uma forma mais assertiva na avaliação da direcionalidade.

O Star Pattern é um padrão de teste circular que consiste em um número específico de regiões (*wedges*) feitos de materiais absorventes e não absorventes distribuídos alternadamente num ângulo específico em sua estrutura circular. Se tomarmos como referência o centro do *Star Pattern*, um raio decrescente leva a um aumento da frequência espacial e o contraste pode ser determinado em função desta frequência, Figura 4.6.

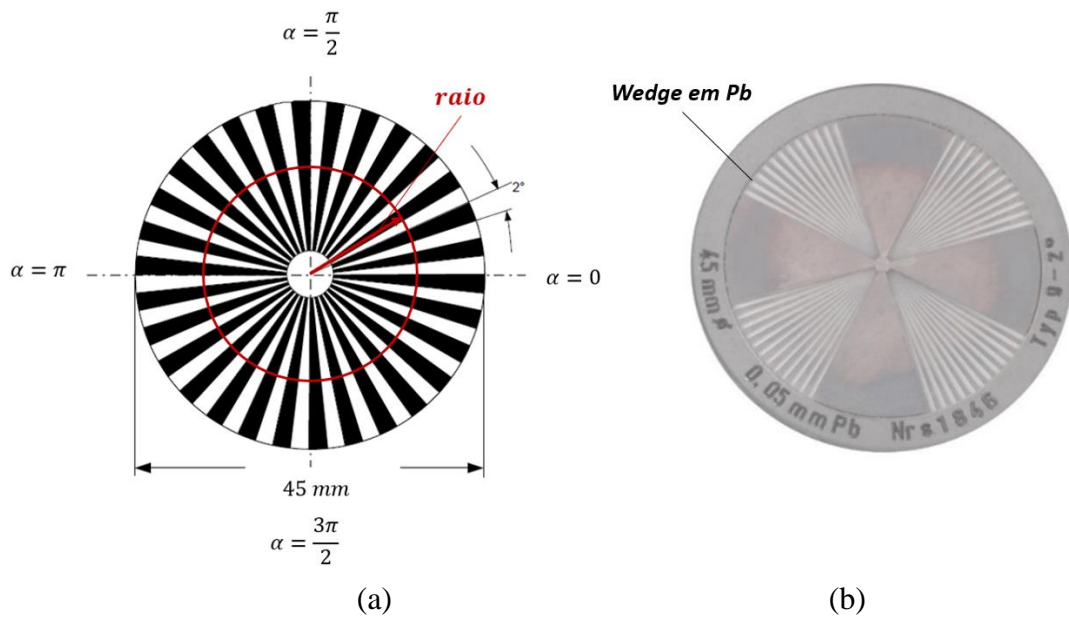


Figura 4.6: Modelos de *Star Pattern* com com ângulo de 2 ° [90]

O *Star Pattern* utilizado neste trabalho foi o da Figura 4.4 (b) que possui 44 (quarenta e quatro) pares de *wedges* divididos em 4 (quatro) setores de 45 ° e cada *wedge* diverge num ângulo de 2 ° e possui um raio de 22,5 mm. A base de construção do *Star Pattern* é sintética e os *wedges* são confeccionados em chumbo (Pb) com espessura de 0,05 mm. A largura de cada *wedge* ao longo do raio de 45 mm em qualquer direção n pode ser calculada pela Equação 4.10.

$$(\Delta)_n = 2\pi \cdot \lambda \cdot \frac{\alpha}{360}$$

Equação 4.10

Onde Δ é a largura de cada *wedge*, α é o ângulo entre os *wedges* do *Star Pattern* e λ corresponde ao tamanho da corda do centro do dispositivo até a região desejada.

Neste sentido, para o *Star Pattern* utilizado no experimento, se for assumido que λ é igual a 22,5 mm (*raio do wedge*) pode-se afirmar que a máxima largura no *wedge* a esta distância é de 785 μm para o *Star Pattern* utilizado no experimento. Portanto, sendo capaz de medir MTF com pelo menos 0,64 pl/mm. Este limite pode ser calculado através da Equação 4.11 para direção vertical (x) e horizontal (y). Evidentemente quanto menor for o tamanho da corda, mas próximo estaremos do centro e portanto maior será a MTF.

$$(MTF)_{x,y} = \frac{1}{2\Delta}$$

Equação 4.11

A Equação 4.11 é uma forma de estimar, numa primeira aproximação, se o *Star Pattern* adotado terá sensibilidade para detectar a penumbra gerada por um determinado ponto focal quando exposto aos Raios X. Numericamente não há impedimento para uso de um *Star Pattern* de 2 ° para pontos focais de 0,4 mm. No entanto, a penumbra será mais próxima do centro do *Star Pattern* e dependendo da resolução do detector poderá ser gerada uma imprecisão maior se comparado com as medidas do ponto focal de maior tamanho. Por esta razão, convém realizar um ensaio preliminar afim de confirmar as primeiras impressões obtidas pelas equações 4.10 e 4.11, sendo conveniente utilizar a maior magnificação possível desde que compreenda toda a região do *Star Pattern*.

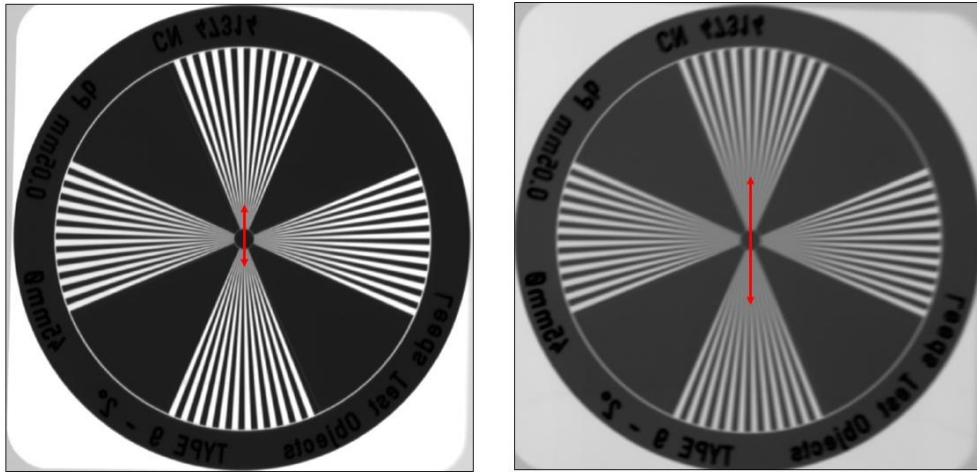
A Figura 4.7 ilustra o tamanho da penumbra para 2(dois) pontos focais para o equipamento RB, a saber: 0,4 mm (foco fino) e 1 mm (foco grosso) para mesma magnificação. Neste caso, verifica-se que a penumbra no foco grosso é maior do que o ponto focal de 0,4 mm, onde foi possível a discriminação da MTF para ambos pontos focais no sistema de radioscopia industrial RB. Caso não fosse possível a discriminação da MTF no foco fino, um *Star Pattern* de menor grau deve ser escolhido.

Ao descrevermos a MTF por uma função *sinc*² [91] e relacionando com o tamanho do ponto focal efetivo, temos que:

$$MTF(ko_{x,y})_n = \frac{\sin(\pi k_0 l \frac{M-1}{M})}{\pi k_0 l \frac{M-1}{M}}$$

Equação 4.12

Onde l deverá ser comprimento relacionado ao ponto focal para os eixos vertical ou horizontal; M é a magnificação; k_o é a frequência espacial para a primeira região de baixo contraste (nulo) do *Star Pattern*; n é o sentido na direção horizontal x e vertical y



(a) 45 kV/3 mA – Ponto Focal : 0,4 mm (EN 12453-2) (b) 45 kV/13 mA – Ponto Focal : 1,0 mm (EN 12453-2)

Figura 4.7: Comparação das penumbras geradas no *Star Pattern* no sistema de Radioscopia Industrial RB para diferentes pontos focais.

O tamanho do ponto focal efetivo p para cada direção n pode ser obtida como uma função da máxima frequência espacial resolvível para o primeiro nulo da Equação 4.12, que resultará na Equação 4.13 e a magnificação pode ser calculada pela Equação 4.14.

$$p(x,y)_n = \frac{M}{MTF_{x,y} (M - 1)}$$

Equação 4.13

Onde M é a magnificação.

$$M = 1 + \frac{b}{a}$$

Equação 4.14

Onde a é a distância da fonte ao objeto e b é a distância do objeto ao detector

Analisando a Equação 4.13 verifica-se que a determinação da MTF é dependente da penumbra no primeiro nulo ou primeira região de baixo contraste, esta pode ser obtida através de softwares de análise de imagens radiográficas como o Isee!.

No entanto, após análise de métodos tradicionais de determinação das regiões de baixo contraste num *Star Pattern* e do método IPL empregando uma esfera de tungstênio (ASTM E1165-12), verificou-se que estes envolvem uma relativa incerteza se obtida a penumbra de forma visual pelos usuários finais, pois o tamanho e a forma desta penumbra irá depender do fluxo e densidade de potência dos raios X (W/m^2), assim como a resolução do detector para uma dada magnificação. Outro fator que também pode influenciar na decisão dos usuários finais são os parâmetros de qualificação dos dispositivos de exibição de imagem (monitores vídeo).

A avaliação do ponto focal com *Star Pattern* envolve duas etapas. A primeira foi a obtenção das imagens radiográficas através dos ensaios experimentais e a segunda etapa foi o cálculo do ponto focal empregando o algoritmo desenvolvido em MATLAB a partir das imagens radioscópicas geradas na primeira etapa.

Na etapa experimental, foram realizados ensaios com equipamentos comerciais de radioscopia RA e RB, visando verificar a influência no tamanho e na anisotropia do ponto focal em função do aumento da potência sob duas análises. A primeira aumentando gradativamente corrente e mantendo fixa a tensão. A segunda aumentando gradativamente a tensão e mantendo fixa a corrente.

Previamente ao início dos ensaios foi verificado se a temperatura ambiente se encontrava em $20,0 \pm 1,0$ °C e medida a resolução do detector. Antes da montagem do arranjo foi zerado os eixos do CNC, sendo verificado o alinhamento e a perpendicularidade entre a fonte e o detector. Na Figura 4.8 é mostrado o arranjo do ensaio experimental para avaliação do ponto focal do equipamento de radioscopia industrial RA.



Figura 4.8: Arranjo experimental para avaliação do ponto focal com *Star Pattern* do equipamento de radioscopia industrial RA

Nos equipamentos de radioscopia industrial RA e RB a corrente foi variada no *range* de 3 a 13 mA em passos de 2 mA e a tensão mantida fixa para todas as medidas. A faixa de tensão foi variada no *range* de 45 kV, 95 kV, 125 kV e 145 kV e a corrente mantida fixa.

A escolha dos valores a serem fixados em relação a tensão e a corrente tomaram como referência o ajuste que resultasse em melhor contraste com uma SNR >100. Neste sentido, deve ser considerada a possibilidade de uso de uma placa de cobre na saída do feixe de Raios X para que as boas condições de contraste sejam mantidas para valores mais elevados de potência.

Uma vez obtidas as imagens radioscópicas estas foram arquivos de entrada para a segunda etapa, onde foi calculado o tamanho e avaliada a anisotropia do ponto focal por algoritmo em MATLAB. A Figura 4.9, resume os procedimentos experimentais para avaliação do ponto focal.

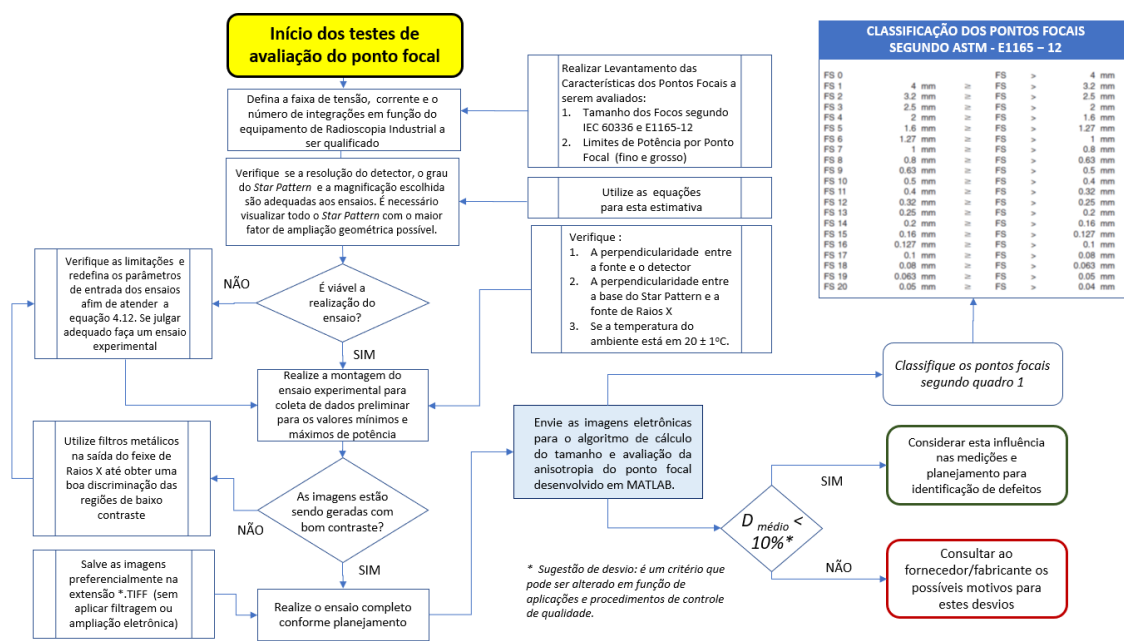


Figura 4.9: Fluxograma do planejamento experimental para avaliação do ponto focal.

O algoritmo para o cálculo do ponto focal se fundamentou no artigo de WEIß [55] que utilizou o *Star Pattern* para caracterização da resolução espacial de microtomógrafos. Neste trabalho, o objetivo principal do algoritmo é a detecção das regiões de contorno em baixo contraste que em PDI é comumente conhecido como detecção de bordas ou *Edge Detection*.

Os detectores de borda são métodos de processamento de imagem local desenvolvidos para detectar os *pixels* em que a intensidade de uma função imagem muda abruptamente.

Três passos são fundamentais para a detecção das bordas [82]: suavização da imagem para redução de ruído; detecção dos pontos de borda, pois esta operação tira da imagem todos os pontos que são candidatos potenciais a se tornarem pontos de borda; localização da borda, que tem como objetivo selecionar, dentre os possíveis pontos de borda, apenas aqueles que de fato pertencem ao conjunto de pontos que formam uma borda.

Os métodos para detecção de bordas podem utilizar filtros com uma ou mais máscaras através de operadores de *Roberts*, *Sobel*, *Prewitt* e *Gaussiana* que estão fundamentados em operadores de gradiente. No entanto, estas técnicas são limitadas em relação a redução do ruído e a natureza das bordas. O método de detecção bordas de *Marr-Hildreth* ou Laplaciano da Gaussiana (LoG - *Laplacian-of-Gaussian*) e o método de *Canny* visam otimizar esta técnica pois são fundamentados em operadores diferenciais.

A técnica de detecção de bordas é utilizada em várias áreas de conhecimento, como processamento de imagens biomédicas [93] e identificação de ameaças por scanners de Raios X [1].

O algoritmo desenvolvido neste trabalho utilizou o Laplaciano da Gaussiana para detecção das regiões de baixo contraste, pois apresenta uma boa capacidade de detecção das bordas sem perda de informação e possui complexidade computacional inferior ao método de *Canny* [90]. Esta técnica é clássica em PDI, sendo abordada por MARR e HILDRETH [91] desde 1980.

A função kernel do algoritmo está fundamentada num operador Laplaciano de uma função gaussiana 2D, representado por $\nabla^2 G$, onde ∇^2 é o operador Laplaciano e G é a função gaussiana 2D. A função gaussiana 2D é representada pela Equação 4.15, que é um filtro passa-baixa, responsável pela pré-suavização (*pre-smoothing*) do ruído associado as imagens radioscópicas, definida por uma função bidimensional $f(x,y)$, obtidas nos ensaios experimentais do *Star Pattern*:

$$G(x, y) = e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

Equação 4.15

Após as diferenciações do $\nabla^2 G$, teremos a Equação 4.16, chamada de Laplaciano da Gaussiana (LoG) [82].

$$\nabla^2 G(x, y) = \left[\frac{x^2 + y^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right] \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

Equação 4.16

Onde σ nas Equações 4.15 e 4.16 é o desvio padrão tal que $\sigma > 0$, a suavidade (*smoothness*) das bordas ou contorno das regiões de baixo contraste no *Star Pattern* é controlada pelo aumento do σ [1].

O algoritmo realizada a convolução do filtro LoG com a imagem radioscópica $f(x, y)$ do *Star Pattern*, conforme Equação 4.17.

$$g(x, y) = \nabla^2[G(x, y) \star f(x, y)]$$

Equação 4.17

No algoritmo antes da realização da convolução as imagens radioscópicas do *Star Pattern* são pré-processadas. Primeiramente estas imagens foram convertidas em ponto flutuante e alocadas numa matriz com os níveis de cinza correspondentes. Na sequência é realizado um processo de interpolação e reamostragem. De modo objetivo estas duas etapas tem por função melhorar a resolução entre os *wedges* e aumentar a precisão do cálculo das zonas de contraste devido a uma melhor definição da bordas, pois atenuam eventuais artefatos.

Quando trabalhamos com sinais digitais amostrados de tamanho finito o *aliasing* é um resultado inevitável. Os principais problemas que o *aliasing* espacial geraria nos *wedges* do *Star Pattern* seriam a inserção de artefatos como serrilhados (*jaggies*), saliências falsas e o aparecimento de padrões de frequência ausentes na imagem original. Os conceitos sobre processamento digital de imagem são bem descritos em [82] e exemplos de aplicação em MATLAB com imagens radiográficas podem ser vistos em [1]. Neste trabalho optou-se pela interpolação bicúbica, pois apresentou uma nitidez entre os *wedges* ligeiramente melhor do que a bilinear, apesar de um tempo maior de processamento. O *elapsed time* medido no MATLAB para interpolação bilinear foi de 0,163 segundos e na bicúbica foi de 0,357 segundos.

Na sequência foi calculado contraste para a região circular de interesse do *Star Pattern* a partir da relação de Michelson, conforme Equação 4.18.

$$f(x, y) = C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

Equação 4.18

Onde L_{max} e L_{min} correspondem ao máximo e mínimo de níveis de cinza da imagem, respectivamente.

Na sequência os resultados são normalizados, obtendo-se para cada região o nível de contraste entre 0 e 1. A região de baixo contraste foi tomada para localizações a menos de 10% (0,1) de todos os níveis de cinza dos *wedges*.

Na Figura 4.10 é mostrado um diagrama em bloco resumino as etapas do algoritmo para a avaliação do tamanho e anisotropia do ponto focal.

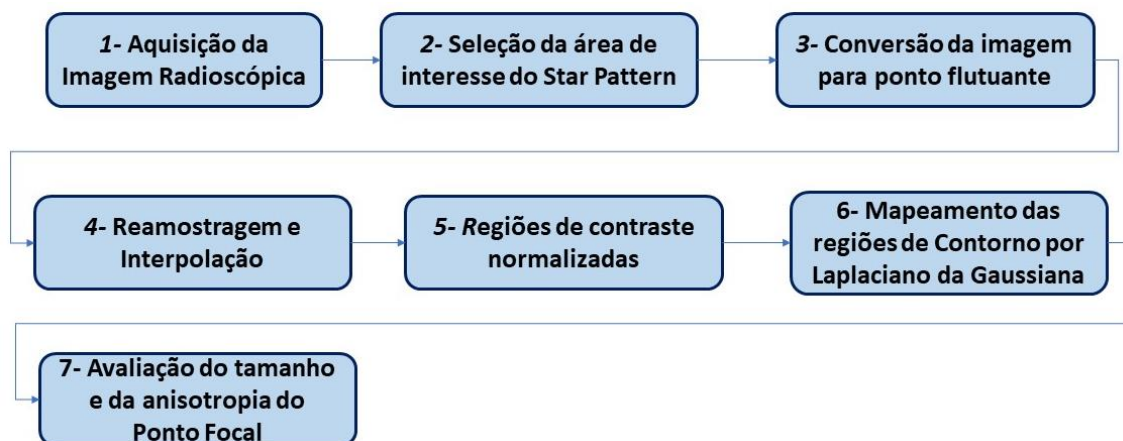


Figura 4.10: Diagrama em blocos do algoritmo para detecção das bordas das regiões de penumbra do *Star Pattern*

A Figura 4.11 representa o resultado da etapa 5. A imagem do *Star Pattern unrolled*, foi obtida por uma transformação do plano cartesiano para polar. O eixo y apresenta a largura do *wedge* Δ , correspondente ao tamanho da corda ou raio no *Star Pattern* calculada conforme Equação 4.10. Esta representação auxilia a avaliação da anisotropia e o dimensionamento do ponto focal. Verifica-se que nas regiões de baixo contraste não há anisotropia entre a direção vertical e horizontal, devido as diferentes amplitudes de penumbra nas respectivas direções.

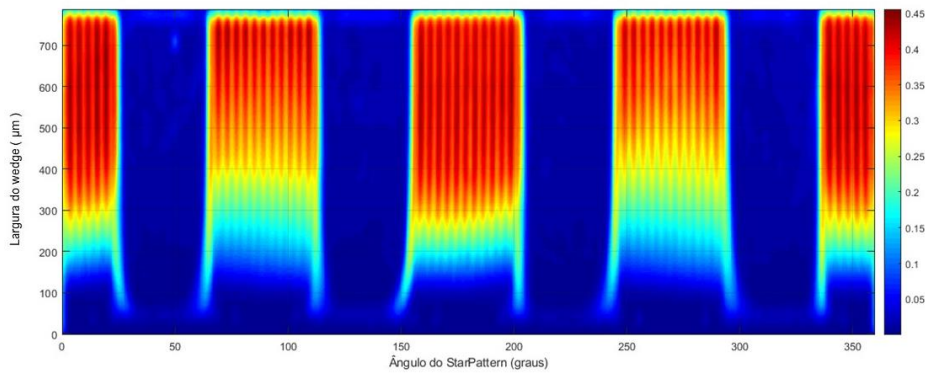


Figura 4.11: Mapa de Contraste de um Star Pattern Tipo 2º para um ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD.

A Figura 4.12 representa o resultado da etapa 6, sendo dado destaque a região de contorno para as áreas de mais baixo contraste. Verifica-se que a largura do *wedge* (Δ), para cada sentido foi em torno de 20 μm para todas as direções. Portanto, estes valores são somados em cada sentido para direção vertical e horizontal, sendo possível calcular a Função de Transferência de Modulação (MTF) pela Equação 4.11. Em seguida é possível calcular o tamanho do ponto focal na direção horizontal (x) e vertical (y) pela Equação 4.12. A partir da Figura 4.12, constatou-se um desvio inferior a 5% em relação ao valor 0,4 mm, que é o valor nominal do foco fino (0,4 mm).

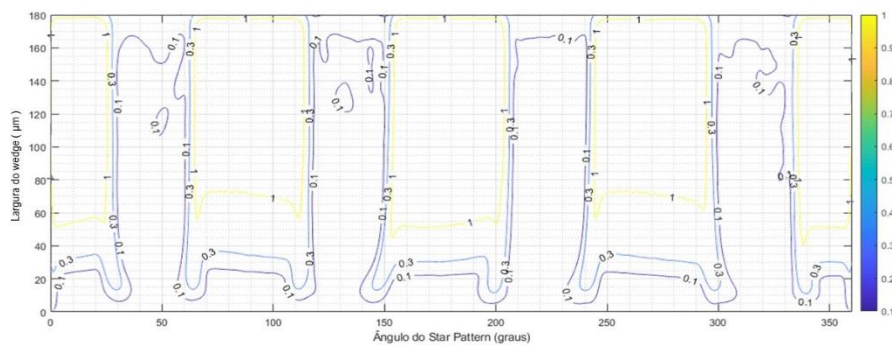


Figura 4.12: Mapa de Contorno com $\sigma = 4$, num Star Pattern Tipo 2º para um ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD.

Os valores encontrados com o *Star Pattern* estão de acordo com a norma IEC 60336, para obter os resultados segundo a norma EN 12543 faz-se necessário realizar uma conversão aplicando a Equação 4.19, obtida através de uma regressão linear simples a partir dos valores disponibilizados em [92], apresentados na Tabela 4.5.

$$\text{ponto focal (EN 12543)} = 1,599p + 0,4873$$

Equação 4.19

Onde p é o tamanho do ponto focal obtido no Star Pattern para a direção vertical ou horizontal.

Tabela 4.5: Equivalência do tamanho dos pontos focais entre as normas IEC 60336 e EN12453

IEC 60336 (mm)	EN 12453(mm)	IEC 60336 (mm)	EN 12453(mm)
0,06	0,20	1,20	2,50
0,20	0,50	1,50	3,00
0,30	0,75	1,80	3,60
0,40	1,00	2,00	4,00
0,50	1,30	3,00	5,50
0,60	1,50	3,20	5,80
0,80	1,90	4,00	7,00
1,00	2,30	4,50	7,50

O critério para escolha do valor de σ na Equação 4.15, foi o ajuste que geravam imagens com bordas mais definidas e menor ruído sem perda de informação. Foram testados alguns valores positivos de σ e o melhor resultado foi obtido com $\sigma = 4$., Figura 4.13.

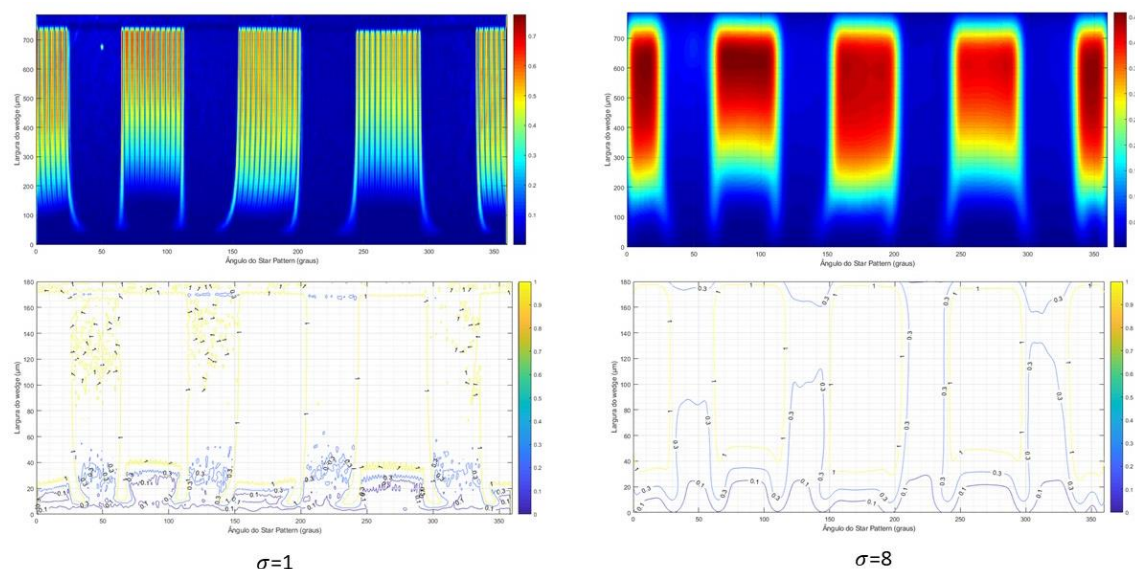


Figura 4.13: Mapas de Contorno das regiões de contraste do Star Pattern Tipo 2°. Ensaio empregando um tubo de Raios X minifoco de 0,4 mm, magnificação 2,5, 38 kV/3mA com detector FPD, com $\sigma=1$ e $\sigma=8$

Percebe que com $\sigma=1$ o nível de suavização é bem inferior do que com $\sigma=8$ e as regiões de contraste não estão bem caracterizadas, percebendo-se uma presença maior do efeito *aliasing*. No entanto, com $\sigma=8$ percebe-se que há uma perda de informação nas bordas, que também resultará em dificuldades para o estabelecimento das regiões de contraste levando a erros na detecção das bordas.

Os cálculos dos pontos focais dos tubos de Raios X dos equipamentos RA e RB obtidos com Star Pattern, foram comparados com os ensaios experimentais empregando uma esfera de tungstênio com diâmetro de $1,0 \pm 0,01$ mm conforme citado na norma EN 12543-5. A metodologia de cálculo do ponto focal seguiu o procedimento descrito no ANEXO A da norma ASTM E1165-12. A metodologia para a quantificação da penumbra tomou como referência a metodologia *integrated line profile* (IPL). Este método foi escolhido por ser referenciado na norma ASTM E1411 (*Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems*) como uma metodologia para o cálculo dos pontos focais. É recomendado aos usuários finais que o cálculo do tamanho do ponto focal segundo a norma ASTM E1165-12 deva ser realização através da Equação 4.20.

$$p_{x,y} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{U_{lm}^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot SR_b\right)^2}$$

Equação 4.20

Onde M é a magnificação, U_{lm} é a penumbra da imagem, SR_b é a resolução espacial básica do detector e p é o tamanho do ponto focal na direção horizontal (x) ou na direção vertical (y)

Para se determinar a dimensão da penumbra, traçou-se um perfil sobre a borda da imagem radiográfica da esfera com o auxílio do programa Isee!. Segundo BAVENDIEK [34], o comprimento da linha do perfil deve ser cerca de três vezes o tamanho esperado em comprimento ou largura da referida medida. Utilizando a ferramenta do Isee! os valores entre 16% e a 84 % do máximo nível de cinza da imagem foram calculados e fornecido o valor da penumbra. Na Equação 4.20 as variáveis magnificação e a resolução espacial básica são conhecidas. A resolução espacial pode ser obtida com IQI de fio duplo conforme norma ASTM E2002. A magnificação pode ser calculada através da Equação 4.14.

Detalhes sobre o procedimento passo a passo para obtenção da Equação 4.20 e da forma de obtenção da penumbra é bem descrito em [34], assim como na norma ASTM E1165-12 [51].

O cálculo dos desvios foi construído a partir da análise de cerca de 61 (sessenta e uma) imagens radioscópicas, 40 (quarenta) imagens do *Star Pattern* e 21 (vinte e uma) imagens mais representativas da esfera, pois na norma ASTM E1165-12 recomenda que a energia seja de 75% ($\pm 5\%$) da energia máxima do tubo, mas não maior que a tensão máxima utilizada em todas as aplicações, assim no equipamento RA a tensão ajustada foi de 70 kV e nos equipamentos RB o a tensão ajustada foi de 60 kV. Por este motivo, a quantidade de medidas para o método empregando a esfera foi menor. No equipamento RA, para o ponto focal fino, a corrente foi variada de 3 a 9 mA em passos de 2 mA. No ponto focal grosso, a corrente variou de 3 a 13 mA, mantendo o incremento de 2 mA. No equipamento RB, para o ponto focal fino, a corrente foi variada de 3 a 11 mA em passos de 2 mA. No ponto focal grosso, a variação de corrente para o equipamento RB foi a mesma para o equipamento RA.

As imagens foram adquiridas com 8 integrações e 400 ms de aquisição de forma a garantir um SNR superior a 100.

4.3 Avaliação dos Parâmetros do Detector

4.3.1. Resolução Espacial do Detector (SRb)

Neste trabalho, a resolução espacial básica (SRb) foi quantificada de acordo com a norma ASTM 2597 (*Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays*), empregando um IQI de fio duplo especificado segundo a norma ASTM E2002 (*Practice for Determining Total Image Unsharpness in Radiology*) conforme descrito na seção 2.2 [93].

Segundo a norma ASTM 2597, a distância entre a fonte o detector não deve ser inferior a 1000 mm, a distância deve ser tal que o feixe de Raios X ilumine toda a área do detector. A largura do feixe incidente não deve ser consideravelmente maior que área do detector, se necessário, o recursos de colimação podem ser utilizados. Caso exista a necessidade de uma distância menor, isso deve ser especificado no procedimento. Não deve haver qualquer objeto entre a fonte e o detector, assim como pré-filtros.

O IQI de fio duplo deve ser posicionado com um desvio angular entre 2° e 5° em relação ao eixo horizontal do detector.

A qualidade da radiação e o tamanho do ponto focal influenciam na resolução espacial. Neste sentido, se o equipamento de radioscopia industrial conter um FPD e operar com tensão acima de 160 kV, como 225 kV ou 320 kV, recomenda-se que o ensaio deva ser realizado na faixa de 220 kV de forma que o ajuste da corrente permita que o valor de cinza do IQI atinja 80% ($\pm 5\%$) do nível de saturação do detector. Se o equipamento de radioscopia operar com tensão inferior a 160 kV, a tensão de 90 kV deve ser utilizada. Os recursos que podem ser utilizados para atingir este requisito é diminuir o valor da corrente ou aumentar a distância entre a fonte e o detector. Em último caso, se não for possível, consulte a norma ASTM 2597 para seleção de filtros que possam auxiliar a medida. A medida da máxima resolução alcançável do sistema de radioscopia foi realizada no foco fino, sem recursos de ampliação eletrônica.

Neste trabalho as imagens dos IQI foram analisadas pelo software Isee! onde foi traçado um perfil de linha na imagem radioscópica do IQI, conforme Figura 4.14. A SRb é obtida pela Equação 4.21.

$$SRb = \frac{1}{2} \cdot u_t$$

Equação 4.21

Onde u_t é o valor da penumbra.

O valor de u_t é o primeiro par de fios não resolvido, ou seja, quando a separação entre os fios não pode ser visualizada. O critério para a determinação do par de fios não resolvido, é a análise da diferença entre os valores de máximo e mínimo de intensidade no perfil de linha. Se esta diferença for menor do que 20% da intensidade máxima, é considerado que o par de fios não está resolvido, Figura 4.14. No exemplo em questão a resolução espacial básica alcançada pelo detector é de 160 μm , pois o último par de fio não resolvido foi o 8D. A Tabela 2.4 especifica os valores dos parâmetros do IQI de fio duplo.

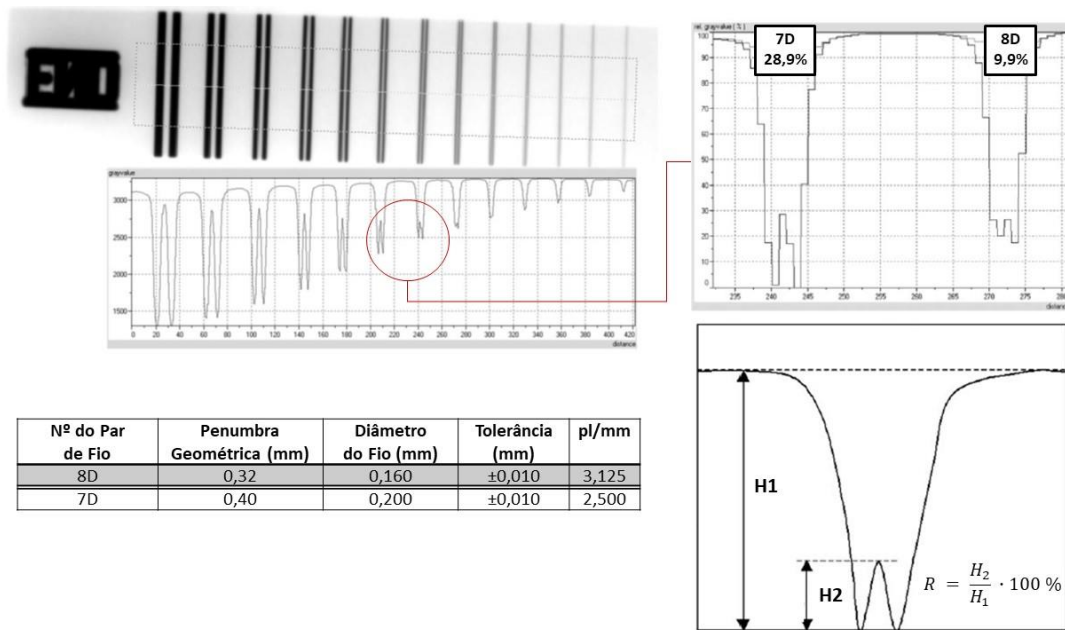


Figura 4.14: Análise de imagens de pares de fios para o cálculo da resolução espacial básica

A resolução espacial pode ser medida de diversas formas, um dispositivo de teste alternativo ao IQI de fio duplo pode ser um *bar pattern* que deve ser especificado em função da máxima resolução espacial nominal alcançável do sistema de radioscopia industrial, geralmente são fabricados de materiais de alta absorção. Na Figura 4.15 (a) é a imagem radioscópica de um *bar pattern* obtido no equipamento RA, com resolução máxima de 5 pl/mm. Já a Figura 4.15(b) é um *bar pattern* de 10 pl/mm e (c) é a imagem radiográfica da Figura 4.15 (b), adaptado de RUECKEL *et al.*, [9].

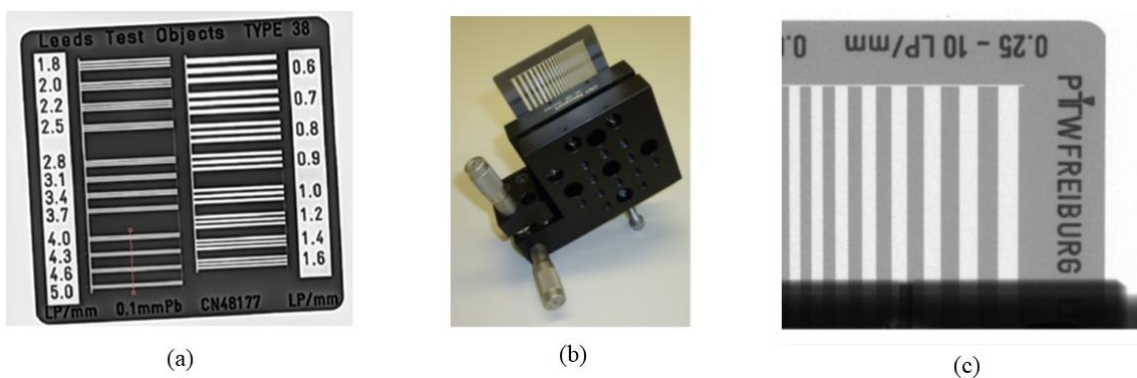


Figura 4.15: Tipos de IQI Bar Pattern

4.3.2. Função Transferência de Modulação (MTF) para Magnificações distintas

A Função Transferência de Modulação (*MTF – modulation transfer function*) é uma medida de capacidade do sistema em reproduzir o contraste da imagem de uma diferença de espessura e/ou densidade do objeto em várias frequências espaciais, ou níveis de detalhes. Portanto, quanto maior a MTF maior será a nitidez na visualização dos detalhes.

Os sistemas de radioscopia se caracterizam por serem dinâmicos, por isso é muito comum o uso do recurso de magnificação (ampliação geométrica) ou movimentação da peça. Portanto, convém avaliar a influência da magnificação na MTF. Com o aumento da magnificação, sendo esperado que haja um aumento da MTF do detector. No entanto, espera-se uma tendência de um aumento da penumbra devido a proximidade com o ponto focal. Portanto, a perceptível melhora da MTF com o aumento da magnificação tem relação com um compromisso entre a escolha do tamanho do ponto focal e o tamanho do pixel do detector.

Segundo BOYCE e SAMEI [95], experimentos com ponto focal de 0,6 mm resultou em pouca ou nenhuma melhora da MTF com a magnificação, pois não foi compensada a perda de resolução devido a penumbra gerada pelo ponto focal. Em contrapartida, pontos focais menores apresentaram melhora da MTF dependendo do tamanho do pixel. A magnificação resultou num menor tamanho de pixel efetivo, aumentando assim a resolução do sistema. Outrossim, a resolução também é afetada pelo tempo e número de integrações, assim como o coeficiente de atenuação do material absorvente usado como *phantom* para avaliação MTF [78].

Diante do exposto, no sentido de avaliar a influência da magnificação na MTF foram desenvolvidos para pesquisa IQI's esféricos de alumina (3,95 g/cm³), aço (7,86 g/cm³) e carbetto de tungstênio (14,7 g/cm³), conforme Figura 4.16. As esferas possuem $20 \pm 0,04$ mm de diâmetro e estão fixadas numa haste de fibra de carbono (1,5 g/cm³).

O dimensionamento da esfera tomou como referência a norma VDI/VDE [96]. Em cada sistema as esferas foram posicionadas entre a fonte e o detector para 5 (cinco) diferentes magnificações. Os valores de tensão e corrente foram escolhidos de modo a gerar uma SNR >130, atendendo critérios mínimos de qualidade segundo a norma ASTM E2597. Todos os parâmetros radiológicos (kV/ mA), tempo e número de integrações foram mantidos constantes para os ensaios nos equipamentos de radioscopia industrial RA e RB.

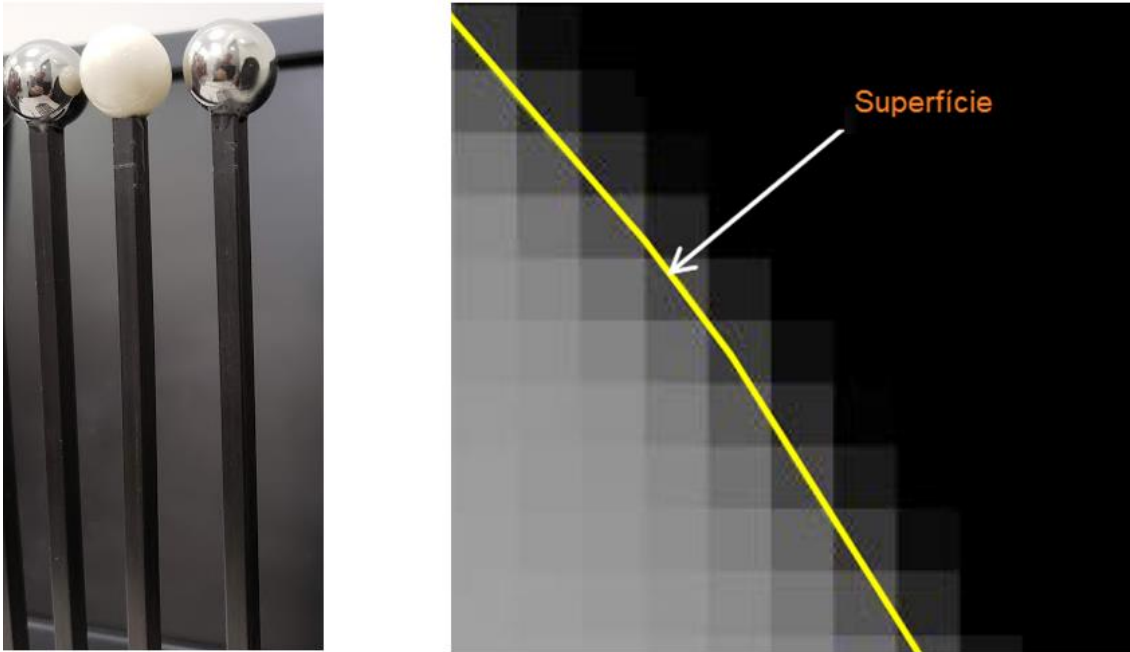


Figura 4.16 : Esferas para avaliação da resolução espacial em função da magnificação (esquerda) e a região ISO 50% dada como referência ao Isee! para o cálculo da MTF adaptado de MÜLLER [57]

A escolha de um IQI esférico deve-se que superfícies arredondadas possuem apenas um ponto cuja normal é paralela ao eixo de rotação da mesa rotativa e portanto sua geometria nominal é invariante com a rotação, mitigando a influência de erros de alinhamento. Os materiais de alta absorção na fabricação dos IQI são necessários pois geram alto contraste facilitando a detecção das bordas, procurou-se escolher materiais com densidades bem distintas visando avaliar a influência do coeficiente de atenuação na MTF.

O critério para escolha da haste carbono deveu-se por possuir mais baixa densidade comparada aos demais materiais e baixo coeficiente de expansão térmica, aproximadamente $(0,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}K^{-1}$.

As MTF foram computadas para cada magnificação, com o auxílio do software Isee!. A determinação da superfície do objeto tomou como referência a ISO-50% , Figura 4.8 (b). Para algumas posições nas direções vertical e horizontal a partir do centro da esfera foram realizadas diversas medidas e escolhida a que gerasse a MTF mais favorável ao sistema para estimativa da resolução.

A partir do conhecimento da MTF foi realizada uma estimativa da resolução espacial (R) do sistema considerando uma $MTF_{20\%}$ para um determinado tipo de material e magnificação, através da Equação 4.22.

$$R = \frac{1}{2 \cdot MTF_{20\%}}$$

Equação 4.22

4.3.3. Sensibilidade ao Contraste Alcançável (CSa)

Neste trabalho buscou-se relacionar a CSa a diferentes qualidades de radiação e espessuras. Para tanto, foi utilizado um *Step Wedge* em alumínio fabricado de acordo com a norma ASTM E2597, conforme já visto na Figura 2.3.

No arranjo experimental o *Step Wedge* foi posicionado de forma que o dispositivo ocupasse toda a área do detector com o maior número de degraus, dentro do possível, e que a magnificação atendesse a recomendação da norma ASTM E1000-16 (*Standard Guide for Radioscopy*) [45]. Esta norma recomenda que a magnificação para tubos de Raios X que não sejam microfoco o fator de ampliação geométrica não exceda a 5. No entanto, a norma indica que magnificações entre 1,2 e 1,5 fornecem um bom compromisso entre a resolução espacial e a imagem magnificada. Na Figura 4.17 é mostrado o ensaio experimental para o equipamento de radioscopia industrial RA. Esta condição foi conseguida com o objeto posicionado a 420 mm do detector, gerando uma magnificação de 1,54.

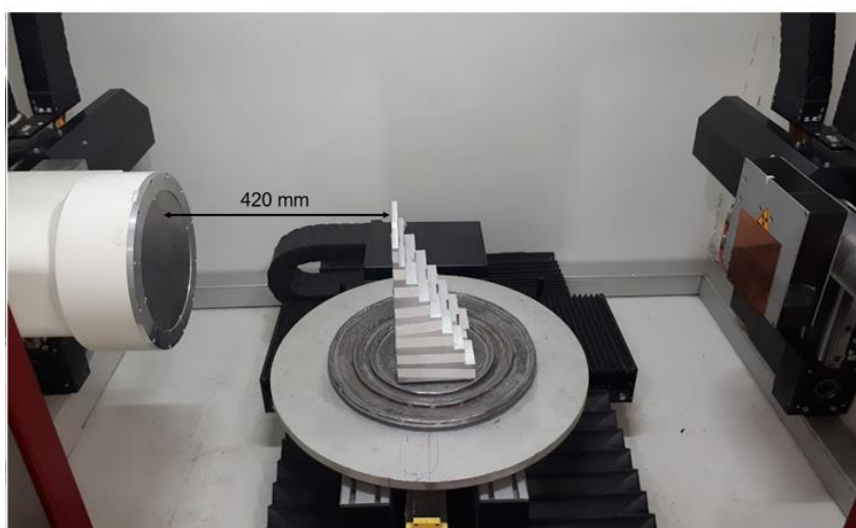


Figura 4.17: Arranjo experimental para obtenção da CSa.

No primeiros ensaios experimentais com o equipamento foi colocado um filtro de cobre de 0,5 mm na saída do colimador, a tensão foi ajustada para o valor máximo (160 kV para o equipamento RA e 225 kV para o equipamento RB) e a corrente foi ajustada até que fosse possível visualizar os rebaixos, sendo escolhidos 400 ms e 8 integrações na aquisição das imagens. Foi realizado o mesmo ensaio sem o filtro de cobre, o critério para utilização ou não deste filtro foi a melhoria na sensibilidade ao contraste. No equipamento RA, como exemplo, verificou-se que a inserção do filtro não surtiu melhoria. A visualização dos rebaixos foi mais nítida sem o filtro. Por isso, optou-se não utilizá-lo na sequência dos testes para este equipamento.

Um vez setados a corrente, o tempo e o número de integrações, foram variados o valor da tensão em passos numa faixa de valor mínimo até o valor máximo. O valor mínimo foi escolhido, considerando como critério a visualização do rebaixo (*groove*) no degrau de menor espessura e no máximo o valor em que fosse possível visualizar o rebaixo (*groove*) na máxima espessura sem a saturação do detector, com uma SNR > 130. Para cada degrau foi possível calcular a CSa, pela Equação 4.23.

$$CSa = \left\lfloor \frac{5}{CNR (5\%)} \right\rfloor$$

Equação 4.23

Segundo a norma ASTM 2597 a Relação Contraste Ruído (CNR - *Contrast-to-Noise Ratio*) pode ser definida como a razão entre as diferenças dos sinais correspondentes aos níveis médio de tons de cinza entre duas áreas da imagem digital e o desvio padrão entre estes sinais, devendo ser computada conforme a Equação 4.24.

$$CNR (5\%) = \frac{0.5 \cdot (sinal (área 1) + sinal (área 3)) - sinal (área 2)}{0.5 \cdot (ruído(área 1) + ruído (área 3))}$$

Equação 4.24

O sinal (valor do nível de cinza) e o ruído (desvio padrão) para cada degrau foi calculado em três regiões retangulares da imagem, a região de interesse (ROI - *Region of Interest*) mínima foi de 1100 pixels, ou seja, 20 pixels x 55 pixels. O ruído foi calculado tomando como referência duas ROIs, numa área duas vezes maior e outra quatro vezes do que a ROI utilizada para o cálculo do nível de cinza.

Posteriormente foram calculados o valor médio de cinza entre essas duas regiões e o desvio padrão correspondente. Na Equação 4.24, as regiões correspondentes as “áreas” podem ser vistas na Figura 4.18.



Figura 4.18: Especificação das áreas no *Step Wedge*

Para cada valor de tensão ajustado, foi calculada a CSa para cada degrau. Deste modo, foi possível qualificar para uma dada qualidade de radiação o valor da máxima espessura que foi possível ser alcançada, considerando como critério uma CSa (5%). Por este motivo, foi proposta de qualificação deste parâmetro uma representação gráfica entre o valor da espessura alcançada versus o valor da tensão ajustada tendo em vista que em radioscopia o tempo de exposição não é uma variável do ensaio.

4.3.4. Sensibilidade ao Contraste (CS)

Conforme já descrito na seção 2 as normas ASTM E2597-14 e ASTM 2737-18 possuem metodologias e objetos de testes distintos de avaliação de sensibilidade ao contraste. Como já explicado anteriormente, foi desenvolvido um procedimento de teste para medida da CS de forma a otimizar o processo de avaliação do contraste de modo numa única medida fosse também possível medir a CS conforme norma ASTM 2737. A montagem do arranjo experimental para medida da CS seguiu o mesmo padrão das medidas da CSa, sendo que em cada degrau foi colocado um IQI de furo, conforme Figura 4.19.

Os IQI's foram fabricados em alumínio de acordo com o material e espessura do *Step Wedge*. Os IQIs foram usinados com espessura e furos apropriados para cada degrau de acordo com a norma ASTM E1025, Tabela 4.6.

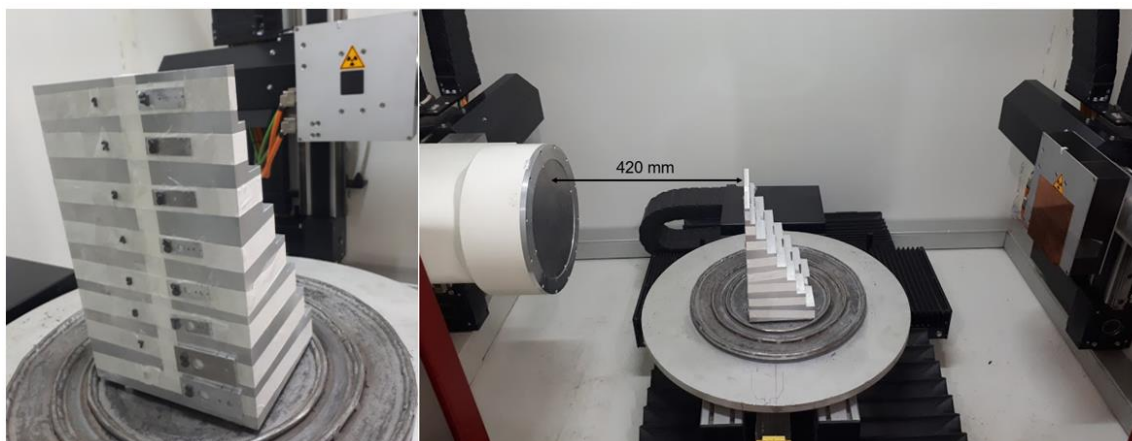


Figura 4.19: Arranjo Experimental com Step Wedge, na primeira imagem mostra em maior detalhe o arranjo dos IQI's de furo para cada degrau

Os IQIs 1 ao 3 necessitaram apresentar a mesma espessura, pois este foi o valor mínimo em que foi possível a realização dos furos sem deformação mecânica. A análise da sensibilidade ao contraste é realizada pela diferença de valor de cinza dentro e fora do furo, com também em função do ruído ao lado do furo, ou seja, na placa do IQI.

Tabela 4.6: Especificação dos IQI de furo conforme ASTM E1025

ID	M	D	F	GRUPO	T%	E-IQI	1T	2T	4T
1	10	17	2T	2	2	1	1	2	4
2	20	25	2T	2	2	1	1	2	4
3	40	35	2T	2	2	1	1	2	4
4	60	40	2T	2	2	1,2	1,2	2,4	4,8
5	80	50	2T	2	2	1,6	1,6	3,2	6,4
6	100	50	2T	2	2	2	2	4	8
7	120	60	2T	2	2	2,4	2,4	4,8	9,6
8	140	60	2T	2	2	2,8	2,8	5,6	11,2

Legenda - ID : IQI; M : Espessura do degrau em milímetros; D: Design do IQI; F : Número do Furo Essencial; E - IQI : Espessura do IQI (2% da espessura do degrau); 1T: diâmetro do furo em milímetros correspondente a espessura do IQI em 2% ; 2T: diâmetro do furo em milímetros correspondente ao dobro da espessura do IQI em 2%; 4T; diâmetro do furo em milímetros correspondente quatro vezes a espessura do IQI em 2%

O cálculo da CNR foi obtido a partir da Equação 4.26 de acordo com a norma ASTM E2737-10.

$$CNR = \frac{GV_{furo} - GV_{fora}}{\sigma_{fora}}$$

Equação 4.26

Onde : GV_{furo} é o nível de cinza médio medido numa região no interior do furo (numa área aproximadamente da metade da área do furo); GV_{fora} é o nível de cinza numa região próxima ao furo e σ_{fora} representa o desvio padrão na região fora do furo.

O valor GV_{furo} foi obtido pelo valor de cinza médio, numa ROI (região de interesse) correspondente à metade do diâmetro do furo, em pixels. Para a determinação de GV_{fora} , foram delimitadas duas ROI's, numa área duas vezes maior e outra quatro vezes maior do que o diâmetro. Posteriormente computados o valor médio de cinza entre essas duas regiões e o desvio padrão correspondente.

A partir do conhecimento da CNR foi possível calcular a sensibilidade ao contraste de acordo com a Equação 4.27.

$$CS (\%) = \frac{GBV}{CNR} \cdot \frac{T_{IQI}}{T_{TOTAL}} \cdot 100\%$$

Equação 4.27

Onde :GBV foi considerado 2,5; T_{iqi} é a espessura do IQI de furo e T_{TOTAL} é a espessura do degrau somada a do IQI de furo

4.3.5. Faixa de Espessura de um Material Específico (SMTR)

Este parâmetro define o alcance máximo para um material, que pode ser produzido na imagem com uma determinada qualidade, sobre certa qualidade de feixe da radiação. Esse fator é medido pelo valor da SNR alcançada para uma dada espessura de material, definindo assim, a faixa de espessura do material que apresenta uma boa qualidade da imagem [40].

Os critérios de qualidade estabelecidos pela norma ASTM E2597 é uma $SNR \geq 130$ para uma sensibilidade de pelo menos 2% e uma $SNR \geq 250$ para uma sensibilidade de pelo menos 1 %. Convém ressaltar, que isso não garante que os níveis de sensibilidade ao contraste serão alcançados, mas é um indicativo para designar se imagem possui qualidade moderada (2%) ou superior (1%).

Na norma ASTM E2597 os gráficos de SMTR são apresentados por curvas relacionando a SNR normalizada em relação a máxima espessura alcançada para tempos distintos de exposição (exemplo: 1, 4, 16 e 64 segundos) uma forma de análise muito aplicada a radiografia digital, pois o tempo de exposição é uma variável que contribui para a qualidade radiográfica. No entanto, ensaios radiográficos empregando equipamentos de radioscopia se caracterizam por inspeção em tempo real, não havendo controle do tempo de exposição.

Por este motivo neste trabalho, quando realizada a avaliação das CS's foram computados os valores de SNR na área 1 do *step* de 20 pixels x 55 pixels para as máximas espessuras alcançadas para cada qualidade de radiação escolhida, partindo destas informações para uma dada CS foram analisados os critérios de SNR pela norma ASTM E2597 sendo as imagens qualificadas com qualidade moderada ($SNR \geq 130$) ou superior ($SNR \geq 250$).

4.3.6. Distorção Geométrica

A metodologia para avaliação da distorção geométrica se fundamentou em Métodos de Modelagem aplicados a Computação Visual [1, 97,98].

A localização espacial de um ponto p numa imagem real é originalmente expressa em unidades de *pixels*. Como exemplo, podemos dizer que p é a intersecção da coluna $p_x=150$ e a linha $p_y=50$ numa imagem digital. A representação de um ponto $P(x,y)$ em um sistema de coordenadas homogêneas é $P(W.x, W.y, W) = P(X, Y, W)$ para qualquer $W \neq 0$, onde W é chamado de fator de escala e $x = X/W$ e $y = Y/W$. Como o sistema de Radioscopia Industrial é predominantemente 2D, o W será sempre 1 e a divisão por W não é necessária. Pode-se imaginar um sistema de coordenadas homogêneas 2D, equivalente a posicionar o plano xy na posição W do eixo z de um sistema 3D qualquer.

Então, podemos denotar $\bar{x} = [x \ y \ 1]^T$ como um vetor dentro de um sistema de coordenadas homogêneas como uma imagem no plano, este vetor que também é chamado de vetor de coordenada normalizado está diretamente relacionado com as coordenadas 3D, $\bar{X} = [X \ Y \ Z]^T$, que corresponde a projeção em perspectiva. Então, os dois vetores \bar{x} e \bar{X} estão relacionados conforme Equação 4.28.

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

Equação 4.28

Na prática nós somente temos acesso a $\bar{p} = [p_x \ p_y \ 1]^T$. É preciso estabelecer uma correlação entre \bar{p} e \bar{x} , ou seja, as coordenadas dos pixels com a projeção da imagem no detector. Se considerarmos que o ponto de referência na imagem é o centro óptico do detector, é necessário conhecer a localização neste ponto imagem: $\bar{c} = [c_x \ c_y]^T$ em pixels.

Admitindo que para um II, f_0 é a distância entre o centro óptico da tela cintiladora para o CCD e atribuímos d_x e d_y , como a dimensão x e y dos pixels do referido sensor em metros, logo $f_x = f_0/d_x$ e $f_y = f_0/d_y$. Se for assumido que os sensores (pixels) assumem uma forma de perfeitamente quadrada, então $f_x = f_y$ e $d_x = d_y$.

No entanto, conforme visto na seção 3, verificamos que na prática tanto o II quanto nos FPD os pixels podem apresentar variação de tamanho e forma.

Então, a coordenada do pixel $\bar{p} = [p_x \ p_y \ 1]^T$ de um ponto na imagem pode ser computado a partir da coordenada homogênea normalizada $\bar{x} = [x \ y \ 1]^T$ através da seguinte expressão, assumindo que os eixos são ortogonais 4.29 e não ortogonais 4.30:

$$\begin{cases} p_x = & f_x x + c_x \\ p_y = & f_y y + c_y \end{cases}$$

Equação 4.29

$$\begin{cases} p_x = & f_x x - \alpha f_y y + c_x \\ p_y = & f_y y + c_y \end{cases}$$

Equação 4.30

Onde α é um coeficiente escalar que controla a quantidade de inclinação entre os dois eixos do detector, se $\alpha = 0$ não existe distorção.

Neste sentido, é esperado que o II apresente uma distorção geométrica muito superior ao FPD devido a própria estrutura de construção deste tipo de detector, vide Figura 3.6 e 3.7. No II quando diminuirmos a FOV, a resolução espacial é aumentada e a distorção geométrica diminuída nas regiões periféricas, pois na verdade estamos selecionado uma região mais próxima no centro do II. A Figura 4.20 mostra uma comparação entre a FOV, a distorção geométrica.



Figura 4.20: Comparação entre os FOV e distorção geométrica de um intensificador

Dentre estas fontes de distorção para o II a mais proeminente é a radial, devido a curvatura existente na tela cintiladora, que pode ser classificada em dois tipos: positiva ou negativa. A distorção radial negativa ou *Barrel*, os pixels da imagem tendem a se deslocar para o centro da imagem. Já a distorção radial positiva ou *Pincushion* [101], os pixels tendem a se afastar do centro óptico da imagem. A Figura 4.21 representa a forma de cada um destes tipos de distorção.

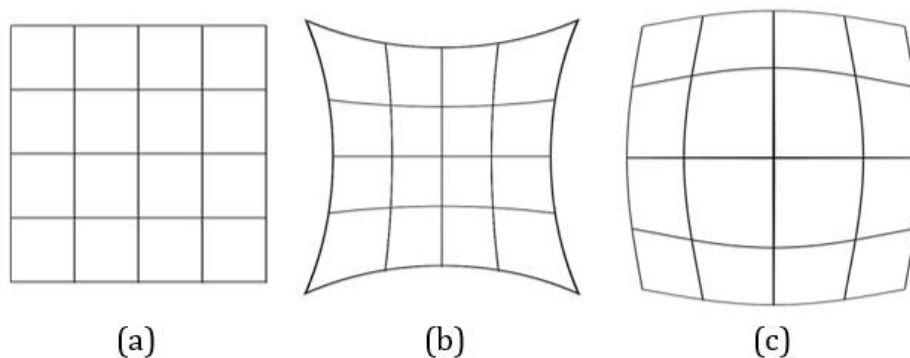


Figura 4.21: Tipos de distorção geométrica: (a) Imagem sem distorção; (b) Distorção Radial Positiva (*Pincushion*); (c) Distorção Radial Negativa (*Barrel*).

Para fazer as avaliações iniciais foi utilizado um phantom da fabricante Leeds Objects (modelo TOR IQ) que possui um grid com valores conhecidos e muito utilizado para controle de qualidade de equipamentos médicos. Nos ensaios foi garantida perpendicularidade entre a fonte, base com o phantom e o detector. Nos ensaios experimentais verificou-se que devido a estrutura dos equipamentos de radioscopia industrial e a constante movimentação do eixo de magnificação, fez necessário a utilização de phantom mais leve. Por este motivo foi desenvolvido um Grid Pattern.

A base de construção do objeto é fibra vidro com 2,4 mm de espessura e o *grid* são pistas constituídas de cobre, chumbo e estanho. O *Grid Pattern* desenvolvido além ser mais leve e ergonômico, possui uma matriz menor que o *phantom* inicial, com quadros de 5 x 5 mm, o que permitiu uma maior precisão no cálculo da distorção devido a um maior número de pontos de intersecção. A Figura 4.22 apresentam detalhes dos equipamentos citados.

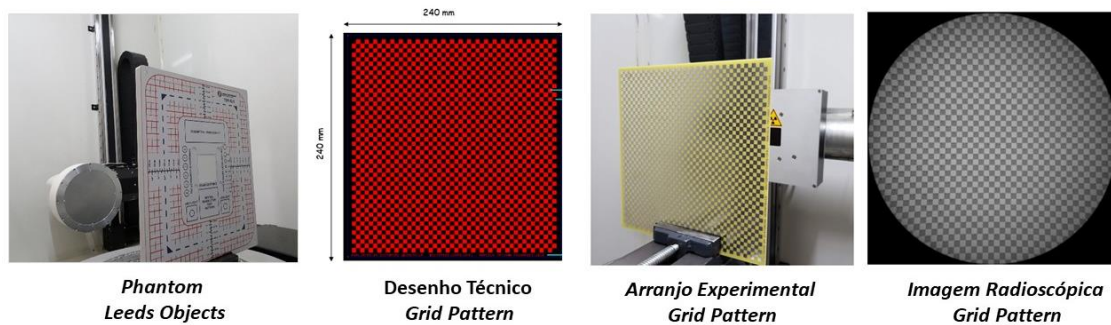


Figura 4.22: Montagem do Arranjo Experimental para Avaliação da Distorção Geométrica com TOR IQ e do *Grid Pattern* para o equipamento RA.

O cálculo da distorção geométrica foi uma adaptação do algoritmo desenvolvido por MERY [1], que em sua versão original referenciava a distorção pelos centros de massa para uma placa perfurada. Neste trabalho a adaptação realizada é que distorção, neste caso foi referenciada aos pontos de intersecção entre os quadros do *grid pattern*, sendo que o erro por distorção geométrica é dado por uma média dos erros detectados em cada ponto de intersecção na imagem, tendo o seu resultado expresso em unidades de pixel.

4.3.7. Uniformidade

A uniformidade significa igual sensibilidade do sistema em todo campo de visão do detector [67]. Recorrendo a conceitos de processamento digital de imagens, vemos dois tipos de padrões de ruído. O primeiro é padrão de ruído fixo, causado pelas *dark currents*. O segundo é o ruído decorrente da foto-responsividade não uniforme dos pixels conhecido como (PRNU- *Photo Response Non-Uniformity Noise*). O PRNU pode ser calculado pelo ruído não uniforme dos pixels (PNU - *pixel non-uniformity*).

Trazendo para nossa aplicação, o PNU poderia ser definido como a sensibilidade que diferentes *pixels* possuem aos Raios X e é causado basicamente por inconsistências da matriz de sensores do detector durante o processo de fabricação. Estes fatores em conjunto contribuem para a não uniformidade da imagem radioscópica, sendo complexo separar com precisão estas componentes ruído que não sejam por algortimos, como exemplo na Transformada Wavelet Discreta (DWT - *Discrete Wavelet Transform*) [99,100].

Diante do exposto, foi proposta uma estimativa do comportamento da uniformidade baseado na análise de imagens radioscópicas de uma placas homogêneas de alumínio com espessura de 20 mm. A escolha da tensão e da corrente considerou uma $SNR \geq 130$, ajustando o tempo e o número de integrações para valores comumente utilizados na inspeção de fundidos de alumínio, os valores escolhidos foram 400 ms e 8 integrações.

Foi escolhida uma magnificação que permitisse que a placa desse cobertura a toda área do detector. As imagens radioscópicas foram analisadas no Isee!, onde foram escolhidas 5(cinco) ROI's com tamanho mínimo de 1100 pixels, ou seja, 20 pixels x 55 pixels, conforme Figura 4.23, tomadas a uma distância da borda correspondente a 10 % da área efetiva do detector. Para cada ROI foi computada os valores médio de pixels (VMP), sendo realizada na sequência os cálculos da média e do desvio padrão. Tomando como referência parâmetros especificados em [66], é tolerada um variação $\leq 15\%$.

Foi desenvolvido também um algoritmo em MATLAB para o cálculo dos VMP da imagem radioscópica visando estimativa gráfica do comportamento da não-uniformidade do detector, tendo como fundamento que este parâmetro pode ser calculado através da Equação 4.31 [1]. Essas avaliações foram realizadas aplicadas aos detectores dos equipamentos de radioscopia industrial RA e RB.

$$NU = \frac{1}{SNR}$$

Equação 4.31

Onde NU é a não-uniformidade e SNR é a relação sinal ruído da imagem.

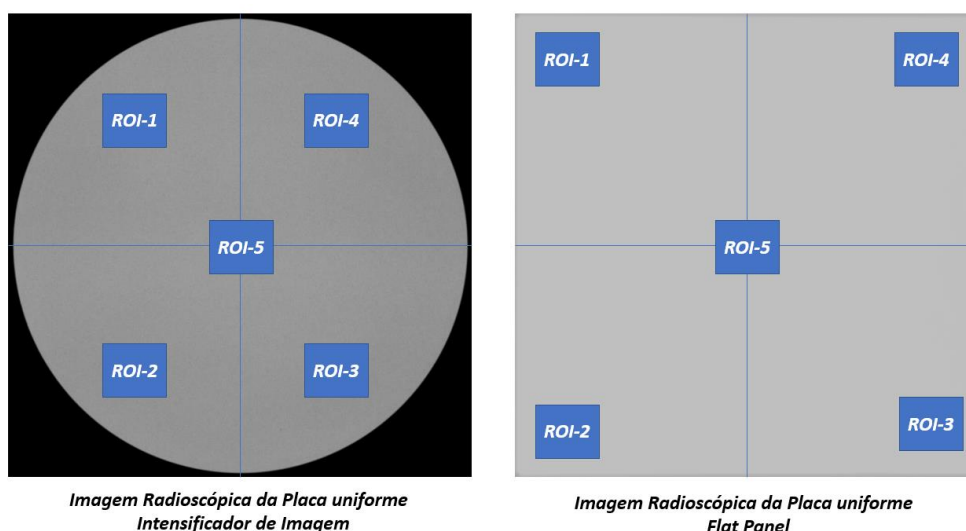


Figura 4.23: Seleção das ROIs para o cálculo da não-uniformidade do intensificador de imagem e do flat panel

4.3.8. Eficiência

A eficiência descreve a SNR de uma imagem radioscópica para um número quanta de Raios X incidentes no detector. A avaliação da eficiência é uma das mais importantes métricas de performance de um detector, pois nem todos sistemas de detecção são capazes de produzir uma SNR correspondente a uma dada dose de exposição.

Este procedimento fundamentou-se no conceito de eficiência definido na norma ASTM E2597 (*Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays*). O detector foi exposto a três qualidades de radiação 30, 40 e 50 kV pois este é o máximo valor de tensão que pode ser utilizado sem a necessidade de filtros, segundo a norma. As imagens foram obtidas com 400 ms e 8 integrações.

Na sequência foram medidos os VP para cada ROI e estas medidas foram repetidas para uma imagem sem radiação. Foi realizada a média para cada conjunto de medidas, denominando $GV_{médio}$ para o primeiro grupo de medidas e GV_{offset} para o segundo conjunto de medidas com a imagem sem radiação. Na sequência foi computado o desvio padrão, a resolução espacial e substituído estes valores na equação 4.32, com vista a estimar a $dSNR_n$ para cada qualidade de radiação.

$$dSNR_n = \frac{GV_{médio} - GV_{offset}}{\sigma} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 88,6}{SR_b} \right)$$

Equação 4.32

4.4 Sistema de Visualização

O sistema de visualização ou de exibição de imagens está constituído por uma estação de trabalho contendo um dispositivo de exibição de imagens, um controlador do monitor, assim como hardware e software computacional que são responsáveis por exibir imagens [104]. Neste trabalho nos referimos ao dispositivo de exibição de imagens como monitor, o controlador como placa de vídeo e os softwares para exibição das imagens são os recursos computacionais utilizados para análise dos padrões.

4.4.1. Referências Normativas

Esta seção descreve o método os critérios de avaliação da performance de um Sistema de Visualização, segundo os parâmetros da Tabela 4.1, aplicada a exibição de imagens em equipamentos de Radioscopia Industrial, que tomou como referências principais os documentos normativos abaixo relacionados:

- a) *ABNT NBR IEC 62563-1: Equipamento eletromédico - Sistemas de exibição de imagens médicas Parte 1: Métodos de avaliação*, publicada em maio de 2017 [101].
- b) *ASTM E2698: Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays*, publicada em abril de 2018 [102].
- c) *DIN 6868-157-2014: Image quality assurance in diagnostic X-ray departments - Part 157: X-ray ordinance acceptance and constancy test of image display systems in their environment*, publicada em novembro de 2014 [103].
- d) *AAPM TG18: ‘Assessment of display performance for medical imaging systems’*, American Association of Physicists in Medicine (AAPM), task group, pre-final DRAFT [85].

4.4.2. Característica do Monitor de Vídeo

O método de qualificação foi aplicado na avaliação da performance do Sistema de Visualização associado ao equipamento de radioscopia RA, pois não houve disponibilidade para realização do equipamento para o referido ensaio. Na Figura 4.24, tem-se a imagens do monitor da fabricante *Hewlett-Packard* (HP). O monitor possui uma luminância nominal típica na faixa de 250 nits (cd/m²) [102].



Figura 4.24: Monitor LA1951g. (1) Entrada VGA (2) Entrada DVI (3) Entrada USB Upstream (4) Saída USB Downstream

Tabela 4.7: Parâmetros do monitor

Parâmetros relacionados ao pixel do monitor						
Tamanho (Polegadas)	Resolução (pixel)	Densidade (ppi)	Tamanho do Pixel (mm)	Razão de Proporção	Dot Pitch (mm)	Total de Pixels
19	1280 x 1024	86,27	0,29	5 :4	0,29(H) 0,29 (V)	1,31 MP
Parâmetros relacionados a área do monitor						
Tamanho (Polegadas)	Diagonal (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Razão de Proporção	Área (cm ²)	
19	483,0	377,16	301,73	5 :4	1629,36	

4.4.3. Equipamentos de Medição, Ferramentas e Metodologia utilizadas na Avaliação do Sistema Visualização

Na Figura 4.25 são apresentados os principais equipamentos utilizados na avaliação do sistema de visualização. Na sequência serão explicados a metodologia com vista a atender os ensaios descritos na Tabela 4.8.

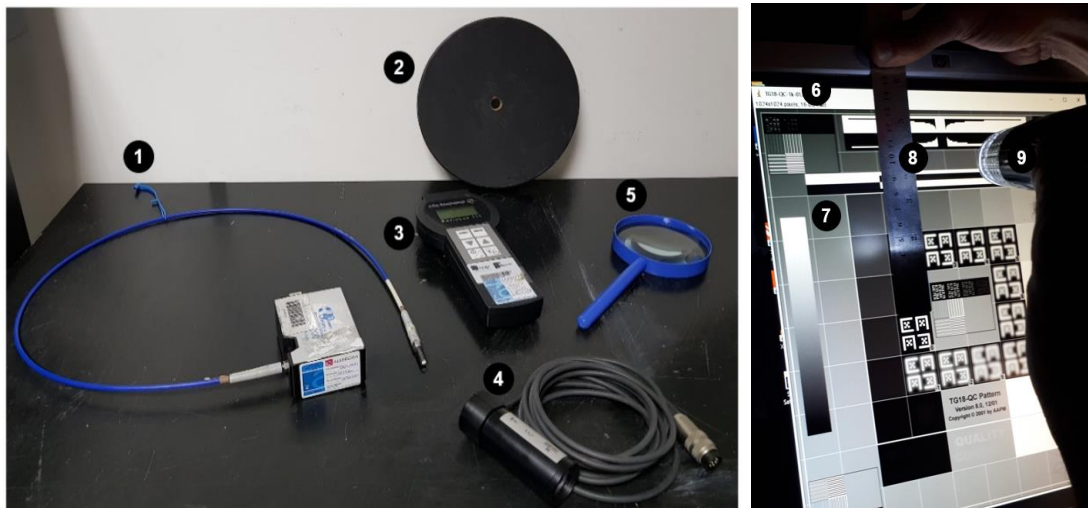


Figura 4.25: Equipamentos e Ferramentas utilizadas na avaliação do sistema de visualização: 1- Mini-Espectrômetro Óptico; 2 – Máscara Padrão TG18; 3- Fotômetro/Luxímetro; 4- Transdutor para avaliação da Luminância em Telas Planas; 5- Lupa; 6 – Softwares para Avaliação dos Padrões de Imagem; 7- Padrões de Imagem conforme instruções normativas citadas na seção 4.3.1; 8- Régua; 9- Lanterna.

Para avaliação da luminância neste trabalho optou-se pelo RadioLux111 da fabricante PRC Krochmann. O equipamento é rastreável pelo PTB - *Physikalisch-Technische Bundesanstalt of Germany* e foi calibrado por laboratório de óptica rastreável pelo INMETRO. O luxímetro utilizado no ensaio é capaz de medir iluminância dentro da faixa de 0,001 lx até 360 klx, com exatidão estando dentro do preconizado pela norma ABNT NBR IEC 62563-1, ou seja, com erro de medição inferior a $\pm 10\%$. Na avaliação da cromaticidade do sistema de visualização foi utilizado um mini espectrômetro óptico com acoplamento por fibra óptica da fabricante *Ocean Optics* USB 2000+.

4.4.4. Procedimentos de Preparação do Sistema de Visualização de Imagens

Antes das avaliações do sistema de exibição de imagem foram realizados os seguintes procedimentos:

- a) **Limpeza da tela.** Foi assegurado que a tela estivesse livre de poeira, impressões digitais e outras marcas que pudessem interferir na interpretação da imagem, sendo obedecidas as instruções do fabricante quanto a escolha dos produtos de limpeza;

- b) **Controle da Temperatura.** Apesar do monitor e dos instrumentos de medição operarem dentro de uma ampla faixa de temperatura, foi assegurado que a temperatura ambiental da sala fosse controlada em $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.
- c) **Assegurado o tempo de estabilização eletrônica (“warm up”) do monitor LCD.** Este tempo visa garantir que o monitor consiga dentro deste tempo atingir um valor constante de luminância. Deve ser observado que cada monitor possui um tempo determinado para o *warm up*, não foi encontrada esta informação no manual técnico do monitor. No entanto, se consultarmos a Figura 4.26, observa-se que a curva de luminância de um monitor LCD não é linear, sendo inadequado fazer qualquer tipo de análise nos primeiros 10 (dez) minutos. Então, primeiramente foi ajustado o brilho para 100% e depois ligado o monitor, sendo aguardado o tempo de 30 (trinta) minutos. Após este período, ajustou-se o brilho para o comumente utilizado nos ensaios de rotina [104].

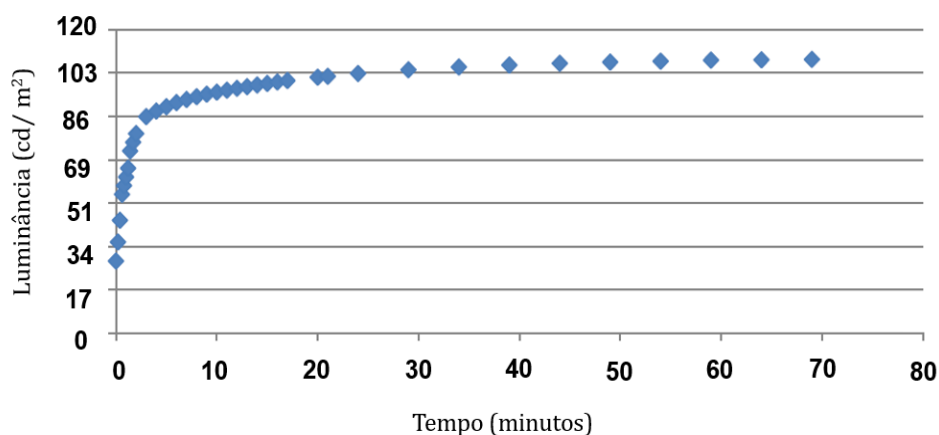


Figura 4.26: Gráfico de Luminância de um Monitor LCD Padrão adaptado de [103]

- d) **Ajuste da posição do monitor.** O monitor deve ser ajustado de modo que o ângulo de visão e a distância de visualização estejam adequadas em função da posição do operador/observador. O ângulo de visão refere-se ao grau acima ou abaixo de uma linha horizontal imaginária ao nível dos olhos do observador e ao centro do objeto que está sendo visualizado no centro da tela no monitor. A distância de visualização refere-se ao espaço entre os olhos do operador e a tela. A posição angular inadequada leva a um desconforto postural, enquanto que a distância visual errada leva a fadiga ocular. Os olhos naturalmente em repouso assumem uma linha de visão direta e descendente.

As pessoas envolvidas em tarefas visualmente exigentes limitam seus movimentos oculares descendentes a cerca de metade de toda a faixa disponível de 60 graus, Figura 4.27. Portanto, para uma visualização confortável das imagens no monitor é razoável colocar o monitor cerca de ± 15 graus da linha normal de visão. Neste sentido, quando foi necessária a análise dos padrões, a borda inferior da tela foi baixada e inclinada para trás em 30 graus [104].

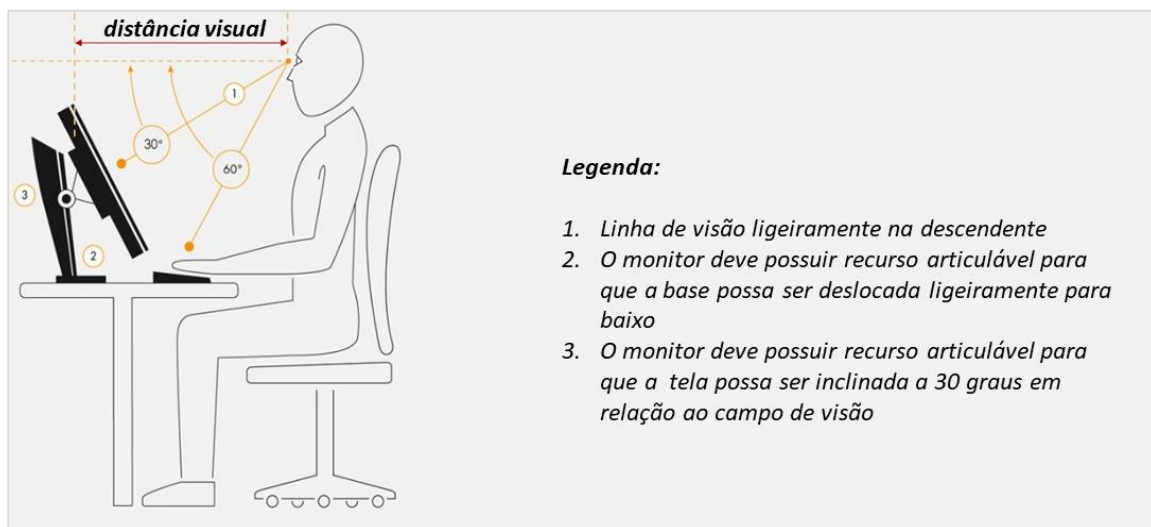


Figura 4.27: Ajuste da posição do monitor adaptado de [105]

4.4.5. Metodologia de avaliação do Sistema de Exibição de Imagem

Os parâmetros e os critérios de performance que nortearam a qualificação do sistema de exibição de imagens são apresentados na Tabela 4.8. Os procedimentos seguiram os protocolos da AAPM TG18 e a norma ABNT NBR IEC 62563-1.

Na sequência serão descritos os procedimentos para obtenção das curvas de resposta de luminância e contraste que são as principais avaliações quantitativas relacionadas a a qualificação do sistema de exibição de imagens.

Tabela 4.8 : Testes de Desempenho do Sistema de Visualização de Radioscopia Industrial adaptado da AAPM TG18, ABNT NBR IEC 62563, DIN 6868-157-2014 e ASTM E2698

Teste	Padrão	Equipamentos	Avaliação	Critério de conformidade
Aspectos gerais da qualidade da imagem	TG18-CQ TG18-UN10 TG18-UN80	Lupa	Qualitativa	Não existência de pixels defeituosos, artefatos, distorções ou perda de contraste na visualização da imagem padrão
Distorção geométrica	TG18-CQ	Régua/ Paquímetro	Qualitativa	Bordas possuem linhas horizontais e verticais completamente retas e apresentação da imagem centralizada do padrão
			Quantitativa	Distorção $\leq 2\%$
Reflexão da tela e Iluminação da sala	TG 18 AD	Fotômetro	Qualitativa	A presença de fontes de luz ou pontos de luz refletida na tela não são detectadas no campo de visão do usuário na visualização da imagem padrão
			Quantitativa	Iluminância ambiente $< 25 \text{ lx}$ Luminância mínima idealmente $\geq 4 \cdot L_{\text{ambiente}}$
Resposta de Luminância	TG18-TC	Fotômetro	Qualitativa	A aparência do padrão de teste TG18-TC deve demonstrar claramente o alvo de baixo contraste em cada uma das regiões 16.
	TG18-MP TG18-LN-01 a TG18-LN-18		Quantitativa	A localização relativa das bandas de contorno e níveis de luminância não deve ser mais do que a distância entre os marcadores. $L_{\text{max}} \geq 170 \text{ cd/m}^2$ Razão de Luminância ≥ 250 Variação de luminância entre monitores de uma mesma estação $\leq 10\%$
				Desvio da resposta de contraste DICOM GSDF $\leq 10\%$
Dependência Angular e Espacial da Luminância	TG UNL 10, TG 18 UNL 80	Fotômetro	Qualitativa	Os padrões devem ser livres de não uniformidades brutas do centro para as bordas. Variações de luminância com dimensões na ordem de 1 cm ou maiores não devem ser observadas
	TG18-TC TG18-LN-01 e TG18-LN-18		Quantitativa	Os limites de ângulos de visão devem ser claramente identificados na parte frontal do dispositivo de exibição A não uniformidade da Luminância: $200 \cdot (L_{\text{MAX}} - L_{\text{MIN}} / L_{\text{MAX}} + L_{\text{MIN}}) \leq 30\%$
Resolução espacial e de baixo contraste	TG18-CQ	Lupa	Qualitativa	Os padrões de Cx exibidos na imagem padrão TG18-QC ou na TG18-CX, exibidos no centro e quatro cantos da tela, devem estar dentro da escala de pontuação de 0 a 4. Os padrões de pares de linha da imagem padrão TG18-QC, exibidos no centro e nos quatro cantos da área de exibição devem ser visualmente distinguíveis A largura relativa dos pares linhas devem ser, visualmente, uniformes. O brilho médio das escalas de cinza (5% a 100%) exibidas no centro do padrão é visualmente, distinguível. Os 18 degraus da escala de cinza exibidas no centro do padrão devem ser visualmente, distinguíveis.
Cromaticidade	TG18-UNL80	Mini Espectrômetro Óptico	Quantitativa	Desvio $< 0,02$ conforme ABNT IEC 62563

4.4.5.1. Avaliação Quantitativa da Resposta de Luminância e Contraste

A resposta de luminância é a razão entre a luminância de saída e os sinais eletrônicos de entrada para os sensores contidos no display do monitor de vídeo. A luminância do monitor é composta pela luz produzida na tela que varia entre um valor mínimo ($L_{\text{mín}}$) e um valor máximo ($L_{\text{máx}}$), juntamente com uma contribuição da iluminação do ambiente.

O termo “taxa de luminância” refere-se à relação $L_{\text{máx}}/L_{\text{mín}}$. O termo “taxa de contraste” é utilizado para caracterizar o display do monitor [109]. Neste trabalho a avaliação quantitativa da resposta de luminância e contraste foi fundamentada no modelo experimental de Barten, que é base para as recomendações contidas na AAPM TG18 . A partir deste modelo foi possível obter três avaliações, conforme apresentada na Figura 4.28.

No teste quantitativo da resposta de luminância o monitor radiológico deve possuir $L_{\text{máx}} > 170 \text{ cd/m}^2$, $L_{\text{máx}}/L_{\text{mín}} \geq 250$ e apresentar desvio de resposta de contraste ao padrão DICOM GSDF $\leq 10\%$.

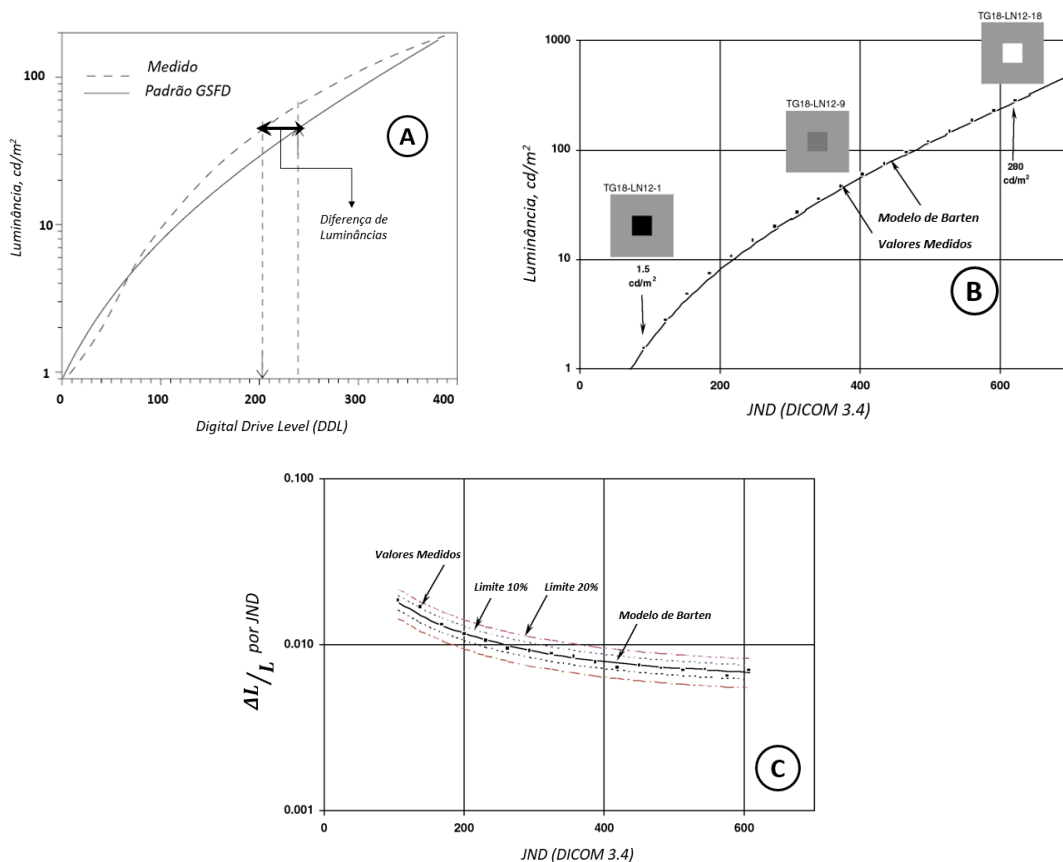


Figura 4.28: Curvas de Resposta de Luminância e contraste

O DDL (*Digital Driving Levels*) de um dispositivo de exibição de imagem ou monitor de vídeo, estabelece uma correspondência entre um valor digital em bits para um dado valor de saída de luminância de um sistema de exibição de imagem. O conjunto de DDLs de um sistema de exibição são todos os valores discretos possíveis que podem produzir valores de luminância num sistema de exibição. A curva A é o mapeamento entre a luminância e os valores de DDL. Cada monitor possui uma curva característica específica. A saída de um determinado valor de DDL é específico ao sistema de exibição e não é corrigida para a GSDF (*Grayscale Standard Display Function* – Função de exibição de tons de cinza) [110].

O padrão DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine-Comunicação Imagens Digitais em Medicina*) GSDF define uma função específica para a calibração da escala de cinzas que será exibida, de forma a preservar o contraste nas extremidades do espectro. Quanto menor for o desvio entre os valores medidos e este padrão, assegura com maior confiabilidade que todos os contrastes da imagem radioscópica estão sendo exibidos, conforme pode ser visto na curva A [85].

A curva B exemplifica as medidas de luminância nos 18 padrões de imagem versus a menor diferença detectável de contraste, denominada de índice JND (diferença apenas perceptível, do inglês, *Just Noticeable Difference*). A diferença detectável de contraste é feita através da comparação dos valores eletrônicos de entrada, chamados *p-values* com os valores das luminâncias de saída de cada uma das 18 imagens padrão, TG 18 LN-1 (L'_{min}) até TG 18 LN-18 ($L'_{máx}$). Os valores de luminância são obtidos com a luz ambiente apagada e com fotômetro calibrado [104,109]. A norma NEMA [110] em seu ANEXO B disponibiliza uma tabela padrão denominada “*Table B-1 Gray Standard Display Function: Luminance Versus JND Index*”, onde os valores de luminância medidos podem ser convertidos através dos valores equivalentes em JND. Esses valores são obtidos conforme Equação 4.33 [85].

$$J_i = J_{min} + \frac{P_i (J_{max} - J_{min})}{\Delta P}$$

Equação 4.33

Onde, J_{min} é o índice JND mínimo correspondente ao L'_{min} , J_{max} é o índice JND máximo correspondente ao $L'_{máx}$, P_i é o *p-values* (valor digital em bits correspondente a imagem padrão TG 18 LN- *i*)

Os índices JND para os valores intermediários, devem ser uniformemente espaçados dentro da faixa entre os valores dos índices J_{min} e o J_{max} e linearmente relacionados aos $p-values$ [85].

A função de exibição padrão em tons de cinza é definida para padrões de luminância que variam entre 0,05 e 400 cd/m². Essa função é definida por um interpolação de 1023 níveis de luminância derivados do modelo de Barten. Esse nível de luminância (L) corresponde dado pela Equação 4.34 [85, 75,86].

$$\text{Log}_{10} L_j = \frac{a + c (\text{Log}_e j) + e (\text{Log}_e j)^2 + g (\text{Log}_e j)^3 + m (\text{Log}_e j)^4}{1 + b(\text{Log}_e j) + d(\text{Log}_e j)^2 + f(\text{Log}_e j)^3 + h(\text{Log}_e j)^4 + k(\text{Log}_e j)^5}$$

Equação 4.34

Onde através desta Equação pode se computado os valores de luminância para qualquer nível de luminância para um dado JND. Nesta Equação j é um índice que pode assumir valores de 1 a 1023 níveis de luminância L_j de JNDs e

$$\begin{aligned} a &= -1,3011877, \\ b &= -2,584019 \times 10^{-2}, \\ c &= 8,0242636 \times 10^{-2}, \\ d &= -1,0320229 \times 10^{-1}, \\ e &= 1,3646699 \times 10^{-1}, \\ f &= 2,8745620 \times 10^{-2}, \\ g &= -2,5468404 \times 10^{-2}, \\ h &= -3,1978977 \times 10^{-3}, \\ k &= 1,2992634 \times 10^{-4}, e \\ m &= 1,3635334 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

A curva C é uma representação dos desvios da reposta de contraste mensurada em relação a reposta de contraste esperada para cada índice JND. A reposta de contraste mensurada é obtida utilizando a Equação 4.34 [85]. É esperado um desvio de contraste mensurado seja menor que 10% em qualquer ponto da curva.

$$\delta_i = \frac{2 (L'_i - L'_{i-1})}{(L'_i + L'_{i-1})(J_i - J_{i-1})} @ 0,5 (J_i + J_{i-1})$$

Equação 4.34

Onde δ é a resposta ao contraste, L' é a luminância mensurada e J é o índice JND.

Calculou-se a resposta de contraste esperada, utilizando a Equação 4.35.

$$\delta'_i = \frac{2 (L^d_i - L^d_{i-1})}{(L^d_i + L^d_{i-1})(J_i - J_{i-1})} @ 0,5 (J_i + J_{i-1})$$

Equação 4.35

Onde δ^d é a resposta ao contraste esperada, L^d é a luminância esperada e J é o índice JND.

4.5 Avaliação do Sistema Cinemático

O Sistema Cinemático de um equipamento de Radioscopia Industrial poder ser considerado uma máquina ferramenta controladas por Controle Numérico Computadorizado (CNC). Uma vez tendo conhecimento do modelo cinemático é possível descrever posições e orientações nos diversos eixos do sistema através de transformações homogêneas. Esse modelo cinemático pode, então, ser aplicado para a correção eletrônica dos erros do sistema de movimentação [5].

Durante processo de alinhamento dos eixos, o CNC adquire a posição atual dos eixos da máquina e o software de controle, utilizando o modelo cinemático, determina os desvios de posição e envia as devidas correções aos motores para o reposicionamento dos eixos.

Considerando que os componentes de base de construção do sistema cinemático são guias lineares e fusos de esfera, é esperado que os erros de posicionamento linear e retilinearidade sejam muito pequenos. No entanto, erros que dependem não dos componentes do sistema de movimentação, mas da montagem destes, são esperados serem maiores e precisam ser conhecidos. Para auxiliar na avaliação destes erros são utilizados instrumentos de medição e controle dimensional.

A metodologia adotada para avaliação dos erros geométricos foi baseada em instrumentos [76]. Foram os principais motivos que fundamentaram esta escolha: a alta resolução do sistema de imageamento da máquina de radioscopia comparada aos valores esperados dos erros de posicionamento linear; pelo fato do experimento ter foco em qualificação, era necessário que a incerteza dos padrões corporificados tivesse rastreabilidade metrológica conhecida; assegurar que fosse mitigada a contaminação das avaliações dos erros geométricos devido às incertezas existentes do sistema de imageamento, principalmente em relação ao ponto focal.

Nas próximas seções serão apresentadas: as características do sistema de movimentação e modelo cinemático proposto para o equipamento de radioscopia industrial objeto de teste; padrões corporificados e instrumentos de medição utilizados na qualificação; assim como metodologia de avaliação dos erros geométricos do sistema de radioscopia industrial.

4.5.1. Características Técnicas do Sistema e Modelagem Cinemática proposta para o Equipamento de Radioscopia Industrial

Na Tabela 4.9, como exemplo, são especificadas as características do sistema cinemático da cabine de radioscopia industrial A (RA) que está sendo avaliada neste trabalho. A máquina possui 7 (sete) graus de liberdade. Na Tabela 4.9 também foi especificada a simbologia atribuída a cada grau de liberdade. A Figura 4.29 é apresentada a representação da Cinemática do equipamento de radioscopia industrial RA.

Tabela 4.9: Características Técnicas do Sistema Cinemático

Número do Grau de Liberdade	Descrição do Sistema Cinemático	Simbologia	Curso	Velocidade
1	Vertical do tubo de Raios X	Z ₁	1200 mm	30 m/min
2	Vertical do Detector de Raios X	Z ₂	1200 mm	30 m/min
3	Eixo X da Mesa Linear	X	600 mm	30 m/min
4	Eixo Y da Mesa Linear	Y	400 mm	30 m/min
5	Tilt do tubo de Raios X	Z ₃	± 30 °	60 °/sec
6	Tilt do Detector de Raios X	Z ₄	± 30 °	60 °/sec
7	Rotação da Mesa de Trabalho	R	n x 360 °	200 °/sec

Para que fosse possível obter os erros geométricos do sistema cinemático, foi necessário que o sistema de controle do CNC disponibilizasse as coordenadas dos pontos que são controladas manualmente ou através de uma programação estabelecida pelo software de operação no console de comando do equipamento de Radioscopia Industrial.

Esse processamento matemático a comparação das posições fornecidas pelo software com os pontos medidos com instrumentos sobre os padrões corporificados com as posições previamente calibradas. Os padrões corporificados e os medidores são instrumentos de medição e controle dimensional .

Neste sentido, a metodologia para avaliação dos erros geométricos da cabine de Radioscopia Industrial baseou-se, na recomendação interna do PTB (*Physicalisch Technische Bundesanstalt*) descrita em [5] e as convenções de erro adotadas em [106].

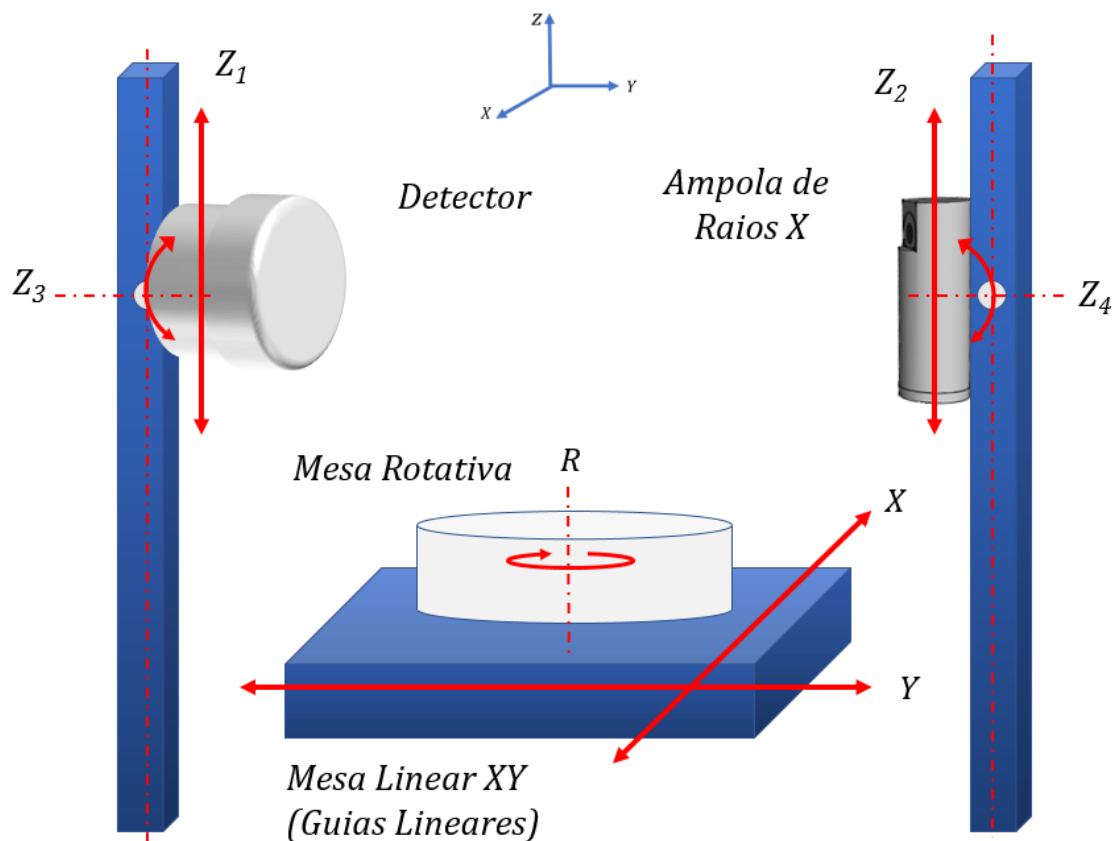


Figura 4.29: Representação do Sistema Cinemático do equipamento RA

4.5.2. Instrumentos de Medição e Controle Dimensional utilizados nos ensaios experimentais

Por se tratar de um processo de qualificação por instrumentos, a escolha dos mesmos tomou como referência a procedência, instrumentos calibrados e resolução compatível com as medidas a serem realizadas. Neste sentido, foram utilizados instrumentos de medição de tecnologia reconhecida na metrologia, a saber:

1. Padrão Escalonado da fabricante MITUTOYO modelo 515-765, a faixa nominal do bloco é de 750 mm. Este padrão consiste num conjunto de blocos padrão acoplados e rigidamente fixos, com intervalos de 10 mm entre si ;
2. Relógio comparador do tipo centesimal da fabricante MITUTOYO, modelo 2646S, com faixa nominal de 10 mm e resolução de 0,01 mm;
3. Relógio comparador com apalpador milesimal da fabricante MITUTOYO, série 513, com faixa nominal de 0,14 mm e resolução de 0,001 mm;

4. Esquadro utilizado com altura de 450 mm e 120 mm de diâmetro da fabricante MITUTOYO.
5. Interferômetro Laser XL-80 da fabricante RENISHAW.

Uma câmera digital *GoPRO Hero 6* foi utilizada para visualizar e registrar as medições realizadas através dos relógios comparadores, em pontos da cabine de Radioscopia Industrial de difícil acesso devido a necessidade de fechamento da porta do equipamento ou ainda onde não era possível a presença, assim como a proximidade de pessoas devido ao deslocamento do sistema cinemático. Na Figura 4.30 é apresentado um exemplo de uso da câmera e um dos acessórios de fixação que foram empregados para visualização e registro das medidas de erro de posicionamento linear empregando relógio comparador apalpador e padrão escalonado.

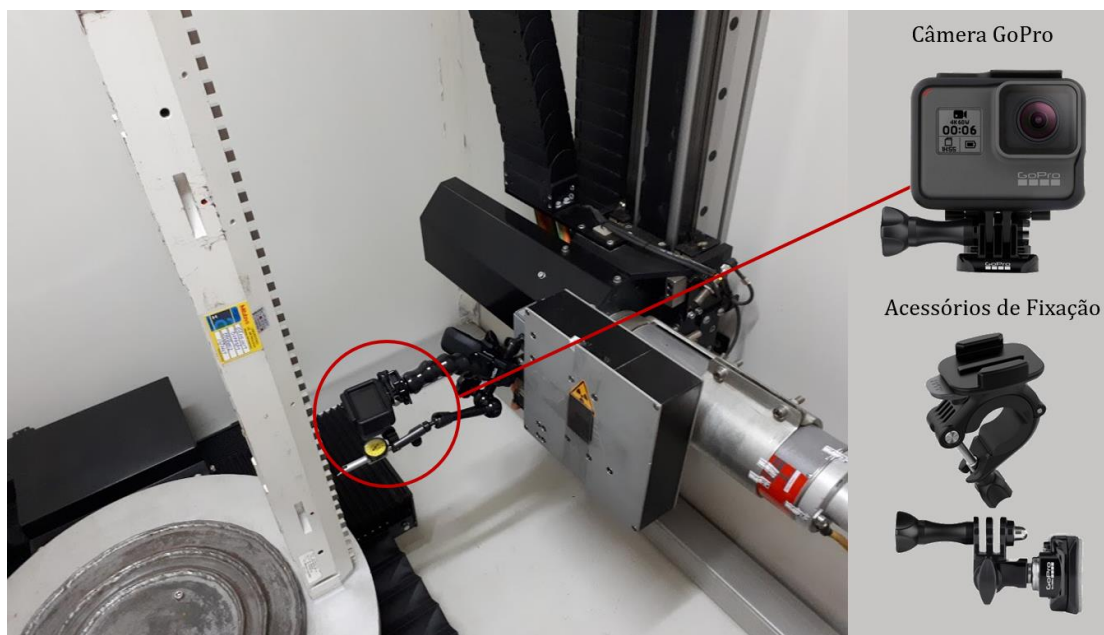


Figura 4.30: Visualização e Registro com a câmera GoPro, das medidas de erro de posicionamento linear

4.5.3. Considerações sobre o uso do interferômetro laser

Antes de fazer uso do interferômetro laser para avaliação do sistema cinemático foi necessário, minimamente, a verificação de três condições verificação da viabilidade do ensaio experimental.

A *primeira* está relacionada quanto a disponibilização das informações de posição, obtidas através do sistema que gerencia a movimentação dos eixos automáticos do sistema, pois se faz necessário programar o espaçamento entre as posições a serem medidas nos eixos. Além disso os erros são calculados a partir das posições referenciadas neste programa, que são obtidas através da relação entre o deslocamento do eixo e os pulsos gerados pelo sistema de medição de deslocamento (escala ou *encoder*) em pulsos/ μm , com as medidas obtidas no interferômetro laser.

A *segunda* restrição é que o feixe do interferômetro não pode ser interrompido, pois ele perde a informação do feixe refletido, impedindo o cálculo do erro de posicionamento.

A *terceira* refere-se ao controle da temperatura e umidade, para que sejam obtidas medidas mais exatas. O ambiente em que a máquina de Radioscopia Industrial opera também possui fatores que provocam erros e incertezas na medição.

Nestas medidas a temperatura é um parâmetro crítico, pois a sua variação altera tanto as dimensões medidas na peça, em função do material que ela é feita, quanto ao comportamento geométrico-dimensional da própria máquina. Para minimizar a influência deste fator as boas práticas recomendam que as medições sejam realizadas na temperatura de referência de $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, condição esta que geralmente é recomendada para a operação de máquinas de medir visando garantir as especificações do fabricante relativo ao seu desempenho metrológico [106].

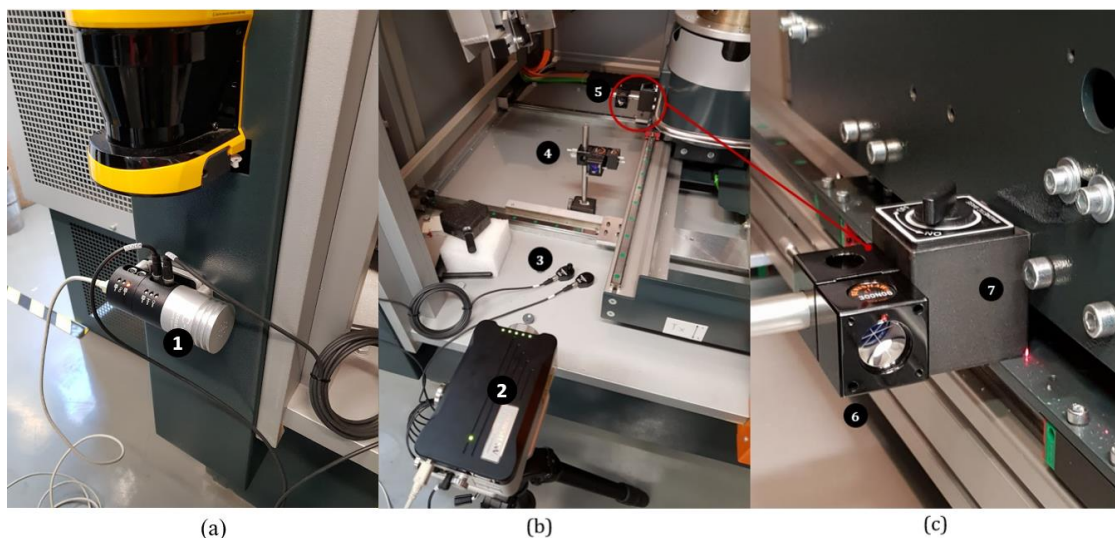


Figura 4.31: Testes iniciais com Interferômetro Laser num equipamento de Radioscopia Industrial. 1: Unidade XC-80 contendo sensor de umidade; 2: Laser do XL-80; 3: Sensores de Temperatura do Ar e do Material; 4: Splitter Óptico com Retrorefletor; 5: Retrorefletor; 6: Detalhe do Retrorefletor; 7: Base Magnética

Não houve disponibilidade para realização dos ensaios no equipamento RB, no período destinado a estas atividades na pesquisa. Por isso, os ensaios foram realizados somente com o equipamento RA. O equipamento RA por questões de segurança somente realiza a movimentação dos eixos com as portas da cabine fechada, o que limitou o uso do interferômetro. Por isso, optou-se por usar os padrões corporificados associados aos relógios comparadores.

4.5.4. Procedimentos para Avaliação dos Principais Erros do Sistema Cinemático por Padrões Corporificados.

Nesta metodologia de qualificação não foi avaliada a exatidão do movimento *Tilt*, para tanto foi travado e zerado os eixos que controlam Z_3 e Z_4 . A nomenclatura aqui utilizada, sempre estará tomando como referência a Figura 4.29.

a) Erros de Posicionamento Linear

Na avaliação dos erros de posicionamento linear dos eixos x, y e z. Para tanto, foram utilizados o relógio apalpador e o bloco padrão escalonado. O padrão foi apoiado na mesa rotativa e alinhado com o eixo x. O primeiro bloco foi apalpado através do comando do CNC e zerado o relógio nesta posição. Foi repetido este procedimento para os demais blocos do padrão e gravadas no sistema estas coordenadas.

Na sequência foi realizada a programação do CNC para repetir este deslocamento por 6 (seis) ciclos, sendo registrado o valor lido no relógio para cada posição, visando verificar os desvios de repetitividade. Na Figura 4.32 é apresentado o arranjo experimental para os três eixos. No caso do eixo z, este procedimento foi repetido para z_1 e z_2 .

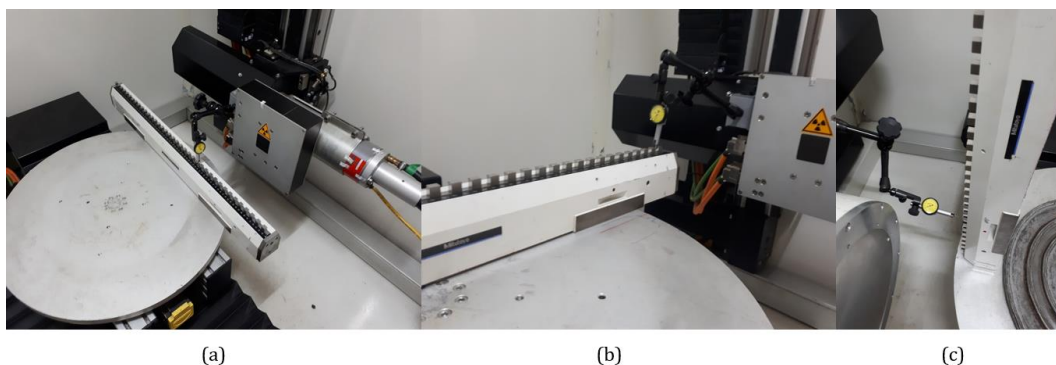


Figura 4.32: Avaliação dos erros de posicionamento linear para os eixos x (a), y (b) e z (c).

b) Erros de Perpendicularidade

Com este procedimento foi possível avaliar os erros de perpendicularidade entre a mesa rotativa e o tubo de Raios X, assim como entre a mesa rotativa e o detector. No ensaio experimental foram utilizados o relógio comparador e o padrão esquadro cilíndrico.

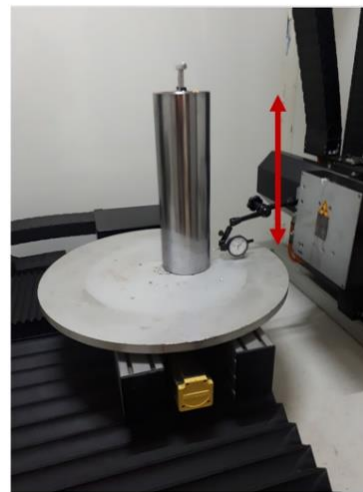
O padrão foi apoiado na mesa rotativa e alinhado com o eixo do detector (Z_1), sendo centralizado em 1 mm. A mesa rotativa foi mantida fixa.

O relógio comparador foi fixado no eixo Z_1 e encostado na base do esquadro cilíndrico até zerar o relógio. O eixo foi deslocado verticalmente até o final do esquadro cilíndrico através do CNC da máquina de radioscopia, sendo registrada a maior indicação do relógio. A mesa foi rotacionada em 90° e repetido o procedimento.

O erro de perpendicularidade equivale ao maior valor indicado no relógio, que é o pior caso. Na Figura 4.33 é apresentado o arranjo experimental para os dois eixos Z_1 para o detector e Z_2 para o tubo Raios X.



(a)



(b)

Figura 4.33: Erro de Perpendicularidade para os eixos Z_1 e Z_2

c) Erros de Retilidade

Estes erros foram levantados a partir dos dados obtidos dos erros de perpendicularidade. A partir dos dados obtidos, calcula-se uma reta pelo 1º e último ponto. O erro de retilidade será o maior afastamento dos pontos medidos em relação a esta reta, como indicado na Figura 4.34.

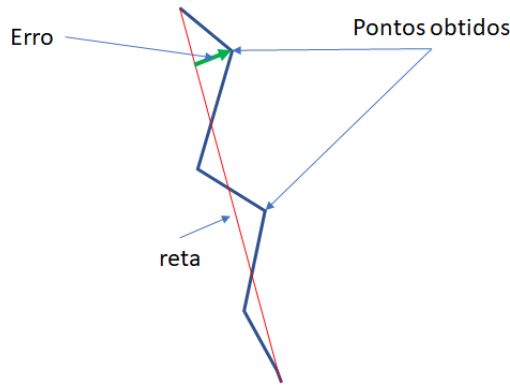


Figura 4.34: Erro de Retilidade para os eixos z_1 e z_2

d) Erro de posicionamento angular da mesa rotativa

Com este procedimento foi possível avaliar os erros de posicionamento angular da mesa rotativa, eixo R. No ensaio experimental foram utilizados relógio apalpador e blocos padrões pequenos (entre 20 mm e 40 mm), os blocos não precisam ser necessariamente iguais. Outras alternativas podem ser avaliadas, no caso da pesquisa havia a disponibilidade de um bloco padrão escalonado, então este padrão foi utilizado.

Foram apoiados os blocos-padrão na mesa rotativa a aproximadamente 90° um do outro, de modo que possam ser apalpados pelo relógio em uma de suas faces. Na seqüência foi fixado o relógio apalpador no eixo z_1 (neste caso poderia também poderia ter sido usado o z_2). Através do CNC da máquina de radioscopia a mesa foi rotacionada para a posição 0° , este primeiro bloco foi apalpado e zerado o relógio apalpador e guardada esta posição no programa. Este procedimento foi repetido para as posições nos ângulos 90° , 180° e 270° , a Figura 4.35 apresenta o esquema do ensaio experimental. A máquina foi programada para repetir o ensaio 5 (cinco) vezes, sendo avaliada a repetitividade do posicionamento angular.

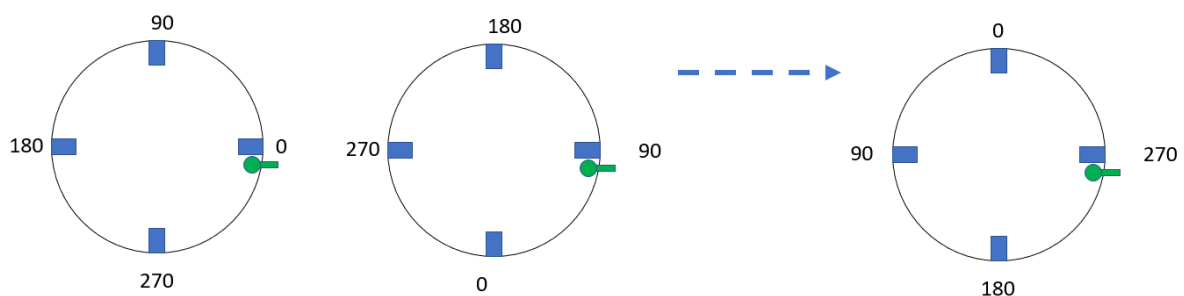


Figura 4.35: Erros de posicionamento angular

e) Erros de Batimentos Radial e Axial da mesa rotativa.

Os erros de batimento radial e axial da mesa rotativa foram obtidos empregando um relógio comparador, com auxílio de uma base magnética.

A base magnética foi fixada no eixo vertical da máquina de radioscopia, mas poderia ser fixada em qualquer parte da máquina fora da mesa rotativa (desde que seja assegurado que no ponto de fixação não haverá vibração). A mesa rotativa foi apalpada com o relógio comparador no sentido radial. O relógio comparador foi zerado, sendo armazenada esta posição no sistema e através do CNC a mesa foi rotacionada em 360°, sendo registrada a diferença entre a maior e a menor indicação do relógio. Foi realizada programação do CNC para repetir este ciclo 5 (cinco) vezes, sendo repetido o mesmo procedimento para o sentido axial, visando avaliar também a repetitividade. A Figura 4.36 ilustra o esquema do ensaio experimental.



Figura 4.36: Erro de Batimento Radial e Axial

4.6 Avaliação do Sistema de Segurança e Radioproteção

Os sistemas de radioscopia industrial estão acondicionados em cabines auto blindadas em chumbo e aço. Os fabricantes de cabines autoblandadas operando com tensões de até 225 kV, geralmente, assumem como critério de proteção uma taxa de dose menor que 1 μ Sv/hora a 10 cm de qualquer superfície acessível [2,3,4]. Deste para confirmação das taxas de dose foi realizado levantamento radiométrico no em torno do equipamento, repetindo in loco o procedimento adotado pelo fabricante de cada equipamento de radioscopia industrial.

Uma câmara de ionização modelo 9DP-1 da fabricante LUDLUM, devidamente calibrada, foi utilizada no levantamento radiométrico. Na oportunidade do levantamento radiométrico foi verificado o estado e a função dos sensores de intertravamento, assim como a atuação dos botões de emergência.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados que retratam a aplicação da metodologia de testes desenvolvida neste trabalho para avaliação da performance de equipamentos comerciais de Radioscopia Industrial, aqui denominados de RA e RB.

A apresentação dos resultados seguirá a sequência descrita na Tabela 4.1. Um dos diferenciais significativos do equipamento A para o sistema B, deve-se que o detector no equipamento de radioscopia industrial RA é um intensificador de imagem.

Devido a motivos de disponibilidade, nem todos os testes aplicados ao equipamento RA foram aplicados ao equipamento RB. Esta informação será sinalizada junto aos resultados sempre que for aplicável.

Como já descrito anteriormente, um dos motivos que justificou a escolha de equipamentos com tecnologia de detecção diferentes, deve-se que no Brasil a maioria das fundições de alumínio e ferro empregam o intensificador de imagem como detector. O fabricante do equipamento RA também comercializa equipamento de radioscopia industrial contendo FPD.

5.1 Gerador de Raios X

5.1.1 Exatidão

Durante o procedimento de obtenção da exatidão da tensão, fontes de incerteza foram consideradas de forma a melhor representar os resultados da medição. Neste sentido, as incertezas foram calculadas tomando como referência o método referenciado no ISO GUM [107]. O fabricante declara que a incerteza associada ao medidor Cobia é de 2% para um intervalo de confiança de 95%. Neste sentido, para o cálculo da incerteza tipo B foram assumidos uma distribuição normal e o cálculo da incerteza padrão foi tomada dividindo a incerteza associada a cada medida pelo fator 1,96 [107]. Não houve disponibilidade de uso do equipamento RB para realização deste ensaios, por este motivo nesta seção somente serão apresentados os resultados para o equipamento RA.

Tabela 5.1: Resultados das Medidas de Exatidão da tensão e incertezas associadas para 5(cinco) repetições

Medição	$kV_{nominal}$	$kV_{médio}$	d (%)	sp	μ_A	μ_B	μ_C
1	40	41,3	3,2%	0,32	0,15	0,41	0,43
2	50	51,1	2,2%	0,28	0,12	0,51	0,52
3	60	61,2	2,0%	0,30	0,13	0,61	0,63
4	70	69,8	0,3%	0,05	0,02	0,71	0,71
5	80	81,4	1,8%	0,35	0,16	0,82	0,83
6	90	90,8	0,9%	0,20	0,09	0,92	0,92
7	100	98,6	1,4%	0,35	0,16	1,02	1,03
8	110	109,8	0,2%	0,05	0,02	1,12	1,12
9	120	121,3	1,1%	0,32	0,15	1,22	1,23
10	130	126,8	2,5%	0,80	0,36	1,33	1,37
11	140	139,4	0,4%	0,15	0,07	1,43	1,43
12	150	149,5	0,3%	0,13	0,06	1,53	1,53

Onde: $kV_{nominal}$ é a tensão ajustada no console de comando; $kV_{médio}$ é a média em 5 (cinco) repetições de medida de tensão; d (%) é a exatidão; s_p é o desvio padrão experimental; μ_A é a incerteza do tipo A; μ_B é a incerteza do tipo B e μ_C é a incerteza combinada.

Os desvios calculados são inferiores a 5 %, estando em conformidade com os critérios de performance adotados neste trabalho. É verificado que a influência das incertezas relativas a medição foram consideravelmente controladas e atenuadas, tendo em vista que a maior contribuição para a incerteza combinada foi a do Tipo B que está relacionada a incerteza do medidor de tensão não invasivo.

5.1.2 Reprodutibilidade

No que tange a reprodutibilidade da tensão, na Figura 5.1 é apresentado o gráfico do coeficiente de variação para as medidas realizadas em função da tensão ajustada no console de comando. Para cada valor de tensão ajustada houveram 5 (cinco) repetições. Os resultados indicam que para toda a faixa de tensão analisada no equipamento RA os coeficientes de variação não foram superiores a 1%, deste modo estando abaixo do limite estabelecido pela NBR IEC 60601 que é de 5%, portanto não apresentando variações de pico significativas para uma série de repetidas exposições.

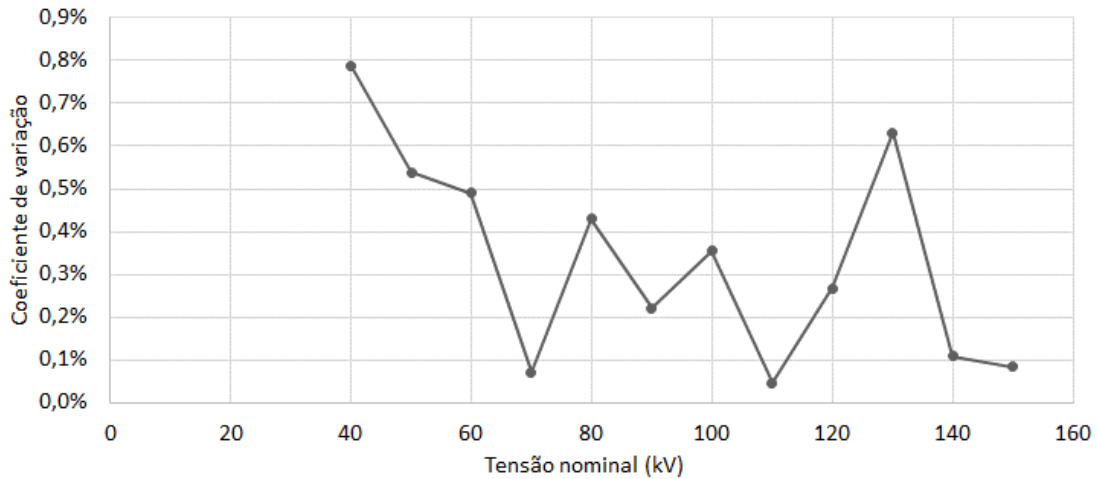


Figura 5.1: Avaliação da Reprodutibilidade das medidas de tensão do equipamento de Radioscopia Industrial RA.

5.1.3 Variação da tensão em função do tempo de exposição

Quanto a estabilidade na manutenção do valor da tensão durante o tempo de exposição de 5 (cinco) segundos, verifica-se na Figura 5.2 que os coeficientes de variação dos valores de pico não foram superiores a 2,5 % para a faixa de tensão analisada do equipamento de Radioscopia Industrial RA. A variação foi inferior a 5 %, estando em conformidade com os critérios de performance adotados neste trabalho.

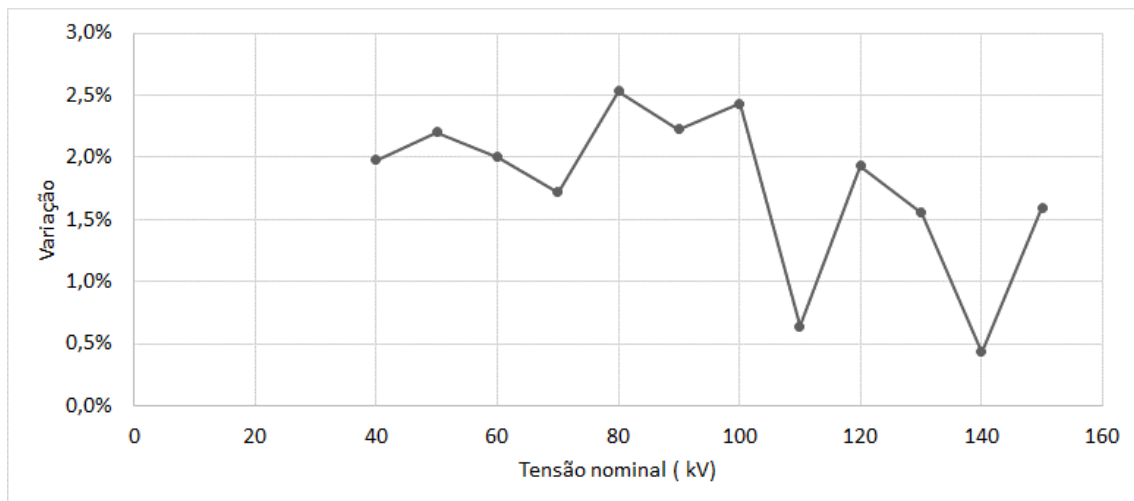


Figura 5.2: Avaliação da variação da tensão em função do tempo de exposição

Não foram identificadas referências normativas quanto a estabilidade da tensão na área radiológica industrial, mas existem alguns fatores que influenciam a estabilidade do tensão e podem contribuir para a variação deste valor.

No caso do equipamento RA o sistema de arrefecimento e de alimentação elétrica do tubo de Raios X são bem controlados e são realizadas manutenções preventivas periódicas. O gerador de alta tensão do tubo é ligado num sistema *nobreak* (conversor a semiconductor-sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada).

Em linhas gerais num *nobreak* a tensão AC na entrada é convertida em tensão DC pelo retificador. O inversor converte esta tensão DC para uma tensão AC com forma de onda senoidal, amplitude e frequência estabilizadas. O inversor é responsável por 100% da potência fornecida à carga por 100% do tempo de operação. Além disso, num *nobreak* existem sensores de temperatura que monitoram a eletrônica interna ao equipamento, assim como a temperatura ambiente. O ambiente onde estão instalados os equipamentos de radioscopia a temperatura é mantida controlada no valor de $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$.

Um outro fator que também pode contribuir para uma maior estabilidade da tensão, no equipamento RA é o fato do tubo de Raios X ser um tubo selado, deste modo as condições de vácuo dentro do tubo são menos suscetíveis a variações do que um tubo aberto.

5.2.2 Tamanho e Forma do Ponto Focal

Nesta seção serão apresentados os resultados de avaliação do ponto focal para os tubos de Raios X dos equipamentos RA e RB empregando *Star Pattern*. Visando avaliar a consistência do método com *Star Pattern*, para ambos os tubos de Raios X também foram realizados ensaios de acordo com as normas ASTM E1165-12 (método IPL) e EN 12543-5, visando a comparação dos resultados.

Nos testes experimentais procurou-se manter, sempre que possível, as faixas de tensão e potência na mesma ordem de grandeza tanto para o equipamento RA quanto para o equipamento RB. A Figura 5.3 mostra uma visão consolidada dos desvios padrão e médio para as todas as medições dos pontos focais realizadas nos equipamentos RA e RB, onde são comparados os resultados do método *Star Pattern* e do método empregando a norma ASTM E1165-12.

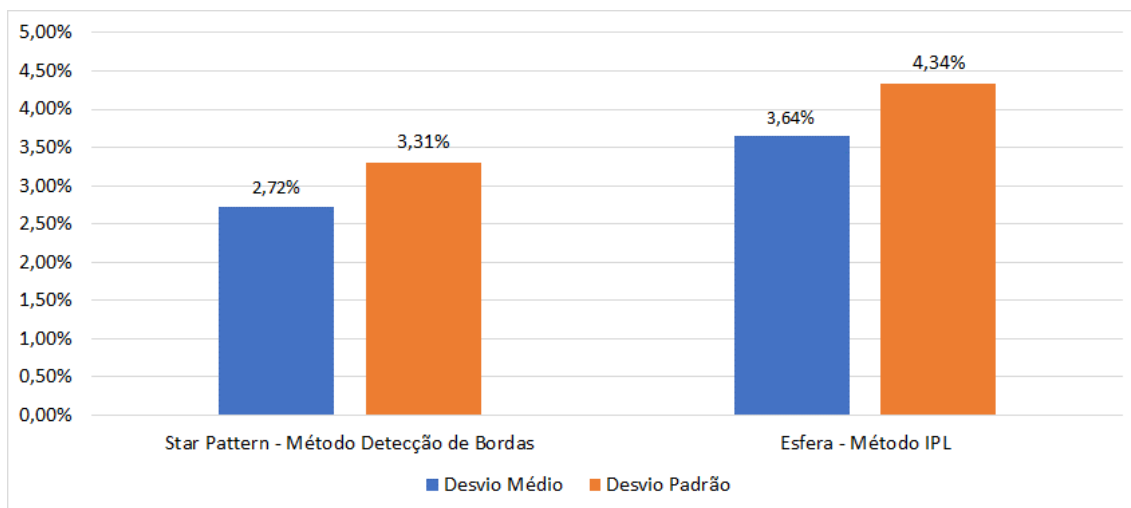


Figura 5.3: Comparação dos desvios médios e padrão entre o *Star Pattern* com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (*integrated line profile*) para os equipamentos RA e RB.

Nos ensaios experimentais a potência variou dentro do intervalo possível para cada método e ponto focal. O cálculo dos desvios foi construído a partir da análise de 61 (sessenta e uma) imagens radiográficas, 40 (quarenta) imagens do *Star Pattern* e 21 (vinte e uma) imagens imagens mais representativas da esfera.

A quantidade de medidas para o método empregando a esfera foi menor do que o *Star Pattern* porque a norma ASTM E1165-12 recomenda que a energia dos Raios X empregada nos ensaios seja setada no valor de 75% ($\pm 5\%$) da energia máxima do tubo, mas não mais que a tensão máxima usada em todas as aplicações. No método empregando a esfera para o equipamento RA a tensão foi ajustada em 70 kV e no equipamento RB a tensão ajustada foi em 60 kV. No equipamento RA para o ponto focal fino a corrente foi variada de 3 a 9 mA, em passos de 2 mA. No ponto focal grosso a corrente variou de 3 a 13 mA, com incremento de 2 mA. No equipamento RB para o ponto focal fino a corrente foi variada de 3 a 11 mA em passos de 2 mA. No ponto focal grosso a variação foi a mesma do que a aplicada no equipamento RA.

Ao analisar a Figura 5.3 o método *Star Pattern* apresentou para todas as medidas valores de desvios padrão e médio inferiores a 5% , mostrando uma forte compatibilidade com o método da norma ASTM E1165-12. Quando comparado com o método IPL, as diferenças dos desvios médio e padrão de aproximadamente 1%.

Um fator que pode justificar os maiores desvios para o método que emprega a esfera é que não foram utilizados algoritmos computacionais para determinar as regiões de baixo contraste, portanto existe uma incerteza associada ao software Isee! e a fatores humanos. No entanto, a ordem da magnitude do desvio padrão é compatível com os resultados encontrados em [34] e com as especificações do fabricante. Por outro lado, utilizou-se um algoritmo de detecção de bordas para o cálculo da largura dos *wedges* do *Star Pattern* e a metodologia desenvolvida que permitiu a detecção das regiões de baixo contraste com desvios inferiores ao método da esfera, além da representação gráfica e quantitativa da anisotropia, através da quantificação das MTF nas direções vertical e horizontal.

As maiores diferenças observadas entre os erros médios na direção vertical e horizontal foram para o tubo de Raios X do equipamento RA com o ponto focal em 0,4 mm, com cerca de 4,6% para o método proposto com o *Star Pattern* e 11,9% para o método da norma ASTM E1165-12, Figuras 5.4 e 5.5. Também houve uma boa concordância entre os dois métodos nas avaliações os demais pontos focais dos tubos de Raios X dos equipamentos RA e RB, as diferenças observadas foram menores de 5 %.

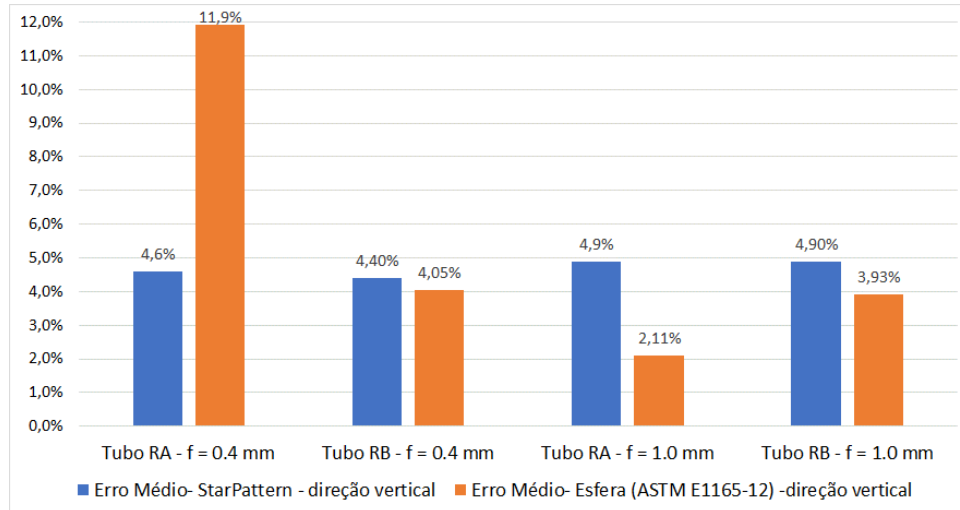


Figura 5.4: Erros Médios do ponto focal na direção vertical para os equipamentos RA e RB, comparando o *Star Pattern* com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (*integrated line profile*)

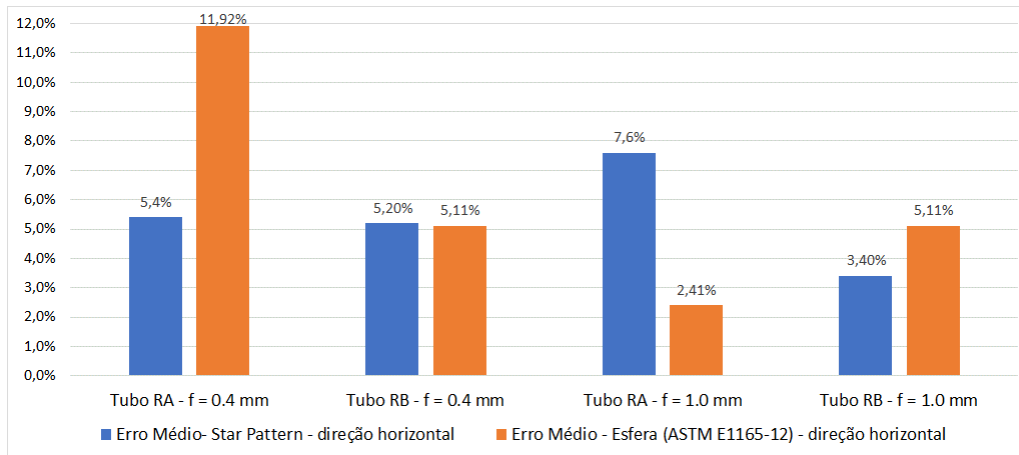


Figura 5.5: Erros Médios do ponto focal na direção horizontal para os equipamentos RA e RB, comparando o *Star Pattern* com método de detecção de bordas e a esfera com método IPL (*integrated line profile*)

A Figura 5.6 mostra que as direções das modulações são diferentes para cada seção do *Star Pattern* quando expostas a diferentes potências. O aumento da potência promove mudanças significativas nos níveis das regiões de contraste, esta informação é usada para o cálculo do ponto focal pois é possível ser detectada pelo algoritmo de detecção de bordas.

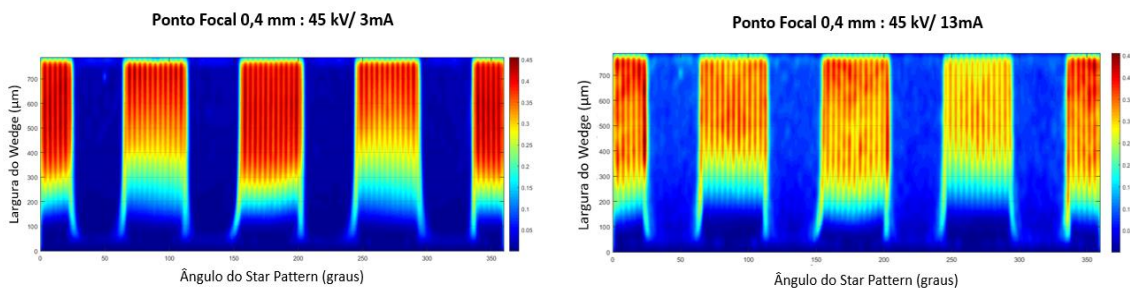


Figura 5.6: Imagens radioscópicas do *Star Pattern* para diferentes potências para o equipamento RB

Na avaliação dos desvios deve ser considerado que para os mesmos tipos de tubos com o mesmo tempo de uso e fabricante, podem haver desvios com comportamentos diferentes [36]. Portanto, quando avaliamos os desvios de pontos focais por imagens radiográficas, precisamos associar esta resposta ao sistema de radioscopia considerando as características de cada equipamento. Por este motivo, é conveniente avaliar a influência do aumento da potência no tamanho do ponto focal e se há uma diferença significativa no comportamento quando a corrente ou tensão é aumentada. Os resultados das medidas dos pontos focais para os equipamentos de radioscopia industrial RA e RB, são apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.10.

Tabela 5.2: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RA, aumento da potência com o aumento da corrente. Foco Fino: 0,4 mm

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
1	38	3	114	0,41	2,75%	0,41	3,50%
2	54	5	270	0,41	3,25%	0,41	3,50%
3	54	7	378	0,42	4,00%	0,42	4,25%
4	54	9	486	0,41	3,25%	0,42	3,75%
5	54	11	594	0,42	4,50%	0,43	7,50%
6	54	13	702	0,42	5,00%	0,43	7,50%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					88,73%		84,18%

Tabela 5.3: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RA, aumento da potência com o aumento da tensão. Foco Fino: 0,4 mm.

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
7	45	3	135	0,41	3,0%	0,42	4,50%
8	95	3	285	0,42	4,0%	0,42	5,00%
9	125	3	375	0,42	5,2%	0,43	7,50%
10	145	3	435	0,45	11,5%	0,43	7,50%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					81,11%		91,56%

Tabela 5.4: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RA, aumento da potência com o aumento da corrente. Foco Grosso: 1,0 mm

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
11	38	3	114	1,02	1,70%	1,04	3,99%
12	54	5	270	1,07	6,80%	1,04	3,99%
13	54	7	378	1,07	6,80%	1,11	10,81%
14	54	9	486	1,07	6,80%	1,11	10,81%
15	54	11	594	1,07	6,80%	1,13	12,52%
16	54	13	702	1,08	8,40%	1,14	14,00%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					81,66%		93,28%

Tabela 5.5: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RA, aumento da potência com o aumento da tensão. Foco Grosso: 1,0 mm

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
17	45	3	135	1,01	0,50%	1,04	3,99%
18	95	3	285	1,02	2,10%	1,02	2,22%
19	125	3	375	1,02	2,10%	1,07	6,91%
20	145	3	435	1,07	6,80%	1,07	7,00%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					82,11%		67,79%

Tabela 5.6: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RB, aumento da potência com o aumento da corrente. Foco Fino: 0,4 mm.

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
21	45	3	135	0,40	0,09%	0,40	1,03%
22	45	5	225	0,40	0,09%	0,40	1,03%
23	45	7	315	0,41	1,88%	0,40	1,03%
24	45	9	405	0,42	1,88%	0,42	4,96%
25	45	11	495	0,42	1,88%	0,44	8,88%
26	45	13	585	0,43	1,88%	0,44	8,88%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					97,05%		90,48%

Tabela 5.7: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RB, aumento da potência com o aumento da tensão. Foco Fino: 0,4 mm.

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
27	45	3	135	0,41	0,09%	0,40	0,09%
28	95	3	285	0,42	5,81%	0,42	5,81%
29	125	3	375	0,42	9,91%	0,43	8,00%
30	145	3	435	0,45	9,91%	0,45	9,00%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					81,11%		99,56%

Tabela 5.8: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RB, aumento da potência com o aumento da corrente. Foco Grosso: 1,0 mm.

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
31	45	3	135	1,02	1,70%	0,95	5,00%
32	45	5	225	1,07	6,80%	0,91	8,90%
33	45	7	315	1,07	6,80%	0,91	8,90%
34	45	9	405	1,07	6,80%	0,99	1,00%
35	45	11	495	1,07	6,80%	0,99	1,00%
36	45	13	585	1,08	8,40%	0,99	1,00%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					81,66%		67,39%

Tabela 5.9: Medidas do Ponto focal do equipamento de Radioscopia RB, aumento da potência com o aumento da tensão. Foco Grosso: 1,0 mm.

Medida	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Potência (W)	p _{vertical} (mm)	d(%)	P _{horizontal} (mm)	d(%)
37	45	3	135	1,01	0,50%	0,95	5,00%
38	95	3	285	1,02	2,10%	0,99	1,00%
39	125	3	375	1,02	2,10%	0,99	1,00%
40	145	3	435	1,07	6,80%	0,99	1,00%
Coeficiente de Correlação (Potência, Tamanho do Foco)					82,11%		88,14%

A aplicação da metodologia proposta foi capaz de detectar 80 (oitenta) diferentes penumbras geradas a partir de diferentes valores de potência para dois equipamentos com sistemas de detecção distintos. Os resultados apontaram um erro médio de aproximadamente 5 % para todas as medidas, pode-se inferir que há uma correlação forte entre o aumento da potência e o aumento do ponto focal para todos os conjuntos de dados.

No equipamento de radioscopia RA, 55% das medidas apresentaram desvios inferiores a 5%, sendo que o maior desvio encontrado como aumento do ponto focal foi de 14% para o ponto focal grosso em maior potência na condição de corrente mais elevada. A frequência de desvios menores ocorreu nas potências mais baixas.

No equipamento de radioscopia RB, 53 % das medidas apresentaram desvios inferiores a 5%. Para este equipamento 95 % das medidas foram inferiores a 10 %, destaca-se uma correlação média de aproximadamente 92% entre o aumento da potência e o ponto focal.

Nas imagens radioscópicas analisadas pode-se inferir que a resolução espacial do detector e o número de níveis associados contribuíram para os desvios, principalmente quando empregadas técnicas computacionais para identificação das escalas de contraste. No caso do *Star Pattern* quando estamos dentro da região de penumbra esta variação ocorre de forma gradativa e a medida vai nos aproximando das bordas a frequência espacial vai diminuindo. Quando estas imagens são adquiridas através de um II, por exemplo, pelo fato deste possuir uma pior resolução espacial e ser natural do processo de aquisição uma maior geração de ruído do que no FPD, a identificação das regiões de baixo contraste pode ser muito prejudicada levando a erros de medição se não empregadas técnicas de pré-processamento de imagens adequadas para o cálculo do ponto focal visando atenuar estes fatores de influência.

Isto pode justificar o motivo maior frequência de erros médios observados para a ampola do equipamento RA. Devido a característica aleatória do fluxo de Raios X, a influência da potência do tubo na resolução espacial e na SNR do sistema, é possível que existam *outliers* que contribuam para que a relação existente entre o aumento da potência e o aumento do ponto focal não seja linearmente perfeita. Como as imagens radioscópicas são *inputs* para o algoritmo, estes efeitos influenciarão a precisão da detecção das bordas da penumbra. Isto pode justificar o motivo dos coeficientes de correlação não serem superiores a 90% para alguns conjuntos de dados.

Deve-se destacar que este cenário sempre será objeto de influência quando avaliamos pontos focais por imagens radiográficas.

Outrossim, BAVENDIEK [36] em “New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards”, realizou medidas de pontos focais de diversos fabricantes. Os procedimentos experimentais fundamentaram-se ASTM E1165 e na EN 12543, empregando um IQI de furo como objeto de teste, para as energias de 90 kV, 120 kV e 180 kV. Este trabalho também é referenciado na atual norma ASTM E1165. O erro médio encontrado para todas as medidas foi de 6,1%. Em termos quantitativos encontramos neste trabalho um erro médio de 5,1%, para todas as medidas mostrando proximidade com os valores encontrados em [34].

5.2 Detector

5.2.1 Resolução Espacial Básica (SRb)

No equipamento de radioscopia industrial RA estas avaliações foram realizadas no foco fino, pois busca-se avaliar qual a capacidade do sistema em identificar o menor detalhe geométrico, neste sentido foram analisadas a resolução espacial para três FOV: 9”, 6” e 4”. O critério para o ajuste da tensão e da corrente, foi o melhor contraste buscando uma $SNR > 250$, quando isso não foi possível o segundo critério foi que a SNR não fosse inferior a 130, não sendo utilizados filtros metálicos e recursos de PDI.

No campo de 9” com o equipamento de radioscopia ajustado para uma tensão de 39 kV e a corrente para 3 mA, pela análise do perfil de linha da imagem do IQI de fio duplo, o primeiro fio não resolvido o par 6D, que corresponde a uma penumbra de 0,50 mm segundo a norma ASTM E2002, portanto a resolução espacial básica que pode ser alcançada por este sistema de radioscopia nesta FOV é de 200 μm , o que segundo a referida norma corresponde a 2,5 pl/mm, conforme pode ser visto na Figura 5.7.

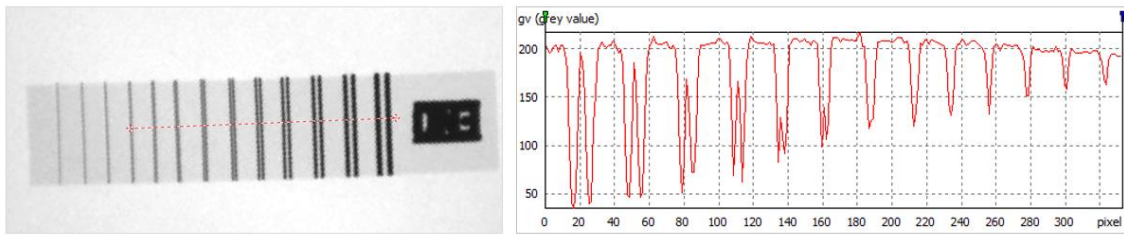


Figura 5.7: Imagem radioscópica de um IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RA com ponto focal de 0,4 mm no campo de 9 polegadas

No equipamento RA a avaliação da resolução espacial básica também foi realizada com o *bar pattern* de chumbo. Este IQI é coberto por uma camada de 0,1 mm de chumbo com densidade de 11,34 g/cm³. No equipamento de radioscopia RA para o campo de 9” foi possível discernir até 2,0 lp/mm, conforme Figura 5.8.

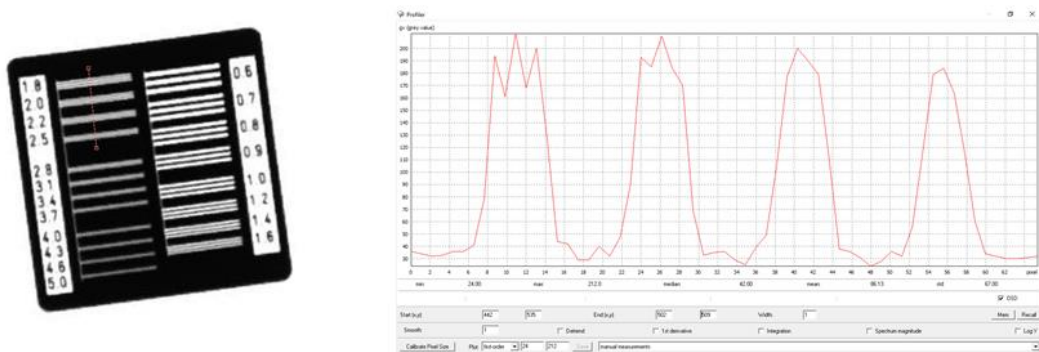


Figura 5.8: Imagem radioscópica do *Bar Pattern* e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RA com ponto focal de 0,4 mm no campo de 9 polegadas

Estas medidas foram repetidas para o campo de 6” e 4”. A tabela 5.11 resume as características de resolução espacial do equipamento RA empregando *bar pattern* e o IQI de fio duplo conforme ASTM E2002. O ajuste da tensão e da corrente no campo de 6” foi de 43 kV/3mA e no campo de 4” foi de 47 kV/3mA. Os resultados da tabela 5.11 indicam que as medidas realizadas com *Bar Pattern* tendem a apresentar um pior resultado quanto a qualificação da resolução espacial do que o IQI de fio duplo. Um dos motivos que pode justificar esta diferença é que no IQI ASTM E2002 a partir do par 3D o material de constituição dos fios é platina com densidade de aproximadamente 21,45 g/cm³, sendo aproximadamente o dobro do chumbo e por consequência produzindo uma melhor resposta em contraste, se considerado os mesmos critérios de SNR da imagem radioscópica, justificando um melhor discernimento entre os fios para este IQI.

Tabela 5.10: Qualificação da resolução espacial básica do detector para o equipamento de radioscopia RA

FOV	IQI de fio duplo ASTM E2002		Bar Pattern	
	μm	(pl/mm)	μm	(pl/mm)
Campo 9"	200	2,500	250	2,000
Campo 6"	160	3,125	160	3,100
Campo 4"	130	3,846	135	3,700

No equipamento de radioscopia industrial RB, pela análise do perfil de linha da imagem do IQI de fio duplo, o fio não resolvido foi o 10°, que corresponde a uma penumbra de 0,20 mm segundo a norma ASTM E2002, portanto a resolução espacial básica que pode ser alcançada por este sistema de radioscopia é de 100 μm sendo capaz de discernir até 5 pl/mm. O ajuste da tensão e da corrente considerou uma SNR > 250, sendo obtida esta condição em 90 kV/2 mA sem o emprego de filtros metálicos e de recursos de PDI.

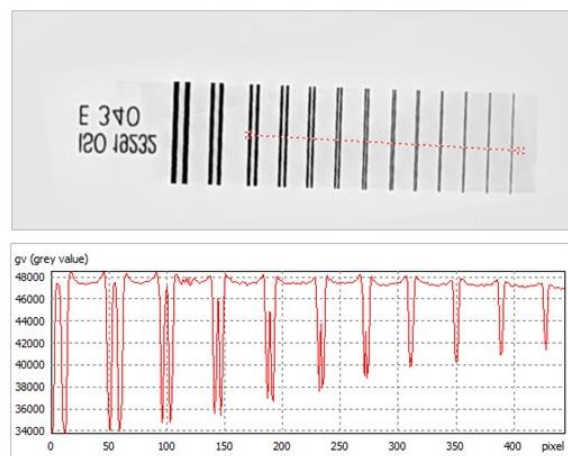


Figura 5.9: Imagem radioscópica do IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RB com ponto focal de 0,4 mm



Figura 5.10: Imagem radioscópica do Bar Pattern e seu respectivo perfil de linha para o equipamento de radioscopia RB com ponto focal de 0,4 mm

Analisando os resultados da Figura 5.10, o *bar pattern* apresentou resultados similares ao IQI da norma ASTM E2002. No equipamento RB foi possível discernir até 5 pl/mm. Portanto, empregando este IQI também é possível concluir que a resolução espacial alcançada pelo sistema foi de 100 μm .

As diferenças encontradas entre os tipos de IQI's nas medidas realizadas no equipamento RA, não foi perceptível no equipamento RB. O que pode justificar este resultado é o fato que a SNR do equipamento RB ser superior ao equipamento RA, devido as características inerentes a cada tipo de detector. Além disso, os níveis de quantização do equipamento RB são superiores ao RA. Esta metodologia também pode ser aplicada para avaliação do sistema no foco grosso, onde é esperado um desempenho inferior da resolução espacial em relação ao foco fino, pois discernibilidade é menor devido ao maior tamanho do ponto focal.

A norma ASTM 2597 estabelece critérios de qualidade para avaliação da resolução espacial de FPD's dentro de uma escala de 0 a 15, onde 0 representa uma condição de resolução espacial muito pobre no valor de 1000 μm e 15 muito elevada qualidade, no valor de 35 μm para uma tensão de 90 kV (sem filtro). Na tabela 5.12 é apresentada a classificação da resolução espacial dos equipamentos RA e RB, segundo a norma ASTM 2597 empregando o IQI de fio duplo ASTM E2002.

Tabela 5.11: Classificação da Resolução Espacial para os equipamentos RA e RB segundo a norma ASTM 2597

Equipamento	IQI de fio duplo ASTM E2002		Nível de Qualidade ASTM 2597
	μm	(pl/mm)	
RA (Campo 9")	200	2,500	7
RA (Campo 6")	160	3,125	8
RA (Campo 4")	130	3,846	9
RB	100	5,000	10

Convém ressaltar que o equipamento RA o detector não é um FPD e sim, um intensificador de imagens. A norma ASTM E1411-16 não prevê critérios de avaliação para qualificação de intensificadores de imagem, pois citando normas para avaliação de detectores que são específicas a qualificação de FPD. Ainda assim, a resolução espacial básica é um dos principais indicativos para qualificação de um equipamento de radioscopia. No entanto, convém analisar outros parâmetros de qualidade e verificar a capacidade de discernibilidade dos defeitos conjugada a outros parâmetros como a sensibilidade ao contraste e relação sinal ruído.

5.2.2 Função Transferência de Modulação (MTF) para magnificações distintas

Nesta seção é de interesse qualificar a influência da magnificação na MTF dos sistemas de radioscopia industrial. Conforme descrito na metodologia, estas avaliações foram realizadas para os materiais alumina, aço e carbetto de tungstênio. Foram tomadas medidas da MTF na direção vertical e horizontal.

Nas Figuras 5.11 e Figura 5.12 são apresentadas as imagens radioscópicas das esferas de tungstênio obtidas através dos equipamentos RA e RB para 5 (cinco) níveis de magnificação. Os parâmetros radiológicos foram selecionados visando o melhor contraste entre os materiais e o background (ar), desde que fosse garantida uma $SNR > 130$ [31]. Para cada sequência de ensaios com um determinado tipo de material todos os parâmetros foram mantidos constantes, exceto a magnificação. O ponto focal utilizado para as avaliações em ambos equipamentos foi de 0,4 mm, pois é do interesse qualificar o limite da resolução espacial alcançável pelos sistemas de radioscopia em função da magnificação, uma das formas de realizar esta avaliação é pela MTF.

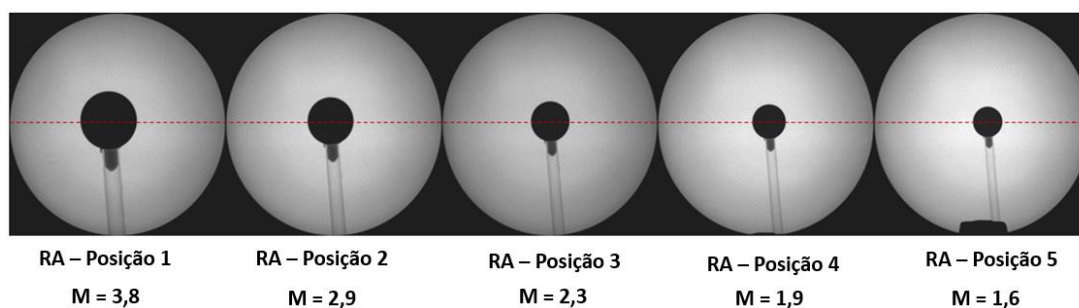


Figura 5.11: Medidas das Esferas de Tungstênio para os cinco níveis de magnificação para o equipamento de Radioscopia RA, a linha tracejada indica o centro das esferas. FOV=9”

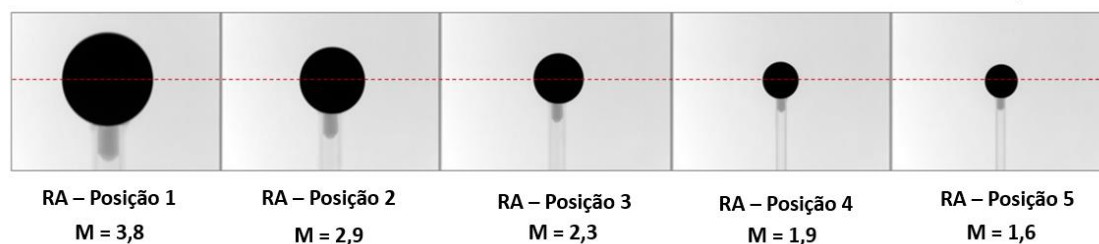


Figura 5.12: Medidas das Esferas de Tungstênio para os cinco níveis de magnificação para o equipamento de Radioscopia RB, a linha tracejada indica o centro das esferas

As tabelas 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam os resultados das avaliações das resoluções espaciais dos sistemas de radioscopia industrial em função da magnificação para o foco de 0,4 mm. O tempo de aquisição e de integração para todos os ensaios foram de 400 ms e 8, respectivamente. No equipamento RA não foi usado recurso de ampliação eletrônica.

Tabela 5.12: MTF para o equipamento RA / Material: Alumina

EQUIPAMENTO RA - (ALUMINA)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	30	30	30	30	30
Corrente	mA	2	2	2	2	2
MTF 20%	pl/mm	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6
Resolução Espacial	μm	294	294	313	313	313
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Tabela 5.13: MTF para o equipamento RB / Material: Alumina

EQUIPAMENTO RB - (ALUMINA)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	80	80	80	80	80
Corrente	mA	3	3	3	3	3
MTF 20%	pl/mm	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7
Resolução Espacial	μm	250	250	250	263	294
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Tabela 5.14: MTF para o equipamento RA / Material: Aço

EQUIPAMENTO RA - (AÇO)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	55	55	55	55	55
Corrente	mA	2	2	2	2	2
MTF 20%	pl/mm	2,3	2,3	2,2	2,1	2,0
Resolução Espacial	μm	217	217	227	238	250
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Tabela 5.15: MTF para o equipamento RB / Material: Aço

EQUIPAMENTO RB - (AÇO)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	120	120	120	120	120
Corrente	mA	3	3	3	3	3
MTF 20%	pl/mm	3,4	3,0	2,9	2,7	2,4
Resolução Espacial	μm	147	167	172	185	208
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Tabela 5.16: MTF para o equipamento RA / Material: Tungstênio

EQUIPAMENTO RA - (TUNGSTÊNIO)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	60	60	60	60	60
Corrente	mA	2	2	2	2	2
MTF 20%	pl/mm	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
Resolução Espacial	μm	200	208	208	217	227
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Tabela 5.17: MTF para o equipamento RB / Material: Tungstênio

EQUIPAMENTO RB - (TUNGSTÊNIO)						
Parâmetro	Unidade	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tensão	kV	130	130	130	130	130
Corrente	mA	3	3	3	3	3
MTF 20%	pl/mm	4,0	4,0	3,7	3,1	2,9
Resolução Espacial	μm	125	125	135	161	172
Fator de Magnificação		3,8	2,9	2,3	1,9	1,6

Pelos resultados constata-se que a MTF é diretamente proporcional a magnificação, estas constatações estão em consonância com as avaliações também realizadas por BOYCE e SAMEI [98]. Pelo fato do corpo de prova ser homogêneo e esférico foi possível medir a MTF em várias direções. Foram considerados os valores mais representativos na direção vertical e horizontal para cada magnificação, sendo computado o maior valor alcançado da MTF_{20%} para o cálculo da resolução espacial. A Figura 5.13 apresenta graficamente o resultado consolidado das medidas para os equipamentos RA e RB.

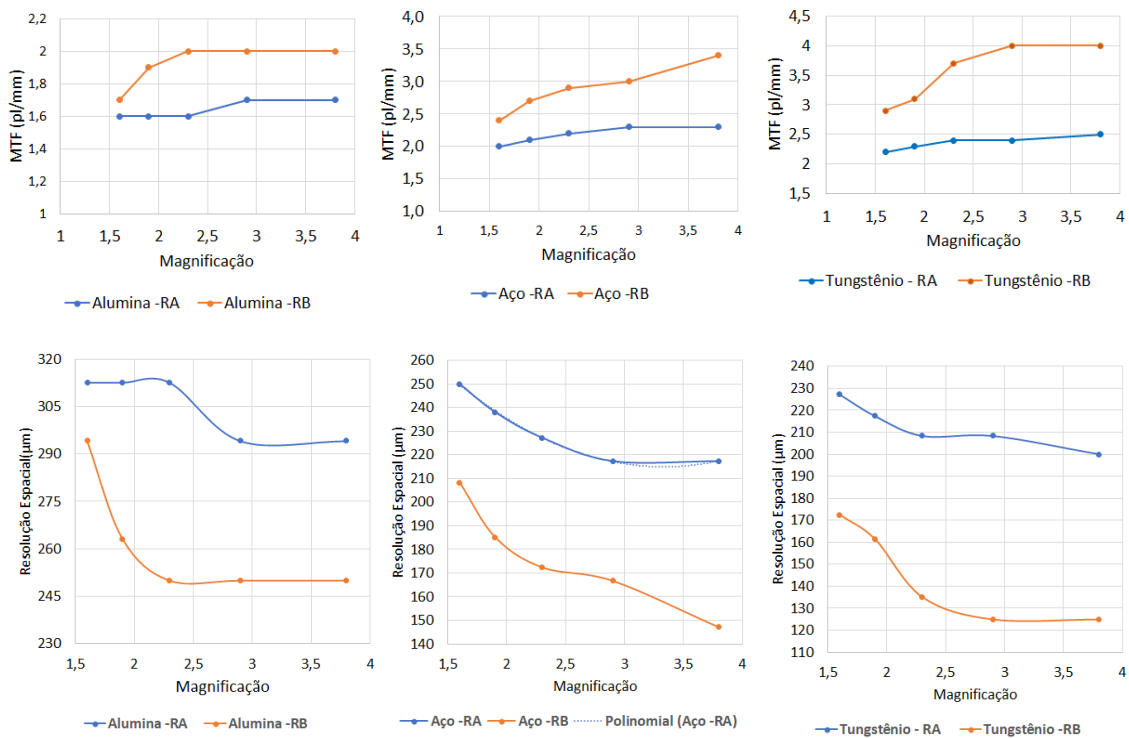


Figura 5.13: Resultado consolidado da MTF versus a magnificação e da resolução espacial versus a magnificação para os equipamentos RA e RB, considerando os materiais alumina, aço e carbeto de tungstênio.

Na Figura 5.13 verifica-se que a densidade do material influencia na MTF. Neste contexto, convém destacar que a MTF do sistema pode ser calculada pela transformada de Fourier da derivada primeira da ESF (*Edge Spread Function*), conforme Equação 2.1, que está relacionada com uma função degrau associada a borda do objeto.

Idealmente esta função degrau seria uma transição do preto para o branco, neste caso a MTF tenderia ao seu valor máximo, devido ao alto contraste. Na realidade esta variação não é tão abrupta, mais sim uma transição mais ampla em vários níveis de cinza, logo se considerarmos que a distribuição dos valores de cinza é tomada por um perfil de linha perpendicular a borda do objeto, podemos então calcular a ESF [86].

Neste sentido quanto mais denso for o objeto de teste haverá uma tendência da ESF a se aproximar de uma função degrau ideal e conseqüentemente maior será a frequência espacial, ou seja, maior será a MTF. Isto pode justificar o motivo dos resultados mais altos de MTF alcançados para as esferas de carbeto de tungstênio para ambos os sistemas de radioscopia. Portanto, a qualificação de desempenho quanto a resolução espacial de um sistema de radioscopia necessita levar em consideração o material objeto de teste. Na Figura 5.13 pode ser verificado que a resolução espacial alcançada pelos equipamentos RA e RB em máxima magnificação não utrapassaram a resolução espacial básica qualificada na seção 5.2.1, a tabela 5.19 compara estes resultados.

Tabela 5.18: Comparação dos valores medidos da Resolução Espacial Básica (SRb) e Resolução Espacial (RE) em máxima magnificação empregando esfera de carbeto de tungstênio para os equipamentos RA e RB

Equipamento	SRb		RE	
	μm	($\mu\text{l/mm}$)	μm	($\mu\text{l/mm}$)
RA	200	2,500	200	2,500
RB	100	5,000	125	4,000

Os resultados da tabela 5.18, confirmam que a resolução espacial é limitada pelo pixel efetivo do detector (aqui definida como SRb, obtida com o IQI de fio duplo), a magnificação e a penumbra gerada pelo ponto focal. Isto pode justificar o porque a MTF não é melhorada mesmo com o aumento da magnificação, pois foi alcançado o limite da resolução espacial para o referido fator de ampliação geométrica.

Quanto a influência do detector deve ser considerado que no equipamento RA há um II acoplado a um CCD com área ativa de $7,4 \times 7,4 \text{ mm}^2$, 8 bits e uma matriz de pixel ativos de 960×960 . No equipamento RB o detector é um FPD com área ativa de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, 16 bits e possui 1024×1024 pixels ativos. O equipamento RB por ter um número de elementos ativos de pixels maior do que equipamento RA, produz imagens com frequências espaciais mais elevadas e numa maior área ativa.

Isso contribui para o aumento do nível de sinal no detector promovendo uma significativa melhora da função de transferência de modulação (MTF), o que contribui para um melhor desempenho da resolução espacial no equipamento de radioscopia RB.

5.2.3 Sensibilidade ao Contraste Alcançável (CSa)

As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam as CSa resolvidas para os equipamentos de radioscopia RA e RB. Nas tabelas os valores especificados na coluna *Step* são as espessuras dos degraus em milímetros, numerados de 1 a 8, associadas as seguintes espessuras respectivamente: 10 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm e 140 mm.

Geralmente a representação dos resultados de CSa (%) se dão em função do tempo de exposição. Na norma ASTM 2597 são dado exemplos de tempo como 1, 4, 16 e 64 segundos. No entanto, o tempo não é um parâmetro variável pelos usuários nos ensaios de rotina em equipamentos de radioscopia industrial pois a inspeção se dá em tempo real, por este motivo neste trabalho os resultados de CSa estão em função da tensão ajustada. O valor de CSa é o % da espessura de parede penetrada em função da tensão.

Tabela 5.19: Resultados da CSa (5%) para o equipamento de radioscopia industrial RB

CSa (5%) – EQUIPAMENTO DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL RB									
Step	60 kV	80 kV	100 kV	120 kV	140 kV	160 kV	180 kV	200 kV	220 kV
1	0,28%	0,07%	0,19%	0,24%					
2	0,02%	0,08%	0,22%	0,31%	0,28%				
3			0,18%	0,27%	0,32%	0,23%	0,09%	1,84%	1,78%
4				0,02%	0,22%	0,28%	1,48%	1,59%	1,71%
5				0,02%	0,06%	0,50%	5,619%	0,38%	0,43%
6				0,02%	0,06%	0,06%	0,302%	0,49%	0,26%
7					0,06%	0,04%	0,421%	0,51%	0,73%
8						0,04%	0,639%	0,11%	0,75%

Tabela 5.20: Resultados da CSa (5%) para o equipamento de radioscopia industrial RA

CSa (5%) – EQUIPAMENTO DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL RA											
Step	40 kV	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	110 kV	120 kV	130 kV	140 kV
1	13,60%										
2		8,41%									
3			11,9%	2,74%							
4				11,65%	7,46%	5,783%					
5						14,01%	8,50%	18,74%			
6							6,11%	7,93%	8,52%	8,33%	5,56%
7									7,29%	10,05%	10,99%
8											22,99%

No equipamento RA para que fosse realizada a avaliação de todas as espessuras do *Step Wedge* foi necessária uma menor transição no passo da tensão ajustada, sob pena de perda de informação devido a falta de níveis de contraste, uma vez que a corrente foi mantida constante.

Segundo a norma ASTM 2597 quanto mais baixo o valor CSa (%) melhor é avaliado o FPD para uma dada tensão ajustada, pois melhor será a sua capacidade em distinguir diferenças de espessuras, de densidades e/ou composição química do objeto, através de uma diferença de sinal na imagem. No entanto, estes valores estão limitados dentro de uma escala de 0 a 15, onde 0 representa a pior condição de sensibilidade ao contraste com valor de 3,2% e 15 uma elevada qualidade com valor de 0,1% para 160 kV, considerando o material alumínio e com 4 segundos de exposição.

Conforme já discutido nas seções anteriores a a norma ASTM 2597 não prevê critérios para a qualificação de intensificadores de imagens. No entanto, o cálculo da CSa está fundamentado em diferenças de sinais em áreas de mesmo material com uma diferença em 5% de espessura para um dado *step* ou degrau, portanto é razoável afirmar que pelos resultados obtidos nas tabelas 5.20 e 5.21, o equipamento RB é mais sensível ao contraste do que o equipamento RA. Também é verificado uma quantidade menor de CSa alcançáveis para o equipamento RA em relação ao RB denotando uma menor variação da escala de valores de cinza, devido a uma quantidade menor de níveis de quantização disponibilizado por este equipamento comparado ao sistema RB. Em contrapartida, verifica-se que o equipamento RA para tensões menores alcança maiores espessuras do que o equipamento RB.

Se aplicado os critérios da norma ASTM 2597 para o equipamento RB, mesmo com tempo de exposição praticamente instantâneo, ainda assim o sistema apresenta bom resultado, pois a CSa média para a tensão de 160 kV ficou em 0,34 % se enquadrando no nível de qualidade entre 9 e 10. Segundo AZEREDO [40] a SNR de um FPD, juntamente com a qualidade da radiação e com o contraste relativo obtido pelo feixe de radiação no objeto, constituem um elemento de qualidade da imagem que se relaciona com a sensibilidade ao contraste do FPD.

Quanto maior a SNR melhor a qualidade da imagem, melhorando a sensibilidade ao contraste, onde os níveis de ruído são superados em relação às diferenças de sinal. A SNR do sistema FPD pode ser aumentada significativamente pela captura de múltiplas imagens com configurações e integrações idênticas no computador (média de imagens, termo conhecido como *frames*).

Diante do exposto, se aplicado este conceito ao equipamento RA uma das possíveis contramedidas para melhorar a resposta da sensibilidade ao contraste seria aumentar o número e o tempo de aquisição das imagens, pois este recurso é disponível tanto no equipamento RA quanto no RB. No entanto, deve ser ressaltado que os sistemas de radioscopia industrial se caracterizam por inspeção em tempo real, portanto devem ser avaliados se o aumento do tempo pode prejudicar a produtividade das inspeções. Nas Figuras 5.15 e 5.16 são apresentadas algumas das imagens radioscópicas resultados dos experimentos que fundamentaram o cálculo da CSa (5%) para o equipamento RA e para o equipamento RB, respectivamente. As imagens foram adquiridas com o mesmo tempo e número de integrações, 400 ms e 32 respectivamente.

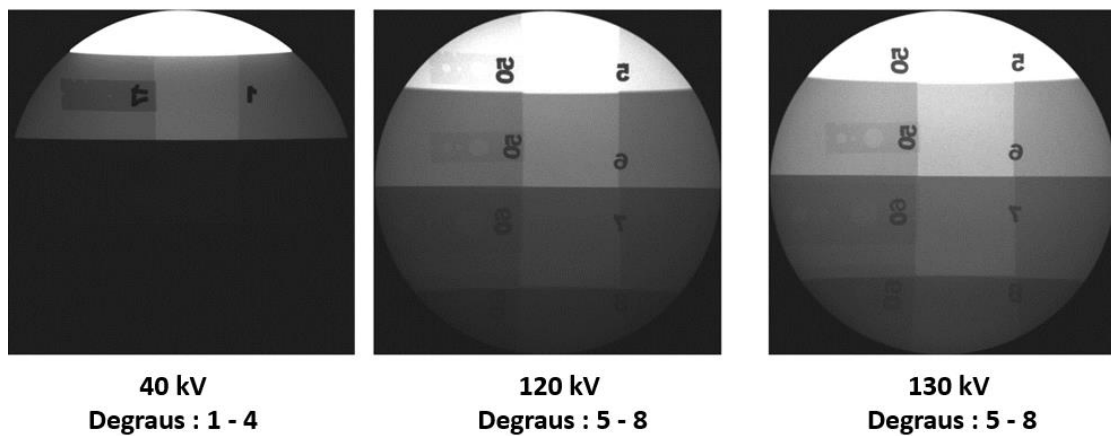


Figura 5.14: Imagens Radioscópicas utilizadas na avaliação da CSa para o equipamento de radioscopia industrial RA

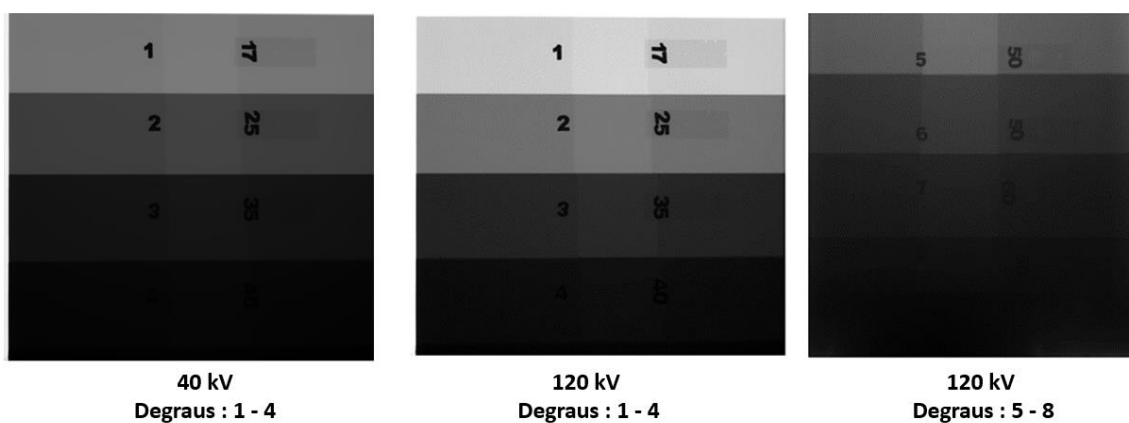


Figura 5.15: Imagens Radioscópicas utilizadas na avaliação da CSa para o equipamento de radioscopia industrial RB

Na Figura 5.15 verifica-se que para espessuras de 80 a 100 mm (degraus 5 a 8) para a mesma tensão e corrente, o equipamento RA alcançou uma CSa para uma maior espessura do que para o equipamento RB, Figura 5.16. No equipamento RA para a tensão de 130 kV a espessura alcançada com o valor mais favorável CSa foi para o *step* 5, com 8,33% em 100 mm de alumínio. Não foram utilizados filtros de processamento de imagem nas avaliações dos equipamentos de radioscopia analisados.

5.2.4 Sensibilidade ao Contraste (CS)

A sensibilidade ao contraste dos detectores digitais de um sistema de radioscopia é dependente da SNR do dispositivo, e esse atua como limiar para detecção de contraste do objeto. Quando o contraste do objeto está abaixo do contraste limite alcançável do referido sistema, informações não estarão disponíveis suficientemente para criar um nível de sinal na imagem digital resultante para a percepção visual [40]. Como já visto na seção 2.2.2 este parâmetro é avaliado empregando IQI's de furos, objeto de teste recomendado na norma ASTM 2737 (*Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability*).

Nas tabelas os valores especificados na coluna *Step* são as espessuras dos degraus em milímetros, numerados de 1 a 8, associadas as seguintes espessuras respectivamente: 10 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm e 140 mm.

Nas Tabelas 5.22 a 5.25 são apresentados os valores resolvido da CS, em relação aos furos 1T, 2T e 4T para os equipamentos RA e RB para diferentes tensões e espessuras, conforme metodologia proposta descrita no capítulo 4. Neste ensaio, quanto menor o valor da Cs (%) obtida, melhor o desempenho do detector quanto à sensibilidade ao contraste para referida espessura e tensão.

Não foram utilizados filtros de processamento de imagem nas avaliações dos equipamentos de radioscopia analisados e as imagens foram adquiridas nas mesmas condições de ensaio para a obtenção da CSa. Todas as avaliações para os equipamentos de Radioscopia RA e RB foram realizadas em foco fino, pois foi de interesse qualificar o limite de sensibilidade de cada equipamento.

Tabela 5.21: Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS) para equipamento RA, segundo a norma ASTM E2737 – Furo: 4T

SENSIBILIDADE AO CONTRASTE (Cs) DO EQUIPAMENTO RA – FURO: 4T											
Step	40 kV	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	110 kV	120 kV	130 kV	140 kV
1	4,15%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	1,44%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	2,10%	0,03%	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	0,76%	0,92%	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0,75%	0,95%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	0,33%	0,25%	0,51%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,24%	0,03%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No equipamento de radioscopia RA foi variada a tensão para as várias espessuras do *Step Wedge* para uma corrente fixa de 3 mA. Na Tabela 5.22 a quantificação da sensibilidade ao contraste dos furos 4T foram resolvidas para as tensões entre 40 e 140 kV para as espessuras de 10 até 120 mm de alumínio.

Na Tabela 5.22, verifica-se que os furos 2T foram resolvidos para as tensões entre 70 e 140 kV alcançando as espessuras de 40 a 120 mm de alumínio. No equipamento RA os furos 1 T somente foram resolvidos para a espessura de 100 mm (*step* 6), onde as Cs resolvidas foram: 2,17% para 120 kV, 0,64% para 130 kV e 1,01% para 140 kV. No *step* 8 somente o furo 4T é visível para a tensão de 140 kV (Figura 5.16). Nas demais situações os furos 1T são visíveis nas espessuras onde o furo 2T é resolvido.

Os valores de CS devem ser entendidos como a capacidade em termos percentuais de distinguir os furos 4T, 2T e 1T, com diâmetro e profundidade específicas para uma dada espessura de alumínio. Na seção 4.3.4 estas especificações e as condições do ensaio foram detalhadas

Tabela 5.22: Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS) para o Sistema de Radioscopia A, segundo a norma ASTM E2737 – Furo: 2T

SENSIBILIDADE AO CONTRASTE (Cs) DO EQUIPAMENTO RA – FURO: 2T											
Step	40 kV	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	110 kV	120 kV	130 kV	140 kV
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	0,15%	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	1,00%	1,06%	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	1,54%	1,16%	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	0,65%	1,15%	2,01%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,18%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

As Tabelas 5.23 e 5.24 apresentam os resultados para o equipamento RB, foi constatado que a quantificação da sensibilidade ao contraste é resolvida para os furos 2T e 1T para as tensões entre 60 e 220 kV. Foi possível a medição da Cs para o furo 2T nas espessuras entre 10 a 120 mm de alumínio, enquanto que para o furo 1T a máxima Cs resolvida ficou limitada a espessura de 100 mm de alumínio, sendo visível para a espessura de 120 mm.

Foi possível resolver os furos 4T para todas as espessuras do equipamento RB, exceto para a espessura de 140 mm, apesar da CSa (5%) ter sido alcançada para a espessura de 140 mm de alumínio em 220 kV, não foi possível visualizar nenhum dos furos do IQI, conforme Figura 5.16.

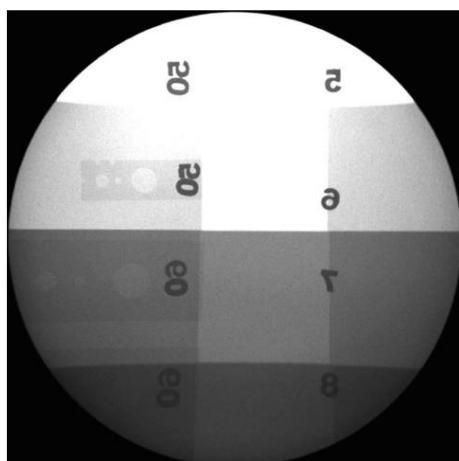
A Figura 5.16 apresenta as imagens radioscópicas dos equipamentos RA e RB para as espessuras de 80 a 100 mm de alumínio para condição de máxima tensão, 140 kV para o equipamento RA e 220 kV para o equipamento RB.

Tabela 5.23: Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS) para o Sistema de Radioscopia B, segundo a norma ASTM E2737 – Furo: 2T

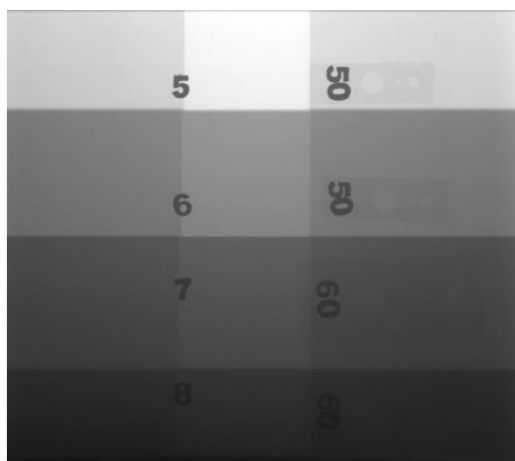
SENSIBILIDADE AO CONTRASTE (Cs) DO EQUIPAMENTO RB – FURO: 2T									
Step	60 kV	80 kV	100 kV	120 kV	140 kV	160 kV	180 kV	200 kV	220 kV
1	1,54%	4,69%	3,39%	0,12%	-	-	-	-	-
2	-	9,82%	3,57%	0,74%	2,12%	-	-	-	-
3	-	-	-	-	0,41%	0,38%	0,57%	1,69%	1,65%
4	-	-	-	-	0,54%	0,06%	6,69%	0,73%	4,48%
5	-	-	-	-	0,96%	0,31%	1,14%	1,24%	1,31%
6	-	-	-	-	0,49%	0,58%	1,66%	1,12%	1,23%
7	-	-	-	-	3,54%	0,54%	1,41%	2,77%	0,23%
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.24: Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS) para o Sistema de Radioscopia B, segundo a norma ASTM E2737 – Furo: 1T

SENSIBILIDADE AO CONTRASTE (Cs) DO EQUIPAMENTO RB – FURO: 1T									
Step	60 kV	80 kV	100 kV	120 kV	140 kV	160 kV	180 kV	200 kV	220 kV
1	3,02%	1,46%	3,82%	-	-	-	-	-	-
2	-	-	1,92%	1,91%	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	0,30%	0,71%	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	0,83%	0,21%	1,62%	1,29%	1,01%
6	-	-	-	-	0,79%	0,34%	0,79%	1,10%	0,23%
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Equipamento RA :140 kV/ 3mA
Degraus : 5 - 8



Equipamento RB : 220 kV/ 3mA
Degraus : 5 - 8

Figura 5.16: Imagens Radioscópicas dos equipamentos RA e RB para a máxima espessura alcançada.

Segundo a norma ASTM E2737 (*Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long-Term Stability*), os critérios para qualificação dos parâmetros de performance devem seguir a ASTM 2597 (*Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays*) e preferencialmente devem ser qualificados os valores de sensibilidade ao contraste para o furo 1T, na impossibilidade usa-se o furo 2T. Deste modo, a Tabela 5.26 apresenta os resultados estimados de qualificação da sensibilidade ao contraste segundo a norma ASTM E2737 para o equipamento RB.

No equipamento RB não foi possível qualificar a CS na espessura de 140 mm, conforme pode ser visto nas Tabelas 5.24 e Tabela 5.25, assim como Figura 5.16

Os resultados encontrados de sensibilidade ao contraste para o equipamento RB empregando a metodologia proposta, foi compatível com a método ASTM 2597, os resultados também estão coerentes com os encontrados em [108].

Tabela 5.25: Resultados estimados de qualificação da sensibilidade ao contraste segundo a norma ASTM E2737 para o equipamento RB

Equipamento	Tensão	Cs - 1T	Qualidade	Cs - 2T	Qualidade
RB	160 kV	0,28 %	10	0,37%	9

Neste trabalho não foi usado o mesmo critério de qualificação do equipamento RA em relação ao RB, pois conforme já discutidos na seção 5.2.3, os critérios adotados para determinar o nível de qualificação segundo a norma ASTM E2737 e ASTM 2597, são para FPDs. No entanto, verifica-se pelos resultados gerais que o equipamento RB apresenta melhor desempenho do que o equipamento RA, pois a frequência de furos 1T e 2T resolvidos foi maior do que o equipamento RB. Além disso, se tomarmos como referência o valor mais alto de tensão (140 kV), o equipamento RA apresentou em média uma sensibilidade ao contraste de 1,61% para o furo 2T e 1,01% para o furo 1T.

5.2.5 Faixa de Espessura de um Material Específico (SMTR)

Na avaliação da SMTR foi computada primeiramente a SNR para as espessuras alcançadas onde foi possível o cálculo de CSa (5%), o critério adotado foi que valores de $SNR \geq 130$ representa uma imagem com qualidade moderada e uma $SNR \geq 250$ uma qualidade superior. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.26 e 5.27, para os equipamentos RA e RB, respectivamente, reiterando que estas medidas foram realizadas com uma corrente de 3 mA, 400 ms e 32 integrações.

Tabela 5.26: Resultados de SNR (não-normalizada) para o equipamento RA

SNR – EQUIPAMENTO DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL RA											
Espessura (mm)	40 kV	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV	110 kV	120 kV	130 kV	140 kV
10	84										
20		127									
40			116	233							
60				65	86	227					
80						77	93	178			
100							48	80	111	177	227
120									48	77	108
140										55	73

No equipamento RA as células marcadas na tabela 5.27 representam as espessuras que atingiram o critério de sensibilidade de 2%, para uma SNR não normalizada. Portanto, para uma SNR não normalizada no equipamento RA as faixas de espessura de alumínio que apresentam uma qualidade de imagem moderada foram: 40 mm/70 kV; 60 mm/90 kV; 80 mm/110 kV; 100 mm/130 kV e 100 mm/140 kV.

Tabela 5.27: Resultados de SNR (não -normalizada) para o equipamento RB

SNR – EQUIPAMENTO DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL RB									
Step	60 kV	80 kV	100 kV	120 kV	140 kV	160 kV	180 kV	200 kV	220 kV
1	1733	1872	2107	2418					
2	1749	1793	1924	2106	2317				
3				1862	1956	2056	2153	2293	2389
4				1742	1827	1879	1943	1943	2073
5				1735	1759	1782	1796	1824	1869
6					1747	1761	1791	1791	1821
7					1739	1749	1773	1773	1795
8						1743	1761	1760	1777

A SNR não normalizada no equipamento RB para todas as faixas de espessura de alumínio apresentam uma qualidade de imagem considerada muito alta. No entanto, no caso dos FPDs é recomendado segundo a norma ASTM 2597 realizarmos esta avaliação pela relação sinal-ruído normalizada SNR_N , que é obtida quando a SNR é normalizada pela SRb e é calculada a partir da Equação 5.2 [40].

$$SNR_N = \frac{SNR_{média} \cdot 88,6}{SRb}$$

Equação 5.2

Para comparação de FPDs com diferentes formatos de pixel uma primeira aproximação pode ser feita para normalizar a SNR pela resolução espacial básica (SRb), em μm . Para a normalização, o fator 88,6 μm é usado como valor de linha de base, feita a partir dos procedimentos de normalização de filmes (ASTM E1815). A área de abertura circular para dosimetria de filme é a mesma que a área de uma caixa quadrada de amostragem digital com 88,6 μm de lado. Assim, o pixel quadrado do FPD pode ser comparado numa relação de 1:1 ao filme [40].

A Tabela 5.28 apresenta os resultados da SNR_N , onde é mantido o nível de qualidade para todas as espessuras e qualidades de radiação.

Tabela 5.28: Resultados da SNR (normalizada) para o equipamento RB

SNR _N – EQUIPAMENTO DE RADIOSCOPIA INDUSTRIAL RB									
Step	60 kV	80 kV	100 kV	120 kV	140 kV	160 kV	180 kV	200 kV	220 kV
1	768	829	933	1071					
2	775	794	852	933	1026				
3				825	867	911	954	1016	1058
4				772	810	832	861	861	918
5				769	779	789	796	808	828
6					774	780	793	793	807
7					770	775	785	786	795
8						772	780	780	787

5.2.6 Distorção Geométrica

Na avaliação da distorção geométrica dos equipamentos RA e RB foi desenvolvido um algoritmo, baseado na teoria de calibração de câmeras e visão computacional conforme metodologia descrita no capítulo 4. A Figura 5.17 apresenta a extração dos pontos de intersecção do *grid pattern* da Leeds Objects para o detector do sistema RA que é um intensificador de imagens, obtidos através de algoritmo em MATLAB.

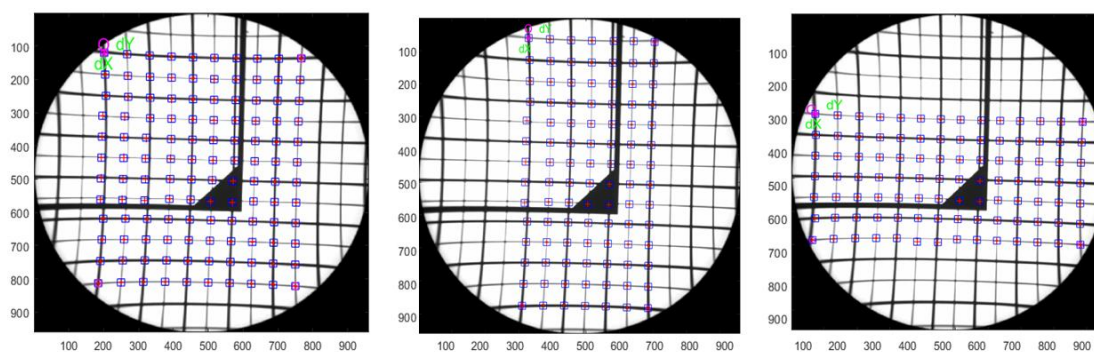


Figura 5.17: Extração dos pontos de intersecção do *grid pattern* da *Leeds Objects*

Pelo fato da área ativa do intensificador ser circular, foram testadas diversas matrizes, conforme é mostrado na Figura 5.17, de forma a contemplar o maior número de pontos possíveis no *grid*. Foi observado durante a execução dos cálculos que isto aumentava a precisão do erro por pixel devido a distorção geométrica. Nesta avaliação, percebeu-se que a distorção tendia a um comportamento radial positivo ou Pincushion, pois os pixels tendem a se afastar do centro óptico da imagem.

Este procedimento foi repetido empregando o *grid pattern* desenvolvido para este trabalho, com um número de maior de pontos de intersecção, conforme descrito na metodologia no capítulo 4. A Figura 5.18 apresenta uma das matrizes obtidas a partir do *grid pattern* desenvolvido e a matriz de intersecção dos pontos na imagem radioscópica correspondente ao objeto de teste, geradas a partir do código desenvolvido em MATLAB baseado em MERY [1].

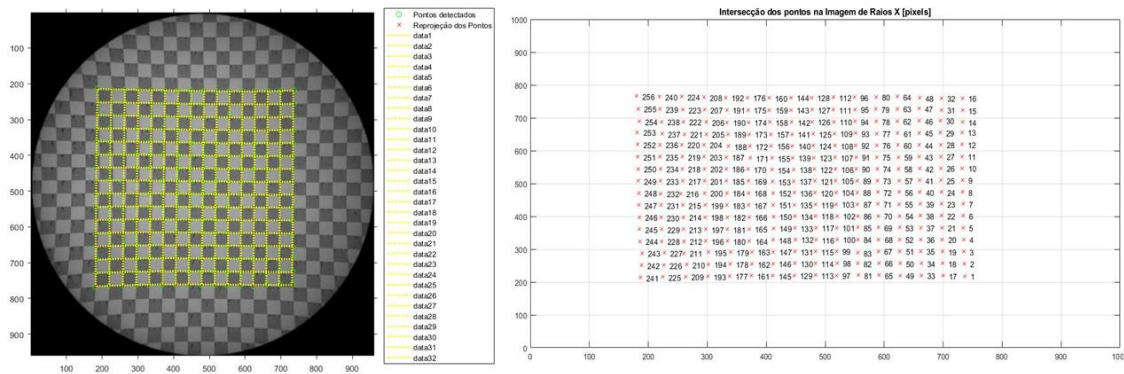


Figura 5.18: Exemplo de uma das matrizes de intersecção de pontos para a imagem radioscópica do grid pattern

Após extração dos pontos de intersecção foi calculado o deslocamento radial para cada pixel em relação a posição ideal, para a imagem gerada do *grid pattern* a partir do intensificador de imagem do equipamento RA, e calculado o erro médio. A mesma metodologia foi aplicada as imagens do equipamento RB. Comparado ao equipamento RA, é esperado que este apresente uma menor distorção tendo em vista que a superfície de detecção é plana. A Tabela 5.29 apresentam os resultados consolidados para os equipamentos RA e RB.

Tabela 5.29: Resultado consolidado da distorção geométrica para os equipamentos de radioscopia industrial RA e RB

Equipamento	Distorção Geométrica Erro Médio
RA (Campo 9'')	1,218 pixels
RB	0,062 pixel

O erro de pixel encontrado no equipamento RB está coerente com os calculados por WEIß em [70], que foi de 0,05 para um pixel efetivo de 127 µm, resultando num erro de aproximadamente 6 µm para um FPD.

O maior valor encontrado para o equipamento RA deve-se a forte contribuição existente nas regiões periféricas da imagem, segundo fabricante do intensificador é esperado um erro de até 18% dentro da região correspondente até 90 % da área do detector para o campo de 9". O erro calculado pelo algoritmo considera toda a imagem, por este motivo se considerarmos que neste campo o pixel efetivo é de 200 μm resultaria num erro de 243,6 μm . Este valor é muito elevado. Por este motivo nas inspeções com intensificador de imagem é altamente recomendável que as avaliações dos defeitos ocorra ao centro da tela do intensificador, pois a influência da distorção geométrica é menor ou utilizar os campos 6 ou 4" para avaliações mais precisas, associado a um objeto de geometria conhecida e de alta absorção (chumbo, tungstênio).

5.2.7 Uniformidade

A Tabela 5.30 apresenta os resultados consolidados para a uniformidade dos detectores para os equipamentos RA e RB, segundo metodologia descrita no capítulo 4.

Os coeficientes de variação calculados referente a não uniformidade para os equipamentos RA e RB apresentaram valores inferiores a 15%, estando em conformidade com valores de referência . No que equipamento RA para a FOV de 4" percebe-se que o desvio padrão diminui com o aumento da tensão e seus valores se aproximam aos medidos no FPD. Isto pode ser justificado porque está sendo selecionado uma região mais próxima ao centro óptico do detector.

Tabela 5.30: Uniformidade dos detectores para os equipamentos RA e RB.

ROI	EQUIPAMENTO RA				ROI	EQUIPAMENTO RB		
	II - 9"		II - 4"			FPD		
	50 kV	65 kV	70 kV	75 kV		40 kV	80	120 kV
1	170	138	150	155	1	781	892	1038
2	170	136	147	153	2	790	891	1035
3	180	136	146	152	3	781	872	1004
4	180	138	148	153	4	781	873	1007
5	222	143	153	156	5	781	883	1019
s	21,5	2,7	2,6	1,9	s	4,1	9,1	15,5
Média	184,3	138,4	148,7	153,5	Média	782	882	1021
CV%	11,7%	2,0%	1,7%	1,2%	CV%	0,5%	1,0%	1,5%

No entanto, quando selecionado o campo de 9" percebe-se uma grande variação comparada ao campo de 9". Se analisarmos a Figura 5.19, pode-se inferir que o valor de 15% é um limite muito elevado considerando as variações bruscas do centro para as regiões periféricas do detector, o que certamente irá implicar perda na qualidade da imagem radioscópica nas regiões periféricas. As diferenças encontradas do cálculo em MATLAB para o ISee! foram : no campo de 9" 0,5% e no campo de 4" foi de 0,2%.

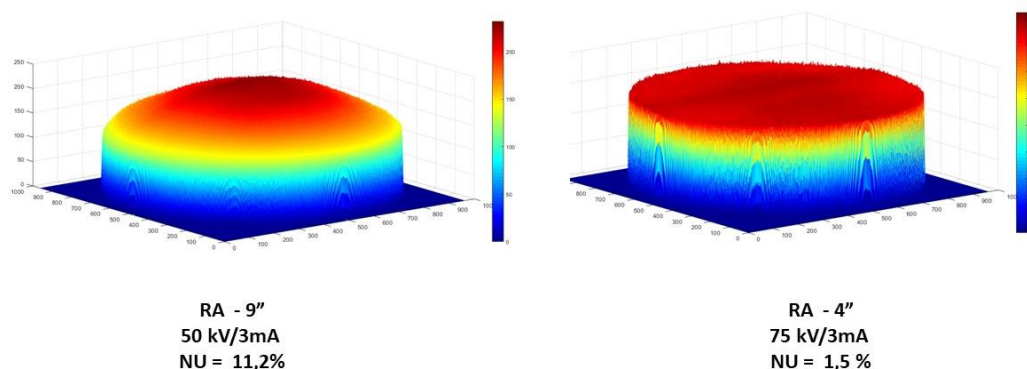


Figura 5.19: Representação Gráfica das Medidas de não uniformidades calculadas por algoritmo em MATLAB para o equipamento RA

Os resultados calculados em MATLAB para o equipamento RA mostram-se coerentes, tendo em vista que as diferenças entre os valores de não uniformidade obtidos pelas ROIs medidas pelo software ISee! e os valores calculados pelo algoritmo para toda a imagem radioscópica foram próximos. O mesmo foi observado para o equipamento RB.

No sistema B o detector é um FPD, apesar de sua estrutura plana não é homogênea isto pode ser constatado pelos resultados apresentados da não uniformidade, especificados na tabela 5.31. Aqui as suposições de LAZOS E WILLIAMSON [71] se confirmam, pois não se pode afirmar que um FPD possui simetria radial e invariância espacial, apesar das não uniformidades calculadas assumirem valores inferiores a 2% para todos os valores medidos. Pode-se inferir que a cada 40 kV de aumento na tensão a não uniformidade aumenta em passos de 0,5%. Isto comprova a necessidade da correção da não-uniformidade ao variar os parâmetros radiológicos dos ensaios equipamentos de radioscopia empregando FPDs, por procedimentos de calibração. Com aumento da tensão há uma aumento na dose e consequente redução de contraste, isto pode justificar a correlação positiva da não-uniformidade com o aumento da tensão.

Na área de processamento digital das imagens os algoritmos utilizados na correção linear do ganho e *offset* do sistema de aquisição de imagens, é conhecido como *shading correction* [1]. Na Figura 5.20 Os resultados da não uniformidades calculadas em MATLAB para o equipamento RB também mostram-se coerentes com os valores das ROIs medidas no Isee!

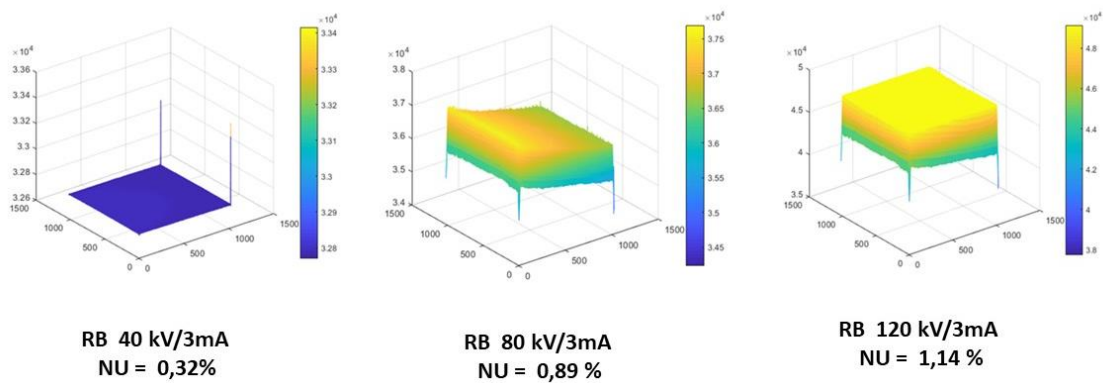


Figura 5.20: Representação Gráfica das Medidas de Não Uniformidades calculadas por algoritmo em MATLAB para o equipamento RB.

5.2.8 Eficiência

A avaliação da eficiência levou em consideração $dSNRn$ para qualificação dos sistemas de radioscopia segundo a norma ASTM E2597, novamente deve ser considerado que o equipamento RA possui um intensificador de imagens como detector e por este motivo os resultados serão analisados quanto ao comportamento da SNR em função do aumento da tensão. O equipamento RB por ter um detector do tipo FPD será analisado em função da $dSNRn$.

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam o comportamento dos parâmetros relacionados a SNR em função da variação da tensão para os equipamentos RA e RB. A corrente utilizada foi de 1 mA, na aquisição das imagens foram utilizados os mesmos critérios para qualificação dos parâmetros CSa de forma a não saturar o detector e o tempo de exposição não ultrapassou 1s. Não foram colocados objeto e filtros adicionais entre a fonte e o detector. No caso do equipamento RB o limite de tensão escolhido foi 50 kV, pois é o valor máximo que pode ser exposto o FPD sem filtros, segundo a norma ASTM E2597.

Os resultados indicam que ambos sistemas apresentaram uma resposta linear do seu desempenho, em função do aumento da dose de radiação especificamente para esta

faixa de tensão analisada. Verifica-se que no sistema RA a SNR não é superior a 250, considerando as condições de ensaio. O que leva também a esta constatação é que em medições realizadas CSa, mesmo em máxima tensão e para uma corrente mais elevada do que a utilizada do ensaio de eficiência os valores de SNR não ultrapassaram a este valor.

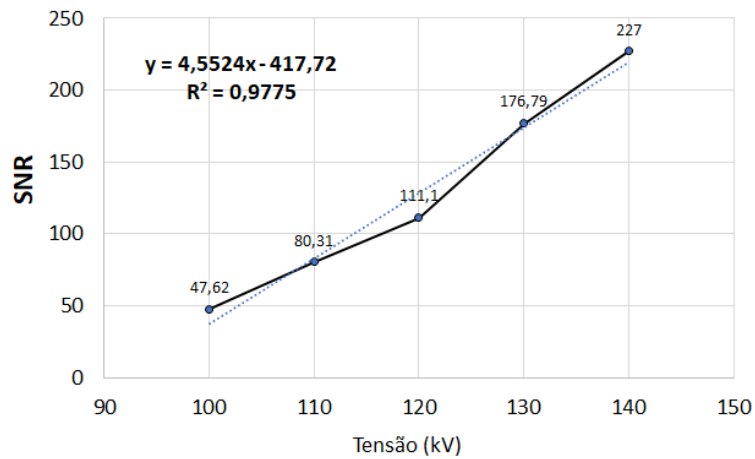


Figura 5.21: Estimativa da eficiência para o equipamento RA, pela relação da SNR em função da variação da tensão

No equipamento RB verifica-se que a dSNRn para a tensão de 50 kV assumiu um valor de 829, este valor está dentro do esperado, sendo considerado um bom resultado para esta condição ensaio e carta de eficiência disponível na norma ASTM E2597.

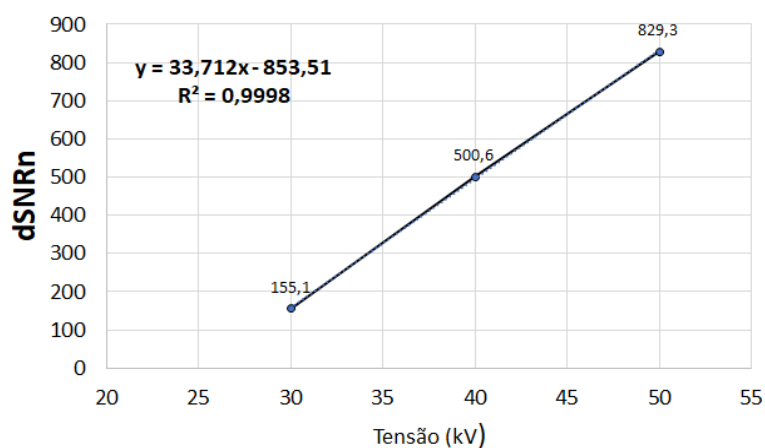


Figura 5.22: Estimativa da eficiência para o equipamento RB, pela relação da dSNRn em função da variação da tensão

5.3 Resultados de Avaliação dos Parâmetros do Sistema de Visualização

A metodologia desenvolvida para avaliação dos parâmetros do sistema de visualização foi aplicada somente ao equipamento RA, devido a não disponibilidade do equipamento RB no período destinado a realização destes ensaios na pesquisa.

5.3.1 Aspectos gerais da imagem

Os aspectos gerais da imagem apresentou no seu teste, 100 % de concordância com os critérios de conformidade com o padrão TG18-QC, conforme procedimento descrito no capítulo 4.

5.3.2 Distorção Geométrica

A distorção geométrica no seu teste qualitativo apresentou 100% de concordância conforme procedimento descrito no capítulo 4. O monitor avaliado apresentou as bordas da imagem padrão TG 18-QC completamente retas e a imagem foi exibida no centro da tela. O desvios das dimensões horizontais e verticais foram menores que 2 % para todos os quadrados da imagem padrão TG 18-QC.

5.3.3 Reflexão da tela e Iluminação da sala

Neste teste empregando a imagem padrão TG18-AD foi possível a discriminação dos aspectos de contraste em completa escuridão e em condições rotineiras de iluminação do ambiente. Nas condições de iluminação de rotina não foi detectada a presença de fontes de luz ou objetos iluminados refletidos na tela.

A iluminância do ambiente foi verificada realizando 5 (cinco) medidas a 30 cm do centro do monitor. O valor médio encontrado foi de 26,5 lux estando 6% acima do recomendado para avaliação de imagens de Raios X estabelecido no procedimento, que é de 25 lux.

5.3.4 Resposta de Luminância e Contraste

Para avaliar a resposta de luminância foram realizados testes qualitativos e quantitativos, conforme norma ABNT NBR IEC 62563 e a metodologia descrita no capítulo 4.

Nesses testes foram observados 5(cinco) critérios de conformidade, onde avaliou-se os alvos de baixo contraste, localização relativa das bandas de contorno de imagens padrão, luminância máxima, razão de luminância, variação de luminância entre monitores e resposta de contraste ao padrão DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) GSDF (Grayscale Standard Display Function). Utilizando o fotômetro e as imagens padrão TG 18-LN-1 a TG 18-LN-18, foi verificado se a luminância máxima exibida pelo monitor, a razão de luminância e o desvio de resposta de contraste ao padrão DICOM GSDF estavam de acordo com os critérios adotados na metodologia. As tabelas 5.31 e 5.32, apresentam os valores medidos da luminância ambiente e a resposta da luminância, respectivamente.

Tabela 5.31: Medidas da Luminância do Ambiente L'_{max} e L'_{min}

Medidas	L'_{max} (cd/m^2) Padrão : TG18-LN-12-18	L'_{min} (cd/m^2) Padrão : TG18-LN-12-1
1	183,0	0,20
2	184,0	0,25
3	184,3	0,23
4	182,0	0,20
5	184,0	0,24
Média	184	0,2

Tabela 5.32: Resposta de Luminância

Padrão	DDL	L_{medida}	JND	L_{ref}
TG18 LN-1	0	0,227	26	0,232
TG18 LN-2	240	0,600	57	0,685
TG18 LN-3	480	1,700	88	1,453
TG18 LN-4	720	3,600	120	2,659
TG18 LN-5	960	6,500	151	4,321
TG18 LN-6	1200	10,610	183	6,665
TG18 LN-7	1440	16,300	214	9,681
TG18 LN-8	1680	22,500	246	13,740
TG18 LN-9	1920	31,000	277	18,793
TG18 LN-10	2160	41,700	309	25,428
TG18 LN-11	2400	55,000	340	33,537
TG18 LN-12	2640	68,000	372	44,032
TG18 LN-13	2880	82,410	403	56,714
TG18 LN-14	3120	101,500	434	72,418
TG18 LN-15	3360	123,100	466	92,500
TG18 LN-16	3600	148,500	497	116,532
TG18 LN-17	3840	173,000	529	147,118
TG18 LN-18	4080	184,000	560	183,583

A partir dos resultados medidos e calculados das luminâncias, tabelas 5.33 e 5.34, foi possível desenvolver os gráficos de análise deste parâmetro. A Figura 5.23 apresenta graficamente os valores medidos em luminância (em escala logarítmica) em relação aos valores de DDL e a Figura 5.24 compara os mesmos valores medidos de luminância em relação ao índice JND (*Just Noticeable Difference*). O objetivo desta análise é obter a resposta de luminância, a curva característica de acordo com o JND e os valores de iluminância com seus devidos fatores de correção.

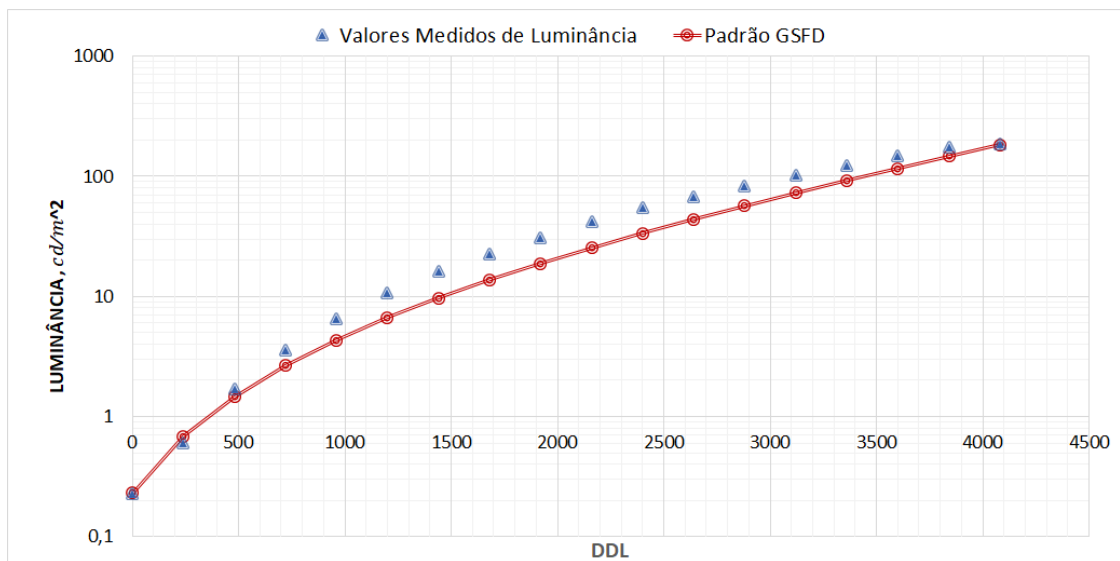


Figura 5.23: Curva da Luminância versus DDL

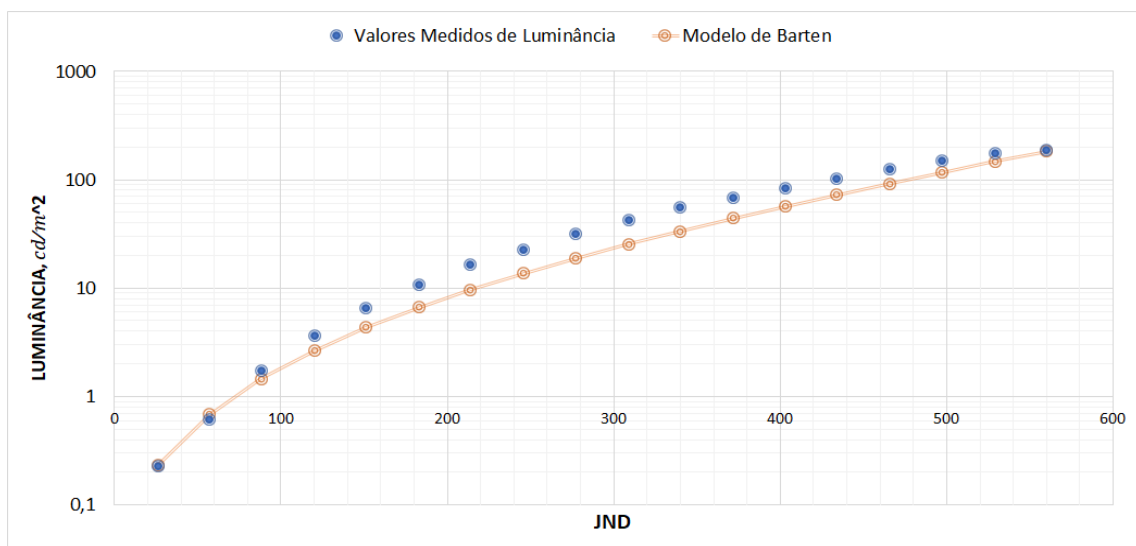


Figura 5.24: Curva da Luminância versus JND

Para o monitor avaliado o nível de luminância máximo medido foi de 184 cd/m², estando de acordo com a AAPM e os outros protocolos utilizados na metodologia, onde foi determinado que para monitores primários a luminância máxima deva ser superior a 170 cd/m². No caso de monitores para fins de visualização de imagens radioscópicas, neste trabalho classificados como secundários, foi definido que a luminância seja superior a 100 cd/m². Portanto, neste quesito o referido monitor ficou qualificado como primário.

A luminância mínima medida empregando os padrões TG 18-LN, foi de 0,2 cd/m², deste modo a razão entre a luminância máxima e a mínima foi de 920. Segundo a metodologia proposta, esta razão não poderia ser inferior 250 para monitores primários e de 100 para monitores secundários. Neste sentido, o monitor ficou qualificado como primário.

A avaliação do desvio de resposta ao contraste em relação ao padrão DICOM GSDF foi realizada através da comparação dos valores de DDL (*Digital Driving Level*) ou *p-values* obtidos através das 18 (dezoito) imagens padrão do TG18-LN com os valores de luminância medidos em cada um destes padrões. Na sequência para cada imagem foram calculados os índices JND e a partir destes valores a resposta ao contraste, Tabela 5.34. O resultado deste procedimento é mostrado na Figura 5.25.

Tabela 5.33: Valores calculados de resposta ao contraste

Padrão	δ_i por JND	δ_i^d por JND	Desvio (%)	$Limite_{sup}$	$Limite_{inf}$	Desvio Absoluto(%)
TG18 LN-1	--	--	---	--	--	--
TG18 LN-2	0,0291	0,0318	-8,7	0,0382	0,0255	8,7
TG18 LN-3	0,0309	0,0232	33,1	0,0278	0,0185	33,1
TG18 LN-4	0,0224	0,0183	22,2	0,0220	0,0147	22,2
TG18 LN-5	0,0185	0,0154	20,6	0,0184	0,0123	20,6
TG18 LN-6	0,0150	0,0133	12,6	0,0160	0,0107	12,6
TG18 LN-7	0,0136	0,0119	14,6	0,0143	0,0095	14,6
TG18 LN-8	0,0100	0,0108	-7,8	0,0130	0,0087	7,8
TG18 LN-9	0,0103	0,0100	2,3	0,0120	0,0080	2,3
TG18 LN-10	0,0092	0,0094	-1,9	0,0113	0,0075	1,9
TG18 LN-11	0,0089	0,0089	0,0	0,0106	0,0071	0,0
TG18 LN-12	0,0066	0,0085	21,9	0,0101	0,0068	21,9
TG18 LN-13	0,0062	0,0081	-23,9	0,0097	0,0065	23,9
TG18 LN-14	0,0067	0,0078	-14,6	0,0094	0,0063	14,6
TG18 LN-15	0,0060	0,0076	-21,0	0,0091	0,0061	21,0
TG18 LN-16	0,0060	0,0074	-18,7	0,0089	0,0059	18,7
TG18 LN-17	0,0048	0,0073	-34,3	0,0087	0,0058	34,3
TG18 LN-18	0,0020	0,0071	-72,1	0,0085	0,0057	72,1
Média do desvio						19,4%
Tolerância da Classe Secundária						20,0%

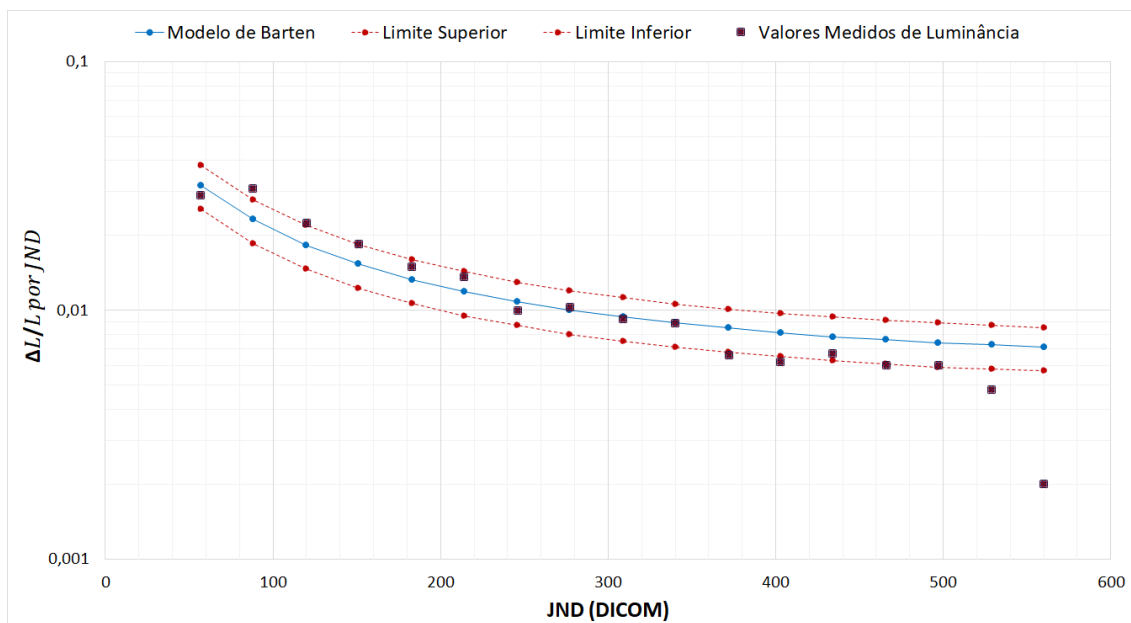


Figura 5.25 : Resposta ao contraste em relação ao padrão DICOM GSDF para o monitor avaliado, sendo referenciado os limites em $\pm 10\%$.

A média calculada dos desvios absolutos para todas as medidas realizadas foi de 19,4%, onde o maior desvio observado foi para o padrão TG 18-LN-18 no valor de 72,1% que corresponde ao ponto de luminância máxima.

Estes resultados fizeram com que o níveis de contraste perceptíveis ao olho humano estivessem fora dos limites em $\pm 10\%$ do JND, sendo portanto este resultado desfavorável a qualificar este monitor como primário. No entanto, os resultados da média dos desvios absolutos dos níveis perceptíveis em contraste ficaram dentro do limite foi inferior a $\pm 20\%$, o que segundo a AAPM este monitor estaria enquadrado como secundário. Apesar do referido monitor ter sido qualificado como primário no requisito resposta a luminância, no que tange a resposta ao contraste o mesmo está qualificado como secundário.

Deste modo, considerando os aspectos globais de resposta a luminância e contraste o equipamento foi qualificado como secundário, sendo portanto mais adequado o seu emprego para visualização das imagens radioscópicas, não sendo adequado a realização de laudos radiológicos por imagem.

5.3.5 Dependência Angular e Espacial da Luminância

A luminância espacial não uniforme refere-se à variação máxima de luminosidade em toda a área do visor quando um padrão uniforme é exibido. Numa avaliação qualitativa, deve-se visualizar a imagem padrão TG18-UN10 e TG18-UN80 a 30 cm de distância e não se deve observar não uniformidades no centro e nas bordas. Segundo a norma ABNT NBR IEC 62563, numa avaliação quantitativa, a não uniformidade de luminância não deve ser superior a 30%. A Tabela 5.34 apresenta os valores medidos de luminância obtidos experimentalmente e os respectivos desvios calculados segundo a norma ABNT. O monitor do equipamento RA apresentou conformidade tanto nos critérios qualitativos, quanto quantitativos.

Tabela 5.34: Avaliação Quantitativa da Não Uniformidade

Localização da Medida de Luminância	TG18 – UNL10 (cd/m ²)	TG18 – UNL80 (cd/m ²)
Central	1,3	112,0
Superior esquerda	1,1	93,0
Superior direita	1,3	96,5
Inferior esquerda	1,3	100,1
Inferior direita	1,4	101,7
Luminância _{min}	1,1	93,0
Luminância _{máx}	1,4	112,0
Desvio	28,57%	18,54%

5.3.6 Resolução Espacial e de Baixo Contraste

O monitor do equipamento RA apresentou concordância de 100 % nos testes de desempenho conforme os critérios estabelecidos na tabela 4.8, estando de acordo com a norma ABNT NBR IEC 62563.

5.3.7 Cromaticidade

No teste qualitativo da cromaticidade do monitor, a avaliação foi feita utilizando a imagem padrão TG18-UN80 e não foi observada diferença significativa da percepção de cor estando de acordo com os critérios da AAPM e outros protocolos adotados na metodologia. A avaliação quantitativa da cromaticidade foi realizada segundo a norma ABNT NBR IEC 62563, empregando o padrão TG18-UNL80, os resultados experimentais são mostrados na tabela 5.36.

Tabela 5.35: Avaliação Quantitativa da Cromaticidade

Localização da Medida da Cromaticidade	u'	v'
Central	0,2024	0,4763
Superior esquerda	0,2025	0,4699
Superior direita	0,2051	0,4673
Inferior esquerda	0,2023	0,4706
Inferior direita	0,2032	0,4695
Desvio Maximo	0,0028	

O desvio máximo encontrado foi de 0,0028 estando aproximadamente 7,17 vezes menor do que o limite estabelecido pela norma ABNT NBR IEC 62563, a Figura 5.26 confirma este bom resultado pois apresenta as medidas das propriedades de cor obtidas a partir da localização central do padrão TG18- UNL80 exibido no monitor. Nesta imagem pode-se observar todo o espectro de cores dentro da faixa de comprimento de onda visível e boa linearidade nas bordas do diagrama de cromaticidade CIE.

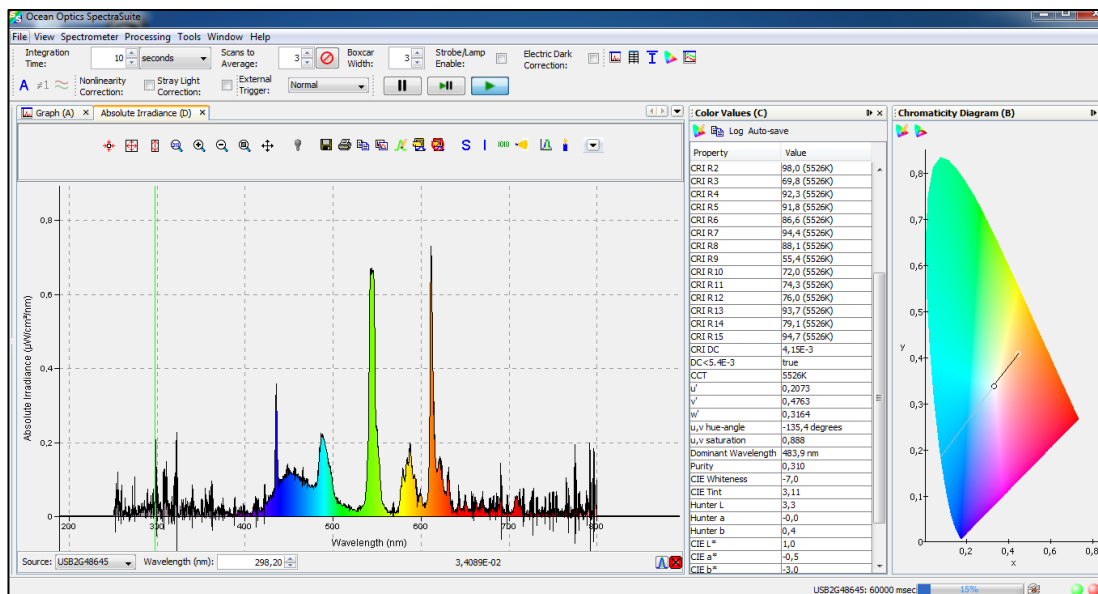


Figura 5.26: Parâmetros para avaliação da Cromaticidade e Diagrama CIE obtido através do miniespectrômetro óptico

5.4 Resultados da Avaliação do Sistema Cinemático

A metodologia desenvolvida para avaliação do sistema cinemático foi aplicada somente ao equipamento RA, devido a não disponibilidade do equipamento RB no período destinado a realização destes ensaios na pesquisa.

5.4.1 Erros de Posicionamento Linear

Na Figura 5.27 são apresentados os desvios de posicionamento e a distribuição da repetitividade para os eixos x e y do sistema cinemático. Ambos os eixos apresentaram boa repetitividade com distribuição normal. A dispersão dos erros no eixo x foi de 0,498%. No eixo y, referenciado no modelo cinemático como eixo de magnificação, para as séries de medidas realizadas foi identificado no pior caso uma dispersão do erro em 0,803%. O maior valor de erro encontrado foi de 22 μm para o eixo x e de 12 μm para o eixo y.

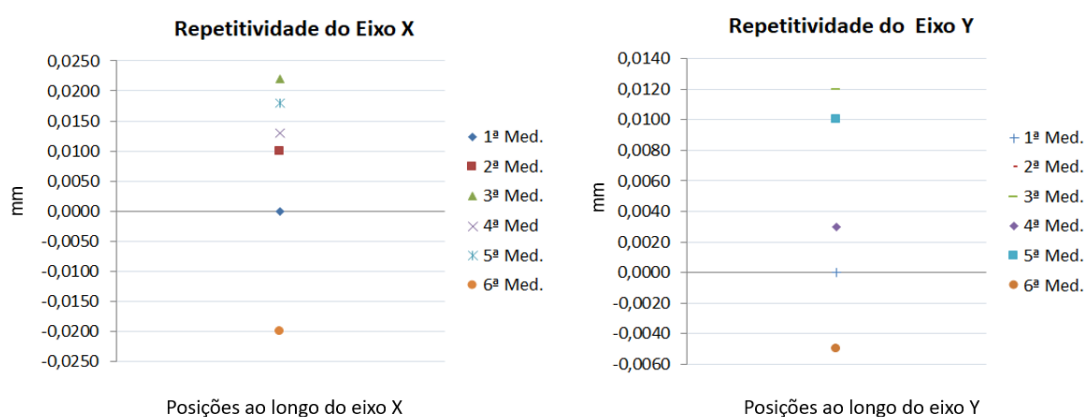


Figura 5.27: Distribuição das Medidas de Repetitividade do Posicionamento para os eixos X e Y

Na Figura 5.28 são apresentados os desvios de posicionamento e a distribuição da repetitividade para os eixos z1 e z2 do sistema cinemático. Ambos os eixos apresentaram boa repetitividade com distribuição normal. No eixo z1 para todas as séries de medidas avaliadas a dispersão dos erros não foram superiores a 0,926% e o maior erro absoluto encontrado foi de 12 μm . No eixo z2 a dispersão dos erros no pior caso foi de 0,585% e maior erro encontrado foi no valor de 10 μm

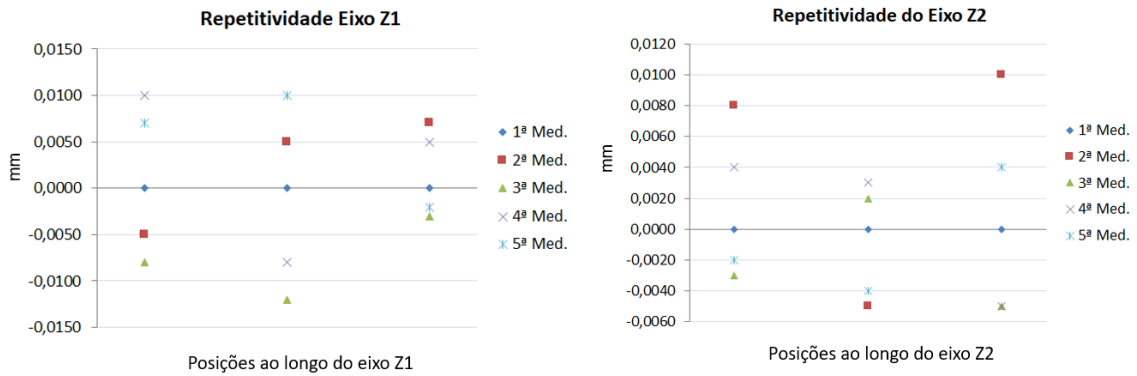


Figura 5.28: Distribuição das Medidas de Repetitividade para os eixos Z_1 e Z_2

5.4.2 Erros de Perpendicularidade

Na Figura 5.29 são apresentados os desvios de repetitividade da perpendicularidade em cada posição do esquadro para os eixos z_1 e z_2 do sistema cinemático do equipamento RA. Ambos os eixos apresentaram boa repetitividade com distribuição normal. A dispersão dos erros de perpendicularidade no eixo z_1 no pior caso foi de 0,548 % e no z_2 foi de 0,809%. Os resultados indicam um erro importante em relação os maiores valores registrados que foram de 290 μm para z_1 e 580 μm para z_2 , indicando que não há perpendicularidade perfeita entre a mesa e os referidos eixos.

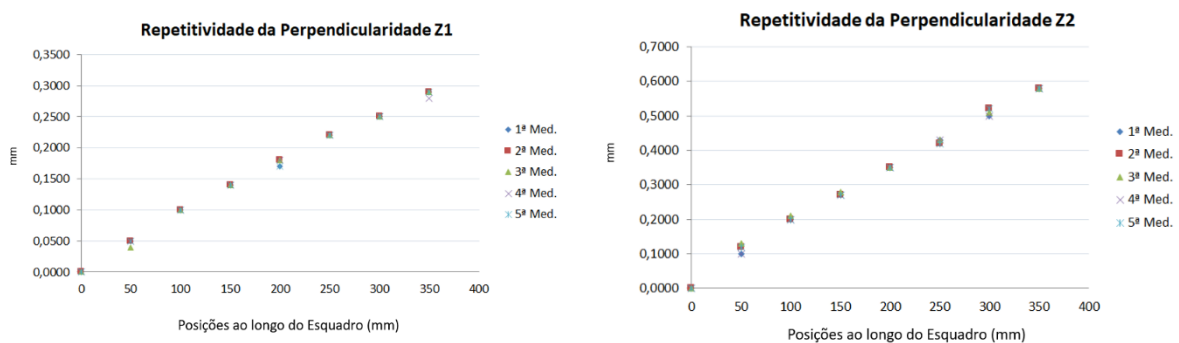


Figura 5.29: Distribuição das medidas de repetitividade da perpendicularidade para os eixos z_1 e z_2

5.4.3 Erros de Retilidade

Na Figura 5.30 são apresentados os erros de retilidade para os eixos z_1 e z_2 .

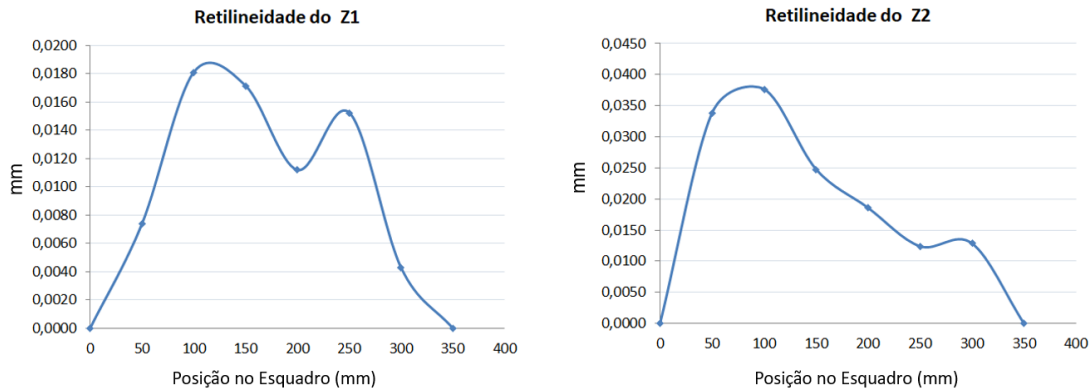


Figura 5.30: Erro de retilidade para os eixos z_1 e z_2

O maior valor de erro encontrado para o eixo z_1 de $18 \mu\text{m}$ e para o eixo z_2 foi de $32 \mu\text{m}$, sendo a dispersão dos erros para z_1 igual a $0,736\%$ e para z_2 $1,407\%$. Aqui o eixo z_2 igualmente as medidas de perpendicularidade, como esperado, foram mais elevadas do que o eixo z_1 .

5.4.4 Erros de posicionamento angular da mesa rotativa

A Figura 5.31 apresenta os erros de repetitividade angular para a mesa rotativa. A dispersão dos erros foram de $1,16\%$ para o posição angular de 90° , $1,05\%$ para a posição de 180° e $1,12\%$ para a posição de 270° .

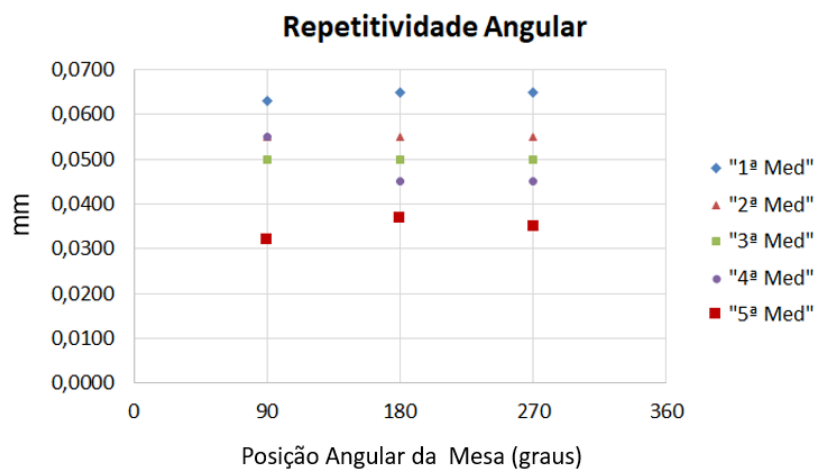


Figura 5.31: Erro de Repetitividade do Posicionamento Angular

5.4.5 Erros de Batimento Axial e Radial

A Figura 5.32 apresenta os erros de batimento axial e radial para a mesa rotativa. A dispersão dos erros para ambos os batimentos foram de aproximadamente 0,45%. Pode-se inferir, pelos resultados obtidos, que a magnitude dos erros de repetitividade para o batimento radial foi aproximadamente 19 vezes superior ao axial. Os maiores erros de batimento axial e radial medido foram de 30 μm e 590 μm , respectivamente.

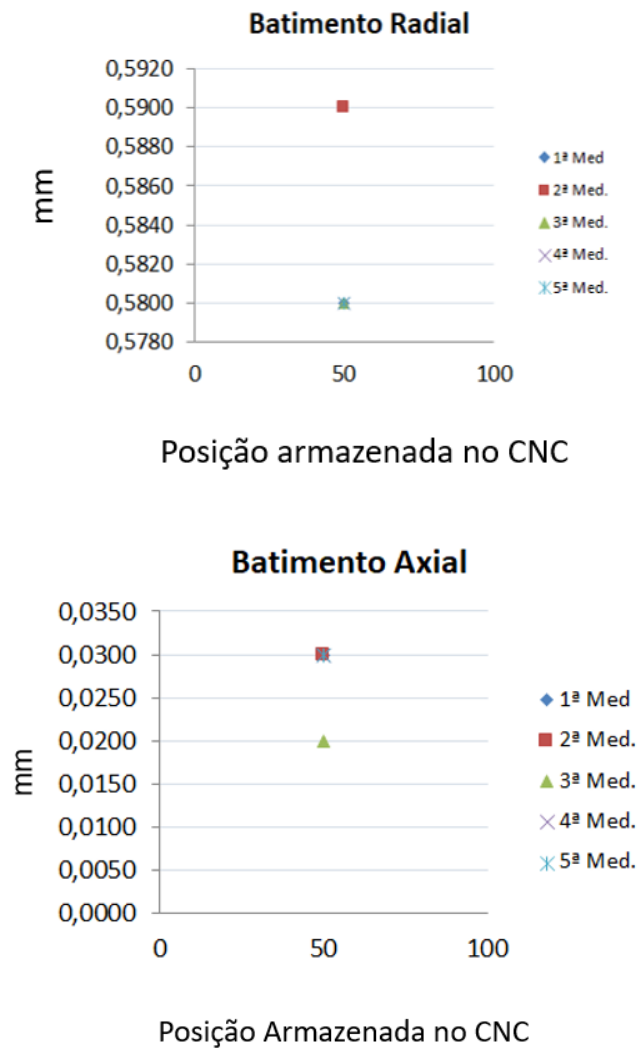


Figura 5.32: Erro de Repetitividade para o Batimento Radial e Axial.

5.4.6 Considerações sobre erros cinemáticos

Os resultados indicam boa repetitividade. No entanto, foram identificados erros de magnitude significativa de repetitividade no conjunto. Há um erro de perpendicularidade entre os eixos e a mesa, havendo provavelmente uma inclinação da mesma maior em relação ao z_2 , a Figura 5.33 ilustra este erro no sistema cinemático.

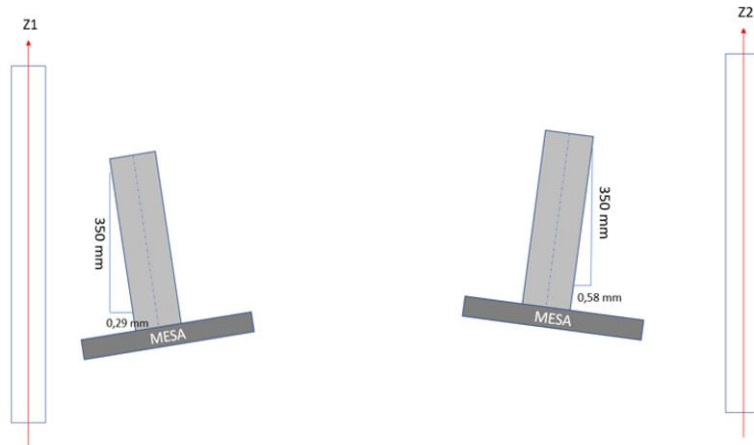


Figura 5.33: Erro de perpendicularidade entre os eixos e a mesa

Dadas as condições de ensaio, podemos inferir que provavelmente não há um paralelismo perfeito entre z_1 e z_2 , devido as diferenças dos erros nos testes de perpendicularidade de z_1 e z_2 . Desta forma, existem fortes evidências que a projeção do eixo de rotação não é paralela ao detector, que podem contribuir para geração de erros de ordem dimensional na imagem.

Os resultados de boa repetitividade e dispersão dos erros inferiores, quando inferiores a 1 %, indicam que as folgas não são tão significativas nos elementos de acionamento. Os desgastes nos componentes mecânicos decorrentes do uso normal da máquina ou após uma irregularidade como uma colisão, excesso de carga ou lubrificação deficiente podem provocar alterações significativas no comportamento geométrico do sistema. Mesmo a utilização em condições normais leva ao desgaste progressivo dos guias e fusos provocando falhas na planicidade dos guias, isto pode justificar os erros retilineidade e inclinação da mesa em relação aos eixos z_1 e z_2 .

5.5 Resultados da Avaliação do Sistema Segurança e Radioproteção

Os resultados das medidas de levantamento radiométrico apontam que no em torno dos equipamentos de radioscopia RA e RB, com equipamento operando em máxima potência, a taxa de dose é inferior a 1 $\mu\text{Sv/hora}$ a 10 cm de qualquer superfície acessível. Deste modo é possível qualificar que a blindagem dos equipamentos asseguram que os níveis de radiação que possam existir no interior da cabine não contribuem para o aumento do nível de radiação do ambiente.

Os dispositivos de intertravamento também estão em condições adequadas de funcionamento. Outrossim, os equipamentos de RA e RB estão de acordo com as normas CNEN aplicáveis a prática de Radioscopia Industrial em cabines autoblindadas. A Figura 5.34 apresenta um esquemático de referência contendo os pontos objeto de medição nas referidas cabines de radioscopia e a tabela 5.36 apresenta os resultados de taxa de dose encontrados para os equipamentos RA e RB, a letra B indica uma medida realizada no lado oposto ao ponto A.

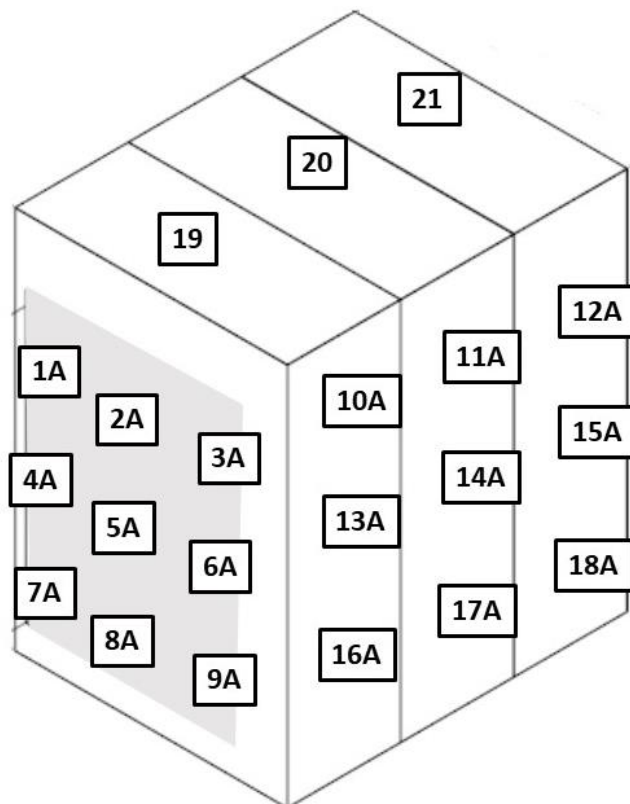


Figura 5.34: Pontos de referência para o levantamento radiométrico dos equipamentos RA e RB.

Tabela 5.36: Resultados dos levantamentos radiométricos para os equipamentos RA e RB

LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EQUIPAMENTO RA							
Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora
1A	0,16	1B	0,17	10A	0,16	10 B	0,16
2A	0,15	2B	0,17	11A	0,18	11B	0,15
3A	0,16	3B	0,18	12A	0,15	12B	0,15
4A	0,17	4B	0,18	13A	0,18	13 B	0,16
5A	0,15	5B	0,16	14A	0,17	14 B	0,15
6A	0,15	6B	0,15	15A	0,15	15 B	0,15
7A	0,16	7B	0,17	16A	0,17	16 B	0,17
8A	0,15	8B	0,18	17A	0,16	17A	0,15
9A	0,16	9B	0,16	18A	0,16	18A	0,16
19	0,15	20	0,15	21	0,15	BG	0,15
LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EQUIPAMENTO RB							
Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora	Medida	μSv/hora
1A	0,18	1B	0,14	10A	0,18	10 B	0,16
2A	0,14	2B	0,14	11A	0,18	11B	0,14
3A	0,18	3B	0,18	12A	0,18	12B	0,14
4A	0,18	4B	0,18	13A	0,18	13 B	0,14
5A	0,14	5B	0,18	14A	0,14	14 B	0,14
6A	0,14	6B	0,14	15A	0,14	15 B	0,14
7A	0,19	7B	0,14	16A	0,14	16 B	0,14
8A	0,14	8B	0,17	17A	0,18	17A	0,14
9A	0,18	9B	0,17	18A	0,18	18A	0,14
19	0,14	20	0,14	21	0,14	BG	0,14

5.6 Resultados Consolidados

Como exemplo de aplicação da metodologia, a Tabela 5.37, apresenta os principais resultados consolidados para o equipamento RA, tendo em vista que todos os testes propostos foram realizados para este sistema de radioscopia industrial.

Tabela 5.37 – Resultados Consolidados para o equipamento RA

GERADOR DE RAIOS X			
ID	Parâmetros	Critério	Resultado
1	Exatidão da Tensão	< 5%	< 5%
2	Reprodutibilidade da Tensão	< 5%	< 5%
3	Estabilidade da Tensão	< 5%	< 5%
4	Tamanho e Forma do Ponto Focal	< 10 %	Foco Fino (Max.Valor)=0,43 mm Classe: FS10 Foco Grosso (Máx. Valor)= 1,14 mm Classe: FS6
DETECTOR (INTENSIFICADOR DE IMAGEM)			
ID	Parâmetros	Critério	Resultado
5	Resolução Espacial Básica (SRb) – Condições limites de discernibilidade	A classificação pela norma EN 13068-3 é mais aderente ao equipamento RA, A norma ASTM 2597 pode ser usada como referência, reitera-se que esta norma é aplicada a FPD.	Limite de Resolução Espacial Básica: Campo 9”= 200 µm (Nível 7-ASTM 2597) Campo 6”= 160 µm (Nível 8-ASTM 2597) Campo 4”=130 µm (Nível 9-ASTM 2597) Classe: SA (EN 13068-3)
6	Função Transferência de Modulação (MTF) para ampliações distintas	O limite é a SRb em máxima amplificação	294 µm – Alumina; 217 µm- Aço ; 200 µm – Tungstênio. Limite para amplificação de 3,8 no campo de 9”
7	Sensibilidade ao Contraste Alcançável (CSa)	Mais adequado aos FPD visando qualificação	Consulte Seção 5.2.3
8	Sensibilidade ao Contraste (Cs)	Limite 1T , demais índices de discernibilidade consultar Tabelas correspondentes aos furos 2 T e 4 T na Seção 5.2.4	100 mm (<i>step 6</i>) CS= 2,17% - 120 kV CS=0,64% - 130 kV CS=1,01% - 140 kV
9	Faixa de espessura de um material específico (SMTR)	SNR > 130 - Moderada SNR > 250 - Superior	Qualidade Moderada para as espessuras / qualidades de radiação 40 mm/70 kV; 60 mm/90 kV; 80 mm/110 kV; 100 mm/130 kV 100 mm/140 kV.

Tabela 5.38 – Resultados Consolidados para o equipamento RA (Continuação)

DETECTOR (INTENSIFICADOR DE IMAGEM)		
ID	Parâmetros	Resultado
		Crítério < 2%
10	Distorção Geométrica	1,218 <i>pixels</i> de erro. Contra medida: Seleccionar matriz ao centro e verificar se atende ao critério do fabricante ou utilizar campo 6” ou 4 “ para avaliações mais precisas.
11	Uniformidade	11,7% no pior caso com o Campo de 9” < 15 %
12	Eficiência	SNR max : 227/140 kV Comportamento Linear para 100-140 kV SNR > 250 e Comportamento Linear para a faixa de qualidade de radiação analisada.
SISTEMA DE VISUALIZAÇÃO		
ID	Parâmetros	Resultados
13	Aspectos Gerais de Qualidade da Imagem	Aprovado Ver Tabela 4.8
14	Distorção Geométrica	Aprovado Ver Tabela 4.8
15	Reflexão da Tela e Iluminação do Ambiente	26,5 lux 25 lx
16	Resposta de Luminância	Desvio: 19,4% Lmáx: 184 cd/m ² Limite : 20% (Secundário)
17	Dependência Angular e Espacial da Luminância	28,5% - UNL-10 18,57% - UNL-80 < 30%
18	Resolução Espacial e de baixo contraste	Aprovado Ver Tabela 4.8
19	Cromaticidade	Desvio: 0,0028 Desvio máx. < 0,02
SISTEMA CINEMÁTICO		
ID	Parâmetros	Resultados
20	Posicionamento Linear	
21	Repetibilidade de posicionamento angular da mesa rotativa (Eixo R)	Dadas as condições de ensaio, podemos inferir que não há um paralelismo perfeito entre z ₁ e z ₂ , devido as diferenças dos erros nos testes de perpendicularidade de z ₁ e z ₂ . Existem fortes evidências que a projeção do eixo de rotação não é paralela ao detector.
22	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do tubo de Raios X	
23	Perpendicularidade da superfície da mesa rotativa em relação ao deslocamento do detector	Contra medida: Recomenda-se ao usuário acionar o fabricante ou empresa autorizada por este para realizar os alinhamentos e calibrações aplicáveis. Os sistema cinemático apresentou boa repetitividade.
24	Retilineidade frontal dos movimentos dos eixos de deslocamento do tubo de Raios X e detector.	
25	Paralelismo entre os eixos	
SISTEMA DE RADIOPROTEÇÃO		
ID	Parâmetros	Resultados
26	Blindagem	Aprovado.
27	Sistemas de Intertravamento	Taxa de dose < 1µSv/hora a 10 cm de qualquer superfície acessível. Intertravamentos funcionando corretamente.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo do trabalho foi alcançado uma vez que foi possível quantificar os parâmetros de qualificação propostos na pesquisa em complemento a norma ASTM E1411-16 (*Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems*) para as partes componentes de um sistema de radioscopia industrial. Além dos ensaios preconizados nesta norma, foram propostos e executados 16 (dezesesseis) testes adicionais a referida norma, a saber: 3 (três) relacionados ao sistema gerador de Raios X, sendo proposto uma nova metodologia para avaliação do ponto focal empregando técnicas de Visão Computacional; 3 (três) ensaios complementares a avaliação do sistema detector de Raios X, sendo proposta uma nova forma de utilização do *Step Wedge* e de condições de ensaios para avaliação dos principais parâmetros de qualidade de imagem; 4 (quatro) testes contemplando avaliações quantitativas do sistema de visualização de imagens, quanto a resposta a luminância, cromaticidade e contraste; 6 (seis) relacionados a avaliação do sistema cinemático. A metodologia foi aplicada a 2 (dois) equipamentos comerciais de radioscopia, que aqui denominamos de RA (com intensificador de imagem) e RB (*com flat panel*).

A contribuição dos parâmetros propostos permitiu avaliar os sistemas de radioscopia como um sistema de inspeção dinâmica, pois estes realizam inspeção em tempo real associado a um sistema de movimentação. A norma ASTM E1411 aborda o desempenho de sistemas radioscópicos somente no modo estático. A dinâmica inerente aos sistemas radioscópicos faz com que sua avaliação torne-se mais complexa, exigindo conhecimentos multidisciplinares e estudos complementares, como proposto nesta pesquisa.

No que tange a qualificação do sistema gerador de Raios X foram propostos a avaliação da exatidão, reprodutibilidade e a estabilidade da tensão, assim como um novo método de avaliação do ponto focal empregando *Star Pattern* por técnicas computacionais de processamento digital de imagens empregando detecção de bordas.

Numa avaliação global, concluímos que a variabilidade de cada um dos parâmetros relacionados ao gerador foram inferiores a 5% num equipamento de radioscopia industrial contendo tubo de raios X selado. Na avaliação do ponto focal empregando o método proposto com *Star Pattern* foi possível avaliar focos com tamanhos de 0,4 mm e 1mm para os 2(dois) equipamentos de radioscopia. No total o algoritmo de detecção de bordas foi capaz de detectar automaticamente 80 (oitenta) penumbras, 40 (quarenta) na direção vertical e 40 (quarenta) na direção horizontal para os referidos pontos focais. O erro médio calculado, resultado nas medições, foi de 5,1 % estando em consonância com BAVENDIEK [34] que encontrou um erro de 6,1% na medição de pontos focais de diferentes fabricantes conforme a norma ASTM E1165 e EN 12543.

O algoritmo empregando *Star Pattern* permitiu avaliações gráficas e quantitativas da anisotropia alcançando valores de potência e tensão superiores ao recomendado pela norma ASTM E1165, sendo possível concluir a existência de uma correlação forte e positiva entre o aumento da potência e o ponto focal, tendo em vista que para todos os conjuntos de medidas realizadas pode-se inferir que esta relação é superior a 67%.

No que tange a avaliação do sistema de detecção dos Raios X foi proposta a qualificação da MTF (*Modulation Transfer Function*) para diferentes magnificações e tipos de materiais, pois o recurso da magnificação é inerente a característica dinâmica dos ensaios radioscópicos principalmente na inspeção de fundidos de alumínio. Através da utilização de IQI esféricos propostos no trabalho, fabricados em alumina, aço e carbeto de tungstênio, foi constatado que a densidade do material afeta de forma significativa a MTF. Os ensaios realizados permitiram concluir que para uma mesma magnificação e num mesmo equipamento um IQI esférico de alumina, que possui densidade de 3,95 g/cm³, apresentou uma MTF duas vezes menor do que o IQI de carbeto de tungstênio com densidade de 14,7 g/cm³. Deste modo, existem evidências que a resolução espacial do sistema de radioscopia dever ser caracterizada não somente pela resolução espacial básica, mas também devem ser incluídas nas avaliações a influência do material e da magnificação. Neste quesito, sugerimos comparações futuras com outros métodos de detecção de borda, afim de avaliar a precisão dos resultados.

Concluimos que os resultados confirmaram que a resolução espacial é limitada pelo pixel efetivo do detector, a magnificação e a penumbra gerada pelo ponto focal. Isto pode justificar o porque dos resultados da MTF nos equipamentos analisados não foram melhoradas mesmo com o aumento de alguns valores de magnificação. Neste sentido, foi possível quantificar um limite alcançável da resolução espacial para um dado fator de ampliação geométrica.

No que tange a avaliação da sensibilidade ao contraste alcançável, sensibilidade ao contraste, faixa de espessura de um material específico e relação sinal ruído, foi proposto uma forma de utilização de um *Step Wedge* em alumínio com 8 degraus, variando de 10 a 140 mm, usinado conforme ASTM 2597 mas associando um IQI de furos a cada *step*. As normas ASTM, muito aderentes a técnica de radiografia, avaliam os detectores variando muito pouco ou mantendo fixa a tensão, no entanto, variando o tempo de exposição. Esta não é uma realidade para equipamentos de radioscopia pois a inspeção se dá em tempo real. Se utilizado a variação do tempo para qualificação de detectores em sistemas de radioscopia, os resultados de qualificação do sistema estarão fora de uma realidade, agregado ao fato que é característico da inspeção a variação da tensão de uma forma muito dinâmica na inspeção de fundidos de alumínio.

Por este motivo julgou-se de maior utilidade qualificar os parâmetros sensibilidade ao contraste alcançável, sensibilidade ao contraste, faixa de espessura de um material específico e relação sinal ruído em função da tensão, mantendo o tempo nas condições reais utilizadas nas rotinas de inspeção. Foi possível qualificar a sensibilidade ao contraste para 11 (onze) qualidades de radiação para o equipamento RA (tensão máxima de 160 kV) e 9 (nove) para o equipamento RB (tensão máxima de 225 kV).

Um fato a ser considerado é que a normas indicadas pela ASTM E1165 não estabelece critérios para qualificação de equipamentos com intensificadores de imagem, somente para FPD. No entanto, o uso de FPDs não é uma realidade nas fundições de ferro e alumínio brasileiras, cerca 90% dos equipamentos de radioscopia industrial alocados nestas indústrias ainda utilizam instensificadores de imagem. O método proposto foi possível envolver critérios mais específicos de sensibilidade ao contraste para tensões distintas, que permitiram caracterizar tanto o equipamento de radioscopia contendo o intensificador de imagem quanto o que possuía um FPD. No equipamento RA os furos 1 T somente foram resolvidos para a espessura de 100 mm (*step* 6), onde as Cs resolvidas foram: 2,17% para 120 kV, 0,64% para 130 kV e 1,01% para 140 kV. O desempenho do equipamento RB foi superior ao do equipamento RA.

Foi proposto um método de avaliação da distorção geométrica do detector, incluindo um dispositivo de teste *grid pattern* e um algoritmo em MATLAB tendo como fundamento Métodos de Modelagem aplicados a Computação Visual [1], sendo possível quantificar um erro médio de 1,218 pixels para o equipamento de radioscopia contendo intensificador de imagem e de 0,062 pixel para o equipamento contendo o FPD. Os valores obtidos com FPD estão coerentes com os resultados encontrados em WEIB [70].

A norma ASTM E1165 não estabelece critérios de avaliação da uniformidade dos detectores para equipamentos de radioscopia industrial e com o método proposto foi possível identificar uma variação entre 0,5% a 1,5% para o equipamento de radioscopia industrial contendo FPD, sendo observado que não uniformidade aumentou com o aumento da tensão. Foi possível verificar que nos equipamentos de radioscopia empregando intensificadores de imagem a não uniformidade para uma FOV de 9" é significativamente diferente para uma FOV de 4". Os resultados calculados foram de 11,7% (em 50 kV) para a FOV de 9" e de 1,2 % (em 75 kV) para uma FOV de 4".

Neste trabalho foi proposto um implemento de avaliações quantitativas do sistema de visualização, pois estes parâmetros são avaliados de forma qualitativa segundo a norma ASTM E2698, indicada pela ASTM E1411. Como implemento nesta pesquisa, estes parâmetros foram avaliados segundo o modelo de Barten preconizado na norma ABNT NBR IEC 62563-1. Foi possível avaliar a resposta a luminância e ao contraste. A média calculada dos desvios absolutos para todas as medidas de luminância realizadas foi de 19,4%. Este resultado fez com que o níveis de contraste perceptíveis ao olho humano estivessem fora dos limites aceitáveis para que este monitor fosse classificado como primário, portanto o mesmo foi enquadrado como secundário.

A norma ASTM E1411 não aborda procedimentos para avaliação dos erros geométricos. Neste sentido, foi proposto a avaliação destes erros por instrumentos metrologicamente rastreáveis e padrões corporificados. O método permitiu identificar um erro de perpendicularidade de 580 μm entre a mesa rotativa e a fonte de Raios X, assim como um erro 290 μm entre a mesa rotativa e o detector, o que certamente irá implicar em erros dimensionais dos defeitos no sistema de radioscopia avaliado.

Os equipamentos de radioscopia avaliados foram qualificados como seguros no que tange aos requisitos de radioproteção, pois o sistema de blindagem assegurou que as taxas de dose a 10 cm de qualquer superfície acessível do equipamento são menores do que 1 $\mu\text{Sv/hora}$ com o sistema operando em máxima potência.

Concluimos que o trabalho proposto contribuiu com implementos e orientações sugeridas pela norma ASTM E1411-16, adicionando critérios de performance visando a otimização da qualificação dos equipamentos de Radioscopia Industrial. O implemento de objetos de testes, instrumentos de medidas rastreáveis e padrões corporificados associados a técnicas de visão computacional empregando MATLAB colaboraram para as avaliações.

Ao final desta pesquisa verificou-se a necessidade de estudos que poderão contribuir para trabalhos futuros, como:

- a) Comparação do Método proposto empregando Star Pattern com outros métodos de avaliação do ponto focal;
- b) Avaliação da influência dos erros identificados nesta pesquisa nos parâmetros de qualidade da imagem;
- c) Avaliação de erros geométricos por imagem versus instrumentos de medidas rastreáveis aplicado a sistemas de radioscopia, recomenda-se realizar esta comparação com interferômetro óptico;
- d) Influência dos erros geométricos em equipamentos de radioscopia com recursos ADR (*Automatic Defect Recognition*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MERY, D. **Computer Vision for X-Ray Testing: Imaging, Systems, Image Databases, and Algorithms**, 1 ed., Springer, 2015.
- [2] GE MEASUREMENTS, 2018. Disponível em: <<https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt>>. Acesso em: 22 de setembro de 2018
- [3] GILARDONI. **Product range for non destructive testings**. Disponível em: <http://www.gilardoni.it/en_controlli-non-distruttivi.asp>. Acesso em: 02 janeiro de 2018.
- [4] YXLON. Disponível em: <<https://www.yxlon.com/home>>. Acesso em: 02 janeiro de 2018.
- [5] SOUSA, A. R., 2000, **Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem..** Tese de D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [6] DEEPESH, V. et al., “Automatic defect recognition (ADR) system for real time Radioscopy (RTR) of straight tube butt (STB) welds”. **Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE**, v.1, pp.355-359, 2011.
- [7] NI, J. “CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation”. **Journal of manufacturing science and engineering**, v. 119, n. 4B, pp. 717-725, 1997.
- [8] RAAD, J. A. Radiografia Industrial, Técnica de Formação de Imagem. [S.l.]: **General Eletric Company - GE IT, 2007.**
- [9] RUECKEL, J., STOCKMAR, M., PFEIFFER, F. *et. al.*, “Spatial resolution characterization of a X-ray micro-CT system”, **Applied Radiation and Isotopes**, v. 94, pp. 230-234, 2014.
- [10] SAMEI, E., FLYNN, M. J., REIMANN, D. A., “A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device”, **Medical Physics**, v.25, n.1, pp. 102-113, 1998,
- [11] CARMIGNATO, S., DEWULF, W., LEACH, R. **Industrial X-Ray Computed Tomography**, 1ed, Springer, 2017.
- [12] AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, **Resolução RDC Nº 17**, p. 61, 2010.
- [13] ASTM E1000 -16, **Standard Guide for Radioscopy**, 2016.
- [14] MARTINS, W.D. “História de Wilhelm Conrad Roentgen e a descoberta dos Raios X”. **Revista de Clínica de Pesquisa Odontológica**, v.1, n.3, pp. 59-63, 2015.
- [15] ASTM E 1000-09, **Standard Guide for Radioscopy**, 2009.
- [16] GONÇALVES, E., **Desenvolvimento de um Sistema de Radioscopia Analógico/Digital**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [17] ASTM E 1411-16, **Standard Practice for Qualification of Radioscopic Systems**, 2016.

- [18] MERY,D., FILBERT,D., JAEGER,T., **Image Processing for Fault Detection in Aluminum Castings**, v.1, n1, pp.1-38, Disponível em: < dmery.sitios.ing.uc.cl/Prints/.../2005-TaylorFrancis-Castings.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2018.
- [19] NEIELSEN,A., MCMORROW, J. D. **Elements of Modern X-ray Physics**. 2. ed. West Sussex, Wiley, 2011.
- [20] SZELES, C. et al. “CdZnTe semiconductor detectors for spectroscopic X-ray imagin”. **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, v.55, n.1, pp.572–582, 2008.
- [21] ZHAO, X., He, Z., ZHANG, S., LIANG, D. “A sparse-representation-based robust inspection system for hidden defects classification in casting components”. **Neurocomputing** , v.10, n.1, pp.1–10, 2015.
- [22] MERY, D., ARTETA, C. “Automatic Defect Recognition in X-ray Testing using Computer Vision”. In: **Winter Conference on Applications of Computer Vision**, IEEE, Santa Rosa, CA, USA, 2017.
- [23] HARARA, W. “Evaluation of the 6082_T6 Aluminium Plates Welded Joints by Digitized Film Radiographs and Digital Radiographs Taken by Fluoroscopy”. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v.51, pp 580-586, 2015.
- [24] ZOU,Y. et al. “Automatic weld defect detection method based on Kalman filtering for real-time radiographic inspection of spiral pipe”. **NDT & E International**,v.72, pp. 1-9, 2015.
- [25] ZHAN, X. et al. “X-ray online detection for laser welding T-joint of Al Li alloy”. **Modern Physics Letters** , v.31, pp.1-9, 2017.
- [26] CHAVEU, D. “Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing”. **Welding in the World**, v.62, pp. 1097–1118, 2018.
- [27] BESERRA, M.T.F., MELLO FILHO, M.O.C., “Computer Based Training In Support a Security Port Logistics Chain”. In: **Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha (SPOLM)**, pp. 1-14, Rio de Janeiro, Agosto, 2014.
- [28] MERY, D. et al. “Modern Computer Vision Techniques for X-Ray Testing in Baggage Inspection”. **Transactions on Systems, Man, And Cybernetics: Systems**. IEEE, v. 47, n. 4, pp. 682-692, 2017.
- [29] BESERRA, M. T. F., MELLO FILHO, M. O. C. , RAUPP, F. M. P. “Radioscopy applied to the improvement of industrial processes of quality control in the Brazilian footwear production”. In: **International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013**, pp.1-6, Recife, Agosto, 2013.
- [30] FULLADOSA, E. et al, “Texture characterization of dry-cured ham using multi energy X-ray analysis”. **Food Control**, v.89, pp. 46-53, 2018.
- [31] RAO, N. et al., “Rapid, Non-destructive Inspection and Classification of Inhalation Blisters Using Low-Energy X-ray Imagin”. **Journal of Pharmaceutical Innovation**, v.13, pp. 270–282, 2018.
- [32] DZIURDZIA, B., SOBOLEWSKI, M., MIKOLAJEK, J. “Convection vs vapour phase reflow in LED and BGA assembly”. **Soldering & Surface Mount Technology**, v. 30, n,2, pp.87-99, 2018.

- [33] NORBERT, D., B. S. “X-ray Inspection: Evolution from Microfocus to Nanofocus”. **Solid State Technology**, 2018. Disponível em: <<http://electroiq.com/blog/2003/12/x-ray-inspection-evolution-from-microfocus-to-nanofocus/>>. Acesso em: 15 janeiro 2018.
- [34] BAVENDIEK, K. et al., “New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards”. In: **18th World Conf Nondestruct**, pp. 1-12, Durban, África do Sul, Abril, 2012.
- [35] ASTM E2422-11, **Standard Digital Reference Images for Inspection of Aluminum Castings**, 2011.
- [36] ASTM E505-18, **Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Casting**, 2018.
- [37] GONZÁLEZ-LÓPEZA, A.; RUIZ-MORALES, C. “MTF determination from a star bar pattern image”. **Medical Physics**, v. 42, n.9. pp.5060-5, 2015.
- [38] MERY, D, FILBERT, D. “Automated flaw detection in aluminum castings based on the tracking of potential defects in a radiosopic image sequence”. **Robotics and Automation**, IEEE, v. 18, n. 6, p. 890-901, 2002.
- [39] BS EN 13068-3, **Non-destructive testing - Radioscopic testing - Part 3: General principles of radioscopic testing of metallic materials by X- and gamma rays**, 2001
- [40] AZEREDO, S.R., 2016, **Aplicação da Radiografia Digital com Flat Panel na Arqueometria**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [41] ASTM E 1025, **Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology**, 2018.
- [42] NDT SUPPLY. Raios X – **Qualidade de Imagem**. Disponível em: <<https://ndtsupply.com>>. Acesso em: 22 de setembro de 2017.
- [43] OLIVEIRA, D.F., 2010, **Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [44] NBR IEC 60601-2-7, **Equipamento eletromédico Parte 2-7: Prescrições particulares para segurança de geradores de alta tensão de geradores de raio X para diagnóstico médico**, 2011
- [45] IAEA, **Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications**. n.9, IAEA Human Health Series, 2012.
- [46] ROS, R. A., CALDAS, L. V. E. "Quality control of noninvasive voltage meters in X-ray equipment, diagnostic level". **Radiol Bras**, v.34, n.2, pp. 89-94, 2001.
- [47] MACEDO, E.M., NAVARRO, M.V.T., PEREIRA, L., GARCIA, I.F.M., NAVARRO, V.C.C. “Implantação de método não invasivo para calibração de medidores de tensão de pico (kVp)”. In: **8º Congresso Brasileiro de Metrologia**, pp. 1-4, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, novembro, 2015.
- [48] FLUKE, **Radiographic and Mammographic Focal Spot Measurements Products**, Manual do Usuário, 1ed, 2015.

- [49] NERSISSIAN, D. Y., 2004, **Determinação das Dimensões do Ponto Focal de Tubos de Raios X utilizando um Sensor CCD e o Método das Funções de Transferências**. Tese de DSc, IPEN, São Paulo, SP, Brasil.
- [50] EN 12543-5:1999, **Measurement of the effective focal spot size of mini and micro focus X-ray tubes. Non-destructive testing – Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing, Part 5**, 1999.
- [51] ASTM E1165-12, **Standard Test Method for Measurement of Focal Spots of Industrial X-Ray Tubes by Pinhole Imaging**, 2012.
- [52] EN 12543, **Non-destructive testing – Characteristics of focal spots in industrial x-ray systems for use in non-destructive testing – Pinhole camera radiographic method**, 2011.
- [53] DAHI, B., **Spatial Resolution Analysis of a Variable Resolution X-Ray Cone-Beam Computed Tomography System**, Ph.D thesis. The University of Tennessee and The University of Memphis, Tennessee, USA, 2009.
- [54] IEC 60336, **Medical electrical equipment - X-ray tube assemblies for medical diagnosis - Characteristics of focal spots**, 2005.
- [55] WEIß, D, Q. et al. “Measuring the 3D resolution of a micro-focus X-ray CT setup”. **Industrial Computed Tomography**, pp. 1-9, 2012.
- [56] ASTM E2698, **Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays**, 2018.
- [57] MÜLLER, P., **Coordinate Metrology by Traceable Computed Tomography**, Phd Thesis, Technical University of Denmark, Alemanha, 2013.
- [58] KRAMM, P., KURFIß, M., “Automated Practical System Qualification, Validation and Reporting acc. ASTM E2737-10”. In: **4th International Symposium on NDT in Aerospace**, pp 1-6, Augsburg, Alemanha, Novembro, 2012.
- [59] ASTM E2597-14, **Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays**, 2014.
- [60] ASTM E2737-18, **Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long- Term Stability**, 2018.
- [61] EWERT, U., ZSCHERPEL, U., “Minimum Requirements for Digital Radiography Equipment and Measurement Procedures by Different Industries and Standard Organizations”. In: **11th European Conference on Non-Destructive Testing ECNDT 2014**, pp.1-18, Prague, Czech Republic, Outubro, 2014.
- [62] LEE, C., BAEK, J., “A New Method to Measure Directional Modulation Transfer Function Using Sphere Phantoms in a Cone Beam Computed Tomography System”, **IEEE Transactions On Medical Imaging**, pp. 1-9, v. 34, n.4, 2015.
- [63] BAEK, J., PELC, N.J., “Use of sphere phantoms to measure the 3D MTF of FDK reconstructions”, **Physics of Medical Imaging**, pp. 1-7, v. 7961, 2011.
- [64] TAKENAGA, T., et al., “Modulation transfer function measurement of CT images by use of a circular edge method with a logistic curve-fitting technique”, **Radiological Physics and Technology**, pp. 53–59, v.8, 2015.
- [65] SUN, X. et al., “MTF evaluation of in-line phase contrast imaging system”, **Quantitative Phase Imaging III**, pp. 1-9, v. 10074, 2017.

- [66] KHAN, M., "Performance Testing of Computed Radiography System and Imaging Plates", In: **Annual Conference Proceedings ASTM**, pp.1-10, New Orleans, Los Angeles, dezembro, 2017.
- [67] SAMEI, E., FLYNN, M. J., REIMANN, D. A., "A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device", **Medical Physics**, pp. 102-113, v.25, n.1, 1998.
- [68] SEIBERT, J.A., "Flat-Panel detectors: how much better are they?", **Journal Pediatric Radiology**, pp. 173-181, v. 36, n. 9, 2006.
- [69] NICKOLOFF, E. L., "Survey of Modern Fluoroscopy Imaging: Flat-Panel Detectors versus Image Intensifiers". **Imaging Physics**, pp. 591-601, v.31, n.2, 2011.
- [70] WEIß, D. et al. "Geometric image distortion in flat-panel X-ray detectors and its influence on the accuracy of CT-based dimensional measurements. Dimensional Measurement - Uncertainty Evaluation". In: **4th Conference on Industrial Computed Tomography**, pp. 19-21, Wels, Austria, setembro, 2012.
- [71] LAZOS, D., WILLIAMSON, J. F., "Impact of flat panel-imager veiling glare on scatter-estimation accuracy and image quality of a commercial on-board cone-beam CT imaging system". **Medical Physics**, pp. 1-13, v.39, n.9, 2012.
- [72] BARNAA, S. L. et al., "Calibration procedures for charge-coupled device x-ray detectors". **American Institute of Physics**, pp. 2927-2934, v. 70, 1999.
- [73] YAFFE, M.J., "Detectors for Digital Mammography". In: **Digital Mammography**, 1ed, capítulo 2, Springer, 2010.
- [74] OLIVEIRA, M.V.L, et al, "Application of a newly developed software program for image quality assessment in cone-beam computed tomography". **Imaging Sci Dent** , pp 75-86, v.47, n.2, 2017.
- [75] MESQUITA, B., 2017, **Controle de Qualidade em Dispositivos de Exibição de Imagens utilizados em Radiodiagnóstico empregando padrão GSDF e JND**. Dissertação de MSc., Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.
- [76] FERRUCCI, M., et al., "Towards geometrical calibration of x-ray computed tomography systems - A review". **Measurement Science and Technology**, pp 1-32, v.26, 2015.
- [77] WELKENHUYZEN, F., et al., "Accuracy study of a 450 kV CT system with a calibrated test object". In: **Proceedings of the 11th IMEKO TC14 International Symposium on Measurement and Quality Control**, p. 297-300, Cracow, Setembro, 2013.
- [78] BARTSCHER, M., ILLEMANN, J., NEUSCHAEFER-RUBE, U., "ISO test survey on material influence in dimensional computed tomography", **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, pp. 79-92, v.6, Parte B, 2016.
- [79] Resolução CNEN 145/13. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços De Radiografia Industrial**, 2013.
- [80] NARDELLI, V. C., 2012, **Medição geométrica utilizando tomografia computadorizada por raios-x: melhoria do desempenho metrológico através da seleção sistemática dos parâmetros de configuração**. Tese de DSc., Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

- [81] CESAREO, R., **X-ray Physics**. Rivista del Nuovo Cimento, 1ed., Compositori, 2000.
- [82] GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. Edição Kindle, 2018.
- [83] MONTGOMERY, D. **Design and analysis of experiments**. 9.ed, John Wiley & Sons Inc, 2017.
- [84] GOMES, C. S., 2018, **Metodologia para otimização de inspeção em tubos por radiografia digital direta**, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [85] AAPM TG18, **Assessment of display performance for medical imaging systems task group, pre-final**, 2005.
- [86] SAMEI, E. et al, “Assessment of display performance for medical imaging systems: Executive summary of AAPM TG18 report”, **Med Phys.**, pp. 1205-1225, v.32, 2005.
- [87] RTI GROUP. **Cobia Flex**. Disponível em: <<http://rtigroup.com/products/product-detail/cobia-flex>>. Acesso em: 01 outubro de 2017.
- [88] KOTHAN, S., TUNG, M., “An Estimation of X-Radiation Output using Mathematic Model”, **American Journal of Applied Sciences**, pp. 923-926, v.9, 2011.
- [89] XU, H., LU, C., BERENDT, R., JHA, N. AND MANDAL, M., "Automatic Nuclei Detection Based on Generalized Laplacian of Gaussian Filters," **IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics**, pp. 826-837, v. 21, 2017.
- [90] MAINI, R., GGARWAL, H., “Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques”, **Computer Science Journals**, pp.1-12, v.3, 2009.
- [91] MARR, D.; HILDRETH, E., “Theory of Edge Detection”, **Biological Sciences**, pp.187-217, v.207, 1990.
- [92] COMET, **Diferença entre os padrões de ponto focal IEC 336 e EN 12543** Disponível em <<https://www.comet-xray.com/service/faq>>. Acesso em: setembro de 2017.
- [93] ASTM E2002-15, **Practice for Determining Total Image Unsharpness in Radiology**, 2015.
- [94] ASTM E2445/E2445M-14, **Standard Practice for Performance Evaluation and Long-Term Stability of Computed Radiography Systems**, 2014.
- [95] BOYCE, S. J., SAMEI, E., “Imaging properties of digital magnification radiography”. **Med. Phys.**, v.33, pp. 984-996, 2006.
- [96] VDI/VDE 2630, **Computed tomography in dimensional metrology—Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors**, Part 1.3, 2011.
- [97] CALTECH, **Camera Calibration Toolbox For Matlab**. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/parameters.html> Acesso em: 15 Janeiro 2018
- [98] BOUGUET, J. Y., 1999, **Visual Methods for Three Dimensional Modeling**. Phd Thesis., California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.

- [99] LUKÁŠ, J., FRIDRICH, J., GOLJAN, M., “Digital camera identification from sensor pattern noise”. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security (TIFS)**, v. 2, pp. 205–214, 2006.
- [100] COSTA, F.O et al., “Open set source camera attribution and device linking”. **Pattern Recognition Letters**, v.39, pp. 92–10, 2014.
- [101] IEC 62563-1. **Equipamento eletromédico - Sistemas de exibição de imagens médicas, Parte 1: Métodos de avaliação**, 2017.
- [102] HEWLETT-PACKARD DEVELOPMENT COMPANY. **HP LA1751g/LA1951g LCD Monitors - User Guide**. Hewlett-Packard, 2009.
- [103] BIRD, DARRELL. **Display Warm Up Rates – How Long is Enough?** Disponível em: <<https://calman.spectralcal.com/>>. Acesso em: 01 Junho 2018.
- [104] GARCIA, I. et al, “Avaliação do desempenho de monitores diagnóstico em uso na cidade de Salvador: estudo piloto” In: **3º Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes**, pp. 1-7, Rio de Janeiro, novembro 2016.
- [105] EIZO. **Ergonomic requirements on screen workstation requirements**. Disponível em: <<https://www.eizo.be/knowledge/workstation-ergonomics/workstation-ergonomics-for-back-health/>>. Acesso em: 03 junho 2018.
- [106] ABNT NBR NM-ISO 230-1: **Código de ensaio de máquinas ferramenta**. Parte 1: Exatidão geométrica de máquinas-ferramenta operando sem carga ou em condições de acabamento, 1999
- [107] ABNT, **Guia para expressão da incerteza de medição**. INMETRO. Rio de Janeiro, 2008
- [108] AZEREDO, S., OLIVEIRA, D., NASCIMENTO, J., LOPES, R.T., “System Qualification of Digital Detector Array (DDA)”. In: **International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013**, pp. 24-29, Recife, PE, Brazil, Novembro de 2013.