

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RADIOSCOPIA

ANALÓGICO/DIGITAL

Elicardo Alves de Souza Gonçalves

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

Orientadores: João Marcos Alcoforado

Rebello

Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Dezembro de 2010

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RADIOSCOPIA ANALÓGICO/
DIGITAL

Elicardo Alves de Souza Gonçalves

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

Examinada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, DSc.

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, DSc.

Prof^a. Maria da Penha Cindra Fonseca, DSc.

. Dr. Sérgio Damasceno Soares, DSc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2010

Gonçalves, Elicardo Alves de Souza

Desenvolvimento de um sistema de radioscopia analógico/
digital / Elicardo Alves de Souza Gonçalves. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2010.

IX, 91 p.: Il.; 29,7 cm

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 89 – 91

1. Radioscopia. 2. Radiografia Digital Indireta. 3.
Geometrias complexas. I. Rebello, João Marcos Alcoforado et
al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades que me fizeram chegar até aqui para concretizar esta dissertação.

Agradeço ao CNPq e à fundação COPPETEC, a COPPE/UFRJ e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo incentivo e permissão para a realização do trabalho.

Agradeço especialmente aos meus Orientadores João Marcos Alcoforado Rebello e Ricardo Tadeu Lopes pela oportunidade, pela confiança depositada em mim, pela troca de idéias, amizade, apoio e incentivo.

Agradeço à equipe do Laboratório de Instrumentação Nuclear, principalmente: Davi, Aline, Daniel, Achilles, Carlos, Sandro, Osmar e Marques por toda a colaboração e por ceder todo o espaço físico e materiais necessários para a realização da dissertação.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Pereira pelas trocas de idéias e por seus conselhos.

À banca examinadora, Maria da Penha Cindra Fonseca, e Sérgio Damasceno Soares por correções, sugestões ou críticas.

Aos amigos da UFRJ, Camila Casquilho, Karen Medeiros, Daniel Greco, Jaqueline Greco, Eduardo Ramalho, Thiago Vicente pelo apoio e incentivo.

Aos amigos do INCa: Thalís Saint' Yves e Paulo César Travassos, assim como os profissionais Fernando Mecca, Antonio Paulo de Oliveira e Delano, pelas discussões e pela ajuda nas horas em que precisei.

À minha família, por todo apoio, em especial a meu Pai, pelas suas sugestões e minha mãe, que sempre acreditou no meu potencial.

A Viviane, pelo companheirismo, pela compreensão e pelo amor e carinho durante todo o tempo.

E, por fim, a todos aqueles que apoiaram de maneira direta ou indireta a realização dessa dissertação.

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

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE RADIOSCOPIA
ANALÓGICO/DIGITAL

Elicardo Alves de Souza Gonçalves

Dezembro/2010

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rabello

Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Método radioativo alternativo à radiografia convencional, a radioscopia mostra-se um eficiente ensaio não destrutivo em algumas situações especiais, como geometrias complexas e de difícil compreensão com apenas uma incidência. Diante desta perspectiva, este trabalho mostra o desenvolvimento e teste de um aparelho de radioscopia com aquisição analógica e armazenamento digital das imagens, mantendo suas características de radioscopia em tempo real, mas sendo uma alternativa de baixo custo para obtenção de radiografias digitais. Os resultados mostram que este sistema pode ser construído, ser avaliado por parâmetros de qualidade e ter utilidade única em algumas situações, sendo capaz para indicação de defeitos em peças reais. A digitalização mostrou-se razoável para armazenamento de imagens, além, de um ótimo ponto para a avaliação intrínseca da qualidade do intensificador de imagens.

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

DEVELOPMENT OF A ANALOG / DIGITAL RADIOSCOPY SYSTEM

Elicardo Alves de Souza Gonçalves

December/2010

Advisors: João Marcos Alcoforado Rabello

Ricardo Tadeu Lopes

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Radioactive Method alternative to conventional radiography, fluoroscopy shows to be an efficient non-destructive testing in some special situations, like in complex geometries and situations where is difficult to understand with only one incidence. Given this perspective, this work shows the development and tests of a device with fluoroscopic analog acquisition and a digital images storage, maintaining its characteristics of fluoroscopy in real time, while being a low cost alternative for obtaining digital radiography images. The results show that this system can be built, be evaluated by quality parameters and be too useful in some situations, being able to indication of defects in real parts. The digitalizing has proved as a reasonable for storing pictures in addition, a great method for assessing the intrinsic quality of the image intensifier.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Radioscopia.....	01
----------------------	----

Capítulo 2 – Fundamento teórico e revisão bibliográfica..... 05

2.1 Histórico.....	06
--------------------	----

2.2 Radioscopia e radiografia.....	07
------------------------------------	----

2.3 Funcionamento de um sistema radioscópico.....	10
---	----

2.3.1 Fonte de radiação ionizante.....	11
--	----

2.3.2 Conversão de raios X em luz.....	12
--	----

2.3.3 Sistema de Intensificação de Imagens.....	17
---	----

2.3.4 Captura da imagem em sistemas digitais.....	18
---	----

2.3.5 Sistemas de visualização da imagem.....	24
---	----

2.4 Qualidade da imagem em sistemas de Radioscopia.....	25
---	----

2.4.1 Contraste.....	27
----------------------	----

2.4.2 Definição de uma imagem.....	32
------------------------------------	----

2.4.3 Avaliação da qualidade da imagem.....	34
---	----

2.5 Considerações sobre o atual uso da radioscopia.....	35
---	----

Capítulo 3 – Materiais e Métodos..... 39

3.1 Materiais.....	39
--------------------	----

3.2 Planejamento do equipamento.....	42
--------------------------------------	----

3.3 Testes iniciais dos equipamentos.....	46
---	----

3.3.1 – Tubo de raios X.....	46
------------------------------	----

3.3.2 – Intensificador de imagens.....	47
--	----

3.4 Construção do equipamento.....	48
3.4.1 Projeto da Base e Haste metálica e Confecção.....	48
3.4.2 Escolha e compra do sistema de digitalização.....	49
3.5 Testes do Sistema.....	50
3.5.1 Aquisição inicial.....	50
3.5.2 Correção do <i>Aliasing</i> Periódico.....	51
3.5.3 Quantificação do <i>Vignetting</i>	51
3.5.4 Tratamento do Ruído.....	53
3.5.5 Contraste da Imagem.....	54
3.5.6 Resolução espacial.....	55
3.6 Testes em peças reais.....	56
Capítulo 4 – Resultados e Discussões.....	59
4.1 Imagens da aquisição inicial.....	59
4.2 Quantificação e tratamento do <i>vignetting</i>	62
4.3 Quantificação e tratamento do ruído.....	66
4.4 Contraste da imagem.....	68
4.5 Resolução espacial.....	70
4.6 Resultados para a peça 1.....	70
4.7 Resultados para a peça 2.....	80
4.8 Discussões dos Resultado.....	82
4.8.1 Peças Reais.....	82
4.8.2 Dificuldades.....	83
Capítulo 5 – Conclusões.....	87
Sugestões para trabalhos futuro	88
Referências bibliográficas.....	89

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Radioscopia

A radioscopia é uma técnica derivada da radiografia, usada para ensaios não destrutivos, cujos princípios físicos de obtenção da imagem são similares ao ensaio radiográfico convencional, com a vantagem de se obter imagens num tempo muito curto, possibilitando até a formação dessas imagens em tempo real [1, 2, 3, 4].

Desta forma, esta técnica nada mais é do que uma forma alternativa de usar a inspeção por radiação ionizante. No passado, quando a inspeção era exclusivamente visual, sem deixar qualquer tipo de registro – a fluoroscopia por visualização direta – além de grandes exposições aos operadores, não permitia uma inspeção rigorosa, metódica e com boa resolução. Ao passo que a radiografia por filmes, além de deixar o filme como registro, permitia que este fosse usado em métodos de identificação de defeitos, e, como a exposição era maior, permitia melhor imagem. Até mesmo o tratamento de imagens começou a ser empregado nas imagens impressas nos filmes [2].

Paralelo a isto, o desenvolvimento de intensificadores de imagem, o acoplamento de câmeras (inicialmente Vidicon) a estes, tornaram a radioscopia

uma forma alternativa, com baixo tempo de exposição, embora com baixa qualidade de imagem, mas, já como forma de registro (vídeo, películas cinematográficas) e alguns métodos de inspeção padronizados. [2]. Desta forma, era usada em um percentual de inspeções, cujas condições eram desfavoráveis à radiografia convencional.

Com o desenvolvimento de câmeras CCD, a digitalização de imagens, e digitalização dos processos de obtenção de imagens, a radioscopia ganha um espaço extra no campo de ensaios não destrutivos. A digitalização na radioscopia aparece de forma natural, sem afetar a eficiência do sistema, e facilita o processamento de imagens para se obter o resultado desejado. Já a radiografia, reluta em usar sistemas de obtenção digital de imagens, isto por que, os filmes digitais atuais não têm a mesma resolução de um filme convencional. A radioscopia não sofreu com perdas de resolução pelo fato de que a resolução dos elementos CCD de uma câmera estar na mesma ordem de grandeza da resolução da imagem adquirida em sistemas analógicos.

A necessidade do uso de radioscopia é justificada, em termos gerais, nas seguintes condições de inspeção:

- Em linhas de produção, onde a inspeção tem que ser rápida, automatizada, e/ou ter um grande número de inspeções por unidade de tempo;
- Em geometrias cuja visualização do objeto em vários planos e ângulos de imagem facilite a caracterização do objeto e de defeitos;
- Em geometrias cuja interpretação da imagem é facilitada pela movimentação do ângulo de visualização do objeto;
- Em ensaios onde o movimento de peças internas possa ser importante.

Nos casos onde a geometria dificulta a interpretação dos resultados, outra técnica de avaliação seria a tomografia, que produz ótimas condições para a interpretação da imagem e localização de defeitos. Apesar disto, o uso de radioscopia tem vantagens como uma economia considerável de tempo na aquisição de imagens.

As diversas imagens de uma radioscopia podem ser utilizadas para uma reconstituição em 3D, caracterizando uma forma de tomografia [5,6]. Assim, com um mesmo equipamento com a capacidade de ser usado para as três técnicas: radioscopia, radiografia e tomografia; mesmo com suas limitações, caminham para uma futura unificação.

Com o desenvolvimento do dispositivo *flat panel*, inicialmente visto como um substituto do filme radiográfico convencional, a radioscopia ganha uma alternativa na aquisição de imagens. Alguns trabalhos colocam a radiografia com *flat panel* como outra forma de radioscopia [5,6]. Neste caso, a aplicação do intensificador de imagens, além de ter um menor custo, também é viável e pode ser uma solução, em casos onde há pouca intensidade.

O presente trabalho apresenta a descrição da construção de um aparelho de radioscopia, incluindo as possíveis dificuldades, assim como a avaliação do aparelho quanto à qualidade das imagens obtidas. Esta avaliação considerou os principais parâmetros de qualidade, em termos de imagem digital.

O capítulo 2 contém a fundamentação teórica sobre radioscopia e uma breve revisão bibliográfica, sobre as principais aplicações atuais no campo dos ensaios não destrutivos. Discute-se também quais as possíveis situações onde a radioscopia prevaleceria sobre a radiografia estática.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos, descrevendo o procedimento de construção do equipamento, os testes realizados e os meios encontrados para contornar problemas que apareceram ao longo do trabalho.

O capítulo 4 descreve os resultados, as discussões sobre estes, e as suas implicações práticas no emprego da radioscopia com um equipamento similar ao construído.

Por último, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais.

Capítulo 2

Fundamento teórico e revisão bibliográfica

O presente capítulo descreve de forma sucinta os princípios básicos da técnica de radioscopia e as suas principais atuações na atualidade. Primeiramente é apresentado um pequeno histórico sobre a técnica e compara-se a radioscopia à radiografia convencional destacando quais as características que são próprias da radioscopia.

A seção 2.1 apresenta um breve histórico da radioscopia, e a seção 2.2 faz uma rápida comparação entre radioscopia e radiografia.

Na seção 2.3 está descrito o aparelho de radioscopia e o papel de cada componente na qualidade da imagem final, e complementando, a seção 2.4 identifica e descreve quais os fatores de qualidade da imagem podem ser avaliados.

Uma revisão bibliográfica sobre as principais atuações da técnica está descrita na seção 2.5 exemplificando quais seriam as principais situações onde ela seria necessária.

2.1 - Histórico

A radioscopia foi usada na medicina, a partir da década de 1920 (3). Mas o uso da radioscopia para a avaliação não destrutiva de materiais não é nova, pois, desde o final da primeira metade do século XX se tem dados do uso dessa técnica [2].

Nos anos 40, já existia a primeira forma de radioscopia não médica, onde a visualização era feita através da cintilação de uma tela de fluorescente, e por isso conhecida como fluoroscopia. Esta era usada para a inspeção em peças de alumínio na indústria automotiva [2]. A partir de então, a inovação tecnológica para os dois campos, uso médico e avaliação não destrutiva, era a mesma [2,3]

Por volta de 1955, intensificadores de imagens para raios X, com lentes oculares, foram introduzidos na inspeção radioscópica [2,3]. Pouco depois, nos anos 60, foi desenvolvido o acoplamento de um intensificador de imagens a um aparelho de TV [2,3]. Esse sistema é muito semelhante ao conhecido atualmente, com a diferença de ser uma câmera analógica (Vidicon), diferente da que usamos hoje, que é baseada em um elemento CCD (*charged coupled device*, em inglês, um elemento capaz de transformar o sinal luminoso em sinal elétrico, atual tecnologia para captura de imagens) [1,3]. Hoje em dia, essa técnica é a mais usada, não só pela eficiência e pela capacidade de rever as imagens, mas também pela eficiência na proteção radiológica do operador, que não fica exposto diretamente ao feixe de raios X [1,3].

Os anos 70 foram marcados pela melhoria nos elementos que compõem o sistema de inspeção, que ficou mais difundida nessa década,

sendo usada principalmente na avaliação de soldas e possíveis trincas [2]. Já nos anos 80, a introdução do processamento de imagens melhorou as chances de encontrar erros em estruturas, assim como diminuiu as dimensões das falhas que poderiam ser avaliadas [2]. Os avanços conseguintes se tratavam da automatização do sistema, e de sua digitalização, tanto na parte de obtenção de imagens quanto na parte de tratamentos da imagem [7,8].

Dessa forma, podemos dizer que é uma das mais antigas formas de ensaio não destrutivo. Mesmo assim, por volta do ano 2000 ainda era considerado como um dos ensaios que predominariam em um futuro próximo [2]. Nos dias de hoje, a radioscopia é vista como uma forma alternativa em avaliações onde as limitações da radiografia convencional prejudicariam as inspeções [4,8] ou em casos onde a inspeção tenha que ser em um tempo muito curto, ou mesmo imagens em tempo real. Um exemplo típico, onde existem tais exigências, é a inspeção de peças em linhas de montagens [5].

2.2 - Radioscopia e radiografia

As principais diferenças entre as técnicas estão no funcionamento dos detectores e nas condições de inspeção [2,7] O princípio fundamental é o mesmo: o feixe incide por um lado do objeto em estudo, e o detector fica do lado oposto [3, 4]. A intensidade do feixe que consegue atravessar o material depende de sua natureza atômica (principalmente densidade) e da sua espessura. Assim, o feixe que chega ao detector traz consigo a imagem latente produzida de forma análoga ao sombreamento [1, 2, 3, 7, 8]

A radiografia convencional usa um filme cuja formação de imagens depende dos grãos de haleto de prata [9]. Priorizando a resolução espacial, estes grãos de prata são de dimensões mínimas, e como consequência, é necessária uma exposição maior; ou seja, usa um feixe mais intenso ou maior tempo de exposição [4,7]. Como consequência, a granulação provocada pela natureza estatística da radiação (ruído) é praticamente zero. [4,7]

A radioscopia usa um sistema capaz de intensificar o sinal que chega ao detector. Desta forma, mesmo com uma exposição bem menor, é possível formar imagens úteis a ensaios não destrutivos [1, 2, 3, 4,7]. Diferente do que acontece no filme, a imagem final do intensificador de imagens é um sinal luminoso, e este pode ser capturado e armazenado em tempos muito curtos chegando a conseguir uma imagem a cada 40 milissegundos [3,4, 7, 8].

Para conseguir esta eficiência no tempo de captura, o intensificador de imagem reduz a resolução espacial do sistema. Dependendo do objetivo, este problema pode ser parcialmente contornado com múltiplas incidências e processamento de imagens. [2,4,8, 10, 11]

As maiores vantagens da técnica de radioscopia estão na questão mecânica, pois o filme radiográfico tem que estar fixo e rígido, enquanto que a alta sensibilidade do intensificador de imagens permite até imagens com o detector em movimento. Isso é crucial para algumas noções de perspectivas e profundidade [7, 8, 12, 13]. Além disto, na radioscopia existe menos preocupação em errar a técnica, pois o ajuste da exposição, pode ser feito interativamente, observando a imagem obtida [7,8]. Outra vantagem é que, como a inspeção é de tempo curto, a radioscopia é a melhor opção onde se necessita de muitas inspeções em um período muito curto de tempo, ou

geometrias complexas que exigem inúmeras exposições ou filmes, como por exemplo, na avaliação de peças automotivas [5].

A radioscopia também oferece menos exposição aos operadores, por ter maior sensibilidade à radiação, e conseqüentemente exigir menos tempo de irradiação e menor intensidade de feixe [1,3].

Na tabela 1 mostra um quadro comparativo entre a radiografia por filme e três tipos de radioscopia: além da técnica convencional, o processamento de imagens e a utilização de uma fonte de radiação com microfoco melhoram a qualidade da imagem. Se compararmos a imagem obtida em um filme com a imagem radioscópica, a primeira tem qualidade superior, com até 0,06 mm de resolução, contra 0,25 da segunda. Com a introdução de processamento de imagens, a resolução não chega a ser melhor, mas se utilizada fonte com microfoco, a resolução chega a 0,05 mm. A sensibilidade ao contraste é de 3 a 4 % em radioscopia convencional, 1 a 2% em filmes e de 0,5 a 1 em radioscopia com processamento de imagens [7]. O processamento, porém, introduz um intervalo de tempo entre a exposição e a visualização de imagens, que passa de ser em tempo real para um intervalo de 30 segundos. Esse tempo para o filme radiográfico pode variar entre de 5 a 15 minutos [7].

Tabela 1 – Comparação da radiografia por filme com diferentes modalidades da radioscopia. Adaptação de (3).

	Radiografia por filme	Radioscopia em tempo real convencional	Radioscopia com processamento de imagem	Radioscopia com processamento de imagem e microfoco
Resolução	0,1 a 0,06 mm	0,5 a 0,25 mm	0,5 a 0,25 mm	Melhor que 0,05
Sensibilidade do contraste	1 a 2 %	3 a 4 %	0,5 a 1 %	0,5 a 1%
Velocidade	5 a 15 minutos por imagem	Tempo Real	1 a 30 segundos por imagem	1 a 30 segundos por imagem
Perspectiva do ensaio	Fixa	Flexível	Flexível	Flexível

2.3 - Funcionamento de um sistema radioscópico

Basicamente, um sistema radioscópico (figura 1) possui os seguintes componentes [1,2,3]:

- uma fonte de radiação, normalmente raios X ou gama.
- uma tela conversora de radiação em luz.
- um método de captura do sinal luminoso, seja por digitalização, seja por sistemas de vídeo.
- um sistema de processamento, e/ou armazenamento da imagem
- um sistema de visualização da imagem

Uma breve descrição de cada componente será dada a seguir.

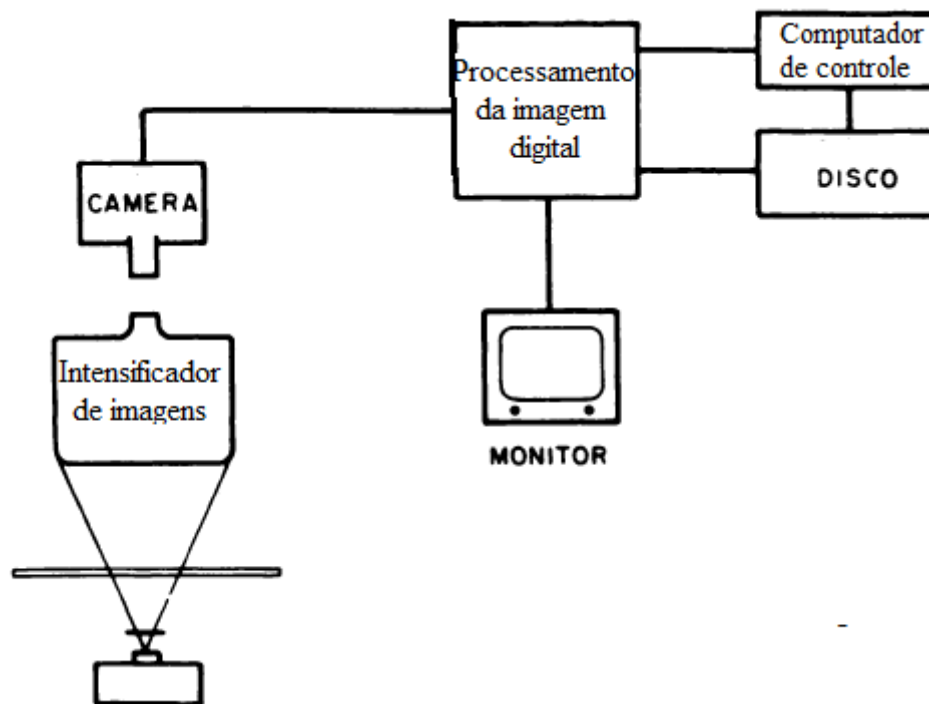


Figura 1: Sistema básico de radioscopia. Adaptado de [3].

2.3.1 - Fonte de radiação ionizante

Usualmente a radioscopia usa ampolas de raios X como fonte de radiação. Ele as apresentam algumas vantagens como o fato de se permitir o controle da energia e da intensidade do feixe (número de fótons emitidos por segundo), além de serem mais seguras do ponto de vista da proteção radiológica, pois os outros tipos de fontes, os radioisótopos, emitem radiação em tempo integral e não apenas quando o equipamento está em funcionamento. Radioisótopos emissores de raios gama podem ser utilizados em aplicações bem específicas, onde se necessita de níveis específicos de energia dos fótons ou em casos em que seja difícil transportar um equipamento com ampola de raios X.

Em todos os casos de fótons, os fatores importantes para a obtenção das imagens são os seguintes: energia de emissão (ou espectro de energia) e fluxo de partículas (atividade ou corrente) [1,3,14].

Emissores beta e alfa não têm aplicação prática explorada no campo da radioscopia, mas a neutrongrafia pode ser usada para obter imagens em tempo real. Nesse caso, a fonte de nêutrons pode ser um reator de baixa potência, ou por isótopos emissores de nêutrons como o amerício. [1,15].

2.3.2 - Conversão de raios X em luz

A tela luminescente do intensificador de imagens é normalmente composta por uma base plástica, onde é aderida a camada de grãos do material cintilante. Para maior aproveitamento da luz emitida, entre a base e os grãos existe um material refletor de luz; isso aumenta a luz que sai da tela em direção ao elemento CCD (figura 2).

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 [1]. Um esquema da tela e de como acontece essa conversão é mostrado na figura 2: 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.

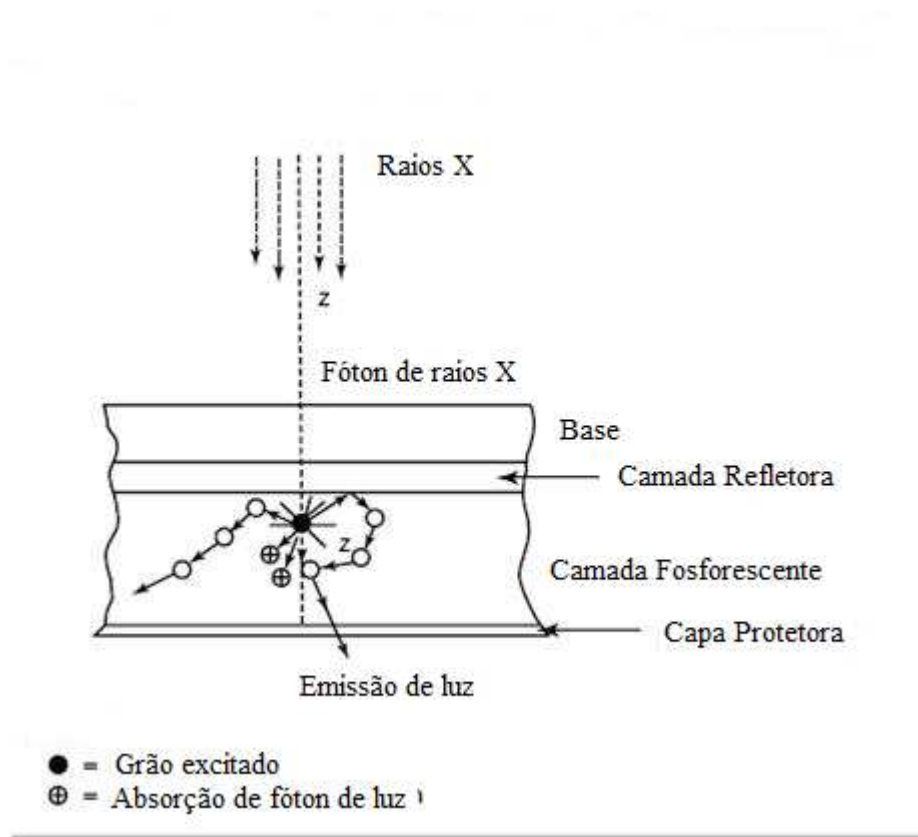


Figura 2: Processo de conversão de raios X em luz. Adaptado de [1].

A espessura da camada do material luminescente é vital para uma boa resolução da imagem, pois, quanto menor for essa espessura, mais próximo do local de interação dos raios X sairão os fótons de luz. Em contrapartida, essa menor espessura significa menos material para os raios X interagirem, o que ocasiona a perda da eficiência (que pode ser definida como a razão entre sensibilização da imagem e a exposição) do sistema na detecção de radiação

ionizante. Esse problema é análogo ao que acontece num chassi de radiografia onde o filme está acoplado a uma tela intensificadora.

Também análogo a um filme radiográfico, a camada luminescente de telas de fósforo tem material emissor de luz em grãos. Essa granulação influencia nos parâmetros da tela: grãos grandes formam telas com maior sensibilidade à radiação e com pouca resolução; grãos pequenos formam telas com menor sensibilidade à radiação, mas com boa resolução [1].

O material fosforescente (ou fluorescente) utilizado também influencia em diversas características da tela luminescente: a probabilidade de interação com os raios X ou gama - que depende da energia do fóton e da espessura da camada de fósforo, mas também do poder de frenagem (tradução do termo em inglês *Stopping Power*) deste material (figura 3B) - o espectro de emissão de luz (figura 3A) e a persistência – que é intervalo de tempo após a irradiação que a tela continua emitindo fótons (tabela 2) [1,3].

A tabela 2 mostra características de diferentes materiais fosforescentes, como densidade, pico de emissão de luz e constante de decaimento. O pico de emissão, que varia de 450 a 550 nm, caracteriza a cor predominante da luz produzida pela excitação. Se essa luz fosse vista diretamente, a olho nu, seria importante esse pico estar perto do centro do espectro visível. A constante de decaimento (definida como o tempo para que o número de átomos excitados decaia de um fator de e^{-1}) varia de 0,06 a 480 μ s, como é considerado instantâneo, quanto menor o tempo de decaimento melhor para a qualidade da imagem. Assim, uma alta constante de decaimento, como do $Gd_2O_2S(Tb)$ pode atrapalhar na rápida obtenção de imagens e também na produção de imagens em tempo real (tabela 2) [1].

Tabela 2 – Característica de diversos materiais fluorescentes. Adaptado de [1]

Material	Símbolo químico	Densidade (g/cm³)	Pico de emissão (nm)	Constante de decaimento (μs)
Sulfeto de Zinco	ZnS(Ag)	4,1	450	0,06
Sulfeto de Zinco Cádmio.	ZnCdS(Ag)	4,5	550	0,085
Iodeto de Césio ativado com Sódio	CsI(Na)	4,5	420	0,65
Tungstato de Cálcio	CaWO ₄	6,1	430	6
Oxisulfeto de Gadolínio ativado com Têrbio	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	7,3	544	480

Existem ainda, sistemas de telas com funções especiais, como algumas cujo material emite luz ao ser atingido por nêutrons e que pode ser usado para a realização de neutrongrafia em tempo real, ou ainda telas cujo material tem grande eficiência para fótons de baixo comprimento de onda, chamadas telas de alta energia [15].

A figura 3 mostra para os mesmos materiais o espectro de emissão de luz (figura 1a) que é a distribuição das energias da emissão de cada um. O espectro do Gd₂O₂S(Tb) mostra uma maior área abaixo da curva, ou seja, maior intensidade de emissão. A figura 3B também mostra o coeficiente de absorção dos materiais (gráfico 1b), que é a probabilidade de interação pela energia. Todos os materiais seguem um mesmo padrão de comportamento apesar do material ZnCdS(Ag) ter um menor coeficiente. No comportamento do material podemos ver que quanto maior a energia, menor interação haverá, ou seja, mais poder de penetração a radiação terá.

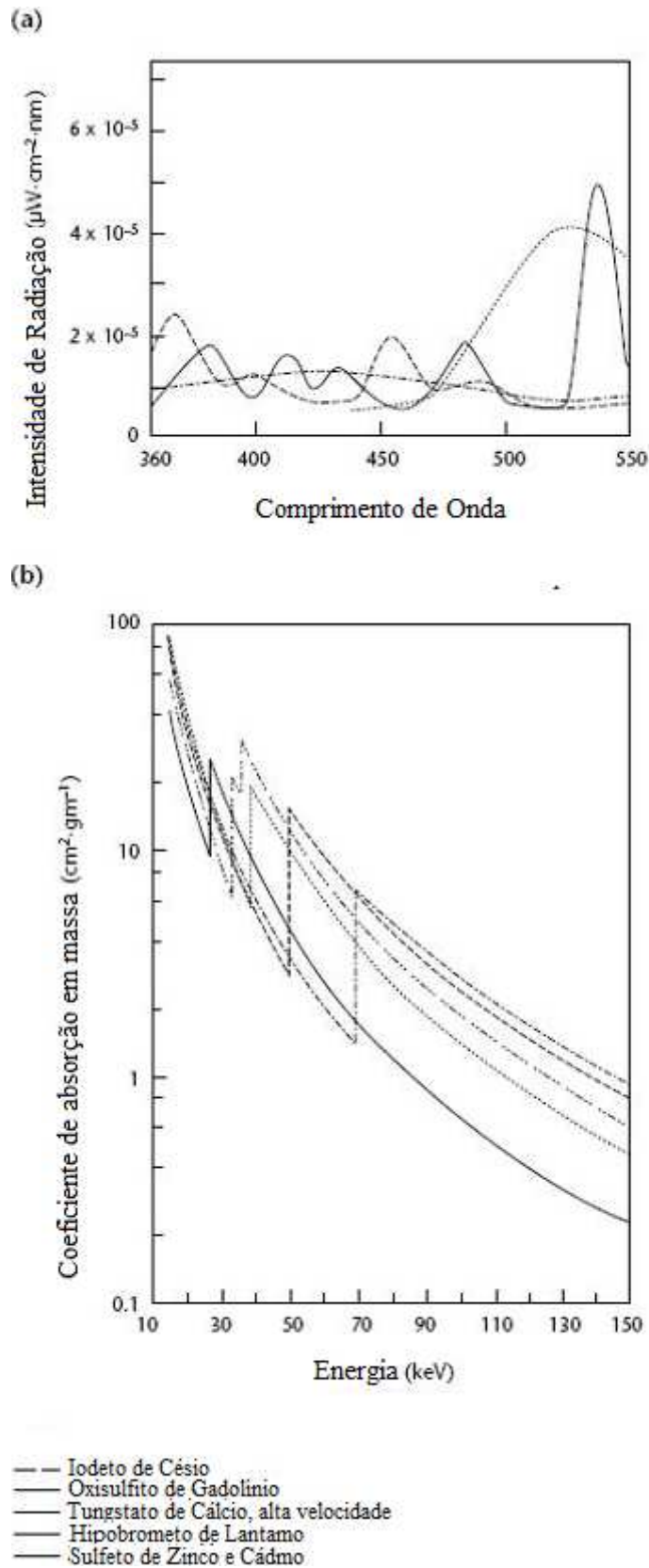


Figura 3 - Telas fluorescentes : (a) espectro de emissão e (b) coeficiente de absorção em massa como função da energia. Adaptado de [1].

2.3.3 - Sistemas de intensificação de imagens

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. O componente responsável por esta função é o intensificador de imagens [1,3,4,7].

Antes do uso de um intensificador de imagem em radioscopia, a avaliação era feita a olho nu, diretamente na tela fluorescente e sem nenhum tipo de tratamento da imagem. Esse tipo de avaliação era então dependente da adaptação do operador e das limitações do olho humano [3].

Este componente do sistema funciona transformando novamente fótons em elétrons, então, estes elétrons são acelerados para atingir novamente um material que converte elétrons em luz. Essa amplificação tipicamente pode ser de um fator entre 30 e 10.000 vezes, normalmente vem acompanhada de uma redução na área total da imagem [1].

O catodo fica acoplado à tela fluorescente, onde os elétrons são produzidos. Estes elétrons então são acelerados por uma diferença de potencial entre o catodo e os eletrodos que estão posicionados ao longo do tubo, em uma geometria que facilita a focalização do feixe de elétrons.

Com uma energia cinética maior após essa aceleração, os elétrons incidem sobre outra tela luminescente (normalmente de iodeto de cério, ativado com sódio), e produzem uma maior quantidade de fótons [1]. A imagem final é mais intensa e menor. É indispensável que isto ocorra em vácuo, para que a eficiência deste processo não seja prejudicada [1,4].

Um esquema do intensificador é mostrado na figura 4, que mostra também que a tela de conversão de raios X para luz tem um formato côncavo, o que pode trazer dispersões geométricas.

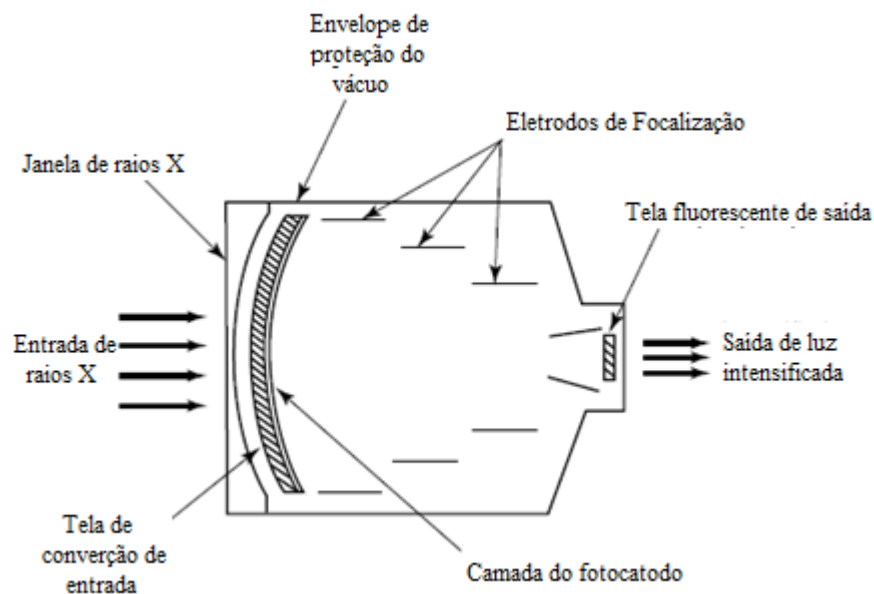


Figura 4 – Representação do funcionamento de um tubo intensificador de imagens. Adaptado de [1].

2.3.4 - Captura da imagem em sistemas digitais

Uma das grandes limitações da radioscopia convencional é o fato de que, com exceção do manuseio para melhorar a visualização, a imagem não é processada. Podemos perceber em um sistema com intensificador de imagem e equipamento de visualização, que as imagens são armazenadas em formatos de vídeo [7]. Capturar e digitalizar essas imagens quadro a quadro pode ser uma opção importante para conseguir mais informações a partir dos dados armazenados [4,10,11]. Para isto, é necessário um componente computacional

conhecido como *frame grabber*, isto é, um dispositivo computacional que permite digitalizar o vídeo analógico. Um sistema de intensificador de imagem que obtém imagens digitalmente é análogo a um sistema digital de captura indireta, onde a imagem é transformada em luz, e esta, é capturada por um elemento CCD, como mostra a figura 5. [2,4,7] Se tratando de radiologia digital, podemos dividir as técnicas em três métodos. O primeiro método, conhecido como conversão indireta, é onde a conversão de raios X para o sinal digital tem uma etapa intermediária, quando sinal é transformado em luz (figura 5).

O segundo método, conversão direta, transforma radiação ionizante diretamente em sinal digital, por intermédio de fotocondutores, e o terceiro método, usa um cassete, conhecido como *image plate*, onde a imagem latente fica armazenada até que este passe por um processo de leitura (figura 5).

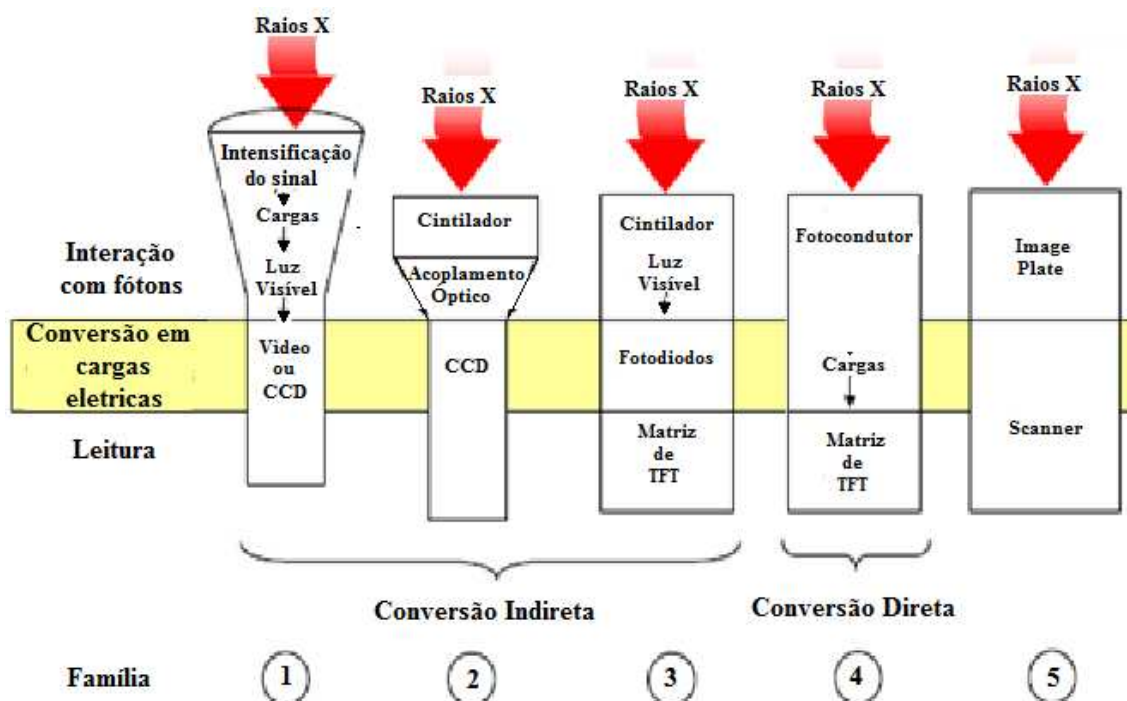


Figura 5: Comparação de um sistema com intensificador de imagem com saída digital com sistemas de radiografia digital. Adaptado de [4]

Conseguir digitalizar o sinal de um sistema de radioscopia analógico, nos traz a possibilidade de trabalhar essa imagem; avaliar com parâmetros matemáticos e assim, tornar as conclusões menos subjetivas [4]; montar estes dados em outras formas de visualização, e até, em ultimo caso, fazer exposições para reconstrução em três dimensões do corpo de prova. [4, 13].

A avaliação da resolução de sistemas de radioscopia convencional, por exemplo, é feita de maneira visual [16], onde o avaliador tem que descrever quantos pares de linha de um IQI [4, 14] ele consegue distinguir [16]; a avaliação em uma imagem digital seria a partir de uma rotina matemática, e portanto, independente de qualquer limitação humana ou do sistema de visualização. A figura 6 mostra a representação gráfica da curva de MTF: O seguimento de cima mostra uma função, que pode ser um perfil de imagem, em valores de pixel que varia de baixa freqüência (objetos grandes - baixa resolução espacial) até uma freqüência relativamente alta (objetos pequenos - alta resolução espacial); o seguimento de baixo mostra como seria a atenuação da função (da imagem) em função do aumento da freqüência, em imagem real (figura 6).

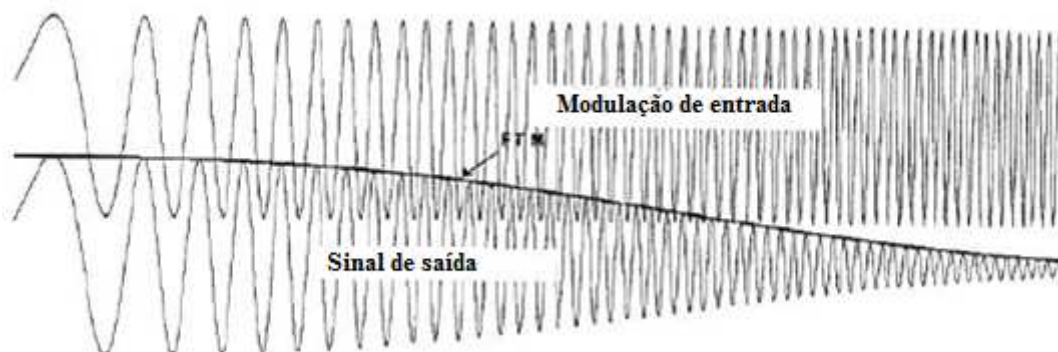


Figura 6: Representação gráfica de uma rotina matemática para a avaliação da resolução espacial. Adaptado de [4]

Porém, este processo de capturar o sinal de vídeo analógico e transformá-lo em imagem digital retira algumas vantagens da radioscopia, como a visualização em tempo real [4]. O ideal seria, então, que as duas opções de obtenção de dados fossem possíveis e integradas ao mesmo equipamento.

Equipamentos de conversão direta, como os que fazem radiografia digital (DR), podem ser usados para o mesmo fim com maior qualidade de imagem [14]. Porém, a aquisição e implantação desse tipo de equipamento pode não ser a melhor opção para uma empresa, sobretudo em termos de investimentos [6]. O Intensificador de imagens, que ainda é largamente utilizado, pode ser aproveitado para este fim, utilizando a digitalização do seu sinal.

Obtendo imagens digitais de uma mesma peça em várias incidências diferentes permite usar os dados para uma reconstrução tomográfica do corpo de prova. Como o sinal obtido é uma imagem, as várias reconstruções obtidas do corpo de prova possibilitam a construção da imagem em três dimensões do objeto de estudo [13]. A soma da radioscopia com a tomografia define um dos mais poderosos métodos de avaliação radiográfica, onde uma técnica preenche o vazio deixado pela limitação da outra [7,13].

Assim como nas câmeras fotográficas usuais, nas câmeras que são acopladas ao intensificador de imagens, os arranjos de elementos CCD (*Charged Coupled Device*) têm se mostrado mais eficientes na captura de imagens, na fidelidade geométrica (capacidade de não distorcer a imagem) e na uniformidade do sinal. Dessa maneira, eles são vistos atualmente como

parte do sistema radioscópico digital básico [4]. A figura 7 mostra todos os componentes de um intensificador de imagens, quando acoplados a um elemento CCD: Os fótons da imagem incidente atingem a primeira camada de fótons e são convertidos em elétrons. Estes elétrons são acelerados, fazendo com que o sinal ganhe intensidade. Novamente os elétrons são convertidos em luz por uma tela luminescente. Esta nova imagem que é mais intensa é então capturada pelo elemento CCD [1].

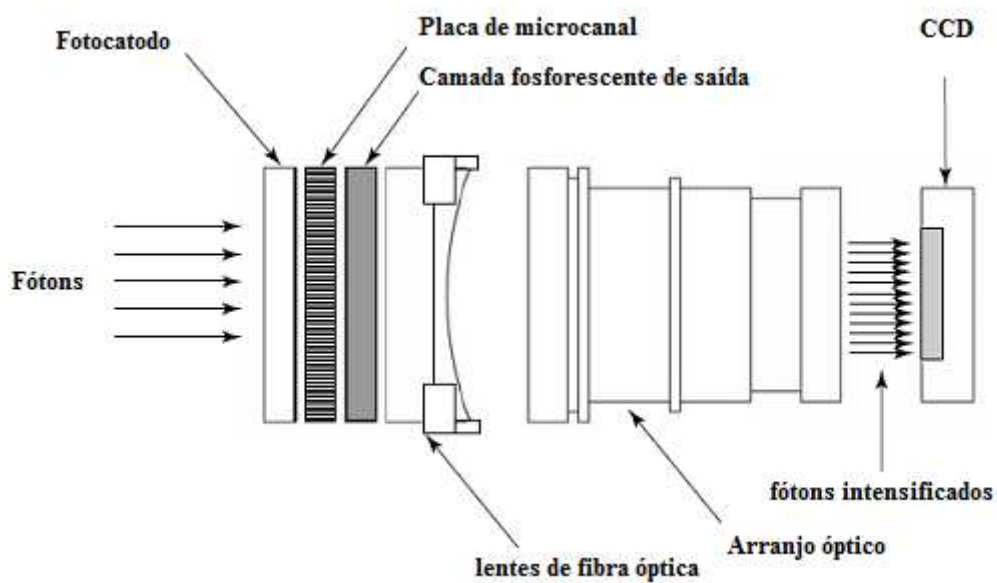


Figura 7 – Componentes de um intensificador de imagens. Adaptado de [1].

Os elementos CCD, que nos sistemas digitais fazem o papel da camada sensível à luz, são expostos em uma matriz, normalmente quadrados ou retangulares, mas são endereçados individualmente, como mostra a figura 8.

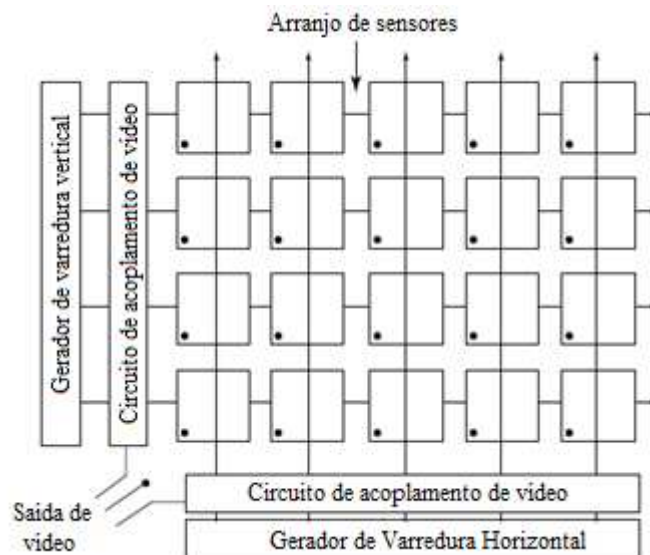


Figura 8 – Arranjo matricial de elementos CCD – adaptado de [1]

Um fóton incidente atinge uma região de um elemento, e se absorvido, cria um par “buraco” e elétron. Isto cria uma pequena corrente, que é percebida como um pequeno potencial elétrico na saída do elemento. Este processo é cumulativo, ou seja, se mais de um fóton atinge o elemento ao mesmo tempo, o potencial elétrico de saída do elemento é multiplicado pelo número de fótons absorvidos. Assim o potencial elétrico de cada elemento é proporcional à intensidade da luz sentida [1, 9].

Como cada elemento tem endereçamento próprio, a intensidade do sinal (potencial elétrico) de cada um pode ser associada à posição do elemento na matriz. A imagem converte cada nível de sinal em um nível de cor, traduzindo assim, a intensidade da luz recebida [1,9].

A resolução espacial do CCD, ou seja, a capacidade de distinguir pequenos objetos é inversamente proporcional ao tamanho de cada elemento. Para uma mesma área sensível à luz, a matriz que contiver os menores elementos, e conseqüentemente maior número de elementos, terá melhor

resolução espacial. Mas em contrapartida, elementos menores significa menor sensibilidade à radiação, pois a probabilidade de interação de um fóton no elemento diminui. Assim como no filme, elementos maiores acumulam fótons incidentes mais rapidamente.

Um intensificador de imagens que funcione com câmera CCD ainda oferece outras vantagens, como o controle automático do brilho, definindo um limiar máximo de corrente permitida, evitando além da saturação danosa dos elementos, imagens saturadas devido à altas exposições de luz [4]. A amplificação da luz desses intensificadores chega a 18000 vezes e a resolução espacial é tipicamente 30 pares de linha por milímetro. [1]

2.3.5 - Sistemas de visualização da imagem

Atualmente, a maioria dos monitores usados para a visualização de imagens em radioscopia são tubos de raios catódicos que usam feixes de elétrons para projetar a imagem em uma tela fosforescente. Com a digitalização de todo o sistema e com a constante baixa de preços de novos equipamentos como a *Tela de cristal líquido* (ou LCD, do inglês *liquid crystal display*), é possível fazer uma projeção de que os monitores convencionais sejam substituídos.

As maiores limitações dos sistemas de visualização atualmente estão nas propriedades do equipamento, na expressão de relação entre o contraste

adquirido pelo feixe de raios X, $\frac{\Delta I}{I}$, e o contraste representado no monitor,

$\frac{\Delta B}{B}$, temos:

$$\frac{\Delta B}{B} = \gamma \frac{\Delta I}{I} \quad (1)$$

Onde

$$\gamma = \gamma_a \gamma_c \gamma_k \gamma_s \gamma_o \quad (2)$$

B é o brilho do monitor

ΔB é a variação do brilho em diferentes áreas do monitor

I é a intensidade do feixe de raios X que chega ao intensificador de imagens.

ΔI é a variação a intensidade do feixe que chega a diferentes áreas do intensificador de imagens.

γ_a é o fator gama do amplificador de elétrons, γ_c o fator da câmera CCD, γ_k e γ_s os fatores do tubo de imagem e da tela fluorescente do monitor, γ_o do olho humano.

Todos esses fatores normalmente são iguais a 1, com exceção do olho humano que, apesar de não ser linear, tem valor, normalmente de 0,3; e do tubo de imagem, que para compensar o olho humano pode ter o valor próximo a 3. [1]

2.4 - Qualidade da imagem em sistemas de radioscopia.

A maioria dos fatores que interfere na resolução e na qualidade da imagem de um ensaio de radioscopia é similar aos de radiografia convencional

[4]. Mas é conveniente lembrar que na obtenção de uma imagem radioscópica, a radiação que contribui para a formação da imagem é apenas a radiação absorvida durante o tempo de captura do sistema de detecção de fótons, enquanto que o filme insere na imagem, qualquer exposição a que for submetido, inclusive a radiação de fundo do ambiente, que sempre está presente. Para a antiga técnica onde se observava a imagem diretamente da tela fluorescente, por exemplo, o tempo de captura era limitado pelo olho humano, e assim, a imagem observada era a soma dos sinais que chegavam à tela a cada 0,2 segundos. Na radioscopia em tempo real, que é dividida em quadros, a limitação é a duração do quadro, ou seja, a imagem é a soma dos sinais que chegam ao intensificador de imagens a cada quadro [2,3]. Como uma radioscopia em tempo real típica tem 30 quadros por segundo, cada quadro seria a soma dos sinais que chegam a cada $1/30$ segundos ou 0,03 segundos [1,3].

Quando se trata de qualidade de imagens de origem radiológica, podemos citar quatro importantes aspectos [4,14]:

- Contraste de objetos;
- Contraste do sistema;
- Definição por geometria;
- Definição (resolução).

2.4.1 - Contraste

O contraste da imagem visualizada de radioscopia pode ser definido como a diferença em níveis de cor (normalmente cinza) entre duas espessuras de um mesmo material [1,4,14].

O contraste do sistema, na verdade, é a capacidade do sistema de diferenciar a resposta em diferentes intensidades de irradiação. O fator gama da tela fluorescente, a amplificação, a câmera e o monitor são relevantes para este contraste [1].

O contraste de um objeto é a diferença de níveis de cor, ou densidade ótica, causada pela presença do objeto no ensaio. Fatores como a espessura e a densidade deste objeto e o espalhamento criado pelo seu ensaio influenciam nesse contraste.

Para um feixe de radiação monoenergético, a radiação incidente na tela fluorescente (I) depende da espessura (x) e composição do corpo de prova, que é posicionado entre a fonte e a tela, segundo a equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

Onde

I é a radiação incidente na tela fluorescente, após atravessar o corpo de prova.

I_0 é a radiação incidente no corpo de prova

μ é o coeficiente de absorção de fótons do material do corpo de prova

x é a espessura do corpo de prova

Essa radiação incidente é proporcional intensidade da cor (B) que esta tela apresenta.

$$B = mI \quad (4)$$

B é a intensidade da cor na tela

m é um parâmetro da própria tela, e pode ser chamado de eficiência.

Então:

$$B = B_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

Onde B_0 é a intensidade da cor da tela se não houvesse corpo de prova.

Derivando,

$$\frac{dB}{dx} = -\mu B_0 e^{-\mu x} = -\mu B \quad (6)$$

ou seja,

$$\frac{dB}{B} = -\mu dx = C \quad (7)$$

onde C é a definição de contraste devido à espessura dx de um objeto [1].

A eficiência das telas fluorescentes influencia diretamente o contraste da imagem, mas com a digitalização e o processamento de imagens, é possível chegar a resultados razoáveis mesmo com telas pouco eficientes [4]. Apesar disto, mesmo com processamento de imagens, as limitações físicas causadas pela pouca eficiência de um sistema pode ser determinante para esconder algum detalhe importante. Assim, o ideal é ter um sistema razoavelmente eficiente para a aplicação desejada.

O contraste observado na imagem é uma resposta do sistema ao contraste luminoso produzido na tela luminescente. Basicamente, o que todo o sistema faz é transformar a imagem formada por este contraste luminoso ao longo do processo de intensificação em escala de cinza para a visualização, e

isto pode modificar os níveis iniciais de diferença de intensidade. A visualização, por exemplo, pode ser feita através de um dispositivo que não tenha uma resposta linear aos níveis de cor da imagem; amplificando o contraste em algumas tonalidades e minimizando-o em outras. [1]

A imagem armazenada digitalmente, normalmente é muito mais rica em informações do que a imagem visualizada [4]. Sistemas digitais de radioscopia adquirem e armazenam a imagem como uma matriz de números, e não com imagens fisicamente formadas e diretamente observadas. Isto é uma enorme vantagem, pois é possível determinar contraste mesmo onde o olho humano não diferenciaria. Um exemplo disto é o fato de podermos definir o número de níveis de cinza em uma imagem a ser adquirida, normalmente entre 256 e 4096 níveis, enquanto o olho humano não consegue chegar a 200. Além disto, a imagem visualizada diretamente é limitada pelo limiar de resposta e pela saturação do olho humano, enquanto que em sistemas digitais esses problemas podem ser contornados, aumentando-se os níveis de cinza, e redistribuindo-os. De forma linear, de modo que os níveis de cinza alcancem todos os níveis de exposição da imagem [1,4, 11].

Muitas vezes a informação desejada não está disponível se a imagem for diretamente visualizada, justificando assim, o uso das ferramentas de processamento de imagens, que permitem adaptar a imagem ao olho humano, em termos do que se pretende observar [1, 11].

Já que o armazenamento e a visualização dispensam esses recursos para a melhor percepção do contraste, o grande limitador da resolução em contraste de uma radioscopia passa a ser a tela fluorescente. De fato, esta é determinante para saber, qual a mínima diferença de espessura do objeto que

pode ser detectada. A energia do feixe primário, e o espalhamento são outros fatores relevantes que determinam a espessura mínima [1].

A energia dos fótons incidentes tem influência na percentagem desses fótons que irão interagir com a tela fluorescente (seção de choque). Assim, essa energia exerce uma influência na eficiência da tela, ou seja, dependendo desta percentagem, o contraste pode ser maior (com grande número de níveis de cor intermediários) ou menor (com níveis de cor próximos).

Basicamente o que o espalhamento faz é adicionar radiação de intensidade randômica ao feixe primário incidente. As informações sobre o objeto ficam contidas na intensidade do feixe primário após este transpassar o objeto. Se esse feixe for adicionado desse sinal randômico, detalhes mais sutis (pequenos ou com contraste parecidos) desaparecem na imagem resultante [1].

O contraste, que até então era dado por:

$$C = \frac{dB}{B} = \frac{dI}{I} \quad (8)$$

B é a intensidade de cor do monitor

dB é a variação da intensidade de cor em diferentes áreas do monitor

I é a intensidade do feixe de raios X que chega ao intensificador de imagens.

dI é a variação da intensidade do feixe que chega a diferentes áreas do intensificador

Passa a ser:

$$C = \frac{dI}{I + I_s} \quad (9)$$

Onde I_s é a radiação espalhada incidente na tela

Ou ainda

$$C = \frac{\frac{dI}{I}}{1+k} \quad (10)$$

Onde k é o coeficiente de radiação que é espalhada e incide sobre a tela [1].

Assim, o contraste é menor, sendo prejudicado pelo espalhamento. Algumas medidas podem ser tomadas para que o ensaio tenha o espalhamento minimizado [1]:

- colimação do feixe primário;
- ajuste do posicionamento dos componentes, para que seja reduzido o espalhamento devido às paredes, ao teto e ao chão;
- inserção de filtro de radiação entre o objeto e a tela. Este filtro tem a propriedade de diminuir a radiação de baixa energia, como a proveniente de espalhamento;
- uso de grades anti-espalhamento, tanto fixas quanto as que se movem durante a aquisição das imagens;
- uso de grandes distâncias entre o objeto e a tela, para que o percentual de radiação espalhada seja menor. Esse percentual é menor em grandes distâncias devido ao fato de que a radiação espalhada não ter direção preferencial, sendo espalhada praticamente de forma isotrópica.

2.4.2 - Definição de uma imagem:

A definição de uma imagem está ligada á capacidade de se definir objetos e seus contornos, ou seja, a capacidade de expressar exatamente onde estão os limites do objeto dentro da imagem. Na radioscopia, pode ser subdividida em definição geométrica, onde os fatores importantes são as dimensões (distâncias entre fonte, objeto e tela fluorescente, tamanho da tela, tamanho focal da fonte), e definição intrínseca, onde fatores importantes são próprios do sistema (a flutuação quântica da intensidade do feixe, a granulação da tela, a varredura de projeção de imagem do monitor). [1, 9]

Dentre as denominações importantes para a definição geométrica, a definição da penumbra tem destaque. Assim como nos filmes radiográficos, a penumbra geométrica está relacionada com a sombra formada na imagem de objetos, tendo em vista que, a fonte de radiação não é pontual. Assim, a borda a imagem do objeto, que deveria ser uma variação brusca de níveis de brilho, passa a ter uma pequena área de variação gradativa como mostrado na figura 9. Essa figura mostra que o tamanho focal f é fundamental para a penumbra e qual deve ser o maior tamanho de pixel que não interfira não prejudique a imagem se considerar a penumbra de todos os objetos.

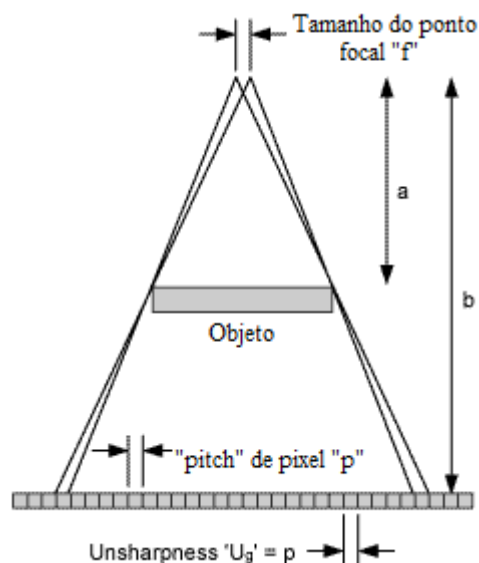


Figura 9 – Parâmetros de ampliação e penumbra. Adaptado de [9].

A área focal pode ser definida como a área a da fonte a partir da qual o feixe de fótons é emitido. É conveniente dizer que a espessura da penumbra, além de depender da área focal da fonte, também depende da magnificação aplicada à imagem, uma vez que ampliando a imagem, amplia-se também sua penumbra. De uma forma geral, a amplificação ideal seria aquela cuja penumbra fosse do tamanho de um pixel da imagem [9]

Outro fator importante é a falta de definição causada por movimento do objeto, também conhecido como *unsharpness motion*. Ele depende da intensidade e da homogeneidade do feixe de radiação ao longo do tempo, o tempo de decaimento da tela fluorescente, e do tempo de resposta dos componentes eletrônicos do sistema. Sistemas atuais conseguem, tipicamente, observar 30 quadros por segundo [1].

Dentre os fatores intrínsecos, as causas quânticas da falta de definição são as mais importantes quando citamos inspeções de curto tempo. Podemos defini-las como a flutuação estatística do brilho na tela fluorescente, devido à

atuação randômica do feixe radiação. Essa atuação randômica pode ser devido à emissão da radiação, tanto artificial como natural; de sua interação com a matéria; da absorção de fótons pela tela fluorescente; da conversão de fótons de raios X em fótons de luz; da direção do feixe de fótons de luz; e da absorção dos fótons de luz pela retina [1].

Basicamente, o que esse fator faz é inserir contraste onde não existe, o que pode dificultar a delimitação das bordas dos objetos. Propriedades intrínsecas do sistema como a granulação da tela fluorescente e a varredura de produção da imagem no monitor [1].

2.4.3 - Avaliação da qualidade de imagem

Para avaliação da qualidade da imagem de sistemas radiográficos em geral, é comum a utilização de indicadores de qualidade. Dentre estes, podemos citar um corpo de prova constituído de um objeto com várias espessuras diferentes, variadas igualmente, com o aspecto de uma escada, conhecido como “penetrâmetro”, usado para verificar o contraste pelas variações de espessura atravessada pela radiação. Outro indicador importante é o comumente conhecido como IQI (image quality indicator), que consiste em diversos pares de linha de materiais absorvedores de radiação. A espessura do par de linhas e a distancia entre cada unidade do par varia, com a intenção de mostrar qual é a espessura mínima que o sistema consegue distinguir como um par, e não como um único objeto. Esta seria a medida da resolução espacial do sistema [5]

2.5 - Considerações sobre o atual uso da radioscopia.

Há um vasto campo de aplicações para a radioscopia quando se trata de ensaios não destrutivos. As aplicações mais modernas são caracterizadas pela eficiência na avaliação de toda uma inspeção e na avaliação de geometrias complexas. O uso de câmeras CCD dentro dos intensificadores de imagem o tornaram um equipamento de extrema relevância na adaptação do sistema de radioscopia às interações digitais. O processamento de imagens e a possibilidade de reconstrução em três dimensões mostram que foram ainda há campos a serem explorados, e que a radioscopia tem o potencial de ser implantado em novos sistemas. Além disso, o uso do intensificador de imagem parece buscar um barateamento e o dinamismo da inspeção, o que necessita de produção de técnicas e formas de avaliação da imagem.

Um exemplo de aplicação futura quem vem ganhando espaço, uma variação do método da radioscopia, que não foi citado, mas que mostra ser uma técnica com grandes aplicações futuras é a radioscopia por nêutrons, onde o feixe é atenuado segundo outras características, que não o número atômico do material examinado. [1, 15]. Esta técnica pode ser aplicada para a caracterização de compósitos com propriedades cujo feixe de fótons não identifica contraste [15]. Essa é mais uma aplicação que demonstra a capacidade da técnica.

Uma aplicação recomendada é em casos onde o ensaio tem que detectar defeitos internos, em uma linha de produção, ou seja, tenha que fazer muitas inspeções em um curto período de tempo. Para verificar a existência destes defeitos é possível também a locomoção dos detectores, verificando a

imagem em vários ângulos. Buschke e colaboradores [5] apontam a radioscopia como uma das principais técnicas na avaliação da indústria automotiva, e cita que o tratamento pode, inclusive apontar alguns defeitos automaticamente. Essa avaliação também é mais eficiente em termos de proteção radiológica, onde toda a irradiação pode ser feita dentro de um gabinete

Em geral, várias partes de um veículo podem ser inspecionadas durante a produção destes, desde a fuselagem, até as rodas de liga leve. Em componentes metálicos um dos defeitos comumente encontrados são poros, que podem ter ocorrido durante a confecção do material, ou qualquer outro tipo de descontinuidade que resultem em um produto mais frágil do que o desejado [10].

Outro exemplo do emprego de radioscopia para esta finalidade é o trabalho de Pardikar [8]. Ele avalia as soldas e conexões de tubos para confecção de boilers através da radioscopia. Do mesmo modo, o uso da radioscopia em tempo real tem resolução e contraste suficiente para encontrar os defeitos procurados. Os objetos examinados são tubos, mas especificamente as conexões soldadas a estes. E a geometria permite uma rotação radial ao longo do eixo do tubo. Apesar desta facilidade, o intensificador de imagens e o tudo de raios X não se movem, o que apresenta rotação é o tudo examinado [8].

Devido à mobilidade da fonte e do detector, a radioscopia tem a propriedade de não ter uma geometria fixa de obtenção da imagem. Dependendo da forma e da posição do objeto a ser avaliado, a interpretação da imagem resultante de uma única radiografia pode ser duvidosa, difícil, ou até

mesmo impossível. [12] Uma imagem tomográfica também seria possível neste caso, mas a obtenção desta é consideravelmente demorada, e a exposição total utilizada é muito alta, sendo esta técnica menos adequada em termos de proteção radiológica. Venkatraman e colaboradores [12] utilizaram a técnica para a inspeção dos flancos das lâminas de uma hélice de helicóptero, que tem aspecto parecido a o de favo de mel conhecida como *honeycomb*. (figura 10).

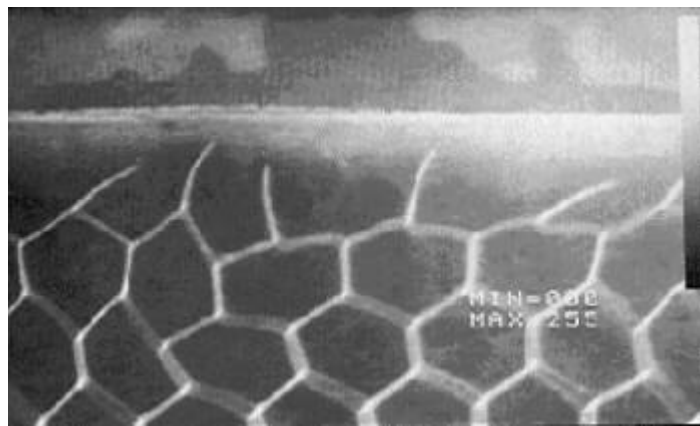


Figura 10: Imagem de radioscopia do interior da hélice. Pode-se verificar certa deformação no aspecto de honeycomb do interior da pá da hélice de um helicóptero. Adaptado de [12]

Sauerwein & Simom [17] usaram a radioscopia para a inspeção de compósitos de fibra de vidro. A dificuldade da radiografia normal se dá em vários níveis nesse tipo de inspeção, seja pela dificuldade de localização do defeito em fibras com diferentes orientações, seja pela sobreposição de vários níveis de fibras.

Campagne & Robillot [13], usaram a radioscopia para a avaliação de defeitos em materiais compósitos usados na fuselagem de aeronaves. O ensaio não é possível com outras técnicas, como radiografia convencional ou

ultra-som pela geometria complexa que a estrutura do material composto apresenta.

Neste caso, além da avaliação produtiva, com curto tempo, a montagem possibilita imagens com variação de ângulos controlada. Isto torna viável a reconstrução de uma imagem 3D, a partir das imagens obtidas por radioscopia. No trabalho de Campagne e Robillot [13], a construção foi feita através de 720 imagens, variadas igualmente de um ângulo de 0,5 graus. Com este grande número de projeções, a imagem obtida é de excelente qualidade (figura 11).

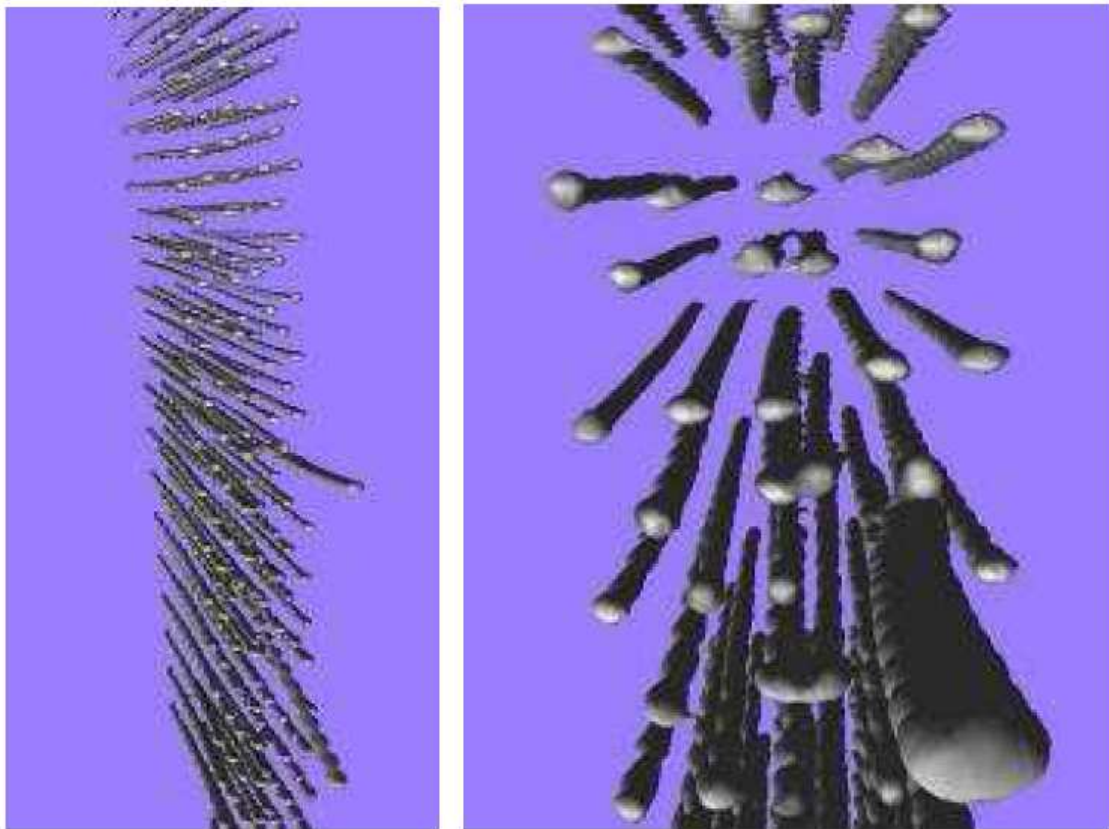


Figura 11: Montagem em três dimensões da peça avaliada. A montagem permite a visualização dos pinos de tungstênio. Adaptado de [13].

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Este capítulo descreve a construção, os procedimentos de teste do aparelho de radioscopia. Apresenta-se também, parte das dificuldades encontradas para esta construção e descreve os procedimentos para contornar estas dificuldades.

3.1 – Materiais

Todo o espaço físico e os materiais utilizados na parte prática do trabalho foram cedidos pelo Laboratório de Instrumentação Nuclear, do Programa de Engenharia Nuclear.

Para a construção do aparelho, estiveram disponíveis os seguintes equipamentos:

- Um aparelho de raios X da marca Schlumberger e modelo Baltograph RC6 CMD 160 com as seguintes especificações técnicas.

Corrente: 0 – 30 mA

Voltagem: 10 – 160 kV

Ponto focal: fino 0,3 x 0,2 mm

Ponto focal grosso: 3 x 3 mm

- Um intensificador de imagens da marca YXLON e modelo TXRS303 com as seguintes especificações técnicas (figura 12)

Imagens de até 12 polegadas

Câmera CCD PULNIX com 525 linhas 60 Hz.



Figura 12: Intensificador de imagens usado no trabalho. Na saída de luz, está anexada uma câmara escura (parte preta) onde está acoplada a câmera.

- Um monitor CRT da marca YXLON e modelo TXRS, com as seguintes especificações técnicas

Display de 15 polegadas

- Uma placa de aquisição de vídeo da marca PINACLE com seguintes especificações técnicas:

- 16 bits em imagens
- resolução de 800x600

- Um microcomputador

- Um goniômetro de alumínio de 15x15 cm, com precisão de 0,1 grau.

(Figura 13)

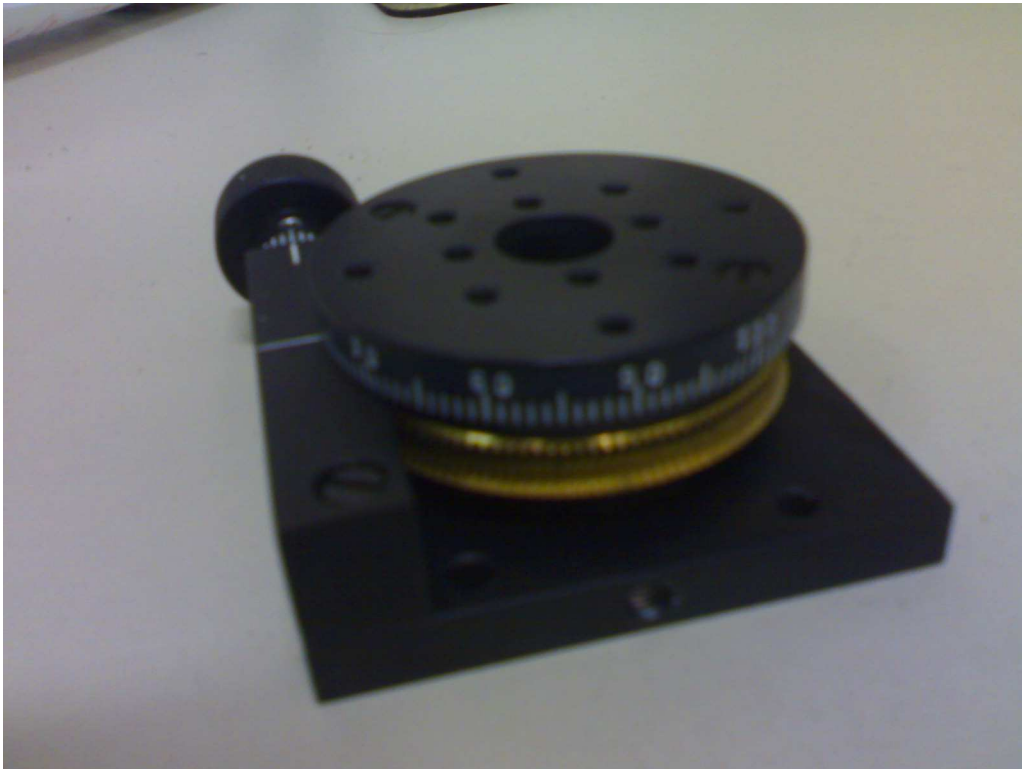


Figura 13: Goniômetro usado no isocentro do sistema com precisão de 0,1 grau.

3.2 - Planejamento do equipamento

Basicamente, a imagem é feita através de transmissão do feixe. O emissor e o detector de radiação ficam de lados opostos ao objeto de ensaio.

A estrutura do aparelho de radioscopia é constituída de um tubo de raios X e um intensificador de imagens - acoplado a uma câmera CCD -, ambos fixados por um suporte metálico.

Este suporte metálico foi confeccionado com o aspecto de um C, onde em uma extremidade fica a ampola de raios X e na outra o intensificador de imagens. Como a extremidade da ampola é móvel, o espaço entre os dois equipamentos é ajustável à peça que ali fica para o ensaio, de forma a abranger tanto pequenas quanto de tamanho médio. Esta estrutura gira por um eixo de rotação central e pode ser fixado em qualquer ângulo (figura 14). O ponto de cruzamento do eixo de rotação do sistema, com a linha liga o ponto focal da ampola com o centro da área do detector, dá-se o nome de isocentro.

No isocentro deste sistema, está um goniômetro (figura 13) que serve como suporte para a peça em estudo, de forma que o sistema tem liberdade para girar, tanto na perspectiva do sistema quando na perspectiva do objeto.

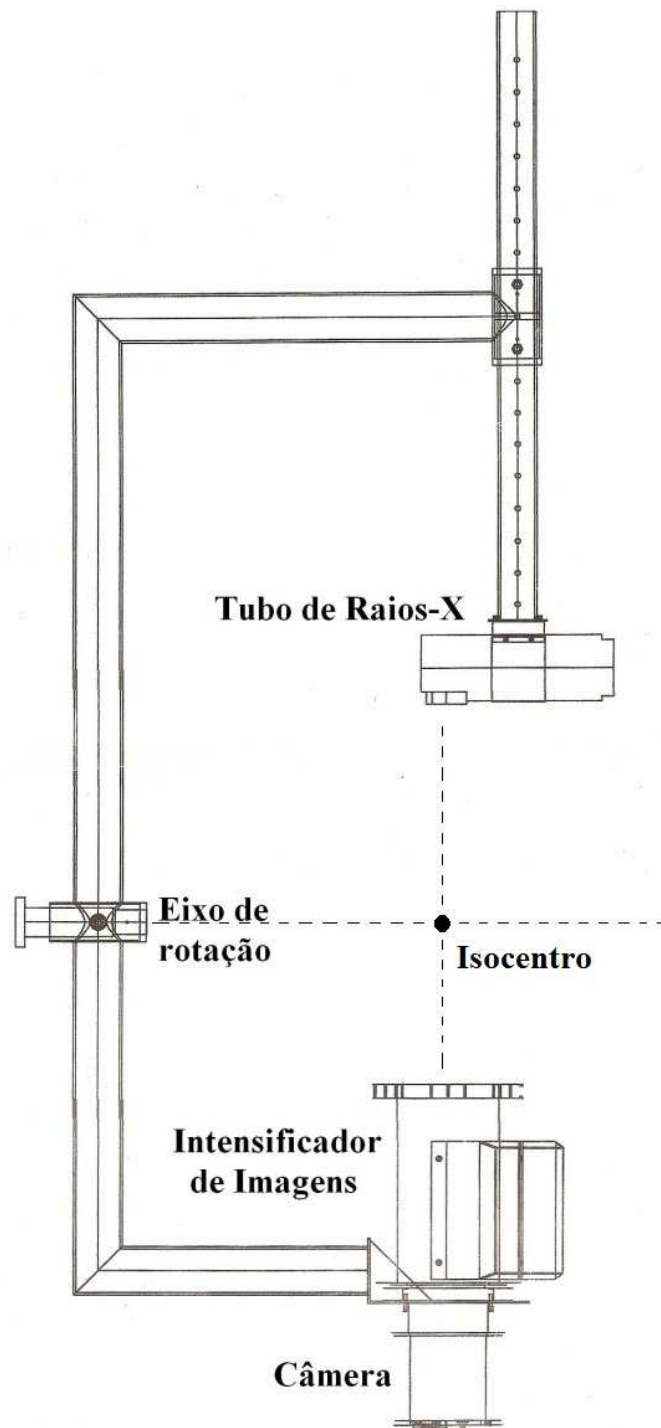


Figura 14: Representação da haste de apoio do aparelho de radioscopia.

O tubo de raios X é alimentado pelo seu console de comando (figura 15), onde se pode acionar e desligar o feixe de raios X, ajustar parâmetros

como o kV (quilovolt, medida da tensão do tubo) e o mA (miliampere, medida da corrente do tubo) à peça de ensaio.



Figura 15: Console de comando do tubo de raios X

O intensificador de imagens também é alimentado pelo seu console de comando. Neste console, é possível ajustar brilho, contraste, *zoom*, e magnificação da imagem de vídeo produzida. Consideremos *zoom* como a amplificação eletrônica do sinal já capturado, para melhor detalhamento, enquanto que magnificação é a diminuição do campo de visão do sistema, acarretando em uma amplificação de uma área da imagem do corpo de prova. A magnificação pode ser geométrica se considerarmos as posições entre fonte e objeto, objeto e detector; e também pode ser física, considerando uma menor convergência do feixe de elétrons acelerados no intensificador de imagens. Vale ressaltar que estes ajustes da imagem são feitos diretamente no

intensificador e na sua câmara anexada, e que desta forma, o próprio sinal de vídeo que sai da câmara é alterado.

O sinal de vídeo produzido no intensificador de imagens é enviado ao monitor de visualização, e este o reenvia para a placa de aquisição de imagem. No monitor, é possível ver a imagem produzida, e também ajustar brilho, contraste e *zoom*.

A placa de aquisição foi adaptada para receber o sinal da saída extra do monitor. Este sinal é bifurcado entre a exibição no tubo de raios catódicos e a aquisição pela placa. A placa faz a conversão do sinal de vídeo analógico para digital. Deste vídeo digital é possível extrair quadros e transformá-los em imagens estáticas. Estas imagens são armazenadas em um microcomputador acoplado à placa, para poder ser usado posteriormente (figura 16).

O microcomputador permite escolher qual imagem vai ser isolada, e das isoladas, qual será guardada.

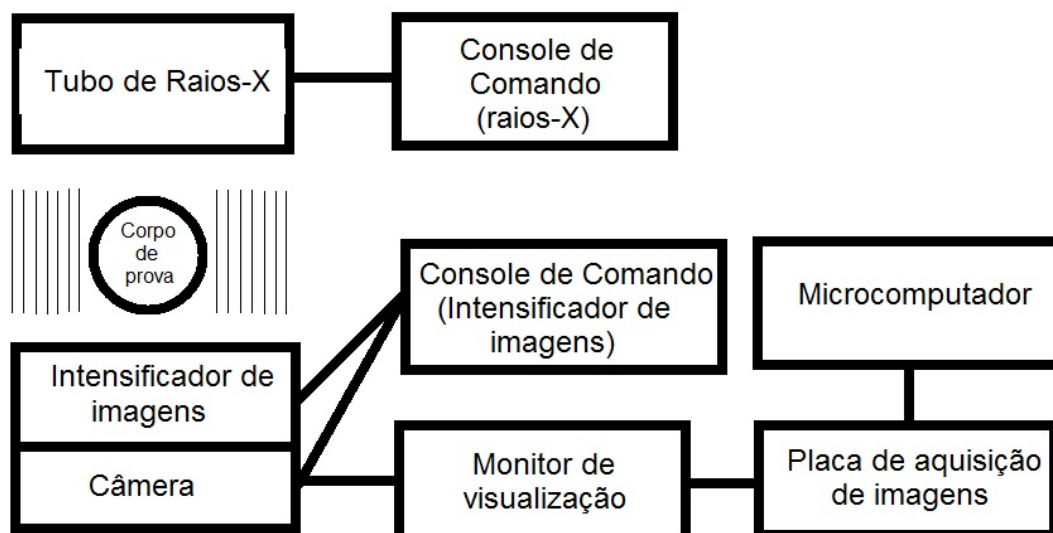


Figura 16: Esquema representativo dos equipamentos do aparelho de radioscopia

3.3 - Testes iniciais dos equipamentos

Estes testes foram realizados antes da confecção da haste de apoio e da placa de digitalização, alinhando os instrumentos manualmente e apoiando-os em uma mesa. Desta forma, foi possível realizar testes de funcionamento dos componentes.

3.3.1 - Tubo de raios X

Primeiramente foi testado o tubo de raios X, acomodado com blindagem apropriada no local onde seriam desenvolvidos os testes. Para se utilizar objetos de teste de alumínio a tensão do tubo não passaria de 60 kV. Nestas condições, um objeto espalhador de 5 mm de alumínio, e com uma corrente de 20 mA (maior do que os níveis que se pretendia usar), a taxa de exposição devido ao feixe espalhado, resultava em uma taxa de dose de até 1 $\mu\text{Sv/h}$ (milisivert por hora) a distância de 2 metros do tubo, onde se localiza o console de comando do raio X. Exagerando uma carga de 8 horas diárias, isto significaria menos de 0,5 milisivert em um ano, considerado aceitável pela Norma CNEN-NN 3.01, cujo limite anual é de 1 milisivert/ano para indivíduos do público e 20 para ocupacionalmente exposto [18].

Para as voltagens de 50kV, em dez medidas, a tensão do tubo apresentou um desvio máximo de 3,3% em relação à média das medidas e 4,5% em relação ao valor nominal. Para a voltagem de 60 kV, em dez medidas, a tensão do tubo apresentou um desvio máximo de 2,1% em relação à media

das medidas e 3,6% em relação ao valor nominal. Todos estes valores estão abaixo de 5%, o que garante um feixe aproximadamente homogêneo.

3.3.2 – Intensificador de imagens

Com o intensificador ligado ao monitor de visualização e na direção do feixe primário do tubo de raios X, o intensificador foi ligado. Tendo a primeira imagem extraída, notou-se que a lente da câmera acoplada estava fora de foco. Sendo assim e foi possível apenas detectar a presença ou não de radiação.

Primeiro com um objeto radiopaco pequeno e depois com um padrão IQI de fio duplo as lentes foram ajustadas iterativamente, através de sucessivas correções e exposições. Foi ajustado para uma máxima resolução possível obtida, a 50kV e 1 mA, com distância foco-detector de 70 cm e distância objeto detector, de zero (IQI junto ao detector),

Como nesta época a placa de aquisição ainda não tinha sido adquirida, foram anotados os dados nominais. No caso do IQI, foi possível distinguir visualmente até o quarto par de linhas, o que resulta em 1,25 pares de linhas por milímetro. Isto significa que o menor par de linha observado tinha 0,8 mm, sendo sua metade, a menor espessura detectável pelo sistema.

3.4 - Construção do equipamento

3.4.1 - Projeto da base e haste metálica e confecção.

O projeto da haste metálica foi feito em conjunto com a equipe de engenharia do LIN, onde ficou definida a estrutura a ser montada (figura 14). Foi projetado para ser montado em um pedestal já existente (figura 17), onde existia a possibilidade de elevação e rebaixamento do eixo de rotação da haste.

A confecção foi realizada por uma empresa externa de usinagem (figura 17). Houve preocupação principalmente com o exato alinhamento entre o ponto focal do tudo e o centro do intensificador de imagens.



Figura 17: A haste metálica em formato de C, usada para a radioscopia (sob a mesa), sendo montada no pedestal de apoio, que permite elevação e rebaixamento da haste.

O alinhamento do feixe de raios X com o intensificador de imagem foi verificado, através de um objeto radiopaco cilíndrico: Colocando o objeto no centro da área sensível do intensificador de imagens, a imagem radiográfica do cilindro deveria apresentar-se como um círculo. Caso aparentasse elíptica ou oval, os equipamentos não estariam alinhados.

3.4.2 – Escolha e compra do sistema de digitalização.

Com os dados fornecidos pelo fabricante do intensificador de imagens, foi possível confeccionar um cabo de adaptação da saída de vídeo do intensificador e do monitor de visualização (plug do tipo BNC) para a entrada de vídeo dos dispositivos mais encontrados no mercado (plug do tipo RCA). A partir desta adaptação, foi procurada uma placa de aquisição de vídeo que satisfazia as seguintes características

- resolução espacial maior que 512 x 512
- profundidade de 16 bits
- externa ao computador (conexão USB)

A placa adquirida com estes requisitos foi da marca PINACLE.

Para que não fosse descartado o monitor de visualização, onde se tem a primeira visão da imagem, a placa de aquisição foi conectada na saída de vídeo do monitor, e integrada a um microcomputador.

3.5 - Testes do sistema.

Com a estrutura final montada e com os equipamentos integrados, foram realizados testes iniciais, que mediam a qualidade da imagem com relação ao sistema de aquisição. E sugeriam os procedimentos que seriam adotados para contornar problemas na imagem.

3.5.1 - Aquisição inicial

Com o equipamento montado, pronto para a digitalização, e a janela de saída do feixe voltada para o intensificador de imagens, foram feitas várias exposições do intensificador, de maneira a tentar conseguir imagens com o sistema sem a presença de corpos de prova, imagens em branco. A tensão e a corrente foram ajustados interativamente, observando sempre a imagem formada no monitor de visualização.

Sempre que ajustados os parâmetros da produção de raios X, era esperado o tempo necessário para que a imagem se estabilizasse, tornando-se constante. As imagens, quando selecionadas, eram adquiridas pela placa de aquisição e armazenadas em disco.

Dessa forma, foram selecionados as tensões 30kV, 50kV e 60kV, com a corrente de 1 mA. As imagens foram digitalizadas com a resolução de 768 x 576 pixels a 8 bits cada. O quadro de vídeo para cada exposição a ser isolado e armazenado foi escolhido aleatoriamente. Pelo padrão da câmera de vídeo anexada ao intensificador, cada imagem é o resultado do sinal luminoso

acumulado a cada 1/20 segundos, ou seja, a cada 50 milissegundos. As imagens iniciais contêm dois artefatos: Um ruído periódico (*aliasing*); e uma variação na intensidade da cor de fundo, conhecida como *vignetting*.

As correções para estes artefatos serão demonstradas neste capítulo, e discutidas no capítulo 4.

3.5.2 – Correção do *aliasing* periódico.

Alguns métodos foram usados na aquisição de imagens para amenizar a presença deste artefato, como a aquisição de vários quadros por exposição e processamento pós aquisição das imagens, mas no geral, para este trabalho, foram utilizadas imagens onde o artefato não aparece, ou aparece fora do corpo de prova ou região de interesse.

3.5.3 - Quantificação do *Vignetting*

Para melhor quantificar e parametrizar este artefato, foram adquiridas imagens e feitos os seguintes procedimentos:

A distância foco-tela de entrada do intensificador foi fixada em 500 mm. Ajustando a imagem para 8 bits (tons de cinza de 0 a 255), e colocando sempre a 1 mA, foram adquiridas três imagens; para 30kV, 50 kV e 60kV, respectivamente.

Após a digitalização, as imagens foram analisadas usando o programa de computador de distribuição gratuita Image-J.

A imagem usada passou por uma supressão de ruído, pois o objetivo deste teste não é quantificar ruído, e sim a variação regional do valor de pixel médio. A supressão de ruído foi feita através de um filtro de média móvel cuja função é suavizar as variações bruscas de valor de pixel na imagem. Ela funciona varrendo a imagem, e aferindo a cada pixel, o valor da média dos pixels a sua volta.

Após esta supressão de ruído, a homogeneidade foi testada, primeiramente, comparando o valor do desvio padrões da imagem como um todo, com o desvio padrão da área central da imagem, considerando-se área central uma região circular com raio igual a um terço do raio da imagem. Este cálculo foi feito nas três imagens.

Para a correção desse artefato, a imagem foi transformada então, na matriz numérica a qual cada elemento representa um pixel. Desta forma foi possível obter perfis da imagem, gráficos onde o eixo x representa a posição na imagem, e o eixo y representa o valor do pixel naquela posição.

Foi traçado o perfil da linha horizontal central da imagem. Assim, foi possível determinar a curva de correção de *vignetting* para cada kV. Esta curva foi ajustada inicialmente pela soma de gaussianas onde era considerada a distância de cada pixel para um pixel central. Para se efetuar a correção, basta subtrair da imagem adquirida, os valores da curva de correção.

3.5.4 - Tratamento do ruído.

A não homogeneidade de uma imagem de radioscopia tem duas causas, uma de alta e outra de baixa frequência espacial. O *vignetting* pode ser considerado uma variação de baixa frequência; a causa em alta frequência é denominada ruído.

Se tratando de imagem, o ruído pode ser quantificado através do desvio padrão de uma região de interesse, mas no caso de intensificador de imagens é necessário certificar que esta medida não está sendo influenciada pelo *vignetting*. Outra preocupação deste trabalho é saber se a correção de *vignetting* influencia o ruído. O ruído foi avaliado através do desvio padrão dos valores de pixel, com e sem a correção de *vignetting*.

Em uma dada imagem, (adquirida a 30 kV e 1 mA), foram traçadas regiões de interesse (ROI, do inglês region of interest). Estas ROIs são círculos, cuja área interna está sob estudo. Inicialmente, foram traçadas ROIs de diferentes tamanhos, concêntricas com a imagem. Foi realizada, então a aquisição do desvio padrão do interior dessas ROIs de diversos tamanhos. Então, foi traçado um gráfico do desvio padrão em função do tamanho da ROI, no centro, e também na borda da imagem. Este procedimento visa estudar a relação direta entre o tamanho da região de interesse, na imagem, e a influência do *vignetting* no desvio padrão

Para retirar da imagem os dados de alta frequência espacial, usou-se filtros passa-baixas. Um exemplo de filtro passa-baixas é a média móvel, usada anteriormente, para a retirada do ruído. De fato, o ruído é um sinal de alta

freqüência espacial da imagem. Para tratar esta imagem foi utilizado o filtro média com matriz de 3 x 3.

3.5.5 - Contraste da imagem.

Para avaliar o contraste do sistema, foi usado um dispositivo de teste, o “penetrâmetro”. Contendo várias espessuras diferentes, normalmente em formato de escada, o corpo de prova testa o quanto um sistema de radiografia consegue definir variações de caminho óptico (figura 18). Para o teste com este intensificador de imagens, foi usada uma escada com 11 degraus, cada um com aproximadamente 3,2 mm, num total de aproximadamente 352 mm. A imagem teve o histograma normalizado, para maximizar a observação de contraste.



Figura 18: Objeto de teste para o contraste do sistema.

Foram adquiridas imagens de 40, 45 e 50 kV a 1 mA, 50 kV a 2 mA e 50 kV a 4 mA. A distância foco-objeto de 500 mm e a menor distância objeto detector possível, ou seja com o objeto junto ao detector.

O perfil médio da imagem do objeto de teste foi obtido de cada imagem.

3.5.6 - Resolução espacial

A resolução espacial foi aferida com um indicador de qualidade da imagem (IQI) de fio duplo (figura 19). A técnica foi ajustada iterativamente para se obter o melhor resultado possível. Desta maneira, usou-se 4mA e 50kV.

A distância foco-objeto foi de 500 mm e a distância objeto-detector foi a mínima possível, ou seja, com o objeto junto ao detector.

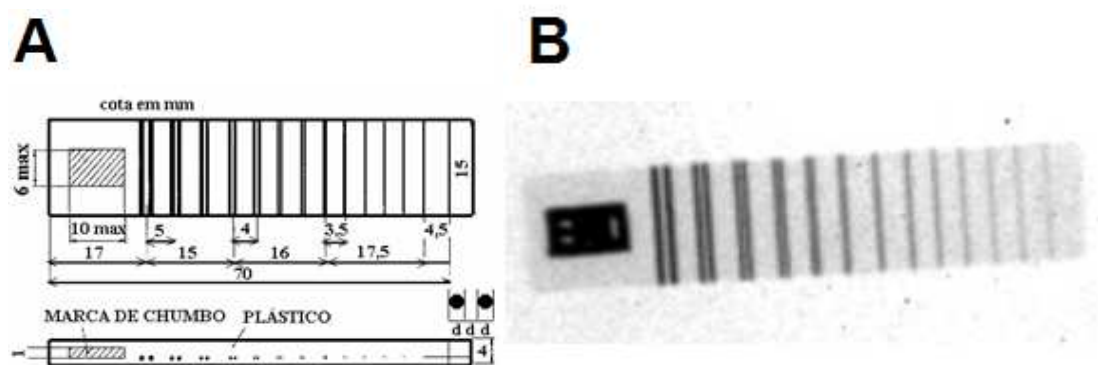


Figura 19: Esquema demonstrativo de um IQI (A) e sua a imagem radiográfica (B)

Este objeto é constituído de objetos radiopacos de diferentes espessuras e espaçamentos, usado qual é a menor dimensão do objeto (ou espaçamento

entre os objetos) que pode ser identificada pelo sistema. No caso do IQI utilizado, estes objetos são pares de linha cuja distância entre cada par de linha é igual ao comprimento da linha. Assim, consegue-se aferir a resolução espacial. Esta propriedade é quantificada em pares de linha por milímetro, ou seja, se, por exemplo, dado sistema tem uma resolução espacial de 2 pares de linha por milímetro, ele consegue identificar um par de linha com 0,5 milímetro, ou seja, o objeto com 0,25 milímetros.

3.6 - Testes em peças reais

Os testes iniciais foram importantes para que pudessem ser aplicadas as correções adequadas para imagens reais.

Após os testes de qualidade do equipamento, foi realizado testes de ensaios não destrutivos em peças reais, com o objetivo de verificar a eficiência do sistema em situações reais, e ao mesmo tempo verificar sua praticidade.

Foram utilizados dois corpos de prova:

Peça 1 - a primeira peça de teste é uma amostra de um tubo de alumínio cuja solda na linha média junta as duas partes iguais, com seção reta de 75 mm aproximadamente (figura 20). As imagens foram feitas com uma distância foco objeto de 70 cm e uma distância objeto detector (tela do intensificador de imagens) de 4 cm. Foi usado o modo magnificado para dar enfoque à região da solda. Foram usados 50 kV e 2 mA. E posteriormente, 5

mA, para a melhora do ruído. A incidência usada é conhecida como “parede dupla vista simples”.

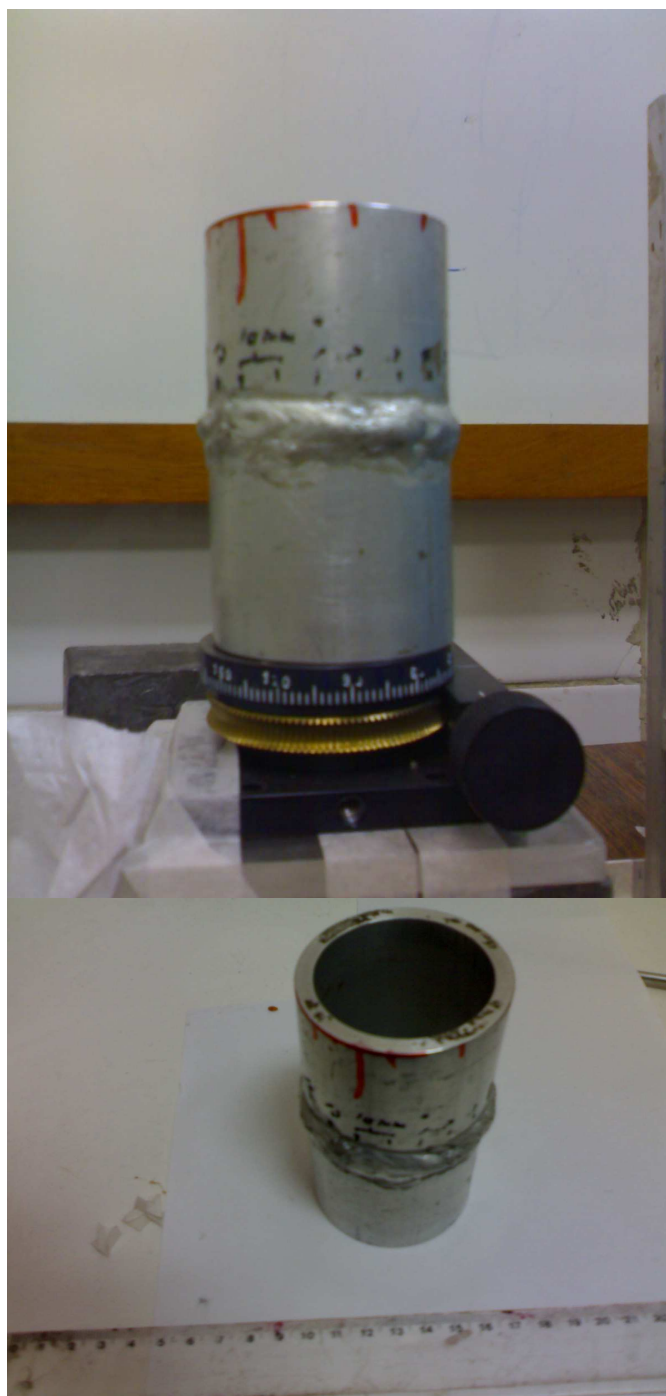


Figura 20 – Imagem da peça 1, utilizada para o ensaio.

As imagens obtidas desta peça foram usadas de maneira análoga a uma radiografia digital, passando por um procedimento segmentação e tratamento de imagens.

Peça 2 – Este corpo de prova tem as mesmas características da peça 1, mudando apenas seu diâmetro, que é de 120 mm (figura 21). As imagens obtida desta peça foram digitalizadas a partir de diversos ângulos de incidência do tipo “parede dupla, vista simples”, para melhor distinguir os possíveis defeitos.



Figura 21 – peça 2.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 - Imagens da aquisição inicial

Uma das imagens da aquisição adquirida é mostrada na figura 22:

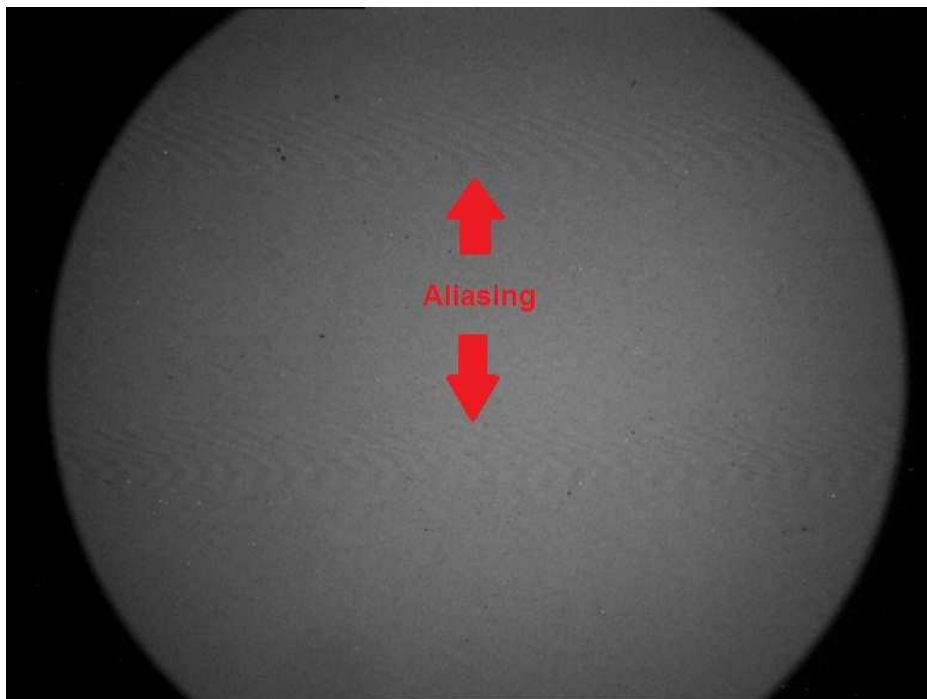


Figura 22: Imagem da aquisição inicial, a 30 kV e 1 mA. É possível ver o *aliasing* periódico na imagem e também perceber que a região central é mais clara.

Perceberam-se durante o armazenamento das imagens digitalizadas, dois artefatos característicos desse tipo de sistema: um ruído periódico e uma

variação radial do nível de cinza, o que torna a região central mais clara do que as bordas.

O mais relevante foi quanto à presença de um ruído verticalmente periódico em regiões da imagem cuja posição varia com o tempo, aparecendo como artefato de *aliasing*. Este artefato é visto tanto na imagem digitalizada como no monitor de visualização. A figura 22 exemplifica uma imagem extraída do sistema, com este artefato: regiões onde a imagem aparece com o aspecto listrado. A posição deste artefato na imagem varia quadro a quadro.

Quanto à variação do nível de cinza, o processo de intensificação da imagem faz as bordas serem mais escuras do que o centro da imagem (efeito *Vignetting*). Assim, existe um gradiente radial do valor de pixel na imagem circular. A figura 23 exemplifica este tipo de artefato, que permanece após a correção de *aliasing*. A figura 24 foi obtida transformando a imagem da figura 15 para que a profundidade fosse de 3 bits. Desta forma, o número de tons de cinza diminui, enfatizando o contraste da imagem. Os círculos concêntricos graduando do preto para o branco indicam a presença deste artefato em toda a extensão da imagem, e que este efeito não está totalmente centralizado.

:

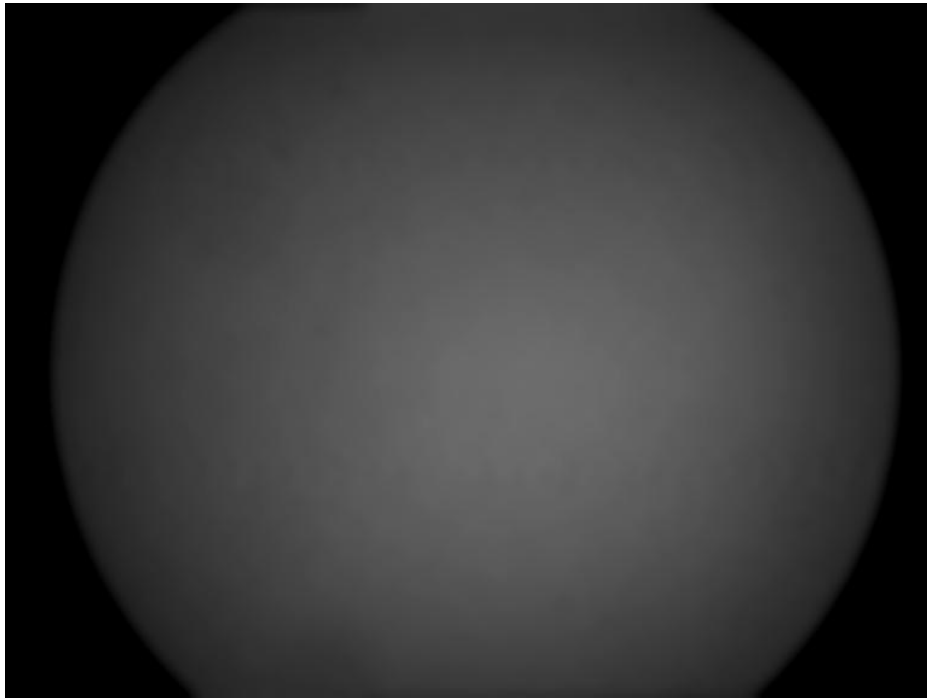


Figura 23. Imagem após correção para *aliasing* e ruído: filtro média móvel 10x10. Parâmetros: 30 kV e 1 mA.

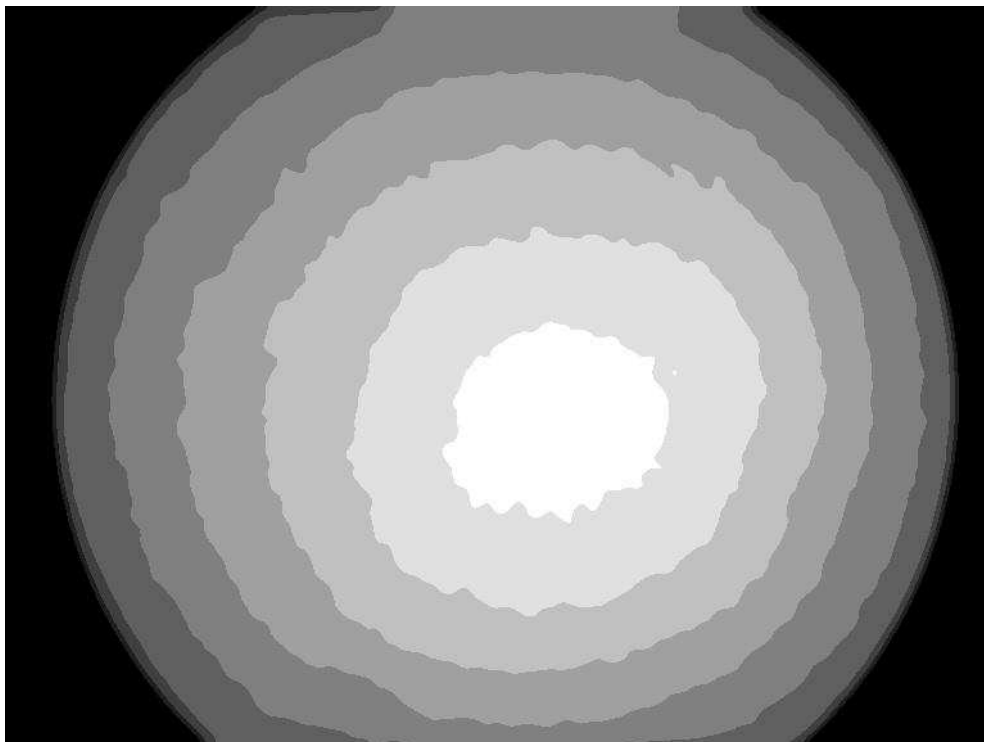


Figura 24: Imagem da figura 23 representada em apenas 3 bits.

4.2 – Quantificação e tratamento do *vignetting*

As imagens adquiridas inicialmente para a quantificação do *vignetting* estão demonstradas na figura 25:

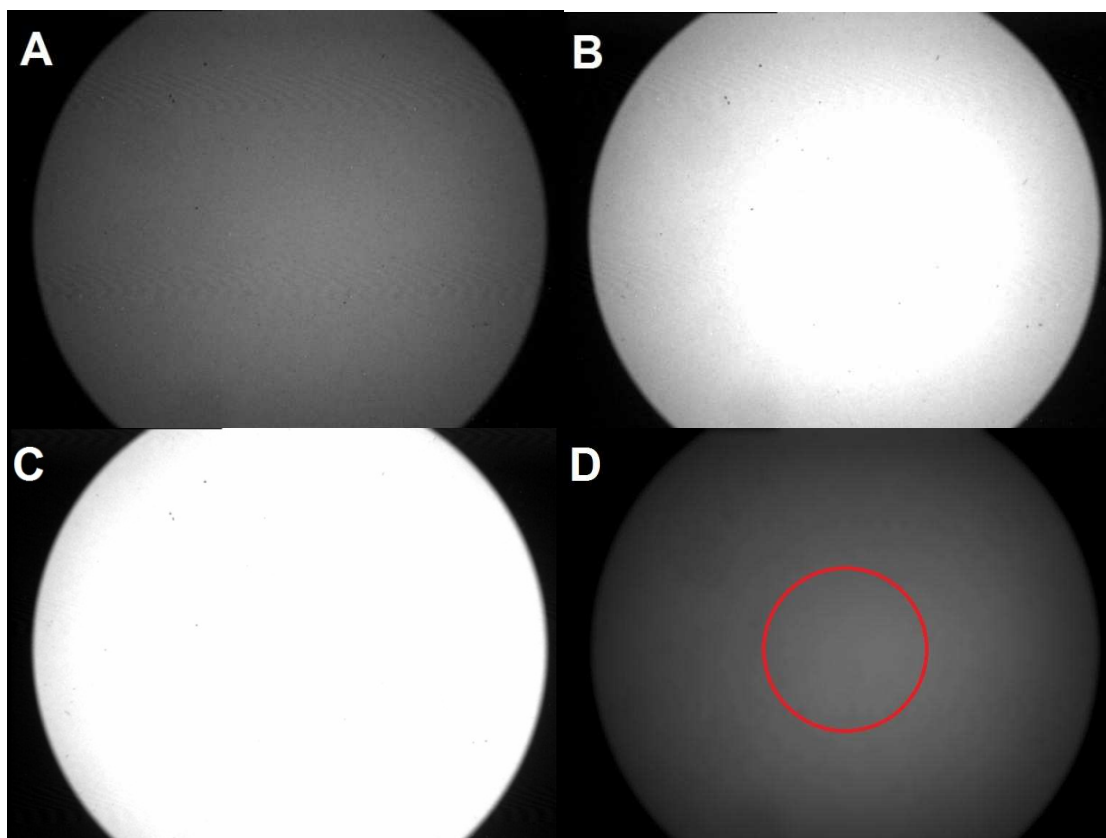


Figura 25: Imagens obtidas com 1 mA e 30 kV (A), 50 kV(B) e 60 kv(C). Além da demonstração de onde é considerada a área central da imagem (D),

E os dados obtidos a partir destas imagens estão representados na tabela 3:

Tabela 3 – Média e desvio padrão das imagens.

	30 kV	50 kV	60 kV
Valor de Pixel Mínimo	0	0	0
Valor de Pixel Máximo	120	255	255
Média do valor de pixel da imagem total	80,869	223,403	250,144
Desvio padrão do valor de pixel da imagem total	18.556	32,290	7.839
Média na área Central (R = 1/3)	109.871	253,983	254
Desvio Padrão na área Central (R = 1/3)	6,45	0,756	0

A diferença de média da imagem total pro centro indica uma imagem mais clara no centro, e o desvio padrão baixo para 50 e 60 kV indicam saturação da região central quanto ao brilho da saída do intensificador (figura 25). Para um feixe de energia extremamente baixa, como é o caso de 30 kV, uma parte considerável dos fótons emitidos é atenuada pela janela de entrada do intensificador de imagens, que é um filtro com 0,5 mm de alumínio. Desta forma, quando se aumenta a energia para 60 kV, por exemplo, o feixe já não sofre tanta atenuação, e faz com que a tela fluorescente brilhe mais, chegando ao nível máximo de luz que pode ser absorvido por cada elemento do CCD. A tendência é que essa não uniformidade apareça também quando estivermos estudando objetos radiopacos, mesmo para tensões acima de 60 kV.

O perfil da linha horizontal central está representado na figura 26:

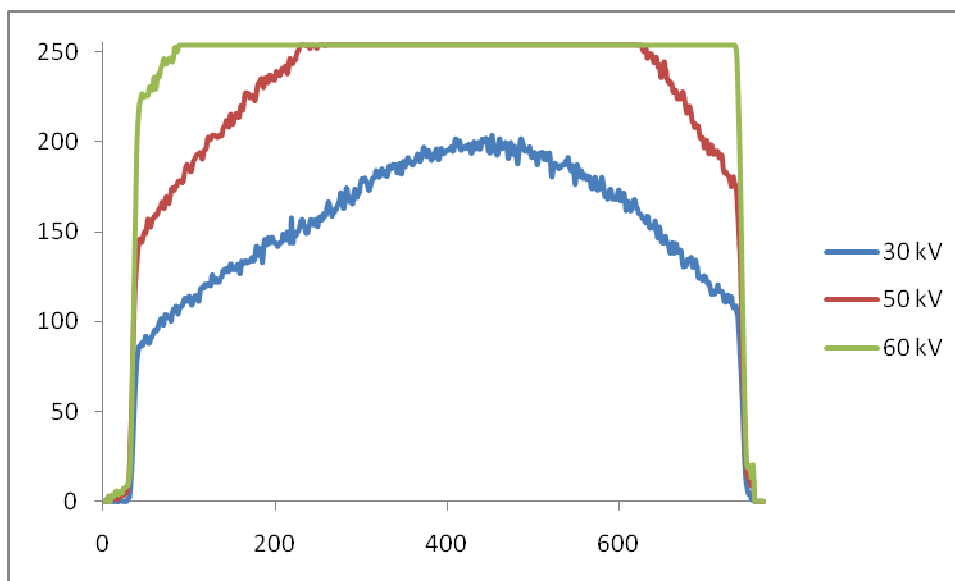


Figura 26: Perfil de número de pixel, da linha central da imagem. Para imagens formadas com 30, 50 e 60 kV a 1 mA.

A figura 27 mostra o perfil horizontal da imagem, extraída a 30 kV e 1 mA, a correção e os valores corrigidos, que são a subtração do valor original pela correção, adicionada ao valor original médio.

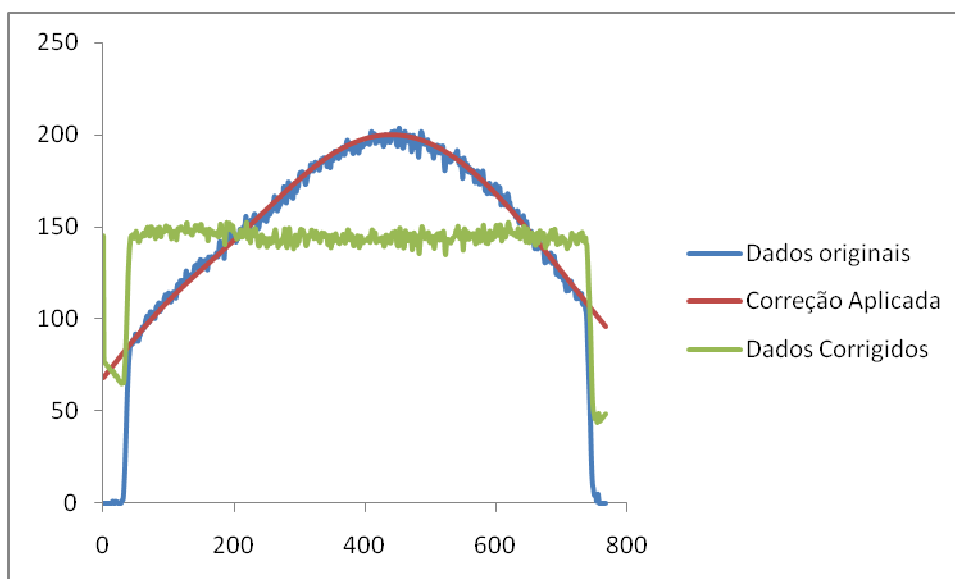


Figura 27: Correção do efeito de *vignetting* Esta correção é aplicada radialmente.

Constatou-se que, a correção aplicada (figura 27), nada mais é do que a imagem original sem os dados de alta frequência espacial. Portanto, esta curva pode ser obtida através da própria imagem, com baixíssimo custo computacional, uma mesma imagem para a correção de qualquer aquisição feita com este intensificador.

A imagem original, e a imagem, após a aplicação da correção podem ser observadas na figura 28. Após ser subtraída da correção, e somado a um valor médio, a imagem teve seu histograma redistribuído, aumentando o seu contraste.

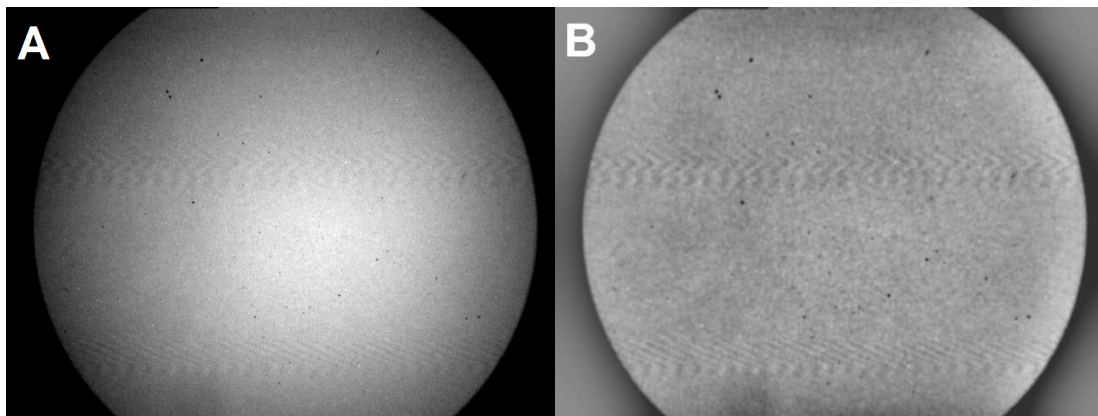


Figura 28: Imagem adquirida (A) e imagem após correção (B) de *vignetting*. Após a correção, os valores de desvio padrão central e da imagem como um todo foram 10,09 e 22,6 pixels respectivamente.

Observa-se na figura 28 também, que as bordas da imagem corrigidas ficaram mais claras. Esta é a consequência de se usar como correção, uma imagem que possui apenas objetos de baixa frequência. A borda da imagem útil é um sinal de alta frequência, e ao ser submetido a um filtro passa-baixas, perde definição.

4.3 - Quantificação e Tratamento do ruído:

Os valores iniciais encontrados para o desvio padrão das imagens com e sem correção de *vignetting* (a 30 kV e 1 mA) foram os seguintes (tabela 4):

Tabela 4: Avaliação do ruído através do desvio padrão total da imagem, com e sem correção de baixa frequência.

Sem correção	20,016
Com correção	8,334

A figura 29 apresenta um gráfico do desvio padrão em função da área da ROI avaliada. Esta ROI está concêntrica com a imagem, o valor do eixo x indica o tamanho da ROI em relação ao tamanho da imagem.

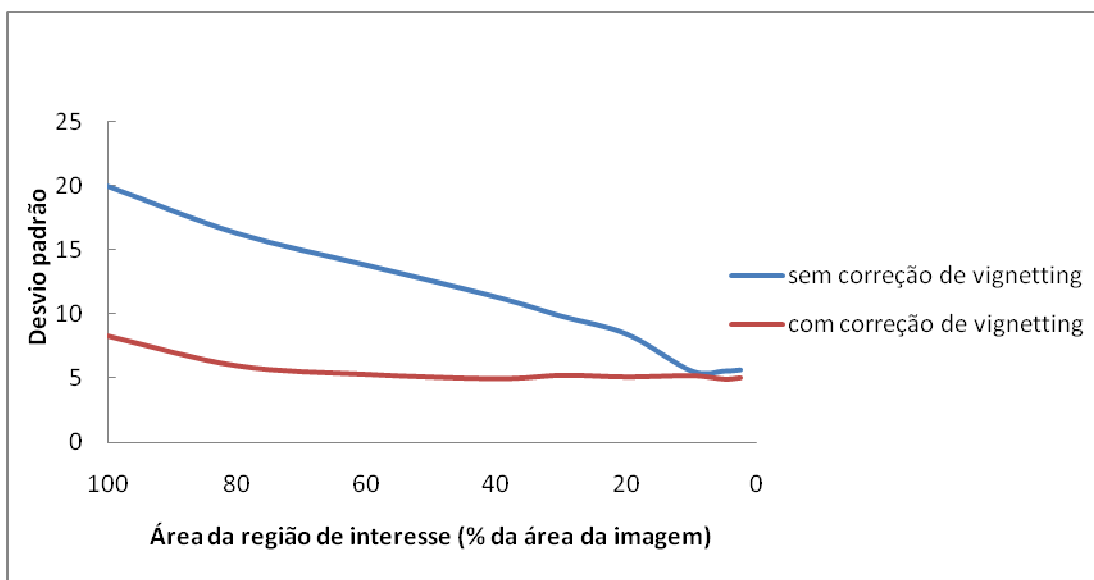


Figura 29: Desvio padrão do número de pixel em diferentes áreas da região de interesse, centrada em relação à imagem.

Com o auxílio do gráfico, podemos ver que nos dois casos, o desvio padrão no centro converge para aproximadamente 5,5 pixels. A imagem com correção é mais estável ao longo do gráfico.

Também foi considerado no caso em que as ROI's estejam junto à borda da imagem (figura 30): Neste caso, a região de interesse tem sua borda tangente à borda da imagem.

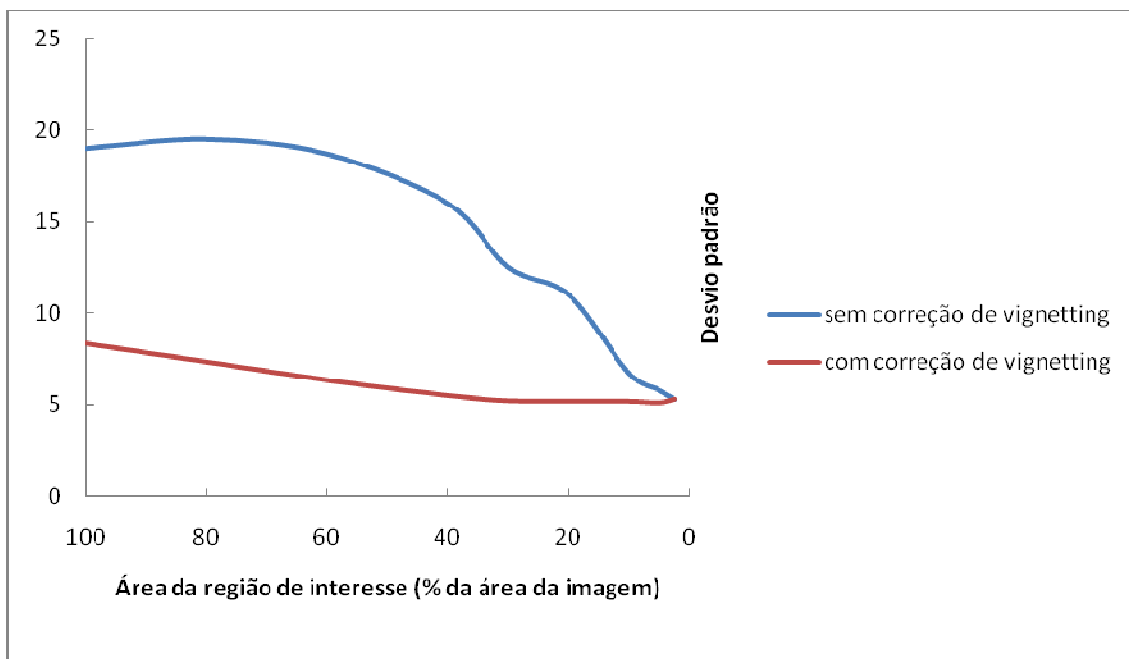


Figura 30: desvio padrão do número de pixel em diferentes áreas da região de interesse, tangente à borda da imagem.

Onde somente a imagem corrigida é estável, mas as imagens parecem convergir para um mesmo valor.

A figura 29 e 30 mostram que tanto a área lateral quando a central têm valores de desvio padrão parecidos, quando convergem para uma ROI mínima, ou seja, minimiza-se o efeito do *vignetting* no desvio padrão.

4.4 – Contraste da Imagem

A imagem obtida a partir do “penetrâmetro” está demonstrada na figura 31:



Figura 31: Imagem radiográfica de um “penetrâmetro” a 50 kV e 4 mA.

A partir das imagens obtidas, foi possível traçar o perfil da linha média dos objetos de teste para contraste. Assim, foram obtidos os gráficos mostrados na figura 32.

A relação sinal ruído no objeto de teste de contraste permite definir até o quinto degrau para 50 kV, e até o quarto degrau para 45kV e 40 kV, todos a 1 mA. Já quando estamos variando apenas o mA a 50 kV, os valores de 1, 2 diferenciam quanto ao número de degraus observados, apenas com 4 mA conseguimos ver um degrau a mais (figura 32)

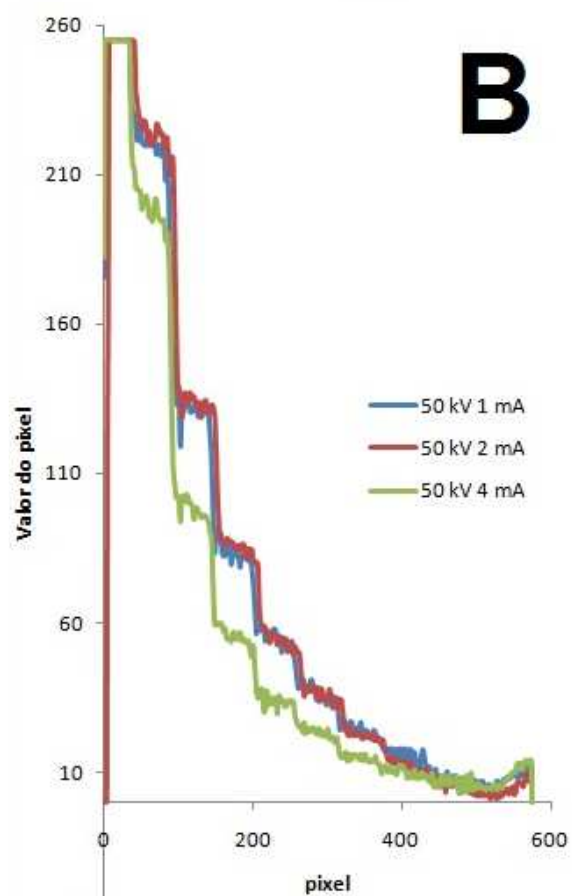
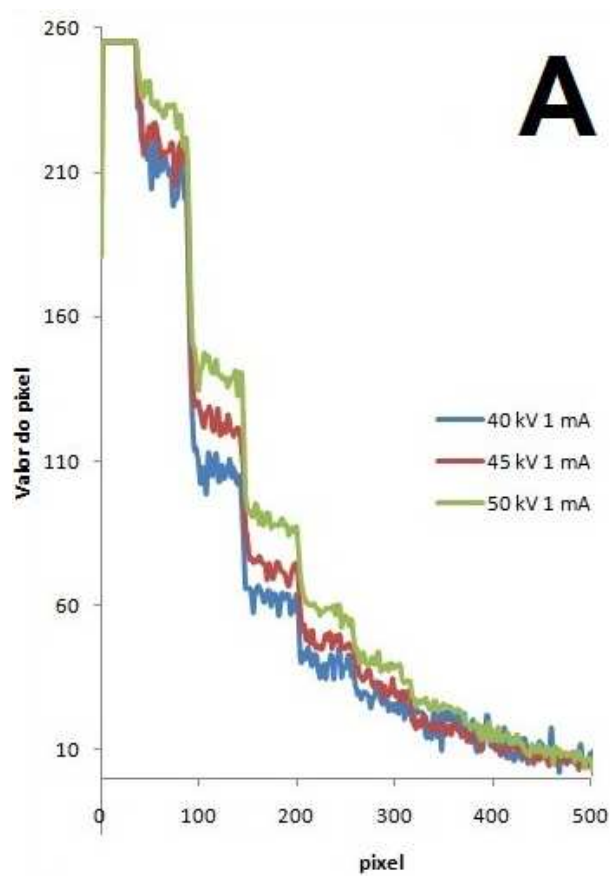


Figura 32: Contraste para diferentes kV e mAs.

4.5 - Resolução espacial

Com as figuras obtidas através do IQI, foi reproduzido o gráfico mostrado na figura 33

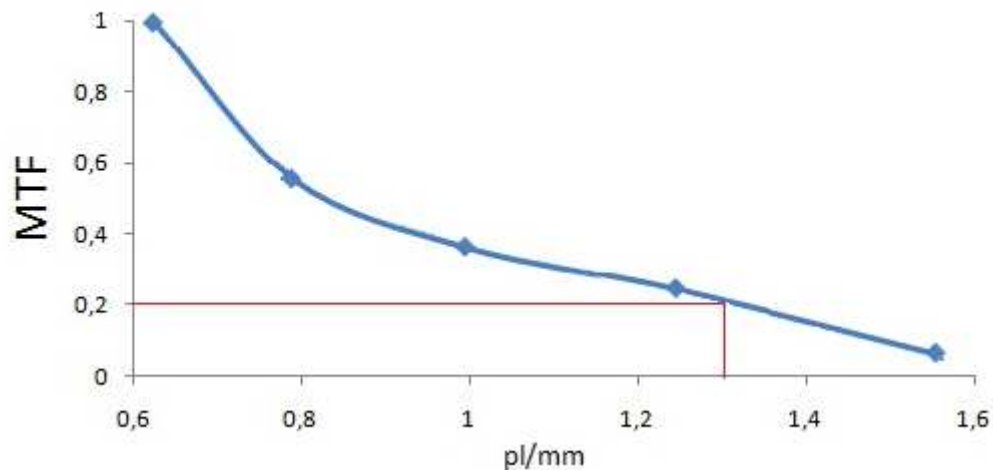


Figura 33 – MTF em função do número de pares de linha por milímetro

Considerando uma variação mínima de 20% para que se possa distinguir entre dois pares de linha, a curva de MTF do sistema indica que se consegue resolver até 1,3 pares de linha por milímetro, ou seja, 0,78 milímetros por par de linha, ou uma resolução de 0,39 milímetros (figura 33).

4.6 - Resultados para a peça 1

Foram obtidas diversas projeções da peça 1. A figura 34 mostra uma destas projeções.

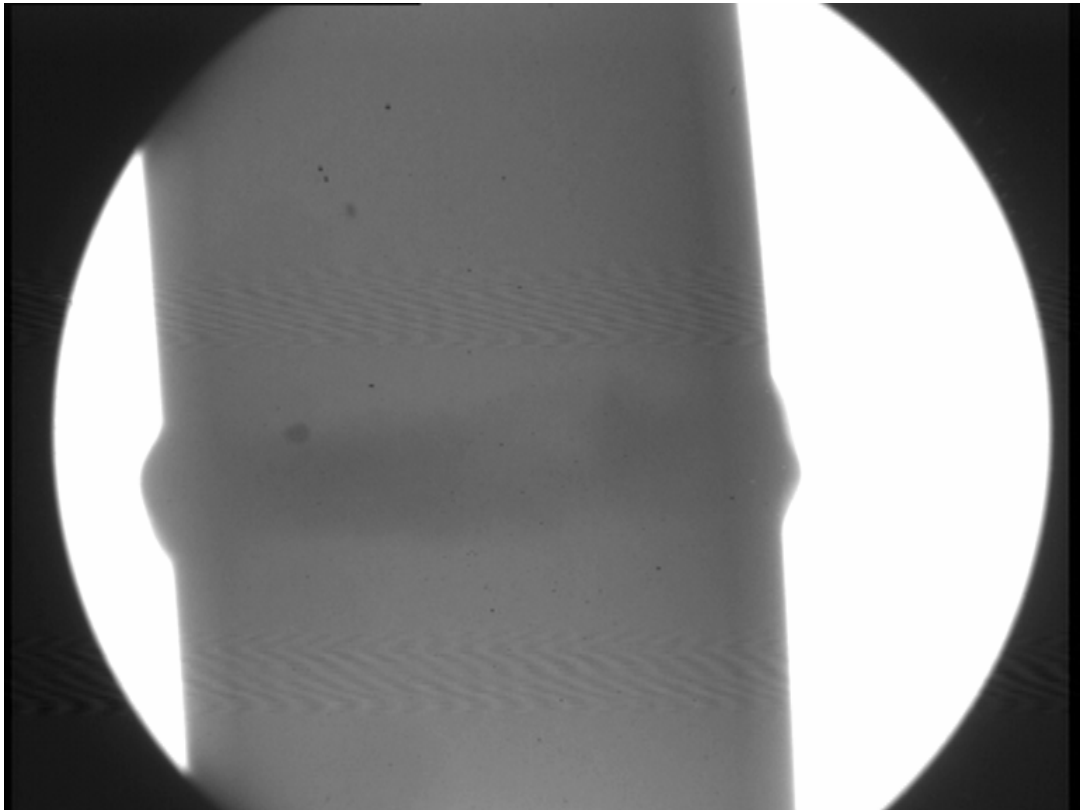


Figura 34 – Imagem obtida com uma tensão de 50kV e corrente de 2 mA, imagem sem processamento. Incidência de parede dupla vista simples.

A imagem adquirida apresentou-se com o perfil do objeto, sem deformidades. Artefatos como o ruído periódico devido à digitalização e pontos escuros na câmera são aparentes. Estes pontos escuros, ou pontos cegos, são pixels provenientes de um elemento do conjunto de elementos CCD que não funciona.

Uma das análises possível da imagem é a distribuição dos valores de pixel (com oito bits, varia de 0 a 255), em um histograma. Podemos notar na figura 35, que o histograma da figura 34 apresenta dois picos completamente distintos.

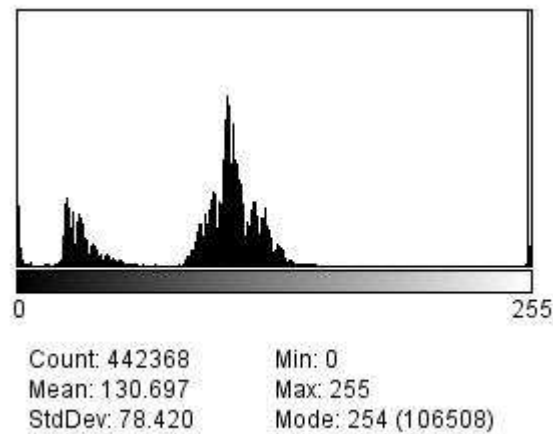
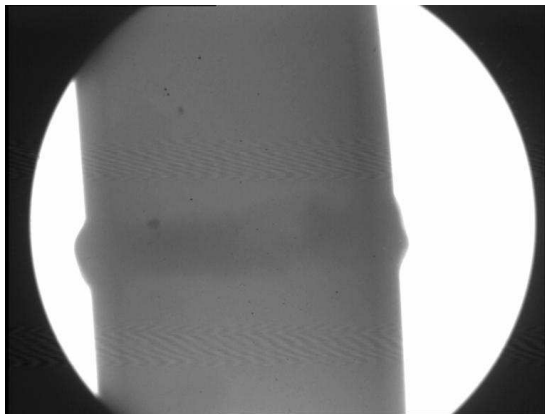


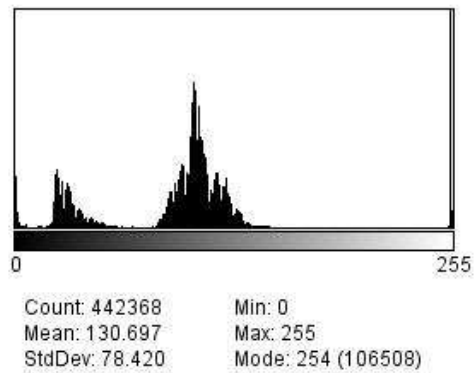
Figura 35: Histograma dos valores de pixel da imagem da imagem da figura 33.

Os dois picos se devem principalmente ao fato de se estar adaptando uma imagem circular em uma matriz quadrada. Deste modo, a imagem em si (a imagem do corpo de prova) é mostrada por uma faixa de valores, e a borda escura da imagem apresenta uma segunda faixa de valores. Assim, distribuição de cinza dentro do histograma, abrange estas duas faixas de valores e, a imagem, com menos possibilidades de níveis de cinza, tem o contraste prejudicado (figura 36), isto por que existem menos valores para preencher os níveis de cinza da imagem do objeto. É possível redistribuir os níveis de cinza, de acordo com a necessidade, ajustando, por exemplo, para abranger apenas nos valores que condizem com os detalhes da imagem que queremos ver (figura 36). Esta redistribuição recebe o nome de Janelamento (36 e 37).

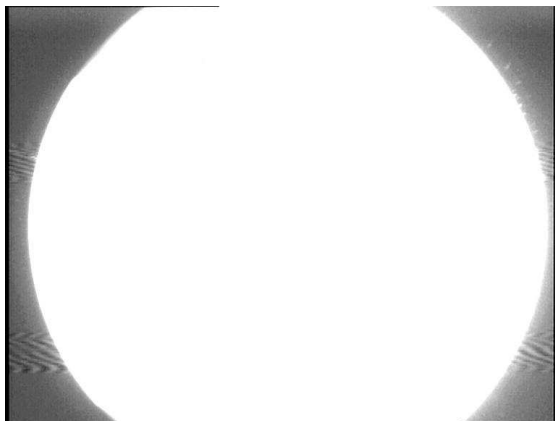
A



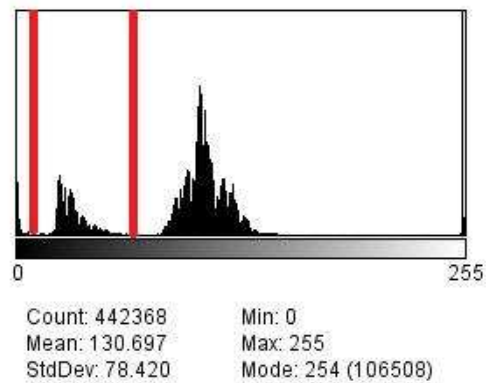
B



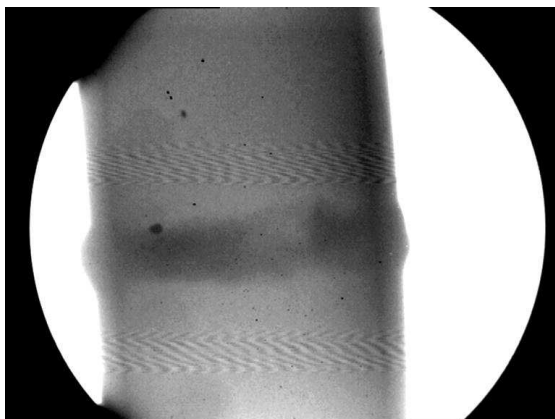
C



D



E



F

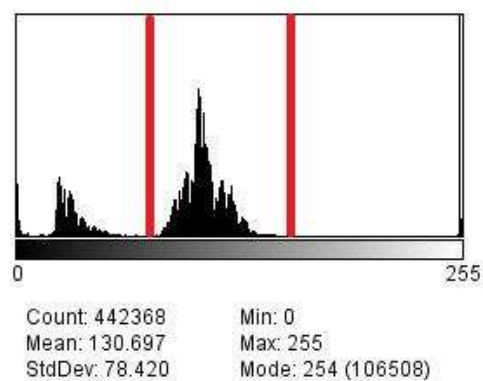


Figura 36: Janelamento do histograma – histograma da imagem original (A e B), primeiro pico (C e D) e segundo pico (E e F). As duas faixas horizontais indicam o menor nível de cinza (preto) e o maior (branco), com seus níveis intermediários distribuídos entre as faixas.

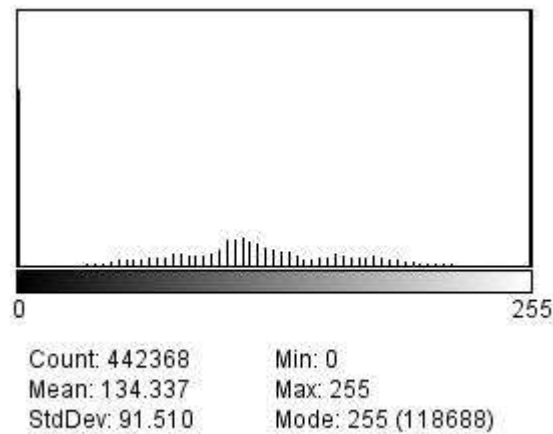


Figura 37: Novo histograma de distribuição de cinza, alargado a partir da janela mostrada em 36F.

A figura 36 mostra que os valores distribuídos ao longo do histograma estão abrangendo estruturas que não têm importância para o objetivo do ensaio. Desta forma, podemos ajustar a janela certa (de figura 36F para figura 37) para ser possível visualizar a região necessária com mais detalhes (figura 35E), aumentando o contraste entre as estruturas que precisam ser definidas. É importante observar que quando se faz este tipo de aumento do contraste, automaticamente aumentando a intensidade do sinal ruidoso. Outra observação é a de que a intensidade do nível zero, ficou maior, pois tudo que estava abaixo do menor nível de cinza (preto) foi considerado também preto.

Para suprimir os efeitos *vignetting*, foi acionado um filtro passa-banda para filtrar objetos no tamanho desejado. Foi permitida a passagem apenas de objetos com tamanho entre 3 e 40 pixels. A imagem resultante após a reorganização do histograma ficou da seguinte forma (figura 38):

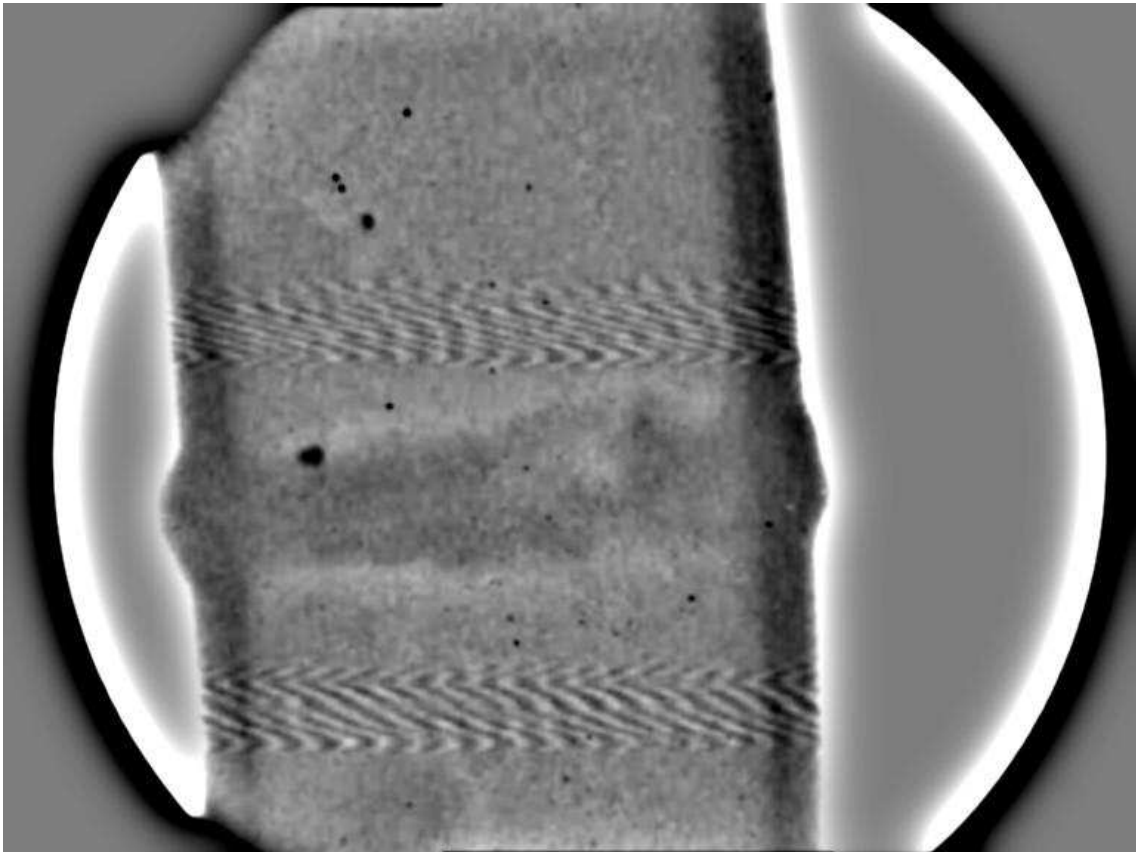


Figura 38: Imagem após filtro passa banda e redistribuir o histograma.

Podemos ver que o uso do filtro passa banda, para retirar o *vignetting*, enfatizou as bordas. Desta maneira, o contraste, tanto de objetos existentes como de artefatos tem sua borda exagerada. A linha branca em torno do objeto (figura 38) é consequência da ênfase da borda, os pontos pretos são pontos cegos da imagem enfatizados pelo mesmo motivo.

Assim, o artefato periódico de digitalização, o ruído e pontos escuros da câmera são enfatizados, mas ao mesmo tempo, a linha que delimita o objeto em estudo também tem um maior contraste (figura 38). Podemos notar, por exemplo, a linha branca em torno do objeto, com borda escura, na figura 38.

A alta quantidade de ruído nesta imagem, apresentada mesmo após a passagem de um filtro que retira ruído, pode ser consequência da baixa corrente no tubo foi utilizada. Uma corrente maior implicaria em menor ruído.

A imagem obtida a 50kV e 5 mA apresenta, visualmente, menos ruído. Desta vez, não foi usado o modo magnificado. O resultado pode ser visto na figura 39:

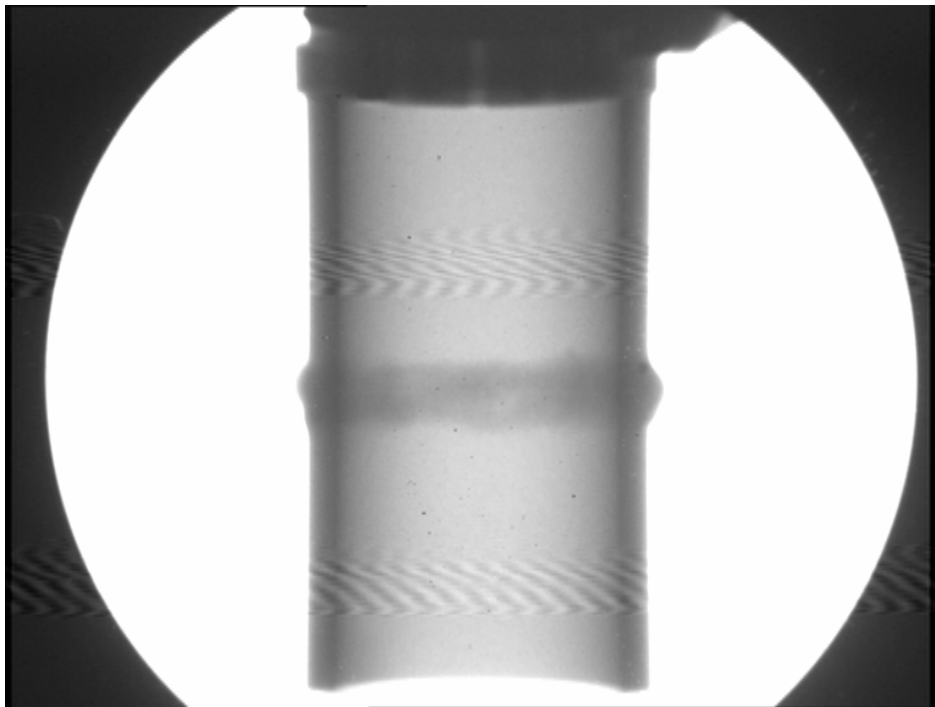


Figura 39: imagem feita com 50kV e 5mA - para menor ruído.

Observando o histograma desta imagem (figura 40):

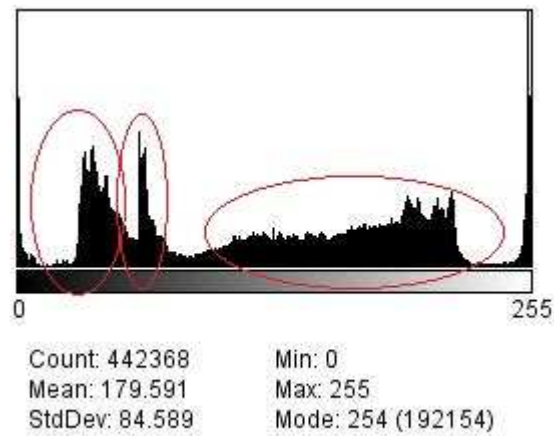


Figura 40: histograma da imagem exibida na figura 39.

Onde podemos distinguir três estruturas, sendo apenas uma relativa à peça do ensaio. Ao ajustar o histograma, expandindo o histograma relativo à peça, para os 256 possíveis níveis de cinza, teremos (figura 41):

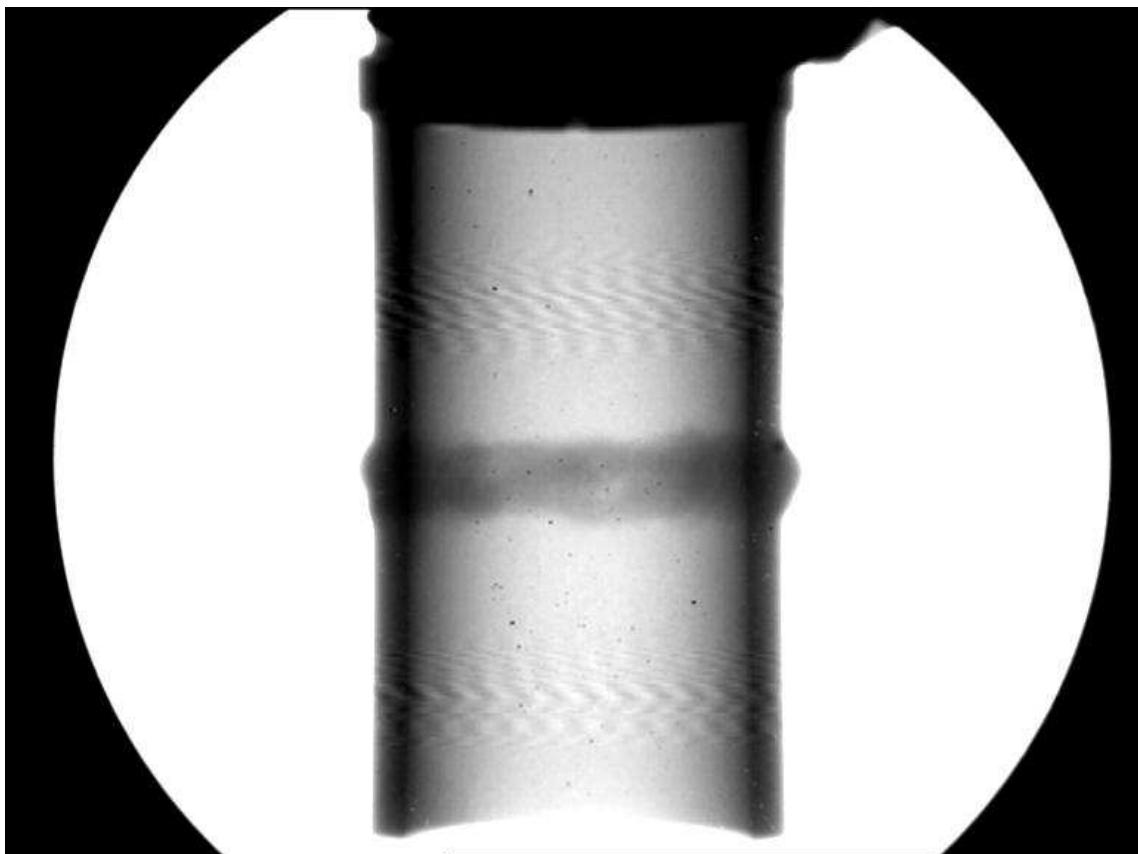


Figura 41: Imagem da figura 39 com o histograma ajustado.

É possível, a partir deste ponto, isolar somente a área onde se espera conseguir alguma informação. No caso da peça 1, esta informação é procurada normalmente na solda. Isolando a imagem da solda (figuras 42, 43 e 44):

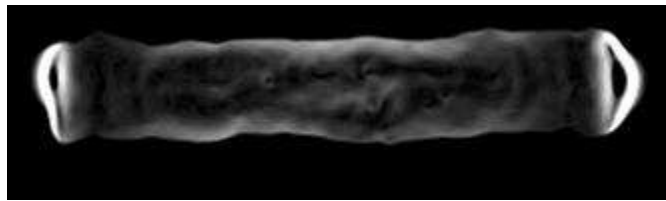
O primeiro passo é eliminar artefatos. Foi escolhido um filtro de imagem, capaz de selecionar um tamanho mínimo e um máximo para os objetos que permanecerão na imagem. Este filtro, também conhecido como passa-banda, foi selecionado para retirar objetos menores que 3 pixels e maiores que 40 pixels. O resultado está representado na figura 42.



Figura 42: Imagem da solda isolada e após a transformada o filtro passa-banda
(de 3 a 400)

Após este procedimento, um filtro, capaz de enfatizar variações bruscas de níveis de cinza foi utilizado. Este filtro funciona aferindo a um pixel o valor relativo ao desvio padrão de sua vizinhança. O resultado é exibido na figura 43A, e , depois de invertida, na figura 43B.

A



B



Figura 43 – Solda após um filtro de variância para achar bordas

Ao considerarmos outro ângulo de exposição da mesma peça, e usando o mesmo processamento de imagens, o resultado aparece na figura 44.



Figura 44: Presença de inclusão e de artefatos na imagem

É importante ressaltar que, apesar de estarmos enfatizando os detalhes na parte da frente da estrutura avaliada (da solda). Este procedimento

retirou toda a informação das bordas da imagem (lateral). Desta forma, seria ideal o uso de mais de uma incidência, como permite a radioscopia (figuras 43, 44 e figuras 45, 46, 47 e 48).

4.7 – Resultados para a peça 2

Estas imagens foram extraídas através de diversas angulações diferentes, e exemplificam a importância deste recurso na radioscopia.

As imagens obtidas da peça 2 a 50 kV, 5 mA, distância foco-objeto de 70 cm e distância objeto-detector de 6 cm. A peça 2 foi girada em torno do seu próprio eixo, de vinte em vinte graus. As figuras 45, 46, 47 e 48 são relativas às posições de 0, 20, 40 e 60 graus, respectivamente.

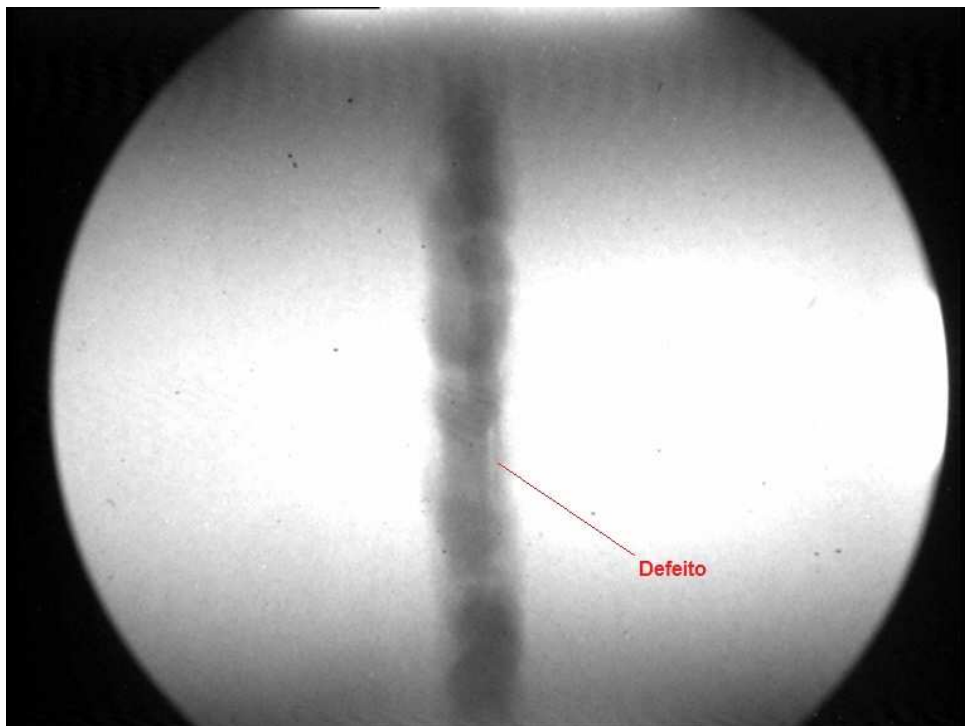


Figura 45: Imagem com ângulo de incidência a zero grau.



Figura 46: Imagem com ângulo de incidência a vinte graus.

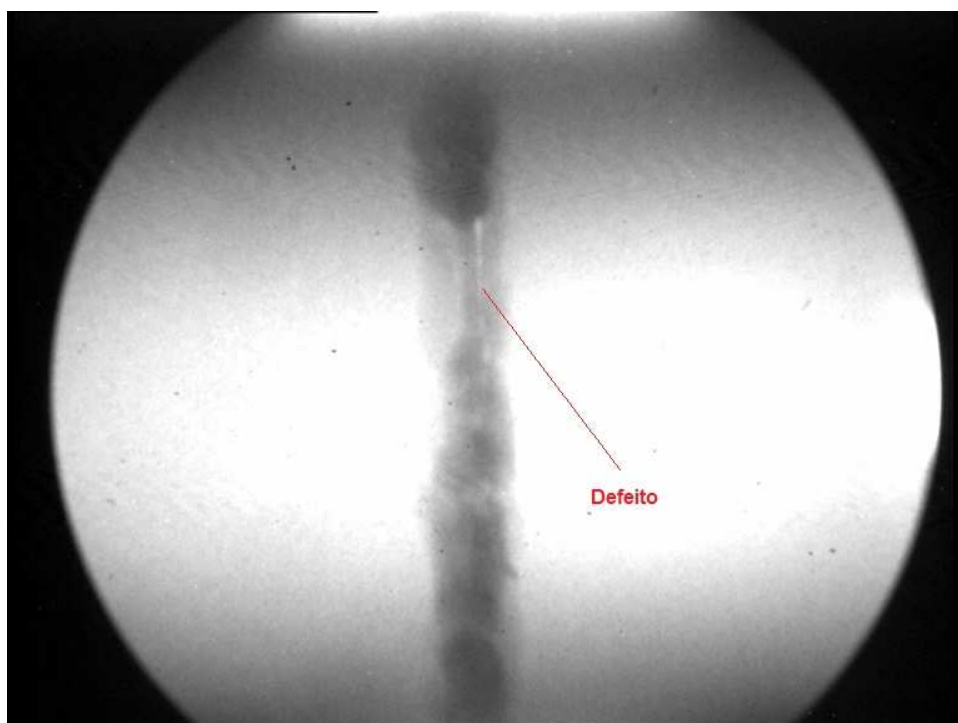


Figura 47: Imagem com ângulo de incidência a 40 graus.

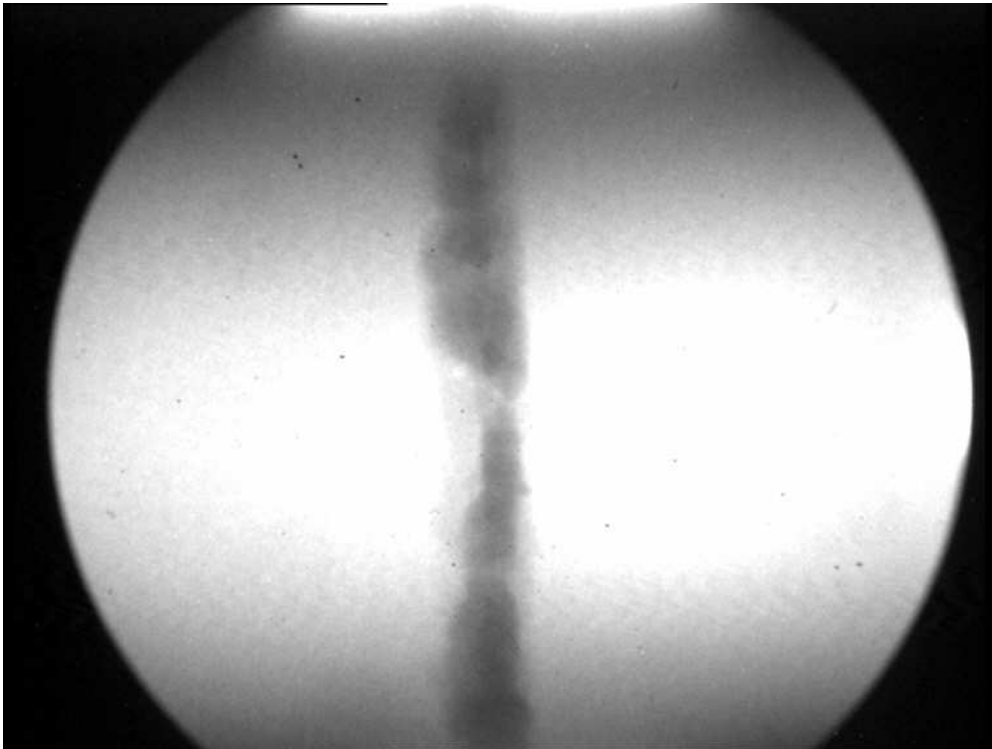


Figura 48: Imagem extraída a 60 graus; não é possível identificar o defeito.

É possível notar que, dependendo do ângulo de incidência, o defeito fica aparente ou não. Desta forma, a variação da incidência torna-se uma arma fundamental em algumas geometrias.

4.8 – Discussões dos Resultados

4.8.1 - Peças reais

No caso das peças reais, o sistema foi capaz de mostrar os dois defeitos nas áreas de solda: a inclusão na peça 1; e a falha na solda da peça 2 que, apesar de razoavelmente fáceis, indicam que o sistema está apto a esta

meta. No caso das peças, além da possibilidade de processar a imagem digital, outros fatores característicos da radioscopia ajudaram a identificar defeitos e distingui-los de possíveis equívocos, principalmente quanto à artefatos.

O primeiro é o fator movimento. Ao se observar a peça em movimento relativo ao detector, cria-se uma melhor perspectiva de onde está o defeito, se realmente não é um problema da formação da imagem, e até se tem melhor a idéia das dimensões deste defeito comparado às dimensões da peça. No caso de dúvida do que é artefato e o que é inclusão na peça 1, basta adquirir a imagem em um diferente ângulo de incidência ou mesmo movimentá-la em relação ao detector. Este procedimento também é utilizado na peça 2, de forma que se possa confirmar a presença do defeito e se sua posição é posterior ou anterior à peça.

O segundo é o fator interatividade: onde durante a própria exposição da peça, se pode mudar os parâmetros como kV e mA do feixe, de forma a descobrir e escolher a melhor técnica para o tipo e a localização do defeito. Observa-se que a imagem produzida pela peça 2 tem sua região central saturada, e esta foi a melhor exposição para se encontrar este defeito. Dificilmente se escolheria para uma radiografia uma exposição onde uma considerável região da imagem terá seu nível de branco saturado.

4.8.2 - Dificuldades:

A grande dificuldade do trabalho foram os pontos escuros na imagem, que estão relacionados ao mau funcionamento de alguns elementos do CCD.

Apesar de existentes em todas as imagens deste trabalho, estas serviram para enfatizar o quanto o fator movimento é importante para distinguir verdadeiros defeitos de artefatos da imagem.

A correção do *aliasing* pode ser feita, mas ela normalmente interfere no resto da imagem. Quando vemos a imagem em vídeo no monitor, onde se passam 20 frames por segundo, dificilmente percebemos a presença deste artefato, pois certamente enxergamos a média de alguns frames. O ideal seria fazer com que a imagem utilizada para a avaliação seja a média de algumas imagens extraídas digitalmente imitando a formação da imagem no olho humano, e atenuando a presença deste artefato.

Apesar do efeito de borda, a correção de *vignetting* através da própria imagem mostrou-se eficiente e com baixo custo computacional. Além disso, a olho nu não foi possível detectar nenhuma deformação espacial das imagens extraídas.

Quanto ao contraste, percebe-se que a algumas propriedades da digitalização prejudicam uma melhor distribuição dos níveis de cinza. Isto por que a imagem digitalizada é retangular (768x576 pixels) enquanto a imagem realmente produzida no intensificador é circular. Desta forma, é armazenado juntamente com a imagem, bordas escuras, que para efeito de digitalização, assumem níveis até diferentes de cinza (figuras 36C e 36D). Competindo com as bordas para a distribuição da escala de cinza, o contraste que realmente é interessante para a avaliação em questão é prejudicado.

Considerações Finais

Apesar de usar normas de padronização como referência bibliográfica, este trabalho não visa, em primeira instância, comparar o aparelho construído com outros, já existentes, em termos de testes de qualidade padronizados, e sim, aperfeiçoar e saber qual é a capacidade do aparelho.

O principal objetivo deste trabalho foi a obtenção de imagens digitais através do intensificador de imagens, cuja saída era analógica. A obtenção deste sinal, porém, não fez com que a visualização da imagem em tempo real deixasse de ser dinâmica.

O sistema com intensificador de imagens e dispositivos de digitalização já foram citados como uma radiografia digital de conversão indireta, no que se trata de baixo custo [6,8] . Apesar da capacidade de 16 bits de profundidade, a digitalização neste trabalho limitou-se a 8 bits, por diversos motivos, como tamanho das imagens adquiridas, capacidade do computador de aquisição, e principalmente, para o fato do contraste do intensificador de imagens não exigir muitos tons de cinza.

Abranger grande número de degraus em uma mesma aquisição significa maior eficiência para a avaliação de corpos de provas que possuam comprimento variável.

Para a radioscopia, no entanto, esta limitação não é tão incapacitante, uma vez que é possível ajustar o a corrente do filamento e a tensão do tubo de raios X interativamente, observando em tempo real na própria imagem o quanto as mudanças surtem efeito. Isto é importante para que não se digitalize imagens onde não se tem os detalhes desejados.

Ao aumentar o contraste de um detalhe, após a digitalização da imagem, aumenta e enfatiza o ruído desta imagem. Desta forma, perde qualidade.

Capítulo 5:

Conclusões

Na avaliação do contraste, foi possível distinguir de cinco a sete degraus. Este número pode aumentar, se a imagem extraída não contivesse as margens escuras. O ideal quando não é possível fazer com este modelo de *hardware*, é digitalizar apenas a região central da imagem, comportando a região de interesse da imagem.

A imagem adquirida teve o MTF, que é o principal parâmetro de qualidade da imagem, como 0,39 mm. É sempre importante lembrar que, este valor foi encontrado em medidas otimizadas, ou seja, em uma geometria que favorecia a resolução espacial, evitando o borramento (*unsharpness*).

A principal deficiência do aparelho construído foi a falta de capacidade de se criar uma aquisição integral, onde a imagem final seria a imagem média, em um determinado intervalo de tempo. Este artifício diminuiria o ruído aleatório da imagem e também o artefato de *aliasing* periódico, tornando a imagem mais homogênea. Nas atuais condições não é impossível se produzir este tipo de imagem, mas é necessário processar todas as imagens de um intervalo de tempo, uma a uma. Se considerarmos 20 imagens por segundo; dois ou três segundos já tornariam esta atividade pouco prática.

Em peças reais o aparelho de radioscopia se mostrou satisfatório na busca por defeito ou inclusão. É interessante ressaltar que não foi quantificado qual o menor defeito possa ser encontrado.

Sugestões para trabalhos futuros

Além de facilitar na avaliação das imagens, a digitalização pode ser uma excelente ferramenta para ajudar na avaliação do próprio intensificador de imagens, assim como do próprio na qualidade do feixe produzido. Isto por que a imagem armazenada tem seu próprio padrão, e pode ser parametrizado (como na figura 26), corrigido para que sejam possíveis avaliações matemáticas com os valores dos pixels. A qualidade seria avaliada então, na constância das características iniciais do sistema, perfis levantados e características de cada aquisição.

Esta imagem adquirida pode ser melhorada quanto ao ruído e à uniformidade, obtendo-se uma rotina computacional para a aquisição integral.

Além disto, a imagem tratada como dados pode ser utilizada em reconstruções, por exemplo, tomográfica. Para isto basta que sejam adquiridas imagens com o ângulo de incidência variando regularmente, e um software de reconstrução ajustado para dado tamanho de campo e distância foco-detector.

É necessário no entanto, o desenvolvimento de uma comparação entre a radioscopia e a radiografia convencional, no que se trata de resolução espacial, contraste e principalmente capacidade de detectar defeitos.

Referências Bibliográficas

- [1] BOSSI, R.H., IDTINGS, F.A., WHEELER, G.C., MOORE, P.O., *Nondestructive Testing Handbook*. 3ª edição, Columbus, EUA, The American Society for Nondestructive Testing, 2002
- [2] PURSCHKE, M., "Radioscopy - The Prevalent Inspection Technique of the Future!?", *15th World Conference of Non destructive Testing*, Rome, Italy, 15-21 October 2000
- [3] KROHMER, J.S., "Radiography and fluoroscopy, 1920 to the present" *Radiographics*, Vol 9. Nº 6, 1989
- [4] BERTHEL, A. ,et al., "Digital radiography: Description and User's Guide" DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June 25-27, 2007, Lyon, France
- [5] BUSCHKE, P., ROYE, W., DAHMEN, T., "Multiple NDT methods in automotive industry", *16th World Conference on Non Destructive Testing*, Montreal, Canada, 30 August – 3 September 2004,
- [6] PARDIKAR, R.J., "Digital radiography and Computed radiography for enhancing the quality and productivity of weldments in boiler components", *17th World Conference on Non Destructive Testing*, Shanghai, China, 25-28 October 2008.
- [7] KIESEL, D., "Radiography – Radioscopy ... a technology comparison", *12th A-PCNDT - Asia-Pacific Conference on NDT*, Auckland, New Zealand, 5-10 November 2006

- [8] PARDIKAR, J.R., "Real Time Radioscopy and digital image processing techniques for on line inspection of welds in boiler tubes", *15th World Conference on Non Destructive Testing*, Rome, Italy, 15-21 October 2000
- [9] BLAKELEY, B., SPARTIOTIS, K., "Digital radiography for the inspection of small defects", **TWI**, v. 48, n.2 (Fev), 2006.
- [10] MERY, D: "Automated Radioscopic Inspection of Aluminium Die Castings", *Materials Evaluation*, 65(6): 643-647, 2006.
- [11] HARARA, Wafik, "Digital Radiography in industry" *17th World Conference on Non Destructive Testing*, Shanghai, China, 25-28 October 2008
- [12] VENKATRAMAN, B., JAYAKUMAR, T., KALYANASUNDARAM, P., RAJ, B., "NDE Methodologies for Examination of Tail Rotor Blades of Helicopters", *15th World Conference on Non Destructive Testing*, Rome, Italy, 15-21 October 2000
- [13] CAMPAGNE, B., ROBILLOT, E., "X-ray investigation of complex composite aeronautical parts" *International symposium on digital industrial radiology and computed tomography*, Lion, France, 25-27 June 2007
- [14] OLIVEIRA, D., LOPES, R.T., MARINHO, C., CAMERINI, C., "Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e *image plates*" *IV Conferencia Panamericana de END* - Buenos Aires – Outubro 2007
- [15] TANG, B.P.Y, HUNGLER, P., SWEETAPPLE, C.P.; BENNETT, L.G.I.; "An Quantitative Evaluation of the Canadian Forces New Radiology Inspection Systems for the Detection of Water Ingress in CF188 Flight Control Surfaces", *17th World Conference on Non Destructive Testing*, Shanghai, China, 25-28 October 2008.

[16] European standard. Non-destructive testing – Radioscopic Testing – Part 3: General principles of radioscopic testing of metallic materials by X-ray and gamma ray, CEN, August, 2001.

[17] LECOMTE, G., KAFTANDJIAN, V., CENDRE, E., “Combination of information from several x-ray images for improving defect detection performances – application to castings inspections”, *9th European Conference on Non Destructive Testing*, Berlin, Germany, 25-29 September 2006

[18] NORMA CNEN-NN-3.01 “Diretrizes básicas de proteção radiológica”, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2005.