



## RADIOGRAFIA DIGITAL UTILIZANDO ALTA ENERGIA PARA INSPEÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO

Joseilson Rodrigues Nascimento

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

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro  
Outubro de 2016

RADIOGRAFIA DIGITAL UTILIZANDO ALTA ENERGIA PARA INSPEÇÃO DE  
MATERIAL FUNDIDO

Joseilson Rodrigues Nascimento

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

Examinada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.

---

Profa. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

---

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

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Dr. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2016

Nascimento, Joseilson Rodrigues

Radiografia Digital Utilizando Alta Energia Para Inspeção de Material Fundido/Joseilson Rodrigues Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVIII, 128 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 123-128.

1. Radiografia Digital. 2. Altas Energias. 3. Acelerador Linear 4. Acelerador Circular - *Betatron*. I. Lopes, Ricardo Tadeu, *et al.*, II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*A minha esposa Ana Carolina.  
Ao meu pai in memoriam José  
Lindoso  
A minha mãe Anaide*

## AGRADECIMENTOS

À Deus que me abençoa a todo o tempo.

A minha esposa Ana Carolina pela dedicação, pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

Aos meus grandes heróis, meu pai *in memoriam* José Lindoso e a minha mãe Anaide, por todo apoio, carinho e por todos os ensinamentos e experiências de vida que passaram.

Ao Prof. Ricardo Tadeu Lopes (PEN/COPPE/UFRJ) pela orientação, disponibilidade e atenção dada neste trabalho e, principalmente, pelo exemplo de dedicação ao trabalho.

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

Aos demais amigos do LIN, em especial, Alessandra, Aline e Célio pela amizade e apoio sempre.

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

Ao amigo Heleno Ribeiro Simões pelo apoio e disponibilidade em ajudar a concretizar os experimentos com os equipamentos necessários.

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

As instituições Confab Industrial S.A – Equipamentos, Cecal Indústria e Comércio Ltda, Arctest Serviços Técnicos de Inspeção e Manutenção Industrial Ltda e a Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. – Nuclep, pelo apoio com grande colaboração no desenvolvimento do estudo.

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

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

## RADIOGRAFIA DIGITAL UTILIZANDO ALTA ENERGIA PARA INSPEÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO

Joseilson Rodrigues Nascimento

Outubro/2016

Orientadores: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Programa: Engenharia Nuclear

O aprimoramento das técnicas está em primeiro lugar dentre as prioridades da indústria no processo de fabricação de peças com materiais fundidos, pois visam diminuir os erros que causam imperfeições, as quais podem comprometer a integridade estrutural dos equipamentos, que são utilizados sob forte condição de pressão e temperatura. Desta forma, existe a necessidade de utilizar métodos mais rigorosos de ensaios não destrutivos, com uma melhor probabilidade de detecção. As exigências nos ensaios não destrutivos aumentam cada vez mais e com isso, a radiografia convencional atingiu o limite de sua sensibilidade com filmes radiográficos industriais. O objetivo deste trabalho foi utilizar a radiografia digital para a inspeção de materiais fundidos, empregando técnicas de processamento de imagem a fim de otimizar a detecção de eventuais descontinuidades. Para este efeito foi inspecionada uma amostra de ensaio de cobre fundido com uma espessura máxima de 150 mm, contendo os defeitos habituais encontrados nas peças fabricadas através de processos de fundição industrial. Os resultados mostraram, que, com o auxílio do processamento matemático, as imagens de radiografia digital apresentaram maior sensibilidade na detecção de defeitos que a radiografia convencional apresentou, eliminando a necessidade de realização de múltiplas exposições e evitando também, as dificuldades envolvidas no uso de filmes múltiplos para inspecionar uma única seção do corpo de prova, com variações na espessura. Além de diminuir o tempo de exposição nos ensaios, utilizando o *Betatron* como equipamento portátil em comparação com a fonte de Co-60.

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

## DIGITAL RADIOGRAPHY UTILIZING HIGH ENERGY FOR INSPECTION IN CAST MATERIALS

Joseilson Rodrigues Nascimento

October/2016

Advisors: Ricardo Tadeu Lopes

Davi Ferreira de Oliveira

Department: Nuclear Engineering

The improvement of the techniques is the first in the rank of priorities of industry in the manufacture process of parts with cast materials; they aim to reduce the errors that cause imperfections, which may compromise the structural integrity of the equipment, which are used under severe pressure and temperature conditions. In this way, there is a need to use more rigorous methods of non-destructive testing, with a better probability of detection. Non-destructive testing requirements increase more and more, and so the conventional radiography reached the limit of their sensitivity with industrial radiographic film. The purpose of this study was to use digital radiography for inspection of cast materials using image-processing techniques in order to optimize the detection of possible discontinuities. To this, it was inspected a sample of copper fused with a maximum thickness of 150 mm, containing the usual defects found in manufactured pieces through process of industrial casting. The results showed that, with the aid of mathematical processing, digital radiography images have presented greater sensitivity in defect detection than the conventional radiography, eliminating the need of multiple exposures and avoiding the difficulties involving the use of multiple films to inspect a single section of the test sample with variations in thickness. It also decreases the exposure time in tests using *Betatron* as a portable equipment comparing to the Co-60 source.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>10</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 – Processo Radiográfico .....</b>	<b>10</b>
3.1.1 – Formação da Imagem Radiográfica.....	10
3.1.2 – Interação da Radiação com a Matéria .....	11
3.1.2.1 – Absorção Fotoelétrica .....	12
3.1.2.2 – Espalhamento Compton .....	13
3.1.2.3 – Produção de pares.....	14
<b>3.2 – Fontes de Radiação de Alta Energia .....</b>	<b>16</b>
3.2.1 – Acelerador Circular – <i>Betatron</i> .....	16
3.2.1.1 – O Eletroímã .....	17
3.2.1.2 – A Câmara de Aceleração.....	20
3.2.2 – Acelerador Linear .....	21
3.2.2.1 – Fontes de microondas ( <i>Magnetron</i> ) .....	22
3.2.2.2 – Planicidade e cobertura do campo de radiação.....	24
3.2.3 – Radiação Gama ( $\gamma$ ) .....	25
3.2.3.1 – Irradiadores para Gamagrafia .....	25
3.2.3.2. – Seleção de fonte radiativa.....	28
<b>3.3 – Técnicas de Imagens Radiográficas .....</b>	<b>28</b>
3.3.1 – Filmes Radiográficos Convencionais .....	29
3.3.1.1 – Elemento Sensível à radiação.....	30
3.3.1.2 – Processamento do filme radiográfico .....	36
3.3.1.3 - Telas intensificadoras de imagem.....	38
3.3.2 – Radiografia Computadorizada (RC).....	38



3.3.2.1 – Estrutura Física da Placa de Imagens .....	39
3.3.2.2 – Funcionamento das Placas de Imagem .....	40
3.3.2.3 – Eficiência de Absorção de Raios X na Placa de Imagem - IP .....	41
3.3.2.4 – Leitor de Radiografia Computadorizada .....	43
<b>3.3.3 – Radiografia Digital Direta .....</b>	<b>44</b>
3.3.3.1 – Detector Digital – DD .....	44
3.3.3.2 – Detector Digital com Conversão Indireta.....	45
<b>3.3.4 – Comparação entre as Técnicas Radiográficas Convencional e</b> <b>Computadorizada.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 – Imagem Radiográfica Digital .....</b>	<b>50</b>
3.4.1 – Qualidade da Imagem .....	50
3.4.1.1 – Resolução Espacial.....	50
3.4.1.2 – Contraste .....	51
3.4.1.3 – Nitidez da Imagem .....	53
3.4.1.4 – Ruído.....	55
3.4.1.5 – Razão Sinal Ruído (SNR) .....	57
<b>3.5 – Processamento da Imagem Digital.....</b>	<b>57</b>
3.5.1 – Restauração/Realce.....	58
3.5.2 – Segmentação e Extração de Atributos .....	58
3.5.2.1 – Classificação .....	58
3.5.2.2 – Operações Pontuais .....	59
3.5.2.3 – Operações Locais .....	60
3.5.2.4 – Operações Globais.....	60
3.5.3 – Software.....	60
<b>3.6 – Materiais Fundidos.....</b>	<b>61</b>
3.6.1 – Base da Moldagem .....	61
3.6.1.1 – Matéria prima: o Cobre .....	61
3.6.1.2 – Características do molde .....	63
3.6.1.3 – Tipos de defeitos dos produtos fundidos .....	64
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>65</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1 – Planejamento Experimental .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 – Materiais e Equipamentos .....</b>	<b>67</b>
4.2.1 – Corpo de Prova .....	67
4.2.2 – Fontes de Radiação.....	68

4.2.2.1 – Acelerador Linear Linac 400 com 4 MeV de energia .....	68
4.2.2.2 – Acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV de energia. ....	69
4.2.2.3 – Acelerador Circular <i>Betatron</i> PXB6 com 6 MeV de energia. ....	70
4.2.2.4 – Fonte de Radiação Gama ( $\gamma$ ) .....	71
4.2.3 – Equipamento de Radiografia Computadorizada.....	72
4.2.4 – Filmes Convencionais .....	73
4.2.5 – Detector Digital .....	74
<b>4.3 – Procedimentos Experimentais .....</b>	<b>75</b>
4.3.1 – Primeira Etapa .....	75
4.3.2 – Segunda Etapa .....	76
4.3.3 – Terceira Etapa.....	77
4.3.4 – Quarta Etapa .....	78
4.3.5 – Parâmetros dos equipamentos .....	79
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>83</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
<b>5.1 – Descrição das descontinuidades .....</b>	<b>83</b>
<b>5.2 – Avaliação da Detectabilidade .....</b>	<b>85</b>
<b>5.3 – Primeira Etapa.....</b>	<b>86</b>
<b>5.4 – Segunda Etapa .....</b>	<b>91</b>
<b>5.5 – Terceira Etapa .....</b>	<b>96</b>
<b>5.6 – Quarta Etapa.....</b>	<b>106</b>
5.6.1 – Ensaio com Radiação X utilizando a técnica computadorizada e a técnica de detecção direta .....	106
<b>5.7 – Avaliação do Contraste entre os Sistemas.....</b>	<b>113</b>
<b>5.8 - Discussão dos Resultados.....</b>	<b>117</b>
5.8.1 – Quanto ao material do bloco refrigerador .....	117
5.8.2 – Quanto à energia das fontes utilizadas .....	117
5.8.3 – Quanto à detectabilidade nas imagens geradas pelos sistemas com alta energia .....	118
5.8.4 – Quanto à sensibilidade dos sistemas que utilizaram RC e detectores diretos .....	120
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>121</b>

**CONCLUSÕES ..... 121**

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 123**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Processo Radiográfico (OLIVEIRA, 2007). .....	11
Figura 3.2 – Espalhamento Compton (KNOLL, 2000). .....	13
Figura 3.3 – Seção de choque diferencial de espalhamento Compton (KNOLL, 2000). .....	14
Figura 3.4 – Importância relativa dos três principais processos de interação (KNOLL, 2000). .....	15
Figura 3.5 – Princípio de funcionamento de um <i>Betatron</i> (JME, 2008). .....	17
Figura 3.6 – Visão longitudinal e transversal do <i>Betatron</i> (PERKINS, 2007; BRYANT, 1994). .....	18
Figura 3.7 – Versão longitudinal com destaque para as linhas de fluxo produzidas pelas bobinas primárias (vermelho) e bobinas secundárias (verde) que ilustram o campo magnético. ....	19
Figura 3.8 – Câmara de aceleração de elétrons de um <i>Betatron</i> de 6 MeV (KERST, 1941). .....	20
Figura 3.9 – Modelo de Acelerador Linear Linatron 400 e seus componentes (VARIAN, 1980). ....	21
Figura 3.10 – Modelo de Acelerador Linear Linatron M3 e seus componentes (VARIAN, 2011). .....	21
Figura 3.11 – Configuração básica do acelerador com <i>Magnetron</i> e tubo acelerador (VARIAN, 1980)...	22
Figura 3.12 – Exemplo de uma válvula <i>Magnetron</i> (MAZZUCCA, 2016). .....	23
Figura 3.13 – Diagrama básico de um modulador por <i>Magnetron</i> (VARIAN, 1980). ....	24
Figura 3.14 – Características das energias dos aceleradores Linatron (VARIAN, 2010). .....	24
Figura 3.15 - Ilustração de um irradiador de gamagrafia (ANDREUCCI, 2003). .....	25
Figura 3.16 – Dispositivo porta-fonte (ANDREUCCI, 2003). .....	26
Figura 3.17 – Esquema de decaimento do Cobalto-60 (HELMER, 1998). ....	27
Figura 3.18 – Espectro em energia do radioisótopo Cobalto-60 (HELMER, 1998). .....	28
Figura 3.19 – Camada dos filmes radiográficos (RAAD, 2007). ....	29
Figura 3.20 – Estrutura do Cristal de haleto de prata (PEREIRA, 2006). ....	30
Figura 3.21 – Seqüência de interação do fóton com o microcristal de haleto de prata; (a) fóton atinge o microcristal; (b) o elétron extra do haleto – Br ou I – é liberado; (c) os haletos saem dos microcristais enquanto os elétrons livres se dirigem para a impureza; (d) os elétrons criam uma região negativa que atrai os íons positivos de prata; (e) os íons Ag <sup>+</sup> incorporam os elétrons livres e se tornam em prata metálica; (f) maior concentração de prata metálica, maior degradação do microcristal (PEREIRA, 2006). .....	31
Figura 3.22 – Densidade óptica e grau de enegrecimento (BARBOSA, 2008). .....	32
Figura 3.23 – Exemplos da técnica de múltiplos filmes e vista composta. ....	33
Figura 3.24 - Curva característica de filmes radiográficos (KODAK, 1980). .....	34
Figura 3.25 – Contraste radiográfico – Exposição (A) 220 kV, (B) 120 kV (SIMÕES, 2012). .....	34

Figura 3.26 – Composição das camadas da placa de imagem. ....	39
Figura 3.27 – Espectro de fotoestímulo do BaFBr:Eu <sup>2+</sup> (OLIVEIRA, 2010). ....	41
Figura 3.28 – Gráfico de absorção em função da energia do raios X (SEIBERT, 1999). ....	42
Figura 3.29 – Sistema da imagem de material fotoestimulável de armazenamento (OLIVEIRA, 2010). ...	44
Figura 3.30 – Configuração do método de conversão direto e (ASAHINA, 2001). ....	45
Figura 3.31 – Estrutura de uma matriz de detectores e uma estrutura transversal de um <i>pixel</i> de conversão indireta com cintilador (KIM, 2003) (A NIOSH SCIENTIFIC WORKSHOP, 2008). ....	46
Figura 3.32 – Arranjo de <i>pixels</i> compostos por Fotodiodos e TFTs na matriz de detectores direto (NASCIMENTO, 2012). ....	47
Figura 3.33 – Arranjo eletrônico de <i>pixels</i> compostos por Fotodiodos e TFTs na matriz de detector direto. (NASCIMENTO, 2012). ....	47
Figura 3.34 – Diagrama do circuito de uma matriz de sensores de silício amorfo (VARIAN, 2010). ....	48
Figura 3.35 – Comparação da curva de sensibilidade entre o filme convencional e a placa de imagem (DURR, 2011). ....	49
Figura 3.36 – Comportamento entre os valores de <i>pixel</i> e os tons de cinza (OLIVEIRA, 2007). ....	50
Figura 3.37 – Estágios de formação do contraste da imagem (SPRAWLS, 1995). ....	52
Figura 3.38 - Contraste obtido sem e com radiação espalhada (SPRAWLS, 1995). ....	52
Figura 3.39 - Perda da nitidez devido a distribuição de intensidade do feixe no ponto focal (SPRAWLS, 1995). ....	53
Figura 3.40 – Ampliação da imagem em função de distâncias foco-detector diferentes (SPRAWLS, 1995). ....	54
Figura 3.41 – Ampliação da imagem em função de distâncias foco-objeto diferentes (SPRAWLS, 1995). ....	54
Figura 3.42 – Distorção causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto (SPRAWLS, 1995). ....	55
Figura 3.43 – Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da radiografia (SILVA, 2000). ....	56
Figura 3.44 – Diagrama de sequência do processamento digital (SCURI, 1999). ....	58
Figura 3.45 – Operações pontuais na imagem digital (SCURI, 1999). ....	59
Figura 3.46 - Operações locais (SCURI, 1999). ....	60
Figura 3.47 – Etapas para a confecção de peça fundida em molde de areia. ....	63
Figura 4.1 – Fluxograma geral da sequência de etapas realizadas nas instalações. ....	66
Figura 4.2 – Bloco refrigerador com 460 kg, e a planta das serpentinas com diâmetros em milímetros. ....	67
Figura 4.3 – Acelerador linear Varian, modelo Linatron com 4 MeV. ....	69

Figura 4.4 – Acelerador linear Varian, modelo Linatron com 3 MeV.....	70
Figura 4.5 – Acelerador Circular <i>Betatron</i> modelo MXB-6 M com 6 MeV. ....	71
Figura 4.6 – Irradiador de fontes de Cobalto 60 com atividade de 49,0 Ci. ....	72
Figura 4.7 – Unidades de leitura dos IPs. (a) CR50P e (b) CRx FLEX.....	73
Figura 4.8 – Detector Digital Direto DXR250V, fabricante GE IT.....	74
Figura 4.9 – Arranjo experimental na primeira etapa – Confab. ....	76
Figura 4.10 – Corpo de prova sendo preparado para ensaio radiográfico – Nuclep. ....	77
Figura 4.11 – Arranjo experimental com acelerador circular <i>Betatron</i> 6 MeV – LNDC. ....	78
Figura 4.12 – Arranjo experimental com acelerador linear Linatron com 3 MeV de energia – Confab. ...	79
Figura 5.1 – Regiões em destaque no corpo de prova onde se concentram as descontinuidades avaliadas. .....	84
Figura 5.2 – Imagem obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando o filme ASTM classe II, em destaque as descontinuidades observadas na imagem. ....	87
Figura 5.3 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando o filme ASTM classe II.....	87
Figura 5.4 – Imagem obtida com acelerador linear Linatron utilizando o filme ASTM classe I, em destaque as descontinuidades observadas na imagem. ....	88
Figura 5.5 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando dois filmes ASTM classe I. ....	89
Figura 5.6 – Imagem do IP IPX obtida com acelerador linear de 4 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	90
Figura 5.7 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron utilizando IP IPX com CR 50P. .	90
Figura 5.8 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando um filme ASTM classe II, em destaque as descontinuidades observadas nas seções de menores espessuras (vista simples). ....	92
Figura 5.9 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando o filme ASTM classe II. ....	92
Figura 5.10 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando dois filmes ASTM classe II, em destaque as descontinuidades observadas nas seções de maiores espessuras (vista composta). ....	93
Figura 5.11 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando dois filmes ASTM classe II analisados juntos.....	94
Figura 5.12 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando <i>Image Plate</i> IPX, em destaque as áreas delimitadas em azul mostram a presença de artefato do IP. ....	95
Figura 5.13 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando IP IPX. ....	95
Figura 5.14 – Imagem obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando dois filmes ASTM classe I com a técnica de vista composta. ....	96
Figura 5.15 – Imagem binarizada obtida com acelerado circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando dois filmes ASTM classe I analisados juntos.....	97

Figura 5.16 – Imagem obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> utilizando o filme ASTM classe II com a técnica de vista simples, e em destaque as descontinuidades observadas na imagem. ....	98
Figura 5.17 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando um filme ASTM classe II – vista simples. ....	98
Figura 5.18 – Imagem obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando o filme ASTM classe II com a técnica de vista composta, e em destaque as descontinuidades observadas na imagem. ....	99
Figura 5.19 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando um filme ASTM classe II – vista simples. ....	99
Figura 5.20 – Imagem do <i>Image plate</i> IPC2 obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	100
Figura 5.21 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando IP IPC2. ...	101
Figura 5.22 – Imagem do <i>Image plate</i> IMPROVED Kodak obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	101
Figura 5.23 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando IP IMPROVED. ....	102
Figura 5.24 – Imagem do <i>Image plate</i> IPU obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada. As marcações em azul mostram artefatos causados pelo IP. ....	103
Figura 5.25 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando IP IPU. ....	103
Figura 5.26 – Imagem do <i>Image plate</i> IPS obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	104
Figura 5.27 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando IP IPS. ....	104
Figura 5.28 – Imagem com utilização do detector digital obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> de 6 MeV utilizando uma matriz de detector digital. ....	105
Figura 5.29 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular <i>Betatron</i> PXB6 utilizando matriz de detector digital. ....	106
Figura 5.30 – Imagem do <i>Image plate</i> IPC2 obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	107
Figura 5.31 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPC2. ....	108
Figura 5.32 – Imagem do <i>Image plate</i> IMPROVED obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	108
Figura 5.33 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IMPROVED. ....	109
Figura 5.34 – Imagem do <i>Image plate</i> IPU obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	109
Figura 5.35 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPU. ....	110
Figura 5.36 – Imagem do <i>Image plate</i> IPS obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada. ....	110

Figura 5.37 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPU. .....	111
Figura 5.38 – Imagem com um detector digital obtida com Linatron M3 com 3 MeV utilizando uma matriz de detector digital. ....	112
Figura 5.39 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando uma matriz de detector digital. ....	112
Figura 5.40 – Imagem os defeitos D4 e D10 com área de avaliação da sensibilidade ao contraste. ....	113
Figura 5.41 – Perfil de linha da descontinuidade D4 para o detector digital DXR 250V. ....	114
Figura 5.42 – Perfil de linha da descontinuidade D10 para o detector digital DXR 250V. ....	114
Figura 5.43 – Perfil de linha da descontinuidade D4 para os detectores de placas de imagens – IP. ....	115
Figura 5.44 – Perfil de linha da descontinuidade D10 para os detectores de placas de imagens – IP. ....	116



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do Cobalto-60.....	27
Tabela 4.1 – Dados característicos e operacionais do acelerador Linatron 400 (VARIAN, 2010). .....	69
Tabela 4.2 – Dados característicos e operacionais do acelerador Linatron M3 (VARIAN, 2010).....	70
Tabela 4.3 – Dados característicos e operacionais do acelerador circular - Betatron PXB6 (JME, 2008). 71	
Tabela 4.4 – Dados característicos das fontes de Cobalto-60 (MASTER, R. C, 1959).....	72
Tabela 4.5 - Características dos equipamentos de RC.....	73
Tabela 4.6 - Descrição dos Image Plates. ....	73
Tabela 4.7 – Características do Detector Digital Direto utilizado. ....	74
Tabela 4.8 – Parâmetros para a técnica de múltiplos filmes e vista composta. ....	79
Tabela 4.9 – Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC.....	80
Tabela 4.10 – Parâmetros de leitura dos equipamentos de detector digital direto com radiação X.....	80
Tabela 4.11 – Parâmetros para a técnica de múltiplos filmes e vista composta. ....	81
Tabela 4.12 – Etapas, fontes de radiação, detectores e parâmetros de teste. ....	82
Tabela 5.1 – Áreas destacadas e suas descontinuidades. ....	85
Tabela 5.2 – Percentual de detectabilidade em cada sistema proposto, com destaque aos detectores de radiação nas técnicas convencional, computadorizada e digital direta. ....	86

**LISTA DE SIGLAS**

AFC	<i>Automatic Frequency Control</i> – Controle de Frequência Automático
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAM	<i>Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung</i>
BSR	<i>Basic Spacial Resolution</i> – Resolução Espacial Básica
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
DC	<i>Direct Current</i> – Corrente Direta
DD	Detector Direto
DDA	<i>Detector Digital Array</i> – Matriz de Detector Digital
DFD	Distância Fonte Detector
DO	Densidade Óptica
EBC	<i>Eletronic Beam Cured</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
IP	<i>Image Plate</i>
LNDC	Laboratório de Ensaio Não Destrutivo e Corrosão
PFN	<i>Pulse Forming Network</i> – Rede de Formação de Pulso
PMT	<i>Photomultiplier</i> – Fotomultiplicadora
PSL	<i>Photoestimulable Luminescence</i> – Luminescência Fotoestimulada
PSP	<i>Photoestimulable Phosphor</i> – Material Fotoestimulável
PSVS	Parede Simples Vista Simples
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i> – Polietileno
RC	Radiografia Computadorizada
RD	Radiografia Digital
RF	Radio Frequência
SNR <sub>N</sub>	<i>Normalized Signal to Noise Ratio</i> – Razão Sinal Ruído Normalizada
TFT	<i>Thin-Film Transistor</i> – Transistor de Película Fina

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos foram utilizados diversos métodos de Ensaio Não Destrutivo (END) para avaliar tubulações, peças de alto forno, vasos de pressão e muitos outros tipos de equipamentos e materiais, com diversas espessuras e tamanhos diferentes no segmento industrial. Com o avanço da tecnologia, surgiram equipamentos capazes de produzir feixes de raios X com alta energia que permitissem a análise de objetos com grandes espessuras e para esses equipamentos são testados a todo tempo diversos modelos de detectores de radiação.

No mercado atual existem alguns tipos de equipamentos portáteis capazes de produzir altas energias. Entre estes estão os equipamentos de gamagrafia que possuem fontes capazes de emitir feixes com energia acima de 1 MeV. Outro equipamento que está em grande expansão de sua utilização, é o acelerador circular por indução *Betatron*. No modelo portátil o *Betatron* é capaz de gerar feixes de raios X com até 6 MeV. Estes modelos portáteis foram produzidos para aplicações específicas, como exemplo em radiografia industrial, e permitem a sua utilização em campo, sem a necessidade de deslocar o material analisado do seu local de origem. O *Betatron* é considerado um transformador de alta voltagem que acelera os elétrons de forma circular, por mudança do campo magnético primário, adquirindo assim, altas velocidades, e conseqüentemente, transformando a energia cinética de um elétron em raios X, após o impacto destes elétrons com o alvo. Algumas das vantagens do uso desse equipamento, além de ser portátil, são: distribuição de alta taxa de dose, possuir foco com dimensões reduzidas (podem ser menor que 2 mm), tempo de exposição reduzido e o rendimento na conversão em raios X satisfatório.

Os processos de controle da qualidade de peças e produtos fundidos têm buscado por meio das novas tecnologias o aumento da sensibilidade, visando a detecção de descontinuidades que hoje em muitas indústrias, ainda são detectadas pelos métodos de radiografia convencional. Essas técnicas radiográficas convencionais estão no limite da sensibilidade dos filmes radiográficos industriais disponíveis, além do compromisso de buscar um tempo de exposição menor e ser sempre um dos fatores mais importantes a ser considerado na qualidade, segurança e produtividade, tanto na fábrica como no campo. Esse tempo será diretamente comprometido quando se leva em consideração grandes espessuras de

materiais fundidos sem a possibilidade de avaliações com alta energia de radiação X. Como detector nessa técnica é utilizado um filme bidimensional que absorve a radiação, após atenuação provocada pela variação de espessura e densidade dos materiais, sendo capaz de definir uma imagem após esse processo. Comumente, todos esses filmes são irradiados com fontes gama. Contudo, com a consolidação de novas tecnologias na área da radiografia industrial, alguns detectores de radiação constituem um grande benefício, uma vez que resultam em ganhos de produtividade, qualidade nas imagens finais, redução do tempo e redução dos poluentes ambientais.

Alguns sistemas de avaliação radiográfica utilizados na indústria, atualmente utilizam equipamentos emissores de radiação X de alta energia para avaliação de peças com espessuras acima de 100 mm de material de fundição. Um destes equipamentos é o acelerador linear no modelo Linac que geralmente são equipamentos industriais instalados em grandes bunkers por possuir design robusto, principalmente pelo seu dissipador de calor que geralmente é alimentado por água. Nessa forma, esses equipamentos não possuem nenhuma facilidade em deslocar-se até onde o produto esteja instalado, forçando assim, a retirada e locomoção do mesmo, até o equipamento de alta energia. O *Betatron* é uma promessa de solução para este tipo de análise, desde que os sistemas de detecção sejam compatíveis com estes equipamentos portáteis. Para avaliação destas fontes de alta energia foram testados alguns tipos de sistemas de detecção da radiação.

Um dos sistemas é a radiografia computadorizada (RC) que consiste em sensores de radiação e sistemas de aquisições para processamento da imagem. O sensor de radiação é formado por uma placa fotoluminescente denominada *image plate* (IP), que consiste em um sensor de radiação do tipo detector bidimensional flexível feito de BaFX:Eu<sup>+2</sup> (X = Cl, Br, I) que após ser exposto à radiação ionizante, acumula essa energia, utilizando materiais fotoestimuláveis para a formação da imagem latente (TAKAHASHI, K., 2002). Após exposição, o *image plate* é inserido no escaner e estimulado por um feixe de laser de luz vermelha ( $\lambda = 700$  nm), onde os cristais liberam a energia armazenada sob a forma de luz visível (luminescência fotoestimulada – PSL), cuja intensidade é proporcional à radiação recebida sobre a placa. As placas armazenam, primeiramente uma imagem latente, e após o estímulo, esta imagem latente será processada e se transformará em imagem radiográfica digital.

Outro sistema avaliado foi a radiografia digital que utiliza uma matriz de detectores digitais com um conversor de radiação de forma indireta, acoplados a uma matriz de Transistor de Película Fina (TFT) para chaveamento do sinal. Esse equipamento também conhecido por sua base plana e não flexível é chamado de “*flat panel*” que possui uma matriz de fotodiodos, acoplados a um cintilador, sobre uma matriz plana e seu modo de conversão consiste em converter a radiação incidente em luz, utilizando um cintilador, como exemplo o *Iodeto de Césio* (CsI) e o *Oxisulfato de Gadolínio* ( $Gd_2O_2S$ ). Logo após detectar esta luz, o fotodiodo converterá em carga e armazenará em um capacitor independente para cada *pixel*. Para liberação da carga no capacitor, para amplificação e posteriormente formação da imagem, é utilizado o transistor TFT para o chaveamento. Este sistema utilizado teve suas limitações devido à baixa proteção às altas energias de radiação que possam incidir sobre os componentes eletrônicos utilizados no detector.

A obtenção de laudos mais precisos, deve-se ao constante empenho das empresas em melhorar a qualidade das imagens digitais, utilizando a radiografia computadorizada e a radiografia digital direta, uma vez que para isso, os equipamentos deveriam passar por melhorias tecnológicas, para acompanhar a demanda das diferentes inspeções nos diversos segmentos industriais. As características desses equipamentos devem ter ajustes específicos para os diferentes tipos de IPs e detectores digitais que possuem características particulares em relação a sua estrutura física e composição do material absorvedor, as quais interferem, diretamente na qualidade da imagem radiográfica digital. Os fabricantes estão produzindo IPs com tamanho de grãos cada vez menores e sua espessura da camada sensível, ainda mais fina, assim como os “*flat panels*” estão sendo produzidos com *pixels* muito menores. Estas melhorias agregam valores importantes para a garantia da qualidade na imagem digital com a utilização de fontes de alta energia, permitindo uma gama de espessuras muito maior para estes IPs.

Neste trabalho o objetivo principal foi avaliar os resultados obtidos com o sistema radiográfico que utilizou um acelerador circular – *Betatron* com 6 MeV de energia, em conjunto com a radiografia computadorizada e a detecção digital direta, e qualificar os resultados desses sistemas em relação aos resultados obtidos com os sistemas que utilizaram os aceleradores lineares com energias de 3 e 4 MeV e uma fonte de Cobalto-60. Assim, foi possível verificar cada procedimento utilizado e avaliar as técnicas radiográficas em cada

ensaio e compará-los no que diz respeito à detectabilidade dos defeitos, assim como a comparação desses defeitos através da sensibilidade ao contraste são objetivos deste estudo.

No capítulo 2 serão apresentadas as revisões bibliográficas do estado da arte da radiografia digital para avaliação com alta energia de materiais fundidos.

No capítulo 3 será apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão do tema do trabalho, abordando temas como as características de emissão da radiação X geradas com altas energias, processos de formação da imagem radiográfica e funcionamento do sistema de radiografia computadorizada.

No capítulo 4 serão descritos os procedimentos experimentais e equipamentos utilizados para realização deste estudo.

Nos capítulos 5 e 6 serão apresentados, respectivamente, os resultados e as conclusões alcançadas a partir do estudo proposto.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentado neste capítulo o estado da arte da radiografia digital utilizando alta energia nas inspeções de materiais fundidos.

A história dos testes radiográficos realmente envolve dois pontos cruciais para o início do seu descobrimento. O primeiro começou com a descoberta dos raios X por Wilhelm Conrad Roentgen, em 1895, e a segunda com o anúncio por Marie final Pierre Curie, em dezembro de 1898, que tinham demonstrado a existência de um novo material radioativo chamado de "rádio" (Hellier, *et. al.*, 2003).

#### *Radiografia Digital*

Imagens em tempo real no campo da radiografia industrial chegaram mais de meio século atrás e mesmo antes disso, em radiografia médica. Todo o progresso em campo para os primeiros 30 - 35 anos após a descoberta da radiografia só produziu imagens analógicas. As imagens digitais vieram, recentemente em placas com materiais fluorescentes, imagem de intensificador com foco de proximidade, em seguida, intensificador eletromagneticamente focado produziu imagens em tempo real em analógico e foram vistas em câmeras de vídeo analógicas. Em meados dos anos oitenta que o sinal, a partir desses dispositivos de câmera de vídeo puderam ser digitalizadas, usando cartões de um isolador de quadros (*Frame Grabber cards*).

Embora esta técnica não possa ser chamada de radiografia digital em um sentido restrito, o formato da radiografia digital entrou no campo em tempo real (RTR), pela primeira vez por esse segmento. Foi então possível modificar alguns parâmetros da imagem, o que chamamos de "processamento de imagem", atualmente. Estas operações foram *off-line*, inicialmente, como os cartões digitalizadores de forma relativamente lenta. Larguras de banda de 5 MHz e acima vieram mais tarde e o processamento de imagem virou "quase em tempo real". Em meados dos anos noventa foram fabricados os primeiros detectores que produziam saídas, diretamente em formato digital. Em um desses sistemas, um deles utilizava placa de imagem, e mesmo com seu processo analógico, eram lidos em um equipamento controlado por computador, portanto, a saída pode ser digital. Este processo é chamado de "Radiografia

Computadorizada” (RC). A outra foi uma família de detectores com base em semicondutores. Antes dos CCD e CMOS se fixarem no mercado, o desenvolvimento desta tecnologia, rapidamente atingiu o ponto mais alto com os detectores do tipo *flat panel*, como são chamados os detectores diretos hoje. A técnica de usá-los é chamada de “Radiografia Digital” (DR) à saída do sinal ser digital derivando em uma imagem visual (VAIDYA, 2010).

### *Altas energias*

O uso de campos eletromagnéticos macroscópicos para a aceleração de partículas carregadas data de meados do século XIX. Os grandes tubos de raios X iniciais já continham em miniatura o mesmo sistema de fonte, vácuo, fonte de alimentação, estrutura de aceleração e mais tarde estes dispositivos se tornaram muito maiores. Em sua descoberta do elétron, J. J. Thompson usava no final do século XIX aceleradores de partículas primitivas deste tipo. Tubos de raios catódicos de hoje, que aceleram elétrons com algumas dezenas de quilovolts, são os descendentes diretos desses dispositivos. Algumas décadas se passaram antes que a tecnologia permitisse o desenvolvimento de potenciais eletrostáticos na faixa de centenas de quilovolts. Mesmo que o progresso na aceleração de elétrons com corrente contínua (DC) tenha ajudado o campo eletromagnético, variando com o tempo, foi reconhecido como o caminho mais fácil para alcançar energias ainda mais altas. O antecessor do acelerador linear moderno foi desenvolvido por Wideroe em 1928; o *Ciclotron* foi proposto no ano seguinte por Lawrence, e a aceleração de elétrons foi demonstrada neste primeiro acelerador circular em 1931. O desenvolvimento do *Ciclotron* progrediu, rapidamente, e no final da década, os equipamentos com energia cinética acima de 10 MeV foram produzidos. Após esta década, todos que estudavam estes equipamentos puderam ver as novas invenções criadas como: o *Síncrotron*, o *Sincrociclotron*, o *Betatron*, e o *linac*. Em 1950, prótons e elétrons haviam sido acelerados até uma energia cinética de 30 MeV. No entanto, energias mais elevadas foram logo alcançadas, auxiliado pela invenção do *Síncrotron* (EDWARDS, *et. at.*, 2004).

PARIDA (1999) utilizou os Ensaios Não Destrutivos (END) na inspeção de produtos fundidos/componentes com intuito de certificar-se de que o componente ou peça em operação irá realizar a sua finalidade de forma satisfatória. Um dos ensaios não-destrutivos feito na avaliação do material foi a radiografia com fonte de radiação X. A interpretação dos dados obtidos através de END durante essas inspeções são realizadas medidas usando o conceito da mecânica da fratura. De acordo com a mecânica de fratura, falhas como fissuras presentes no material crescem sob a ação conjunta do estresse e o ambiente durante o serviço, e, em última



análise conduz a falhas no componente devido ao crescimento das dimensões críticas. Os conceitos de mecânica da fratura permitem calcular o tamanho crítico de defeito e permitir estimar a vida útil restante do componente. A peça analisada possui alguns defeitos comuns que ocorrem durante o processo de solidificação em materiais fundidos como: inclusões não metálicas, contração de volume, macro encolhimento (tubulação), encolhimento central, micro encolhimento e trincas por fadiga do material durante o resfriamento. Todo o estudo foi baseado na análise de defeitos com radiação X e gama, e cada uma delas para uma dada espessura e tipo de material. A radiografia convencional é utilizada para análise dos defeitos e, para determinar o tipo de fonte de radiação, são usadas referências normativas da ASTM de acordo com o material e espessura. Um exemplo é a norma ASTM E280 que indica o uso raios X de alta energia e fonte de Cobalto-60 para a inspeção de aço fundido com espessuras de parede entre 11,4 e 30,4 mm. A avaliação desse estudo indica que a menor variação detectável na espessura do metal situa-se entre 0,5 e 2,0 por cento da espessura total da seção analisada. Falhas estreitas pouco perceptíveis (trincas) devem situar-se num plano aproximadamente paralelo ao feixe de raios X incidente.

SHINOHARA *et. at.* (2002), visando um estudo de avaliação detalhada do grau de corrosão nos tubos de aço de diferentes diâmetros em torno de 25 a 50 mm e sobre a integridade dos isoladores de alta tensão utilizados nas torres de transmissão através de gamagrafia digital, realizou vários testes utilizando uma fonte de raios gama de Irídio-192 e uma placa de imagem *Image Plate*. Como resultado, imagens radiográficas digitais de excelente nitidez e resolução foram obtidas utilizando uma fonte de Ir-192 com atividade de 1,5 Ci, que corresponde em torno de 10% da intensidade necessária para obtenção de radiografias na gamagrafia convencional. Este fato permite também mostrar uma importância fundamental do ponto de vista de proteção radiológica devido a redução significativa de doses radioativas que os operadores estão sujeitos e necessidade mínima de área de balizamento na realização de ensaios radiográficos com raios gama. Estes resultados permitem concluir a potencialidade e viabilidade do uso da técnica digital aliada à gamagrafia.

SANDLIN (2010) tinha como objetivo investigar nas aplicações de radiografia com alta energia em inspeção da solda de vedações em tampas de barris feita em cobre fundido, que eram utilizados para guarda de elemento combustível radiativo. O recipiente estava cheio de resíduos radioativos quando a inspeção foi feita. Este fato define a exigência de que as inspeções devem ser completamente automatizadas. Foi utilizado um acelerador linear de 9

MeV de energia devido a espessura do material em cobre que variou entre 40 e 120 mm. Com altas energias para a proteção radiológica nos locais de teste ficou muito mais difícil ter controle sobre a segurança do pessoal envolvido. Todos estes aspectos fazem da inspeção em peças de cobre com alta energia muito importante nesta área. Foi preciso avaliar alguns fatores antes da montagem do arranjo experimental como: a geometria da solda na peça, a atenuação da radiação e as dispersões causadas pelo cobre. O arranjo de inspeção por raios X utilizado na instalação consiste em um detector digital de silício amorfo com resolução de 4 mm e um acelerador linear Linatron 3000 com 9 MeV de energia. Durante a inspeção o recipiente está girando enquanto a fonte e o detector são estacionários angulados a peça, mas perpendiculares entre si. Este sistema foi concebido para ser capaz de detectar poros de 1 mm de espessura em uma área de 100 mm<sup>2</sup> do cobre. Neste arranjo o feixe incidente forma um ângulo de 35 graus com o plano da solda. Os testes mostraram as imagens digitais geradas por estes detectores podem ser equivalentes ou melhores que as imagens geradas nos filmes convencionais para a maioria das aplicações e no caso particular deste estudo provou ser a melhor alternativa de substituição dos filmes. Para o ensaio de raios X com acelerador na base da solda de vedação no recipiente de deposição final, um detector digital colimado é de extrema necessidade. Estes detectores de *flat panel* foram úteis por sua baixa sensibilidade à radiação dispersa e à radiação de fundo do elemento combustível dentro do barril de cobre. Supõe-se também que a radiografia estereoscópica vai melhorar a resolução de defeitos com raios X e ajudar a determinar a localização dos defeitos na direção mencionada. O potencial da radiografia estereoscópica de alta energia, por conseguinte, deve ser estudada.

KOLKOORI, *et. al.* (2014) apresenta uma técnica de imagem dupla alta energia de raios X para inspeção contêiner de carga usando o “método de atenuação do espectro de alta energia de raios X”. Este método baseia-se na atenuação de espectros de alta energia contínua. A técnica experimental desenvolvida consiste num *Betatron* com alta energia (até 7,5 MeV) como fonte de raios X e uma matriz de detectores digitais com tamanho de *pixel* de 200 µm. A fim de avaliar a capacidade de detectabilidade nas imagens de materiais utilizando dupla alta energia de raios X, as amostras de teste propostas foram materiais de baixo e alto número atômico (Z) com formato de cunha e diferentes espessuras de degraus. O espectro de raios X selecionado para os experimentos de dupla energia correspondem a 3 MeV e 7,5 MeV. Foi avaliada a relação quantitativa entre os coeficientes de atenuação de baixa e alta energia de raios X com base em simulação dos espectros de fonte poli-energética de alta energia de raios X e a sensibilidade do detector, utilizando “ferramenta de simulação de teste de inspeção com

análise radiográfica" (aRTist) desenvolvido pelo BAM. Os coeficientes de atenuação efetivos simulados são comparados com os correspondentes resultados experimentais, de modo a estabelecer um método para a identificação de materiais de baixo e alto número atômico ( $Z$ ) no container. Para finalizar são discutidas aplicações importantes da técnica proposta no contexto de segurança na aviação. Os resultados numéricos sobre a variação da função de dupla energia com número atômico ( $Z$ ) com energias mais elevadas de raios X, mostrou que a capacidade de discriminação de material é reduzida em número atômico  $Z \leq 10$  e  $Z > 46$ . Foi observado também que a precisão da discriminação de materiais em containers de carga poderia ser melhorada, considerando o efeito da espessura do material sobre eficácia do coeficiente de atenuação. Os equipamentos mostraram um desempenho satisfatório para as avaliações dos resultados. As imagens digitais com uso de dupla alta energia de raios X medidos em um *phantom* de ensaio contendo materiais em cunha de diferentes espessuras de baixo e alto número atômico ( $Z$ ) foram comparados com os resultados da simulação obtidos utilizando o programa de simulação aRTist. Foram obtidos resultados quantitativos equivalentes entre simulação e experimentos.

## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 – Processo Radiográfico

A radiografia é a técnica que permite a utilização da radiação eletromagnética para inspecionar um objeto com estrutura não uniforme. A interação da radiação com o material analisado poderá ser detectado por um filme, através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de um objeto absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Com a variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um meio, irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou descontinuidade no material.

##### 3.1.1 – Formação da Imagem Radiográfica

Ao considerar uma fonte emissora existente, a intensidade inicial da radiação eletromagnética que atravessa um objeto decrescerá exponencialmente com a espessura do mesmo, de acordo com a equação 3.1.

$$I = I_0(E).exp(-\mu(E)x) \quad (3.1)$$

onde,

E é a energia da radiação incidente;

$I_0$  é a intensidade da fonte de radiação;

I é a intensidade da radiação após atravessar o material;

x é a espessura do material;

$\mu$  é o coeficiente total de absorção do material.

O coeficiente de absorção total é definido como a soma dos coeficientes representados pelos processos de absorção da radiação pela matéria, ou seja, efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares,  $\mu_f$ ,  $\mu_c$  e  $\mu_p$ , indicando respectivamente a probabilidade de ocorrência dos fenômenos mencionados. Dessa forma, diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material terão como consequência uma variação na intensidade do feixe transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação. Dessa forma a descontinuidade aparecerá no detector devido à variação entre as intensidades da radiação que passa através da parte homogênea do corpo e através da descontinuidade, como mostra a figura 3.1.

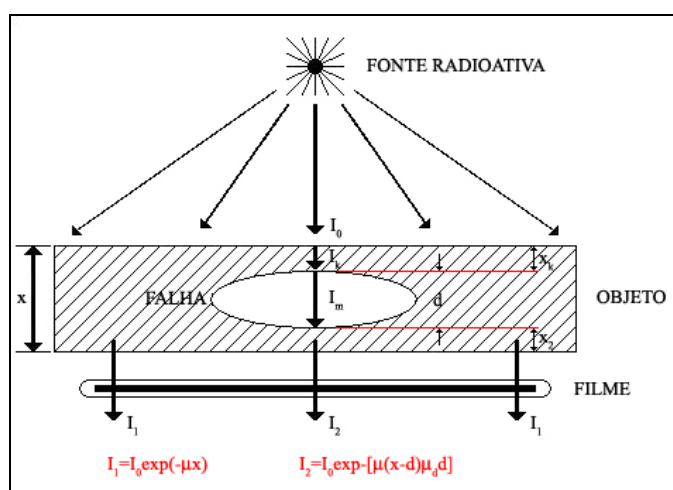


Figura 3.1 – Processo Radiográfico (OLIVEIRA, 2007).

A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação no material e na descontinuidade aumenta com o aumento entre a diferença das densidades do objeto com e sem descontinuidade, e dessa forma, a sensibilidade desse método é diretamente proporcional à densidade do objeto e inversamente proporcional à da descontinuidade. O coeficiente de absorção varia inversamente com a energia (efeito fotoelétrico e Compton), e, portanto, haverá perda de sensibilidade para fontes de energias mais altas (OLIVEIRA, 2007).

### 3.1.2 – Interação da Radiação com a Matéria

Apesar de um grande número de possíveis mecanismos de interação da radiação com a matéria ser conhecidos, apenas os três tipos mais importantes serão apresentados nesta seção: absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares. Todos estes processos consistem na transferência parcial ou completa da energia do fóton para a energia do elétron.

Estes resultam em mudanças súbitas e abruptas na trajetória do fóton, onde este pode desaparecer inteiramente ou ser espalhado em um ângulo significativo (KNOLL, 2000).

### 3.1.2.1 – Absorção Fotoelétrica

Caracterizado pela transferência total de energia de um fóton (radiação X ou gama), que é absorvido completamente. Em seu lugar, um elétron orbital é ejetado pelo átomo com uma energia cinética bem definida. A interação acontece com o átomo como um todo e não pode ocorrer para elétrons livres. Para fótons com energia suficiente, a origem mais provável de fotoelétrons é a camada mais fortemente ligada ou camada K do átomo. O fotoelétron aparece com energia dada pela equação 3.2 (KNOLL, 2000).

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (3.2)$$

Onde  $E_b$  representa a energia de ligação do elétron em sua camada original. Para fótons com energias maiores que algumas centenas de keV, o fotoelétron carrega consigo a maioria da energia original do fóton.

Adicionalmente ao fotoelétron, a interação cria ainda um átomo absorvedor ionizado com vacância em uma de suas camadas eletrônicas. Essa vacância é rapidamente preenchida através da captura de um elétron livre do meio e/ou o rearranjo de elétrons de outras camadas do átomo. Além disso, um ou mais raios X característicos podem também ser gerados, entretanto na maioria dos casos esses fótons de raios X são reabsorvidos próximos a sua origem através de absorção fotoelétrica envolvendo camadas eletrônicas menos ligadas.

O processo de absorção fotoelétrica é o modo de interação predominante para fótons de baixa energia relativa. O processo é ainda reforçado para materiais absorvedores de alto número atômico  $Z$ . Não há uma expressão analítica válida para a probabilidade de absorção fotoelétrica por átomo para toda a faixa de energias e números atômicos, porém a aproximação grosseira é mostrada na equação 3.3 (KNOLL, 2000).

$$\tau \cong \text{constante} \times \frac{Z^n}{E^{3,5}} \quad (3.3)$$

Onde o expoente  $n$  varia entre 4 e 5 para a região de interesse de energia de fótons. Essa severa dependência da probabilidade da absorção fotoelétrica com o número atômico do

absorvedor é a razão primária para a preponderância de materiais de alto Z em blindagens para fótons (KNOLL, 2000).

### 3.1.2.2 – Espalhamento Compton

Este efeito ocorre quando o fóton interage com um elétron periférico do átomo, mas cede apenas parte de sua energia, resultando na emissão de um fóton com energia menor e que continua sua trajetória dentro do material e em outra direção. Este é o mecanismo de interação predominante para energias de fótons típicos de fontes de radioisótopos.

No espalhamento Compton, o fóton incidente é desviado sob um ângulo  $\theta$  da direção original. O fóton transfere parte de sua energia ao elétron (assumindo que está inicialmente em repouso), que passa a ser chamado de elétron de recuo. Como todos os ângulos de espalhamento são possíveis, a energia transferida para o elétron pode variar de zero até grandes frações da energia do fóton (KNOLL, 2000).

A figura 3.2 mostra a ilustração do espalhamento Compton.

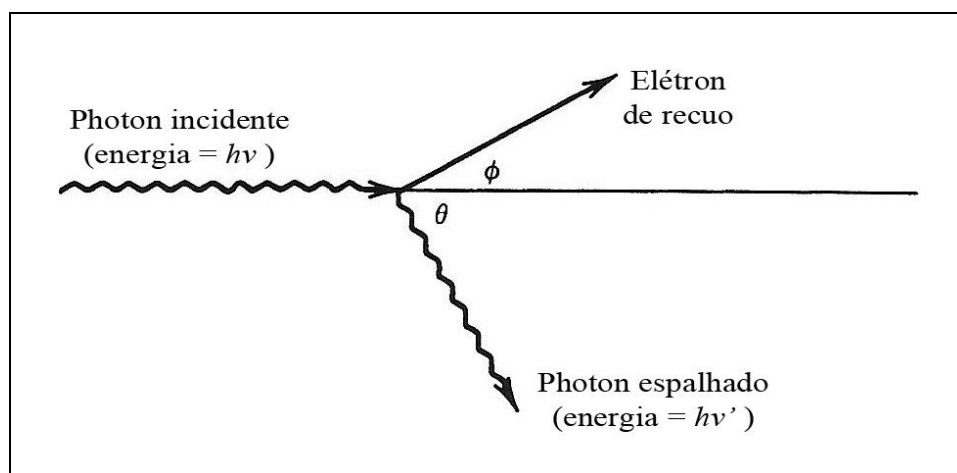


Figura 3.2 – Espalhamento Compton (KNOLL, 2000).

A expressão que relaciona a transferência de energia e o ângulo de espalhamento para qualquer interação pode ser simplesmente derivada escrevendo equações simultâneas para a conservação de energia e momento, como mostra a equação 3.4.

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (3.4)$$

Onde  $m_0c^2$  é a energia de repouso do elétron (0,511 MeV). Para pequenos ângulos de espalhamento  $\theta$ , pouca energia é transferida. Parte da energia original é sempre retida pelo fóton incidente, mesmo no extremo  $\theta = \pi$ .

A probabilidade de espalhamento Compton por átomo do absorvedor depende do número de elétrons disponíveis como alvos de espalhamento e assim aumenta linearmente com Z. A distribuição angular do fóton espalhado é predita pela fórmula de Klein-Nishina para seção de choque diferencial de espalhamento  $d\sigma/d\Omega$ , como mostra a equação 3.5 (KNOLL, 2000).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (3.5)$$

Onde  $\alpha \equiv hv/m_0c^2$  e  $r_0$  é o raio clássico do elétron. A distribuição é mostrada graficamente na figura 3.3 e ilustra a forte tendência do espalhamento para frente para altos valores de energia do fóton.

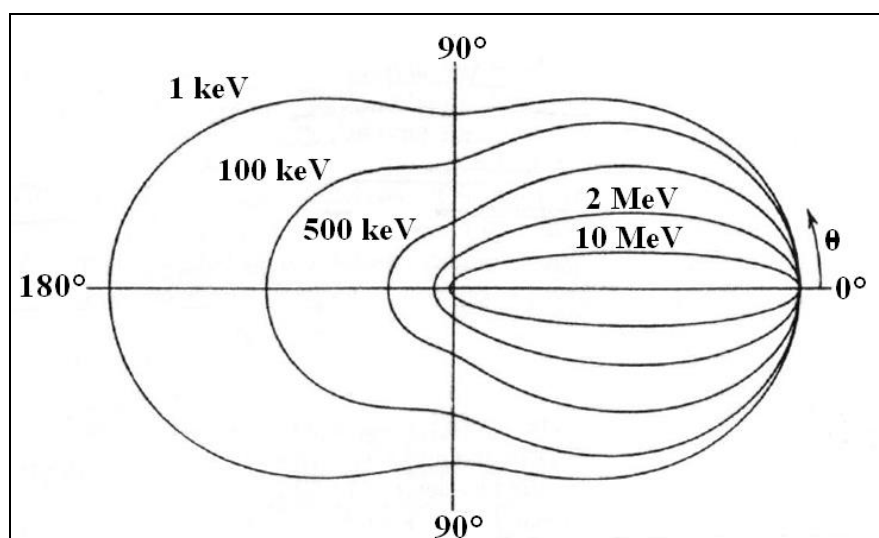


Figura 3.3 – Seção de choque diferencial de espalhamento Compton (KNOLL, 2000).

### 3.1.2.3 – Produção de pares

Se a energia do fóton excede o dobro (1,02 MeV) da energia de repouso do elétron, o processo de produção de pares é energeticamente possível. A probabilidade dessa interação permanece muito baixa até a energia do fóton se aproximar de vários MeV e assim a produção de pares está predominantemente confinada a fótons de altas energias. Na interação (que



acontece no campo coulombiano do núcleo), o fóton desaparece e é substituído por um par elétron-pósitron (KNOLL, 2000).

Todo o excesso de energia contida no fóton acima dos 1,02 MeV necessários para criar o par se transforma em energia cinética compartilhada pelo elétron e pelo pósitron. Como o pósitron irá subsequentemente se aniquilar após entrar em um meio absorvedor, dois fótons de aniquilação são normalmente produzidos como produtos secundários da interação.

Não existe uma simples expressão para a probabilidade de produção de pares por núcleo, porém sua magnitude varia aproximadamente com o quadrado do número atômico do absorvedor. A importância relativa dos três processos descritos anteriormente para diferentes materiais absorvedores e energias do fóton são ilustradas na figura 3.4. A linha a esquerda representa a energia que a absorção fotoelétrica e o espalhamento Compton são igualmente prováveis em função do número atômico do absorvedor. A linha a direita representa a energia que o espalhamento Compton e a produção de pares são igualmente prováveis. Assim três áreas são definidas no gráfico onde a absorção fotoelétrica, o espalhamento Compton e a produção de pares predominam em cada (KNOLL, 2000).

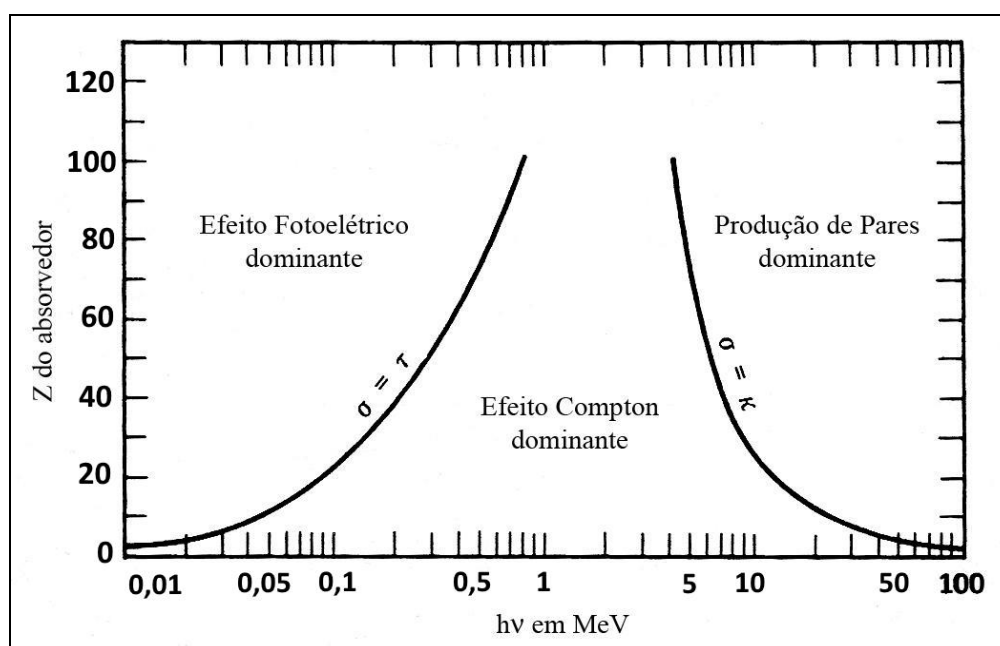


Figura 3.4 – Importância relativa dos três principais processos de interação (KNOLL, 2000).

## 3.2 – Fontes de Radiação de Alta Energia

### 3.2.1 – Acelerador Circular – *Betatron*

O nome *Betatron* vem do símbolo grego *beta*, usado cientificamente para indicar elétrons de alta energia, e do sufixo *tron*, que significa *instrumento para*. O *Betatron* é um instrumento para produzir elétrons de alta energia.

O *Betatron* opera segundo o princípio de um transformador de corrente alternada. Este tipo de transformador modifica uma voltagem alternada em outra. A explicação de seu funcionamento reside no fato de que uma corrente elétrica pode criar magnetismo, e, inversamente, esse magnetismo pode criar uma corrente elétrica.

Em 1941, alguns pesquisadores empenhados na construção deste equipamento consideraram essas possibilidades descritas, anteriormente e utilizaram o campo elétrico, associado a um campo magnético que poderia variar em função do tempo como um meio de acelerar os elétrons. Esta era uma possibilidade muito atraente, porque o campo magnético pode ser usado para gerar uma órbita circular ou espiral e manter o elétron fixo nela, e ao mesmo tempo, o fluxo magnético dentro da órbita aumenta e causa um campo elétrico tangencial ao longo da órbita (KERST, 1941).

Colocando uma bobina em torno de cada peça polar magnética e aplicando uma corrente alternada, o campo magnético gerado aumenta o espaço de ar entre as peças polares magnéticas. Devido a este espaço no núcleo, a permeabilidade magnética entre as peças polares possuem pouco efeito sobre as propriedades magnéticas que aceleram e guiam os elétrons, e para isto acontecer, a permeabilidade deve ser suficientemente elevado, acima de 2000. Com a confecção correta das peças polares, o campo magnético criado por elas exerce uma força sobre os elétrons e faz com que eles permaneçam em uma órbita estável no centro da câmara de vidro. À medida que o material do filamento (catodo) é aquecido, os átomos são atraídos pelo anodo, entre o catodo e o anodo ficam imersos no vácuo da câmara de vidro, onde são facilmente arrastados pelo campo magnético, logo após este campo ser produzido pela bobina secundária. Isto só acontece quando este campo magnético chega ao seu máximo.

Na câmara a vácuo, os elétrons levam aproximadamente  $1/720$  segundos para circularem em torno da trajetória da câmara e chegar à sua máxima energia.

A figura 3.5 apresenta um corte transversal da câmara de vidro e mostra a trajetória dos elétrons após sua injeção até colidir com o alvo.

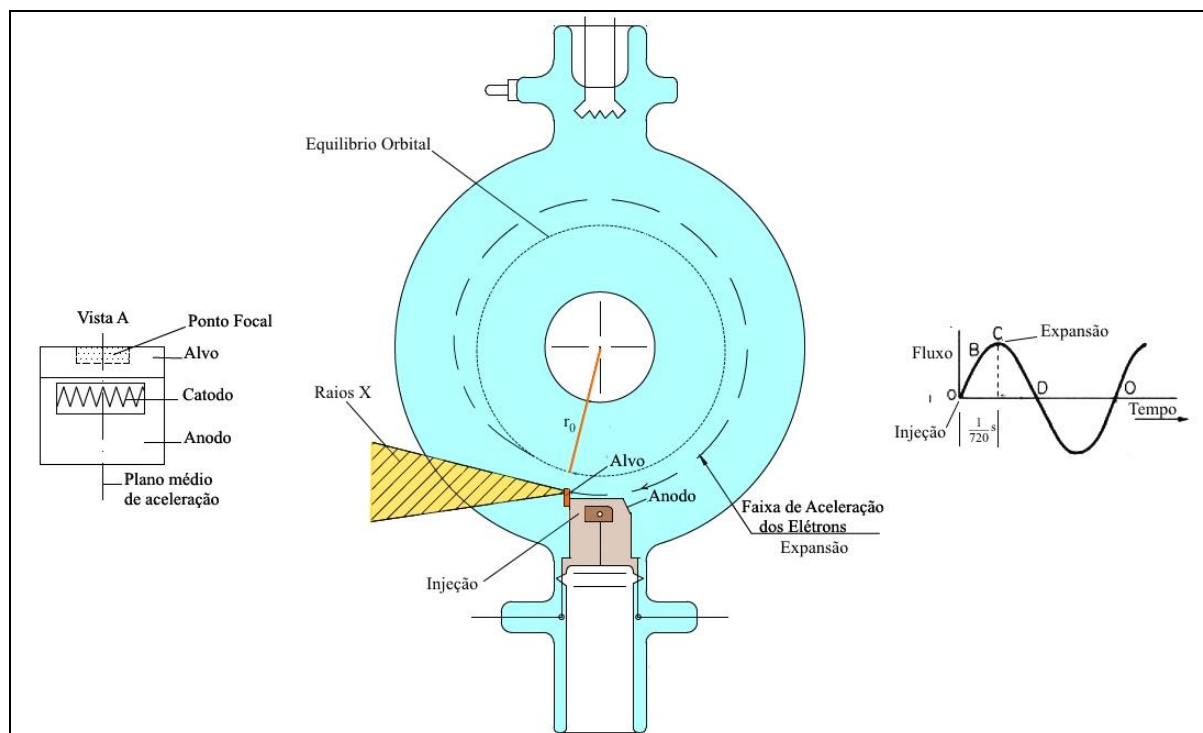


Figura 3.5 – Princípio de funcionamento de um *Betatron* (JME, 2008).

A órbita em equilíbrio é perturbada pelo defletor, e os elétrons acelerados são guiados até sair de sua trajetória e atingem um ponto metálico (alvo de tântalo) localizado no injetor (acima do anodo). Quando os elétrons de alta energia batem nesse alvo, são formados raios X de alta energia, que saem da câmara de vácuo em uma trajetória retilínea com alto poder de penetração. A cada máximo da corrente alternada com 180 ciclos da bobina principal, os raios X, ou elétrons, neste caso, saem através de impulsos ou explosões e nunca de forma contínua.

### 3.2.1.1 – O Eletroímã

O transformador *Betatron* pode ser descrito como duas bobinas que circulam em torno de uma peça de polo magnético, presa ao núcleo magnético, mais precisamente na barra central do cabeçote. Frequentemente, os modelos mais complexos são mais eficientes e um destes tem barras, em cima e em baixo, ligadas por três *pernas* verticais, como pode ser visto na figura 3.6. Esta figura mostra um corte longitudinal e transversal da peça polar magnética e em destaque a câmara de vidro em azul no corte longitudinal.

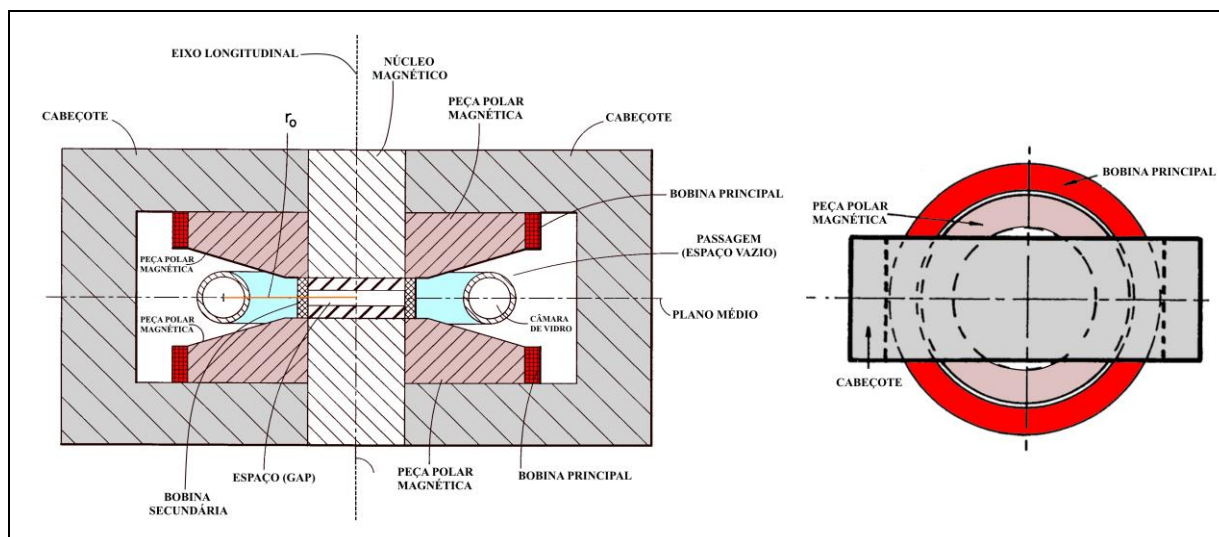


Figura 3.6 – Visão longitudinal e transversal do *Betatron* (PERKINS, 2007; BRYANT, 1994).

A bobina é dividida em duas partes: uma no alto e a outra na parte inferior do cabeçote. A câmara de vácuo fica localizada no lugar de uma bobina secundária, entre as duas partes da bobina principal.

No *Betatron* com alguns milhões de volts, seu núcleo magnético central é separado através de um espaço de ar ou de algum tipo de material não magnético ou não condutor, em que a câmara fica localizada. Isto permite não só que o magnetismo impulse os elétrons dentro da câmara, mas também lhe permite executar outra tarefa que é a de manter os elétrons em sua órbita no interior da câmara de vidro.

Para que os elétrons mantenham-se em órbita estável, o equilíbrio orbital (*condição de Betatron*) deve ser satisfeita. Simplificando, essa condição de equilíbrio requer que o campo médio que engloba a órbita de elétrons (ou seja, o campo da bobina primária) deve ser o dobro do campo criado pela bobina secundária. Para que a órbita dos elétrons permaneça fixa no interior da câmara a vácuo, esta proporcionalidade dos campos deve ser mantida durante todo o processo de aceleração. A ativação da bobina principal cria um fluxo magnético que confina e acelera os elétrons contidos na câmara alojada na passagem entre as peças de polo magnético como mostra a figura 3.7.

Para manter o equilíbrio orbital e acelerar elétrons a uma velocidade relativista, a equação 3.6 mostra a condição que deve ser satisfeita:

$$\Delta\varphi_0 = 2\pi r_0^2 \cdot \Delta B_{y0} \quad (3,6)$$

onde:

- $r_0$  é o raio central da órbita da câmara de vidro localizada, aproximadamente, no centro equidistante das peças polares magnéticas;
- $\Delta\varphi_0$  representa a variação do fluxo fechado no raio central  $r_0$ ; e
- $\Delta B_{y0}$  é a alteração no campo guia no raio central  $r_0$ .

O equilíbrio orbital entre  $\Delta\varphi_0$  e  $\Delta B_{y0}$  é assegurado, quando a escolha adequada da largura adequada de um ou mais espaços no núcleo magnético é mantido. Estas lacunas podem ser preenchidas por ar, materiais não metálicos ou materiais não magnéticos e que tenha uma temperatura de fusão superior a 150° C.

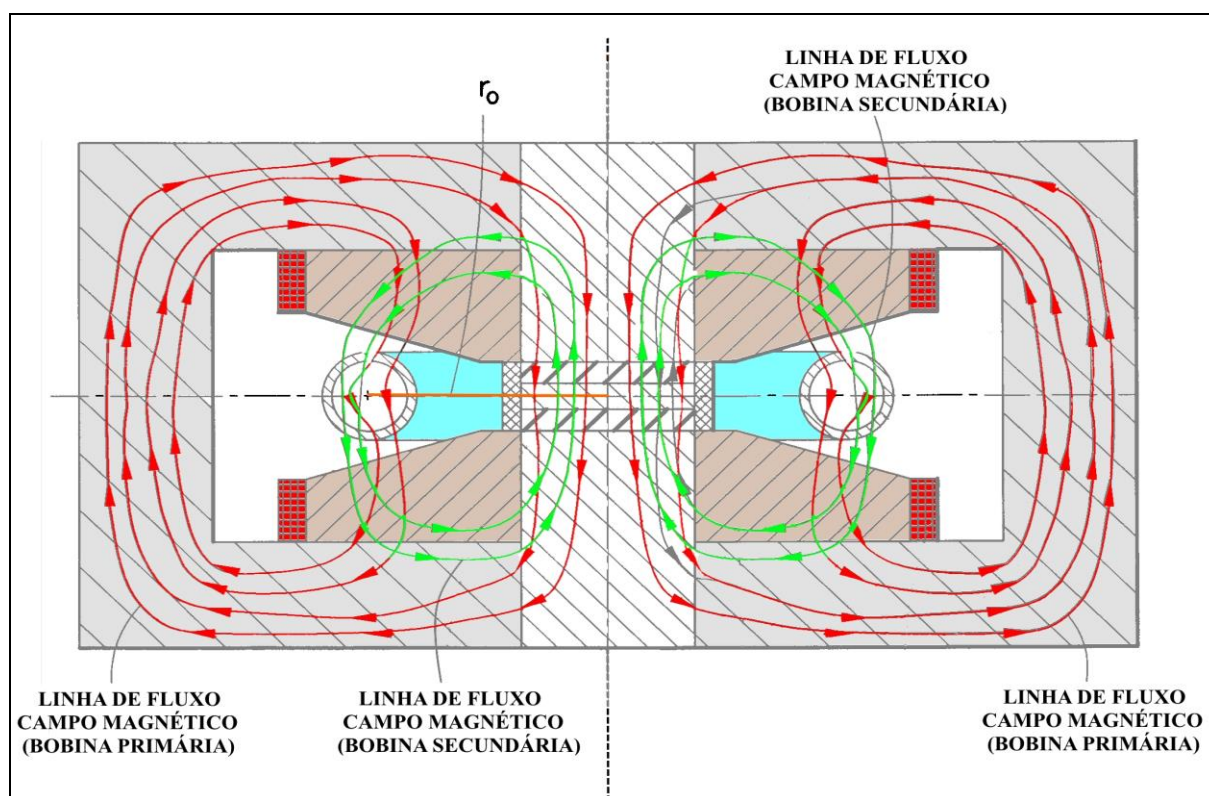


Figura 3.7 – Versão longitudinal com destaque para as linhas de fluxo produzidas pelas bobinas primárias (vermelho) e bobinas secundárias (verde) que ilustram o campo magnético.

### 3.2.1.2 – A Câmara de Aceleração

O principal objetivo da construção desta câmara é para que seu volume fosse o maior possível, para garantir uma orbital centra ampla. Para este fato ser concreto, a câmara de vidro teria que ser na forma de anel com paredes paralelas às faces das peças de polo magnético. Esta câmara esférica varia seu diâmetro entre 10 e 20 cm e possui espessura de parede de 2,5 mm com forma achatada como mostrado na figura 3.8.

Construída a partir de um vidro de baixa expansão térmica ou de cerâmica cujas superfícies interiores foram revestidas com uma fina camada de prata (material condutor) quimicamente depositada. Esta câmara possui um revestimento necessário para evitar a descarga elétrica e dispersões potenciais do feixe de elétrons, que possam acumular nas paredes ou que prejudiquem a circulação do feixe. Para que isso não ocorra o revestimento é ligado ao aterramento do equipamento.

Durante a o equilíbrio orbital, o volume interior da câmara está sob um vácuo de aproximadamente  $133,32 \times 10^{-8}$  Pa até  $133,32 \times 10^{-9}$  Pa, a fim de minimizar a perda de elétrons a partir de colisões com as moléculas de gás residual. O volume interior da câmara se sobrepõe entre as peças dos polos magnéticos (ver figura 3.7), de tal maneira que as órbitas estáveis de baixa intensidade não interceptam a parede da câmara (KERST, 1941).



Figura 3.8 – Câmara de aceleração de elétrons de um *Betatron* de 6 MeV (KERST, 1941).

### 3.2.2 – Acelerador Linear

Os aceleradores Lineares combinam as mais recentes vantagens conseguidas em mais de 40 anos de pesquisa básica em física nuclear, física de plasma, propagação de microondas e tecnologia de alto vácuo. Os aceleradores lineares consistem, basicamente de três partes fundamentais como na figura 3.9 e na figura 3.10, console, cabeçote, e modulador (VARIAN, 1980) (VARIAN, 2011).



Figura 3.9 – Modelo de Acelerador Linear Linatron 400 e seus componentes (VARIAN, 1980).



Figura 3.10 – Modelo de Acelerador Linear Linatron M3 e seus componentes (VARIAN, 2011).

Para um melhor estudo e descrever os principais componentes e características de um acelerador linear modelo *Linatron* – Varian é necessário envolver os seguintes itens: canhão acelerador, alvo, janela de transição de radio frequência, estrutura externa selada, sistema de radio frequência, painel de controle (console), planicidade do campo radiante, cobertura de campo, sensibilidade, qualidade dos raios X.

O canhão eletrônico atira elétrons dentro de uma estrutura, o tubo acelerador, que consiste de um cilindro metálico, especialmente desenhado, com cavidades ressonantes, precisamente fabricadas. Simultaneamente, uma fonte de micro-ondas de alta potência injeta ondas de energia eletromagnética, dentro do tubo acelerador. Os elétrons absorvem a energia das micro-ondas e são acelerados até a velocidade muito próximo da velocidade da luz. O modulador fornece pulsos de alta tensão que sincronizam a potência do canhão eletrônico com a fonte de micro-ondas figura 3.11 (VARIAN, 1980). Esta figura mostra a configuração básica de um acelerador com *magnetron* e tubo acelerador colinear com o feixe de radiação.

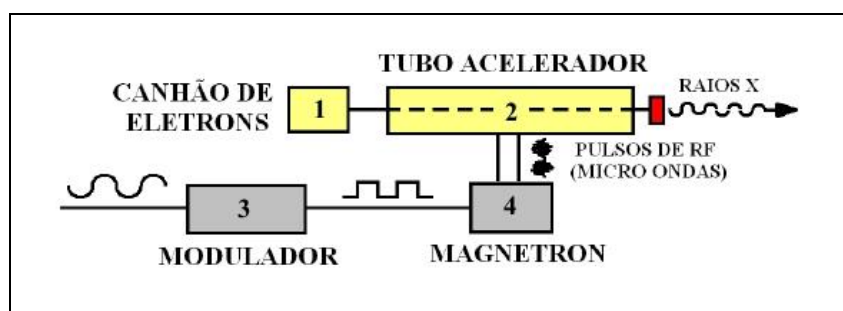


Figura 3.11 – Configuração básica do acelerador com *Magnetron* e tubo acelerador (VARIAN, 1980).

### 3.2.2.1 – Fontes de microondas (*Magnetron*)

O *Magnetron* é uma válvula do tipo diodo, ou seja, não possui grade. O anodo é montado em um bloco de cobre com cavidades cilíndricas internamente. O catodo é um cilindro rígido concêntrico ao anodo aquecido indiretamente por uma espiral de tungstênio que forma o filamento. O espaço interno entre o catodo e o anodo é preenchido com vácuo e é chamado de região de interação. Essa estrutura, anodo e catodo, é submetida a um campo magnético uniforme. A figura 3.12 exemplifica a constituição de uma típica válvula *Magnetron* (MAZZUCCA, 2016,).



As válvulas utilizadas em um acelerador linear para uso em radioterapia utilizam frequência de RF de 3,0GHz no tubo acelerador de partículas. Para energias de até 10MeV é possível operar com a potência do RF entre 2,5MW a 3,0MW. Para energias superiores a 10MeV, pode ser necessário entre 5,0MW a 7,0 MW de potência de RF.

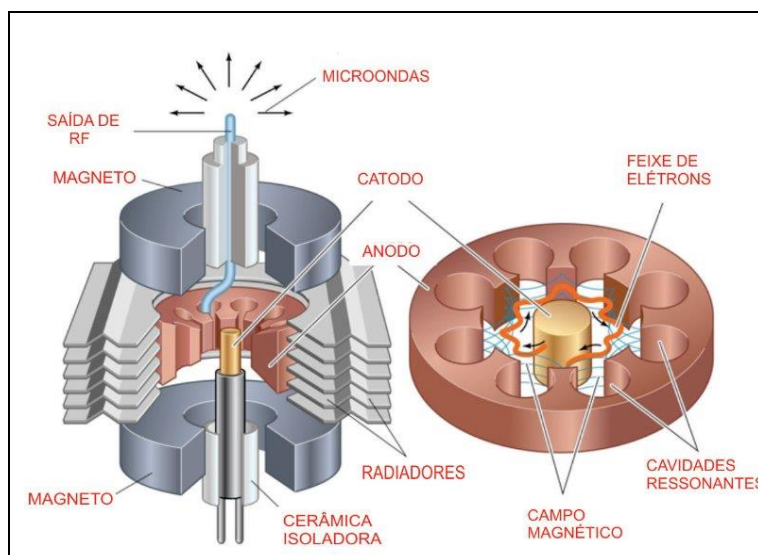


Figura 3.12 – Exemplo de uma válvula *Magnetron* (MAZZUCCA, 2016).

No acelerador linear o *Magnetron* é energizado através da descarga do PFN (Pulse Forming Network), no Modulador, em um transformador de pulsos conectado à válvula. Quando o pulso é aplicado, inicia a oscilação no *Magnetron*. A frequência desses pulsos define o regime de operação da válvula. Em condições normais de funcionamento, muitos elétrons atingem o anodo, mas uma quantidade significativa volta para o catodo, provocando o seu super-aquecimento.

Variações na temperatura podem causar significantes variações na frequência de oscilação da válvula e, conseqüentemente, na energia dos elétrons acelerados. Por esta razão, a frequência de oscilação do *Magnetron* deve ser constantemente monitorada e controlada. Para manter a temperatura do catodo constante, a tensão do filamento é reduzida durante o funcionamento da válvula, mesmo para válvulas com o anodo refrigerado à água. Quando a frequência dos pulsos de disparo é muito alta, a temperatura do catodo aumenta tanto que a tensão do filamento pode até ser zerada. O controle da frequência é realizado através do sistema AFC (Automatic Frequency Control) que analisa uma amostra do valor do RF na saída da válvula, se o valor não for o desejado a frequência nas cavidades é sintonizada por modulo acoplado à válvula que introduz ou remove um bloco de cobre em uma das cavidades (MAZZUCCA, 2016).

O *Magnetron* funciona como um oscilador de microondas auto excitado. Na prática, a oscilação no *magnetron* é efetivamente iniciada pela impetuosidade do ruído elétrico ou pelo caminho descrito pelos elétrons ao se moverem no sistema. A potência necessária para sustentar essas oscilações é fornecida pela carga espacial dos elétrons no espaço de interação. As cavidades ressonantes acumulam a energia gerada pelo movimento dos elétrons na própria frequência a ser entregue ao resto do sistema. Efetivamente, pode-se verificar que o magnetron nada mais é que um conversor de pulsos DC em microondas (SIMÕES, 2012).

Estes campos são mostrados em forma de diagramas na figura 3.13.

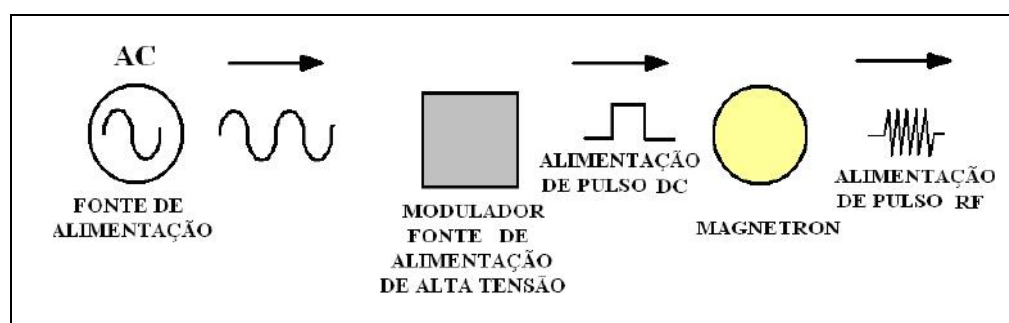


Figura 3.13 – Diagrama básico de um modulador por Magnetron (VARIAN, 1980).

### 3.2.2.2 – Planicidade e cobertura do campo de radiação

A figura 3.14 mostra os gráficos das distribuições de intensidade dos raios X através dos feixes não compensados nas energias de 1, 2, 4 e 6 MeV. Este gráfico ilustra o efeito radiante e o grau de nivelamento do campo. O aumento da distância fonte-detector reduz o efeito da radiação para um tamanho de determinado detector.

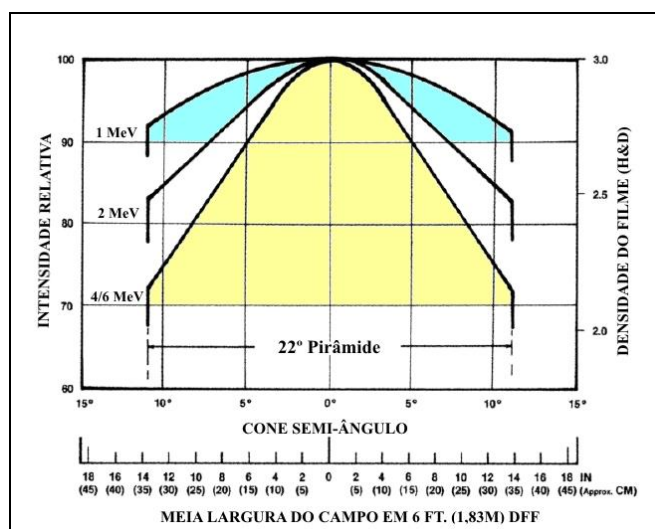


Figura 3.14 – Características das energias dos aceleradores Linatron (VARIAN, 2010).

### 3.2.3 – Radiação Gama ( $\gamma$ )

Os raios gama originam-se, geralmente de desintegrações no núcleo do átomo e são emissões espontâneas observadas em determinados elementos radioativos naturais e artificiais. Os raios gama também podem ter origem em processos subatômicos como a aniquilação de um par (pósitron-elétron ou próton-antipróton) e em fenômenos astrofísicos. Estes raios se caracterizam por uma série de emissões discretas em energia (KNOLL, 1989).

#### 3.2.3.1 – Irradiadores para Gamagrafia

Na área dos Ensaio Não Destrutivos (END), a gamagrafia é uma técnica alternativa ao método de radiografia convencional, utilizando-se uma fonte emissora de raios gama no lugar dos equipamentos de raios X.

Os irradiadores para gamagrafia são equipamentos dotados de mecanismos que permitem expor a fonte radioativa com segurança. A parte principal do irradiador é a blindagem, que permite a proteção do operador a níveis aceitáveis de trabalho. Os irradiadores são construídos de forma a suportar choques, incêndios e outros danos, sem oferecer riscos de vazamento da radiação a níveis acima dos estabelecidos para proteção radiológica. A figura 3.15 mostra, simplificadamente um irradiador e seus componentes.

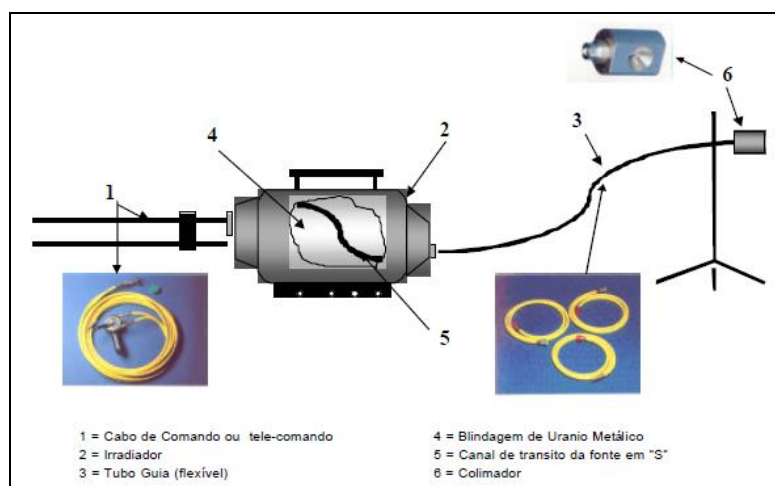


Figura 3.15 - Ilustração de um irradiador de gamagrafia (ANDREUCCI, 2003).

Os principais componentes de um irradiador para gamagrafia são: a blindagem, o tubo guia e os comandos.

A blindagem é responsável por absorver a radiação continuamente emitida pela fonte, mantendo a dose externa dentro dos limites aceitáveis. Geralmente são confeccionadas em

chumbo ou urânio exaurido, com revestimento externo em aço inoxidável. O tamanho e peso de um irradiador irá depender da atividade e do tipo de fonte a ser utilizada (ANDREUCCI, 2003).

O tubo guia é um tubo que conduzirá a fonte desde a sua blindagem, até o local exato da exposição.

Os comandos são responsáveis pelo acionamento e controle da fonte, levando a fonte da blindagem ao local da exposição através do tubo guia, e recolhendo-a de volta a blindagem após o término da exposição. Estes controles de exposição podem ser elétricos, pneumáticos e mais comumente, manuais (ANDREUCCI, 2003).

A fonte utilizada em gamagrafia consiste em certa quantidade de um determinado radioisótopo encapsulado e lacrado em um invólucro metálico, denominado porta-fonte. Este se destina a impedir o contato entre o material radioativo e o meio externo, evitando assim qualquer tipo de contaminação. A figura 3.16 mostra um típico porta-fonte.

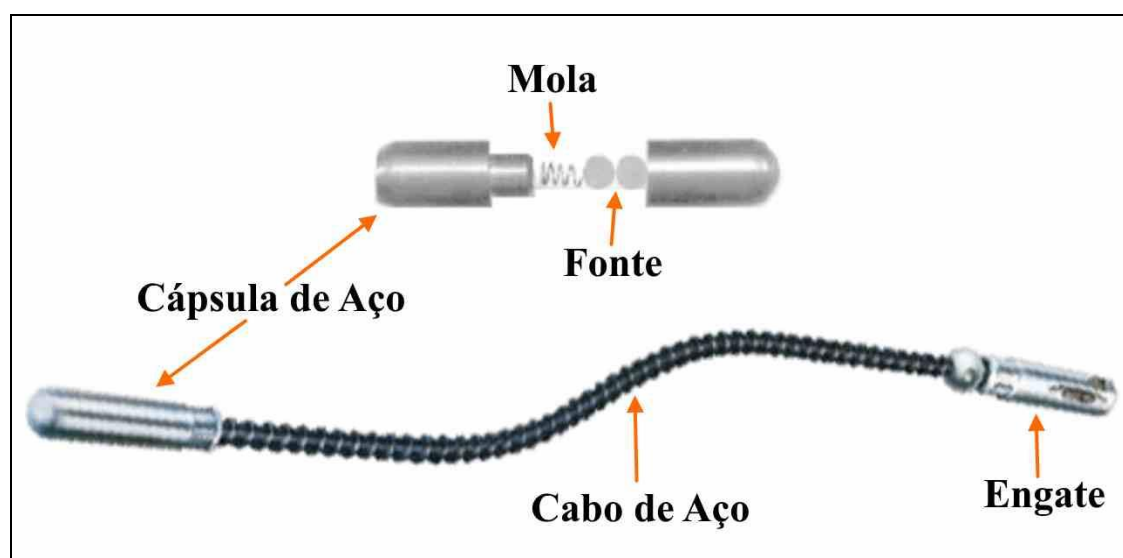


Figura 3.16 – Dispositivo porta-fonte (ANDREUCCI, 2003).

Um dos isótopos muito utilizados, atualmente, para a gamagrafia industrial de peças com altas espessuras é o Cobalto-60 devido sua energia. A seguir será feita uma descrição da fonte de Cobalto-60, que foi utilizada na execução desse trabalho, devido às características dos corpos de prova analisados.

As fontes de Cobalto-60 têm muita utilização em controle de qualidade de peças fundidas, forjadas e juntas soldadas de grande espessura, colunas e vigas de concreto armado

e outras estruturas. Os isótopos são particularmente úteis para aqueles que trabalham normalmente com raios X de 250 kVp (quilovolts-peak) e que têm demandas ocasionais para investigar secções mais espessas do que 2 polegadas. O Cobalto-60 é equivalente a uma radiografia de raios X de gerador de 3 MeV, com diferença na fluência de fótons emitidos. Ele pode ser usado para se obter boas radiografias de pelo menos 200 mm de aço (MASTER, 1959). A tabela 3.1 apresenta as energias mais intensas do Cobalto-60 e suas respectivas probabilidades de emissão.

Tabela 3.1 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do Cobalto-60.

$E_{\gamma}$ (keV)	$I_{\gamma}$ (%)
1173,228	99,85
1332,492	99,98

A figura 3.17 ilustra o esquema de decaimento e as principais transições energéticas de um isótopo de Cobalto-60 e a figura 3.18 mostra um espectro em energia típico da fonte de Cobalto-60.

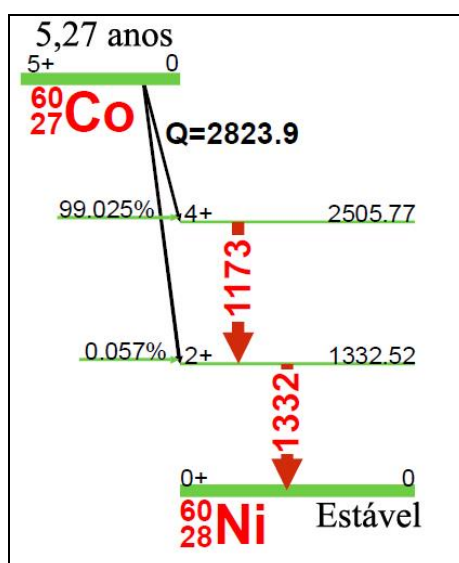


Figura 3.17 – Esquema de decaimento do Cobalto-60 (HELMER, 1998).

A gamagrafia, contudo, apresenta algumas desvantagens: uma que destaca se é que a fonte radiativa possui emissão contínua, por isso os equipamentos de gamagrafia devem possuir blindagem permanente, capaz de reduzir a radiação a níveis aceitáveis quando a fonte não estiver exposta.

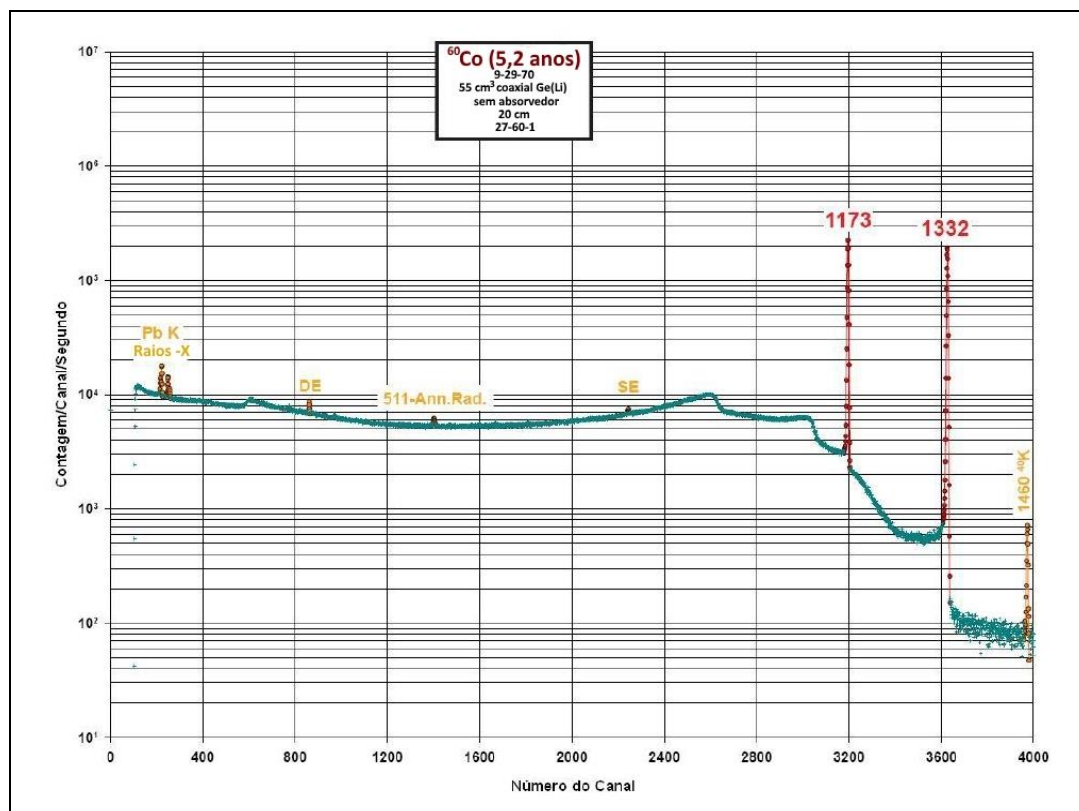
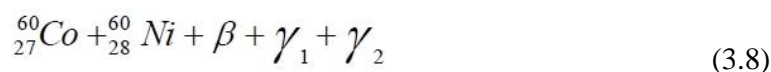


Figura 3.18 – Espectro em energia do radioisótopo Cobalto-60 (HELMER, 1998).

### 3.2.3.2. – Seleção de fonte radiativa

Em contraste com o aparelho de raios X, que emitem uma ampla faixa de comprimento de ondas, fontes de raios gama emitem um ou alguns comprimentos de ondas discretos. O Cobalto-60 é produzido em reatores atômicos segundo as equações 3.7 e 3.8:



Pode-se assumir na prática que a fonte de Cobalto-60 é monoenergética, com energia média de 1,25 MeV. O fato de ser radioisótopo de meia vida longa significa que se pode dispor das fontes por longo tempo, sem preocupação de substituí-las por perda de efetividade (HELMER, 1998).

## 3.3 – Técnicas de Imagens Radiográficas

Neste trabalho foram abordados três tipos de processamentos radiográficos, no qual o foco principal foi discutir a potencialidade de cada um deles nos aspectos de qualidade de imagens na detectabilidade, tempo de exposição e aspectos quanto ao meio ambiente. Os três

tipos são: Filmes Radiográficos Convencionais, Radiografia Computadorizada (RC) e Detector Digital (DD).

### 3.3.1 – Filmes Radiográficos Convencionais

Ao analisar a estrutura de um filme radiográfico, nota-se que este é composto por uma emulsão fotográfica muito fina e uma base plástica transparente que serve para sustentar a emulsão. A emulsão consiste em uma camada muito fina (espessura de 0,025 mm) de gelatina, que contém um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata. A emulsão é colocada sobre um suporte, denominado base, que é feito geralmente de um poliéster ou celulóide, transparente e de cor levemente azulada. Uma característica dos filmes radiográficos é que, ao contrário dos filmes fotográficos, eles possuem a emulsão em ambos os lados da base, conforme mostrado na figura 3.20. Os cristais de brometo de prata, presentes na emulsão, possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação ou luz, tornarem-se susceptíveis de reagir com um produto químico chamado de revelador. O revelador atua sobre esses cristais provocando uma reação de redução que resulta em prata metálica negra. Os locais do filme, atingidos por uma quantidade maior de radiação, apresentarão, após a ação do revelador, um número maior de grãos negros que as regiões atingidas por radiação de menor intensidade. Dessa forma, quando vistos sob a ação de uma fonte de luz, os filmes apresentarão áreas mais escuras e mais claras que irão compor a imagem do objeto radiografado (PEREIRA, 2006).

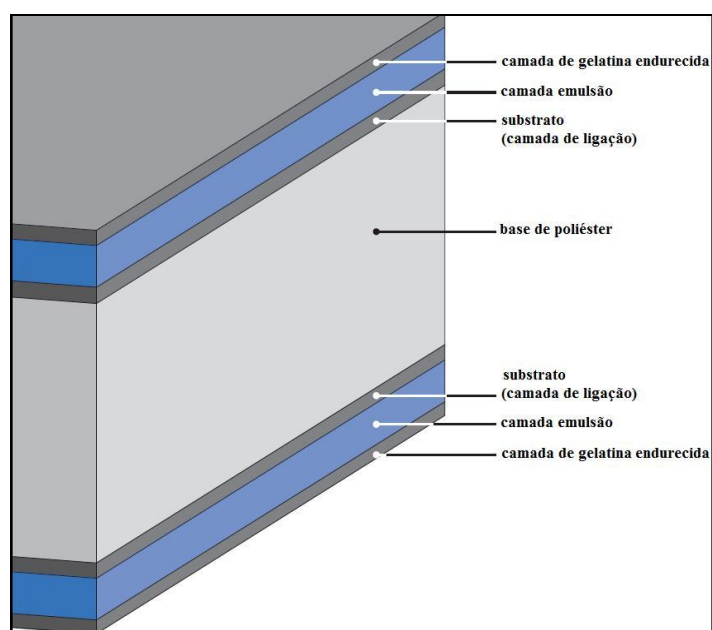


Figura 3.19 – Camada dos filmes radiográficos (RAAD, 2007).

### 3.3.1.1 – Elemento Sensível à radiação

Este é o elemento principal, pois é o que absorve a radiação e a converte em imagem, constituída de uma gama de tons escuros e claros que contém informação útil para diagnóstico. Os haletos de prata mais utilizados são os brometos. Eles são depositados em forma de microcristais sobre a base, misturados à gelatina que os mantém em suas posições relativas. Aos microcristais de brometo de prata é adicionada uma pequena quantidade de iodeto de prata (até 10%), o que serve para aumentar a sensibilidade em relação ao uso de qualquer uma das duas substâncias puras. A figura 3.20 ilustra a forma dos átomos dentro dos microcristais.

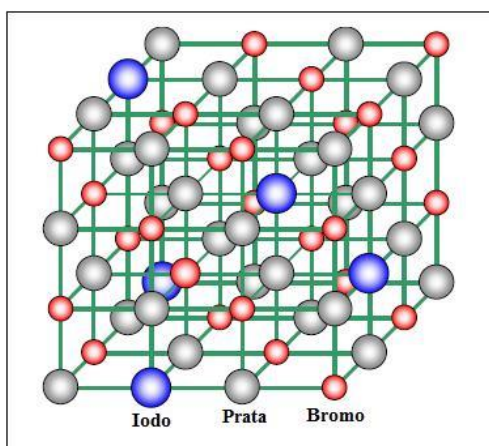


Figura 3.20 – Estrutura do Cristal de haleto de prata (PEREIRA, 2006).

Os filmes radiográficos possuem microcristais que são sensíveis à radiação X e principalmente à luz produzida pelo écran. Os microcristais desse elemento, colocados sobre a base do filme com ajuda da gelatina, irão reagir à passagem da luz e transformar a imagem latente, em uma imagem gravada pontualmente em cada um dos próprios cristais.

Assim como descrito na figura 3.21, este processo de sensibilização começa quando um fóton de luz oriundo da tela intensificadora interage com a gelatina e com os microcristais. Geralmente, o átomo de bromo ou iodo, por possuírem um elétron a mais, são os que mais facilmente liberam elétrons. Este elétron, agora livre, poderá circular pelas moléculas dos haletos e então se ligar a qualquer outro átomo. Porém, a inclusão da impureza tem justamente o objetivo de atrair este elétron livre. Em sua trajetória, o elétron livre poderá colidir com outros átomos e criar outros elétrons livres. Ao chegarem próximos da impureza, os elétrons livres acabam criando uma região negativa dentro do microcristal. O bromo ou iodo, que cedeu seu elétron extra, volta a ser um átomo neutro. Como a ligação iônica que existia entre a prata e o bromo, ou iodo, deixou de existir, este átomo, Br ou I, está livre para deixar a estrutura do haleto de prata e se misturar com a gelatina.



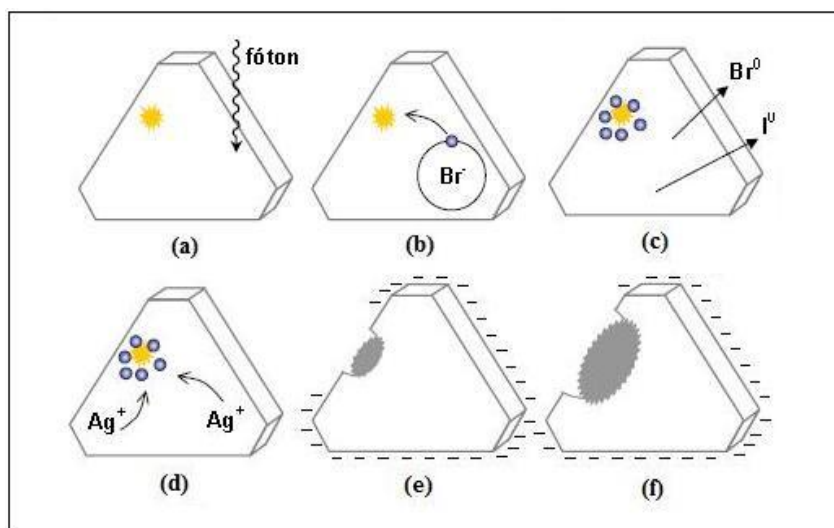


Figura 3.21 – Sequência de interação do fóton com o microcristal de haleto de prata; (a) fóton atinge o microcristal; (b) o elétron extra do haleto – Br ou I – é liberado; (c) os haletos saem dos microcristais enquanto os elétrons livres se dirigem para a impureza; (d) os elétrons criam uma região negativa que atrai os íons positivos de prata; (e) os íons  $\text{Ag}^+$  incorporam os elétrons livres e se tornam em prata metálica; (f) maior concentração de prata metálica, maior degradação do microcristal (PEREIRA, 2006).

Com a formação de uma região eletricamente negativa, os íons de prata,  $\text{Ag}^+$  que estão livres, pois perderam a ligação iônica com os íons de Br e I, são atraídos para esta região. Ao chegarem nesta região, os íons de  $\text{Ag}^+$  se juntam com os elétrons livres e voltam a ser prata neutra ( $\text{Ag}^0$ ), ou prata metálica. Assim, há uma degradação do microcristal pela dissociação dos haletos de prata. Esta degradação é tão maior quanto forem os elétrons livres que o microcristal conseguir liberar, fruto dos fótons que interagiram. A intensidade da degradação, maior ou menor, é que cria os diferentes níveis de cinza da imagem, além de facilitar o processo de revelação (PEREIRA, 2006).

A seguir, são detalhadas algumas características dos filmes radiográficos:

#### a. Densidade Óptica

A imagem formada no filme radiográfico possui áreas claras e escuras, evidenciando certo grau de enegrecimento que é denominada de densidade. Na figura 3.22 vemos um exemplo desta diferença do grau de enegrecimento. Matematicamente a densidade é expressa como sendo o logaritmo da razão entre a intensidade de luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida e visualmente observada, na equação 3.9 (MOREIRA, 2007).

$$D = \log \frac{I_0}{I} \quad (3.9)$$

onde,

$I_0$  = Intensidade de Luz incidente

$I$  = Intensidade de luz transmitida

Conclui-se, pela equação 3.9, que, quanto maior a densidade, mais enegrecido ficará o filme. Podemos observar também que a quantidade  $(I_0/I)$  é o inverso de  $(I/I_0)$ , a fração de feixe incidente transmitido pelo filme processado, ou a transmitância do filme (DOMANUS,1992).



Figura 3.22 – Densidade óptica e grau de enegrecimento (BARBOSA, 2008).

#### b. Velocidade

Se dois filmes diferentes forem submetidos a uma mesma exposição, nota-se que as densidades obtidas nos dois filmes serão diferentes, ou seja, com uma mesma exposição, um filme apresenta maior rapidez para atingir determinada densidade, quando comparado com outro. Portanto, um filme rápido necessita de menor tempo de exposição para atingir uma determinada densidade, quando comparado com outro filme mais lento. Ou ainda, se um filme rápido e um filme lento forem submetidos a uma exposição idêntica, o filme rápido atingirá uma densidade maior. A velocidade é uma característica própria de cada filme e depende, principalmente, do tamanho dos cristais de prata presentes na emulsão. Quanto maior o tamanho dos cristais, mais rápido será o filme e sua imagem será mais grosseira e menos nítida que uma imagem formada por grãos menores. Portanto, quanto mais rápido o filme, menos nítida será a imagem formada por ele (KODAK, 1980).

### c. Classificação dos filmes

A grande variedade de condições e a heterogeneidade de materiais encontrados na radiografia industrial levaram os fabricantes a produzir vários tipos de filmes. Uma classificação dos filmes foi estabelecida pela ASTM que identifica os tipos de filmes pela velocidade de exposição e sensibilidade. Os mais empregados na área industrial são os da Classe I e II por possuírem características de sensibilidade, velocidade e resistência adequadas (ASTM E 1815, 2008). Pode ser empregada ainda a técnica de vista composta, onde dois ou mais filmes, de mesmas ou diferentes classes são expostos em conjunto no mesmo chassi. Nesta técnica, o tempo de exposição é calculado para a exposição com um único filme e em seguida, dividido pelo número de filmes colocados no chassi, caso seja da mesma classe ou tipo, ou seja, mesma sensibilidade. Caso os filmes não sejam de mesma sensibilidade é necessário adequar o tempo de exposição de acordo com a escolha da composição de tipos de filmes para obter a densidade mínima requerida. Nesta situação deve ser respeitado o tempo do filme que possui maior sensibilidade, para que não haja perda de informação. Para o laudo, os filmes são avaliados, individualmente e em conjunto (sobrepostos), dependendo da descontinuidade. A figura 3.23 mostra uma ilustração de uma imagem radiográfica.

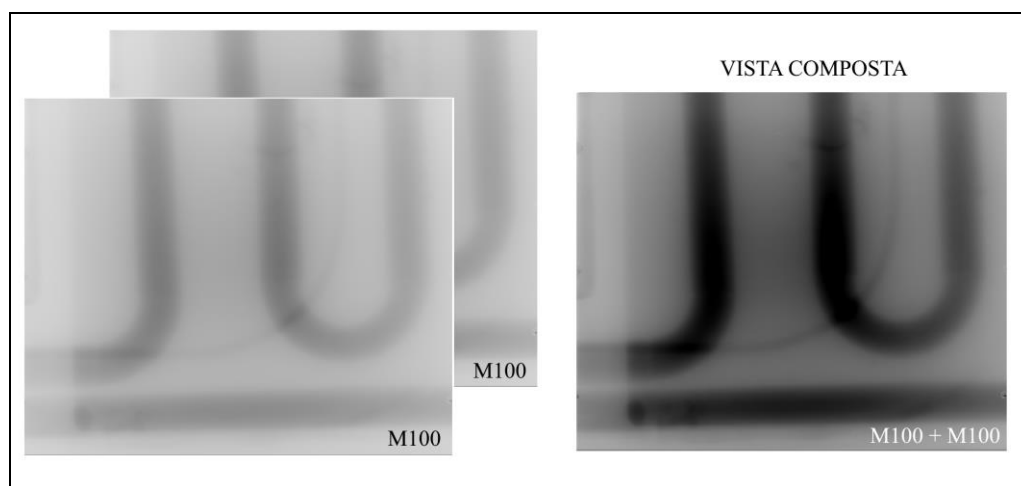


Figura 3.23 – Exemplos da técnica de múltiplos filmes e vista composta.

### d. Curva característica dos filmes

A curva característica de um filme, também chamada de curva sensitométrica ou curva H & D (Hurter-Driffield), relaciona a exposição dada a um filme com a densidade resultante. Por meio das curvas características podem-se comparar qualitativamente filmes diferentes, estabelecendo critérios para corrigir densidades obtidas para uma dada exposição, conforme

apresentado na figura 3.24. As curvas são em geral fornecidas pelo fabricante do filme e são obtidas mediante as exposições sucessivas do filme, tendo suas densidades medidas em cada exposição. Os valores são plotados em um gráfico de densidades em função do logaritmo da exposição relativa (KODAK,1980).

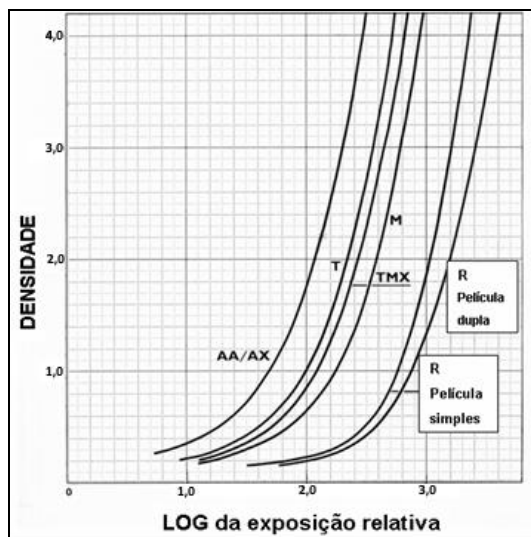


Figura 3.24 - Curva característica de filmes radiográficos (KODAK,1980).

#### e. Contraste

As variações de densidade de uma região para outra (área clara e área escura) ao longo de filme radiográfico são responsáveis pela formação da imagem. A diferença de densidades entre duas regiões adjacentes no filme é denominada contraste. O contraste pode também ser entendido como a capacidade de o filme detectar intensidade e energias diferentes de radiação como mostra a figura 3.25. Imagens com alto contraste permitem em geral melhor qualidade e segurança na interpretação da radiografia (VARIAN, 2010).



Figura 3.25 – Contraste radiográfico – Exposição (A) 220 kV, (B) 120 kV (SIMÕES, 2012).

O contraste radiográfico é o resultado da combinação do *contraste do objeto* e o *contraste do filme*. O contraste do objeto é ditado pela faixa de intensidade de radiação emergente da peça. Uma chapa plana de material homogêneo e de espessura aproximadamente uniforme apresentará um baixo contraste do objeto. Por outro lado, uma peça com grande variação de espessura, emergirá uma grande faixa de intensidade de radiação e, portanto, apresentará um alto contraste do objeto. Em resumo o contraste do objeto pode ser definido pela relação entre as maiores e menores intensidades de radiação transmitida ao filme. Uma peça pode apresentar um baixo contraste do objeto para energias mais baixas e um alto contraste do objeto para altas energias maiores (SIMÕES, 2012).

O contraste também afetado pela radiação espalhada cuja remoção irá aumentar o contraste do objeto. Diferentes tipos de filmes têm diferentes características de contraste. Um filme de alto contraste pode produzir, relativamente, uma radiografia de abaixo contraste se o contraste do objeto é muito baixo, diferentemente de um filme de baixo contraste se o contraste do objeto for muito alto (SIMÕES, 2012).

#### f. Definição

Observando com detalhe a imagem formada no filme radiográfico, é possível notar que a mudança de densidades de uma área a outra não se faz de maneira brusca. A imagem de um objeto apresenta uma região de transição nas suas bordas, com uma densidade intermediária entre a densidade da imagem e a de fundo. Quanto mais estreita for esta faixa de transição, melhor será a definição desta imagem (MOREIRA, 2007).

#### g. Sensibilidade Radiográfica

Uma distinção deve ser feita entre os termos: qualidade radiográfica e sensibilidade radiográfica. Em muitos dos tipos de serviços em que se utiliza a radiografia industrial, a qualidade e sensibilidade radiográficas são consideradas sinônimas, isto acontece particularmente no campo de detecção de falhas, onde a habilidade de mostrar pequenas discontinuidades está associada ao aumento da sensibilidade radiográfica. Porém, nas inspeções de peças fundidas com espessura irregular, a qualidade de imagem pode estar associada à habilidade da técnica radiográfica empregada cobrir uma ampla faixa de espessura com um único filme e obter uma sensibilidade razoável, no lugar de se obter uma boa sensibilidade para uma dada espessura do fundido (HALMASHAW, 1995).

#### h. Sensibilidade

A sensibilidade é um termo geral ou qualitativo, refere-se ao tamanho do menor detalhe que pode ser visto em uma radiografia. Ela é obtida a partir do IQI de arame ou de furos. O IQI de arame é composto de arames de diversos diâmetros possíveis de serem vistos na imagem radiográfica. A sensibilidade radiográfica depende da combinação de efeitos de dois conjuntos de fatores independentes. Um é o contraste radiográfico e o outro a definição radiográfica (KODAK, 1980) (ASME Code Section V, 2010).

#### i. Ruído

O ruído está relacionado com o tamanho e a distribuição dos grãos de prata do filme radiográfico e pode acobertar pequenos detalhes na imagem. Portanto em uma inspeção onde se deseja detectar pequenas discontinuidades, deve-se utilizar filmes de granulação fina (AGFA, 1981).

#### 3.3.1.2 – Processamento do filme radiográfico

O processamento dos filmes radiográficos deve seguir algumas considerações gerais, necessárias ao bom desempenho desta tarefa. No manuseio do filme, a limpeza é essencial. A câmara escura e os acessórios e equipamentos devem ser mantidos rigorosamente limpos, e usados somente para o propósito aos quais eles se destinam. Os banhos de processamento e a revelação devem ser controlados, quanto à temperatura e tempo de duração de acordo com a recomendação do fabricante, e podem ser processados manualmente ou em processadoras automáticas.

O processamento visa transformar a imagem latente invisível, formada durante o processo de exposição do filme, em imagem visível de prata metálica, de forma que esta imagem seja a mais representativa possível das estruturas do objeto radiografado.

O processamento é composto por uma série de etapas que se relata a seguir:

#### a. Revelação

Quando um filme exposto é imerso no tanque contendo o revelador, esta solução age sobre os cristais de brometo de prata metálica. Esta seletividade está na capacidade de discriminar os grãos expostos dos não expostos. Devido a fatores eletroquímicos, as

moléculas dos agentes reveladores atingem os cristais, que ficam como que revestidos. A visibilidade da imagem e, conseqüentemente o contraste, a densidade de fundo e a definição dependem do tipo de revelador usado, do tempo de revelação e da temperatura do revelador. Desta forma, o controle tempo-temperatura é de fundamental importância para obter-se uma radiografia com boa qualidade. A revelação deve ser feita com agitação permanente do filme no revelador, a fim de que se obtenha uma distribuição homogênea do líquido em ambos os lados da emulsão, evitando-se a sedimentação do brometo e outros sais que podem provocar manchas susceptíveis de mascarar possíveis descontinuidades (KODAK, 1980).

#### b. Banho de parada

Após a revelação a gelatina amolecida da emulsão encontra-se saturada com o revelador. Por isso é necessário uma lavagem intermediária de 20 segundos em água corrente ou ácido acético, antes de levar o filme ao fixador. Este procedimento tem duas funções: Cessar a revelação (com o uso do ácido acético isto ocorre quase imediatamente) e não permitir que o revelador seja conduzido ao fixador neutralizando-o.

#### c. Fixação

A primeira função do fixador é remover da emulsão por dissolução os cristais não expostos, portanto não revelados. A presença destes cristais deixa a imagem radiográfica “opaca”, sem condições de interpretação. A outra função é endurecer a gelatina da emulsão, para que a radiografia fique resistente, em condições de manipulação para o uso do profissional. O tempo de fixação normalmente não deve exceder a 15 minutos. Os filmes devem ser agitados quando colocados no fixador durante pelo menos 2 minutos, para garantir uma ação uniforme deste. O fixador deve ser mantido a uma temperatura igual ao do revelador, ou seja, cerca de 20°C (KODAK, 1980).

#### d. Agente Endurecedor

Este tipo de agente é incorporado ao fixador com objetivo de tornar a gelatina da emulsão mais resistente às injúrias mecânicas da manipulação do filme, e este endurecimento também favorece um tempo de secagem mais curto. O agente mais frequentemente empregado é o alúmen de potássio. A acidez da solução fixadora realça sua capacidade de endurecer a gelatina.

#### e. Lavagem dos filmes

Após a fixação, os filmes seguem para o processo de lavagem para remover o fixador da emulsão. Cada filme deve ser lavado por um período de, aproximadamente, 30 minutos. A temperatura da água no tanque de lavagem é um fator muito importante a ser considerado, e os melhores resultados são obtidos com a temperatura por volta de 20°C (KODAK, 1980).

#### f. Processamento Químico e Mecânico

Este sistema de processamento é utilizado quando há grande volume de trabalho, pois só assim torna-se econômico. O processamento é inteiramente automático, sendo que o manuseio só é utilizado para carregamento e descarregamento de filmes. O ciclo de processamento é inferior a 15 minutos. Quando adequadamente mantido e operado, este equipamento produz radiografia de alta qualidade. A alta velocidade de processamento torna-se possível pelo uso de soluções químicas especiais, contínua agitação dos filmes, manutenção da temperatura das soluções e secagem por jatos de ar aquecido.

#### 3.3.1.3 - Telas intensificadoras de imagem

As telas intensificadoras possuem como principal finalidade diminuir o tempo de exposição em ensaios radiográficos industriais. Nestes casos usam-se finas folhas de metal (geralmente chumbo) como intensificadoras da radiação primária emitida pela fonte. O fator de intensificação, além de ser função da natureza e da espessura da tela, depende do contato efetivo entre estas e o filme. O grau de intensificação das telas de chumbo depende da natureza e espessura do material a ensaiar, da qualidade da fonte emissora de radiação e do tipo de filme usado. Na parte traseira do chassi a função exclusiva é absorver a radiação retro espalhada e impedir que cause falta de definição na imagem (MOREIRA, 2007).

#### 3.3.2 – Radiografia Computadorizada (RC)

A radiografia computadorizada é a técnica utilizada na aquisição da imagem digital que utiliza placas de imagem *Image Plate* – IP como detector sensível a radiação. Estes são os mais bem sucedidos comercialmente na área de radiografia digital. Os materiais utilizados com maior frequência são da família do fluoreto de bário em forma de pó e depositados em um substrato para formar a placa de imagem (OLIVEIRA, 2010). Os mecanismos de absorção de raios X são idênticos aos de telas de matérias fotoluminescentes convencionais usados em filmes. A diferença é que o sinal óptico útil não é derivado da luz emitida imediatamente a



incidência de radiação, mas de uma subsequente emissão, quando a imagem latente consistindo em cargas aprisionadas são estimuladas opticamente e liberadas das armadilhas metaestáveis. Isso desencadeia um processo chamado luminescência fotoestimulada (PSL) resultando na emissão de luz visível de comprimento de onda curto (cor azul) em quantidade proporcional ao fluxo de raios X original. Em radiografia computadorizada, a placa de imagem é posicionada em um cassete, para a proteção contra a luz e exposto aos raios X e em seguida é escaneada com um laser para liberar a luminescência fotoestimulada. A luz azul de PSL é coletada e detectada por um tubo fotomultiplicador. O sinal da fotomultiplicadora é digitalizado ponto a ponto para formar a imagem (ROWLANDS, 2002).

### 3.3.2.1 – Estrutura Física da Placa de Imagens

A estrutura da placa de imagem consiste em um suporte de poliéster, camada de material sensível, camada protetora e outros componentes que podem variar de acordo com o fabricante. Na figura 3.26, pode-se ver a disposição física das camadas da placa de imagem.

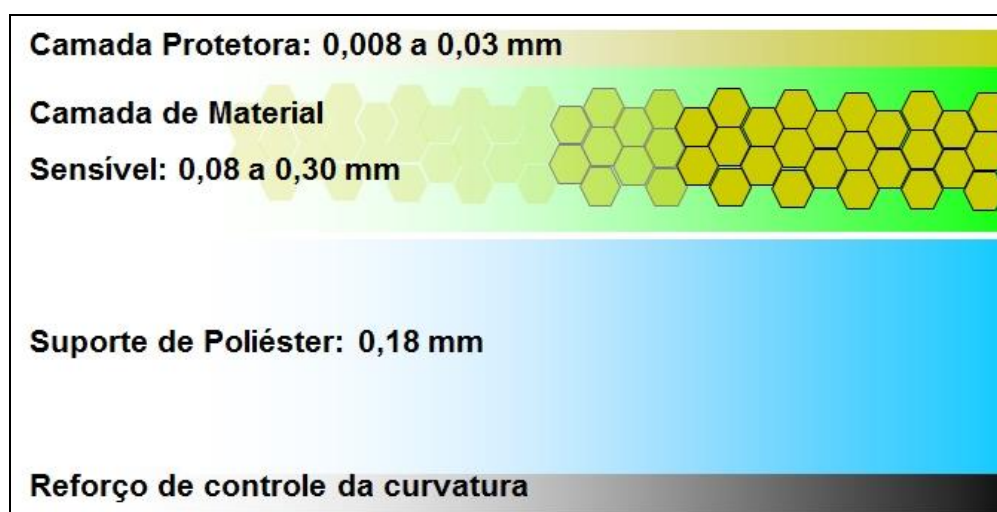


Figura 3.26 – Composição das camadas da placa de imagem.

A camada fotoestimulável é protegida por uma camada protetora EBC (*Electronic – Beam – Cured*), que é composta por um pré-polímero de alta densidade com aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  de espessura, garantindo assim maior proteção contra agentes mecânicos e químicos, que poderiam danificar a placa de imagem durante o processo de leitura ou manipulação pelos usuários.

A camada de material fotoestimulável é comumente constituída de cristais de  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ , com grãos de tamanho variados, dependendo do tipo de placa. Essa camada além

de conter os grãos de material fotoestimulável tem em sua composição um polímero orgânico de modo a unir os grãos e providenciar uma formação uniforme do filme.

A camada de suporte, composta de polietileno (PET – *Polyethylene Terephthalate*) possui espessura entre 200 e 350  $\mu\text{m}$  e, além da função de proteção da camada do material fotoestimulável contra agentes externos, serve também para manter uma planificação do filme e apresentar flexibilidade. O suporte pode ter lamina pretas na sua parte posterior de modo a providenciar assim absorção de luz que entrariam de forma indesejada.

Além das características mencionadas acima, todas as camadas devem manter suas propriedades físicas inalteradas por temperatura, umidade, raios X, luz do laser, além de apresentar flexibilidade e resistência mecânica. Pois mesmo possuindo tantas camadas de proteção estas placas de imagem, é sempre necessário manuseá-las com muito cuidado para não haver degradação por contatos bruscos e manter em ambientes limpo e de acordo com as normas dos fabricantes, para manter sempre o melhor desempenho e a vida útil das placas serem longas.

### 3.3.2.2 – Funcionamento das Placas de Imagem

Apesar de muitos elementos apresentarem como característica a emissão de luminescência fotoestimulada (PSL), a maioria dos materiais fotoestimuláveis utilizados na radiografia computadorizada fazem parte de uma classe de haletos de alcalinos terrosos dopados com európio, entre os quais se destaca o flúor brometo de bário dopado com európio bivalente ( $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ ). Este elemento possui uma resposta de luminescência fotoestimulada altamente linear quando exposto a energia dos raios X. Além disso, possui uma resposta muito rápida com um tempo de vida muito curto, possibilitando a sua utilização em sistema de escaneamento de alta velocidade. Possivelmente, são usados outros tipos de material fotoestimulável, como o flúor bromo iodeto de bário ( $\text{BaFBr/I:Eu}^{2+}$ ), mas nenhum com tanta frequência como o  $\text{BaFBr:Eu}^{+2}$ .

Quando o material fotoestimulável é exposto à radiação ionizante, pares elétron-buraco são criados na rede cristalina. A quantidade de pares é proporcional à energia de radiação absorvida. Estes podem se recombinar imediatamente a partir do estado excitado do íon  $\text{Eu}^{2+}$  ou criar estados quase estáveis (F centros). Os F centros e seus correspondentes buracos armazenam a energia absorvida da radiação ionizante e quando irradiado pelo laser, com comprimento de onda adequado, no processo de leitura da placa de imagem, os F centros

absorvem fótons do laser, elevando os elétrons a um estado excitado. A partir desse estado este pode receber energia térmica atingindo a banda de condução. Uma vez na banda de condução, o elétron está disponível para recombinar com os buracos capturados pelos íons  $\text{Eu}^{2+}$  e emitir luz correspondente a essa transição (ROWLANDS, 2002).

Sabe-se que nos cristais de haletos, os F centros são criados quando irradiados com raios X. Nos cristais de  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  dois tipos de F centros são obtidos: um devido ao flúor e outro devido ao bromo. Ambos os centros são criados pelo mesmo processo, contudo, somente os formados com bromo contribuem significativamente para o processo de fotoestimulação.

Na figura 3.27 pode ser visto o espectro típico de fotoestímulo. A linha vermelha corresponde ao F centro baseado no bromo. A linha preta contínua é o espectro total e a linha azul é a diferença entre elas. Assim é visto que o fotoestímulo é devido basicamente aos F centros do bromo ( $\text{F} - (\text{Br}^-)$ ) (OLIVEIRA, 2010).

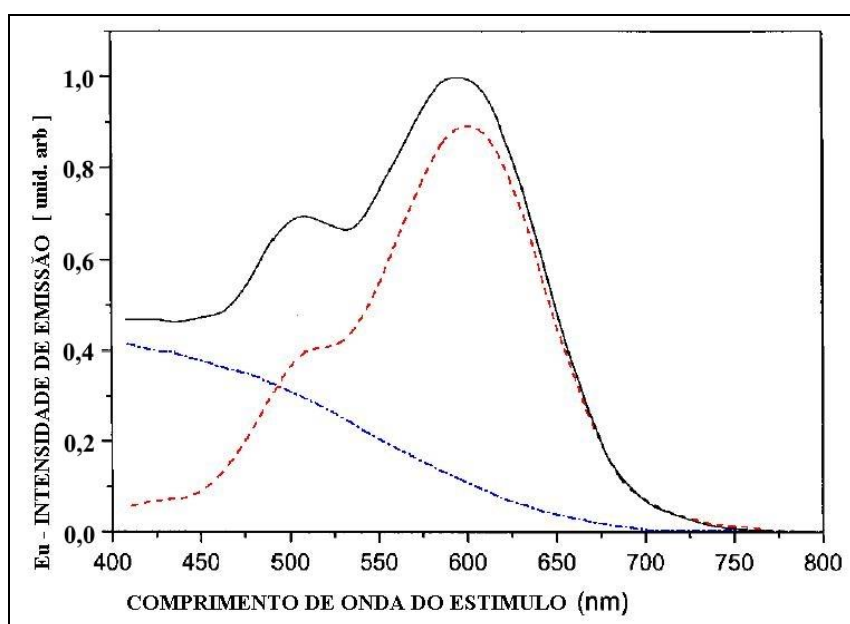


Figura 3.27 – Espectro de fotoestímulo do  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  (OLIVEIRA, 2010).

### 3.3.2.3 – Eficiência de Absorção de Raios X na Placa de Imagem - IP

A eficiência de absorção dos fótons de raios X pode influenciar no ruído de quanta (*X-ray Quanta Noise*). Neste tópico será analisada a curva de eficiência de absorção do material fotoestimulável em função da energia dos fótons raios X.

Na figura 3.28, pode ser visto o gráfico que mostra a variação da absorção em função da energia dos fótons incidentes, para dois tipos de material fotoestimulável diferentes e a variação da absorção dos fótons em função da densidade superficial para o BaFBr com densidades diferentes (ROWLANDS, 2002).

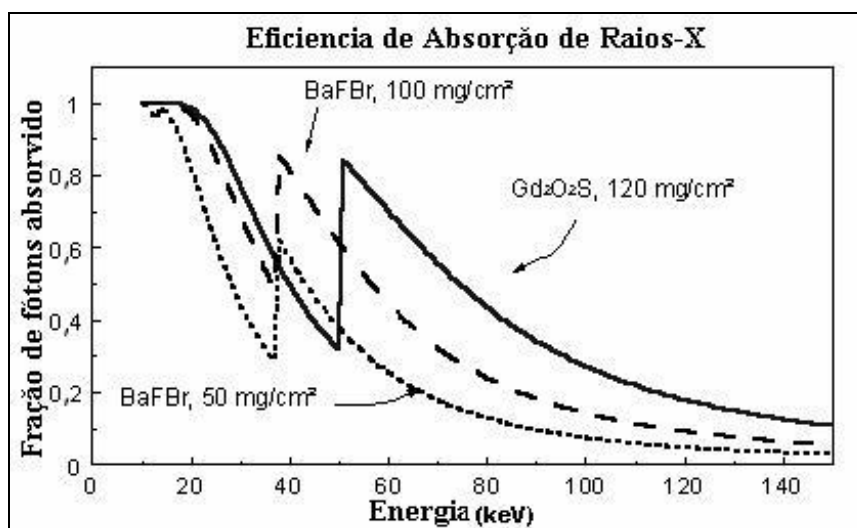


Figura 3.28 – Gráfico de absorção em função da energia do raios X (SEIBERT, 1999).

Observa-se que os materiais fotoestimuláveis representados no gráfico, apresentam uma alta eficiência de absorção para fótons de baixas energias, aproximadamente 10 keV, indicando que uma imagem radiográfica pode perder qualidade (presença de ruído) devido à radiação ionizante ambiental. Após um período de tempo sem usar a placa de imagem, é aconselhado que este seja “apagado” antes do próximo uso, eliminando assim a influência dessas radiações. Outro aspecto importante com relação à eficiência para fótons de energias baixas é o uso de filtros no momento de uma exposição, eliminando o efeito de espalhamento de radiação.

Observa-se também, que o BaFBr:Eu apresenta uma eficiência melhor comparada com o Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb (écran de terra rara), que foi uma das condições impostas durante a pesquisa do material fotoestimulável ideal. Segundo a curva de eficiência apresentada acima, o material fotoestimulável usado na placa de imagem apresenta um pico próximo a 40 keV, esse pico é devido à linha k do bário (37 keV).

Outro aspecto importante é com relação à densidade superficial ( $\mu/\rho$ , onde:  $\mu$  representa o coeficiente de absorção do material e  $\rho$  a densidade do material). É observado que para o mesmo material fotoestimulável, porém com densidades diferentes, existe uma

variação na eficiência de absorção. O material fotoestimulável que tem uma densidade superficial maior ( $100 \text{ mg/cm}^2$ ) apresenta uma eficiência maior do que o material fotoestimulável com uma densidade superficial menor ( $50 \text{ mg/cm}^2$ ). Dessa forma, é visto que a eficiência do material fotoestimulável pode ser aumentada com o aumento da densidade superficial (espessura do filme). Porém, como foi mencionado anteriormente, o aumento da camada do material fotoestimulável resulta na diminuição da resolução. Novas tecnologias têm estudado técnicas de aumentar a densidade superficial sem aumentar a espessura do filme (SEIBERT, 1999).

#### 3.3.2.4 – Leitor de Radiografia Computadorizada

Os equipamentos para leitura das placas de imagem utilizados na radiografia computadorizada (RC) são dispositivos eletromecânicos que incorporam todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução/exibição da radiografia final. Em termos de recursos e design, existe certa variação de fabricante para fabricante, mas todos os leitores realizam as seguintes funções básicas: ao alimentar o sistema com a placa de imagem, o mesmo permanece em velocidade constante durante todo o processo, a velocidade com a qual a varredura é feita com o laser sobre a placa é ajustada de acordo com o tempo de decaimento do sinal luminescente ( $0,8 \mu\text{s}$  para o  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ ), que é um dos principais fatores limitantes para o tempo de leitura do IP (SILVA, 2013).

Ao passar pelo feixe de laser estimulador ocorre todo um processo de luminescência fotoestimulada, ponto a ponto da placa, e após é coletado por um filtro que faz a separação fotoestimulada contra o espectro da luminescência. Os fótons de luminescência possuem comprimentos de onda diferentes dos fótons do laser estimulante. Para evitar que os fótons do laser estimulante sejam transformados em um sinal eletrônico são usados filtros óticos que somente transmitem fótons de luminescência (TAKAHASHI, 2002).

Em seguida, um fotomultiplicador/detector amplifica o sinal. O sinal analógico é convertido em digital e o computador armazena a matriz em um *buffer* de imagem para as operações subsequentes, como exibição, inserção de anotações, análise, medição, armazenamento etc. Após a leitura, nem toda a energia armazenada na tela é liberada. Para garantir a remoção completa de toda imagem latente, o IP é apagado com uma luz de alta intensidade, que a ilumina por um curto período, permitindo assim que ela seja reutilizada em outras exposições (ROUSSILHE, 2007). A etapa do apagamento pode ser realizada no leitor

RC (desde que este possua um sistema de apagamento acoplado) ou em um equipamento a parte.

Muitas vezes, depois da estação de leitura, há ainda a etapa do apagamento, realizada pela ação de uma luz fluorescente brilhante (OLIVEIRA, 2004). A figura 3.29 mostra um diagrama funcional de um sistema típico.

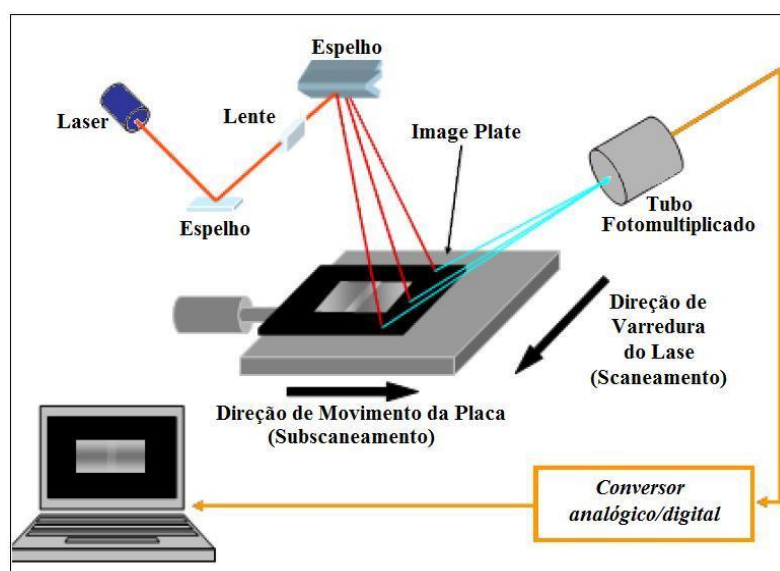


Figura 3.29 – Sistema da imagem de material fotoestimulável de armazenamento (OLIVEIRA, 2010).

As funções de leitura são bem comuns na maioria dos leitores da RC. O que realmente as diferencia é o programa especializado para recursos personalizados e funcionalidade. Dentro do espaço de trabalho digital, o potencial do computador permitirá o aprimoramento da imagem com tarefas como a correção do efeito de magnificação geométrica, inerente à técnica de exposição tangencial e a realização de trabalho simples de estimativas de espessura de parede.

### 3.3.3 – Radiografia Digital Direta

#### 3.3.3.1 – Detector Digital – DD

Quando é citado algo sobre um Detector Digital, presume-se que alguns equipamentos com a capacidade de gerar, após a interação da radiação com objeto, uma imagem digital residual da conversão analógico-digital. Alguns equipamentos como CCD, CMOS e DDA são encontrados atualmente no mercado desempenhando funções para análise nos diversos seguimentos de avaliação médica e industrial. Neste trabalho foi apresentado um estudo utilizando uma Matriz de Detector Direto (DDA), também conhecido como *Flat Panel*, que

por sua vez possui as mesmas propriedades de detecção da radiação com materiais sólidos do tipo semicondutores, e faz a conversão dos raios X de entrada em cargas elétricas que são eletronicamente legíveis de modo direto e com maior eficiência. Estes detectores são considerados uma potencial solução para ser utilizado em radiografia digital na área industrial.

Essa matriz de detector digital é essencialmente uma estrutura com uma grande área plana formada por detectores com circuitos integrados, ela possui milhões de *pixels*, e cada um desses atuam como um detector individual, utilizando um tipo de conversão específica para cada material detector, como mostrado esquematicamente na figura 3.30. Cada *pixel* converte a intensidade da radiação incidente para uma quantidade de carga proporcional à mesma, esta carga gera um sinal que é responsável por um valor, com dependência do número de bits, utilizado na escala de cinza e definida pelo sistema de imagens na estação de trabalho.

Há basicamente dois tipos de conversão feitos pelo detector direto. O detector direto com conversão direta que utiliza um fotocondutor de selênio-amorfo (a-Se) e o detector direto com conversão indireta, que utiliza fotodiodo de silício-amorfo (a-Si) com um cintilador acoplado a ele que pode ser de diversos materiais, sendo o Iodeto de Césio (CsI) e o Oxissulfato de Gadolínio ( $Gd_2O_2S$ ) os mais comuns (KINNO, 1998).

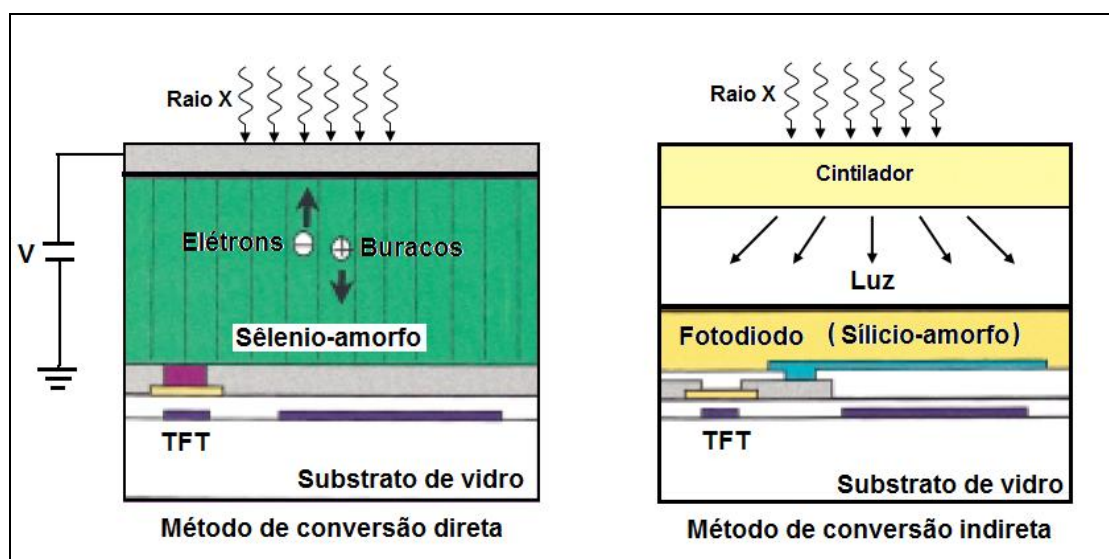


Figura 3.30 – Configuração do método de conversão direto e (ASAHINA, 2001).

### 3.3.3.2 – Detector Digital com Conversão Indireta

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

conversão indireta e definiremos com maior clareza seu funcionamento.

#### a. Princípio de Operação

Na conversão indireta para aquisição de imagem, um fotodiodo é acoplado a cada *pixel* e toda a matriz é coberta por um material cintilador, onde a interação da radiação X com este cintilador produz fótons luz visível de alta eficiência. Esses fótons de luz se chocam em um dispositivo de fotodiodo no qual os convertem em elétrons que podem ativar os *pixels* da camada de Silício amorfo (a-Si). Esta carga produzida pelo fotodiodo é armazenada em um capacitor e liberada após a ativação do *pixel* pelo TFT. Ao ser ativado pelo endereço do sinal a partir da unidade processadora de alta velocidade, essa carga acumulada é lida e direcionada para fora do capacitor como um sinal elétrico (KIM, 2003).

Na figura 3.31 é ilustrada uma estrutura básica da matriz de detector digital e um corte transversal do *pixel* deste detector digital.

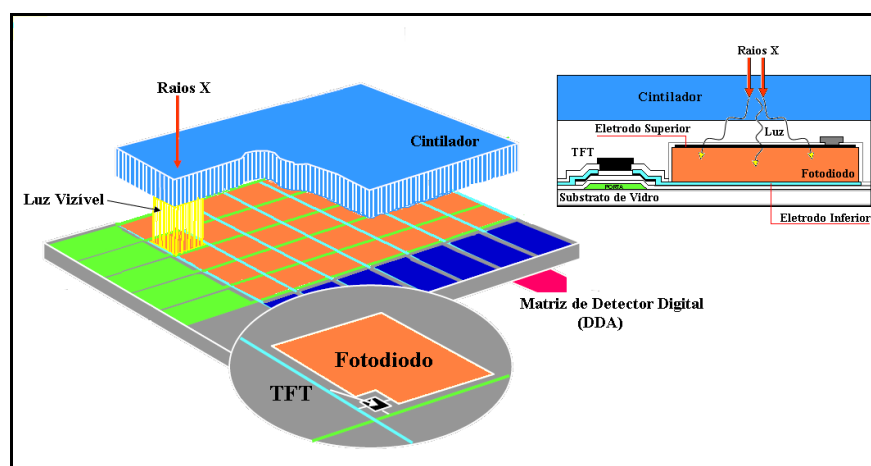


Figura 3.31 – Estrutura de uma matriz de detectores e uma estrutura transversal de um *pixel* de conversão indireta com cintilador (KIM, 2003) (A NIOSH SCIENTIFIC WORKSHOP, 2008).

#### b. Matrizes de Sensores de Silício Amorfo

Numa escala microscópica o silício amorfo foi impresso com milhões de transistores arranjados e acoplados quimicamente a um substrato de vidro monolítico, detalhados na figura 3.32 e 3.33. Cada sensor (*pixel*) de Silício amorfo desta matriz é utilizado no acúmulo de cargas geradas pela absorção de raios X e fornece, através das linhas de varredura, cargas que serão amplificadas pelo sistema. O componente de armazenamento destas cargas é um capacitor de matriz de fotodiodos chaveada no circuito, por um Transistor de Película Fina (TFT).



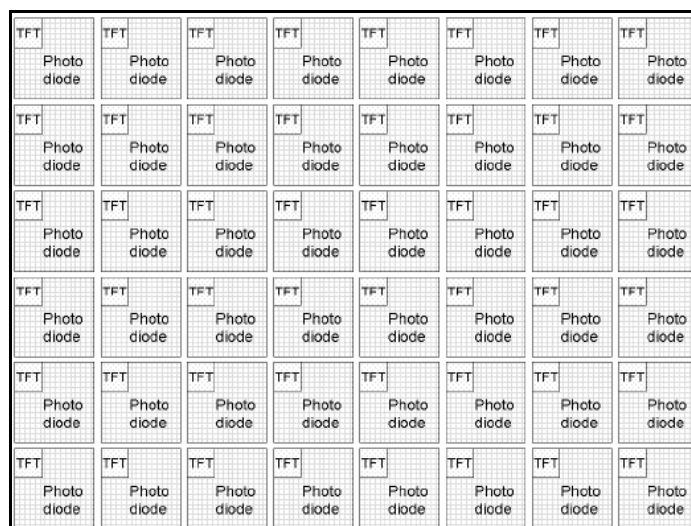


Figura 3.32 – Arranjo de *pixels* compostos por Fotodiodos e TFTs na matriz de detectores direto (NASCIMENTO, 2012).

Quando acumulado cargas nestes capacitores de Silício amorfo, ao sinal, o TFT é ativado por um sinal de endereço da unidade de processamento de alta velocidade, a carga acumulada é lida como um sinal elétrico pela unidade de processamento de sinal de alta velocidade. Ao desligar o TFT o capacitor volta a acumular cargas para uma posterior leitura do *pixel* (NASCIMENTO, 2012).

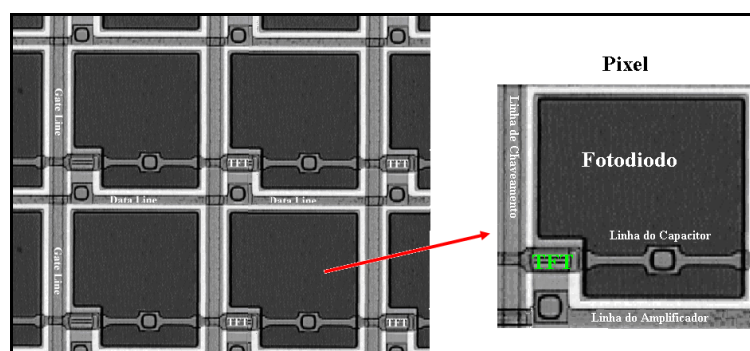


Figura 3.33 – Arranjo eletrônico de *pixels* compostos por Fotodiodos e TFTs na matriz de detector direto. (NASCIMENTO, 2012).

Fótons chocam-se no fotodiodo que são convertidos em dois portadores de carga elétrica, chamado par elétron-buraco. Um par elétron-buraco consiste de um elétron carregado negativamente e um buraco carregado positivamente.

O número de cargas produzidas irá variar com a intensidade dos fótons de luz penetrante, pulsos elétricos são criados e podem ser lidos rapidamente e interpretados pelo computador para produzir uma imagem digital.

O esquema dos componentes principais encontra-se apresentado na figura 3.34. Em grandes matrizes, são produzidos milhares de sinais que devem ser lidos de forma organizada para que a informação de cada um deles represente a posição correta do *pixel*. Normalmente a varredura é feita de forma progressiva.

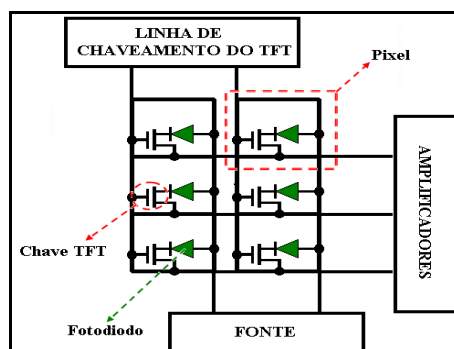


Figura 3.34 – Diagrama do circuito de uma matriz de sensores de silício amorfo (VARIAN, 2010).

Embora o silício amorfo tenha propriedades eletrônicas proeminentes, seu baixo número atômico não o permite trabalhar com altas energias. Por esta razão os raios X são convertidos em luz e a espessura do detector é maior que a dos detectores diretos.

### 3.3.4 – Comparação entre as Técnicas Radiográficas Convencional e Computadorizada.

Devido a sua alta sensibilidade radiográfica, os IPs são capazes de detectar radiações a baixos níveis, sendo capazes de formar imagem com tempo de exposição inferior do que com filmes convencionais. Porém, este fato os torna altamente vulneráveis a radiações espalhadas, que contribuem negativamente na qualidade da imagem (NASCIMENTO, 2012).

Os IPs possuem dimensões próprias de acordo com cada fabricante e alguns tamanhos são padrões de acordo com o equipamento que será utilizado, o que não acontece com os filmes convencionais que podem ser adaptados a qualquer tamanho e dependerá única e exclusivamente das dimensões da área que será analisada, sem interferir no resultado final.

Os filmes convencionais possuem maior sensibilidade a luz visível, o que não acontece com os IPS, que dependendo do local onde estará sendo realizada a radiografia seria permitido utilizar o IP diretamente no objeto sem a necessidade de chassi. O local deve ter baixa luminosidade para não ocorrer o apagamento do IP. As placas podem ser reutilizadas milhares de vezes sem gerar resíduos químicos com redução do impacto ambiental e preocupações regulamentares.

Também nesta técnica, o número de níveis de cinza é dependente do número de bits usado para quantificação, geralmente 12 ou 16 bits, ou seja, 4096 ou 65536 níveis de cinza. No sistema de radiografia convencional esse número é limitado à visão humana, ou seja, 32 níveis de cinza (SILVA, 2013).

O sistema computadorizado apresenta uma faixa dinâmica com resposta linear com relação à dose de exposição e extremamente ampla, como pode ser visto na figura 3.35. Isso permite a captura de imagens de objetos complexos numa única exposição, descartando a necessidade de realizar vários carregamentos de filme ou várias exposições (MACHADO, 2011).

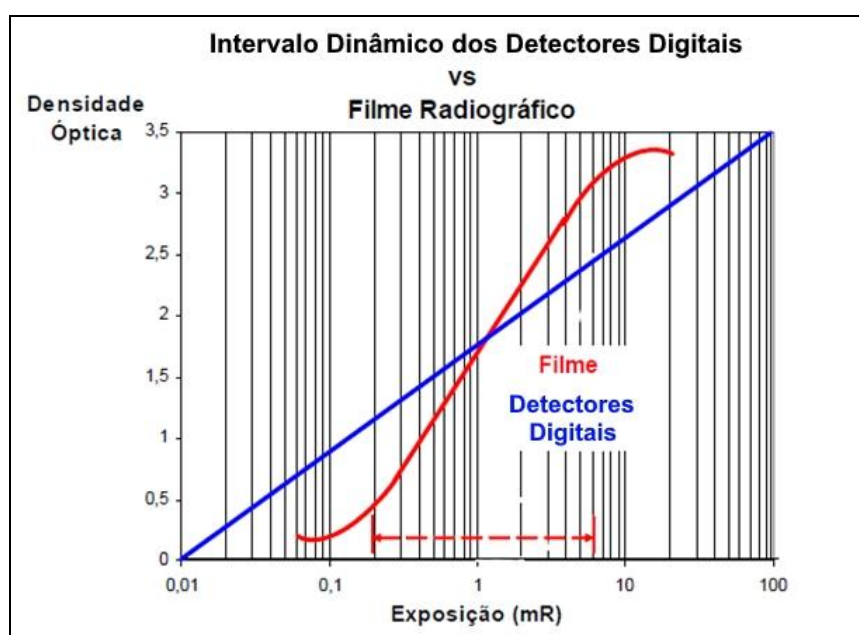


Figura 3.35 – Comparação da curva de sensibilidade entre o filme convencional e a placa de imagem (DURR, 2011).

Para sistemas filme-écran, que servem tanto como meio de aquisição de imagem como também para a visualização, é necessário sintonizar o contraste do filme com a velocidade radiográfica a faixa de exposição, para adquirir uma imagem com contraste ótimo e o mínimo de ruído. Já com placa de imagem isso não é necessário, devido ao fato da aquisição e a visualização da imagem serem eventos que ocorrem separadamente. Então, compensações para sub e sobre exposição são possíveis por meio de algoritmos aplicados aos dados digitais.

Devido a alta sensibilidade das placas de imagem, aproximadamente 100 vezes mais sensível do que os filmes radiográficos convencionais, elimina-se o longo tempo de

exposição, sendo capaz de detectar radiação onde filmes radiográficos convencionais não seriam.

A manipulação da imagem em sistemas de RC permite a possibilidade de múltiplas operações. Já na radiografia convencional, existe apenas a possibilidade de aumentar ou diminuir a intensidade do negatoscópio e a utilização de lupas e régua milimetradas para analisar as radiografias (SILVA, 2013).

### 3.4 – Imagem Radiográfica Digital

A imagem digital consiste em uma matriz onde cada elemento, ou *pixel*, é representado por um valor numérico que simboliza uma tonalidade de cor. A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados bits, que podem assumir os valores 0 ou 1. Um conjunto de bits chama-se byte. Os bits e bytes são usados para representar os *pixels* da imagem digital. Diferentes configurações de bytes representam as diversas tonalidades dos *pixels* (OLIVEIRA, 2007). A figura 3.36 mostra a relação entre as configurações de bytes, valores de *pixel* e tonalidades de cinza.

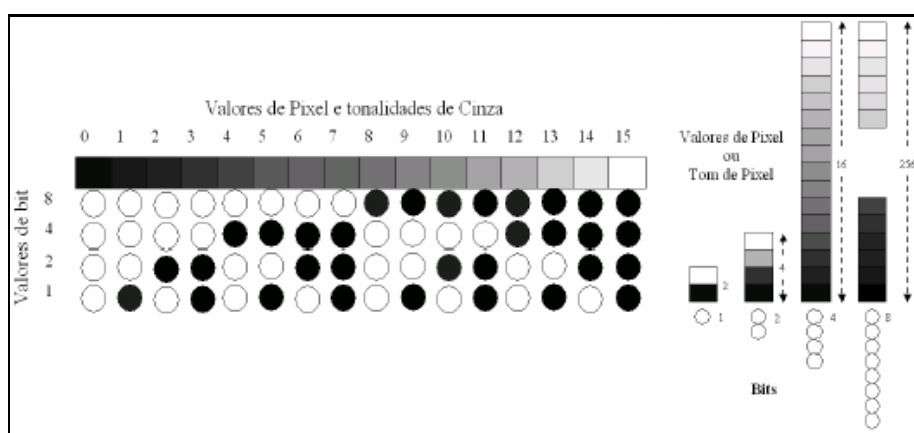


Figura 3.36 – Comportamento entre os valores de *pixel* e os tons de cinza (OLIVEIRA, 2007).

#### 3.4.1 – Qualidade da Imagem

##### 3.4.1.1 – Resolução Espacial

Um dos principais parâmetros que afetam a qualidade da imagem digital é a resolução espacial. A resolução espacial é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidos ou visualizados (ANDREUCCI, R., 2003).

O tamanho e a quantidade de *pixels* de uma imagem são fatores determinantes para a análise de detalhes em uma imagem digital. Desde que cada *pixel* tenha somente um valor numérico ou escala de cinza, não é possível ver qualquer detalhe com apenas um *pixel*, uma vez que todas as estruturas dentro da área coberta por este *pixel* serão representadas por um único valor numérico ou escala de cinza. Consequentemente, boa resolução requer *pixels* pequenos que são obtidos por selecionar matrizes de grandes dimensões.

Outro fator importante é o número de bits usados para representar cada *pixel*. Este fator afeta o número da escala de cinza ou níveis de nitidez: quanto maior o número de bits por *pixel*, maior será a escala de tons de cinza, ou níveis de brilho da imagem (OLIVEIRA, 2007).

#### 3.4.1.2 – Contraste

Contraste é o grau de diferenciação entre duas estruturas adjacentes, e sua função é tornar visíveis as interfaces e estruturas do objeto inspecionado. O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em três tipos: contraste do objeto, do sujeito e da imagem (CORREA, 2005) (SPRAWLS, 1995). A figura 3.37 mostra os estágios de formação do contraste da imagem.

- a. Contraste do objeto - Para um objeto ser visível em uma imagem radiográfica, este objeto deve possuir contraste físico em relação ao meio no qual está inserido. Este contraste, denominado contraste do objeto, é função da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto em relação ao meio. O contraste do objeto é proporcional ao produto de sua densidade e espessura (SPRAWLS, 1995).
- b. Contraste do sujeito - Após a interação da radiação com diferentes estruturas do corpo, emerge destas uma radiação cuja distribuição em energia é diferente daquela que penetrou no corpo, devido ao fato de, no trajeto haver estruturas de características diferenciadas. A essa nova distribuição de energias que compõem o feixe dá-se o nome de imagem área (SILVA, 2000). A partir disso, pode-se definir uma grandeza bastante útil quando se trata da produção de uma imagem: o contraste do sujeito. O contraste do sujeito é a diferença na exposição entre vários pontos dentro da área da imagem. Este é afetado, além do contraste do objeto, pelos fatores que influenciam na qualidade da radiação, tais como a tensão aplicada, o material do ânodo, o *ripple* e a filtração (SPRAWLS, 1995).

- c. Contraste da imagem - O contraste da imagem radiográfica depende basicamente das características das estruturas do objeto a ser inspecionado, como densidade e espessura, da distribuição de energia dos fótons, da intensidade de fótons que emergem do objeto, das características do filme e do processamento da imagem.

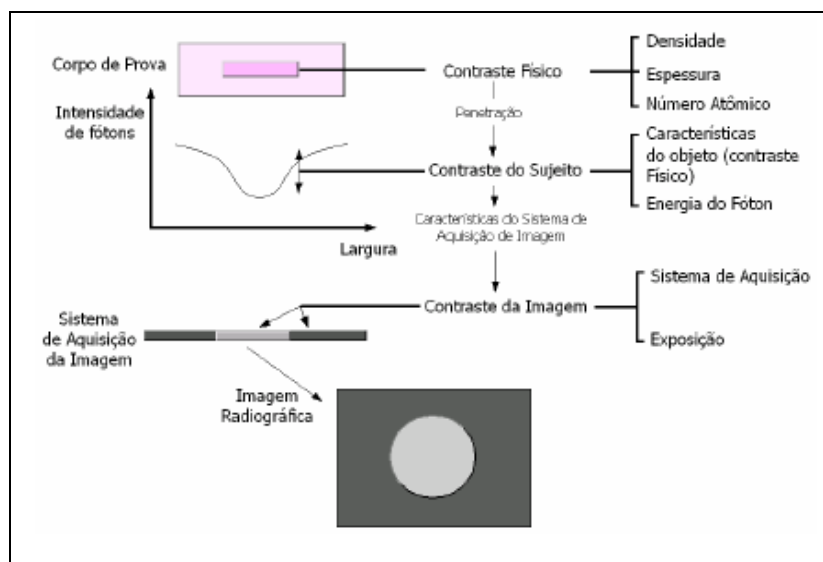


Figura 3.37 – Estágios de formação do contraste da imagem (SPRAWLS, 1995).

A seguir estão descritos os principais fatores que afetam o contraste:

#### i. Radiação Espalhada

Um fator que influencia o contraste da imagem é a radiação espalhada (ou dispersa). O contraste diminui exponencialmente com o aumento deste tipo de radiação (SPRAWLS, 1995). A radiação espalhada influencia na imagem radiográfica, diminuindo o contraste, principalmente nas regiões claras do filme, mascarando os detalhes situados nestas áreas. A figura 3.38 mostra o contraste de uma imagem obtida sem e com a radiação espalhada.

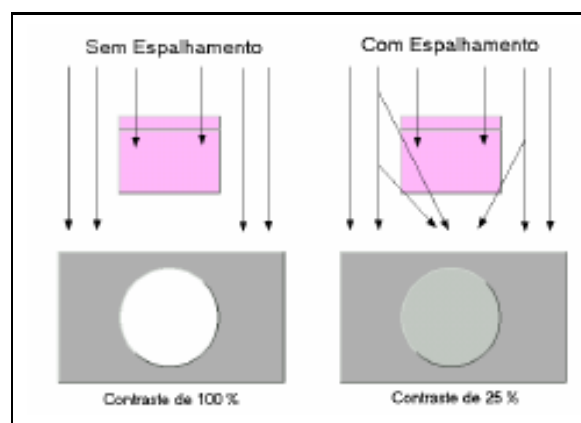


Figura 3.38 - Contraste obtido sem e com radiação espalhada (SPRAWLS, 1995).

## ii. Energia do Feixe de Radiação

A energia é um dos fatores que mais influenciam o contraste radiográfico, controlando a capacidade de penetração do feixe de radiação (SPRAWLS, 1995). Quanto maior a energia, menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades do objeto, dando origem a uma imagem de baixo contraste.

### 3.4.1.3 – Nitidez da Imagem

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

A seguir estão descritos os principais fatores que afetam a nitidez da imagem:

#### a. Distribuição da Intensidade do Feixe no Ponto Focal

A nitidez de uma imagem varia com a distribuição de intensidade do feixe através do ponto focal (SPRAWLS, 1995). A figura 3.39 mostra a perda da nitidez da imagem devido à distribuição de intensidade do feixe no ponto focal.

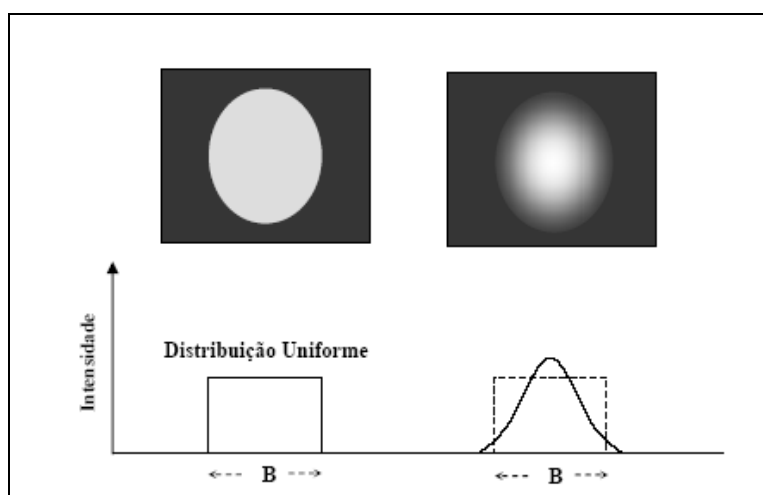


Figura 3.39 - Perda da nitidez devido a distribuição de intensidade do feixe no ponto focal (SPRAWLS, 1995).

## b. Fatores Geométricos

Os fatores geométricos interferem na representação de estruturas na imagem, causando distorções, ampliação e indefinição de contornos. A distorção da imagem pode ser provocada pela distância inadequada do foco da fonte ao sistema de detecção da imagem e pela distância inadequada do foco ao objeto irradiado.

Quando o objeto irradiado está separado do sistema de detecção, a imagem deste tende a ser maior. Esta ampliação ou magnificação aumenta com o aumento da distância objeto-detector ou com a aproximação do objeto irradiado em relação ao foco da fonte. Nas figuras 3.40 e 3.41 são mostradas essas duas situações, em que a magnificação aumenta a indefinição das bordas das estruturas na imagem.

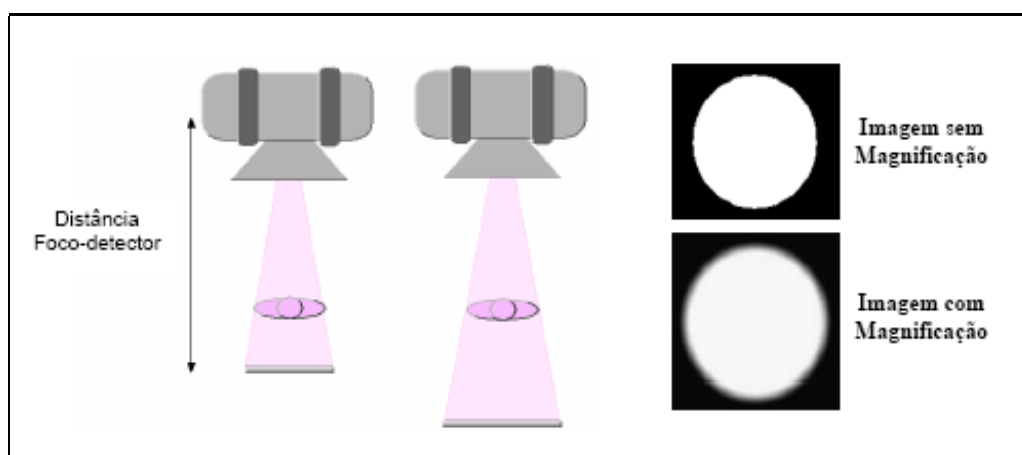


Figura 3.40 – Ampliação da imagem em função de distâncias foco-detector diferentes (SPRAWLS, 1995).

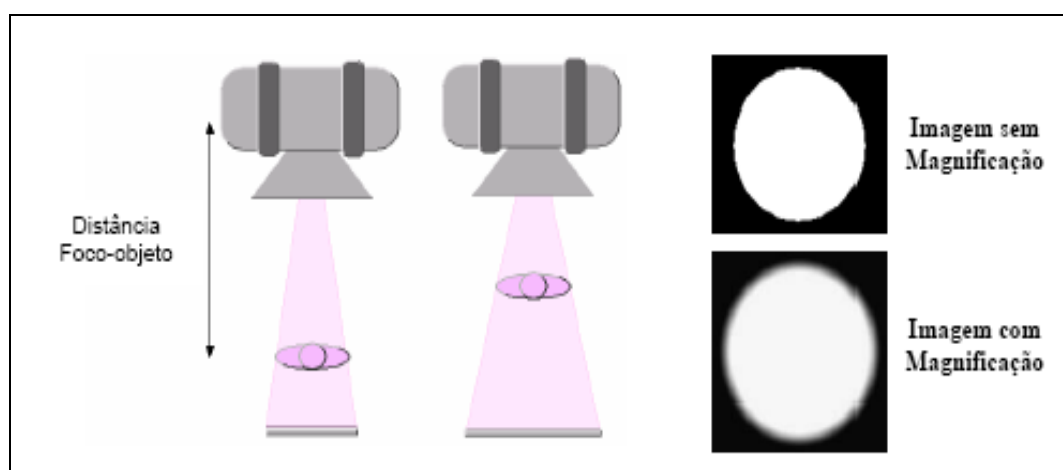


Figura 3.41 – Ampliação da imagem em função de distâncias foco-objeto diferentes (SPRAWLS, 1995).



Outra importante causa de distorção da imagem é o não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto. As partes do objeto fora do centro do feixe sofrem maior distorção (SPRAWLS, 1995). Na figura 3.42 é mostrada a distorção de uma imagem, causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto.

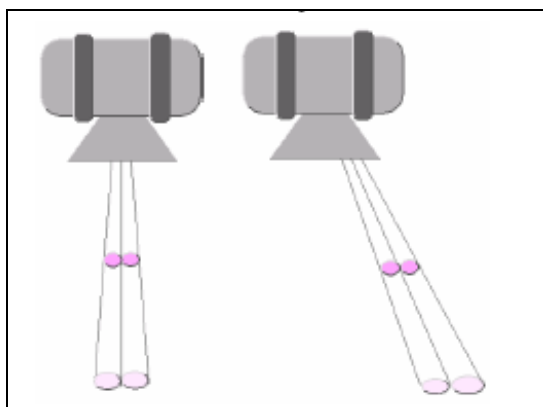


Figura 3.42 – Distorção causada pelo não alinhamento do eixo central do feixe com o objeto (SPRAWLS, 1995).

#### c. Tamanho Finito do Ponto Focal

Quanto maior é o tamanho focal de uma fonte de radiação maior será a indefinição das bordas estruturais da imagem, principalmente quando houver magnificação (SPRAWLS, 1995).

#### 3.4.1.4 – Ruído

O ruído são variações aleatórias de intensidade no sinal da imagem, que contribuem para redução de visualização de detalhes, especialmente de objetos pequenos e de baixo contraste. O ruído da imagem possui diversas origens. A própria maneira aleatória que os fótons de radiação são distribuídos no processo de formação da imagem é uma fonte de ruído, denominado ruído quântico.

Existem vários tipos de fontes de ruídos que podem contribuir para o ruído geral na imagem final, contudo serão mencionados apenas os mais importantes.

- a. Ruído de Quanta nos Raios X - A variação randômica dos raios X, ao ser absorvida pelo receptor PSP, determina o componente do ruído de quanta. Mesmo quando exposto a um feixe de raios X uniforme, o número de quanta absorvido por unidade de área na

placa fosforescente varia, conforme a distribuição de Poisson. Quanto menor o número de fótons absorvidos, maior o grau de flutuação.

- b. Ruído de Luminescência - A variação da luminescência estimulada durante o processo de leitura contribui significativamente para a variação na saída do sinal. Essa flutuação é causada pelo número de fótons gerados no IP. O ruído de luminescência é inversamente proporcional ao número de fótons e depende também de vários outros fatores tais como, a energia dos raios X incidente, a quantidade de luminescência fotoestimulada na placa, a eficiência do guia coletor de luz, a estabilidade do *laser* e a eficiência do conversor fotomultiplicador.
- c. Ruídos da Estrutura do IP - Esse tipo de ruído é causado pela irregularidade da camada interna do IP. Para uma diminuição desse ruído é importante que a granulação do mesmo seja a menor possível e que tenha uma distribuição uniforme.
- d. Ruídos de Quantização - Ruídos de quantização adicionam incerteza na determinação dos sinais digitais discretos. Este tipo de ruído é dependente da quantidade de bits utilizado no processo de conversão analógica – digital.
- e. Ruídos Eletrônicos - Ruídos eletrônicos causam degradação no sinal de saída, durante todo o processo, contudo com maior intensidade no processo de conversão fotoelétrica. Na figura 3.43 pode-se observar a contribuição dos ruídos durante todo o processo de obtenção de uma imagem radiográfica.

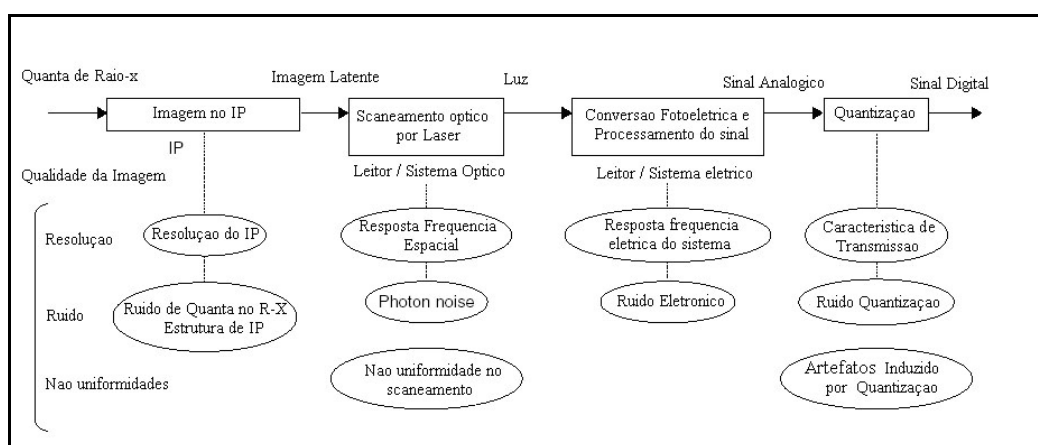


Figura 3.43 – Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da radiografia (SILVA, 2000).

### 3.4.1.5 – Razão Sinal Ruído (SNR)

Como mencionado anteriormente, o ruído em um sistema eletrônico ou digital é qualquer sinal indesejado que interfere na detecção ou processamento do sinal desejado. Este ruído degrada o desempenho do sistema, então é importante determinar a razão entre o sinal desejado e o indesejado, ou a razão sinal ruído. Quanto maior for esta razão, maior qualidade de visualização de detalhes a imagem apresentará.

Em uma imagem digital, a razão sinal ruído pode ser calculada através da razão entre a média de certa região da imagem e seu respectivo desvio padrão, obtido através do programa de processamento de imagem. A SNR é calculada pela equação 3.10.

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (3.10)$$

onde,

$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (3.11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_{i,j} - \bar{X})^2}{(ixj) - 1}} \quad (3.12)$$

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

## 3.5 – Processamento da Imagem Digital

Imagem digital é na realidade um suporte físico que carrega informação. Processar uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair mais facilmente a informação. O processamento de imagens é uma ciência que permite modificar, analisar e manipular imagens digitais a partir de um computador.

As funções de processamento de imagens digitais podem ser classificadas em duas, por escopo, que está relacionado com técnicas de processamento ou por resultado, que está relacionado com os tipos de resultado de cada técnica (SCURI, 1999). Através do diagrama mostrando na figura 3.44 pode-se ter uma ideia melhor das classes de processamento por resultado.

A qualidade é um fator comum em todas as classes de processamento. Existem duas subdivisões em qualidade de imagem: fidelidade e inteligibilidade. No primeiro caso, a

preocupação é em aproximar a imagem processada da imagem original ou de um padrão estipulado que a melhor represente. No segundo caso a preocupação é com a informação extraída da imagem, seja pelo olho humano, seja por algum processamento (SCURI, 1999).

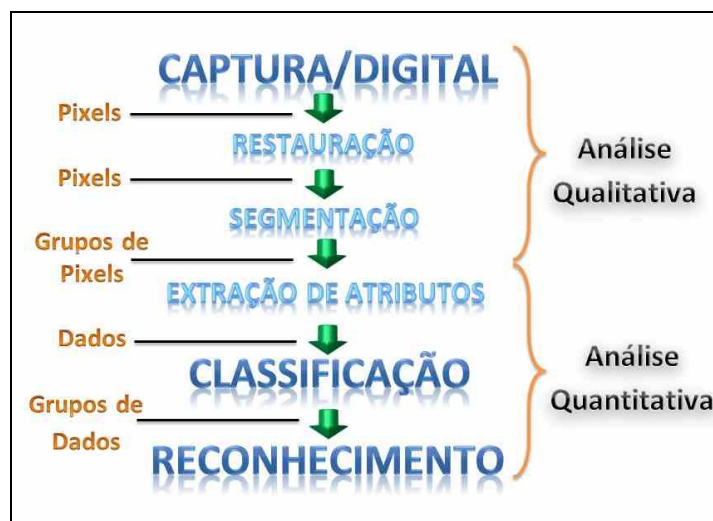


Figura 3.44 – Diagrama de sequência do processamento digital (SCURI, 1999).

### 3.5.1 – Restauração/Realce

A restauração busca compensar distorções específicas, normalmente geradas no momento da aquisição. Quando se pode identificar experimentalmente a função que representa a deformação ou construir um modelo matemático adequado, é possível buscar a função inversa e aplicá-la sobre a imagem deformada. Por exemplo: correção de foco, imagens borradas por movimento. Em todos os casos, a formulação matemática envolvida é extremamente complexa e o custo computacional muito alto. Os resultados podem ter consequências somente qualitativas (SCURI, 1999).

### 3.5.2 – Segmentação e Extração de Atributos

No contexto de processamento de imagens científicas, é comum buscar dados relacionados com os objetos presentes na imagem. Para isso, são necessárias as operações de Segmentação, que procuram isolar regiões de *pixels* e operações de Extração de Atributos, que focam nessas regiões e calculam uma série de parâmetros que as descreverão (SCURI, 1999).

#### 3.5.2.1 – Classificação

Uma vez com os parâmetros descritos acima coletados, pode-se distinguir objetos na imagem agrupando parâmetros de acordo com sua semelhança para cada região de *pixels*

encontrada. Feita a classificação dos parâmetros, pode-se tomar decisões e relatar fatos relacionados com os objetos do mundo real, ponderando sempre através uma medida de erro da classificação.

A palavra classificação não denota nenhum juízo de valor, mas apenas o grupamento em classes dos diversos objetos obtidos na segmentação, cujos atributos já foram medidos. Em geral, vários atributos são necessários para uma correta classificação. Mas, quanto mais atributos, mais complexo se torna o problema. Desta forma, é muito importante realizar uma seleção adequada dos atributos disponíveis, visando otimizar o processo (SCURI, 1999).

### 3.5.2.2 – Operações Pontuais

Operações pontuais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende apenas do mesmo *pixel* na imagem original, figura 3.45. Neste caso a única informação fornecida é a cor do *pixel*, por isso muitas das operações pontuais são operações que alteram características de cor e luminância, tais como: brilho, contraste, nível de branco e nível de preto, saturação, dentre outros.

Qualquer operação pontual pode ser visualizada como um mapeamento de *pixels* da imagem original para a imagem processada. E isso é facilmente representado como um gráfico que relaciona as tonalidades disponíveis na imagem original com as tonalidades disponíveis na imagem processada.

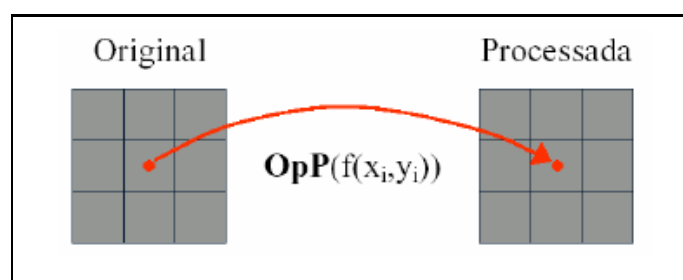


Figura 3.45 – Operações pontuais na imagem digital (SCURI, 1999).

As operações pontuais que envolvem apenas uma imagem original são chamadas de unárias, e as operações que usam mais de uma imagem original, são chamadas de binárias, ternárias, etc. Um exemplo de operação pontual com várias imagens é a média de várias imagens capturadas na mesma posição, é uma técnica comum de eliminação de ruído. Mas as operações binárias mais comuns são as operações aritméticas de soma, subtração e divisão de duas ou mais imagens.

Embora as funções pontuais estejam restritas somente ao *pixel* que está sendo processado, o processamento em si pode levar em consideração dados globais da imagem, como por exemplo, o histograma. O histograma é uma função estatística da imagem que para cada nível de tonalidade, calcula quantos *pixels* existem naquela tonalidade. Muitas operações pontuais usam o histograma como parâmetro de decisão para fornecer resultados diferentes para o *pixel* da imagem processada (SCURI, 1999).

### 3.5.2.3 – Operações Locais

Operações locais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de uma vizinhança do mesmo *pixel* na imagem original, figura 3.46. As operações que realizam deformações no *grid* de *pixels* utilizam a técnica de interpolação para encontrar o novo ponto. A técnica de interpolação não deixa de ser uma operação local que depende apenas de uma vizinhança, embora algumas técnicas de interpolação muito sofisticadas e em geral muito lentas usam uma vizinhança bem extensa.

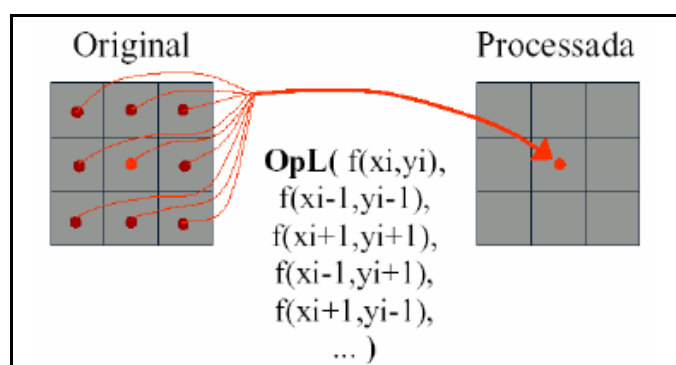


Figura 3.46 - Operações locais (SCURI, 1999).

### 3.5.2.4 – Operações Globais

Operações globais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de um processamento realizado em todos os *pixels* da imagem original. Neste grupo de operações estão as transformadas de domínio, tais como a Transformada de Fourier, a Transformada de Wavelets e a Transformada de Hough (SCURI, 1999).

### 3.5.3 – Software

Existem diversos sistemas de processamento de imagens disponíveis no mercado. Eles se distinguem pela forma de distribuição (Comercial, *Shareware*, *Freeware*), pela área de aplicação (editoração eletrônica, análise científica, visualização, edição informal, pesquisa) e pelas plataformas em que estão disponíveis (UNIX, Windows, MAC) (SCURI, 1999).

Geralmente os sistemas de radiografia computadorizada fornecem programas próprios de processamento de imagem que permitem diversas operações de análise com a imagem gerada após o processamento do *scanner*, tais como inversão na escala de cor da imagem, realce de bordas (imagem em relevo), redução de ruído, medição de descontinuidades na imagem e, inclusive, geração de relatórios finais.

### **3.6 – Materiais Fundidos**

O processo de fabricação de peças metálicas consiste essencialmente em encher com metal líquido a cavidade de um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada. A fundição é um dos processos mais antigos e também um dos mais versáteis, principalmente quando se considera os diferentes formatos e tamanhos das peças que se pode produzir por esse processo. Sabendo-se que toda essa variedade é obtida não com um único processo e sim com a escolha, dentre os processos disponíveis, do que melhor se adapta às exigências do mercado e sua produção garanta o mínimo custo dentro do prazo estipulado. A matéria-prima metálica para a produção de peças fundidas é constituída pelas ligas metálicas ferrosas (ligas de ferro e carbono) e as não-ferrosas (ligas de cobre, alumínio, zinco e magnésio) (SOARES, 2000).

#### 3.6.1 – Base da Moldagem

Após a fusão do metal em fornos apropriados com altas temperaturas o metal líquido é vazado num molde, cuja cavidade corresponde ao negativo da peça que se deseja obter. Para se construir um molde em areia é necessário primeiramente se fabricar o modelo (adaptação do desenho da peça) e os machos, caso existam furos ou partes ocas. Numa primeira abordagem podemos dizer que o modelo é fabricado em madeira e o molde e o macho em areia. Dessa forma, a partir de um modelo podemos fabricar uma variedade muito grande de moldes, cada molde dando origem a uma peça fundida. Após vazamento e solidificação, a peça é retirada do molde, com forma próxima à final precisando apenas passar pelas etapas de acabamento: corte de canais; rebarbação; usinagem; tratamento térmico e soldagem (opcionais); controle de qualidade final e expedição.

##### 3.6.1.1 – Matéria prima: o Cobre

O Cobre e suas ligas são o terceiro metal mais utilizado no mundo, perdendo apenas para os aços e para o alumínio e suas ligas. Suas principais características são a elevada

condutividade elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga. Sua densidade é de  $8,94 \text{ g/cm}^3$ , um pouco acima da do aço, e sua temperatura de fusão é de  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ .

As ligas de cobre podem ser fundidas por processos que permitam obter uma grande variedade de formas geométricas, como a fundição em areia, a fundição em casca, o processo por cera perdida e a fundição sob pressão. Mesmo os processos que permitem obter peças de boa qualidade, porém com limitação na variedade de formas, também podem ser aplicados às ligas de cobre, como a fundição contínua, a fundição centrífuga e a fundição em coquilha.

Para a escolha de um processo de fundição é fundamental determinar o tamanho e a forma das peças a serem fundidas, a quantidade de peças a serem produzidas e os requisitos de projeto, as tolerâncias dimensionais e a qualidade desejada.

A seguir, os diversos tipos de processo de fundição recomendados para ligas de cobre são relacionados, levando em condição o grau de fundibilidade (alto ou baixo):

- a. Fundição em areia: alta fundibilidade para latões (Cu-Zn) e bronzes com chumbo e zinco; e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos (com e sem chumbo), Cu-Zn-Sn, bronzes com chumbo, cobres de alta condutividade, latões de alta resistência mecânica, ligas cobre-cromo, cobre-alumínio, cuproníquel e Cu-Mn-Al.
- b. Fundição sob pressão: alta fundibilidade para latões e ligas cobre-alumínio e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos, bronzes fosforosos com chumbo, bronzes com zinco, cobres de alta condutividade, latões e alta resistência mecânica, ligas cobre-cromo, ligas cobre-alumínio, cobre berílio e cobre-manganês-alumínio.
- c. Fundição contínua: alta fundibilidade para bronzes fosforosos, bronzes com zinco, bronzes com chumbo e bronzes com zinco e chumbo. Fundibilidade razoável para bronzes fosforosos com chumbo, cobres de alta condutividade, ligas cobre-alumínio, cobre níquel e cobre-manganês-alumínio.
- d. Fundição centrífuga: alta fundibilidade para bronzes fosforosos, e fundibilidade razoável para bronzes fosforosos com chumbo, bronzes com zinco, bronzes com chumbo, latões e latões de alta resistência mecânica, cobres de alta condutividade,



ligas cobre-cromo, cobre-alumínio, cuproníqueis, cobre-berílio e cobre-manganês-alumínio.

- e. Fundição em coquilha (feito por gravidade com moldes permanentes de aço carbono): alta fundibilidade para bronzes fosforosos e bronzes fosforosos com chumbo, além de bronzes com chumbo. Fundibilidade razoável para bronzes com chumbo e zinco e bronzes com zinco (INFORMET, 2016).

A figura 3.47, a seguir, esquematiza as etapas de preenchimento do molde em areia com metal líquido.

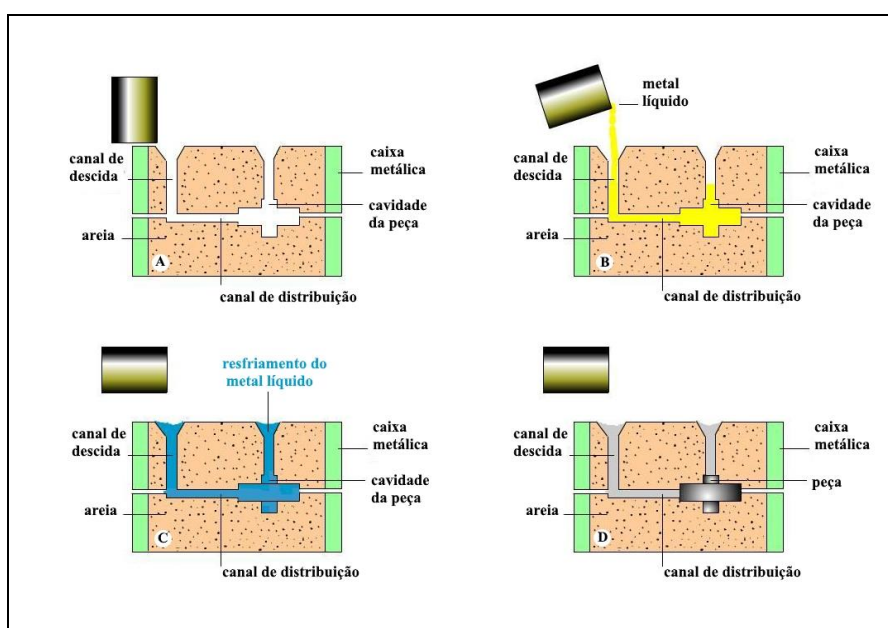


Figura 3.47 – Etapas para a confecção de peça fundida em molde de areia.

### 3.6.1.2 – Características do molde

Para que um produto fundido tenha a qualidade esperada, os moldes devem apresentar as seguintes características essenciais:

- Resistência suficiente para suportar a pressão do metal líquido.
- Resistência à ação erosiva do metal que escoar rapidamente durante o vazamento.
- Mínima geração de gás durante o processo de vazamento e solidificação, a fim de impedir a contaminação do metal e o rompimento do molde.
- Permeabilidade suficiente para que os gases gerados possam sair durante o vazamento do metal.

- e. Refratariedade que permita suportar as altas temperaturas de fusão dos metais e que facilite a desmoldagem da peça.
- f. Possibilidade de contração da peça, que acontece durante a solidificação. A fundição em moldes de areia verde não tem nada a ver com a cor verde. O processo tem esse nome somente, porque a mistura com a qual o molde é feito mantém sua umidade original, quer dizer que não passa por um processo de secagem. A matéria-prima para esse tipo de moldagem é composta, basicamente, por um agregado granular refratário, chamado de areia-base que pode ser sílica, cromita ou zirconita, mais argila (como aglomerante) e água. Tanto metais ferrosos quanto não-ferrosos podem ser fundidos nesse tipo de molde. Os moldes são preparados, o metal é vazado por gravidade, e as peças são desmoldadas durante rápidos ciclos de produção. Após a utilização, praticamente, toda a areia (98%) pode ser reutilizada. Esse processo de moldagem é facilmente mecanizável, sendo realizado por meio de máquinas automáticas.

#### 3.6.1.3 – Tipos de defeitos dos produtos fundidos

Como em todo o processo, algumas peças estão suscetíveis aos erros e assim aparecem os defeitos. Alguns defeitos comuns das peças fundidas são:

- a. Inclusão da areia do molde nas paredes internas ou externas da peça. Isso causa problemas de usinagem: os grãos de areia são abrasivos e, por isso, estragam a ferramenta. Além disso, causam defeitos na superfície da peça usinada.
- b. Defeitos de composição da liga metálica que causam o aparecimento de partículas duras indesejáveis no material. Isso também causa desgaste da ferramenta de usinagem.
- c. Rechupe, ou seja, falta de material devido ao processo de solidificação, causado por projeto de massalote mal feito.
- d. Porosidade, ou seja, a existência de "buraquinhos" dentro da peça. Eles se originam quando os gases que existem dentro do metal líquido não são eliminados durante o processo de vazamento e solidificação. Isso causa fragilidade e defeitos superficiais na peça usinada.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o planejamento experimental inicial assim como o material e os métodos utilizados nas instalações colaboradoras para realização deste trabalho.

#### **4.1 – Planejamento Experimental**

Para um melhor planejamento das etapas a serem realizadas foi necessário avaliar os parâmetros que seriam adotados no desenvolvimento experimental deste trabalho. Os tipos de equipamentos de alta energia, os tipos de detectores de radiação, a escolha do material do corpo de prova e as técnicas de END empregadas foram os primeiros desafios para que fosse possível o desenvolvimento deste estudo. A partir da obtenção do corpo de prova proveniente do processo de fundição em cobre com sua espessura variando de 75 a 150 mm que atendia às premissas estabelecidas, anteriormente, e este corpo de prova viabilizou tanto a utilização de aceleradores lineares para a radiação X como a utilização de uma fonte gama. Determinamos também a utilização do acelerador circular por indução *Betatron*, como mais uma opção de fonte de raios-X de alta energia, com possibilidade de avaliar materiais com espessuras entre 50 a 200 mm.

Com a colaboração da Confab foi utilizado um acelerador linear Linatron de 4 MeV de energia nas primeiras etapas e, posteriormente, um acelerador linear Linatron M de 3 MeV na etapa final, neste local, foram realizados testes para as técnicas convencionais e para técnicas computadorizadas nas primeiras etapas e na última etapa foi utilizada RC e o detector digital. Foi utilizada posteriormente uma fonte gama de Cobalto-60 com Atividade de 49,0 Ci, e nesta etapa,, os testes foram feitos com o apoio da Nuclep. Nos testes com o apoio destes colaboradores foram utilizados equipamentos para RC, durante todo o trabalho, assim como o equipamento de detecção direta, utilizado nas últimas etapas. Para facilitar o entendimento das principais etapas neste trabalho experimental, foi elaborado um fluxograma mostrando as etapas envolvidas neste estudo conforme mostrado na figura 4.1.

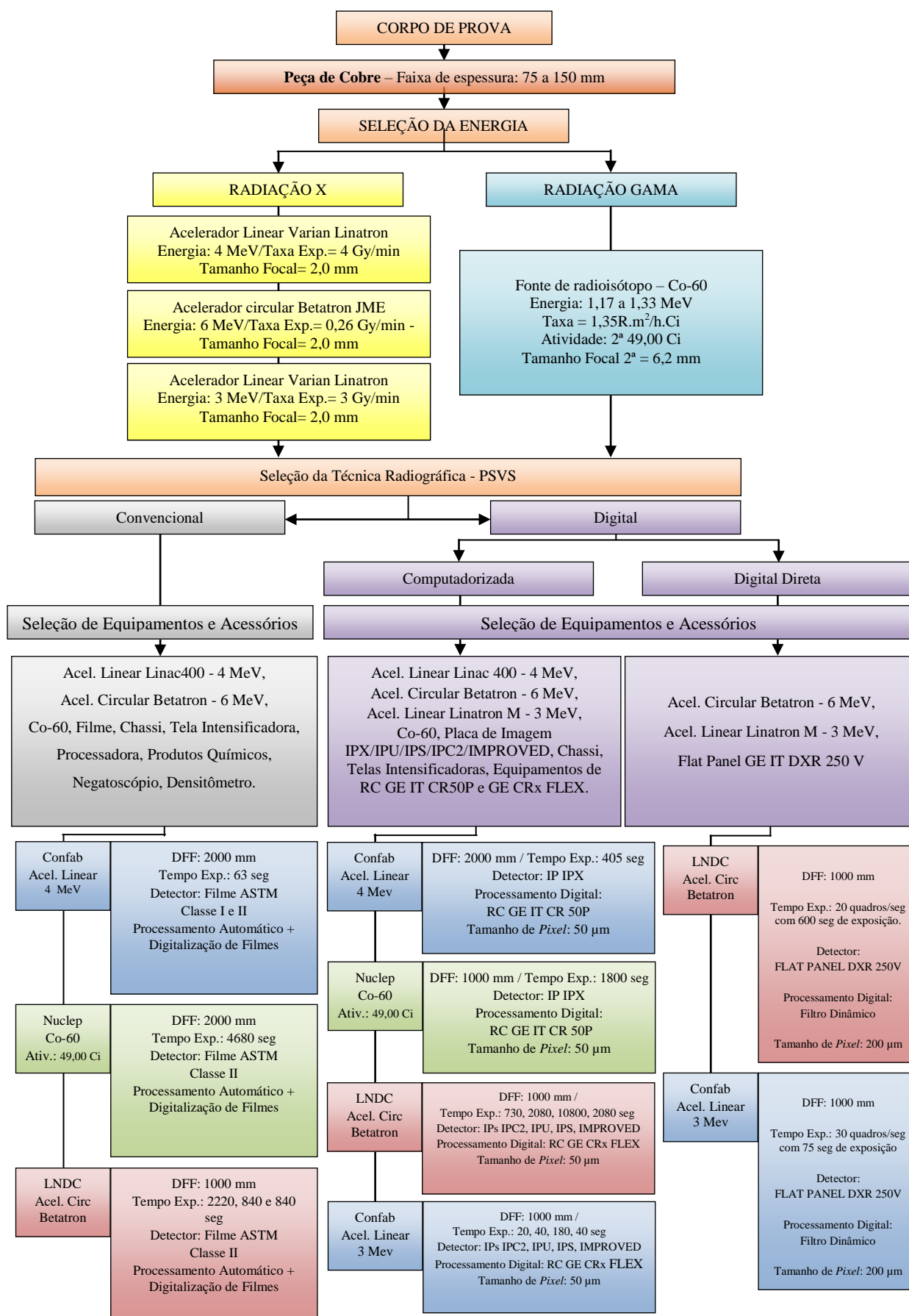


Figura 4.1 – Fluxograma geral da sequência de etapas realizadas nas instalações.

## 4.2 – Materiais e Equipamentos

A seguir serão apresentadas as características do corpo de prova, os equipamentos emissores de radiação e os detectores de radiação utilizados neste trabalho, bem como a metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo proposto.

### 4.2.1 – Corpo de Prova

Este corpo de prova, conforme pode ser visto na figura 4.2, de nome bloco refrigerador foi fabricado na empresa Cecal Indústria e Comércio Ltda, foi fundido em cobre atendendo a condutividade elétrica de peças fundidas Cu-C(CC040A) que estava em conformidade com os requisitos apresentados na Tabela 1 da norma DIN EN 1982-2008, além da norma, são seguidas as orientações dos boletins técnicos do fabricante. O teor de cobre garante a propriedade de excelente material para condução térmica. Este corpo de prova de cobre possui uma espessura máxima de 150 mm antes da usinagem final, contendo serpentinas no seu interior. A serpentina de maior diâmetro ( $\varnothing$  48,3 mm) é de material inconel (Ni-Cr-Fe) por onde circula o ar de refrigeração. A finalidade da serpentina de menor diâmetro ( $\varnothing$  17,2 mm) é para a colocação de termopar.

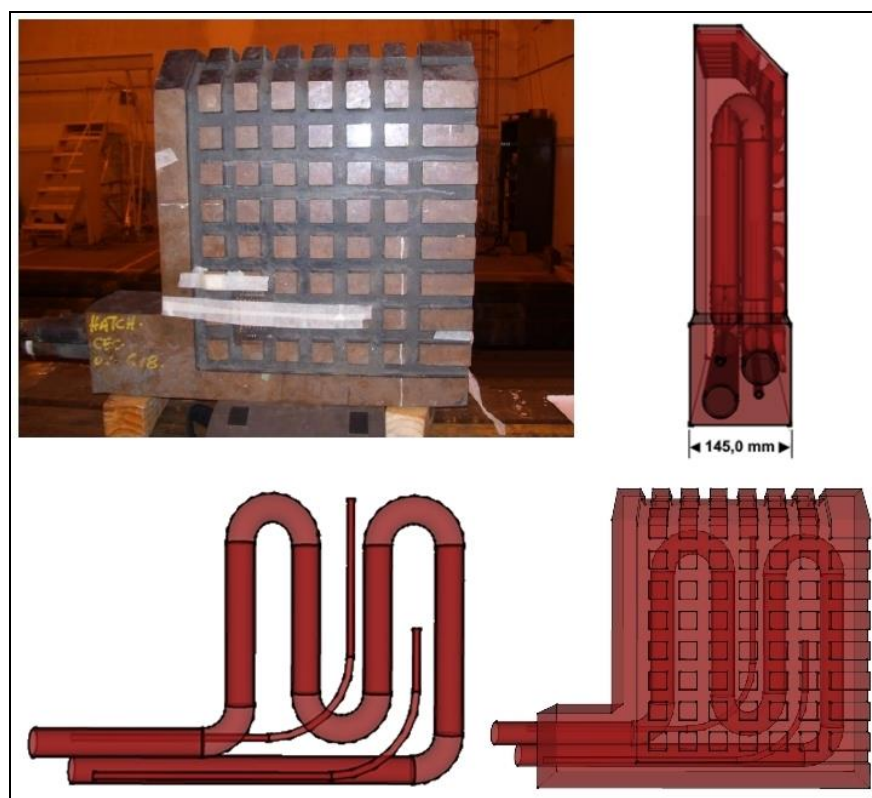


Figura 4.2 – Bloco refrigerador com 460 kg, e a planta das serpentinas com diâmetros em milímetros.

Durante a fabricação, as superfícies externas das serpentinas foram posicionadas e travadas por meio de “chapelins”, peças auxiliares que sustentam um núcleo na posição correta, durante o vazamento do metal (processo de fundição), junto ao modelo, agindo como separador (espaçadores), calços ou distanciadores, evitando que as peças se quebrem ou criem fissuras (trincas), quando desmoldadas, atuando também como determinante da espessura da parede.

As superfícies das serpentinas devem possuir boas condições de limpeza para que no processo de fundição haja uma adequada fusão com o material do bloco, sem, por fim que este processo de fusão não danifique suas paredes. Como primeira parte do processo de fundição deste bloco foi a troca térmica, é comum que estas seções não apresentem descontinuidades, do tipo bolhas de gás e falta de fusão, entre as paredes das serpentinas e o material do bloco. Contudo, para que a eficiência da troca térmica seja mantida, conforme projeto, deve ser observado essas condições. Este corpo de prova possui o cobre como elemento de liga de maior teor percentual.

Para o atendimento destas condições, como mostra a figura 3.48, os materiais foram selecionados mantendo o ponto de fusão para o cobre do bloco no valor de vazamento de 1180 °C e selecionando uma composição para o material das serpentinas que elevem o ponto de fusão para 1550 °C.

#### 4.2.2 – Fontes de Radiação

Nos ensaios radiográficos foram empregados fontes de raios X e gama ( $\gamma$ ) com alta energia conforme especificado a seguir:

##### 4.2.2.1 – Acelerador Linear Linac 400 com 4 MeV de energia.

Um dos equipamentos de alta energia utilizados foi um acelerador linear de fabricação da Varian, modelo Linatron – 400, com energia efetiva de 4 MeV, sua taxa de dose medida a um metro do alvo, no eixo central, durante um minuto é medido em Gy/min e seu tamanho focal não ultrapassa 2 mm para esta energia. O seu campo é definido por um colimador com forma de pirâmide e um ângulo de 22,5° máximo. De acordo com a norma ASTM E 142 1-2T ou equivalente, o sistema mostrou que sua sensibilidade ao longo do intervalo entre 51 mm a 254 mm de aço e aproximadamente entre 46 mm e 231 mm de cobre. A taxa de dose mínima

em  $7,5^\circ$  fora do eixo central é de 70% da taxa de dose no eixo central sem o filtro achatador. A figura 4.3 mostra a imagem do acelerador linear Linatron 400 e na Tabela 4.1, estão especificadas as características operacionais do acelerador linear.

Tabela 4.1 – Dados característicos e operacionais do acelerador Linatron 400 (VARIAN, 2010).

<b>ACELERADOR LINEAR LINATRON 400 - VARIAN</b>	
Energia do feixe (MeV)	4
HVL – <i>Half Value Layer</i> para o aço (cm)	2,5
Raios X em rad/min a 1m – centro do feixe	400
Máxima Taxa de Dose (Gy/min)	4
Máximo Diâmetro Focal (mm)	2
Média de RX (% intensidade fora do eixo central do colimador)	0,25
<b>Dimensão do campo normal a 1,8 m (DFD)</b>	71 x 71 cm



Figura 4.3 – Acelerador linear Varian, modelo Linatron com 4 MeV.

#### 4.2.2.2 – Acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV de energia.

Foi utilizado também como fonte de raios X, um acelerador linear de fabricação da Varian, modelo Linatron – M3, com energias efetivas de 1, 2 e 3 MeV, sua taxa de dose medida a um metro do alvo, no eixo central, durante um minuto é medido em Gy/min e seu tamanho focal não ultrapassa 2 mm para todas as energias. O seu campo é definido por um colimador com forma de pirâmide e um ângulo entre  $30^\circ$  e  $22,5^\circ$ . De acordo com a norma ASTM E 142 1-2T ou equivalente, o sistema mostrou que sua sensibilidade, ao longo do intervalo entre 38 mm a 203 mm no aço e aproximadamente entre 35 mm e 185 mm de cobre. A assimetria do feixe no feixe não excede 5% à  $\pm 7,5^\circ$  fora do eixo central para todas as

energias. A figura 4.4 mostra a imagem do acelerador linear Linatron M3 e na Tabela 4.2, estão especificadas as características operacionais do acelerador linear.

Tabela 4.2 – Dados característicos e operacionais do acelerador Linatron M3 (VARIAN, 2010).

<i>ACELERADOR LINEAR LINATRON M3 - VARIAN</i>	
Energia do feixe (MeV)	1, 2, 3
HVL – <i>Half Value Layer</i> para o aço (cm)	1,6 / 2,01 / 2,31
Raios X em rad/min a 1 m – centro do feixe	25 / 200 / 300
Máxima Taxa de Dose (Gy/min)	0,25 / 2,0 / 3,0
Máximo Diâmetro Focal (mm)	2
Média de RX (% intensidade fora do eixo central do colimador)	0,25
<b>Dimensão do campo normal a 1 m (DFD)</b>	10 x 10 cm



Figura 4.4 – Acelerador linear Varian, modelo Linatron com 3 MeV.

#### 4.2.2.3 – Acelerador Circular *Betatron* PXB6 com 6 MeV de energia.

Foi utilizado como fonte de raios X um acelerador Circular de fabricação da JME, modelo *Betatron* – PXB6, com energias máxima efetiva de 6 MeV e sua taxa de dose medida a um metro do alvo, no eixo central, durante um minuto é medido em Gy/min e seu tamanho focal é de 0,3x3,0 mm para todas as energias. O seu campo é definido por um colimador com forma cilíndrica e o ângulo 22,5°. Segundo manual do fabricante, este equipamento possui sensibilidade no máximo de 300 mm no aço e aproximadamente 273 mm de cobre. A taxa de dose mínima em 6,5° fora do eixo central é de 6,8% da taxa de dose no eixo central sem o



filtro achatador. A figura 4.5 mostra a imagem do acelerador Circular *Betatron* no bunker no LNDC. Na Tabela 4.3, estão especificadas as características operacionais do acelerador linear.

Tabela 4.3 – Dados característicos e operacionais do acelerador circular - *Betatron* PXB6 (JME, 2008).

<b>ACELERADOR CIRCULAR POR INDUÇÃO – BETATRON PXB6</b>	
Energia do feixe (MeV)	2-6
Raios X em rad/min a 1m – centro do feixe	2,60
Máxima Taxa de Dose (Gy/min) a 1m	0,03
Máximo Diâmetro Focal (mm)	0,3 x 3
<b>Dimensão do campo normal a 1m (DFD)</b>	43,1 x 43,1 cm



Figura 4.5 – Acelerador Circular *Betatron* modelo MXB-6 M com 6 MeV.

#### 4.2.2.4 – Fonte de Radiação Gama ( $\gamma$ )

Como fontes de raios  $\gamma$ , figura 4.6 foi utilizada uma fonte de Cobalto-60, com dimensão focal de 4,2 x 4,6 mm e Atividade de 49,0 Ci, e possuem equivalência a uma radiografia de raios X de gerador com energia de 3 MeV, mas não é uma fonte de energia tão intensa. Estas fontes podem ser usadas para se obter boas radiografias (dependendo da técnica e detector de radiação utilizado) de pelo menos 200 mm de aço e aproximadamente 182 mm de cobre. Na Tabela 4.4 estão especificadas as características operacionais da fonte de radiação gama utilizada.

Tabela 4.4 – Dados característicos das fontes de Cobalto-60 (MASTER, R. C, 1959).

<i>ELEMENTO</i>	<b>Cobalto</b>
Isótopo	60
Número Atômico - Z	27
Meia - Vida	5,3 anos
Forma Química	Co
Raios Gama / Beta em MeV	1,17 e 1,33 / 0,31
Fator Gama ( $\Gamma$ ) mC/kg.h/GBq a 1m / R/h.Ci a 1m ou mSv/h.GBq a 1m	9,06 / 1,35 ou 0,351

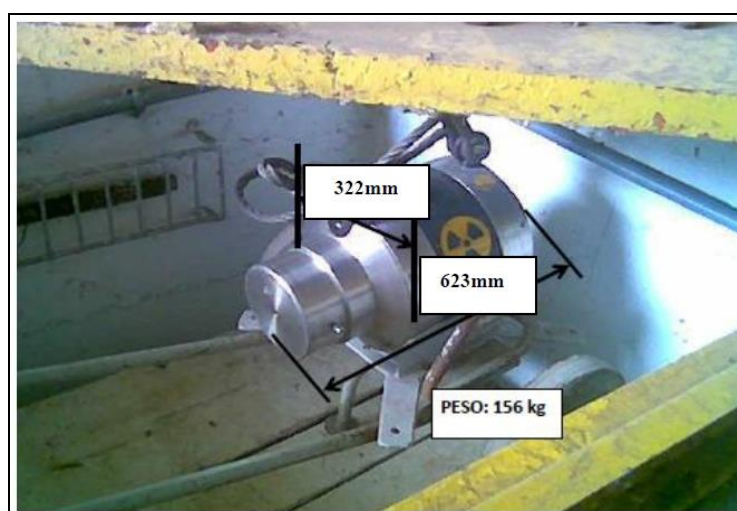


Figura 4.6 – Irradiador de fontes de Cobalto 60 com atividade de 49,0 Ci.

#### 4.2.3 – Equipamento de Radiografia Computadorizada

Para realização deste trabalho foram utilizados dois equipamentos de radiografia computadorizada (*scanners*), ambos do mesmo fabricante GE. Os módulos de leitura de IP são os modelo CR 50P, figura 4.7 – a, e CRx FLEX, figura 4.7 – b, todos compostos com uma estação de trabalho e os programas necessários para aquisição e tratamento das imagens. A Tabela 4.5 apresenta as características de cada equipamento utilizado. Foram utilizados IPs dos fabricantes GE e KODAK para processamento das imagens em diferentes etapas e com diferentes equipamentos de alta energia. Para a leitura do filme IPX foi utilizado o equipamento (*scanner*) GE CR 50P, e para os outros quatro IPs foi utilizado o *scanner* GE CRx FLEX, todos os equipamentos foram utilizados de acordo com as especificações do fabricante. Na Tabela 4.5 está a descrição dos IPs utilizados, que são diferenciados por sua resolução.

Tabela 4.5 - Características dos equipamentos de RC.

Equipamento	Fabricante	Tamanho Focal do Laser ( $\mu\text{m}$ )	Ganho da PMT	Range Dinâmico	Resolução de Leitura do Scanner
GE CR50P	GE	50	300 a 1200	16 bits	50/75/100/130/150/200 $\mu\text{m}$
GE CRx FLEX		30	50 a 1600	16 bits	50/100 $\mu\text{m}$

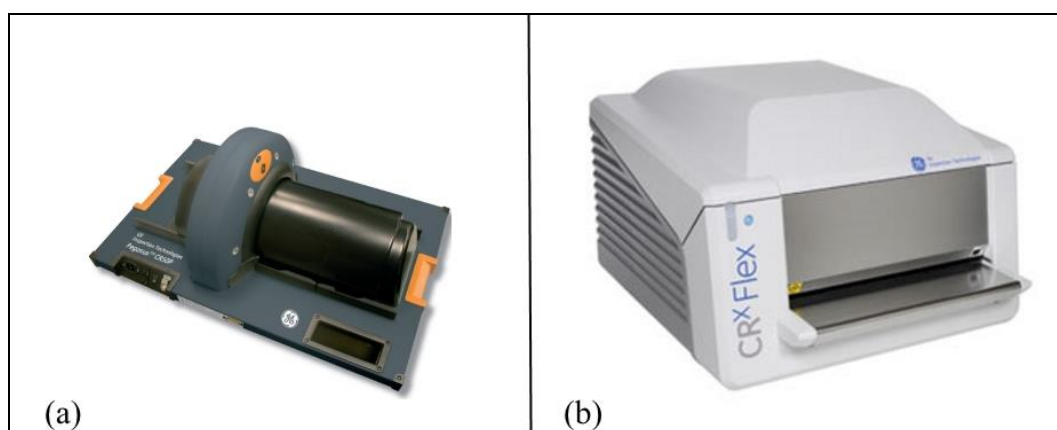


Figura 4.7 – Unidades de leitura dos IPs. (a) CR50P e (b) CRx FLEX.

Tabela 4.6 - Descrição dos Image Plates.

<i>Image Plate</i>	Fabricante	Resolução
IPX	GE	Alta Resolução
IPC2	GE	Placa de Alta Velocidade
IPS	GE	Alta Resolução
IPU	GE	Extrema Resolução (Azul)
IMPROVED	KODAK	Alta Resolução

#### 4.2.4 – Filmes Convencionais

Para realização da radiografia convencional, foram utilizados os Filmes de duas classes:

ASTM Classe I (modelo M100, Kodak Industrex)

ASTM Classe II (modelo AA400, Kodak Industrex)

Ambos foram utilizados por possuir características de sensibilidade, velocidade e resistência adequadas à área industrial. Em alguns procedimentos experimentais estes filmes foram expostos juntos no mesmo chassi para obter vista composta e separados para a técnica

de vista simples. Após a revelação, os filmes foram digitalizados pelo scanner modelo LS85, fabricado pela Kodak na primeira e segunda fase e com o digitalizador FS50 da GEIT na quarta fase.

#### 4.2.5 – Detector Digital

Para os ensaios com radiografia digital foi utilizado uma Matriz de Detector Digital (DDA), comumente chamado de *flat panel*, da empresa GE Inspection Technologies, possui dimensões ativas de 410 x 410 mm, trabalha em uma faixa de energia de 30 kV a 3 MeV (ASTM E 2597, 2007), outras descrições estão contidas na Tabela 4.7. O sistema de aquisição de imagem é o *Rhythm Acquire* (GE) e para visualização e tratamento das imagens possui o *Rhythm Review* (GE). A figura 4.8 apresenta o modelo de DDA utilizado com a radiografia direta.

Tabela 4.7 – Características do Detector Digital Direto utilizado.

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



Figura 4.8 – Detector Digital Direto DXR250V, fabricante GE IT.

### 4.3 – Procedimentos Experimentais

Nesta parte do trabalho serão descritos os procedimentos tomados em cada instituição colaboradora e o tipo de equipamento usado assim como os aspectos técnicos de cada equipamento.

#### 4.3.1 – Primeira Etapa

A primeira etapa deste estudo foi realizada na Confab Industrial S.A., quando inicialmente foram feitas uma série de imagens no corpo de prova de cobre com a técnica convencional, utilizando uma fonte de radiação X de alta energia, neste caso, o acelerador linear Linatron 400 com energia de 4 MeV, e como detector, filmes radiográficos industriais, de classes I e II. Os testes iniciais foram para avaliar as técnicas convencionais e com isso, uma posterior substituição das mesmas pela radiografia computadorizada, em função da diminuição do tempo total para avaliação de um corpo de prova.

Os primeiros ensaios foram feitos com dois filmes classe II que foram irradiados juntos no mesmo chassi, com tempo de 63 segundos, a uma distância fonte filme de 2000 mm, e posteriormente, a imagem foi avaliada individualmente. No segundo ensaio radiográfico foram radiografados dois filmes classe I no mesmo chassi e após revelação foram visualizados, separadamente, no negatoscópio, estes filmes foram radiografados com o tempo de 84 segundos e uma distância fonte detector de 2000 mm. Ambos os ensaios foram feitos com energia de 4 MeV e a dose foi de 605 e 804 mGy em cada radiografia.

No terceiro ensaio realizado foi empregado a técnica computadorizada, utilizando a placa de imagem IP IPX de alta definição em conjunto com o escâner GE CR50P. Antes da utilização desta placa foi feito um apagamento, onde são removidas imagens latentes com a exposição da placa à uma luz branca de alta intensidade. Esta placa foi irradiada com uma distância fonte detector de 2000 mm e a dose total foi de 3900 mGy. Esta distância fonte/detector de 2000 mm utilizada em todos os ensaios com o acelerador linear com 4 MeV de energia, foi devido a sua taxa de exposição ser muito alta. A tensão na PMT do escâner CR50P foi de 600 V e o tamanho de *pixel* foi mantido fixo em 50  $\mu\text{m}$ . As imagens foram avaliadas e processadas na estação de trabalho com monitor de alta resolução. Todas as imagens foram realizadas em um bunker fechado e o arranjo foi bem localizado de forma que todos os detectores ficavam com uma distância maior que dois metros de qualquer parede do local. A figura 4.9 mostra o arranjo experimental utilizado nesta etapa.

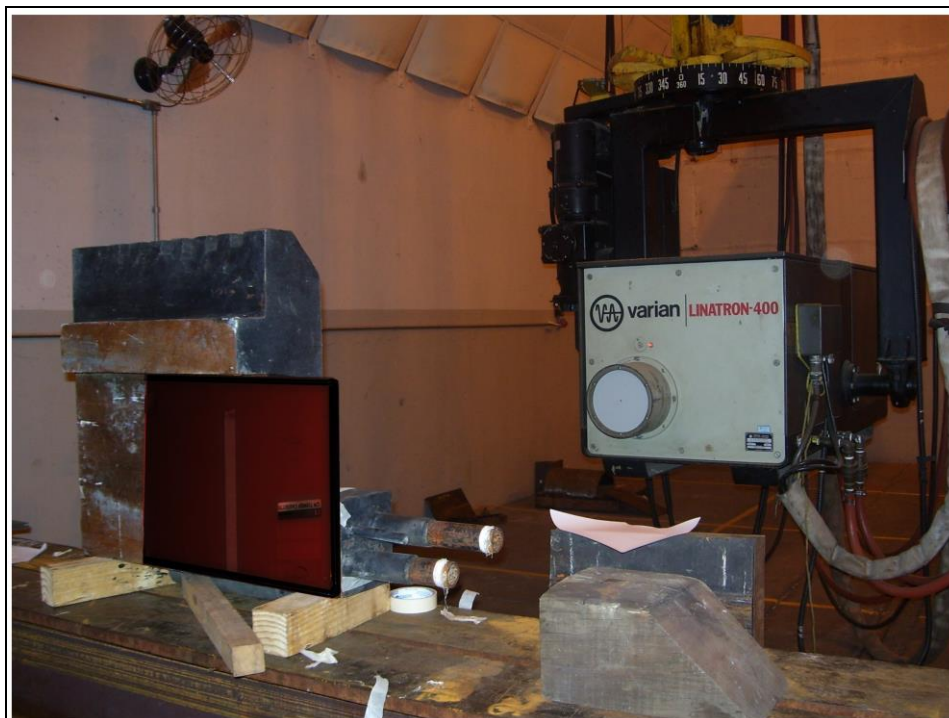


Figura 4.9 – Arranjo experimental na primeira etapa – Confab.

#### 4.3.2 – Segunda Etapa

Nesta etapa, o ensaio foi realizado nas instalações da empresa Nuclep – Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A.. Para radiografar o corpo de prova foi utilizado uma fonte gama de Cobalto-60 com atividade inicial de 49,0 Ci, utilizando o mesmo arranjo experimental da primeira etapa, com a distância fonte detector de 1000 mm para as técnicas convencionais e computadorizadas. A distância das paredes permaneceu acima dos 2 metros dentro do bunker e a única modificação considerável neste arranjo foi a modificação do corpo de prova para uma melhor avaliação das imagens com esta fonte de radiação. O corpo de prova foi usinado para reduzir sua espessura na região mais crítica com a retirada de aproximadamente 25 mm de espessura dos ressaltos, como mostrado na figura 4.10. O objetivo foi estender as avaliações com a radiação gama, e retirando os ressaltos ficou apenas com as interferências das serpentinas e também ficou adequado para a energia do Cobalto-60. Foram utilizados filmes classe II e para radiografias com vista simples e vista composta e uma placa de imagem com a técnica computadorizada com modelo IPX do fabricante GE. A tensão na PMT do escâner CR50P foi de 600 V e o tamanho de *pixel* foi mantido fixo em 50  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.10 – Corpo de prova sendo preparado para ensaio radiográfico – Nuclep.

#### 4.3.3 – Terceira Etapa

Nesta etapa, as radiografias foram realizadas no LNDC/COPPE/UFRJ e o conjunto de equipamentos necessários para a realização dos ensaios foi: um acelerador circular *Betatron* com energia de 6 MeV, filmes classe II para vista simples e vista composta do fabricante Kodak, cinco placas de imagens com modelos e características físicas diferentes e um detector digital com matriz de detectores diretos. O corpo de prova já possuía a menor espessura na região de defeitos devido à usinagem nos gomos de cobre e permanecia com as mesmas características dos arranjos montados nas etapas anteriores. Neste bunker foi resolvido que o arranjo deveria ficar com o maior número de materiais que pudessem causar a maior contribuição de radiação espalhada possível na placa de imagem, para chegar o mais perto de um ensaio no campo com todas as perturbações do meio. As distâncias das paredes para o bloco eram menos que 1000 mm e o mesmo estava diretamente no chão sem nenhuma anteparo para apoiá-lo. A distância fonte detector era de 1000 mm, inclusive para o detector digital. Os filmes classe II utilizados foram AA400 do fabricante Kodak, sendo utilizados dois filmes em um mesmo chassi e na leitura dos defeitos vistos separadamente e em conjunto. As placas de imagens para as RC utilizadas foram: IPS, IPC2, IPU todas do fabricante GE e a placa de imagem IMPROVED do fabricante Kodak com tamanhos de grão, variando entre 4 e 10,90  $\mu\text{m}$  com um erro de aproximação entre  $\pm 0,99 \mu\text{m}$  e  $\pm 3,84 \mu\text{m}$ . A tensão na PMT do escâner CRx FLEX foi de 200 V e o tamanho de *pixel* foi mantido fixo em 50  $\mu\text{m}$ . E por fim, foi utilizado um detector digital com 200  $\mu\text{m}$  de tamanho de *pixel* e com um cintilador com alta sensibilidade, seu tempo máximo exposto foi de 600 segundos, com 20 quadros por segundo. A figura 4.11 mostra o arranjo experimental utilizando o *Betatron* com 6 MeV de energia.



Figura 4.11 – Arranjo experimental com acelerador circular *Betatron* 6 MeV – LNDC.

#### 4.3.4 – Quarta Etapa

Nesta última etapa, um acelerador linear com 3 MeV de energia foi utilizado nas instalações da Confab em conjunto com outros equipamentos necessários para a realização dos ensaios. Foram utilizados cinco placas de imagens do fabricante GE e um detector digital com matriz de detectores diretos do fabricante GE, os mesmos detectores utilizados na terceira etapa. Foi utilizado o mesmo corpo de prova de cobre e ele permaneceu com as mesmas características que nos arranjos montados nas etapas anteriores. Neste bunker foi resolvido que o arranjo deveria ficar com as melhores condições para evitar ao máximo os espalhamentos que pudessem prejudicar as imagens finais. As distâncias das paredes para o bloco eram maiores que 2000 mm e o mesmo ficou sobre um apoio metálico, distante do chão, com folhas de chumbo ao seu redor e sua distância fonte detector era de 1000 mm em todos os arranjos experimentais.

O intuito desta última fase foi reproduzir com o acelerador linear de 3 MeV as melhores imagens com baixa contribuição de espalhamento, erros de leitura ou até mesmo problemas físicos nos detectores digitais, como exemplo arranhões na estrutura das placas ou na matriz de diodos, e com as melhores condições nos ensaios, comparar as radiografias adquiridas nas etapas anteriores com esta etapa. As placas de imagens para as RC utilizadas foram: IPS, IPC2, IPU todas do fabricante GE e a placa de imagem IMPROVED do fabricante Kodak com tamanhos de grão variando entre 4 e 10,90  $\mu\text{m}$  com um erro entre  $\pm 0,99 \mu\text{m}$  e  $\pm 3,84 \mu\text{m}$ . A tensão na PMT do escâner CRx FLEX foi de 200 V e o tamanho de *pixel* foi mantido fixo em 50  $\mu\text{m}$ . E por fim foi utilizado um detector digital com 200  $\mu\text{m}$  de tamanho de *pixel* e com um cintilador com alta sensibilidade, seu tempo máximo exposto foi



de 600 segundos, com 20 quadros por segundo. A figura 4.12 mostra o arranjo experimental, utilizando o acelerador linear com 3 MeV de energia.



Figura 4.12 – Arranjo experimental com acelerador linear Linatron com 3 MeV de energia – Confab.

#### 4.3.5 – Parâmetros dos equipamentos

Na Tabela 4.8 estão os parâmetros para os ensaios com a técnica convencional em todas as etapas deste estudo.

Tabela 4.8 – Parâmetros para a técnica de múltiplos filmes e vista composta.

Quantidade de filmes	Classe	Fabricante	Modelo	Écran (Pol.)	Fontes de Radiação	Distância Fonte Detector (mm)	Etapas
2	II	Kodak	AA400	0,010	Acelerador Linear Linatron 400 - 4MeV	2000	1ª Etapa
2	I e I	Kodak	M100 + M100	0,010		2000	
2	II	Kodak	AA400	0,010	Fonte Co-60 Atividade 49,0 Ci	1000	2ª Etapa
2	II e II	Kodak	AA400 + AA400	0,010		1000	
2	I e I	Kodak	M100 + M100	0,010	Acelerador Circular Betatron – 6 MeV	1000	3ª Etapa
2	II	Kodak	AA400	0,010		1000	
2	II e II	Kodak	AA400 + AA400	0,010		1000	

Na Tabela 4.9 estão os parâmetros de leitura para a radiografia computadorizadas com a utilização de escâneres nas etapas que foi utilizada a técnica.

Tabela 4.9 – Parâmetros de leitura dos equipamentos de RC.

<b>Equipamento Scanner</b>	<b>Tipo de IP</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Ganho PMT (V)</b>	<b>Foco Laser (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tamanho Pixel (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Etapas</b>
CR50P / Acelerador Linear Linatron 400	IPX	GE	600	50	50	1ª Etapa
CR50P / Fonte gama – Co-60	IPX	GE	600	50	50	2ª Etapa
CRx FLEX /Acelerador Circular Betatron PBX6	IPC2	GE	200	30	50	3ª Etapa
	IPS					
	IPU					
	IMPROVED					

Na Tabela 4.10 estão os parâmetros de leitura para a radiografia Digital com a com os parâmetros de utilização da matriz de detectores.

Tabela 4.10 – Parâmetros de leitura dos equipamentos de detector digital direto com radiação X.

<b>Equipamento</b>	<b>Detector digital</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Ganho</b>	<b>Número de Quadros</b>	<b>Tamanho Pixel (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Etapas</b>
Acelerador Circular Betatron PBX6	<i>Flat panel</i> DXR 250 V	GE	2200	20	200	3ª Etapa
Acelerador Linear Linatron 400				30		4ª Eatpa

Na Tabela 4.11 estão os parâmetros para os ensaios com a técnica convencional em todas as etapas deste estudo.

Tabela 4.11 – Parâmetros para a técnica de múltiplos filmes e vista composta.

<b>Tipo de Detector</b>	<b>Fabric./ Modelo</b>	<b>Tamanho de Pixel (µm)</b>	<b>Tempo de Exposição (seg)</b>	<b>Fontes de Radiação</b>	<b>DFD (mm)</b>	<b>Étapas</b>
Placa de Imagem	GE / IPX	50	405	CR50P / Acelerador Linear Linatron 400	2000	1ª Etapa
Placa de Imagem	GE / IPX	50	1800	CR50P / Fonte gama – Co-60	1000	2ª Etapa
Placa de Imagem	GE / IPC2	50	730	Acelerador Circular Betatron – 6 MeV	1000	3ª Etapa
Placa de Imagem	Kodak / Improved	50	2080		1000	
Placa de Imagem	GE / IPU	50	10800		1000	
Placa de Imagem	GE / IPS	50	2080		1000	
Flat Panel	GE DRX 250V	200	600		1000	
Placa de Imagem	GE / IPC2	50	20	Acelerador Linear Linatron – 4 MeV	1000	4ª Etapa
Placa de Imagem	Kodak / Improved	50	40		1000	
Placa de Imagem	GE / IPU	50	180		1000	
Placa de Imagem	GE / IPS	50	40		1000	
Flat Panel	GE DRX 250V	200	75		1000	

A Tabela 4.12 mostra um resumo das aquisições em cada etapa, a fonte de radiação utilizada para cada ensaio radiográfico, mostra também os tipos de detectores com seus tamanhos de *pixel*, tempo de exposição, a dose total utilizada em cada aquisição e as suas respectivas distâncias fonte detector. Esta tabela permite avaliar parâmetros na qualidade da imagem e a detectabilidade em função da dose recebida em cada ensaio radiográfico realizado. Durante as primeiras etapas percebeu-se o quão a distância fonte/detector com 1000 mm prejudicou os ensaios devido à saturação das imagens geradas com filmes convencionais e placas de imagem. Em seguida, houve uma proposta para que esta distância fosse alterada para 2000 mm e após essa alteração, os resultados esperados foram obtidos. Na terceira e quarta etapas, à distância de 1000 mm foi utilizada e a avaliação dos resultados não foi prejudicada, devido à proporcionalidade de comparação entre dose e tempo de exposição.

Tabela 4.12 – Etapas, fontes de radiação, detectores e parâmetros de teste.

Etapas	Fonte	Tipo de Detector	Tamanho de <i>Pixel</i> ( $\mu\text{m}$ )	Tempo de Exposição (seg)	Dose (mGy)	DFD (mm)
1ª	Acelerador Linear Varian Linatron 400 4 MeV	Filme Classe II	-	63	605	2000
		Filmes Classe I + Classe I (Técnica de Múltiplos filmes)	-	84	807	2000
		GE IPX Imaging Plate Escâner GE CR50P	50	405	3900	2000
2ª	Isótopo Cobalto-60	Filme Classe II	-	4680	665	1000
		Filmes Classe II + Classe II (Técnica de Múltiplos filmes)	-	4680	665	1000
		Placa de Imagem GE IPX Escâner GE CR50P	50	1800	256	1000
3ª	Acelerador Circular JME Betatron 6 MeV	Filmes Classe I + Classe I (Técnica de Múltiplos filmes)	-	2220	1575	1000
		Filme Classe II	-	840	590	1000
		Filmes Classe II + Classe II (Técnica de Múltiplos filmes)	-	840	590	1000
		Placa de imagem GE IPC2 Escâner GE CRxFlex	50	730	510	1000
		Placa de imagem Carestream HR IMPROVED Escâner GE CRxFlex	50	2080	1475	1000
		Placa de imagem GE IPU Escâner GE CRxFlex	50	10800	7700	1000
		Placa de imagem GE IPS Escâner GE CRxFlex	50	2080	1475	1000
		<i>Flat panel DXR 250 V</i>	200	600	420	1000
4ª	Acelerador Linear Varian Linatron M3 4 MeV	Placa de imagem GE IPC2 Escâner GE CRxFlex	50	20	992	1000
		Placa de imagem Carestream HR IMPROVED Escâner GE CRxFlex	50	40	1985	1000
		Placa de imagem GE IPU Escâner GE CRxFlex	50	180	8926	1000
		Placa de imagem GE IPS Escâner GE CRxFlex	50	40	1985	1000
		<i>Flat panel DXR 250 V</i>	200	75	3711	1000

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos no trabalho, segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior. Após análise do corpo de prova e avaliar as técnicas radiográficas aplicadas ao mesmo, o maior intuito do trabalho foi avaliar se o desempenho do equipamento portátil acelerador circular – *Betatron* teria a detectabilidade no mesmo grau de confiabilidade que mostrou com a mesma técnica os equipamentos já utilizados comumente na área de END.

#### 5.1 – Descrição das discontinuidades

Como visto anteriormente, o corpo de prova é um protótipo de um bloco refrigerador construído em cobre de alta condutibilidade térmica. O CP foi recusado pelo fabricante devido não atender aos requisitos da norma ASTM E 272 (ASTM E-272, 1999) que destacam alguns tipos de defeitos que possam comprometer o funcionamento de peças fundidas, devido a sua má fabricação. Na primeira etapa foram feitas radiografias com o IP IPX e filmes convencionais, e após análise das imagens, pode-se mapear no corpo de prova 21 defeitos, conforme representados na figura 5.1. Os exames radiográficos foram executados numa região das seções mais representativas do CP. Na região do detector (cinza) estão marcadas outras duas áreas, onde se encontram distribuídas as discontinuidades aprovadas e as recusadas (defeitos) em vermelho.

Na imagem a área amarela apresenta discontinuidades de número 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19 e 21 como mostra a figura 5.1, com exceção da discontinuidade de número 20. As demais discontinuidades de número 12, 13 e 14 estão localizadas na área verde. O foco principal deste estudo não era a caracterização de defeitos e sim identificá-los nas imagens radiográficas e dessa forma, comparar os sistemas de forma ampla. Desta forma foram apresentados 21 defeitos iniciais detectados a partir de radiografias convencionais na primeira etapa.

Nas etapas subsequentes foram detectados novos defeitos que normativamente não reprovariam este corpo de prova. Mas como este estudo visa avaliar a detectabilidade de forma ampla, utilizamos estes novos defeitos para melhorar ainda mais as avaliações entre os

sistemas empregados nos ensaios. Isto garante que trabalhos futuros tenham referências quantitativas e qualitativas dos sistemas empregados, garantindo padrões ainda melhores na detectabilidade de defeitos em imagens digitais. Estes novos defeitos foram classificados após avaliação na quarta etapa desse estudo, pois além dos 21 defeitos existentes foram detectados mais 13 defeitos com tamanhos menores que os encontrados inicialmente. Na área em amarelo foram marcadas as descontinuidades, **b, d, e, f, g, i, j, l, m** e **n** como mostrado na figura 5.1, com exceção das descontinuidades com letras **a** e **c** que não ficaram dentro de nenhuma das áreas mais críticas do corpo de prova. E dentro da área verde foi marcada apenas uma descontinuidade, a de letra **h**.

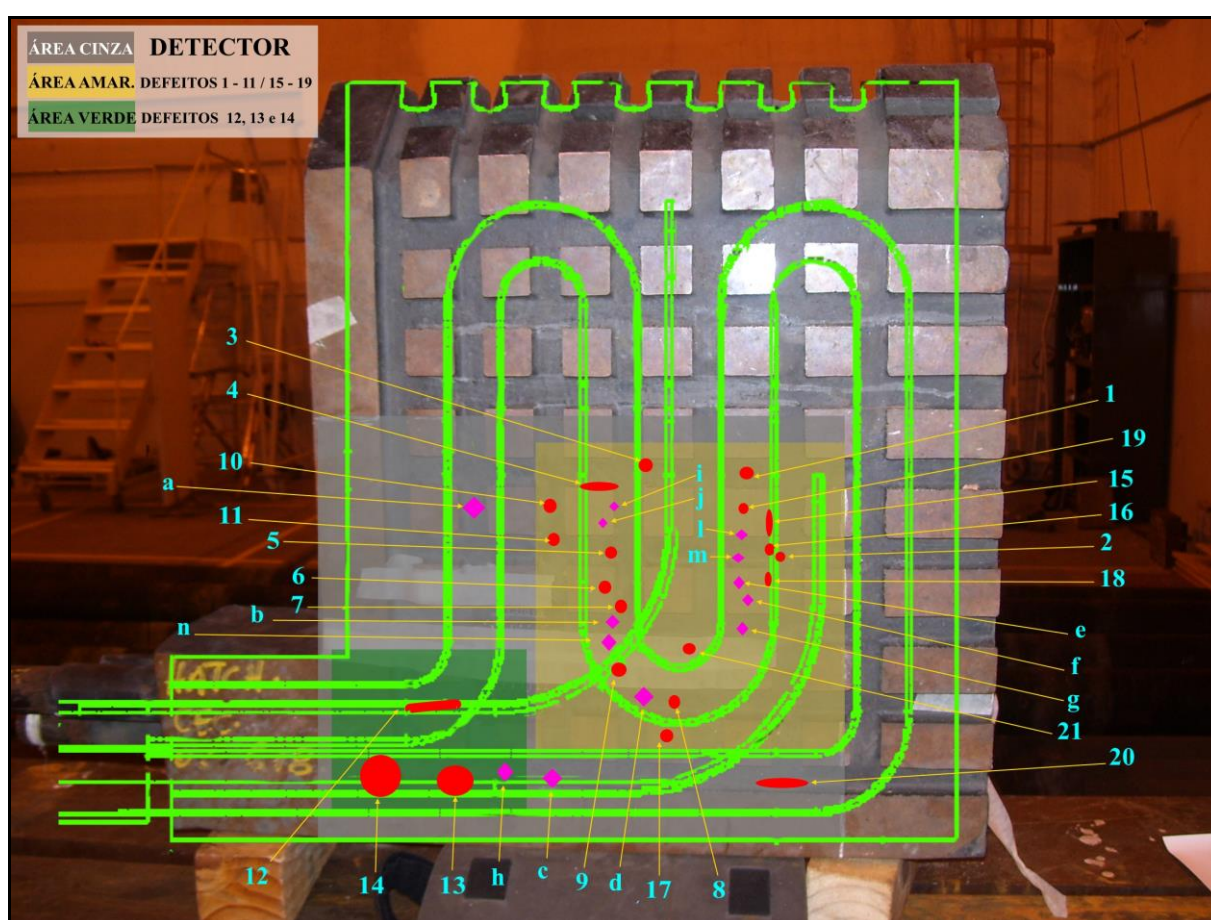


Figura 5.1 – Regiões em destaque no corpo de prova onde se concentram as descontinuidades avaliadas.

As principais descontinuidades foram identificadas de acordo com sua forma apresentada a seguir na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Áreas destacadas e suas descontinuidades.

Número da Descontinuidade	Tipo de Descontinuidade	Área
1, 5, 6, 17 e 19 a, d	Poros – aparecem nas formas arredondadas ou levemente alongadas.	Amarelo
2, 10, 11, 15, 18 e 21 e, f, g, i, j, l, m e n	Rechupe do Tipo Esponja.	Amarelo
3, 4 e 7	Rechupe do Tipo Linear – Formas alongadas e contornos irregulares.	Amarelo
12, 13 e 14 c e h	Características Próprias – difícil definição Próximas de Rechupe e Falta de fusão	Verde
9 e 20*	Características Próprias – difícil definição Próximas de Rechupe e Falta de fusão	Amarelo

\* Fora das áreas em amarelo e verde.

Junto com as imagens foi apresentado o mapa de defeitos de forma binarizada, que representa de forma integral a dimensão de todos os defeitos com apenas dois níveis de cinza. Na avaliação através dos mapas não se pode definir e nem caracterizar o tipo de defeito, mas se consegue quantificar o tamanho de cada um deles e comparar o percentual de detectabilidade. O processo de binarizar uma imagem ocorre através de programas de imagens digitais, de filtros especiais e também de avaliações dos níveis de cinza ao redor de cada defeito e o histograma ajuda a identificar a variação do nível de cinza em torno do defeito, logo, estas imagens chegaram aos resultados muito próximos do que são visualizados, diretamente, nas imagens radiográficas.

## 5.2 – Avaliação da Detectabilidade

A Tabela 5.2 mostra os sistemas utilizados em todas as etapas deste estudo, assim com o percentual de detectabilidade que cada um dos sistemas apresentou após avaliações dos resultados. Nesta tabela também estão apresentados todos os defeitos detectados nas imagens avaliadas. O sistema com acelerador circular – *Betatron* com a técnica de radiografia computadorizada e digital direta foi destaque nos resultados e demonstrou similaridade com os sistemas utilizando acelerador linear de 3 MeV. Somente os detectores digitais apresentaram cem por cento dos defeitos identificados em todas as etapas. O *image plate* IPU se mostrou pouco sensível com as seções de maiores espessuras, e seu tempo foi o maior em relação às demais técnicas como visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Percentual de detectabilidade em cada sistema proposto, com destaque aos detectores de radiação nas técnicas convencional, computadorizada e digital direta.

Fonte	Detector	Defeitos detectados	Detectabilidade (%)
Acelerador Linear Linatron 400 4 MeV	Filme Classe II	2 - 4, 10, 11, 13 - 19, 21	49
	Filmes Classe I + Classe I	1 - 21	83
	Placa de Imagem IPX	1 - 21 e b - i, l, m, n	96
Cobalt-60	Filme Classe II	1 - 20, b - e, g - l, n	87
	Filmes Classe II + Classe II	2, 3, 4, 10, 11, 15, 17, 21	19
	Placa de Imagem IPX	1 - 16, 18, 19, a, b, d - f, h - n	89
Acelerador circular Betatron PXB6 6 MeV	Filmes Classe I + Classe I	1 - 20, b - d, h - l	80
	Filme Classe II	1 - 18, 20, d, i, j	65
	Filmes Classe II + Classe II	1 - 4, 8 - 20, c - h, l, m	75
	Placa de Imagem IPC2	1 - 21, a, b, d, g - m	91
	Placa de Imagem Improved	1 - 21, b - e, h - n	93
	Placa de Imagem IPU	1 - 21, b - e, h - l, n	91
	Placa de Imagem IPS	1 - 21, c - f, h - n	92
Acelerador Linear Linatron M3 3 MeV	Detector digital DXR 250 V	1 - 21, a - n	100
	Placa de Imagem IPC2	1 - 21, b, c, e, f, i - n	91
	Placa de Imagem Improved	1 - 21, b - f, h - n	95
	Placa de Imagem IPU	1 - 20, c - f, h - n	93
	Placa de Imagem IPS	1 - 20, a - c, e, f, h - n	92
	Detector digital DXR 250 V	1 - 21, a - n	100

### 5.3 – Primeira Etapa

#### 5.3.1 – Ensaios com Radiação X utilizando as técnicas convencionais e computadorizadas

Nesta etapa as primeiras experiências para a detecção das descontinuidades utilizando a radiografia convencional foram utilizando filmes classe II – AA400 com a técnica de vista simples. Este filme possui maior sensibilidade e serviu para ajustes do tempo de exposição, e por ser mais sensível foi importante na avaliação das áreas com maior espessura no corpo de prova de cobre mesmo não apresentando nenhum defeito nas partes de menor espessura. Na figura 5.2 estão destacados os defeitos detectados nas duas regiões assinaladas na figura do corpo de prova. Na região em amarelo foram detectados os defeitos 2,3,4,10,11,15,16,17,18,19 e 21 e na região verde foram detectados os defeitos 13 e 14. A junção de alguns destes defeitos com avaliações com filmes da classe I de menor sensibilidade podem levar os resultados próximo ao total na detectabilidade dos defeitos.

Na imagem seguinte, figura 5.3, serão mostrados os mesmos defeitos apresentados na detectabilidade com o filme classe II, mas de forma binarizada, que terão destaque com maior nitidez e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura 5.2.



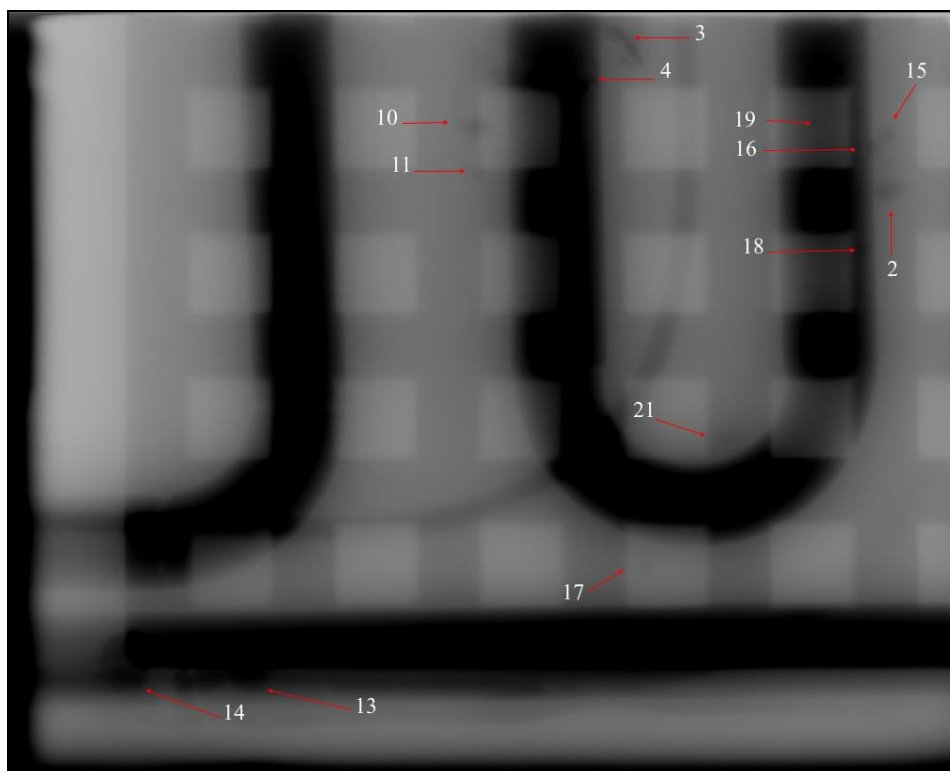


Figura 5.2 – Imagem obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando o filme ASTM classe II, em destaque as descontinuidades observadas na imagem.

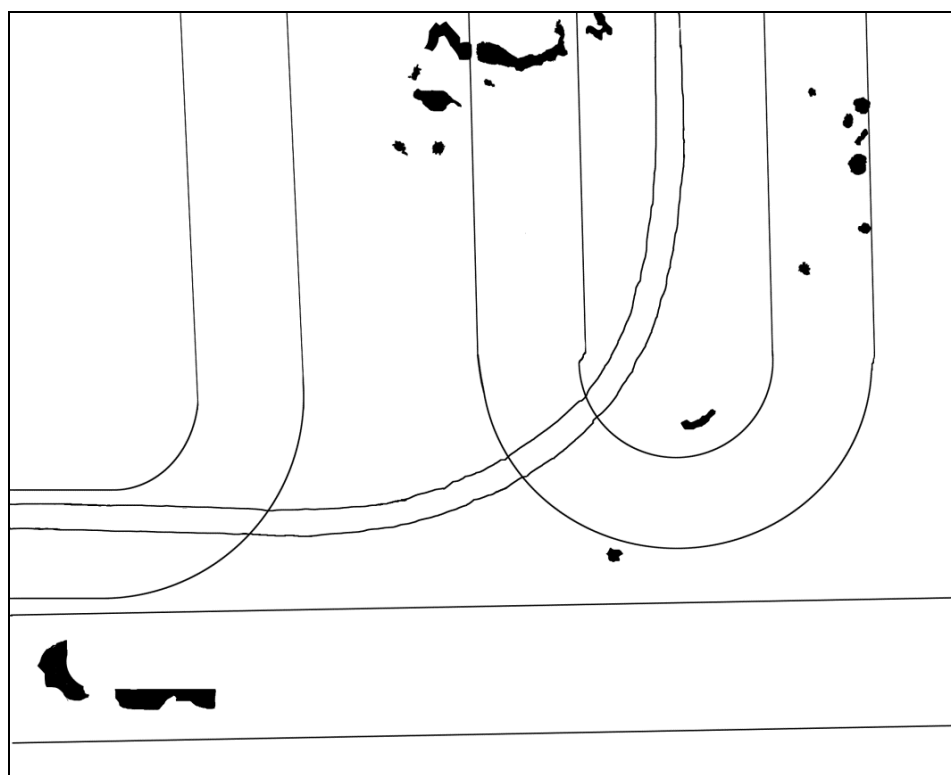


Figura 5.3 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando o filme ASTM classe II.

A radiografia com os filmes classe I (M100) baseou-se na menor espessura do corpo de prova para fazer a imagem. As doses correspondentes utilizadas para adquirir as duas imagens com técnicas convencionais com filmes expostos juntos foram muito iguais. O laudo obtido na visualização das imagens, na maioria das vezes foi utilizando apenas um filme para determinadas áreas da peça. O requisito para manter a densidades acima de 1,5 H & D, foi mantido em todas as imagens convencionais. Na figura 5.4 estão em destaque na imagem os defeitos nas duas áreas avaliadas, na área em amarelo do corpo de prova foram detectados os defeitos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21 na área em amarelo e os defeitos 12,13 e 14 na área em verde.

Na figura 5.5 serão mostrados os mesmos defeitos apresentados na detectabilidade com o filme classe I, mas de forma binarizada, que terão destaque com maior nitidez e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura 5.4.

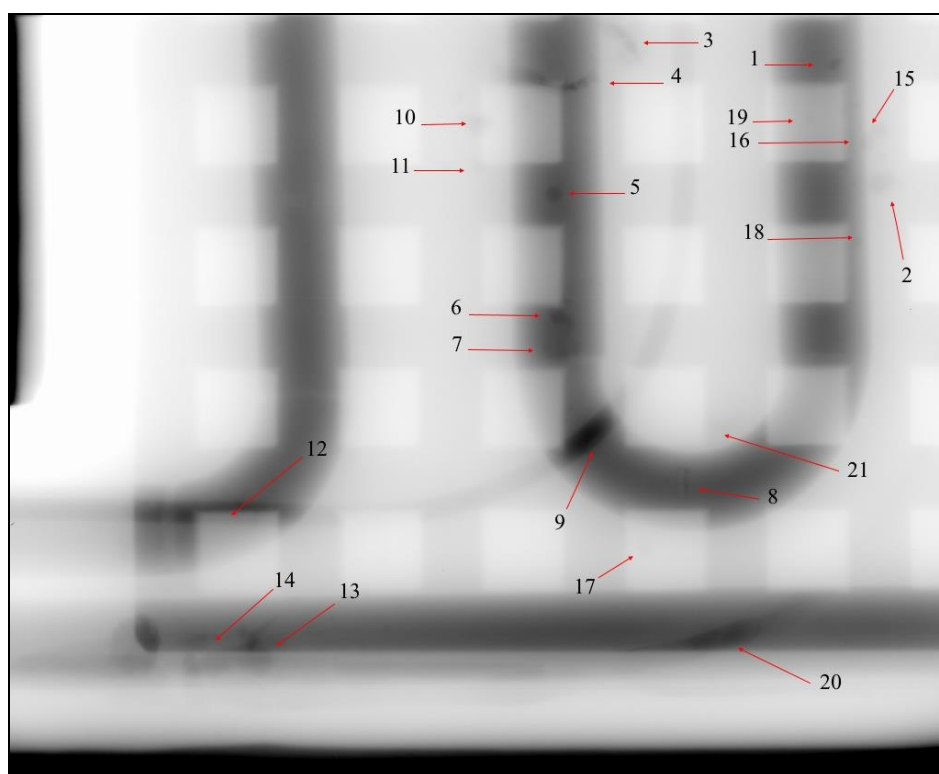


Figura 5.4 – Imagem obtida com acelerador linear Linatron utilizando o filme ASTM classe I, em destaque as discontinuidades observadas na imagem.

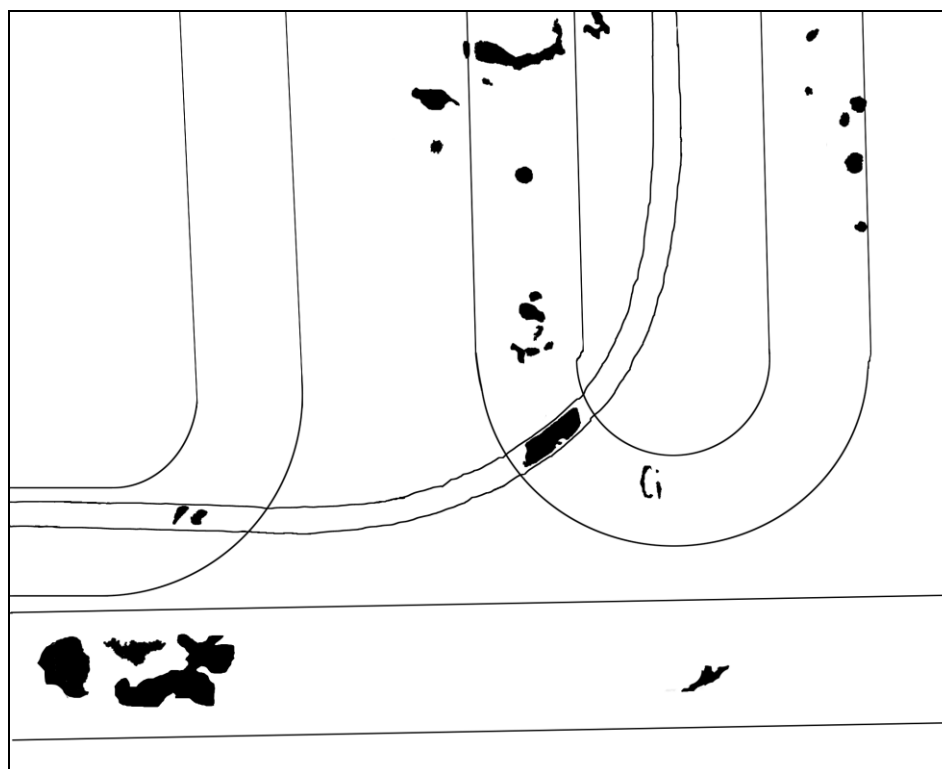


Figura 5.5 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron 400 utilizando dois filmes ASTM classe I.

Entre as duas técnicas aplicadas aos filmes convencionais, percebeu-se que a detectabilidade no filme utilizado de classe I – M100, para detecção das discontinuidades em seções de menor quantidade de material, devido ao canal formado pelas serpentinas ser melhor para estas discontinuidades.

A figura 5.6 mostra a imagem adquirida com acelerador linear de 4 MeV com radiografia computadorizada utilizando placa de imagem IPX do fabricante GE. Esta imagem apresenta todos os defeitos das duas áreas marcadas. Com uma melhora significativa na relação sinal ruído em relação ao filme convencional, foram observados novos defeitos mesmo com a maior espessura devido os gomos que acrescentam maior espessura na área analisada. Além dos 21 defeitos já caracterizados foram detectados nesta imagem mais 11 defeitos diferentes, (setas em verde neste corpo de prova) estes em particular não reprovam o corpo de prova. Nas imagens geradas com os IP IPX com técnica RC, foi utilizada uma ferramenta de processamento de imagens e com ela foi possível detectar as discontinuidades do corpo de prova, tendo como base o mapa de defeitos da primeira etapa. A figura 5.6 mostra uma das imagens processada com filtro *Enhance Details* e ajuste de brilho e contraste. Na mascara, figura 5.7, com imagem binarizada são demonstrados os defeitos de forma mais

nítida.

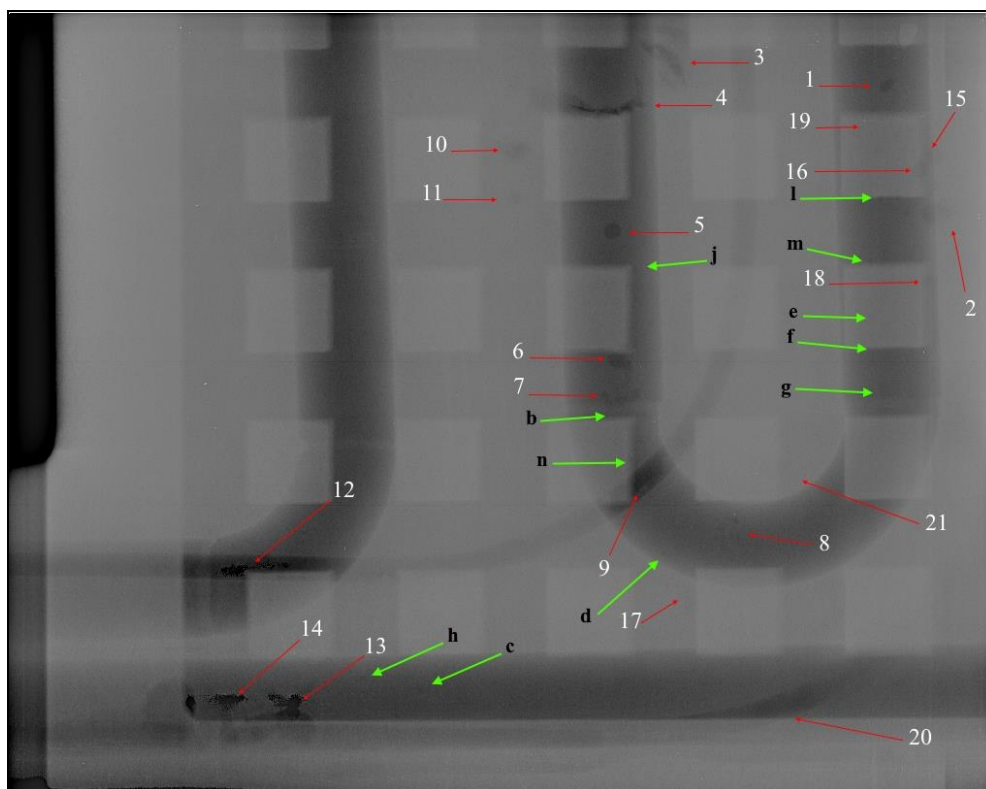


Figura 5.6 – Imagem do IP IPX obtida com acelerador linear de 4 MeV utilizando a radiografia computadorizada.

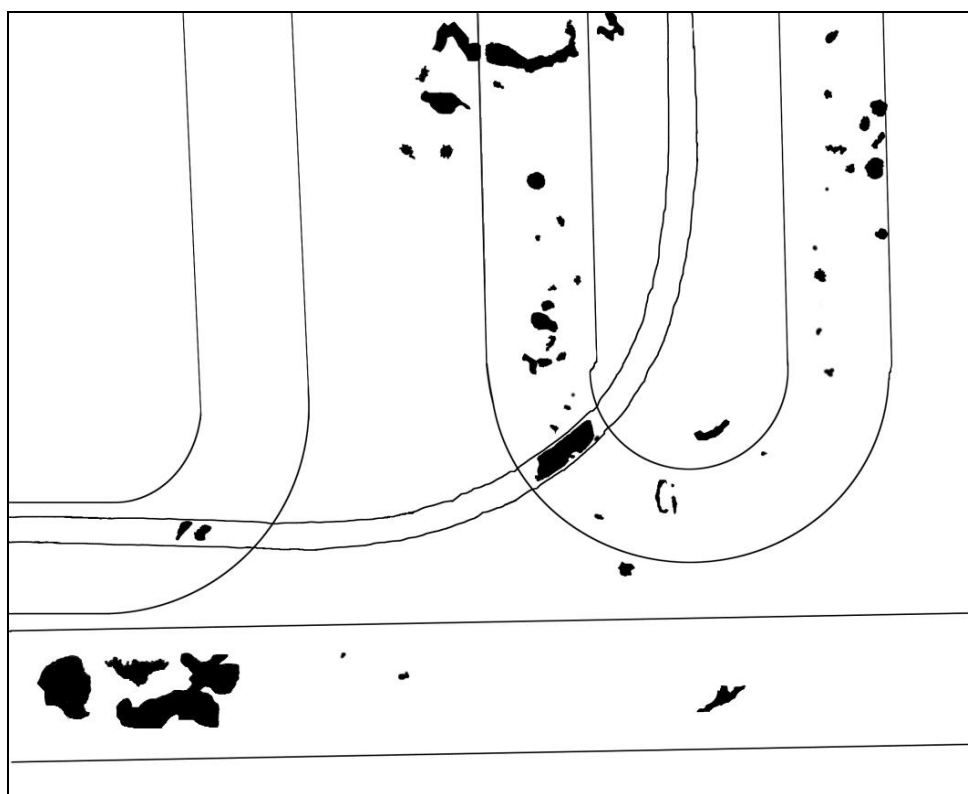


Figura 5.7 – Imagem binarizada obtida com acelerador linear Linatron utilizando IP IPX com CR 50P.

## 5.4 – Segunda Etapa

### 5.4.1 – Ensaio com Radiação Gama ( $\gamma$ ) utilizando as técnicas convencionais e computadorizadas

Um dos motivos pelo qual foi utilizado uma fonte gama de Cobalto-60, foi pela técnica de gamagrafia ser um método de inspeção com grande utilização atualmente no mercado e o único equipamento que possui características portáteis para uma comparação direta com o acelerador circular *Betatron*. A gamagrafia foi utilizada também para uma comparação entre os tempos e a detectabilidade das imagens geradas com técnicas convencionais e computadorizada.

Na técnica convencional foram feitas duas imagens utilizando filmes de sensibilidades iguais – ASTM classe II tipo Kodak AA400, o laudo obtido na visualização da primeira imagem analisada, figura 5.8, também foi utilizando apenas um dos dois filmes expostos juntos para avaliação da menor espessura na região das serpentinas como mostrado na figura. O requisito para manter a densidades acima de 1,5 H & D, foi mantido nestas imagens. Nesta figura a seguir estão em destaque na imagem os defeitos nas duas áreas avaliadas. Na área em amarelo do corpo de prova foram detectados os defeitos de 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18 e 19 na área em verde e os defeitos 12, 13 e 14, as marcações em setas verdes são defeito encontrados, mas que não representavam reprovação do corpo de prova devido ao processo de fundição.

Na figura 5.9 serão mostrados os mesmo defeitos apresentados na detectabilidade com o filme classe II, mas de forma binarizada, que terão destaque com maior nitidez e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura anterior.

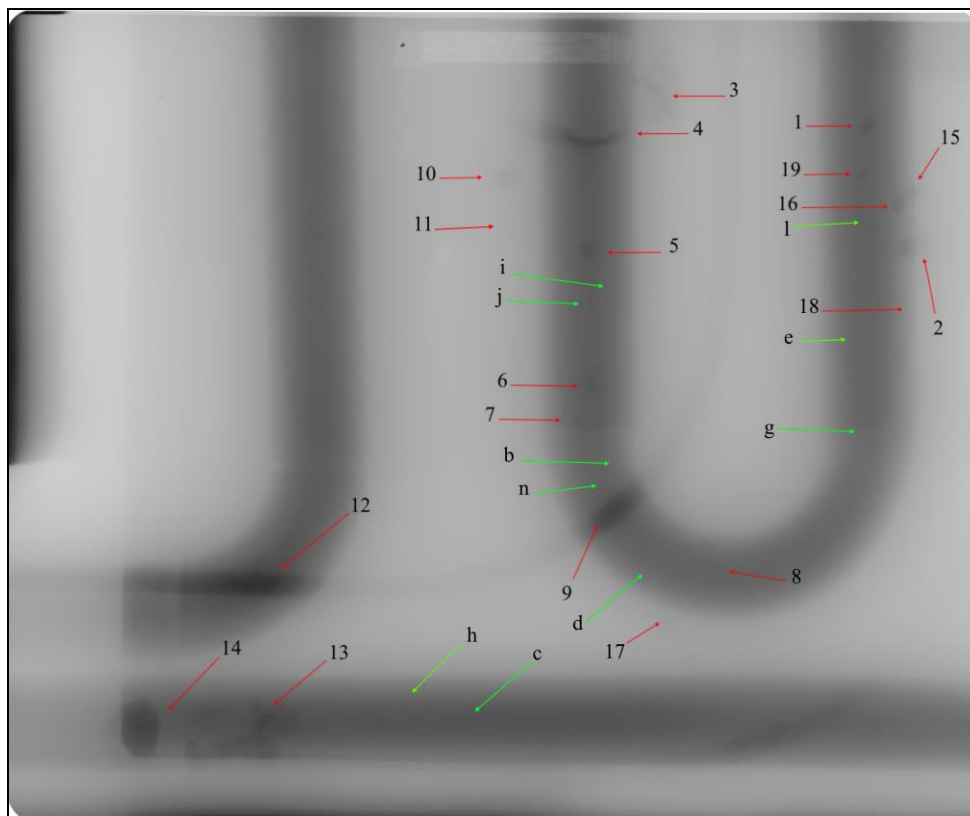


Figura 5.8 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando um filme ASTM classe II, em destaque as discontinuidades observadas nas seções de menores espessuras (vista simples).

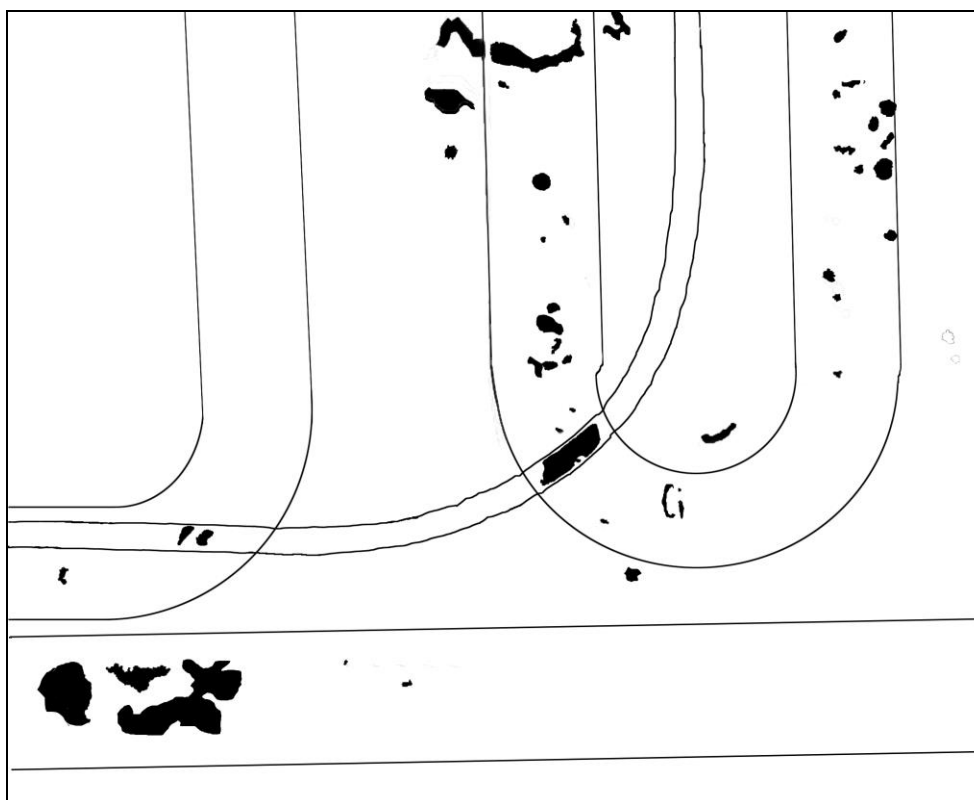


Figura 5.9 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando o filme ASTM classe II.

Em continuidade com a técnica convencional, foram utilizados nesta próxima imagem, figura 5.10, dois filmes iguais ASTM classe II – AA400 expostos juntos, para análise das partes mais espessas do corpo de prova. Ambas imagens visualizadas juntas sobre o negatoscópio, vista composta, mantendo os requisitos da densidade acima de 1,5 H & D nas regiões de interesse. Na figura também estão destacados na imagem os defeitos nas duas áreas avaliadas, na área em amarelo foram detectados os defeitos de 2, 3, 4, 21 e 17, e nenhuma na área verde, e dois dos principais defeitos, 15 e 2, foram detectados parcialmente, o que prejudicou nesta avaliação, pois estes defeitos eram muito importantes devido à sua localização na serpentina. Na figura 5.11 foram mostrados os mesmos defeitos apresentados na detectabilidade com a utilização dos dois filmes juntos de mesma sensibilidade, mas de forma binarizada, que terão destaque com maior nitidez e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura 5.10.

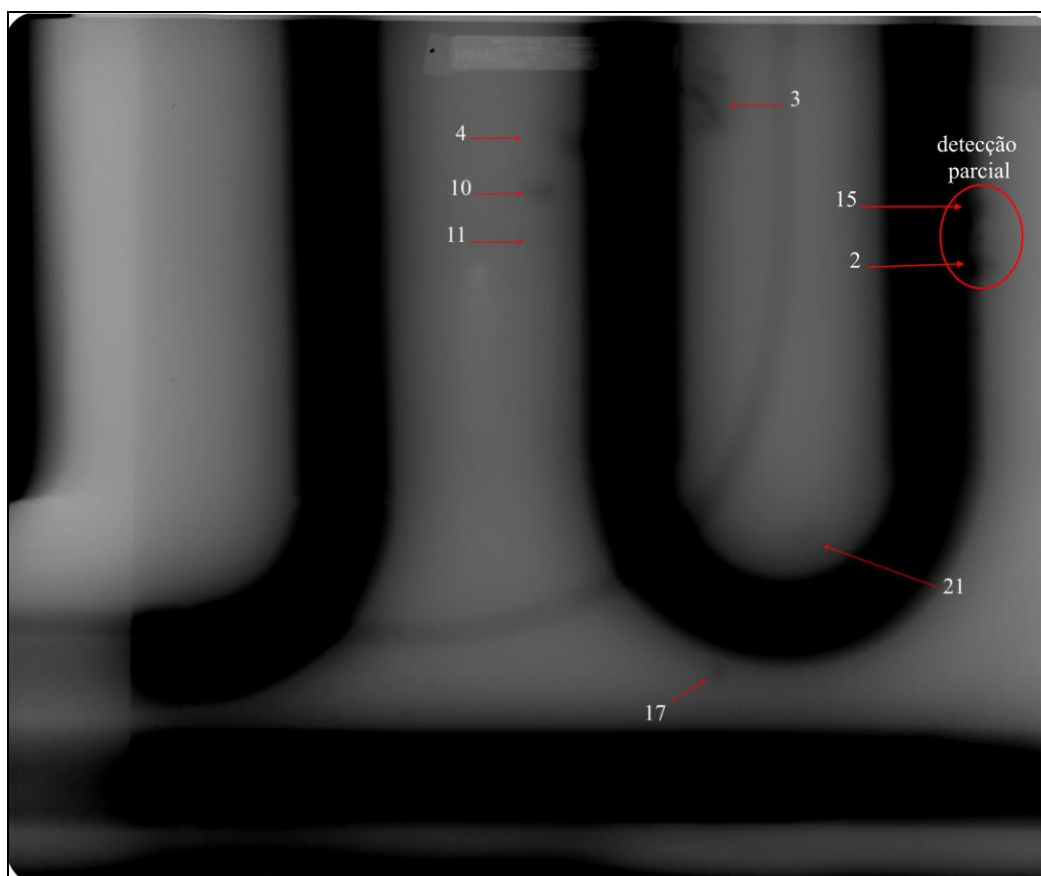


Figura 5.10 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando dois filmes ASTM classe II, em destaque as discontinuidades observadas nas seções de maiores espessuras (vista composta).

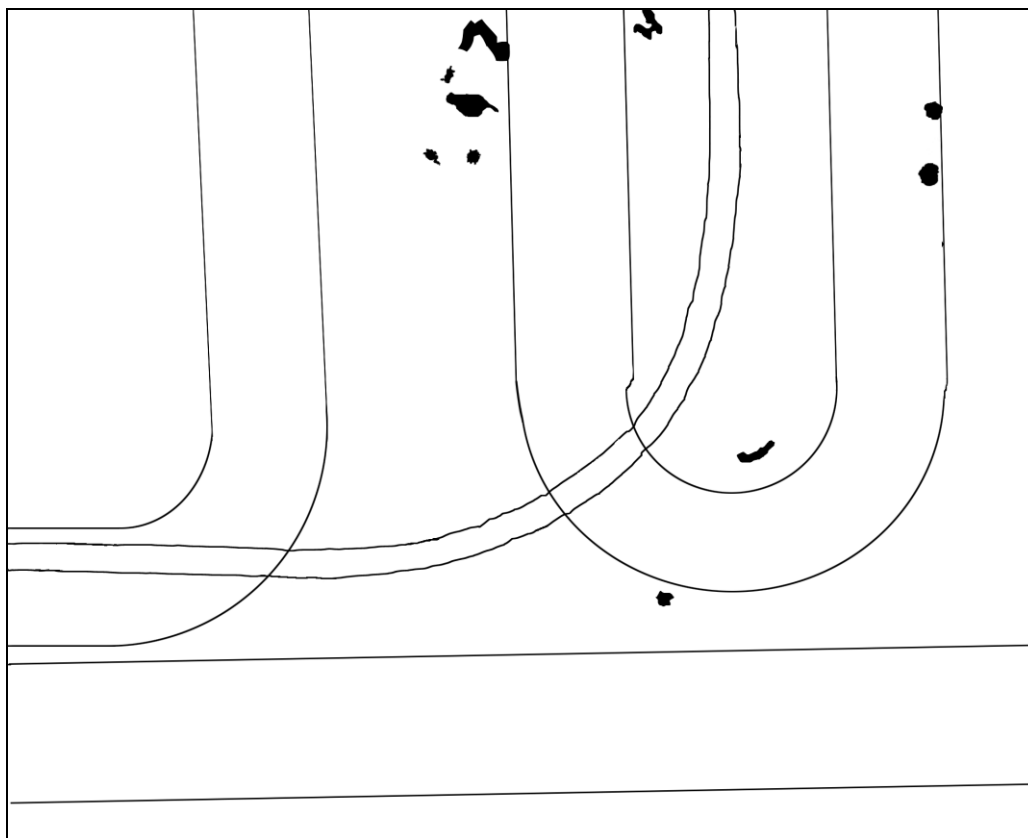


Figura 5.11 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando dois filmes ASTM classe II analisados juntos.

No ensaio com RC utilizando fonte gama ( $\gamma$ ) foram obtida apenas uma imagem com a placa de imagem IPX que foi processada com ferramentas de processamento de imagem utilizando um filtro *Enhance Details* no programa ISee!, onde foram feitos ajustes de brilho e contraste para melhor detectabilidade dos defeitos. Esta mesma imagem digital havia sido muito prejudicada pela presença de artefatos (arranhões) gerados pelo *Image Plate*. Mesmo com estes artefatos foi possível visualizar as discontinuidades de números 15 e 2, que são de uma região muito importante.

Na figura 5.13 foram mostrados os mesmos defeitos apresentados na detectabilidade com a utilização da placa de imagem IPX, mas de forma binarizada, que terão destaque com maior nitidez e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura 5.12.



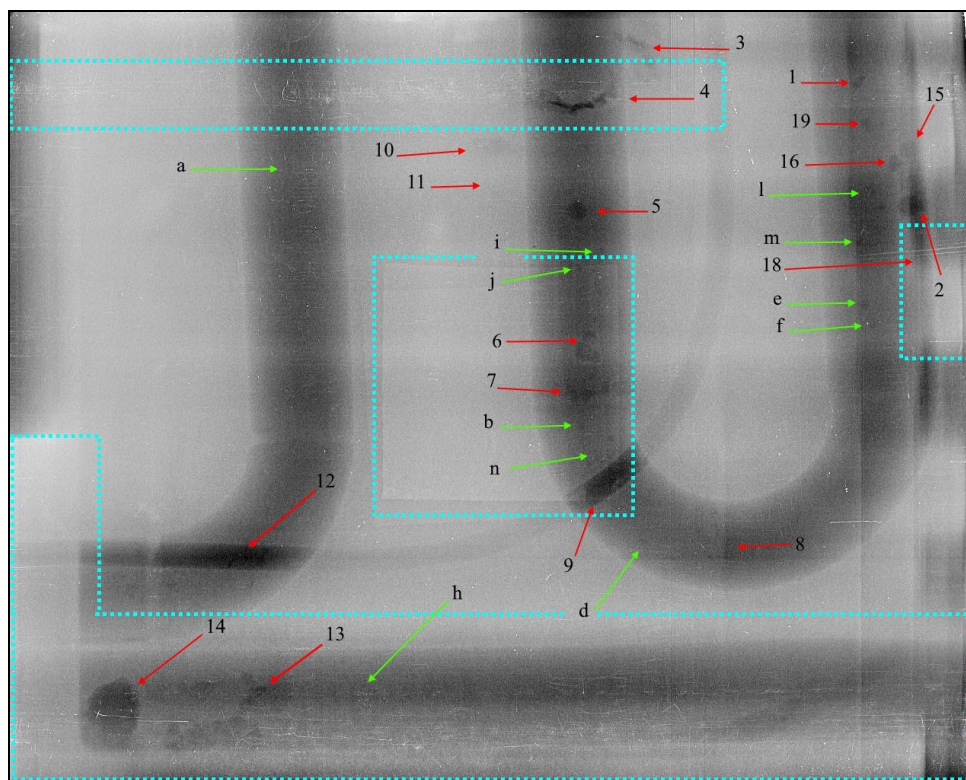


Figura 5.12 – Imagem obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando *Image Plate* IPX, em destaque as áreas delimitadas em azul mostram a presença de artefato do IP.

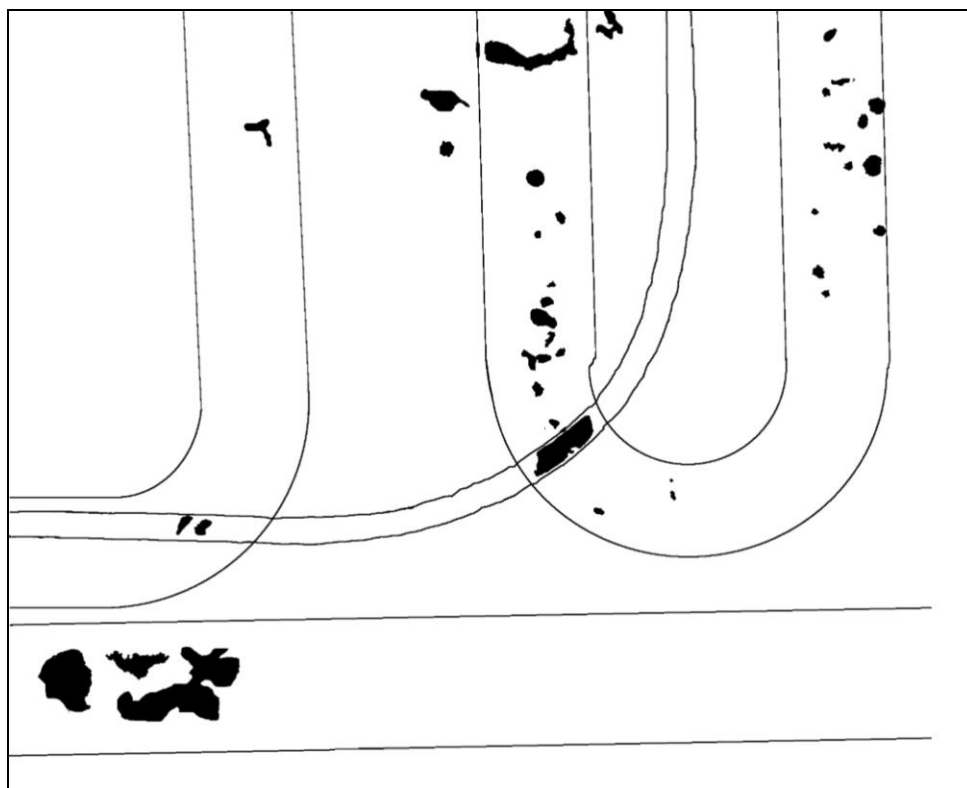


Figura 5.13 – Imagem binarizada obtida com fonte gama ( $\gamma$ ) utilizando IP IPX.

## 5.5 – Terceira Etapa

5.5.1 – Ensaios com Radiação X utilizando acelerador circular *Betatron* com a técnica convencional e computadorizada

Nesta etapa foi utilizado o acelerador circular *Betatron* com a técnica convencional utilizando filmes de classe I e classe II e a técnica computadorizada utilizando placas de imagens de diferentes fabricantes. Na primeira avaliação com a técnica convencional foi utilizado um filme classe I (M100), baseado na detectabilidade de regiões de menor espessura do corpo de prova (serpentinhas), e nesta avaliação foram utilizados dois filmes em conjunto (técnica de vista composta), para detectabilidade destas regiões. Ambas imagens visualizadas juntas sobre o negatoscópio, mantendo os requisitos da densidade acima de 1,5 H & D nas partes espessas. Na figura 5.14 estão destacados na imagem os defeitos nas duas áreas avaliadas, na área em amarelo foram detectados os defeitos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, e na área verde foram detectados os defeitos de 12, 13 e 14, outros defeitos com menor probabilidade de reprovação do corpo de prova também foram detectados. Na figura 5.15 foram mostrados os mesmo defeitos apresentados na detectabilidade do filme, mas de forma binarizada, com maior nitidez dos defeitos e mantendo o mesmo percentual de detectabilidade encontrado na imagem mostrada na figura 5.15.

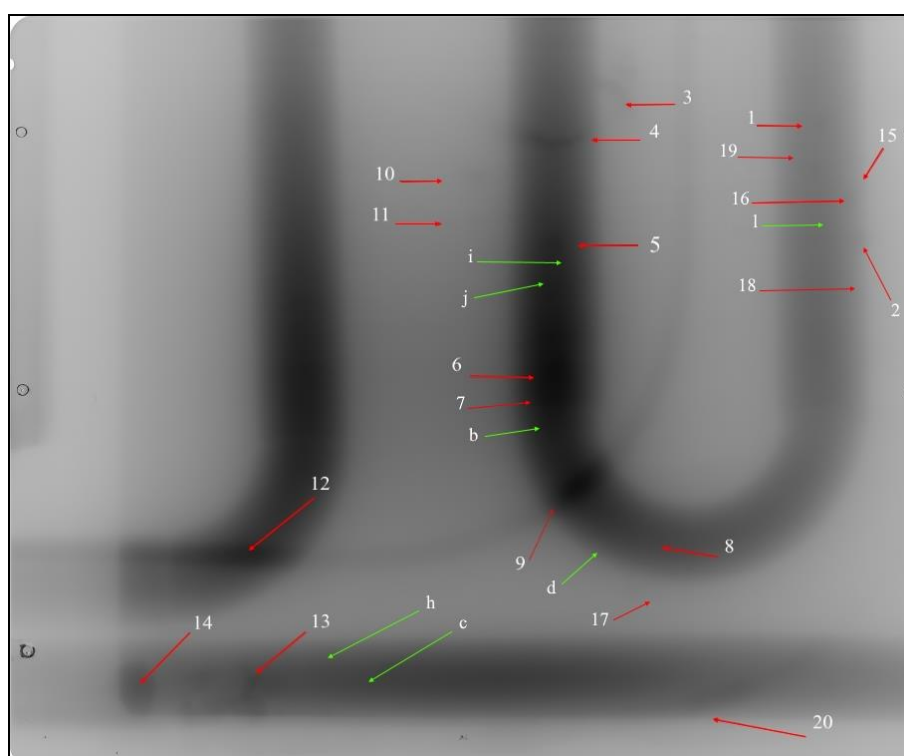


Figura 5.14 – Imagem obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando dois filmes ASTM classe I com a técnica de vista composta.



Figura 5.15 – Imagem binarizada obtida com acelerado circular *Betatron* PXB6 utilizando dois filmes ASTM classe I analisados juntos.

Foram utilizados dois filmes de menor sensibilidade ASTM classe II – AA400 e baseou-se na maior espessura do corpo de prova. Neste ensaio os dois filmes foram radiografados ao mesmo tempo, mas para análise das partes menos espessas do corpo de prova foi utilizado somente um dos filmes para avaliação desta área. Já para análise das partes mais espessas, como era esperado, foi utilizada a técnica de vista composta para avaliar a detectabilidade nesta área. Percebeu-se que a totalidade de detectabilidade em ambas as avaliações das imagens poderia se chegar aos cem por cento de detecção dos defeitos.

As doses utilizadas para adquirir as imagens com vista composta nas técnicas convencionais ficaram muito diferentes, a dose do filme classe I foi duas vezes maior que a dose adquirida pelo filme de classe II, o que mostra a baixa sensibilidade do filme classe II. As figuras 5.16 e 5.18 mostram as imagens avaliadas com a técnica de vista simples e com a técnica de vista composta utilizando filmes classe II – AA400. Nas figuras 5.17 e 5.19 estão representados os defeitos de forma binarizada, com a mesma proporção de detectabilidade encontrada nas imagens radiográficas. O filme com vista composta apresentou uma densidade óptica de 2,42 no centro da imagem.

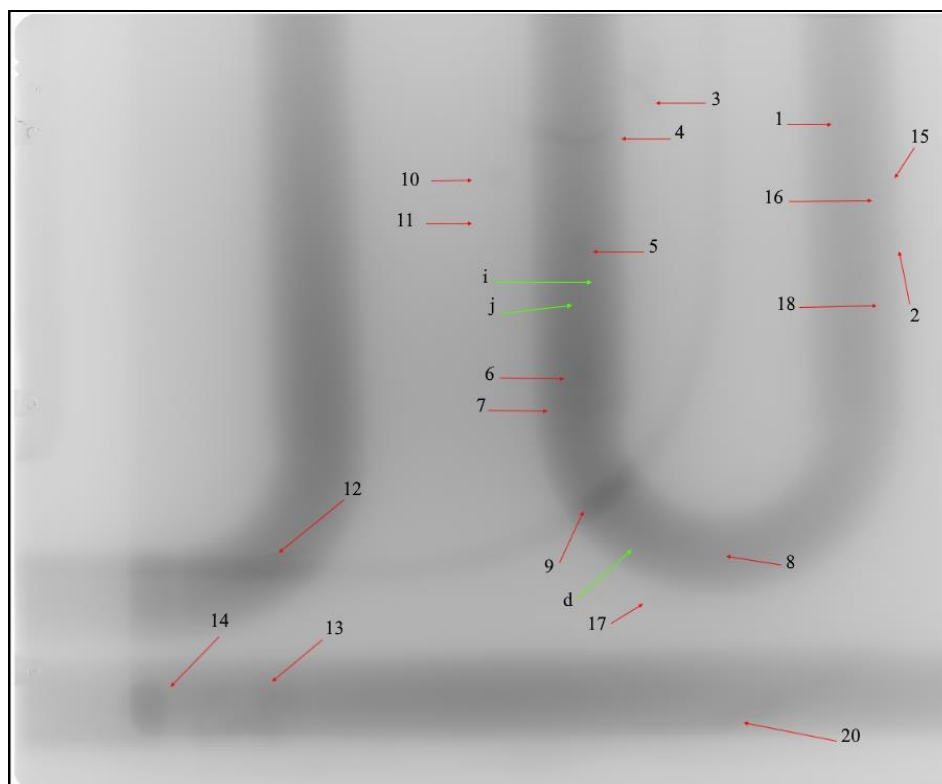


Figura 5.16 – Imagem obtida com acelerador circular *Betatron* utilizando o filme ASTM classe II com a técnica de vista simples, e em destaque as discontinuidades observadas na imagem.

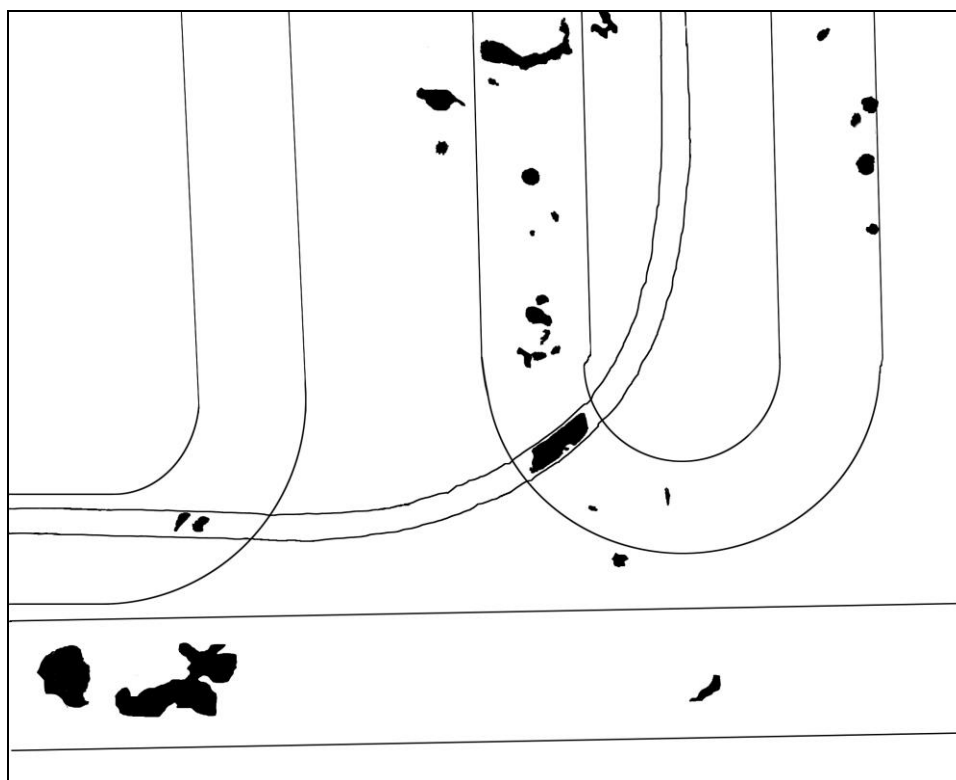


Figura 5.17 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando um filme ASTM classe II – vista simples.

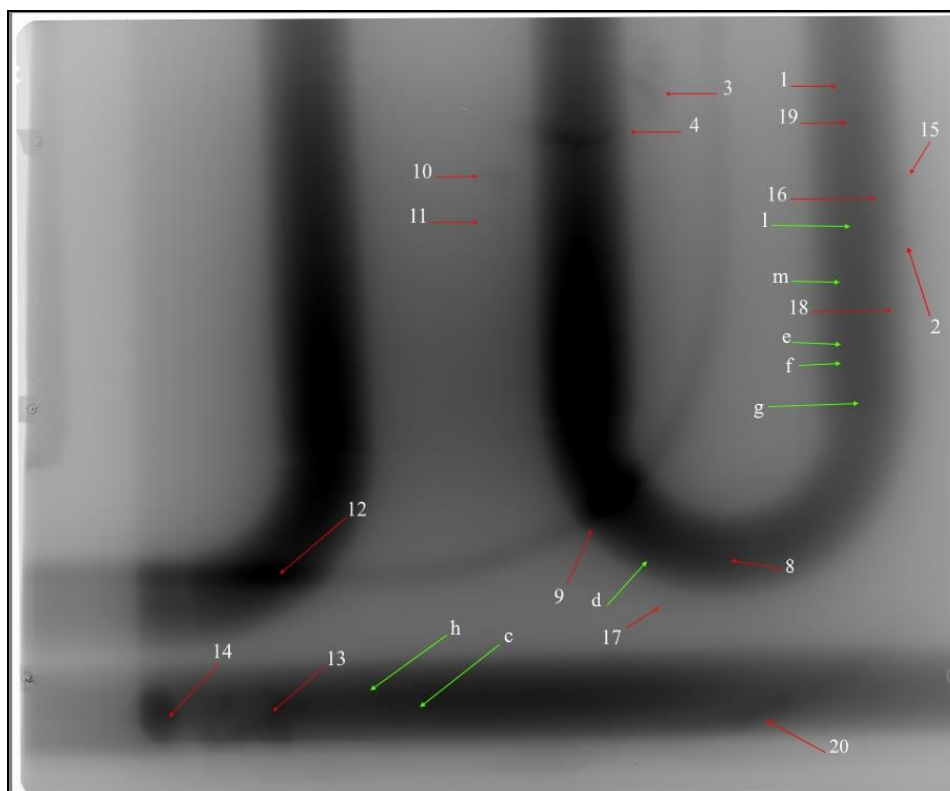


Figura 5.18 – Imagem obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando o filme ASTM classe II com a técnica de vista composta, e em destaque as discontinuidades observadas na imagem.

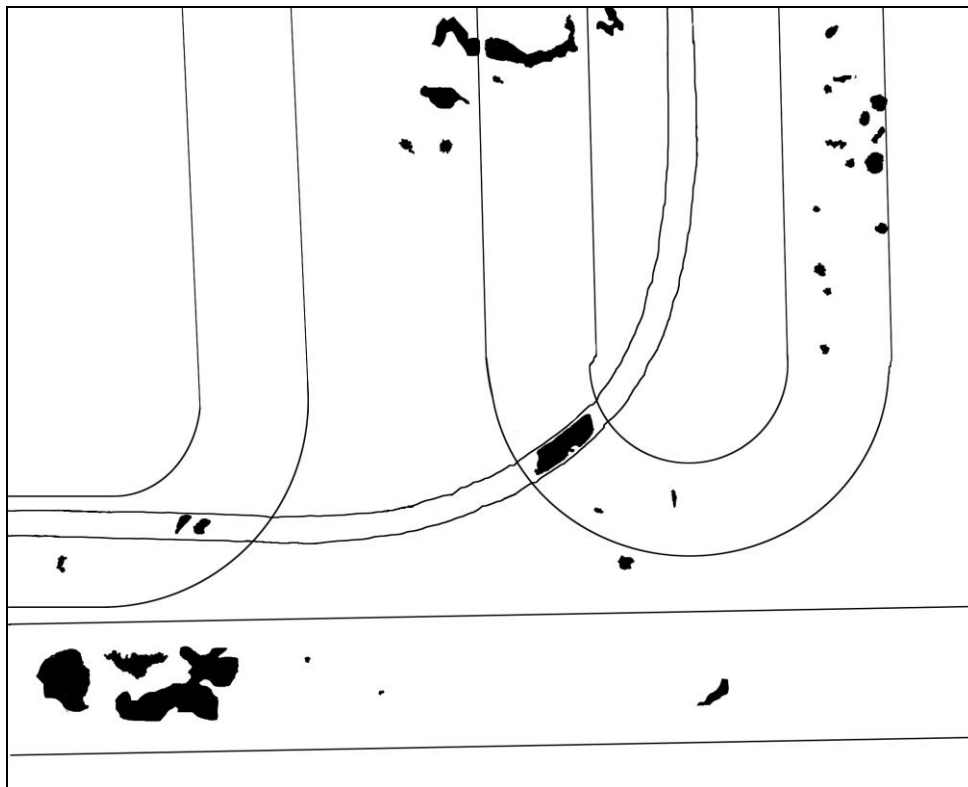


Figura 5.19 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando um filme ASTM classe II – vista simples.

As figuras 5.20, 5.22, 5.24 e 5.26 mostram o quanto a técnica de RC, utilizando placas de imagens disponíveis no mercado demonstraram alta detectabilidade dos defeitos, e todas as imagens apresentaram detectabilidade superior aos noventa por cento dos defeitos. O equipamento *Betatron*, mesmo com uma taxa de dose muito menor em relação ao acelerador linear de 3 MeV e de 4 MeV de energia, não tornou-se inferior em relação ao sistema composto para avaliações de imagens na RC, percebendo-se com facilidade, a qualidade na imagem gerada pelo sistema. As condições utilizadas no ambiente dos ensaios radiográficos com os aceleradores lineares foram mais favoráveis do que as condições com *Betatron*, pois seu arranjo aproximou-se muito mais da realidade no campo. As placas de imagens utilizadas em conjunto com o *Betatron* foram IPC2, IPS, IPU do fabricante GE e a placa IMPROVED do fabricante Kodak.

Assim como nas imagens com a detectabilidade dos defeitos, estes foram apresentados nas imagens binarizadas apresentando o mesmo percentual de detecção com as técnicas de RC utilizando o acelerador circular *Betatron* PXB6 e serão apresentadas nas figuras 5.21, 5.23, 5.25 e 5.27, com a máxima nitidez dos defeitos detectados nas imagens.

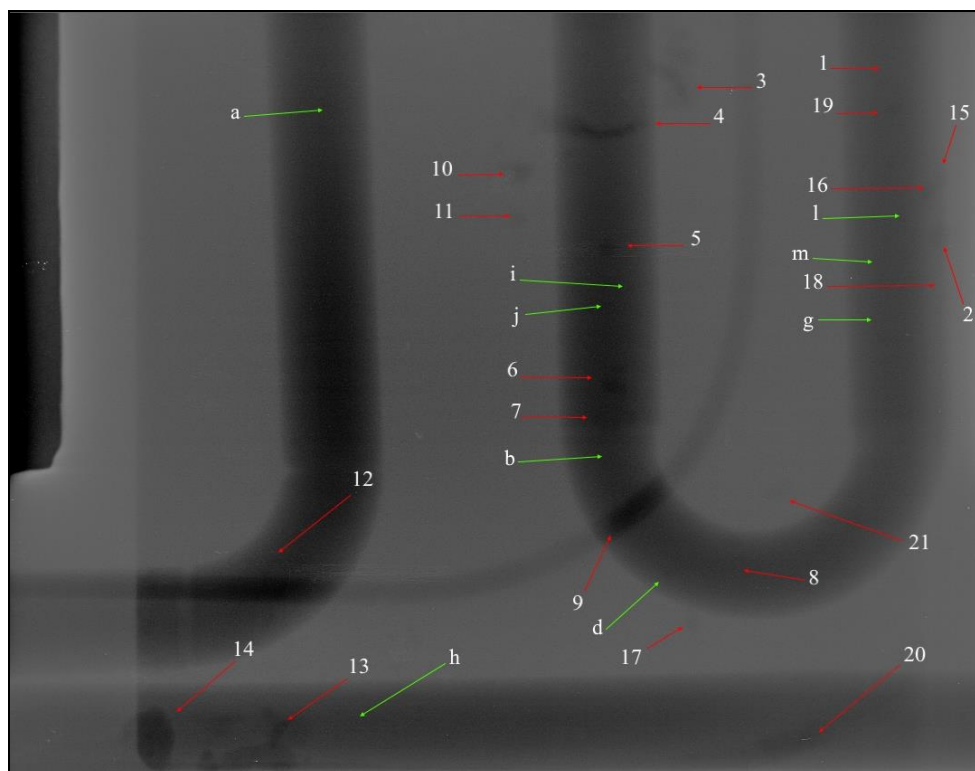


Figura 5.20 – Imagem do *Image plate* IPC2 obtida com acelerador circular *Betatron* de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada.



Figura 5.21 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando IP IPC2.

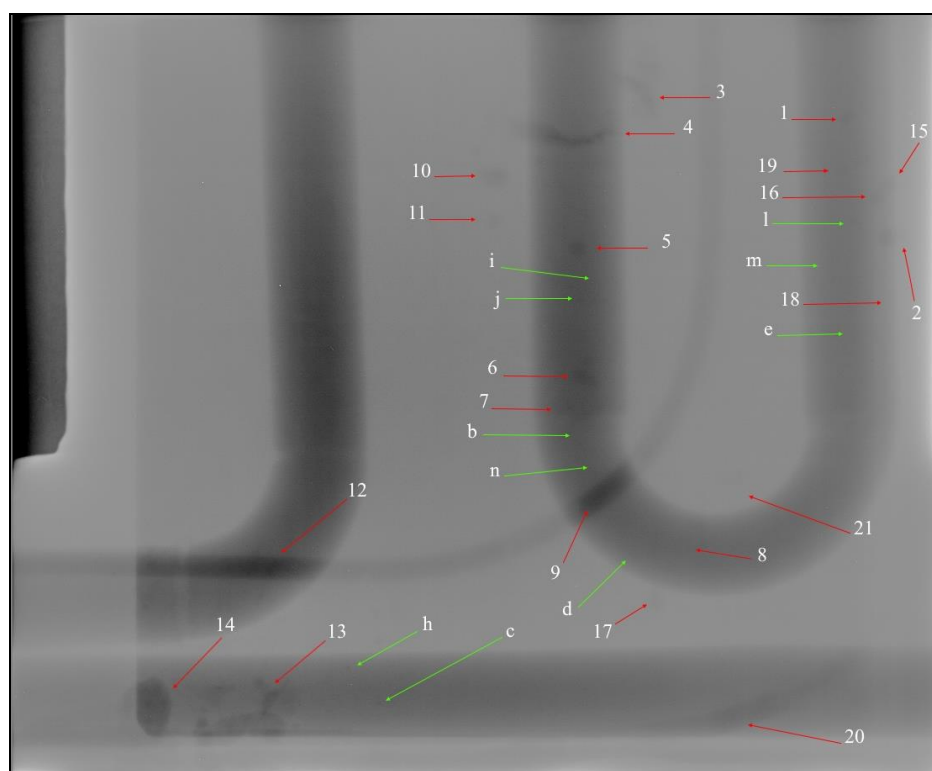


Figura 5.22 – Imagem do *Image plate* IMPROVED Kodak obtida com acelerador circular *Betatron* de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada.

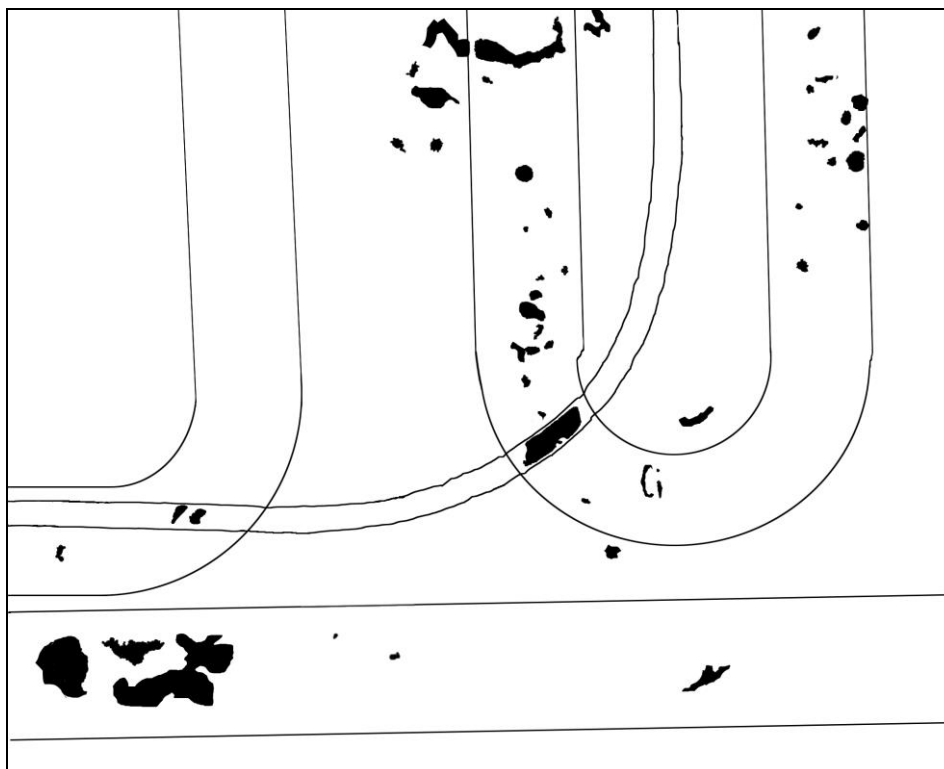


Figura 5.23 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando IP IMPROVED.

A imagem na figura 5.24 mesmo com uma quantidade de artefatos moderada, gerados pelo *image plate*, não prejudicou a análise e apresentou um percentual bem elevado na detectabilidade em comparação com a placa IPX. Um agravante foi o tempo de exposição da placa de imagem IPU que ultrapassou 10 mil segundos, com isso houve um aumento considerável da exposição no ambiente o que não se justifica no campo, principalmente pelo risco accidental de trabalhadores e pela proteção radiológica envolvida. Neste sistema com a utilização do acelerador circular *Betatron*, o fabricante indica que se a utilização ultrapassar 60 segundos ele deve ficar outros 45 minutos ligado com intervalos de 15 minutos desligado, o que significa muito mais tempo para aquisição de uma única imagem com esta placa de imagem, o que não é muito viável em campo. O longo tempo de exposição contribuiu negativamente na qualidade da imagem devido a sua alta sensibilidade radiográfica, os IPs são capazes de detectar radiações a baixos níveis, este fato os torna altamente vulneráveis a radiações espalhadas, pois na situação de campo há muita contribuição do espalhamento devido a proximidade de outros objetos.



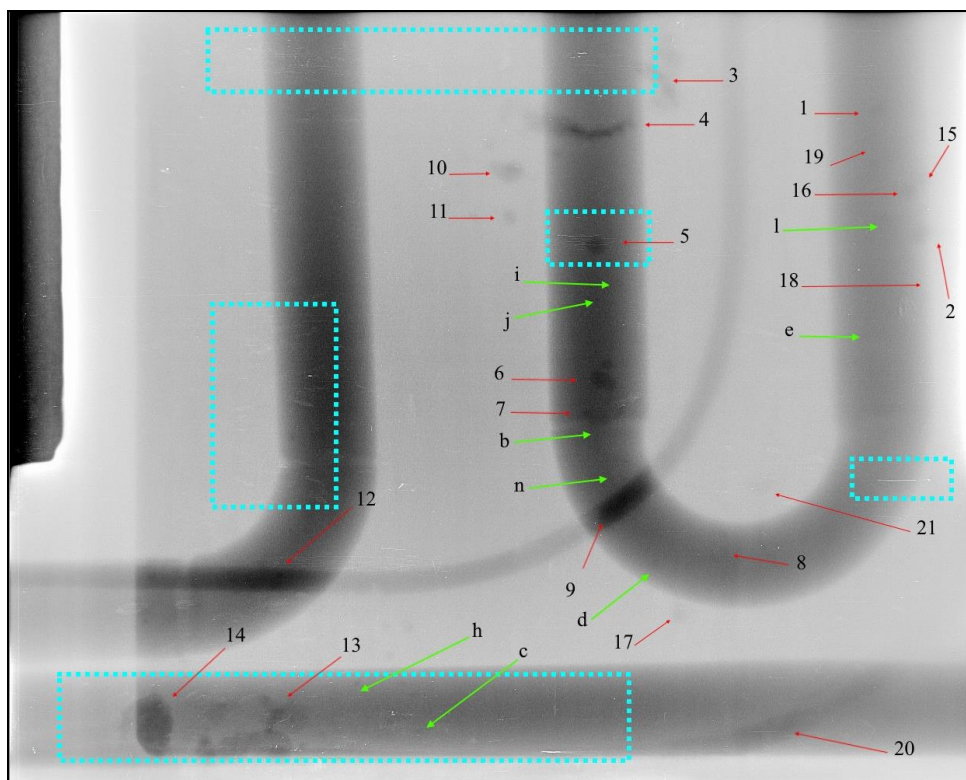


Figura 5.24 – Imagem do *Image plate* IPU obtida com acelerador circular *Betatron* de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada. As marcações em azul mostram artefatos causados pelo IP.

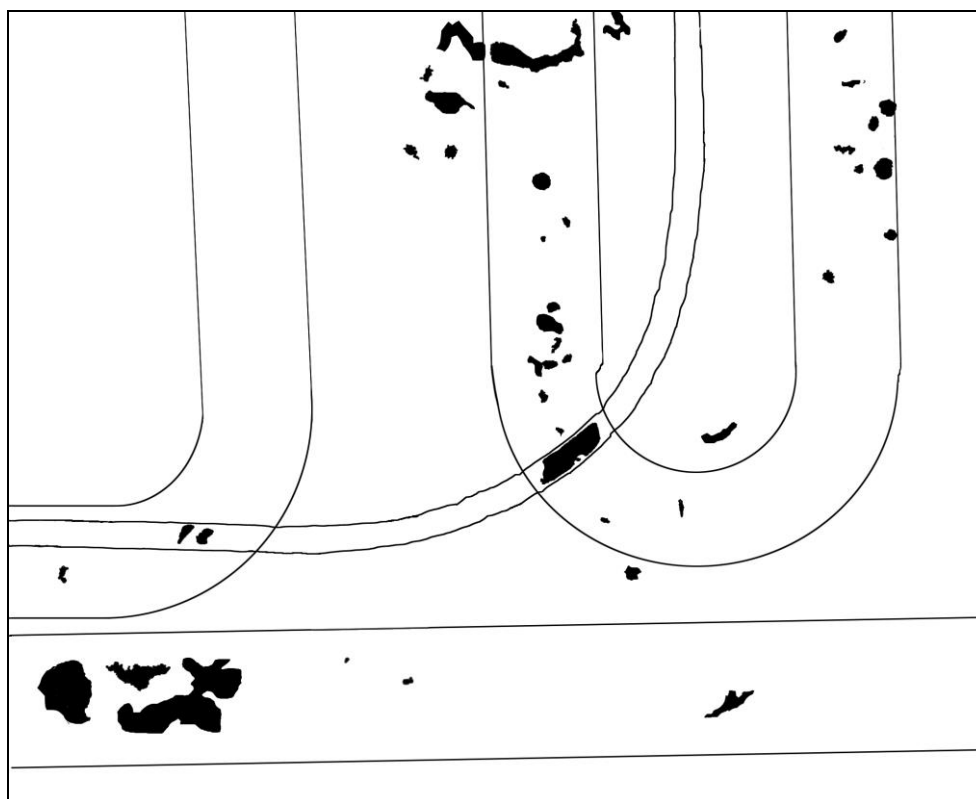


Figura 5.25 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando IP IPU.

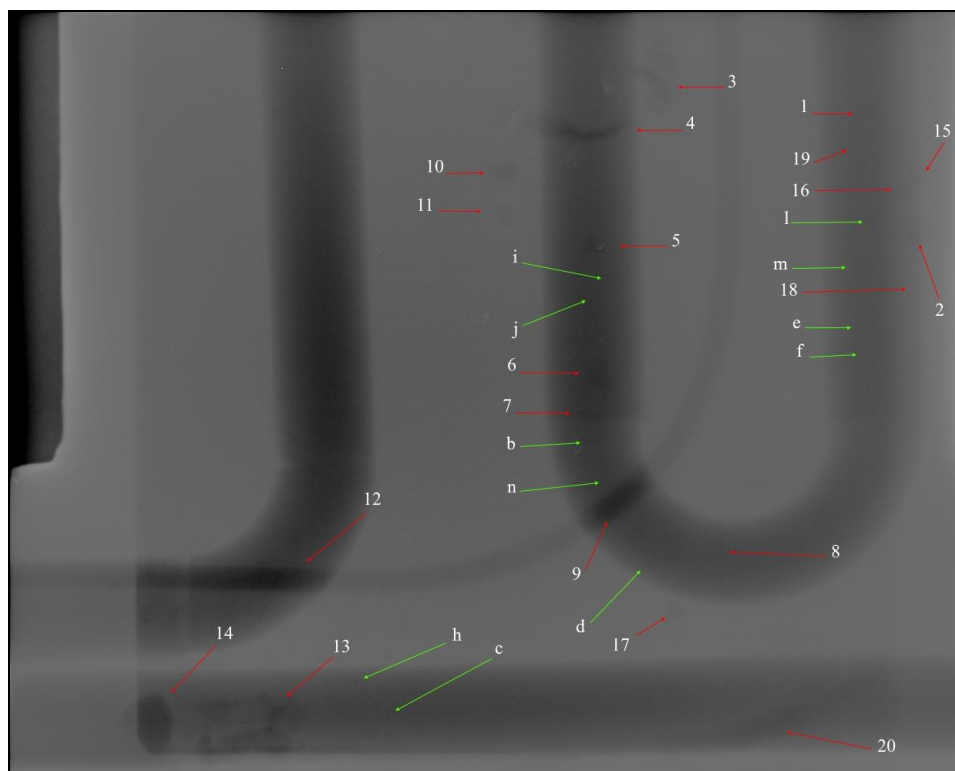


Figura 5.26 – Imagem do Image plate IPS obtida com acelerador circular *Betatron* de 6 MeV utilizando a radiografia computadorizada.



Figura 5.27 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando IP IPS.

Nesta etapa, além da utilização dos IPs foi empregada a técnica digital com um Detector Digital direto, utilizando uma matriz de silício amorfo, e devido a sua grande expansão na área industrial possui destaque na radiografia digital pelo seu desempenho na qualidade de imagem com baixas doses empregadas. O tempo de exposição é um grande aliado no que se diz respeito à cultura da proteção radiológica, principalmente quando este detector está empregado nos ensaios com os equipamentos *Betatron* com 6 MeV de energia. Neste trabalho um dos focos principais foi avaliar o sistema, utilizando o acelerador circular *Betatron*, na situação mais ríspida que proporciona o trabalho em campo, e tirar respostas positivas na análise de materiais com espessuras acima de 120 mm, utilizando detectores digitais, e após avaliar as respostas com os sistemas de RC e detectores diretos, isso pode ser atendido. Nas figuras 5.28 e 5.29 estão apresentados os defeitos em sua totalidade neste corpo de prova, na sequência, a primeira figura mostra a imagem, cuja detectabilidade chegou ao máximo dentro das condições de campo e comparações com os outros sistemas e na segunda figura, os defeitos estão apresentados de forma binarizada, mostrando a mesma proporção de detectabilidade encontrada na figura anterior.

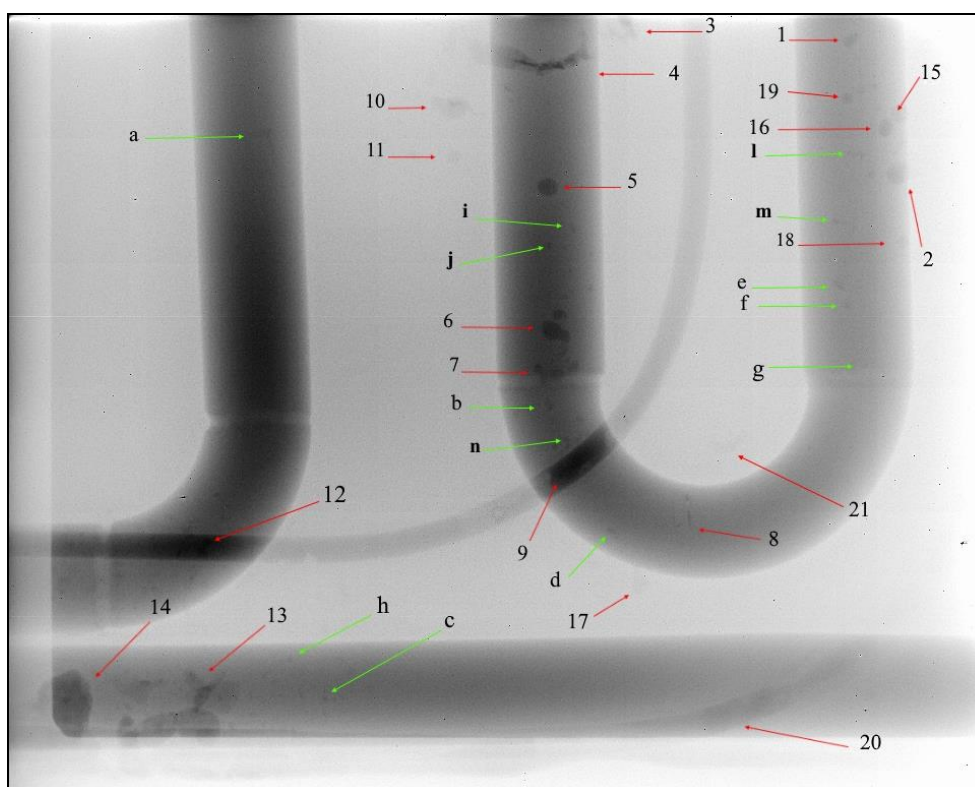


Figura 5.28 – Imagem com utilização do detector digital obtida com acelerador circular *Betatron* de 6 MeV utilizando uma matriz de detector digital.

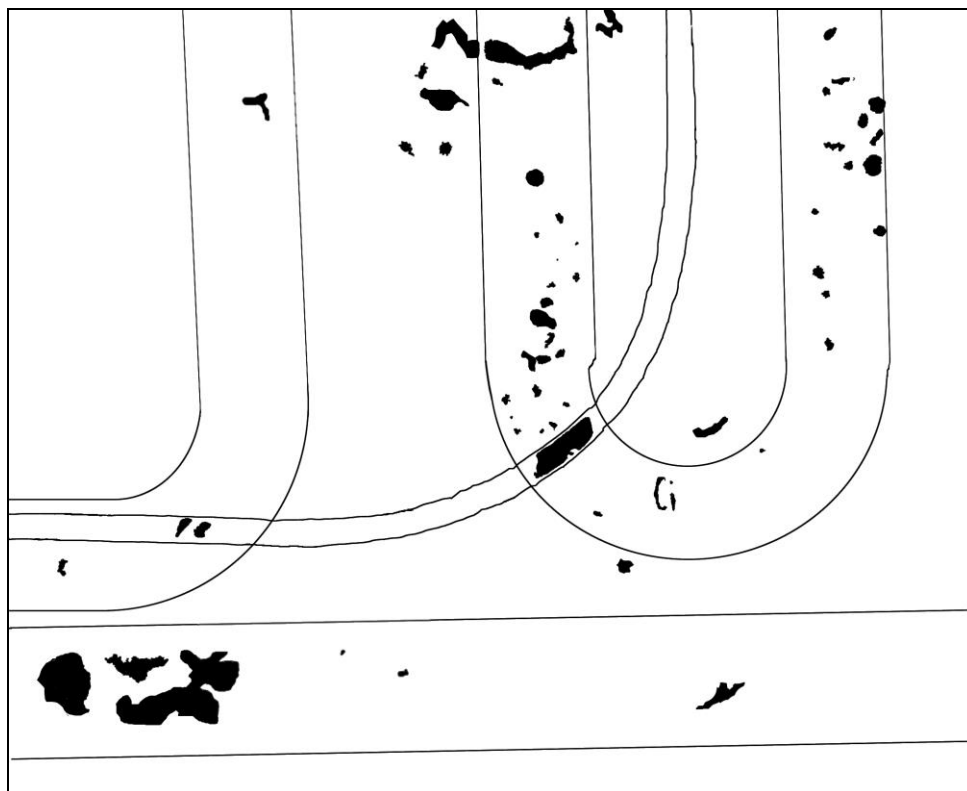


Figura 5.29 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular *Betatron* PXB6 utilizando matriz de detector digital.

## 5.6 – Quarta Etapa

5.6.1 – Ensaio com Radiação X utilizando a técnica computadorizada e a técnica de detecção direta

Nesta etapa foi utilizado o acelerador linear com energia de 3 MeV em conjunto com a técnica computadorizada utilizando placas de imagens de diferentes fabricantes e uma matriz de detector digital (DDA).

Estes ensaios foram feitos utilizando as mesmas condições de distância e com os mesmos parâmetros de utilização dos equipamentos escâneres de leitura dos IPs e os mesmos parâmetros de utilização do detector digital. As condições para evitar espalhamentos e outras contribuições negativas para as radiografias foram utilizadas nestes ensaios radiográficos para reproduzir resultados mais favoráveis e com isso, melhorar as avaliações com os outros sistemas, principalmente com os sistemas utilizando o acelerador circular *Betatron*. A alta taxa de dose deste acelerador linear garantiu tempos 36 vezes mais curtos comparados com os tempos dos sistemas empregados anteriormente.

As figuras 5.30, 5.32, 5.34 e 5.36 mostram o quanto a técnica de RC, utilizando placas de imagens disponíveis no mercado demonstraram muita qualidade na detectabilidade dos defeitos, principalmente em condições favoráveis em termos de espalhamento, e todas as imagens apresentaram detectabilidade superior aos noventa por cento dos defeitos. As placas de imagens utilizadas em conjunto com o *Betatron* foram IPC2, IPS, IPU do fabricante GE e a placa IMPROVED do fabricante Kodak.

Assim como nas imagens com a detecção dos defeitos, estes foram apresentados nas imagens binarizadas, apresentando o mesmo percentual de detectabilidade com as técnicas de RC, utilizando o acelerador linear Linatron 400 e serão apresentadas nas figuras 5.31, 5.33, 5.35 e 5.37, com a máxima nitidez dos defeitos detectados nas imagens.

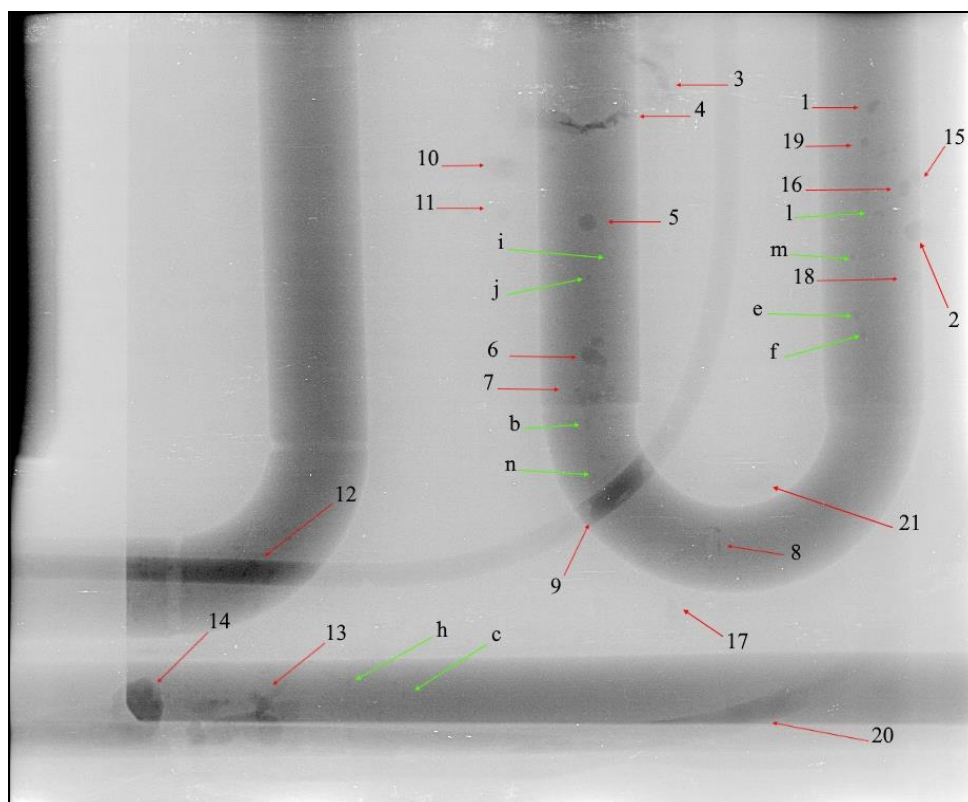


Figura 5.30 – Imagem do Image plate IPC2 obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada.

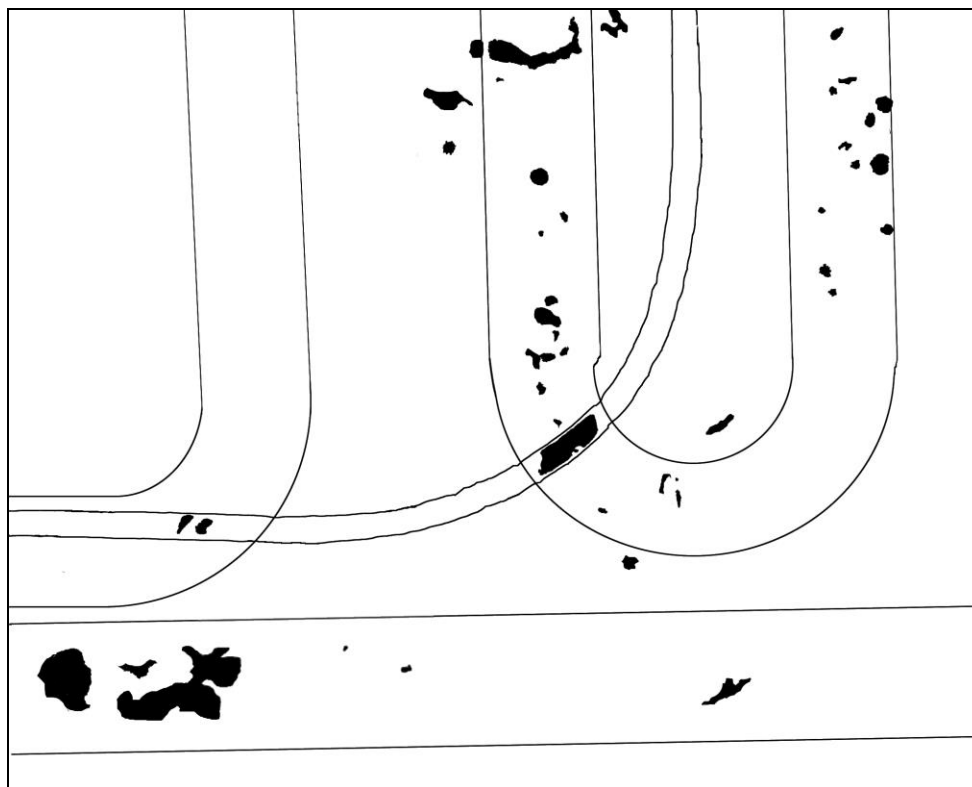


Figura 5.31 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPC2.

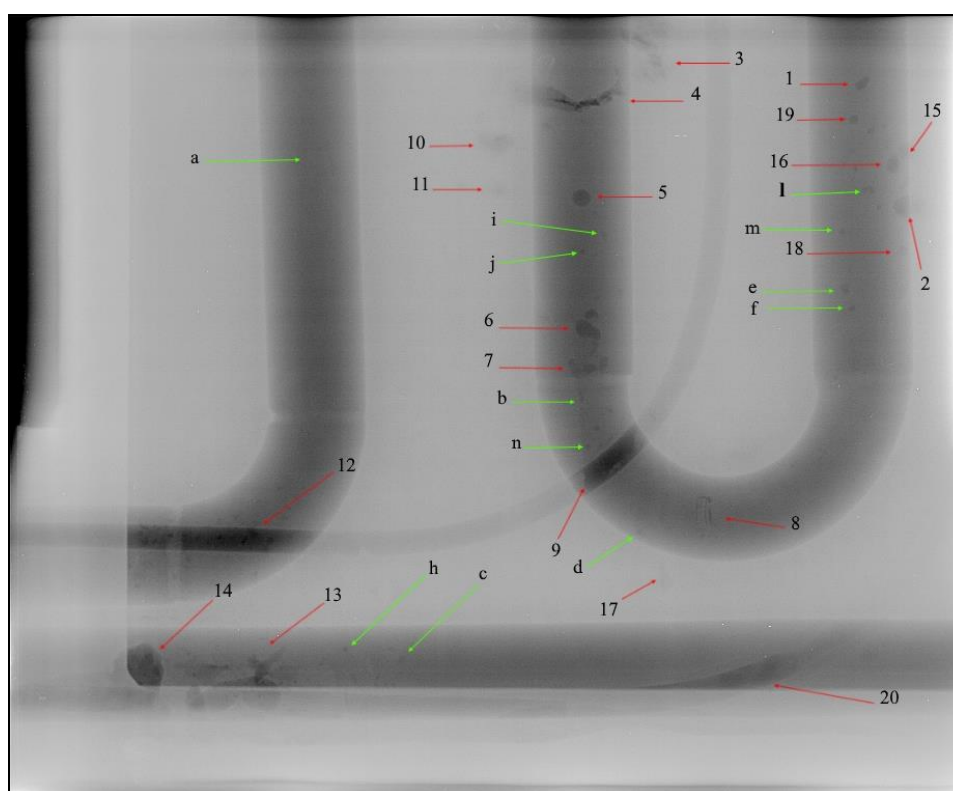


Figura 5.32 – Imagem do Image plate IMPROVED obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada.

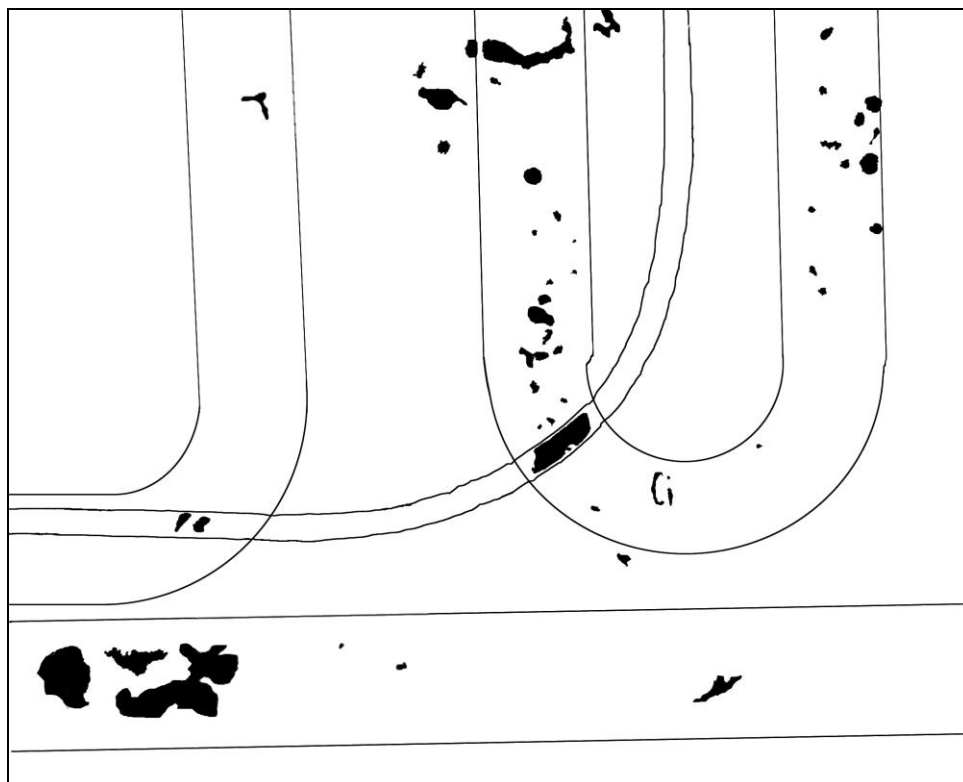


Figura 5.33 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IMPROVED.

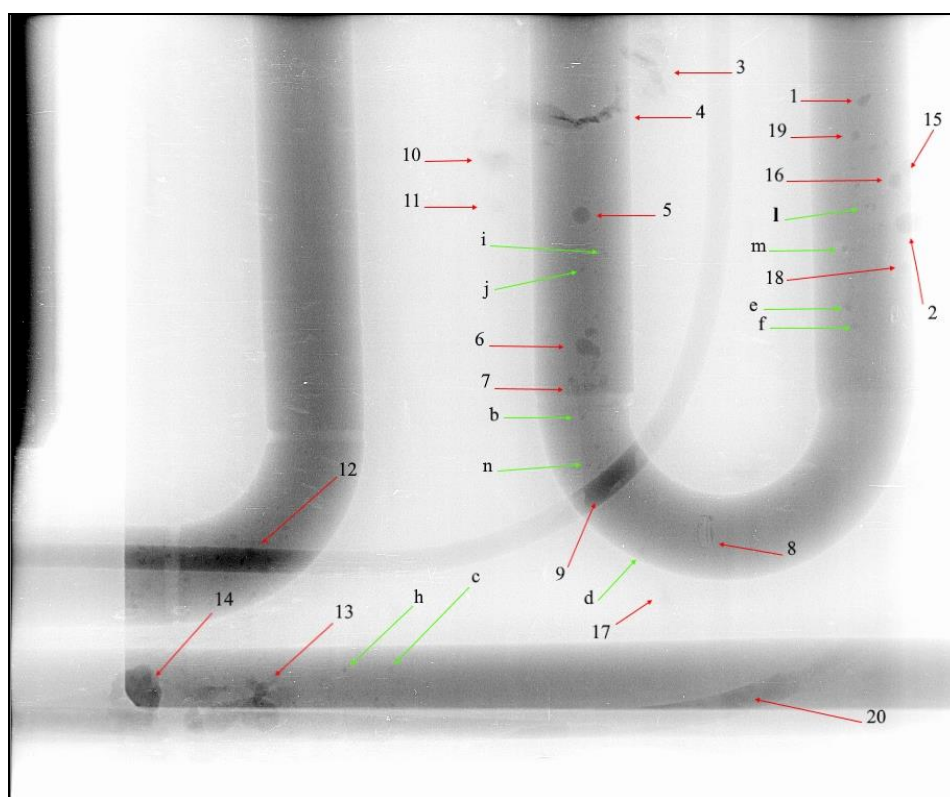


Figura 5.34 – Imagem do Image plate IPU obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada.



Figura 5.35 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPU.

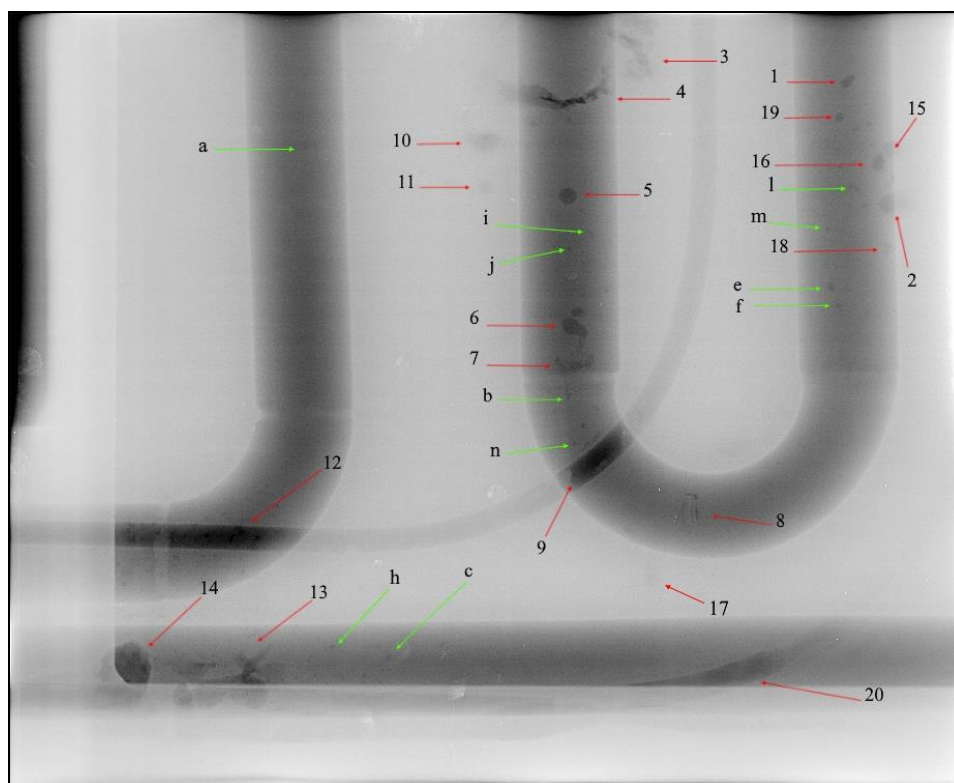


Figura 5.36 – Imagem do Image plate IPS obtida com acelerador Linear Linatron M3 com 3 MeV utilizando a radiografia computadorizada.





Figura 5.37 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando IP IPU.

A combinação entre acelerador linear e estes detectores digitais de radiação, IPs e detector digital em um bunker com isolamento em torno do arranjo, para ser ter a menor contribuição do espalhamento formado nos materiais e paredes ao seu redor, permitiu uma análise mais precisa dos defeitos existentes no corpo de prova, imagens que serviram para uma análise mais precisa como os mesmos detectores com o acelerador circular *Betatron*. Nas figuras 5.38 e 5.39 estão apresentados os defeitos em sua totalidade neste corpo de prova, na sequência, a primeira figura mostra a imagem cujo detectabilidade chegou ao máximo dentro das condições de campo e comparações com os outros sistemas e na segunda figura, os defeitos estão apresentados de forma binarizada, mostrando a mesma proporção de detectabilidade encontrada na figura anterior.

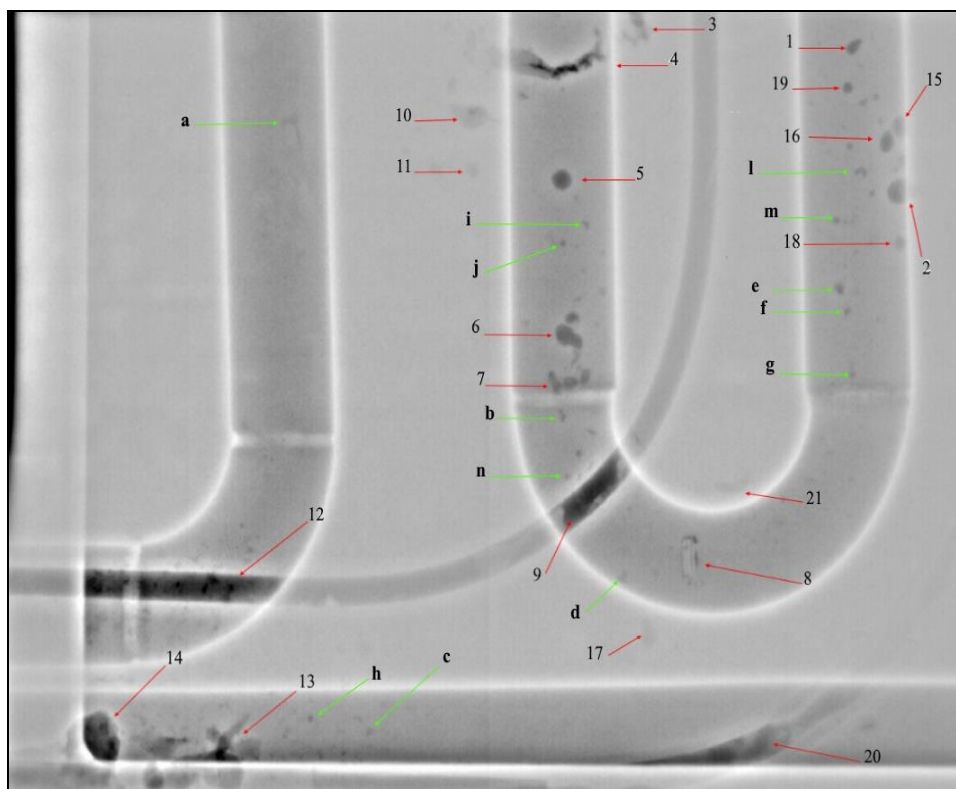


Figura 5.38 – Imagem com um detector digital obtida com Linatron M3 com 3 MeV utilizando uma matriz de detector digital.

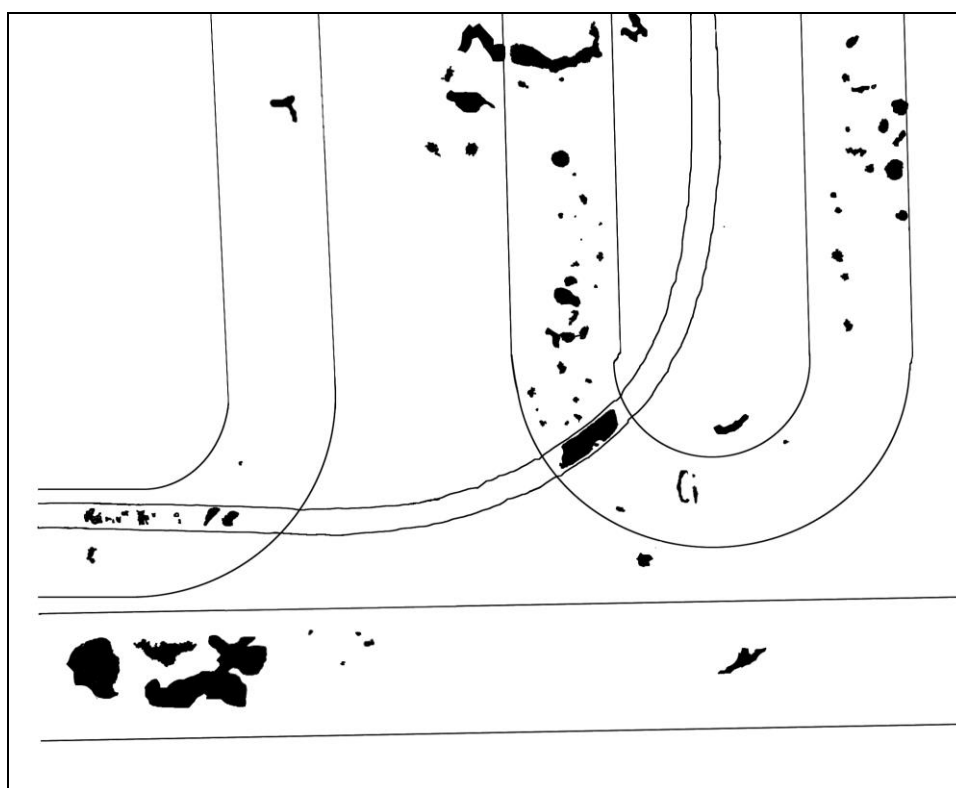


Figura 5.39 – Imagem binarizada obtida com acelerador circular linear Linatron M3 utilizando uma matriz de detector digital.

## 5.7 – Avaliação do Contraste entre os Sistemas

Através da região destacada em amarelo do bloco refrigerador mostrado na figura 5.1 na primeira etapa, foram escolhidos dois defeitos onde havia se concentrado a recusa das descontinuidades (defeitos) que foi objeto para comprometer a utilização do bloco refrigerador. Após obtenção das imagens digitais de cada sistema foi traçado um perfil de linha ao longo das descontinuidades selecionadas como mostrado na figura 5.40, uma localizada sobre a serpentina e a segunda sobre a parte mais espessa do bloco.

As descontinuidades foram representadas graficamente através do perfil de linha, figuras 5.41 a 5.44, para avaliar o quanto é sensível um sistema através do contraste apresentados nestas imagens digitais. O perfil de linha traçado foi mantido exatamente na mesma localização em todas as imagens digitais para se avaliar com mais precisão a descontinuidade com a variação na escala de cinza. As imagens foram adquiridas com as técnicas computadorizadas e digitais diretas utilizando um acelerador linear com 3 MeV, outro com 4 MeV, um acelerador circular com 6 MeV e uma fonte de Cobalto-60 com 49,0 Ci de atividade e tamanho focal de 4,2 x 4,6.

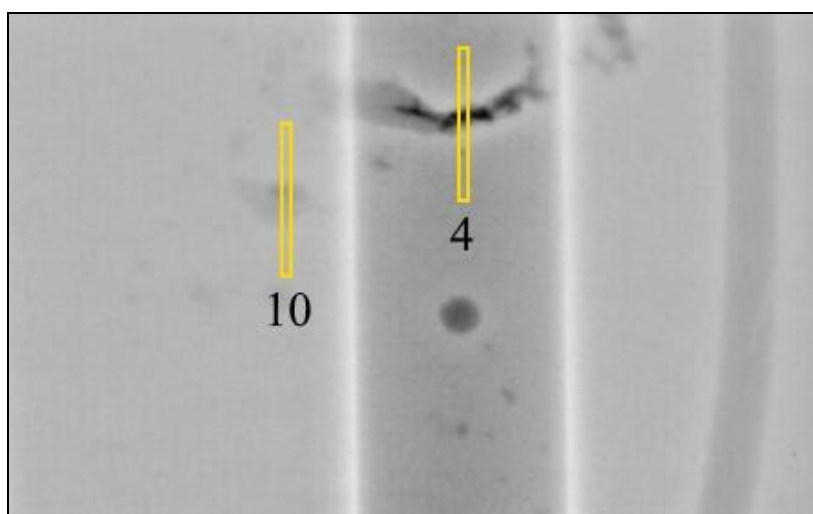


Figura 5.40 – Imagem os defeitos D4 e D10 com área de avaliação da sensibilidade ao contraste.

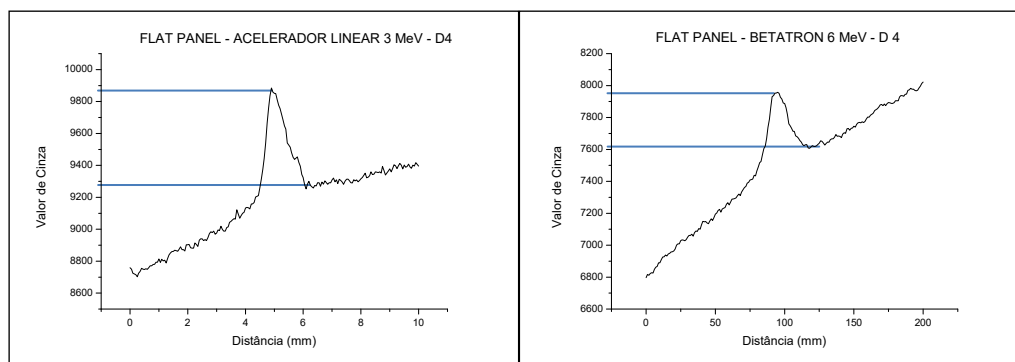


Figura 5.41 – Perfil de linha da descontinuidade D4 para o detector digital DXR 250V.

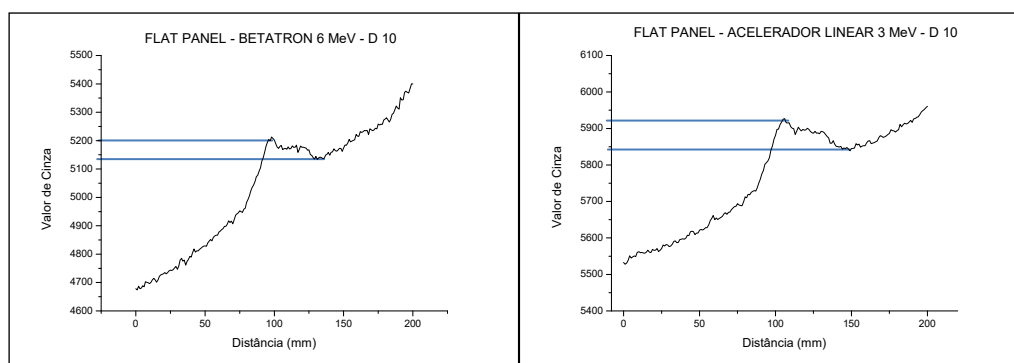


Figura 5.42 – Perfil de linha da descontinuidade D10 para o detector digital DXR 250V.

Estas imagens representam defeitos localizados na parte superior da área cinza, estão localizados fora do eixo central de radiação, mesmo assim possuem uma ótima contaste mesmo sendo de duas regiões com espessuras diferentes. Os detectores digitais destacam-se por sua capacidade de detectar intensidade e energias diferentes de radiação, devido sua ótima relação sinal ruído.

A seguir serão apresentados graficamente os defeitos D4 e D10 (figuras 5.43 e 5.44), através da ferramenta perfil de linha, nas imagens digitais adquiridas com placa de imagens com todas as fontes de alta energia.

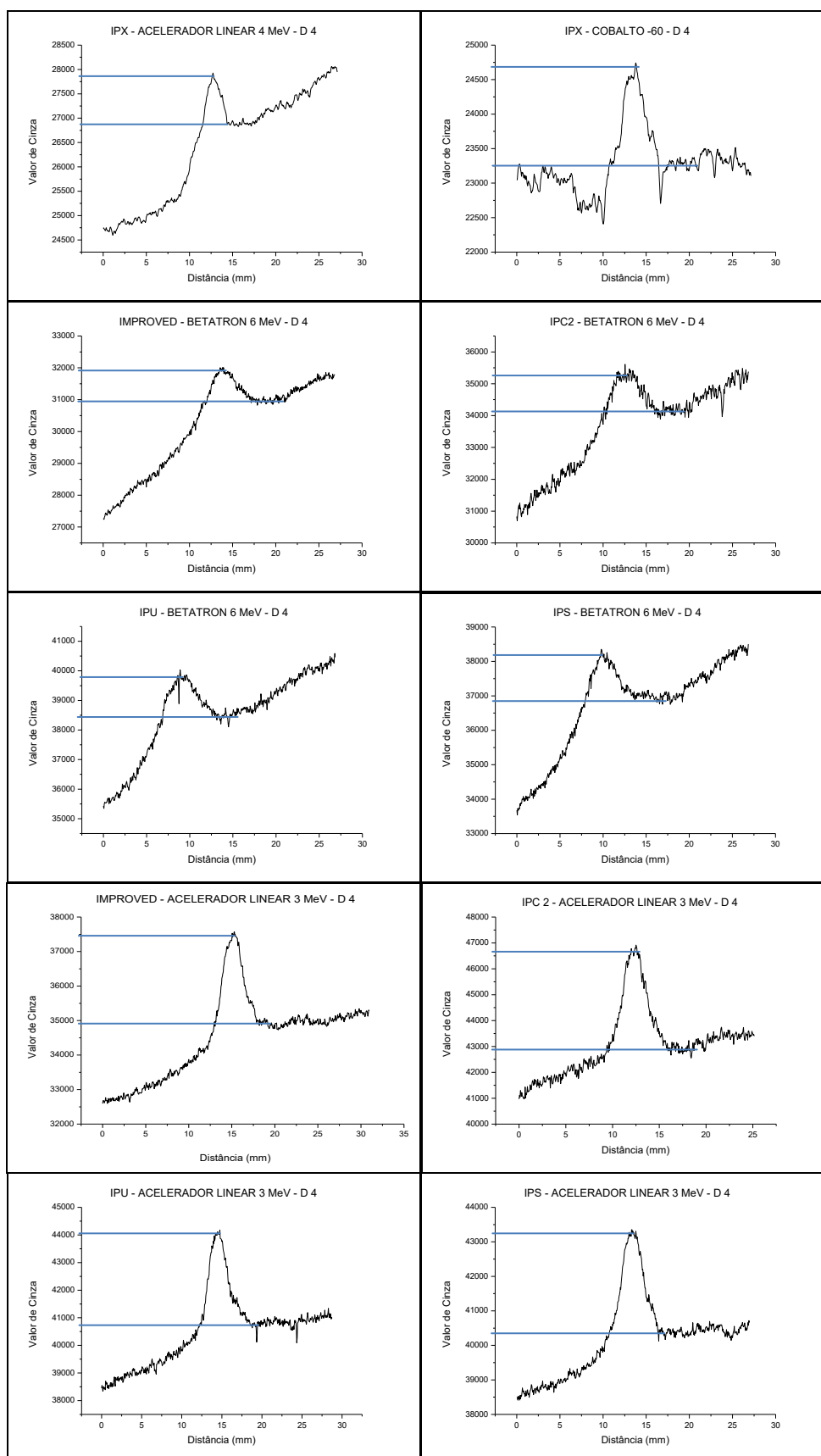


Figura 5.43 – Perfil de linha da descontinuidade D4 para os detectores de placas de imagens – IP.

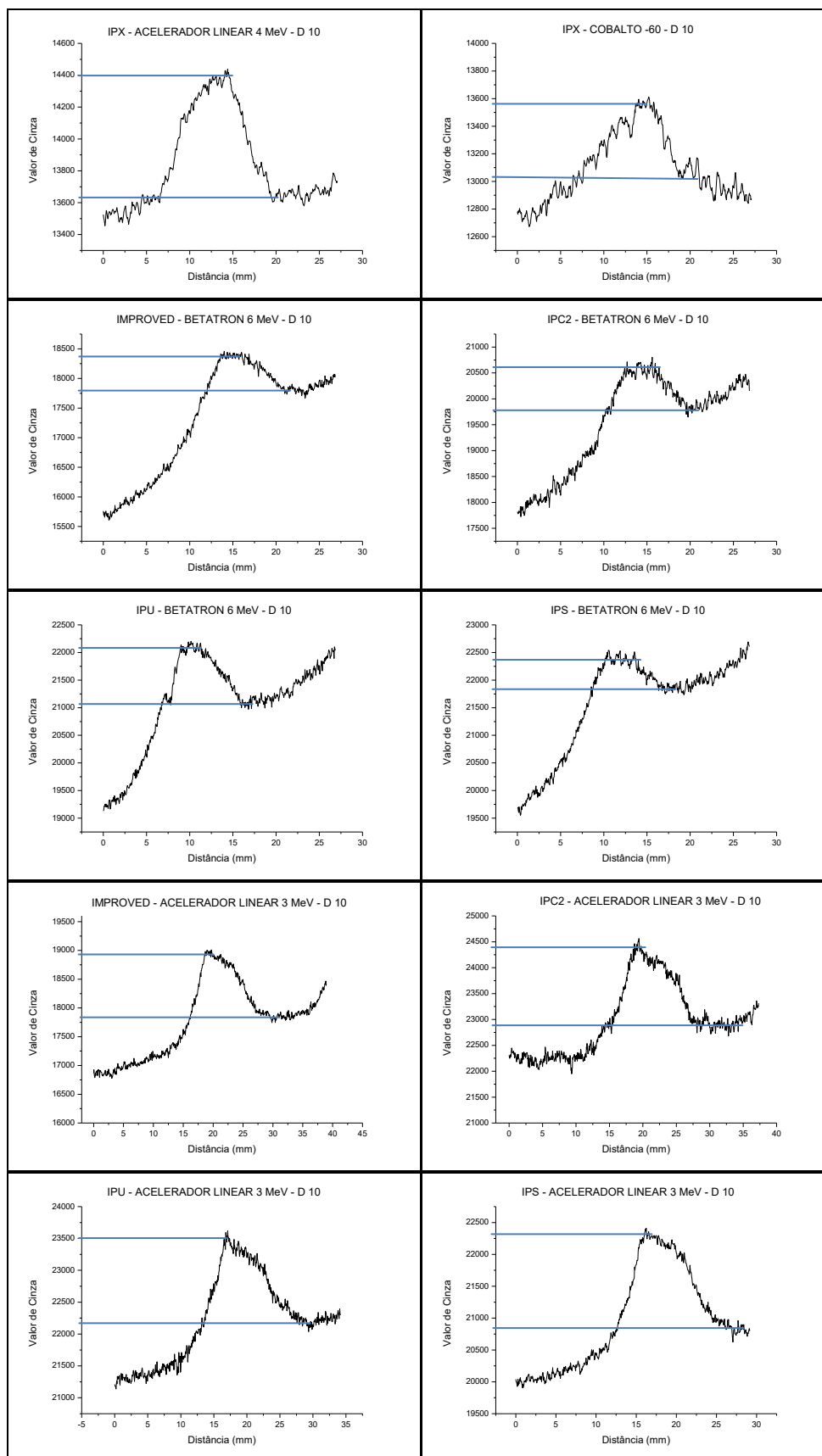


Figura 5.44 – Perfil de linha da descontinuidade D10 para os detectores de placas de imagens – IP.

## 5.8 - Discussão dos Resultados

O objetivo principal do trabalho foi avaliar os resultados obtidos com o sistema radiográfico que utilizou um acelerador circular – *Betatron* com 6 MeV de energia, utilizando a radiografia computadorizada, detector digital direto e qualificar os resultados deste sistema em relação aos resultados obtidos com os sistemas que utilizaram os aceleradores lineares com energias de 3 e 4 MeV e uma fonte de Cobalto-60.

### 5.8.1 – Quanto ao material do bloco refrigerador

O Cobre (Cu), material do bloco refrigerador, por sua formação cristalina centrada pode ter gerado muito espalhamento interno com os ensaios feitos com o sistema que utilizou fonte de Cobalto-60. Outra informação de muita relevância é a espessura do bloco refrigerador, que afetou diretamente o contraste na maioria das imagens feitas com o sistema que utilizou fonte gama. Outro aspecto que afetou significativamente o contraste do sujeito neste ensaio foi a densidade do cobre, pois este corpo de prova possui serpentinas feitas em aço carbono fundidas em cobre, logo o espalhamento entre estes dois materiais afeta muito o contraste.

### 5.8.2 – Quanto à energia das fontes utilizadas

Como um dos principais sistemas utilizados na área de END, o Cobalto-60 tem grandes aplicações em campo por possuir um equipamento portátil e sua energia está acima de 1 MeV, que permite sua utilização com espessuras acima de quatro polegadas de cobre. Foi feita uma avaliação entre os principais sistemas que utilizaram a radiografia convencional e em função da diminuição da dispersão do feixe de radiação, devido ao aumento da energia, notou-se uma melhora significativa em relação ao sistema que utilizou o acelerador circular, e a escolha deste em especial, é porque ele possui características físicas pra ser utilizado em campo, assim como o sistema que utiliza o Cobalto-60. Outra grande vantagem do acelerador circular *Betatron*, em relação ao Cobalto-60 foi devido ao tempo de exposição na técnica de vista composta, utilizando filmes com maior sensibilidade (Classe II). Além do tempo de exposição ter sido quase seis vezes menor, sua detectabilidade foi cerca de quatro vezes maior que as imagens com o sistema que utilizou *Betatron* e filmes classe II.

O IPX foi testado para avaliar os sistemas que utilizou um acelerador linear com 4 MeV de energia e uma fonte de Cobalto-60, e percebeu se que a taxa de exposição pode também ser um fator negativo se este acelerador linear hipoteticamente fosse considerado um equipamento portátil, pois mesmo com um tempo de exposição quatro vezes menor e com

uma distância fonte detector duas vezes menor, a sua dose em relação à exposição com fonte gama foi quinze vezes maior, estes resultados para profissionais da proteção radiológica seria inviável ter que trabalhar com tamanha exposição. Nenhum programa de proteção física conseguiria projetar barreiras suficientes para minimizar os danos que causariam esta dose em campo.

Foram comparadas as imagens dos sistemas que utilizaram aceleradores lineares com 3 e 4 MeV de energia com os outros sistemas, mas estes equipamentos em especial possuem uma taxa de dose excepcionalmente elevada e os resultados permitiram uma das melhores análises em se tratando de utilização de alta energia com os detectores convencionais e digitais empregados neste estudo. Esta afirmação também foi baseada principalmente pela resposta do sistema que utilizou acelerador circular – *Betatron* e detector direto do tipo *flat panel*, que por sua vez o resultado adquirido por este foi igual ao obtido pelo acelerador linear de 3 MeV com cem por cento de aproveitamento na detectabilidade.

### 5.8.3 – Quanto à detectabilidade nas imagens geradas pelos sistemas com alta energia

As imagens também foram avaliadas a partir da detectabilidade de vinte e um defeitos apresentados no bloco refrigerador, inicialmente como destacado na figura 5.1, logo após avaliação com detectores diretos este número de defeitos mudou e o estudo, a partir deste momento começou a avaliar a detectabilidade de mais treze defeitos, mesmo que estes não comprometiam a utilização do corpo de prova em sua atividade fim, mas que proporcionaria uma gama de resultados para futuros trabalhos com espessuras e matérias similares. Não foram avaliados somente vinte e um defeitos e sim trinta e quatro defeitos nas duas regiões em destaque na figura 5.1 em todos os sistemas utilizados neste trabalho.

Ao iniciar a utilização com a fonte de Cobalto-60 foi percebido que com sua atividade baixa para avaliar as espessuras que seriam úteis com fonte gama, seria necessário utilizar uma distância fonte detector (DFD) de 1000 mm para atingir as metas de detectabilidade do sistema. Na sequência, todos os outros sistemas ficaram com esta distância que se tornou padrão, e apenas os sistemas que utilizaram o acelerador linear com 4 MeV, pois já haviam concluídos os ensaios radiográficos, permaneceu com a distância fonte detector de 2000 mm.

Com a utilização da técnica de vista simples, utilizando filmes de classe II com menor sensibilidade, pode se perceber uma maior detectabilidade com fonte de Cobalto-60 em relação ao acelerador linear Linatron 400 com 4 MeV de energia. Esta diferença na detecção foi devido à distância da fonte gama ser duas vezes menor que a distância da fonte de radiação



X de alta energia, pois a contribuição de espalhamento foi muito maior mesmo com suas doses medidas com valores bem próximos.

Ao utilizar os sistemas com *Betatron* e acelerador linear 3 MeV, em conjunto com o detector direto do tipo *flat panel*, pode se desenhar um novo mapa de defeitos, o que permitiu uma avaliação mais precisa entre os sistemas que utilizaram radiografia computadorizada e detector direto na detectabilidade destes defeitos.

A partir desta nova opção de mapa, avaliar estes sistemas ficou mais rigoroso, pois os fatores físicos e qualitativos vão ser fundamentais para as avaliações. Em primeiro plano vimos que os sistemas que utilizaram *Betatron* e acelerador linear 3 MeV com radiografia computadorizada obtiveram mais de 90% de detecção das descontinuidades em relação ao novo mapa em todos os sistemas, e somente o sistema que utilizou acelerador linear 4 MeV em conjunto com o IP IPX na radiografia computadorizada obteve um percentual acima dos 90%. A baixa qualidade da placa IPX, muito avariada com arranhões em sua estrutura, prejudicou o desempenho, principalmente com a fonte gama. Estas placas devem ser manuseadas de forma cuidadosa para não interfira no resultado final da detectabilidade.

Em uma breve comparação entre os tempos dos equipamentos portáteis, percebeu se que o tempo utilizado com a maioria dos sistemas que utilizaram o *Betatron*, exceto com o IP IPU, obtiveram tempos muito próximos aos tempos dos sistemas que utilizaram a fonte gama, que para sistemas portáteis os resultados em detectabilidade do sistema que utilizou *Betatron* foram superiores aos outros com fonte de Cobalto-60. Notou-se também que o acelerador circular – *Betatron*, para alcançar os mesmos parâmetros de qualidades na radiografia computadorizada utilizou tempos de exposição muito elevados devido à baixa taxa de dose em relação aos demais sistemas, o que para trabalhos em campo, não seria bom para a proteção radiológica dos profissionais. No caso do sistema *Betatron* e IP IPU, com o maior tempo de exposição, chegando a 3 horas, além da proteção radiológica. Outra desvantagem é o curto tempo que estas placas possuem para serem digitalizadas, antes de sofrerem perda de sinal pelas características fotoluminescente do material da placa.

O sistema que utilizou o *Betatron* em conjunto com a placa IPS teve um ótimo desempenho, tanto na qualidade da imagem pelos aspectos físicos, na detectabilidade e seu tempo não foi o mais alto entre os sistemas. Devido à diferença de absorção do cobre, com diferentes medidas de espessuras nas áreas marcadas no CP, os resultados poderiam ser mais favoráveis para estas placas de imagens utilizadas na radiografia computadorizada.

#### 5.8.4 – Quanto à sensibilidade dos sistemas que utilizaram RC e detectores diretos

Além da detectabilidade destes defeitos foi feita uma comparação do contraste nas imagens entre todos os sistemas, para avaliar a sensibilidade de cada um deles, através de dois defeitos escolhidos. Estes dois defeitos não foram escolhidos aleatoriamente, eles fazem partes da lista de descontinuidades que afetaram na decisão de reprovar a peça após fundição. Levando em consideração a espessura deste corpo de prova, as variações de densidade de uma região para outra ou os diferentes materiais fundidos neste corpo de prova, a melhor maneira de visualizar o quanto um sistema foi capaz de definir as mudanças de uma região para outra, foi através do contraste. Com estas informações e com ferramentas digitais do programa ISee! foi apresentado através do perfil de linha o quanto um sistema pode detectar as alterações numa dada região do material. Nas figuras 5.24 a 5.27, estão apresentados graficamente uma seção dos defeitos D4 e D10 entre a diferença nos valores de cinza em cada *pixel* na imagem digital pela distância percorrida dentro do perfil marcado sobre o defeito.

As curvas características dos sistemas que utilizaram o detector direto, demonstram maior relação sinal-ruído, onde a variação é maior para o acelerador linear, e com este sinal uniforme apresentou baixo ruído. O sistema com *Betatron* também apresentou estas características, mas possui uma concentração maior da fluência de fótons no centro do feixe, o que faz com que a distribuição de dose do centro da placa para as extremidades tenha uma variação muito grande no valor de cinza. Isto acontece pela falta de um filtro equalizador de feixe na janela de saída do equipamento.

Os sistemas que utilizaram fonte de Cobalto-60 apresentaram nas figuras 5.26 e 5.27, os gráficos D4 e D10 uma variação expressiva no valor de cinza, o que significa uma presença considerável de ruído na imagem, provavelmente causado pelo espalhamento devido à grande espessura do CP e pela diferença entre a densidade do cobre no material base ser maior que a do aço carbono utilizado na serpentina. Nas demais imagens os picos característicos de ruído foram basicamente de defeitos físicos causados nas placas, por isso, as recomendações dos fabricantes em manipular estas placas de forma cuidadosa. Os ensaios radiográficos utilizando o acelerador circular – *Betatron* também apresentaram mais ruído que os demais, isto aconteceu propositalmente, pois estes ensaios com *Betatron* foram feitos com atenuadores muito próximos do corpo de prova para simular uma realidade bem próxima do que acontece em campo. Mas mesmo com todo este espalhamento, o sistema se mostrou eficiente na detectabilidade dos defeitos apresentados pelo corpo de prova.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Segundo análise dos resultados obtidos neste trabalho, é viável a aplicação dos sistemas que empregam a RC e detectores diretos digitais na inspeção de material fundido com espessuras variando até 150 mm de cobre (Cu), utilizando também fontes de alta energia como o acelerador circular por indução – *Betatron*. Foi possível comparar os sistemas que utilizaram o *Betatron* como fonte de alta energia, e avaliar sua resposta positiva, se tratando de detectabilidade de defeitos em material fundido, com os demais sistemas utilizados neste estudo, os aceleradores lineares com 3 e 4 MeV e com a fonte gama de Cobalto-60. A utilização destes sistemas portáteis, utilizando *Betatron* é tão eficiente quanto os que utilizam fonte de Cobalto-60 no campo e os aceleradores em bunker.

Após avaliar os sistemas que utilizaram fontes gama, percebeu-se que os fabricantes precisam desenvolver placas de imagem e detectores digitais com capacidade de atender as demandas que este segmento precisa para avaliar peças e matérias. As fontes de Cobalto-60 possuem desvantagens do tipo: maior proteção radiológica para desenvolver trabalhos em campo, principalmente pelos altos tempos de exposição que geram altas doses; baixa qualidade nas imagens, devido ao tamanho focal que geram alta resolução e com grandes variações na espessura, torna-se mais difícil a detectabilidade de defeitos. Mas essas fontes também possuem algumas vantagens: a primeira é ter um equipamento de proteção portátil (blindagem) o que garante fácil locomoção do objeto e garante melhor proteção ao trabalhador e a outra é ter uma meia vida longa, o que permite sua utilização por muito tempo.

A proposta em avaliar o sistema utilizando o *Betatron* para análise de espessuras acima de 4 polegadas em conjunto com a radiografia computadorizada e com detector direto do tipo *flat panel* foi excelente, grande parte das discontinuidades foram observadas nas imagens geradas com este sistema, ultrapassando sempre os 90% de defeitos mapeados durante análise com outros sistemas. Garantiu uma detectabilidade de defeitos menores que aqueles que normativamente reprovam o corpo de prova. Em contrapartida, os tempos para aquisição com a radiografia computadorizada ficaram bem elevados, o que seria um risco para os trabalhadores, se não houvesse uma maneira eficaz de isolamento na área dos ensaios

radiográficos. A utilização do sistema com *Betatron* e filmes convencionais também se mostrou eficaz com estes sistemas, principalmente para a técnica de vista composta, utilizando filmes mais rápidos, em particular, neste caso, a melhor detectabilidade foi na região com maior espessura. É viável a utilização do *Betatron* em campo para este tipo de ensaio, desde que se faça um estudo para avaliar barreiras primárias na proteção radiológica dos profissionais envolvidos.

Como trabalhos futuros podem ser citados os seguintes projetos:

- Utilização de novos IPs e detector direto do tipo *flat panel* com fonte gama de Cobalto-60.
- Confecção de Indicadores de Qualidade para os testes de Contrastes em peças e equipamentos com grandes espessuras e densidades diferentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGFA, 1989, Industrial Radiography, Agfa Gevaert, Ed. Birmann, N.V., Bélgica.

ANDREUCCI, R., 2006, Radiologia industrial, Disponível em: [http://www.playmagem.com.br/radiologia/radiologia\\_industrial.pdf](http://www.playmagem.com.br/radiologia/radiologia_industrial.pdf) . Acesso em 07 Janeiro de 2017, 01:15:30, 76p.

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

ASTM E 272, 1999, Standard Reference Radiographs for High-Strength Copper-Base and Nickel-Copper Alloy Casting.

ASTM E1815, 2008, American Society for Testing and Materials, Standard test method for classification of film systems for industrial Radiography. West Conshohocken, USA.

ASTM E 2445-05, 2005, Standard Practice for Qualification and Long-Term Stability of Computed Radiology Systems.

ASTM E 2446-05, 2005, Standard Practice for Classification of Computed Radiology Systems.

ASME Code Section V, 2010, Nondestructive Examination – Article 2, Radiographic Standards, SE – 94 Standard Guide for Radiographic Examination 2010 Edition 2011a Addenda. Identical with ASTM Specification E 94 – 2004.

ATKINS, W. W., 1951, *The Betatron And Its Applications*, Georgia Institute of Technology, Thesis M. Sc., North Ave NW, Atlanta, GA 30332, USA.

BAM, 2007, User Manual for the Measuring Program ISee!, Verson 10.2. Disponível em: <http://dir.bam.de/ic/>. Acesso em 07 Janeiro de 2017, 02:15:20.

BARBOSA, A. L. N., 2008, *Desenvolvimento de uma tela cintiladora nacional conversora de nêutrons*, Dissertação M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BRYANT, P.J., 1994, *A Brief History And Review Of Accelerators*, CERN - Center European for Research Nuclear, Geneva, Switzerland.

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

DIN EN 1435, 2002, Radiographic Testing of Welded Joints. Dutsche Norm, Non-destructive testing of welds September.

DIN EN 1982, 2008, Copper and Copper Alloys – Ingost and Communication in Nondrestructive Evaluation, Deutsche Norm (DICONDE).

DOMANUS, J. C., 1992, *Pratical Nêutron Radiografhhy*, 1<sup>a</sup> ed, Commsission of the European Communitie, Boston, Kluwer Academic Publishers.

DUPEN, D., 1966, *The Story Of Stanford's Two-Mile-Long Accelerator, Technical Report Prepared Under*, San Francisco, USA, v 48, p 17-20.

DURR NDT, 2015, HD-Cr 35 Ndt Data Sheet, Disponível em: [http://www.duerr-ndt.de/\\_pdfs/HD-CR\\_35\\_NDT\\_GB.pdf](http://www.duerr-ndt.de/_pdfs/HD-CR_35_NDT_GB.pdf). Acesso em: 07 Janeiro 2017, 15:40:00.

EDWARDS D. A., SYPHERS M. J., 2004, *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators*, Wiley-VCH Verlang GMBH&CO, Germany.

EN 14784-1, 2005, Non-destructive testing - Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates - Part 1: Classification of systems, Augus.

EN 462-5, 1996, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value..

GE; disponível: [http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/geit-40058en\\_crxvision\\_en.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/geit-40058en_crxvision_en.pdf) - Acesso em: 30 de Setembro de 2016.

GURVICH, A. M., HALL, C., KAMENSKIKH, I. A. *et al.*, 1996, “Phosphors for Luminescent Imaging Plates”, *Journal of X-ray Science and Technology*, vol. 6, p. 48-62.

HALMASHAW, R., 1995, *Industrial Radiology – Theory and Practice*, 2 ed., Londres Chapman & Hall.

HALMASHAW, R., 1970, “Radiography Using High Energy X-rays”, *Non-Destructive Testing Center*, Londres, v 3, p. 120-124.

HAUS, A. G., CULLINAN J. E., 1989, “Screen Film Processing Systems for Medical Radiography”, *Health Sciences Division, Eastman Kodak Company*, Rochester, New York.

HELMER, R. G., GEHRKE, R. J., DAVIDSON, J. R., *et al.*, 1998, Gamma-Ray Spectrum Catalogue – Ge and Si Detectors Spectra, Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, Idaho, USA.

HELLIER, C. J., 2003, “Radiographic Testing”, *Handbook Mc Graw-hill*, New York, USA, cp 6, p 6.1-6.70.

INFORMET, METAIS & LIGAS – COBRE, 2016, Disponível em <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-assunto.php?codSecao=12>. Acesso em: 02 Outubro 2016, 10:20:00.

ISO 19232-5, 2004, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type) - Determination of image unsharpness value.

JME, 2008, Data-sheet - Portable 6MeV X-Ray *Betatron*, For Radiographic Non Destructive Testing, Microprocessor model: PXB-6 M.

KERST, D., W., 1941, “The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction”, *University of Illinois*, Urbana, Illinois.

KINNO, A., ATSUTA, M., TANAKA, M., *et al.* 1998, “Development of a large area direct conversion X-ray image detector”. *IDW*, p 313-318.

KIM H. J., HO K. K., 2003, “Construction and characterization of an amorphous silicon flat-panel detector based on ion-shower”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v 505, p155-158.

KNOLL, G. F., 2000, *Radiation Detection and Measurement*, 3 ed, New York, John Willey & Sons Inc.

KODAK, 1980, *Radiography in Modern industry*, Forth Edition, Eastman Kodak Company, New York, <http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry>, Acesso em: 02 Ago. 2015, 14:25:40.

KOLKOORI S., WROBEL N., DERESCH A., *et al.*, 2014, “Dual High-Energy X-ray Digital Radiography for Material Discrimination in Cargo Containers” , *BAM Federal Institute for Materials Research and Testing*; Berlin, Germany.

MACHADO, A. S., 2011, *Estudo Comparativo da Radiografia Convencional e Computadorizada para Análise de Ligas Metálicas*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MASTER, R. C., 1959, *Nondestructive Testing Handbook*, 1 ed., New York, Edited for the Society for Nondestructive Testing.

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

MAZZUCCA, L., 2016, *Conhecendo a Válvula Magnetron*, Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/conhecendo-v%C3%A1lvula-magnetron-luiz-mazzucca>. Acesso em: 01 Janeiro. 2017, 19:25:36.

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

OLIVEIRA, F. M., 2004, *Estudo de Sistema de Radiografia Computadorizada com Uso de Placas de Imagem*, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, D. F., 2007, *Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profunda*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

PARIDA N., 1999, “Non-destructive Testing and Evaluation of Cast Materials”, *Materials Characterization Techniques-Principles and Applications*, Índia, p 177-193,.



PEREIRA, R., 2006, Filmes e Processamento Radiográfico. ebah, Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABM8QAJ/apostila-filme-processamento-radiografico>. Acesso em: 30 de Setembro 2016, 15:30:00.

PERKINS, L. T., 2007. “Bi-Directional Dispenser Cathode”, *This patent application is related to commonly owned U.S. patent application Ser. No. 11/957,183 filed.*

RAAD, J. A., 2007, “Radiografia Industrial - Técnica de Formação de Imagem”, *General Electric Company- GE*, Brasil.

ROUSSILHE, J., MANGO, S. A., FALLET, E., 2007, “Performance Evaluation of a Computed Radiography System”. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Lyon, France.

ROWLANDS J. A., 2002, *The Physics of Computed Radiography*, Institute Of Physics Publishing, Phys. Med. Biol. **47** (2002) R123–R166, Toronto, Canada.

SANDLIN S., 2010, *High Energy Radiography for Inspection of the Lid Weld in Disposal Canisters*, POSIVA, Working Report, Eurajoki, Finland.

SCURI, A. E., 1999, “Fundamentos da Imagem Digital”. Notas de Aula, Tecgraf/PUC, Rio de Janeiro.

SEIBERT, J. A., 1999, “Physics of Computed Radiography”, *41<sup>st</sup> Annual Meeting of the American Association of Physicists in Medicine*, Nashville, USA.

SESSLER, A., WILSON, E., 2007, “A century of particle accelerators”, *Engines Of Discovery*, CERN – 49-53, Geneva, Switzerland.

SILVA, A. S. S., 2013, *Avaliação Dos Procedimentos Para Inspeção De Soldas Com Radiografia Computadorizada Utilizando A Técnica Psvs*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

SIMÕES H. R., 2012, *Avaliação de Materiais usando a Radiografia Computadorizada (CR) Empregando um Acelerador Linear e Cobalto – 60 como Fontes de Alta Energia*. Dissertação de M.Sc., Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil.

SHINOHARA A. H., ACIOLI E., KHOURY H. J., 2002, “Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia”, 6º COTEQ, *Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos*, Salvador, Bahia, Brasil.

SHILTON, M. G., CChem MRSC. “Advanced, Second Generation Selenium-75 Gamma Radiography Sources”, AEA Technology QSA, Didcot, Oxon, Reino Unido.

SOARES, G. A., 2000, “Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia”, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

STEIN, M., KASYANOV, V. A., CHAKHLOV, V. L., *et al.*, 2004, “Small-Size Betatrons for Radiographic Inspection”, TPU, Tomsk, Russia; JME Ltd., Lowestoft, UK.

TAKAHASHI, K., 2002, “Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX:Eu<sup>2+</sup> (X = Cl, Br, I) and Imaging Plates”, *Journal of Luminescence*, Japan, v 100, p. 307-315.

VAIDYA P. P., 2010, “Flat Panel Detector in Industria Radiographi”, Head Quality Control Section, Quality Assurance Division Bhabha, Atomic Research Centre, Bombay – 400 085, India.

VARIAN Associates Inc., 1980, Radiation Division, *LINATRON -200 / 400 / 2000 Maintenance Course*, Calif., USA, p19-23.

VARIAN, 2010; “High Energy X-Ray Application” – Varian Radiation Divison.

VARIAN SYSTEM, 2010, DDA Digital Imaging, Disponível em: <https://www.varian.com/x-ray-imaging-components/products/medical-imaging/digital-detectors>, Acesso em: 30 Setembro. 2016, 20:10:35.