

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Heleno Ribeiro Simões

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS USANDO A
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)
EMPREGANDO UM ACELERADOR LINEAR E
COBALTO – 60 COMO FONTES DE ALTAS
ENERGIAS**

TAUBATÉ – SP

2012

Heleno Ribeiro Simões

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS USANDO A
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)
EMPREGANDO UM ACELERADOR LINEAR E
COBALTO – 60 COMO FONTES DE ALTAS
ENERGIAS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara.

TAUBATÉ – SP

2012

Heleno Ribeiro Simões

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS USANDO A
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR) EMPREGANDO
UM ACELERADOR LINEAR E COBALTO – 60 COMO
FONTES DE ALTAS ENERGIAS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação.

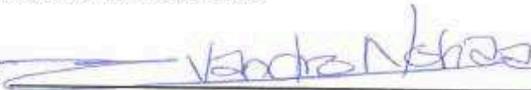
Data: 15/12/2012

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Dr. Aluísio Pinto da Silva

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Dr. Edson Vasques Moreira

Assinatura: 

*Aos meus filhos Ricardo, Rodrigo e Renato e
de modo especial a minha esposa de onde veio o
maior apoio em todas as horas e principalmente grande
incentivadora para conclusão deste mestrado, Ivone.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter-me dado forças para o término deste trabalho e por tudo em minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação da Universidade de Taubaté, pelos conhecimentos técnico-científicos ministrados e, em particular, ao Dr. Evandro Luis Nohara, orientação, compreensão, disponibilidade, amizade e pelo apoio e contribuições relevantes para a realização deste trabalho.

A Confab Industrial S.A – Equipamentos, na pessoa do Engenheiro Wagner Ribeiro Silva, pela ajuda durante sua gestão nesta atualização e ampliação do conhecimento técnico.

Aos professores doutores Ricardo Tadeu Lopes e Davi Ferreira de Oliveira da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo grande apoio e contribuições científicas e significativas para a realização deste trabalho.

Às instituições Cecal Indústria e Comércio Ltda, Arctest Serviços Técnicos de Inspeção e Manutenção Industrial Ltda e a Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A – Nuclep, pela grande colaboração.

Aos professores Doutores Ana Paula Rossifini Alves, Carlos Alberto Chaves, Eduardo Norberto Codaro, José Rubens de Camargo, Anselmo Monteiro Ilkiu, Durval Rodrigues Junior, Gilberto Walter Arenas Miranda, Eveline Mattos Tápias Oliveira e Marcos Valério Ribeiro, que compartilharam seu conhecimento.

A secretária da pós-graduação Senhora Helena Barros Fiorio por seu atendimento e colaboração incansável com todos os mestrandos.

Resumo

AVALIAÇÃO DE MATERIAIS USANDO A RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR) EMPREGANDO UM ACELERADOR LINEAR E COBALTO – 60 COMO FONTES DE ALTAS ENERGIAS

Nas construções de caldeiras de força, vasos de pressão e outros tipos de equipamentos para os diversos segmentos industriais têm exigido da engenharia de materiais um desenvolvimento tecnológico para melhores processos na obtenção de materiais fundidos, forjados, laminados, e outros. Desenvolver recursos tecnológicos que minimizem a presença de imperfeições que possam comprometer a integridade estrutural dos equipamentos que operam com pressão tem sido uma busca constante tanto nas usinas como nas indústrias de bens de capital nas fases das construções. Uma construção implica em seleção de materiais, projeto, fabricação, exames, inspeção, testes, certificação e dispositivos de alívio que atendam aos requisitos dos códigos e normas. Estes requisitos estão cada vez maiores e estabelecem limites para a existência destas imperfeições vão de encontro à necessidade de lançar mão de métodos de ensaios não destrutivos que permitam sempre a melhor probabilidade de detecção. Os processos de controle da qualidade têm buscado por meio das novas tecnologias aumentarem a sua sensibilidade, visando à detecção de descontinuidades que hoje são detectadas pelos métodos convencionais. Em termos de ensaios não destrutivos, as exigências para o ensaio radiográfico convencional estão no limite da sensibilidade dos filmes radiográficos industriais disponíveis, além do compromisso de buscar um tempo de exposição menor ser sempre um fator importante a ser considerado na qualidade, segurança e produtividade tanto na fábrica como no campo. O objetivo deste trabalho foi estudar e avaliar a técnica de radiografia computadorizada (RC) em relação à radiografia convencional para inspeção dos materiais, utilizando os parâmetros de avaliação, tais como, relação sinal ruído, resolução espacial, ferramentas para detectabilidade, sensibilidade ao contraste e tons de cinza, que são aplicáveis nas avaliações de imagens digitais. Para a avaliação da técnica de radiografia industrial digital foi utilizado um corpo-de-prova fabricada pelo processo de fundição com espessura de 75 a 150 mm, com defeitos típicos do processo. O corpo-de-prova foi radiografado com a técnica convencional e digital. Na técnica convencional foram utilizados os filmes radiográficos industriais tipos I e II do ASTM E 1815, um acelerador linear Varian modelo Linatron 400 de 4 MeV e duas fontes de Cobalto-60 com atividades

diferentes. Na técnica computadorizada foram utilizados as mesmas fontes de radiação, uma placa de fósforo denominada IPX e um equipamento CR-50P ambos da GE IT. Pelos resultados obtidos pode-se verificar que a radiografia digital com os equipamentos avaliados, atende satisfatoriamente os códigos e normas que são utilizadas na avaliação de peças fundidas. A técnica mostrou-se mais qualitativa quando na avaliação das descontinuidades localizadas nas seções críticas, pois o sistema RC possibilita a utilização de ferramenta de perfil de linha que fornece os valores de nível de cinza ao longo de uma trajetória linear demarcada na área da imagem da descontinuidade. Com isto, mesmo em poucos experimentos e um único sistema de RC pode-se concluir que a técnica é bastante vantajosa na detecção de descontinuidades nos processos de fabricação e que atendeu tanto os requisitos do ASTM E 272 para o cobre ou o ASME Seção VIII Divisão 1, Apêndice 7 que referenciam os padrões radiográficos conforme as normas ASTM E-186 e ASTM E-280 para aços fundidos.

Palavras-chave: Radiografia Computadorizada (RC), peças fundidas, placas de fósforo, *Image Plate*, acelerador linear, fonte de Cobalto-60.

Abstract

EVALUATION OF MATERIALS USING COMPUTED RADIOGRAPHY (CR) EMPLOYING A LINEAR ACCELERATOR AND COBALT – 60 AS SOURCES OF HIGH ENERGY

In the constructions of power boilers, pressure vessels and other equipment for several industries has required the development of materials engineering technology for better processes in obtaining materials cast, forged, rolled, and others. Develop technological resources that minimize the presence of imperfections that could compromise the structural integrity of the equipment operating pressure has been a constant search both in plants and in capital goods industries phases of construction. A construction involves materials selection, design, fabrication, testing, inspection, testing, certification, and relief devices that meet the requirements of codes and standards. These requirements are increasing and establish limits for the existence of these imperfections go against the need to resort to non-destructive testing methods that enable always the best probability of detection. The processes of quality control have sought through new technologies increase their sensitivity in order to detect discontinuities of today are detected by conventional methods. In terms of non-destructive testing, requirements for conventional radiographic testing are at the limit of sensitivity of available industrial radiographic films, besides the commitment to seek a lower exposure time is always an important factor to be considered in quality, safety and productivity both in the factory and in the field. The aim of this work was to study and evaluate the technical radiography Computed (RC) compared to conventional radiography for inspection of materials, using evaluation parameters such as signal to noise ratio, spatial resolution, and tools for detectability, contrast sensitivity and grayscale, which apply in evaluations of digital images. For the evaluation of industrial radiography technique it was used a test specimen manufactured by the casting process with thickness from 75 to 150 mm, with typical defects in the process. The test specimen was X-rayed with the conventional and digital techniques. In the conventional technique were used industrial radiographic films types I and II to ASTM E 1815, a linear accelerator Varian model 400 Linatron 4 MeV and two cobalt-60 sources with different activities. In the technique computed were used the same radiation source, a phosphor plate IPX and an apparatus called CR-50P both GE IT. From the results it can be seen that with digital radiography equipment evaluated satisfactorily meets the codes and standards that are used in the evaluation of castings. The technique was more qualitative evaluation when the discontinuities located in critical sections for the system to use RC allows

tool profile line shows values of gray level along a linear path demarcated in the image area discontinuity. With this, even in a few experiments a single system and RC can be concluded that the technique is quite advantageous in the detection of discontinuities in the manufacturing processes and that both met the requirements of ASTM E 272 for copper or ASME Section VIII Division 1, Appendix 7 that reference radiographic patterns according to ASTM E-186 and ASTM E-280 for steel castings.

Key-words: Computed Radiography (CR), casting parts, phosphor plate, Image Plate, linear accelerator, Cobalt-60 source.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Seções críticas de bocais forjados de vasos de pressão | 23 |
| Figura 1.2 - Suporte de serpentina de fornos petroquímicos, produzidos por fundição com análise por meio de elementos finitos seções críticas da peça..... | 23 |
| Figura 2.1 - Interação fotoelétrica de um fóton incidente com um elétron orbital..... | 30 |
| Figura 2.2 - Ilustração do espalhamento Compton | 31 |
| Figura 2.3 - Ilustração da produção de pares..... | 32 |
| Figura 2.4 - Importância relativa dos efeitos..... | 32 |
| Figura 2.5 - Processo do método de ensaio radiográfico..... | 34 |
| Figura 2.6 - Esquema do filme radiográfico industrial..... | 35 |
| Figura 2.7 - (a) Emulsão não exposta (b) Emulsão exposta e revelada..... | 35 |
| Figura 2.8 - Contraste radiográfico - Exposição (220 kV, (B) 120 kV | 37 |
| Figura 2.9 - De A a F ilustram os princípios geométricos de formação da imagem | 39 |
| Figura 2.10 - Penumbra geométrica | 39 |
| Figura 2.11 - (a) Contraste; (b) Definição radiográfica..... | 40 |
| Figura 2.12 - Espectro em energia do radioisótopo Cobalto-60..... | 43 |
| Figura 2.13 - Esquema da Radiografia Computadorizada..... | 44 |
| Figura 2.14 - Espectro de fotoestímulo do BaFBr:Eu ²⁺ , linhas: (a) vermelha corresponde ao F centro baseado no Bromo, (b) preta é o espectro total e (c) azul é a diferença entre elas | 47 |
| Figura 2.15 - Diagrama de níveis de energia para o mecanismo de PSL no BaFBr:Eu..... | 48 |
| Figura 2.16 - Sistema da imagem de Fósforo de Armazenamento..... | 49 |
| Figura 2.17 - (a) Disposição de varredura do laser; (b) Processo de leitura do IP | 51 |
| Figura 2.18 - Ilustração do processo de formação da imagem computadorizada | 51 |
| Figura 2.19 - Elementos básicos de uma fotomultiplicadora | 52 |
| Figura 2.20 - Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza | 55 |
| Figura 2.21 - Processos de degradação da resolução espacial..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.22 - Estágios de formação do contraste da imagem..... | 58 |
| Figura 2.23 - Contraste obtido sem e com radiação espalhada | 59 |
| Figura 2.24 - Comportamento do contraste da imagem em função da radiação espalhada..... | 59 |
| Figura 2.25 - Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da RC..... | 61 |
| Figura 2.26 - Diagrama de seqüência do processo digital..... | 63 |
| Figura 2.27 - Operações pontuais na imagem digital | 66 |
| Figura 2.28 - Tonalidades na imagem digital..... | 67 |
| Figura 2.29 - Histograma de uma imagem monocromática | 67 |
| Figura 2.30 - Operações pontuais | 68 |
| Figura 2.31 - Composição das camadas do IP..... | 71 |
| Figura 2.32 - Gráfico de absorção em função da energia dos raios X..... | 73 |
| Figura 2.33 - Comparação da curva de sensibilidade entre os filmes radiográficos e IP..... | 74 |
| Figura 3.1 – Fluxograma geral da seqüência de etapas realizadas no presente trabalho..... | 80 |
| Figura 3.2 - Bloco refrigerado posicionado para ER, peso 460 kg, dimensões em mm | 83 |
| Figura 3.3 - Desenho do bloco refrigerado mostrando os detalhes das serpentinas..... | 84 |
| Figura 3.4 - Ensaio de PMI por meio de fluorescência de raios X..... | 85 |
| Figura 3.5 - Dados na tela do aparelho de uma amostra por meio do ensaio de PMI..... | 85 |
| Figura 3.6 - Aceleradores Varian - partes principais do modelo Linatron 400..... | 87 |
| Figura 3.7 - Configuração básica de acelerador com Magnetron e tubo acelerador | 88 |
| Figura 3.8 - (a) Magnetron (b) Corte seccional do Magnetron | 89 |
| Figura 3.9 - Diagrama básico de um modulador por Magnetron | 89 |
| Figura 3.10 - Características das energias dos aceleradores Linatron..... | 90 |
| Figura 3.11 - Irradiador da fonte de Co-60 com atividade 49,0 Ci. | 91 |
| Figura 3.12 - Filme Kodak e emulsão com a tecnologia Grão T | 92 |
| Figura 3.13 - Tela de chumbo: com o plástico de proteção e o papelão no verso..... | 93 |
| Figura 3.14 - Régua para cálculo do tempo de exposição para Co-60 e Ir-192 | 94 |
| Figura 3.15 - IQI de furo – ASTM E 1025 ou ASME SE-1025 | 95 |
| Figura 3.16 - IQIs de fio - (a) IQI de Cobre utilizado (b) ASTM E – 747 e (c) BS-EN 462-1.. | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.17 - Indicador de qualidade de fio duplo | 97 |
| Figura 3.18 - Manchas provocadas por respingos: (a) por revelador (b) por fixador | 98 |
| Figura 3.19 - Processadora automática Colenta INDX 43I..... | 99 |
| Figura 3.20 - Ilustrações do negatoscópio KOWOLUX 3 | 100 |
| Figura 3.21 - Densitômetro eletrônico digital Konica Minolta PDA - 100..... | 101 |
| Figura 3.22 - (a) Equipamento de RC GE CR50P (b) Estação de trabalho..... | 102 |
| Figura 3.23 - Bunker 1 da Confab - dimensões L 12,0 x C 21,0 x H 12,0 m..... | 103 |
| Figura 3.24 - Console onde são selecionados os parâmetros da exposição. | 104 |
| Figura 3.25 - Acelerador linear Varian modelo Linatron 400 da Confab.. | 105 |
| Figura 3.26 - Técnica de múltiplos filmes e vista composta.. | 106 |
| Figura 3.27 - Arranjo experimental para o ER com acelerador linear.. | 107 |
| Figura 3.28 - Cuidados e armazenamento do <i>Image Plate</i> no chassi..... | 108 |
| Figura 3.29 - (a) Bunker da Arctest, área de exposição de 3,0 x 3,0 m (b) Arranjo para ER.. | 110 |
| Figura 3.30 - Preparação para o ensaio com o Cobalto-60 nas instalações da Nuclep.. | 112 |
| Figura 3.31 - CP preparado para o ER com o Co-60 antes da usinagem dos ressaltos..... | 112 |
| Figura 3.32 - CP preparado para o ER com o Co-60 após da usinagem dos ressaltos..... | 113 |
| Figura 3.33 - Exemplo da imagem de porosidade..... | 116 |
| Figura 3.34 - Exemplo da imagem de rechupe do tipo esponja.. | 116 |
| Figura 3.35 - Exemplo da imagem de rechupe do tipo linear.. | 116 |
| Figura 3.36 - Exemplo da imagem de trinca de contração..... | 117 |
| Figura 3.37 - Exemplo da imagem inclusões de areia..... | 118 |
| Figura 3.38 - Suporte sem fundir..... | 118 |
| Figura 4.1 - Região de destaque no CP onde se concentram as descontinuidades para análise por meio do método de ensaio radiográfico | 120 |
| Figura 4.2 - Mostrando as variações de espessuras nas seções críticas do CP presentes nas áreas 1 e 2 da Figura 4.1 | 120 |
| Figura 4.3 - Imagem radiográfica da técnica convencional com a radiação X de 4 MeV mostrando as duas áreas destacadas e as descontinuidades detectadas | 121 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.4 - Imagem obtida com filme ASTM classe II (dimensões 355 x 430 mm) mostrando descontinuidades das seções de maiores espessuras..... | 123 |
| Figura 4.5 - Imagem obtida com filme ASTM classe I (dimensões 355 x 430 mm) mostrando descontinuidades das seções de menores espessuras..... | 123 |
| Figura 4.6 - Imagem obtida por radiografia industrial computadorizada com processamento matemático, IP (dimensões de 355 x 430 mm)..... | 124 |
| Figura 4.7 - Imagem radiográfica utilizando dois filmes ASTM classe II (técnica de vista composta)..... | 125 |
| Figura 4.8 - Imagem radiográfica utilizando um filme de classe II (técnica vista simples) | 126 |
| Figura 4.9 - Imagem da técnica RC utilizando fonte de Co-60 com 22,56 Ci de atividade..... | 127 |
| Figura 4.10 - Imagem obtida com filme ASTM classe II mostrando descontinuidades nas seções de menores espessuras (vista simples). | 128 |
| Figura 4.11 - Imagem obtida com dois filmes ASTM classe II mostrando descontinuidades nas seções de maiores espessuras (técnica vista composta)..... | 129 |
| Figura 4.12 - Imagem obtida com a técnica RC com processamento matemático, as áreas delimitadas em verde mostram a presença de artefatos..... | 129 |
| Figura 4.13 - Imagem da técnica RC com a radiação X do acelerador linear | 131 |
| Figura 4.14 - Gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 resultado dos traçados das linhas na imagem da Figura 4.13..... | 131 |
| Figura 4.15 - Imagem da técnica RC com fonte de Co-60 de 22,56 Ci da Arctest..... | 132 |
| Figura 4.16 - Gráficos do perfil de tons de cinza resultado dos traçados das linhas sobre as descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 da Figura 4.15..... | 132 |
| Figura 4.17 - Imagem da técnica RC com fonte de Co-60 de 49,00 Ci da Nuclep | 133 |
| Figura 4.18 - Gráficos do perfil de tons de cinza resultado dos traçados das linhas sobre as descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 da Figura 4.17..... | 133 |
| Figura 4.19 - Radiografia convencional da área 1 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem) | 134 |
| Figura 4.20 - RC da área 1 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem) | 134 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.21 - Radiografia convencional da área 2 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem) | 135 |
| Figura 4.22 - RC da área 2 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem) | 135 |
| Figura 4.23 - RC com radiação X do acelerador linear mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs..... | 136 |
| Figura 4.24 - RC com radiação gama da fonte de Co-60 de 22,56 Ci mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs | 137 |
| Figura 4.25 - RC com radiação gama da fonte de Co-60 de 49,00 Ci mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs | 137 |
| Figura 4.26 - Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 3: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci..... | 139 |
| Figura 4.27 - Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 4: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci..... | 140 |
| Figura 4.28 - Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 5: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci..... | 140 |
| Figura 4.29 - Gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades 13 e 14: (a) acelerador linear, (b) Co-60 atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 atividade 49,00Ci..... | 141 |
| Figura 4.30 - (a) Diagrama esquemático de alguns dos modos de energia da radiação X ou gama [26], (b) Radiação X ou gama secundários resultante do espalhamento no interior das serpentinas | 142 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 - Imperfeições x métodos de END | 28 |
| Tabela 2.2 - Valores máximos de penumbra..... | 39 |
| Tabela 2.3 - Resumo dos fatores que afetam a qualidade da imagem..... | 41 |
| Tabela 3.1 - Teores dos elementos de liga presentes no corpo-de-prova..... | 86 |
| Tabela 3.2 - Dados do acelerador linear Linac modelo Linatron 400..... | 87 |
| Tabela 3.3 - Dados característicos e operacionais do acelerador | 88 |
| Tabela 3.4 - Características das fontes de Cobalto-60 | 91 |
| Tabela 3.5 - Classificação dos filmes radiográficos industriais utilizados..... | 92 |
| Tabela 3.6 - Dados do indicador de fio duplo de acordo com normas, dimensões em mm..... | 97 |
| Tabela 3.7 - Dados do negatoscópio KOWOLUX 3..... | 100 |
| Tabela 3.8 - Dados do densitômetro digital Konica Minolta PDA – 100 | 101 |
| Tabela 3.9 - Dose e tempos das exposições, acelerador linear, DFD de 2000mm..... | 106 |
| Tabela 3.10 - Dose e tempos das exposições, fonte Co-60 com 22,56 Ci, DFD de 1000mm . | 111 |
| Tabela 3.11 - Dose e tempos das exposições, fonte Co-60 com 49,00 Ci, DFD de 1000mm . | 113 |
| Tabela 3.12 - Comparação entre as descontinuidades Trinca de Contração e Rechupe Linear | 117 |
| Tabela 4.1 - Variação de espessura e seleção do IQI conforme ASME Seção V | 121 |
| Tabela 4.2 - Valores de SNR_N com radiação X e gama nas imagens da RC | 138 |
| Tabela 4.3 - Espessuras correspondentes entre cobre e aço e seleção do IQI..... | 143 |
| Tabela 4.4 - CSR para as energias das fontes de radiação utilizadas..... | 144 |
| Tabela 4.5 - Fatores radiográficos aproximados de equivalência para o cobre em relação ao aço nas fontes de altas energias..... | 145 |
| Tabela 4.6 - Valores de CSR empregando os fatores da Tabela 4.5 | 145 |
| Tabela 4.7 - Valores das distâncias mínimas foco-detector calculados – DFD | 146 |
| Tabela 4.8 - Resumo dos resultados na detectabilidade das descontinuidades..... | 147 |
| Tabela 4.9 - Dados dos perfis de tons de cinza das descontinuidades | 149 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|--|
| ABENDI | Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeções |
| API | <i>American Petroleum Institute</i> |
| ASME | <i>American Society of Mechanical Engineers</i> |
| ASTM | <i>American Society of Testing Materials</i> |
| BAM | <i>Federal Institute for Materials Research and Testing</i> |
| CEBRACO | Centro Brasileiro de Informação do Cobre. |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| Confab | Confab Industrial S.A – Equipamentos |
| COPPE | Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia |
| CP | Corpo-de-prova |
| CSR | Camada Semi-redutora |
| DFE | Distância Foco Filme |
| DFO | Distância da fonte-objeto |
| DFD | Distância fonte-detector |
| DIN | <i>German Institute for Standardization</i> |
| DQE | <i>Detective Quantum Efficiency</i> |
| EA | Ensaio por Emissão Acústica (Método de END) |
| EN | <i>European Normalization</i> |
| ER | Ensaio Radiográfico (Método de END) |
| EBC | <i>Electronic Beam Cured</i> |
| ECP | Ensaio por Correntes Parasitas (Método de END) |
| END | Ensaios não destrutivos ou Exames não destrutivos |
| ESR | <i>Electron Spin Resonance</i> |
| F | Tamanho da fonte |
| GEIT | <i>General Electric Inspection Technology</i> |
| H&D | <i>Hunter & Driffield</i> |
| HVL | <i>Half-Value Layer</i> ou CSR |
| IIW | <i>International Institute of Welding</i> |

| | |
|-------------|--|
| IP | <i>Image Plate</i> |
| IQI | Indicador de Qualidade de Imagem |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| NIST | <i>National Institute of Standards and Technology</i> |
| MTF | <i>Modulation Transfer Function</i> |
| PACS | <i>Picture Archiving and Communications System</i> |
| PSL | <i>Photoestimulable Luminescence</i> |
| PSP | <i>Photoestimulable Phosphor</i> |
| PET | <i>Polyethylene Terephthalate</i> |
| Pg | Penumbra geométrica |
| PMI | <i>Positive Material Identification</i> |
| PMT | Fotomultiplicadora |
| PM | Ensaio por Partículas Magnéticas (Método de END) |
| POD | <i>Probability Of Detection</i> |
| PSVS | Técnica Radiográfica de Parede Simples – Vista Simples |
| RAD | <i>Radiation Absorber Dose</i> |
| RC | Radiografia Computadorizada |
| RD | Radiografia Digital |
| ROI | <i>Region Of Interest</i> |
| RP | <i>Recommended Practice</i> |
| SNQC | Sistema Nacional de Qualificação e Certificação |
| SFD | <i>Source to Film Distance</i> |
| SRb | Resolução Básica Espacial |
| SNR | Relação Sinal Ruído |
| TLD | Dosímetro termoluminescente |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 | 22 |
| INTRODUÇÃO | 22 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA | 22 |
| 1.1.1 Considerações iniciais | 22 |
| 1.1.2 O problema | 23 |
| 1.2 OBJETIVOS | 24 |
| 1.2.1 A proposta da pesquisa | 24 |
| 1.2.2 Justificativa e relevância | 24 |
| 1.2.3 Organização do trabalho | 26 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | 27 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1 MÉTODO DE ENSAIO RADIOGRÁFICO | 27 |
| 2.2 EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA..... | 29 |
| 2.2.1 Categorias da absorção da radiação | 29 |
| 2.2.2 Absorção de fótons | 29 |
| 2.2.3 Efeito fotoelétrico ou Efeito Thompson | 29 |
| 2.2.4 Efeito Compton ou espalhamento Compton (ou incoerente) | 30 |
| 2.2.5 Produção de pares | 31 |
| 2.2.6 Importância relativa dos efeitos: fotoelétrico, Compton e produção de pares | 32 |
| 2.2.7 Princípios físicos que regem a formação da imagem radiográfica | 33 |
| 2.3 ENSAIO RADIOGRÁFICO CONVENCIONAL | 34 |
| 2.3.1 Filme radiográfico industrial | 34 |
| 2.3.2 Propriedades da imagem radiográfica convencional | 36 |
| 2.3.2.1 Densidade | 36 |
| 2.3.2.2 Contraste radiográfico | 36 |
| 2.3.2.3 Definição radiográfica..... | 38 |
| 2.3.2.3.1 <i>Penumbra radiográfica</i> | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.3.3 Sensibilidade radiográfica | 40 |
| 2.3.3.1 Sensibilidade | 40 |
| 2.4 TERMO FONTE | 42 |
| 2.4.1 Radiação X | 42 |
| 2.4.2 Radiação gama (Gamagrafia) | 42 |
| 2.4.2.1 Seleção de fonte radioativa | 42 |
| 2.5 RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)..... | 43 |
| 2.5.1 A história do detector <i>Imagem Plate</i> | 44 |
| 2.5.2 Mecanismo de emissão de luminescência | 46 |
| 2.5.3 Processo de aquisição da imagem | 48 |
| 2.5.3.1 Leitor de radiografia computadorizada | 48 |
| 2.5.3.1.1 <i>A leitura do Image Plate</i> | 49 |
| 2.5.3.1.2 <i>Detecção e conversão do sinal fotoestimulado</i> | 52 |
| 2.5.3.1.3 <i>Digitalização do sinal fotoestimulado</i> | 53 |
| 2.5.3.2 Imagem radiográfica digital | 54 |
| 2.5.3.3 Qualidade da imagem digital | 55 |
| 2.5.3.3.1 <i>Resolução Espacial</i> | 55 |
| 2.5.3.3.2 <i>Resolução em Contraste</i> | 57 |
| 2.5.3.3.3 <i>Fatores que afetam o contraste</i> | 59 |
| 2.5.3.3.4 <i>Ruídos</i> | 60 |
| 2.5.3.3.5 <i>Aliasing</i> | 62 |
| 2.5.3.3.6 <i>DQE – Eficiência de Detecção de Quanta</i> | 62 |
| 2.5.3.3.7 <i>Desvanecimento da Imagem (Fading)</i> | 62 |
| 2.5.4 Processamento da imagem digital | 63 |
| 2.5.4.1 Restauração/Realce | 64 |
| 2.5.4.2 Segmentação..... | 64 |
| 2.5.4.3 Extração de Atributos..... | 65 |
| 2.5.4.4 Classificação..... | 65 |
| 2.5.4.5 Operações Pontuais | 66 |
| 2.5.4.6 Operações Locais | 68 |
| 2.5.4.7 Operações Globais..... | 69 |
| 2.5.4.8 Programa | 69 |
| 2.5.4.9 Processamento em Contraste..... | 70 |

| | | |
|----------------------------|---|------------|
| 2.5.4.10 | Processamento em Frequência | 70 |
| 2.5.5 | Característica do <i>Imagem Plate</i> | 71 |
| 2.5.5.1 | Estrutura física do <i>Imagem Plate</i> | 71 |
| 2.5.5.2 | Eficiência de absorção de raios X no <i>Imagem Plate</i> | 72 |
| 2.5.5.3 | Curva de Sensibilidade..... | 74 |
| 2.5.6 | Vantagens/desvantagem da Radiografia Computadorizada em comparação com Radiografia Convencional..... | 75 |
| 2.5.6.1 | Detector | 75 |
| 2.5.6.2 | Obtenção, Processamento, Quantificação e Arquivamento das Imagens | 76 |
| 2.5.7 | Sistemas de aquisição da imagem digital | 77 |
| CAPÍTULO 3 | | 79 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | | 79 |
| 3.1 | PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL..... | 79 |
| 3.2 | MATERIAIS E INSTRUMENTOS | 81 |
| 3.2.1 | O corpo-de-prova de cobre e o processo de fundição | 81 |
| 3.2.2 | Equipamento de raios X – acelerador linear | 87 |
| 3.2.2.1 | Fontes de Microondas (Magnetron) | 88 |
| 3.2.2.2 | Planicidade e cobertura do campo de radiação | 90 |
| 3.2.3 | Equipamento de raios gama – Cobalto-60 | 90 |
| 3.2.4 | Filmes radiográficos industriais..... | 91 |
| 3.2.5 | Telas intensificadoras de chumbo | 92 |
| 3.2.6 | Cálculo do tempo de exposição para fontes de Co-60..... | 93 |
| 3.2.7 | Indicadores de qualidade de imagem – IQI | 94 |
| 3.2.7.1 | IQI de furo | 94 |
| 3.2.7.2 | IQI de arame..... | 95 |
| 3.2.8 | Indicadores de qualidade de imagem para resolução espacial | 96 |
| 3.2.9 | Processamento de filmes radiográficos industriais | 97 |
| 3.2.9.1 | Processamento automático de filmes radiográficos | 98 |
| 3.2.10 | Negatoscópio | 99 |
| 3.2.11 | Medidores de densidade de filmes radiográficos industriais | 100 |
| 3.2.12 | Placas de fósforo – <i>Imagem Plate</i> (IP) | 101 |
| 3.2.13 | Leitora ou escâner | 101 |
| 3.2.14 | Estação de trabalho | 102 |

| | | |
|-------------------------------|---|------------|
| 3.2.15 | Programas de processamento de imagem digital | 103 |
| 3.3 | ENSAIOS REALIZADOS NA CONFAB EQUIPAMENTOS | 103 |
| 3.3.1 | Acelerador linear | 104 |
| 3.3.2 | Outros equipamentos/instrumentos e acessórios..... | 105 |
| 3.3.3 | Aquisição e processamento das imagens dos filmes | 105 |
| 3.3.4 | Equipamento de Radiografia Computadorizada (RC)..... | 107 |
| 3.3.4.1 | Aquisição e processamento das imagens da RC | 108 |
| 3.3.4.1.1 | <i>Placas de Fósforo.....</i> | <i>108</i> |
| 3.3.4.1.2 | <i>O processamento da Imagem da RC</i> | <i>109</i> |
| 3.3.4.1.3 | <i>As condições para o laudo da RC</i> | <i>109</i> |
| 3.4 | ENSAIOS REALIZADOS COM FONTE DE Co-60 DE 22, 56 Ci..... | 110 |
| 3.4.1 | Fonte de Cobalto-60 | 110 |
| 3.4.2 | Detetores para a técnica convencional e digital..... | 111 |
| 3.4.3 | Indicadores de qualidade de imagem | 111 |
| 3.5 | ENSAIOS REALIZADOS COM FONTE DE Co-60 DE 49 Ci..... | 112 |
| 3.6 | AVALIAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES NAS IMAGENS RADIOGRAFICAS | 114 |
| 3.6.1 | Interpretação das imagens..... | 114 |
| 3.6.2 | Descontinuidades presentes em peças fundidas de cobre..... | 115 |
| | | |
| CAPÍTULO 4 | | 119 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | | 119 |
| 4.1 | CARACTERÍSTICAS DO CORPO-DE-PROVA DE MATERIAL COBRE..... | 119 |
| 4.2 | ENSAIOS COM A RADIAÇÃO X – ENERGIA DE 4 MeV | 122 |
| 4.3 | ENSAIOS COM RADIAÇÃO GAMA – FONTE DE COBALTO-60 COM ATIVIDADE DE 22,56 Ci..... | 125 |
| 4.4 | ENSAIOS COM RADIAÇÃO GAMA – FONTE DE COBALTO-60 COM ATIVIDADE DE 49,00 Ci..... | 127 |
| 4.5 | COMPARANDO OS ENSAIOS COM A RADIAÇÃO X DE 4 MeV E A GAMA DAS FONTES DE Co-60 DE 22,56 E 49,00 Ci..... | 130 |
| 4.5.1 | Avaliações das áreas 1 e 2 do CP por meio das fontes de radiação X/gama | 134 |
| 4.5.2 | Utilização dos recursos da técnica de RC – Resolução Espacial Básica..... | 135 |
| 4.5.3 | Utilização dos recursos da técnica de RC – Perfis de Linha | 138 |
| 4.6 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 142 |

| | |
|--|-----|
| 4.6.1 Quanto ao material cobre do bloco refrigerador | 142 |
| 4.6.2 Quanto às energias das fontes utilizadas..... | 144 |
| 4.6.3 Quanto à radiação espalhada | 145 |
| 4.6.4 Quanto aos fatores geométricos: dimensão focal, distância fonte-detector (dfd), distância objeto-detector (dod)..... | 146 |
| 4.6.5 Quanto aos dados dos ensaios realizados com as três fontes e as duas técnicas relatados na Tabela 4.7 | 147 |
| 4.6.6 Quanto aos dados dos gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades de número 3, 4, 5, 13 e 14 relatados na Tabela 4.8 | 149 |
| | |
| CAPÍTULO 5 | 151 |
| CONCLUSÕES | 151 |
| | |
| CAPÍTULO 6 | 154 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 154 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 155 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÕES DO PROBLEMA

1.1.1 Considerações iniciais

Nas fases das construções de caldeiras de força, vasos de pressão e outros equipamentos para os segmentos industriais, a inspeção da integridade estrutural durante as etapas é possível devido ao uso de métodos de END, em especial por meio do método radiográfico com a técnica de radiografia industrial. A radiografia industrial deste seu início vem utilizando a radiação ionizante por meio de um equipamento de raios X ou uma fonte de radiação gama. Como detector um filme radiográfico industrial bidimensional, capaz de definir uma imagem devido às atenuações da radiação provocadas pela variação de espessura e densidades dos materiais e peças apresentados para o ensaio radiográfico.

Nos últimos anos, graças à contribuição da tecnologia computacional tem mudado as práticas de quase todas as atividades, das científicas às de negócio, educação e formação profissional, até as empresariais. O conteúdo e práticas proporcionadas por essa tecnologia começam a seguir essa tendência de mudança na execução e nos resultados dos END em todos os segmentos industriais e área médica, contribuindo para uma melhor probabilidade de detecção – POD [1]. Acompanhando essa evolução temos o advento de outros tipos de detectores e a radiografia industrial vem passando gradativamente por uma transição da técnica convencional ou analógica para a digital. Esta última tem se mostrado muito atrativa, proporcionando condições operacionais facilitadas que não era possível com as técnicas analógicas. Nos dias de hoje vem acontecendo o avanço da radiografia digital e sua substituição a radiografia convencional vem se tornando uma realidade [2]. Atualmente existem diversos tipos de sistemas para aquisição da imagem digital, como, por exemplo, a Radiografia Computadorizada (RC).

1.1.2 O problema

Os filmes radiográficos, devido a sua baixa faixa dinâmica, são capazes de formar imagem apenas dentro de certa escala de densidade ótica. Porém, nem sempre todas as discontinuidades podem ser detectadas, principalmente em peças de geometrias complexas e com seções críticas e/ou com mudanças abruptas [3] (Figuras 1.1 e 1.2) como ocorrem nas peças fundidas e forjadas. Para estas situações tem-se empregado técnicas radiográficas por meio de filmes de sensibilidades diferentes para detectar as discontinuidades e atender as normas de construção.

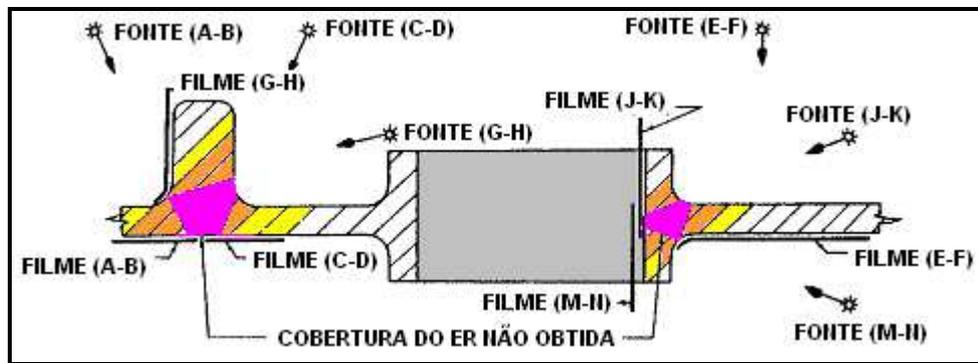


Figura 1.1 – Seções críticas de bocais forjados de vasos de pressão [3].

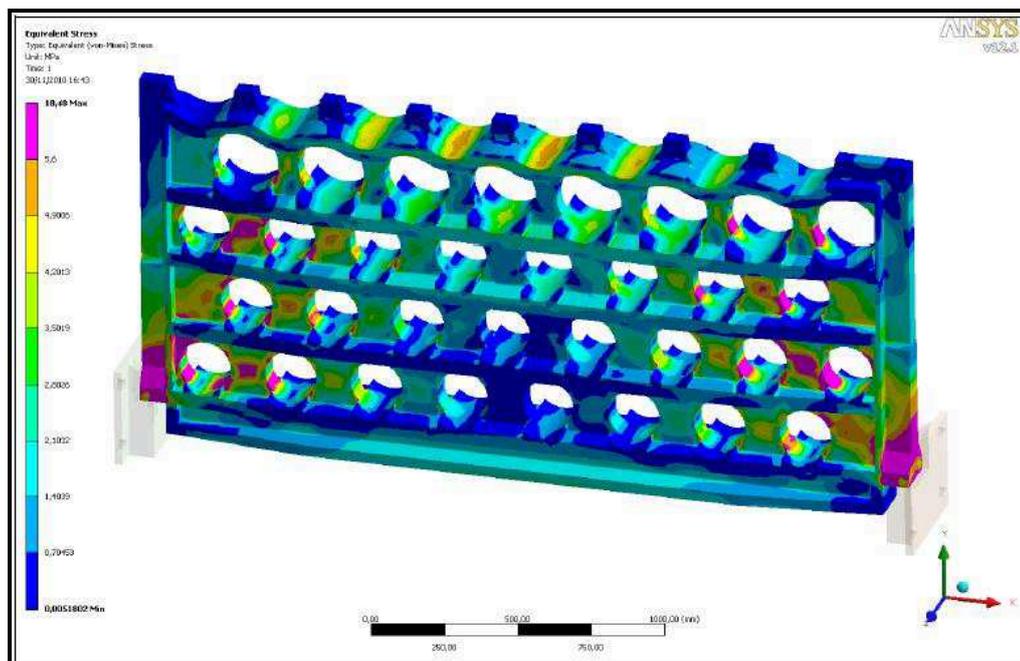


Figura 1.2 – Suporte de serpentina de fornos petroquímicos, produzidos por fundição com análise por meio de elementos finitos seções críticas da peça [3].

Outra possibilidade é empregar as técnicas de múltiplos filmes e vista composta com o uso de múltiplos filmes [4, 5]. Nesta técnica, o ensaio radiográfico é realizado utilizando dois ou mais filmes de mesmas ou diferentes sensibilidades e expostos juntos no mesmo cassete. Os filmes são laudados individualmente para avaliar as menores espessuras e quando sobrepostos são laudados para se ter a vista composta nas maiores espessuras e seções críticas. A técnica requer um inspetor com boa experiência para laudar as imagens, qualificado e certificado pelo SNQC – ABENDI.

Seções críticas em fundidos estáticos são as seções onde as imperfeições são geralmente encontradas nas mudanças bruscas de seção e nas junções de *risers*, portas, ou alimentadores para o fundido. Para a fundição centrífuga, seções críticas devem ser interpretadas como todas as mudanças bruscas de secção, a circunferência por uma distância de, pelo menos, 3 polegadas (75 mm) a partir de cada extremidade, e uma banda circunferencial adicional, pelo menos, 3 polegadas (75 mm) de largura e incluindo a área de indicação a mais severa detectada por métodos de outros exames [3].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 A proposta da pesquisa

A partir da problemática mencionada na seção anterior, surgiu à proposta de analisar com maior propriedade quais ganhos podem ser obtidos na radiografia industrial de peças fundidas utilizando altas energias com a utilização da RC, a partir da energia de fonte para radiografia industrial de Cobalto – 60 [2].

1.2.2 Justificativa e relevância

É relevante enfatizar a importância do presente trabalho, pois há situações em que a técnica de radiografia industrial para altas espessuras necessita de altas energias para a obtenção de uma imagem radiográfica. Estas energias são pouco empregadas quando se trata de radiografia computadorizada (RC). Nos processos de fabricação de fundição, por exemplo, existe a necessidade de buscar a substituição da radiografia convencional com o emprego da radiografia computadorizada (RC) que utiliza as placas de fósforo como detectores para a formação da imagem latente.

A RC foi inicialmente desenvolvida e utilizada somente na área médica, mas recentemente vem gradativamente ganhando seu espaço na área industrial [2]. Esse sistema possui diversas vantagens em relação à técnica convencional, especialmente para o exame de peças fundidas, forjadas, soldas, detecção de corrosão e avaliação de mecanismos de danos em tubulações [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Outras possíveis vantagens é obter em algumas situações a redução do tempo de exposição, conseqüentemente podem ser reduzidos os raios de balizamento nos serviços de radiografia industrial que realizam serviços em diversas localidades incluindo recintos blindados – *bunkers* – e operações em campo, em áreas urbanas ou regiões remotas e desabitadas do País. No Brasil apenas 2% das fontes para gamagrafia existentes são de Co-60, devido à alta energia desta fonte os ensaios são realizados na grande maioria em *bunkers* [16]. Segundo Aquino (2009), para os cálculos do tempo de exposição da radiografia computadorizada (CR), tomando-se como base o tempo de exposição da radiografia convencional, utilizando-se filmes ASTM classe II. O tempo é reduzido em 20 vezes. Com base nos dados coletados nos experimentos com TLD, pode-se afirmar que a técnica RC reduz significativamente os raios de balizamento de áreas e custos, com conseqüente melhoria da proteção radiológica e da segurança [16, 17]. Nestas condições são atendidas plenamente as normas CNEN [18, 19].

Para avaliar a influência das altas energias de radiação na formação das imagens foi utilizado um acelerador linear de 4 MeV e duas fontes do radioisótopo Cobalto-60 com atividades diferentes. Foi avaliada a capacidade do sistema RC em detectar as discontinuidades presentes nas seções críticas do CP fabricado em cobre por meio de fundição, a estabilidade dimensional e o posicionamento das serpentinas no seu interior, observando as vantagens da utilização da técnica.

A relevância deste trabalho foi avaliar o emprego da técnica RC na detecção de discontinuidades localizadas em seções críticas [3], utilizando para o laudo as diversas ferramentas de processamento e análises disponíveis para as imagens digitais para a visibilidade de falhas empregando os parâmetros essenciais para a sensibilidade ao contraste: sensibilidade radiográfica (IQI's), relação sinal-ruído normalizado (SNRn), resolução básica espacial (SRb) e o contraste específico com os resultados obtidos com a técnica de radiografia convencional [2, 20].

1.2.3 Organização do trabalho

A dissertação está organizada em seis capítulos. A seguir uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo:

No **capítulo 2** introduziu-se a fundamentação teórica para aplicação do método END – Ensaio Radiográfico nas técnicas convencionais e computadorizadas, compreensão da radiação e absorção de fótons, os efeitos da radiação eletromagnética com a matéria, as radiações X e gama. Uma abordagem da radiografia computadorizada, a história e origem do fósforo utilizado na composição do *Image Plate*, estrutura e funcionamento do IP e a unidade leitora. Além disso, comentou-se como é o processamento da imagem e a metodologia para gerenciar qualidade e resolução.

No **capítulo 3** são descritos os procedimentos experimentais, descreve os materiais, instrumentos, métodos e técnicas empregadas para a obtenção dos dados, o corpo-de-prova de cobre, formas de energias aplicadas de raios X por meio de um acelerador linear e gama de fontes radiativas de Cobalto-60. Os ensaios realizados com as três fontes e em três instalações radiativas diferentes.

No **capítulo 4** expõem-se os dados obtidos, analisados pelos métodos e técnicas propostas e a discussão dos resultados.

No **capítulo 5** concluíram-se os resultados viabilizados pelos ensaios radiográficos executados com as duas técnicas radiográficas.

No **capítulo 6** a pesquisa apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros em prol de desenvolvimento ainda maior da técnica de radiografia industrial computadorizada por meio de placas de fósforo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MÉTODO DE ENSAIO RADIOGRÁFICO

A radiografia industrial é um método de END que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo examinada. 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 seções de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante [21]. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada por meio de um filme, ou um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. Essa variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um meio, irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma descontinuidade interna. Quando esta ultrapassar os limites do critério de aceitação de um código ou norma de construção é considerado um *defeito* no material e a peça deve ser recusada ou reparada se a norma permitir [3, 12, 13, 14].

A Tabela 2.1 extraída da *Subsection A, Article 1 Nonmandatory Appendix* da Seção V do Código ASME faz referência as imperfeições presentes nos materiais soldados, fundidos, forjados, laminados, barras, tubos e outros e aos métodos de END aplicáveis, bem como o desempenho de cada método de END na detecção. Destaca-se que o método radiográfico por meio de radiografia industrial convencional é o mais efetivo na avaliação volumétrica destes materiais [5].

A radiografia industrial tem sido gradativamente desenvolvida com uso da tecnologia digital. A RC faz uso de detectores bidimensionais denominados *IP (Image Plate)*, esses possuem uma série de características próprias, tais como: altíssima sensibilidade em relação aos filmes radiográficos industriais para os raios X e gama, maior faixa dinâmica, linearidade superior, boa resolução espacial, obtenção de imagens digitais diretamente da leitora permitindo um posterior processamento computacional das imagens [22].

Tabela 2.1 – Imperfeições x métodos de END [5]

| <i>Métodos de END</i> | <i>Superficiais</i> | | <i>Sub-superficiais</i> | | <i>Volumétricos</i> | | |
|----------------------------------|---------------------|----|-------------------------|-----|---------------------|----|----|
| | Visual | LP | PM | ECP | ER | US | EA |
| Imperfeições na soldagem | | | | | | | |
| Perfuração | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| Trincas | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Reforço excessivo | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| Inclusões (escória/tungstênio) | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| Fusão incompleta | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Penetração Incompleta | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| Desalinhamento | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| Sobreposição | 2 | 3 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Porosidade | 3 | 3 | 1 | 0 | 3 | 2 | 1 |
| Concavidade na raiz | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 |
| Mordedura | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| Imperfeições em produtos | | | | | | | |
| Arrebento/ruptura (Forjados) | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Gota fria (Fundidos) | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| Trincas (em todos os produtos) | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Trincas de contração (Fundidos) | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Inclusões (em todos os produtos) | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| Laminação (chapa, tubo) | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Dobras (forjados) | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| Porosidade (fundidos) | 3 | 3 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 |
| Costuras (barra, tubo) | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 |

Legenda Tabela 1:

3 – Alta efetividade: todas ou a maioria das técnicas padrões detectará esta imperfeição sob todas ou a maioria das condições;

2 – Média efetividade: uma ou mais técnicas padrões detectarão esta imperfeição, sob certas condições;

1 – Baixa efetividade: técnicas especiais, condições e/ou qualificações de pessoal são exigidas para detectar esta imperfeição;

0 – Método de END não aplicável.

2.2. EFEITOS DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

Sabe-se que um feixe de raios X ou gama, ao interagir com qualquer material, sofre variação em sua intensidade, motivada por uma série de fenômenos físicos que ocorrem simultaneamente, cada qual com sua própria probabilidade. Os fenômenos que ocorrem entre a radiação eletromagnética e a matéria podem ser de absorção, espalhamento coerente ou incoerente e transmissão sem interação. Sendo esses fenômenos relacionados com a nuvem eletrônica, o núcleo ou o campo coulombiano do átomo da matéria a interagir [23].

2.2.1. Categorias da absorção da radiação

A absorção da radiação pode ser separada em duas categorias: a *absorção de fótons* e a *absorção de partículas carregadas*. Embora uma terceira categoria, a das *partículas neutras*, tais como o nêutron é importante em física, tem até o momento pouca aplicação nos exames não destrutivos [23].

2.2.2. Absorção de fótons

A *absorção de fótons* tem desempenhado o papel mais importante nos END. Um feixe de raios X ou gama apresenta uma absorção exponencial característica de sua passagem através da matéria. Esta é uma consequência do fato de que, geralmente, um fóton é removido do feixe por um único evento, resultado da interação do fóton com o núcleo ou um elétron orbital do elemento absorvente e pode ser classificado como um dos três tipos predominantes: o *efeito fotoelétrico*, *espalhamento Compton* e *produção de pares* [23].

2.2.3. Efeito fotoelétrico ou efeito Thompson

O *efeito fotoelétrico* ou *efeito Thompson*, conhecido também como *conversão interna* é definido como o processo de um fóton de energia; E_γ transfere sua energia total para um elétron em alguma camada de um átomo Figura 2.1. Esta energia pode ser apenas suficiente para mover o elétron de uma camada para outra, ou pode ser suficiente para remover o elétron completamente, isto é, para ionizar o átomo. Neste último caso, a energia cinética do elétron ejetado é apenas a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação deste elétron particular no átomo. Neste efeito, a radiação X ou gama transfere toda sua energia a um único

elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética E_c bem definida, dada pela equação (2.1).

$$E_c = h\nu - B_e \quad (2.1)$$

Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e B_e é a energia de ligação do elétron orbital.

A direção de saída do fotoelétron em relação à de incidência do fóton varia com a energia. Para altas energias (acima de 3 MeV), a probabilidade de o elétron sair na direção e sentido do fóton é alta, para baixas energias (abaixo de 20 keV) a maior probabilidade é a de sair com um ângulo de 70° . Isto devido à ação dos campos elétricos e magnético que, variando na direção perpendicular à de propagação do fóton, exercem força sobre o elétron na direção de 90° , e se compõe com o momento angular do elétron [24].

O efeito fotoelétrico é predominante para baixas energias e para elementos químicos de elevado número atômicos Z . A probabilidade de ocorrência aumenta com Z^4 e decresce rapidamente com o aumento da energia [24].

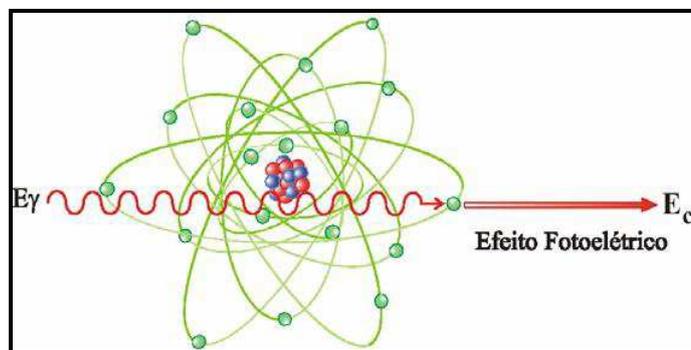


Figura 2.1 – Interação fotoelétrica de um fóton incidente com um elétron orbital [24].

2.2.4. Efeito Compton ou espalhamento Compton (ou incoerente)

No efeito Compton, o fóton é espalhado por um elétron de baixa energia de ligação, que recebe somente parte de sua energia, continuando sua sobrevivência dentro do material em outra direção. Como a transferência de energia depende da direção do elétron emergente e esta é aleatória, de um fóton de energia fixa podem resultar elétrons com energia variável, com valores de zero até um valor máximo. Assim, a informação associada ao elétron

emergente é desinteressante sob o ponto de vista da detecção da energia do fóton incidente. Sua distribuição no espectro de contagem é aleatória, aproximadamente retangular. Na Figura 2.2 é mostrada a ilustração deste fenômeno.

No efeito Compton um fóton colide com um elétron. Ao invés de ceder toda sua energia para o elétron como no efeito fotoelétrico, contudo, as ações de fótons apenas a sua energia com o elétron atingido. A energia de ligação do elétron é normalmente considerada insignificante comparada com a energia do fóton. Quando a energia de ligação dos elétrons orbitais se torna desprezível face à energia do fóton incidente, a probabilidade de ocorrência de espalhamento Compton aumenta consideravelmente.

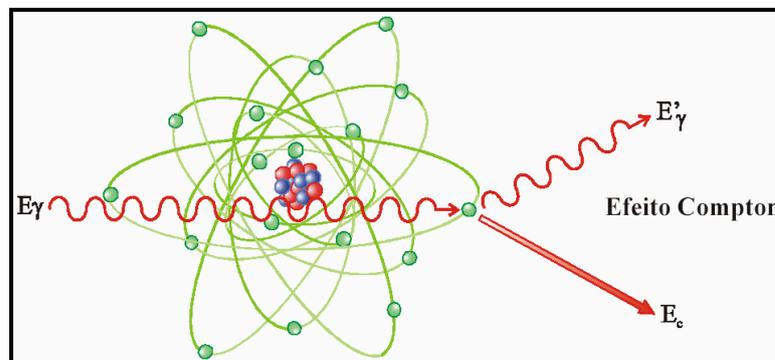


Figura 2.2 – Ilustração do espalhamento Compton [24].

2.2.5. Produção de pares

A produção de pares ocorre quando um fóton interage com as vizinhanças do núcleo de um átomo, e há a probabilidade do fóton desaparecer e no seu lugar criar-se um par elétron-pósitron. Uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia é a produção de um par elétron-pósitron.

Este efeito ocorre quando fótons de energia igual ou superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron. As duas partículas transferem a sua energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a 2 fótons, cada um com energia de 511 keV. Na Figura 2.3 é apresentada a ilustração do efeito [24].

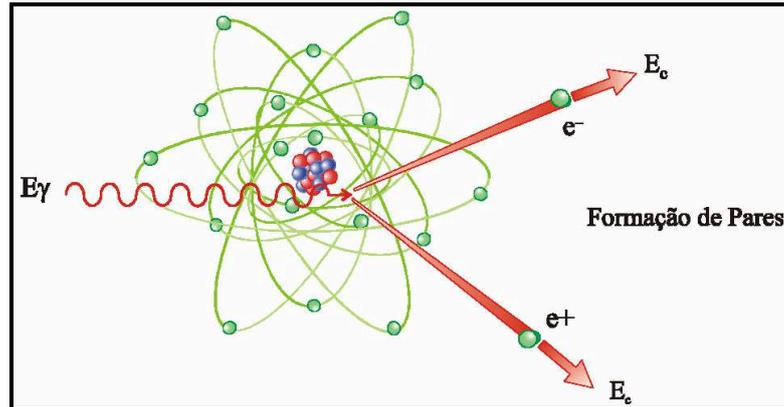


Figura 2.3 – Ilustração da produção de pares [24].

2.2.6. Importância relativa dos efeitos: fotoelétrico, Compton e produção de pares

As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton e este acaba se tornando o efeito predominante apenas para elementos com alto número atômico. Já para elementos de baixo Z , o efeito Compton torna-se predominante. Em energias a partir de 1,022 MeV, a produção de pares passa a contribuir nas interações dos fótons. A Figura 2.4 mostra a variação da participação de cada um desses processos para a variação de Z e da energia dos fótons [24].

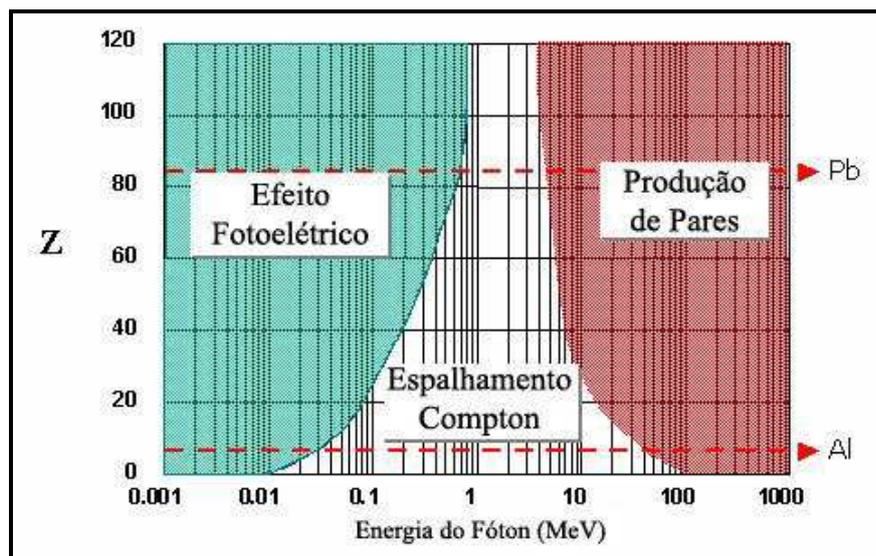


Figura 2.4 – Importância relativa dos efeitos [24].

2.2.7. Princípios físicos que regem a formação da imagem radiográfica

A radiografia é o resultado do uso da radiação para produzir a imagem de um objeto em um material fotossensível. Quanto mais denso e espesso for esse objeto, maior será a probabilidade dos fótons do feixe de interagirem com os seus átomos, resultando em um índice menor de transmissão de fótons. Portanto, conforme o feixe emerge do objeto a ser examinado, ocorrerá uma variação na intensidade do feixe transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação [21].

Quando um feixe de radiação X ou gama incide sobre um material de espessura x , parte do feixe é espalhada, parte é absorvida pelos processos e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade I do feixe emergente está associada à intensidade I_0 do feixe incidente, expressado pela equação (2.2).

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2.2)$$

Onde I_0 é a intensidade da fonte de radiação, I é a intensidade da radiação após atravessar o material de espessura x , e μ é o coeficiente total de absorção do material, definida como a soma dos coeficientes κ , σ e τ , os quais representam a probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétricos, Compton e produção de pares, respectivamente.

A Figura 2.5 mostra um esquema de como ocorre o processo radiográfico. 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. A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação μ no material e μ_d na descontinuidade, aumenta com o aumento entre a diferença das densidades do objeto com e sem descontinuidade.

Dessa forma, a sensibilidade desse método é diretamente proporcional à densidade do objeto e inversamente proporcional à descontinuidade μ varia inversamente com a energia (efeito fotoelétrico e Compton), e, portanto, haverá perda de sensibilidade para fontes de energias mais altas.

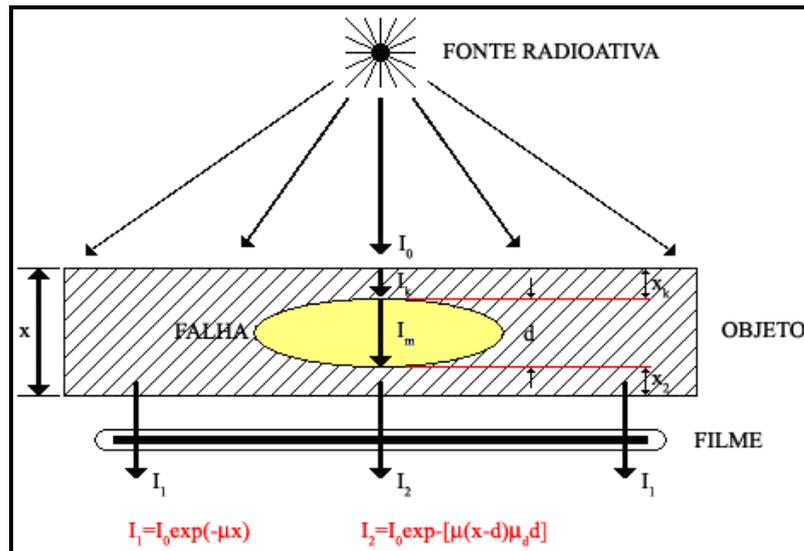


Figura 2.5 – Processo do método de ensaio radiográfico [24].

2.3 ENSAIO RADIOGRÁFICO CONVENCIONAL

2.3.1 Filme radiográfico industrial

Uma peça é registrada por meio do uso de filmes radiográficos industriais, onde a informação é registrada como uma variação da quantidade de depósito de prata ao longo do filme, produzindo um registro permanente – a imagem radiográfica [25]. O filme para radiografia industrial consiste de uma emulsão (gelatina) contendo um composto de prata foto-sensível (brometo de prata) sobre uma base azul flexível e transparente. Normalmente, a emulsão cobre os dois lados da base em camadas de aproximadamente 0,0127 mm de espessura. A aplicação da emulsão foto-sensível em ambos os lados dobra a quantidade de prata, aumentando deste modo a velocidade do filme. Ao mesmo tempo, a camada de emulsão fina proporciona uma revelação, fixação e secagem em um tempo razoável [26].

A camada foto-sensível é unida à película de acetato por uma fina camada de adesivo, sendo também protegida por uma camada de gelatina dura [27]. A Figura 2.6 mostra o esquema do filme radiográfico destacando suas camadas.

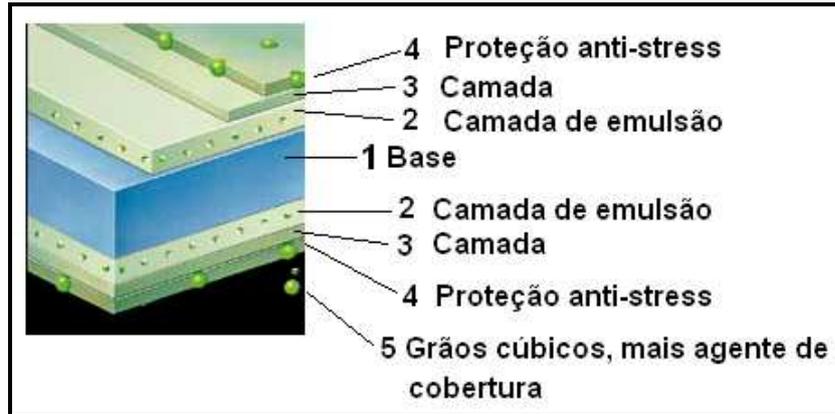


Figura 2.6 – Esquema do filme radiográfico industrial [27].

Quando os raios X, ou os raios gama, ou luz atingem os grãos de prata da camada foto-sensível, uma mudança acontece na estrutura física dos grãos. Esta transformação é de tal natureza que ele não pode ser detectado por métodos físicos triviais. A quantidade de prata da camada foto-sensível transformada é função do maior ou menor grau de exposição à radiação. Quando o filme exposto for tratado com uma solução química, banho revelador, uma reação acontece causando a transformação da prata iônica para a prata metálica negra. Esta prata contida na gelatina em ambos os lados da base é que forma a imagem radiográfica industrial. A emulsão é específica para cada tipo de aplicação, industrial ou fotográfica [26].

A Figura 2.7 (a) mostra a seção transversal de um filme radiográfico industrial com emulsão não exposta e a Figura 2.7 (b) mostra a seção transversal de um filme para radiografia industrial exposto e revelado. As figuras mostram a distribuição dos grãos [26].

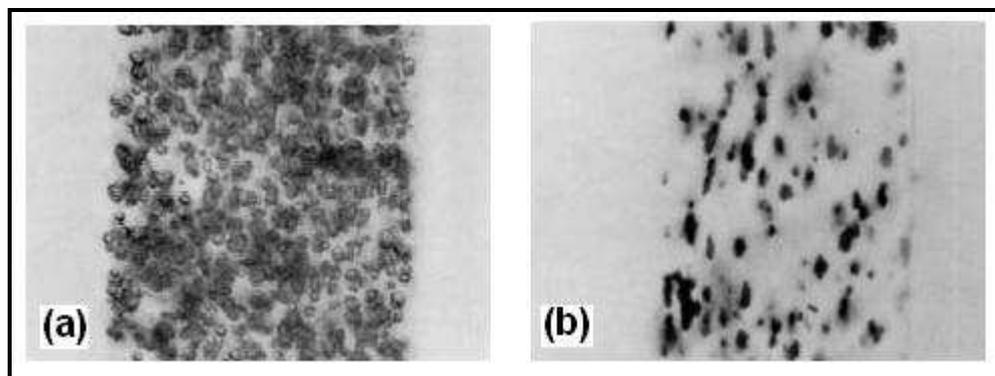


Figura 2.7 – (a) Emulsão não exposta (b) Emulsão exposta e revelada [26].

Os filmes radiográficos industriais são expostos para uma faixa de densidade óptica (D) entre 1,8 e 4,0 para as técnicas com equipamentos de raios X e 2,0 e 4,0 para gamagrafia [4, 5]. Este valor é o dobro do valor típico para aplicações médicas. Objetos sob exame radiográfico, como por exemplo, os fundidos, forjados e soldas (Figuras 1.1 e 1.2), exigem uma boa visualização das trincas e de variação de espessura de parede, portanto leva para maiores exigências de nitidez e o contraste de imagem [23, 26].

2.3.2 Propriedades da imagem radiográfica convencional

2.3.2.1 Densidade

Chamamos de densidade o grau de enegrecimento da imagem radiográfica. Quantitativamente a densidade (D) é definida por:

$$D = \log \frac{I_0}{I} \quad (2.3)$$

Onde I_0 = Intensidade de luz incidente; I = Intensidade de luz que atravessa a radiografia. A relação I_0/I é chamada opacidade óptica e a reciprocidade da opacidade é denominada transmissão. Portanto, se um filme transmite metade da luz incidente tem opacidade 2, logo sua densidade é 0,30. Similarmente, para filmes que transmitem 1/10, 1/100 ou 1/1000 tem respectivamente densidades 1,0, 2,0 e 3,0 H&D [26].

2.3.2.2 Contraste radiográfico

Chamamos de contraste radiográfico às diferenças de densidade entre áreas de um filme. Qualquer sombra ou detalhe de uma imagem somente é visível devido ao contraste com o fundo ou com as vizinhanças. Dentro de certos limites, pode-se afirmar que quanto maior for o contraste ou a diferença de densidades, mais facilidade tem-se para visualizar os pequenos detalhes. Porém, se o contraste for aumentado em demasia haverá perda de visibilidade de detalhes tanto nas seções espessas quanto nas seções. As partes com maiores espessuras apresentarão densidades muito baixas e as partes finas ficarão com densidades muito altas para serem vistas em negatoscópio.

Este princípio está mostrado na Figura 2.8 onde são apresentadas duas radiografias de um corpo-de-prova de aço com a espessura variando de 1/4" a 3/4" com degraus de 1/8", uma

exposta a um feixe de raios X de 220kv (A) e a outra exposta a um feixe de raios X de 120kv (B). Pode-se verificar que, para as tonalidades intermediárias, a visualização dos degraus é melhor na radiografia em baixa tensão (B) do que na radiografia feita em alta tensão (A) [26].

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 outras palavras, o contraste do objeto pode ser definido pela relação entre as maiores e menores intensidades de radiação transmitidas ao filme. Uma peça pode apresentar um baixo contraste do objeto para pequenos comprimentos de onda e um alto contraste do objeto para comprimentos de onda maiores.

O contraste é 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 baixo contraste se o contraste do objeto é muito baixo, diferentemente de um filme de baixo contraste que pode produzir, relativamente, uma radiografia de alto contraste se o contraste do objeto for muito alto. A Tabela 2.3 apresenta um resumo de todos os fatores que afetam a qualidade da imagem radiográfica com relação ao contraste radiográfico [26].



Figura 2.8 – Contraste radiográfico – Exposição (A) 220 kV, (B) 120 kV [26].

2.3.2.3 Definição radiográfica

A definição radiográfica é a precisão com que se definem os contornos da imagem. A Tabela 2.3 apresenta em resumo de todos os fatores que afetam a qualidade da imagem radiográfica com relação à definição radiográfica [26].

2.3.2.3.1 Penumbra geométrica

A imagem radiográfica é formada pela propagação em linha reta do feixe de radiação a partir do foco da fonte de radiação X ou γ que atravessa o objeto e atinge o filme. O processo geométrico de formação da imagem radiográfica é semelhante ao processo de formação de sombras a partir da luz visível, onde a definição da imagem sobre um plano depende do tamanho do foco ou fonte, de sua distância relativa ao objeto e à superfície onde se forma a imagem. Quanto menor for o tamanho da fonte de radiação X ou gama, mais nítida será as imagens formadas [25, 26].

Os aparelhos de raios X e as fontes de raios gama produzem sempre radiografias com certa desfocalização nas bordas das discontinuidades devido às dimensões finitas do foco ou fonte, que é denominado penumbra geométrica Figura 2.9 (A-F) [26]. Para que a imagem projetada seja fiel ao objeto, é necessário que esta apresente um mínimo de ampliação ou deformação. Esta perda de definição é denominada penumbra geométrica que é mostrada na Figura 2.10. Com a equação (2.4) abaixo é possível calcular a penumbra geométrica [5]:

$$U_g = \frac{F \cdot t}{D_{fo}} \quad (2.4)$$

Onde: U_g - Penumbra geométrica; F - Tamanho da fonte; t - Distância do objeto ao detector; D_{fo} - Distância da fonte ao objeto. O valor máximo de U_g ocorre quando uma discontinuidade é detectada na superfície do objeto a ser radiografado.

$$U_{g \max} = \frac{F(e+t)}{D_{ff} - (e+t)} \quad (2.5)$$

Onde: e – espessura da peça (mm); D_{ff} - Distância da fonte filme (mm).

O item T-285 do Artigo 2 do Código ASME Seção V, Ed. 2010, estabelece valores máximos para a penumbra, conforme mostrado na Tabela 2.2 [5].

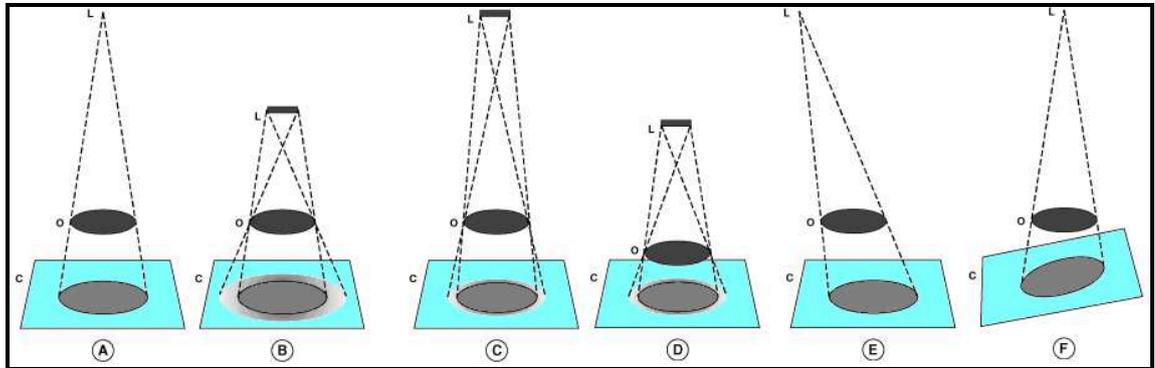


Figura 2.9 – De A a F Ilustram os princípios geométricos de formação da imagem [26].

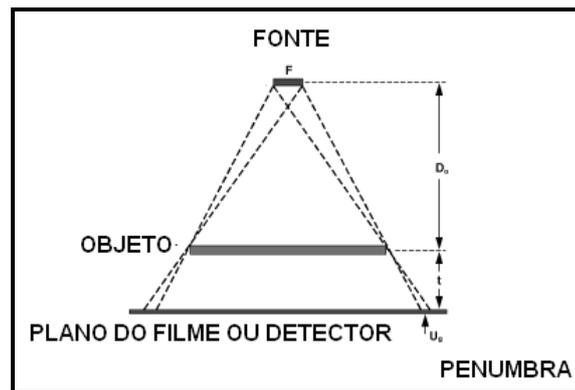


Figura 2.10 – Penumbra geométrica [5, 26].

Tabela 2.2 – Valores máximos de penumbra [5]

| Espessura (e) (mm) | Penumbra máxima (U_g) (mm) |
|--------------------|--------------------------------|
| $e \leq 50$ | 0,51 |
| $50 < e \leq 75$ | 0,76 |
| $75 < e \leq 100$ | 1,02 |
| $e > 100$ | 1,78 |

2.3.3 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 radiográfica são consideradas sinônimas, isto acontece particularmente no campo de detecção de falhas, onde a habilidade de mostrar pequenas descontinuidades está associada ao aumento da sensibilidade radiográfica. Porém, na inspeção de peças fundidas com espessura irregular, a qualidade de imagem pode estar associada à habilidade da técnica radiográfica empregada cobrir uma ampla faixa da espessura com um único filme e obter uma sensibilidade razoável, no lugar de se obter uma boa sensibilidade para uma dada espessura do fundido [25].

2.3.3.1 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 possível de ser visto na imagem radiográfica industrial ou digital. A sensibilidade radiográfica depende da combinação de efeitos de dois conjuntos de fatores independentes. Um é o contraste radiográfico e outro a definição radiográfica [5, 26].

A Tabela 2.3 relaciona os fatores que afetam a qualidade de imagem. A Figura 2.11 mostra uma comparação entre as duas propriedades. A vantagem do alto contraste Figura 2.11 (a) é prejudicada pela baixa resolução. Apesar do baixo contraste Figura 2.11 (b) uma melhor percepção dos detalhes é obtida pelo aumento da definição.

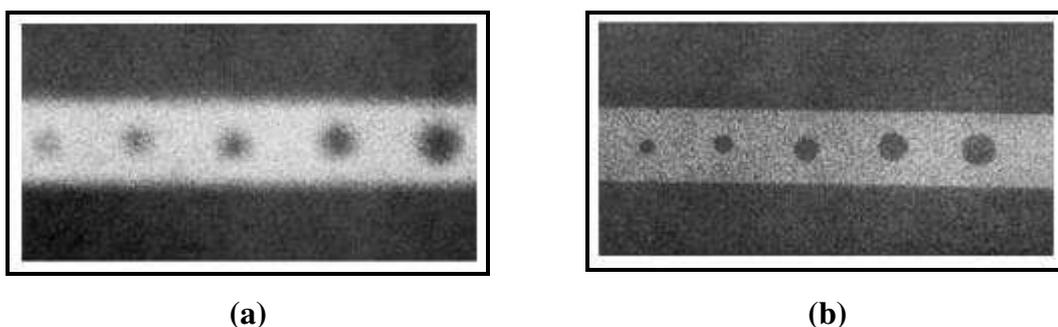


Figura 2.11 – (a) Contraste; (b) Definição radiográfica [26].

Tabela 2.3 – Resumo dos fatores que afetam a qualidade da imagem [5, 26]

| Fatores que afetam a qualidade da imagem radiográfica | | | |
|---|---|---|--|
| Contraste | | Definição | |
| Contraste do Objeto | Contraste do Filme | Fatores Geométricos | Granulação do filme |
| Afetado por: | Afetado por: | Afetado por: | Afetado por: |
| <p>A. Diferença de absorção na peça (espessura, composição, densidade);</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grandes – tendem a contrastes acentuados • Pequenas – tendem a contrastes leves | <p>A. Tipo de filme;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto gradiente médio – tende a contraste acentuado • Baixo gradiente médio – tende a contraste leve | <p>A. Tamanho focal;</p> | <p>A. Tipo de filme;</p> |
| <p>B. Energia da radiação;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Energia ou kV alto tende a contraste leve • Energia ou kV baixo tende a contraste acentuado | <p>B. Nível de revelação (tipo do revelador, tempo e temperatura de revelação, atividade do revelador, grau de agitação);</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adequados – tende a contraste acentuado • Superior ou inferior – tende a contraste leve | <p>B. Distância - foco ou fonte-detector (dfd);</p> | <p>B. Tipo de tela intensificadora</p> |
| <p>C. Radiação espalhada</p> <ul style="list-style-type: none"> • Em pequena proporção tende a contraste acentuado • Em grande proporção tende a contraste leve | <p>C. Densidade</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixa – tende a contraste leve • Alta – tende a contraste acentuado | <p>C. Distância - objeto - detector (dod);</p> | <p>C. Comprimento de onda da radiação</p> |
| <p>D. Filtragem do feixe de radiação.</p> | <p>D. Tipo de tela intensificadora (fluorescente, chumbo, ou nenhuma).</p> | <p>D. Mudança abrupta de espessura;</p> <p>E. Contato tela intensificadora - filme</p> <p>F. Movimento da peça</p> | <p>D. Condições de revelação.</p> |

2.4 TERMO FONTE

2.4.1 Radiação X

Os raios X são radiações eletromagnéticas que se originam na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas devido à interação destas com o campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons [24]. Devido o trabalho envolver altas espessuras a utilização da radiação X empregou-se um acelerador linear de 4 MeV.

2.4.2 Radiação gama (Gamagrafia)

Na radiografia industrial é comum denominar a técnica do ensaio radiográfico por meio de fontes emissora de raios gama de *gamagrafia* que é uma técnica da radiografia convencional. É muito comum a utilização dessa técnica para inspeção de peças de médias e grandes espessuras, mostrando-se vantajosa em ocasiões onde for necessário um maior poder de penetração, limitado quando se utiliza aparelho de raios X. Outra vantagem está nas reduzidas dimensão de um equipamento de gamagrafia, em comparação com um aparelho de raios X.

Contudo, a gamagrafia apresenta algumas desvantagens. Devido à emissão contínua da fonte radioativa, os equipamentos de gamagrafia devem possuir uma blindagem permanente, capaz de reduzir a radiação a níveis aceitáveis quando a fonte não estiver exposta. Outra desvantagem está na qualidade da imagem. Devido ao seu espectro discreto, a imagem final é dotada de certa quantidade de ruído. Isso prejudica todos os parâmetros de análise da qualidade da imagem, como a resolução espacial e a razão sinal ruído, havendo assim critérios de avaliação da imagem utilizando as fontes de raios gama empregadas na radiografia convencional [22].

2.4.2.1 Seleção de fonte radioativa

Em contraste com aparelhos de raios X, que emitem uma ampla faixa de comprimentos de onda, fontes de raios gama emitem um ou alguns comprimentos de onda discretos. A Figura 2.12 mostra o espectro de raios gama de Cobalto 60. É produzido em reatores atômicos segundo o seguinte esquema:



Pode-se assumir na prática que a fonte de Co-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 [28].

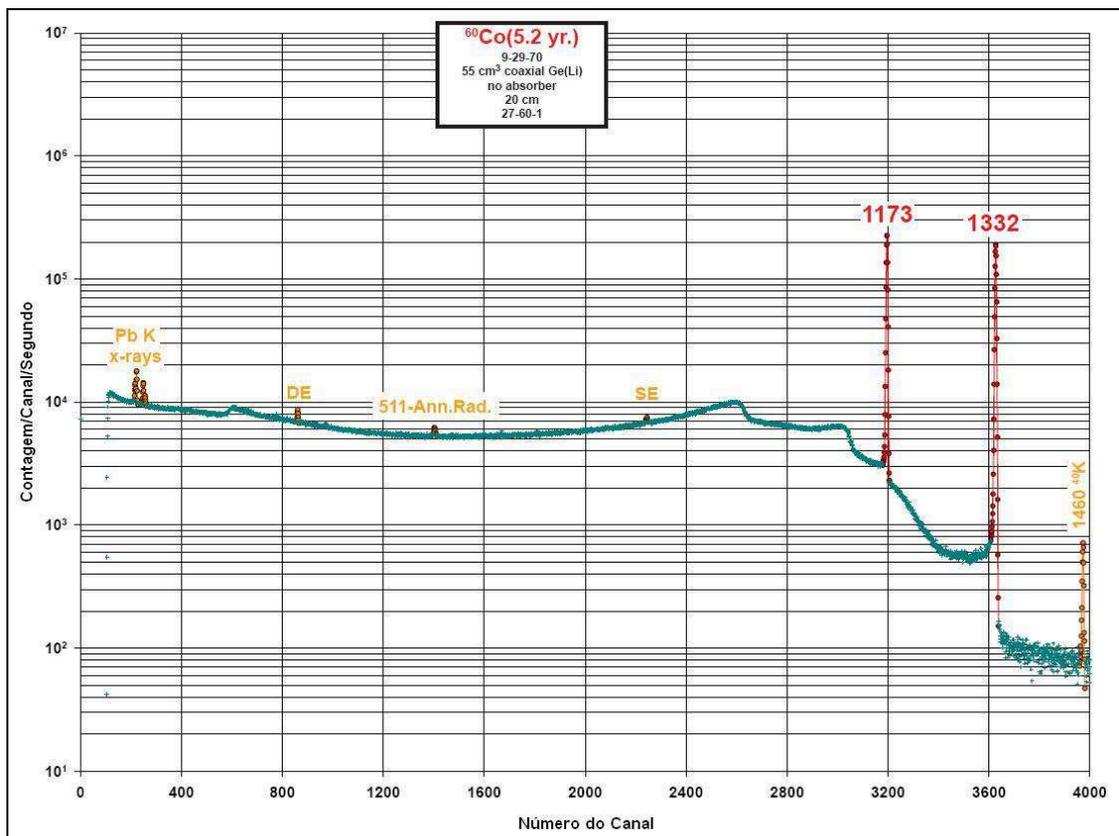


Figura 2.12 – Espectro em energia do radioisótopo Cobalto-60 [28].

2.5 RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)

A técnica da Radiografia Computadorizada – RC engloba todo o processo de obtenção de uma imagem digital nas fases de aquisição, processamento, apresentação e gerenciamento da imagem. Em resumo a técnica CR é composta pelos seguintes componentes: o *Image Plate (IP)* ou placa de fósforo; a leitora de *IP*; a estação de trabalho (computador para processamento de imagens); e o cassete (item opcional). Além disso, é necessário um

equipamento de raios X ou gama conveniente para a aplicação em questão [29]. Esses elementos em conjunto atuam em seqüência como mostrado na Figura 2.13.

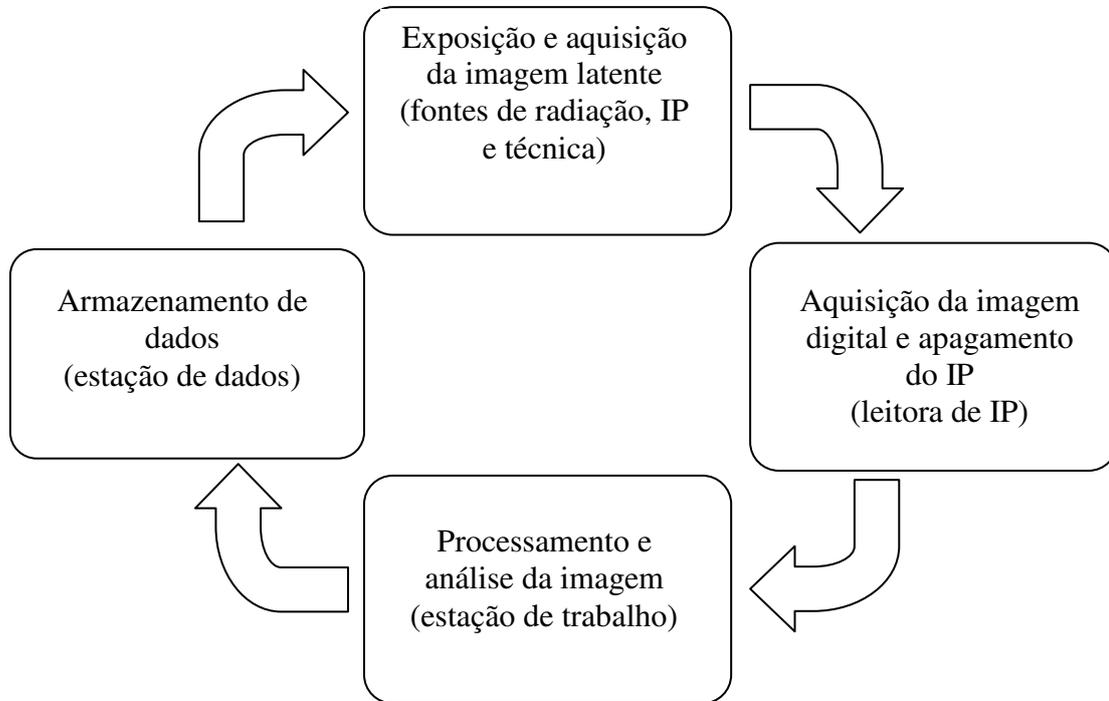


Figura 2.13 – Esquema da Radiografia Computadorizada [29].

2.5.1 A história do detector Image Plate

O fenômeno da luminescência fotoestimulada não é uma tecnologia nova. Sua descoberta se deu há mais de um século, mas por falta de aplicações práticas, ficou por várias décadas relegadas à condição de curiosidade científica. O interesse no fenômeno se renovou na década de 1940, quando foram conduzidas várias experiências em busca de aplicações práticas, mas voltadas principalmente para interesses militares. Nada mais derivou desse trabalho, possivelmente por não se dispor na época da tecnologia do computador. A primeira aplicação, em 1947, consistiu em uma folha de papel com sulfeto utilizado com elemento fotoestimulável e exposto a um feixe de raios X [30]. Após a exposição, a folha foi irradiada com luz infravermelha, uma imagem de luminescência fotoestimulada foi capturada em um filme fotográfico.

O ponto de partida de desenvolvimento do *IP* e subseqüentemente em um sistema de radiografia computadorizada, na Fuji Film Company Ltd., foi descrito como “processamento

de imagem” em um longo plano de pesquisa do Laboratório de Pesquisa Ashigara, Fuji Photo Film Co.,Ltd, em 1971. Esse plano foi proposto como um desenvolvimento na técnica de radiografia médica para o futuro. Então, o plano de pesquisa foi posto em prática em abril de 1975 [31]. A pesquisa do material fotoestimulável que seria utilizado na nova técnica de radiografia estava condicionada a satisfazer alguns requisitos necessários, conforme a seguir [31]:

- O material fotoestimulável tinha que ser estimulado pelo laser de He-Ne, já que era o único prático existente na época;
- O tempo de luminescência tinha de ser menor ou no máximo próximo a $1\mu\text{s}$ de modo a ser feito a varredura sobre o *Image Plate* em um período de tempo praticável;
- Ter um coeficiente de absorção de raios X maior ou igual que os intensificadores de imagens da época.

Como resultado da pesquisa de vários materiais, tais como haleto básico de fósforo, sulfetos, haloboratos, halosilicatos, halofosfatos, halogermanat os de metais alcalino-terrosos, em alguns óxidos, sulfatos, boratos e silicatos [32], entre tentativas e erros baseados nas condições acima, os que surtiram melhor resultado foram primeiramente o BaFX:Eu^{2+} e ($\text{X} = \text{Cl, Br, I}$), mostrando-se o melhor candidato [31, 33]. Os BaFX:Eu são fósforos na forma de cristal que consistem de Haleto de Bário Flúor, usando o elemento de terra rara, Európio, como traço de impurezas, que serve como ativadores da emissão de luz. Nesse caso, o Európio é um íon bivalente e substitui o íon Bário e o X representa o átomo de halogênio que pode ser Cl, Br ou I.

Embora um grande número de materiais apresente como propriedade uma forte luminescência fotoestimulável, a maior parte dos fósforos de armazenamento modernos se enquadram numa classe de haletos de alcalinos terrosos dopados com európio, entre os quais destaca o flúor-brometo de bário (BaFBr:Eu^{2+}) dopado com európio bivalente. Trata-se de um material que se presta particularmente a aplicações de radiografia computadorizada, apresentando resposta de intensidade de fotoluminescência fotoestimulável muito linear quando exposto à energia dos raios X, além de uma resposta muito rápida com tempo de vida curto. Às vezes são usados outros fósforos, como o flúor-bromo-iodeto de bário (BaFBr/I:Eu^{2+}), embora nenhum seja comum quanto o BaFBr:Eu^{2+} [30].

No mesmo ano de 1975, a Kodak patenteou o primeiro sistema de fósforo de armazenamento escaneado, dando origem à moderna radiografia computadorizada. Essas descobertas e a invenção de um sistema de radiografia computadorizada foram anunciadas pela primeira vez no Congresso Internacional de Radiologia em 1981 e em 1983, o primeiro sistema que empregava a tecnologia de fósforo de armazenamento foi comercializado pela Fuji Film Company Ltd [30]. Sua aceitação passou a crescer consistentemente, primeiramente em meio à comunidade médica do final da década de 1980 e, agora, na comunidade industrial mostrando-se capaz de substituir a radiografia convencional como um sistema digital [32].

2.5.2 Mecanismo de emissão de luminescência

Apesar de muitos elementos apresentarem como característica a emissão de luminescência fotoestimulada (PSL), a maioria dos fósforos utilizados na RC 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 (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 fósforos, como o flúor bromo iodeto de bário (BaFBr/I:Eu^{2+}), mas nenhum com tanta frequência com o BaFBr:Eu^{2+} [22].

Pode ser dito que o fósforo utilizado na RC deve ter no mínimo dois centros de armazenagem de energia proveniente de radiação, um para os elétrons que são liberados quando interagem com os fótons de raios X e outro que são os centros de armazenagem de buracos, chamados de ativadores, que no caso dos fósforos de haleto de bário flúor são os íons de európio Eu^{2+} . Além disso, os ativadores devem ser capazes de capturar os elétrons liberados no processo de excitação ótica (segundo estímulo) [22].

Sabe-se que nos cristais de haletos, os F centros são criados quando irradiados com raios X. Nos cristais de 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 2.14 pode ser visto o espectro típico de fotoestímulo. Assim é visto que o fotoestímulo é devido basicamente aos F centros do Bromo ($\text{F} - (\text{Br}^-)$).

O primeiro modelo do mecanismo de captura e desexcitação no fósforo utilizado no *Image Plate* foi apresentado por Takahashi [31], sendo chamado Modelo PSL. As bandas no modelo PSL do BaFX:Eu são mostrados na Figura 2.15. Quando o fósforo é exposto à radiação ionizante, pares elétron-buraco são criados na rede cristalina. A quantidade de pares é proporcional à energia da radiação. Estes podem se recombinar imediatamente a partir do estado excitado do íon 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 do *IP*, 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 Eu^{2+} e emitir luz correspondente a essa transição.

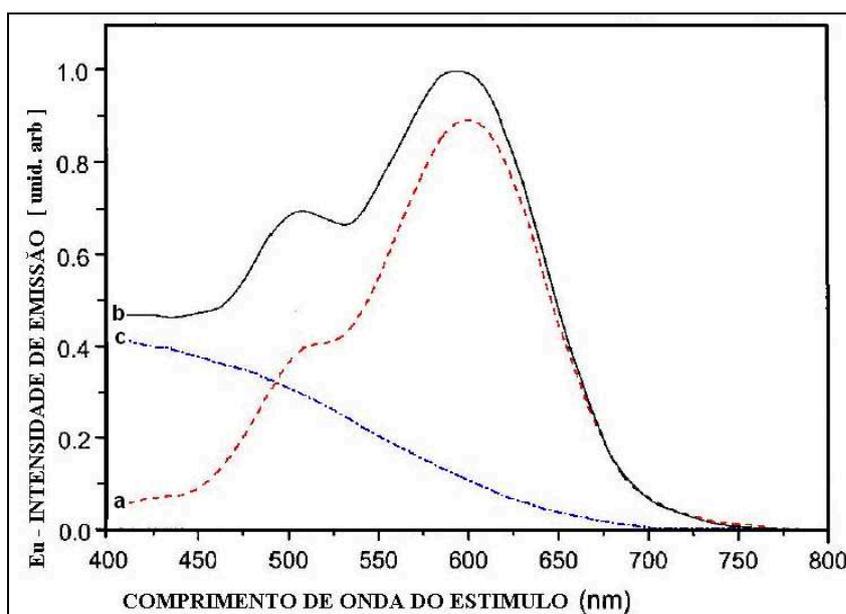


Figura 2.14 – Espectro de fotoestímulo do BaFBr:Eu²⁺, linhas: (a) vermelha corresponde ao F centro baseado no Bromo, (b) preta é o espectro total e (c) azul é a diferença entre elas [34].

O modelo PSL defendido por Takahashi foi estabelecido experimentalmente. Takahashi realizou medidas de sinais de ressonância eletrônica de *spin* (ESR) de amostras BaFCl e BaFBr, onde a razão entre Cl para F ou Br para F foram variadas. Observou-se que as simulações dos sinais de ESR concordavam muito bem com os modelos teóricos.

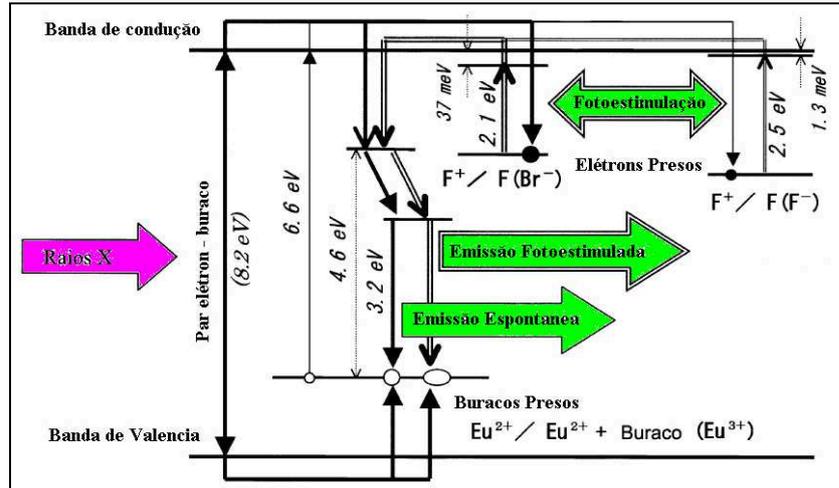


Figura 2.15 – Diagrama de níveis de energia para o mecanismo de PSL no BaFBr:Eu [31].

2.5.3 Processos de aquisição da imagem digital

2.5.3.1 Leitor da Radiografia Computadorizada

O leitor da radiografia computadorizada (CR) é um dispositivo eletromecânico que incorpora todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução/exibição da radiografia final [36]. Em termos de recursos e *design*, existe certa variação de fabricante para fabricante, mas todos os leitores realizam as seguintes funções básicas: um sistema de alimentação aceita a placa de fósforo, numa velocidade uniforme, um sistema de transporte conduz a placa de imagem através de um escâner com feixe de laser estimulador; a luminescência fotoestimulada, *pixel por pixel*, é coletada por um filtro que faz a separação da fotoestimulação contra o espectro da luminescência, uma vez que o feixe de estimulação é várias ordens de grandeza mais intensa que a luminescência (dados da imagem). Em seguida, um fotomultiplicador/detector amplifica o sinal. O sinal analógico é convertido em digital e o computador armazena a matriz temporariamente em um retentor (*buffer*) a imagem para as operações subseqüentes, como exibição, inserção de anotações, análise, medição, armazenamento, etc. Muitas vezes, depois da estação de leitura, há ainda a etapa do apagamento, realizada pela ação de uma luz fluorescente brilhante. A Figura 2.16 mostra um diagrama funcional de um sistema típico.

Essas funções eletromecânicas são comuns à maioria dos leitores da CR. 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 [36].

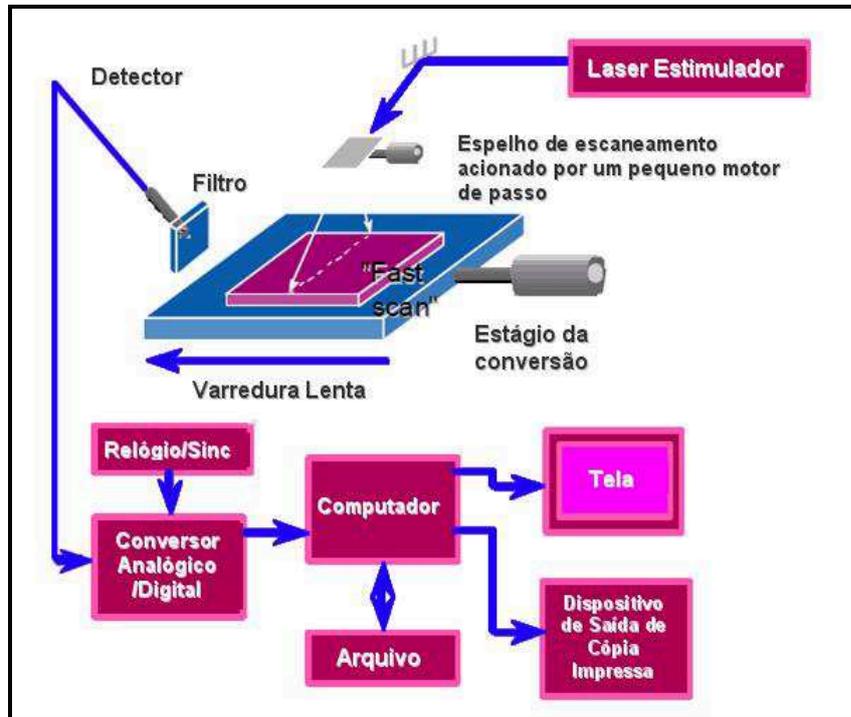


Figura 2.16 – Sistema da Imagem de Fósforo de Armazenamento [36].

2.5.3.1.1 A Leitura do Image Plate

No processo de luminescência fotoestimulável necessita-se de um segundo estímulo. Como os centros de cor absorvem energia quando irradiados com raio laser vermelho, para ler a imagem utiliza-se tipicamente um feixe direcionado de raios laser de HeNe. A absorção de energia pelos centros de cor libera elétrons presos com conseqüente emissão de luz azul (390nm) quando esses elétrons liberados se recombinam com as lacunas nos lugares ocupados pelo Eu^{2+} , voltando então às suas posições de valência originais. A intensidade dessa emissão é proporcional à carga presa, que por sua vez é proporcional à absorção original dos raios X.

A velocidade com a qual o scaneamento é feito 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 fósforo BaFBra:Eu^{2+}), que é um dos principais fatores limitantes para o tempo de scaneamento. A

potência do feixe do laser determina que fração de energia armazenada seja liberada, isso gera impactos no tempo de scaneamento, efeitos de atraso fosforescente e sinais residuais. Lasers com potências altas podem liberar mais elétrons aprisionados, mas em troca há uma perda na resolução espacial, causada pelo aumento da penetração do feixe do laser aumentando o espalhamento da luz estimulada na camada do fósforo. Em alguns sistemas atuais, já é possível regular a intensidade do laser de estímulo. Para garantir que somente os fótons de luminescência sejam coletados pelo sistema, é utilizado um filtro ótico especial, destinado a bloquear a luz estimuladora, que tem uma intensidade muito maior que a luz emitida pelo *Image Plate*.

A terminologia utilizada para se referir à direção ao longo do caminho da reflexão do laser é a direção de scaneamento. A direção de sub-scaneamento é referida à direção de movimento da placa. Na Figura 2.17 (a) pode ser visto a disposição da varredura do laser sobre a placa de fósforo. O scaneamento do *IP* é realizado linha a linha, e no final de cada linha o feixe retorna ao início da próxima linha. Como a placa do fósforo está se movendo simultaneamente, a velocidade de translação é ajustada de modo que a próxima varredura do feixe do laser inicie com um espaçamento igual à área efetiva do foco do laser sobre a placa, isso garante que dimensões de amostra são iguais na direção x e y – Figura 2.17 (b).

Durante a leitura, nem toda a energia armazenada na tela é liberada. Para garantir a remoção completa de toda imagem latente, a placa de fósforo de armazenamento é apagada com uma luz de alta intensidade que a inunda por um curto período, permitindo assim que ela seja reutilizada em outras exposições. A etapa do apagamento pode ser realizada no leitor CR (desde que este possua um sistema de apagamento acoplado) ou em um equipamento a parte, imediatamente em seguida à etapa de leitura. Na Figura 2.18, pode ser visto no processo de formação da imagem computadorizada.

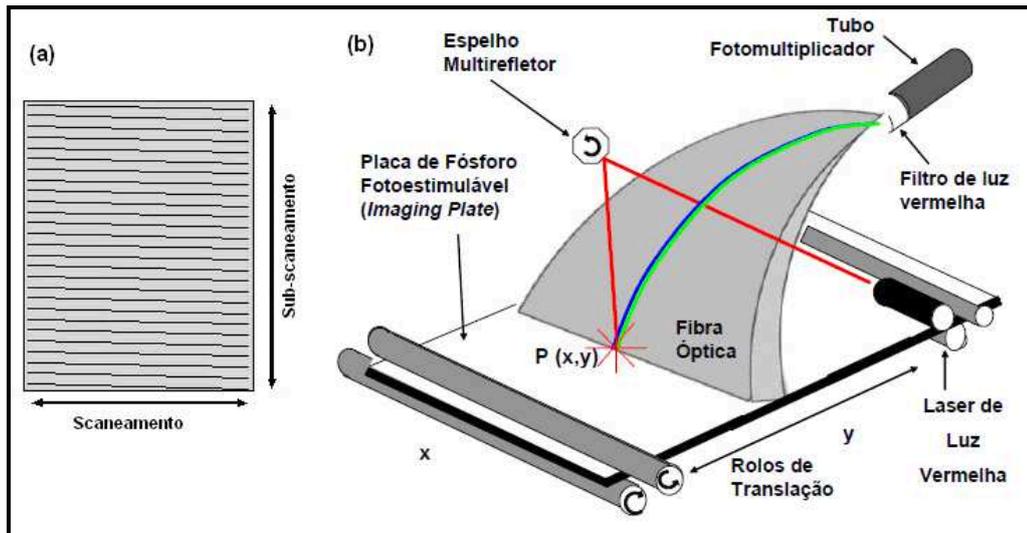


Figura 2.17 – (a) Disposição de varredura do laser; (b) Processo de leitura do IP [34].

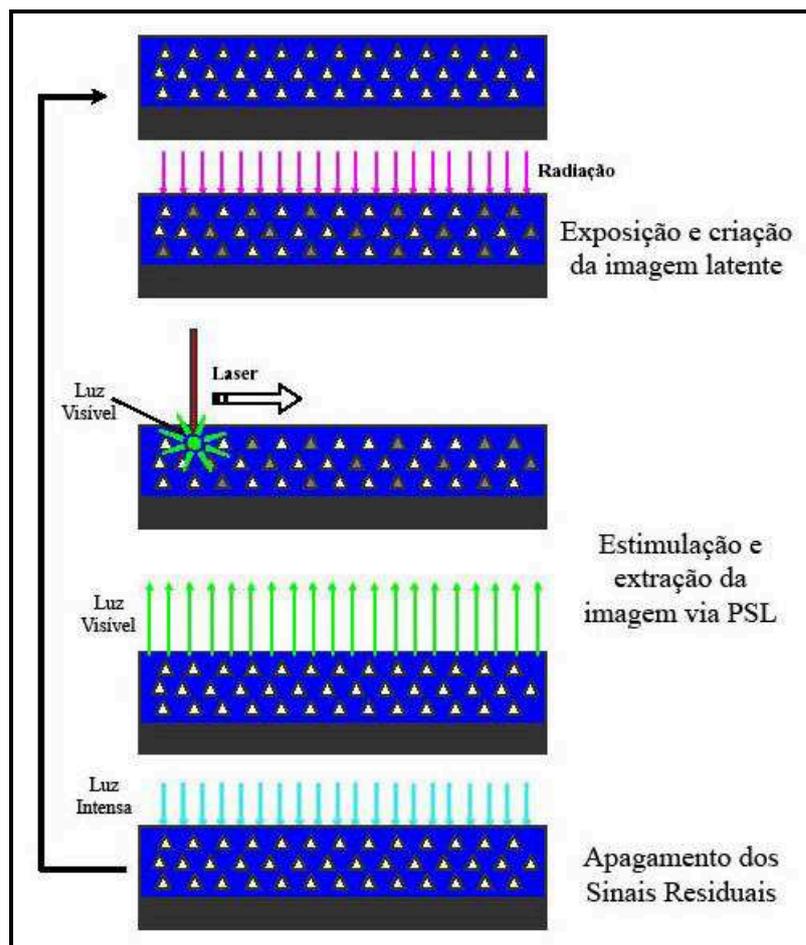


Figura 2.18 – Ilustração do processo de formação da imagem computadorizada [36].

2.5.3.1.2 Detecção e conversão do sinal fotoestimulado

O sinal fotoestimulado é emitido em todas as direções a partir do fósforo. Desta forma um sistema de captura óptica, um guia coletor de luz, é posicionado na interface fósforo-laser ao longo de toda direção de scaneamento, de modo a capturar uma porção da luz emitida e a direcionar ao catodo de um tubo fotomultiplicador (PMT). A fotomultiplicadora tem como função básica coletar a luz produzida na luminescência e transformá-la em pulsos de corrente elétrica. Seus componentes básicos são apresentados na Figura 2.19.

A sensibilidade da janela do fotocatodo do tubo fotomultiplicador é ajustada de modo que somente o comprimento de onda correspondente a luz emitida ($\cong 400\mu\text{m}$) seja capturado, descartando assim a possibilidade de absorção de fótons de outros comprimentos de onda. Fóton-elétrons emitidos pelo catodo são acelerados e amplificados através de uma série de dinodos dentro do tubo fotomultiplicador. O ganho é dado pelos ajustes de acordo com a voltagem sobre os dinodos. Assim, um sinal de corrente útil é obtido na saída do tubo.

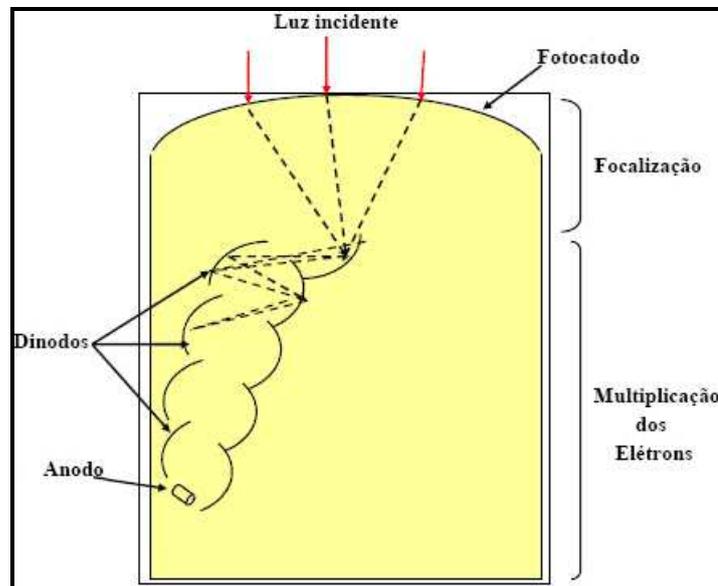


Figura 2.19 – Elementos básicos de uma fotomultiplicadora [22].

A faixa dinâmica do sinal de saída de um tubo fotomultiplicador é muito maior do que em uma placa de fósforo, permitindo assim, uma boa amplificação do sinal de saída. A variação da intensidade de luz corresponde à variação na exposição, ou seja, quanto maior a exposição da placa de fósforo maior será o número de fótons emitidos no processo de

luminescência. Finalmente, os elétrons são coletados no anodo produzindo um pulso de corrente que pode ser medido por um circuito eletrônico apropriado.

2.5.3.1.3 Digitalização do sinal fotoestimulado

Para ocorrer à digitalização, no sinal de saída do tubo fotomultiplicador deve se determinar antes o máximo e o mínimo do sinal, de modo a se obter a melhor faixa. Em alguns leitores de sistemas de radiografia computadorizada essa determinação de máximo e mínimo é feita com um pré scaneamento utilizando um laser de baixa intensidade. Assim, o ganho do tubo fotomultiplicador é ajustado para uma ótima digitalização do scaneamento subsequente, mais refinado com o laser em uma potência maior. Na maioria dos sistemas, os tubos fotomultiplicadores são ajustados para uma luminescência correspondente a uma exposição na faixa de 0,01 a 100 mR.

Uma vez determinado o fator de ganho do tubo fotomultiplicador, o sinal é comprimido na saída do mesmo. A maioria dos sistemas comprime o sinal de saída com amplificadores analógicos – logarítmicos ou amplificadores “square root”. Nos amplificadores logarítmicos é providenciada uma relação linear entre a exposição incidente e o sinal de saída. Já nos amplificadores “square root” é providenciado uma relação linear entre o ruído do quanta associado à exposição [36].

O processo de digitalização, conversão do sinal contínuo analógico em um sinal discreto, é feito em dois passos: amostragem e quantização. Na amostragem é determinada a localização e o tamanho do sinal fotoestimulado, de uma área específica do receptor. Na quantificação é determinado o valor médio da amplitude do sinal na área [22].

A saída do tubo fotomultiplicador é medida em uma frequência temporal, coordenada com a taxa de scaneamento do laser e quantizado a um valor inteiro e discreto dependente da amplitude do sinal e o número total de valores digitais possíveis. Um conversor analógico – digital (A/D) converte o sinal de saída do tubo fotomultiplicador a uma taxa muito mais rápida que a taxa de scaneamento do laser. Um “pixel clock” coordena o tempo em que um sinal foi codificado com a posição física na linha de scaneamento. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre o sinal e a posição em que ele foi gerado [22].

A razão entre a taxa de amostragem no conversor A/D e o scaneamento ao longo do caminho da reflexão do laser determina o tamanho do *pixel* na direção de scaneamento. A velocidade de translação, sub scaneamento, é coordenada com tamanho do *pixel* na direção de scaneamento. Dessa maneira, o espaçamento entre as linhas é igual à largura do *pixel*, obtendo assim *pixel* quadrado. Atualmente, o tamanho típico do *pixel* fica em torno de 87 a 113 μm , podendo alcançar menores valores dependendo do tamanho do detector e do sistema de radiografia computadorizada [22].

Embora exista uma infinita possibilidade de valores de voltagens analógicos, entre o máximo e o mínimo na saída do tubo fotomultiplicador, o conversor A/D quebra o sinal em uma série de valores discretos, para codificar a amplitude do sinal. O número de bits utilizados para se aproximar do sinal analógico determina o número de valores discretos possíveis. Em geral, os sistemas utilizam 10, 12 ou 16 bits, tendo dessa forma, 1024, 4096 ou 65536 valores possíveis para uma dada amplitude do sinal analógico, respectivamente [22].

2.5.3.2 Imagem radiográfica digital

As imagens obtidas no processo de luminescência fotoestimulada são matrizes que podem ser manipuladas de modo a apresentarem imagens alternativas. Juntamente com os sistemas de radiografia computadorizada, os fabricantes providenciam junto aos seus equipamentos sofisticados computadores (hardware) e programas, de modo que o usuário final possa manipular a imagem de acordo com suas necessidades.

A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados *bits*, que podem assumir os valores 0 ou 1. A um conjunto de bits chamamos *byte*. Os *bits* e *bytes* são usados para representar os *pixels* da imagem digital. Diferentes configurações de bytes representam as diversas tonalidades de grau de cinza nos *pixels*. A Figura 2.20 mostra o relacionamento entre as configurações de *bytes*, valores de *pixel* e tonalidades de cinza.

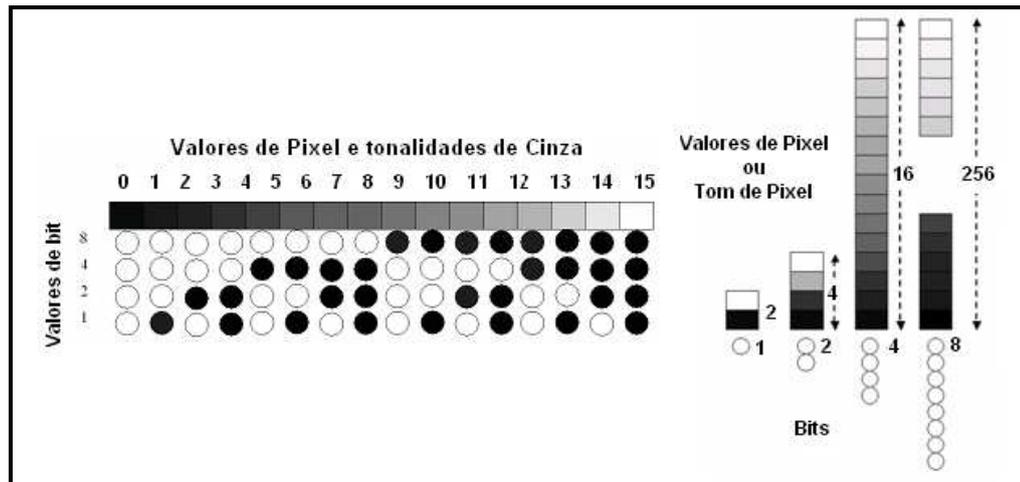


Figura 2.20 – Comportamento entre os valores de *pixel* e os tons de cinza [22].

O tamanho numérico de uma imagem (número de bytes) determina o espaço no disco ou computador utilizado para guardá-la. A maior parte dos sistemas de aquisição de imagens digitais trabalha com bytes de oito bits.

2.5.3.3 Qualidade da imagem digital

Neste tópico apresentaremos alguns dos fatores que influenciam na qualidade de uma imagem radiográfica, como resolução espacial, contraste, ruído, *aliasing* entre outros.

2.5.3.3.1. 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 [21]. Em uma imagem radiográfica está atrelada a uma série de fatores, que contribuem para uma degradação do sinal, causando uma perda de definição na imagem (*unsharpness*), como a seguir:

- Limitações físicas impostas pela composição do material;
- Espessura da placa de fósforo;
- O tamanho finito do diâmetro do foco do laser incidente na camada do fósforo;
- Atraso temporal da luminescência;
- Espalhamento da luminescência no fósforo.

O atraso na luminescência causa uma resolução espacial ligeiramente menor na direção ao longo do caminho da reflexão do laser – direção de varredura, do que na direção de movimento da placa – sub-varredura, embora, fosse esperada uma maior precisão no movimento ótico/eletrônico do que no movimento mecânico. O varredura é ajustado para um tempo de decaimento da luminescência de $0,8\mu\text{s}$, caso esse decaimento ocorra depois desse tempo, o posicionamento do laser estará em nova posição, logo o sinal atrasado não será interpretado como proveniente do *pixel* anterior.

A perda de resolução devido à placa de fósforo ocorre devido a três processos:

- A difusão do feixe de luz estimulante na placa de fósforo;
- Estimulação dos fósforos pela luz de luminescência emitida por outros grãos;
- Reflexo da luz do feixe estimulante na camada de suporte da placa de fósforo.

A Figura 2.21 esquematiza alguns exemplos de processos de degradação da resolução espacial. A perda de resolução devido à placa de fósforo pode ser reduzida de diversas maneiras:

- A camada de fósforo pode ser colorida de forma a otimizar a absorção do feixe de estimulação e minimizar a absorção da luz de luminescência;
- Os grãos de fósforo devem possuir pequena dimensão para minimizar a dispersão;
- A camada de protetora e de fósforo deve ter espessura reduzida; e
- A camada de suporte deve incorporar um corante absorvente para evitar a formação de reflexos sobre a camada de fósforo.

Placas de fósforo que possuem estas características são chamadas de detectores de fósforo fotoestimulável de alta resolução (*High Resolution – HR*). Contudo, essas placas apresentam menor eficiência na absorção dos fótons de raios X, devido à sua espessura, diminuindo assim a resolução em contraste e aumentando o tempo de exposição.

Outro fator que influencia na resolução espacial é a amostragem digital. Esta é determinada pela máxima frequência espacial, segundo o teorema de Nyquist. A frequência de amostragem é dada pelo inverso do dobro da maior frequência no sinal ($1/2f$). Neste caso, a frequência do sinal é determinada pelo tamanho do *pixel* ($1/2\Delta x$). Dessa forma, placas de

fósforos menores irão oferecer melhor limite de resolução do que placas maiores, uma vez que o tamanho do *pixel* está relacionado com a dimensão a ser escaneada.

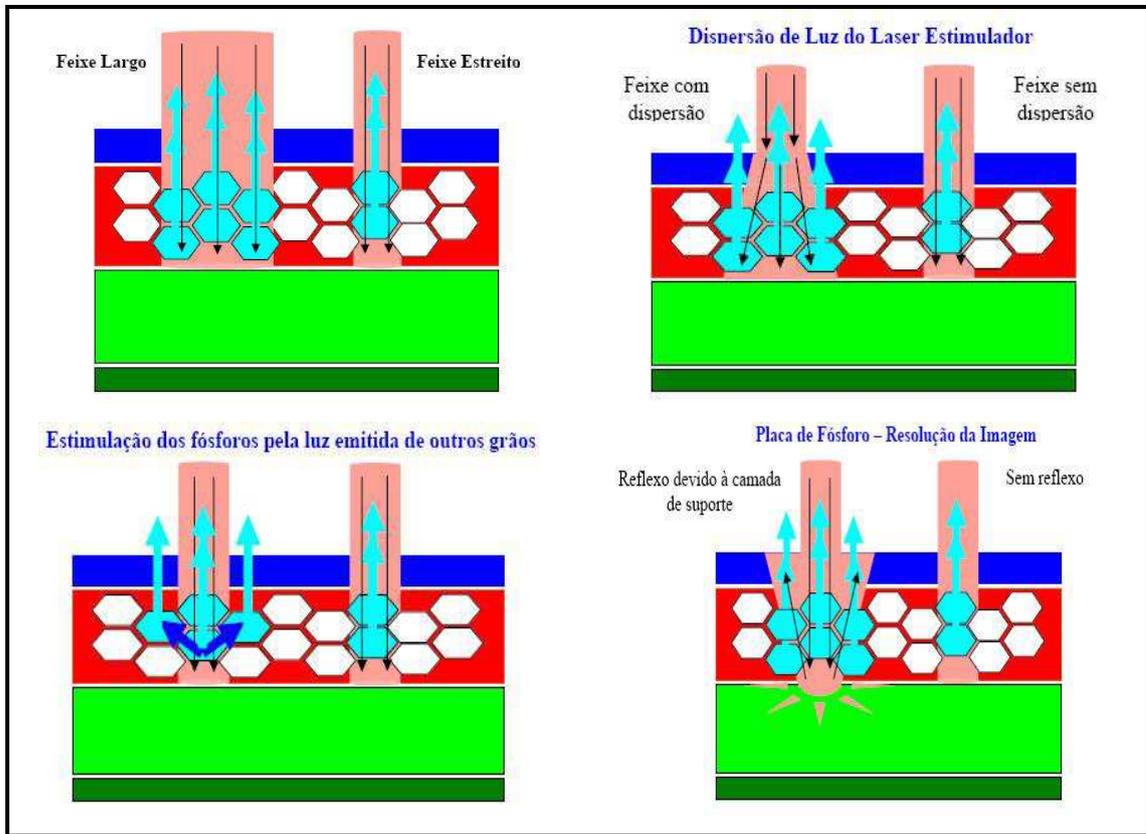


Figura 2.21 – Processos de degradação da resolução espacial [22].

2.5.3.3.2 Resolução em Contraste

A menor diferença em um sinal que pode ser representado entre *pixels* digitais na imagem depende do número total de códigos (nível de quantificação), assim como a amplitude do sinal em relação ao background. Na maioria dos sistemas, os valores dos *pixel* mudam com o logaritmo da luminescência fotoestimulada, ou comparavelmente com o logaritmo da dose de radiação na placa. Então a diferença numérica entre os valores dos *pixels* nos fornece a definição de contraste. O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em dois tipos: contraste do sujeito e contraste da imagem [5, 26].

Contraste do Sujeito

Após a interação da radiação com diferentes estruturas do corpo de prova, emerge destas uma radiação cuja distribuição em energia é diferente daquela que o penetrou, 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 aérea [37], e a diferença na exposição entre vários pontos dentro da imagem aérea denomina-se contraste do sujeito. Este é afetado principalmente pela energia da radiação incidente no corpo de prova [5, 26, 38].

Contraste da imagem

Contraste da imagem é o grau de diferenciação em tons de cinza de duas estruturas adjacentes na imagem. O contraste da imagem depende basicamente das características das estruturas do corpo inspecionado, composição dos materiais, densidade e espessura, da energia e da intensidade de fótons que emergem das diferentes estruturas (contraste do sujeito) e das características do sistema de detecção de imagem [5, 26]. Na Figura 2.22 são mostrados os estágios de formação do contraste da imagem.

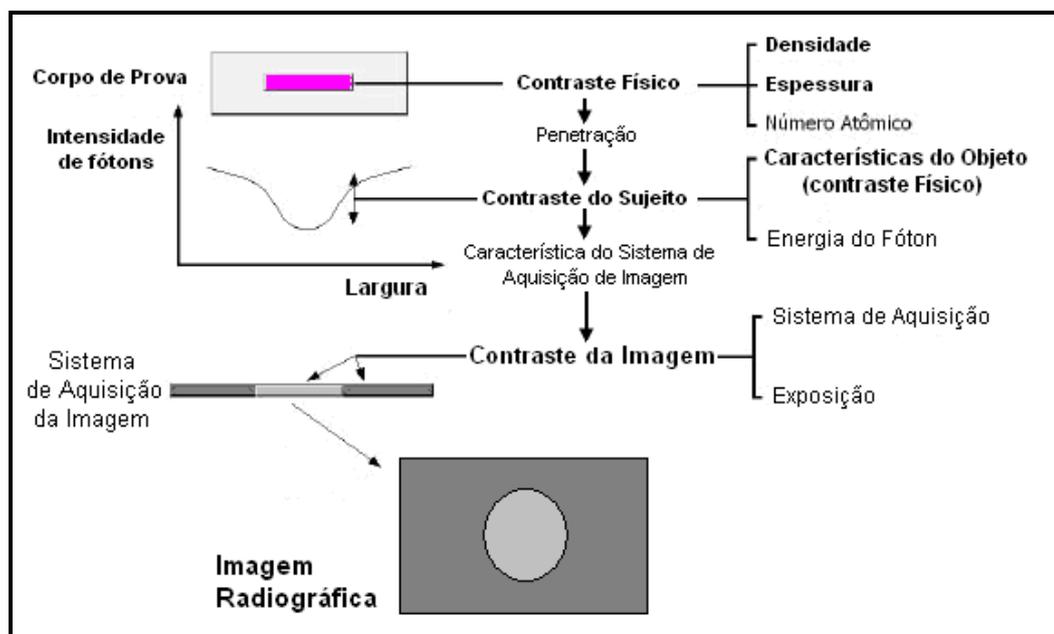


Figura 2.22 – Estágios de formação do contraste da imagem [38].

2.5.3.3.3 Fatores que afetam o contraste

Radiação espalhada

Um fator que influencia o contraste da imagem é a radiação espalhada (ou dispersa). A radiação espalhada diminui o contraste, “mascarando” detalhes na imagem [5, 26]. A Figura 2.23 mostra o contraste de uma imagem obtida sem e com a radiação espalhada.

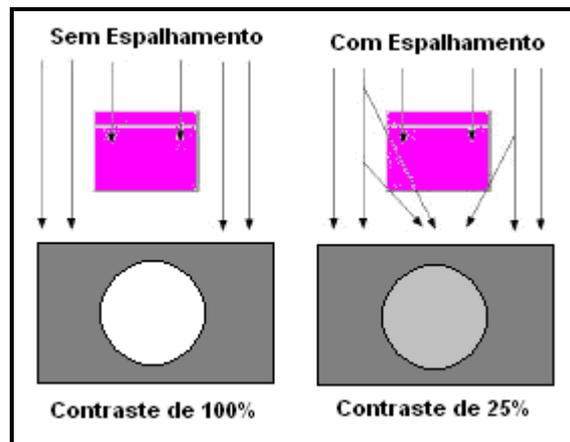


Figura 2.23 – Contraste obtido sem e com radiação espalhada [38].

O contraste diminui exponencialmente com o aumento da radiação espalhada. Na Figura 2.24 é apresentado o comportamento do contraste da imagem com o aumento da radiação espalhada.

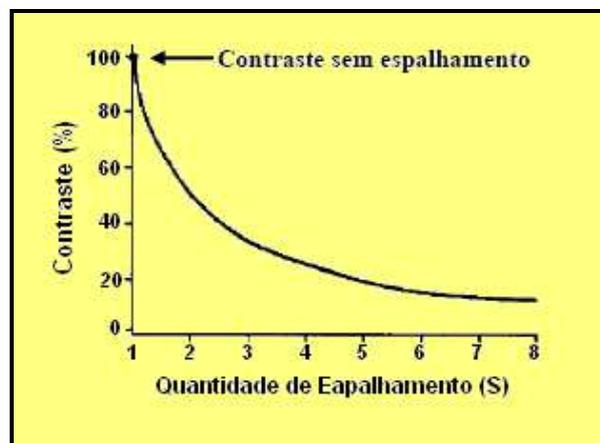


Figura 2.24 – Comportamento do contraste da imagem em função da radiação espalhada [22].

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 [38]. Quanto maior a energia, menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades de massa do corpo de prova, produzindo menor variação na atenuação [5, 26]. A Figura 2.8 mostra a variação do contraste em função do aumento da energia do feixe. Assim como o filme convencional tem contraste limitado a uma dada velocidade de exposição radiográfica, o contraste na imagem radiográfica digital é limitado pelo nível de ruído.

2.5.3.3.4 Ruídos

Existem vários tipos de fontes de ruídos que podem contribuir para o ruído geral na imagem final. Contudo serão mencionados apenas alguns [22, 38].

Ruído de Quanta nos Raios X

A variação randômica dos raios X absorvida no receptor PSP determina o componente de ruído quantum. Mesmo quando exposto a um feixe de raios X uniforme, o número de quanta absorvido por unidade de área no *Image Plate* varia, conforme a distribuição de Poisson. Quanto menor o número de fótons absorvidos, maior o grau de flutuação.

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 gerado no fósforo. 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 no *IP*, da eficiência do guia coletor de luz, da estabilidade do laser e da eficiência do conversor fotomultiplicador.

Ruídos da Estrutura do Image Plate

Esse tipo de ruído é causado pela irregularidade da camada interna do fósforo fotoestimulável. Para uma diminuição desse ruído é importante que a granulação do fósforo seja a menor possível e que tenha uma distribuição mais uniforme.

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.

Ruídos Eletrônicos

Ruídos eletrônicos causam degradação no sinal de saída, durante todo o processo, contudo com maior intensidade no processo de conversão fotoelétrico. Na Figura 2.25 pode-se observar a contribuição dos ruídos durante todo o processo de obtenção de uma imagem radiográfica.

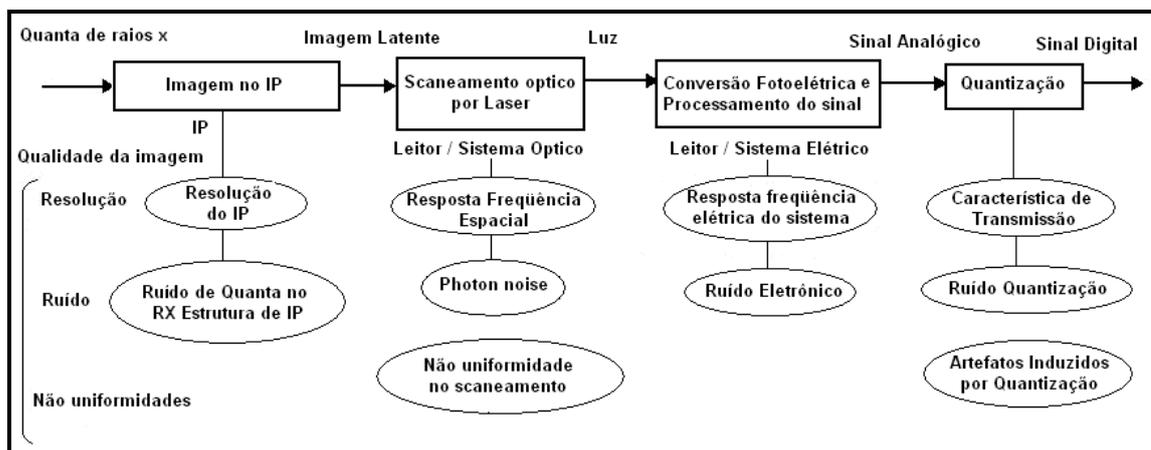


Figura 2.25 – Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da RC [22].

2.5.3.3.5 *Aliasing*

A amostragem é determinada pelo máximo da frequência espacial contida na saída da imagem. Baseado no teorema de Nyquist [39], um sinal só pode ser representado com o mínimo de garantia se este for amostrado com uma frequência de no mínimo duas vezes maior que a maior frequência do sinal de entrada. Dessa forma, a amostragem inadequada de sinais de alta frequência, acima da frequência de Nyquist, reflete sobre sinais de baixas frequências causando um sinal artificial, afetando negativamente a imagem.

Aliasing pode ser controlado na direção de varredura, com o uso de filtros passa baixa, reduzindo sinais de alta frequência. Contudo, isso não é possível na direção de sub-varredura e como foi mencionado, no processamento em frequência, pode-se perder definição de alguns detalhes na imagem, com a filtragem dessas frequências. O impacto do *aliasing* na qualidade da imagem é dependente do nível de ruído na imagem e reduz a eficiência de detecção de quanta do receptor (PSP), na qual a eficiência de detecção de quanta (DQE) representa a eficiência de detecção de informação com respeito à frequência espacial.

2.5.3.3.6 *DQE – Eficiência de Detecção de Quanta*

O DQE é um fator que indica a eficiência com que a informação da imagem detectada é transmitida e então mostrada como imagem final. Ela é definida como a razão entre o quadrado da relação sinal-ruído na saída sobre o quadrado da relação sinal-ruído da entrada ($DQE = (S/N)_{out}^2 / (S/N)_{in}^2$). Ela é dependente da eficiência de detecção quanta do fósforo e do ruído associado em cada processo na criação da imagem final. Isso inclui o número de elétrons aprisionados por número de fótons de raios X absorvido, ruído na estimulação e emissão da imagem latente, ruído na conversão fotoelétrica, ruído associado à digitalização e ruído na apresentação da imagem final. O valor ideal DQE para um detector de raios X é 1, ou seja, 100% da informação é transmitida sem degradação de ruído.

2.5.3.3.7 *Desvanecimento da Imagem (Fading)*

O desvanecimento é um fenômeno em que elétrons ou buracos gerados pelos raios X desaparecem em um processo de fosforescência excitada por energia térmica. Tipicamente um *Image Plate* irá perder cerca de 25% do sinal aprisionado em um período que pode variar de

10 minutos a 8 horas, resultando em uma diminuição da quantidade de luminescência fotoestimulada. Após um intervalo de tempo maior, o sinal continuará a desvanecer, contudo, de modo mais lento [40]. Quando uma exposição aos raios X é necessária por um longo período de tempo, a linearidade entre o tempo de exposição e quantidade de luminescência liberada pode ser prejudicada pelo desvanecimento.

Como mencionado acima, o desvanecimento do sinal depende da temperatura ambiente em que o *IP* se encontra antes do scaneamento e do comprimento de onda do laser no segundo estímulo. O grau de desvanecimento do sinal tende a aumentar com o aumento da temperatura e do comprimento de onda da luz estimulada. Por exemplo, o desvanecimento do sinal quando escaneado com um laser de diodo com comprimento de onda de 650nm é maior do que quando escaneado com um laser HeNe com comprimento de onda de 630nm [40].

2.5.4 Processamento da imagem digital

As funções de processamento de imagens digitais podem ser classificadas em duas classes, por escopo ou por resultado. Por escopo, está relacionado com técnicas de processamento. Por resultado, está relacionado com os tipos de resultado de cada técnica. Através do diagrama mostrando na Figura 2.26 pode-se ter uma idéia melhor das classes de processamento por resultado.

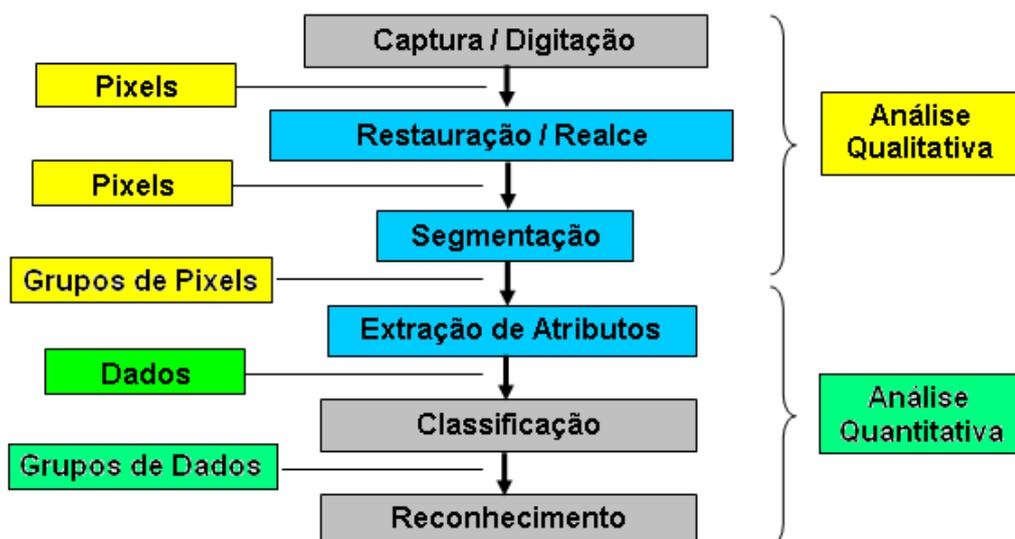


Figura 2.26 – Diagrama de seqüência do processamento digital [22].

Há um fator comum em todas as classes de processamento, este fator é qualidade. Existem duas subdivisões em qualidade de imagem: fidelidade e inteligibilidade. No primeiro caso estamos preocupados em aproximar a imagem processada da imagem original ou de um padrão estipulado que a melhor represente. No segundo caso, nos preocupamos com a informação que conseguimos extrair da imagem, seja pelo olho humano ou por algum processamento. Programas para editoração eletrônica precisam ter um cuidado muito grande com a fidelidade na representação da cor da imagem. Já programas de processamento de imagens científicas em geral não estão preocupados com a fidelidade da cor e sim a informação contida na imagem.

2.5.4.1 Restauração / Realce

Quando estamos no contexto de editoração eletrônica, ficamos normalmente situados apenas no escopo de operações de Realce ou Obscurecimento, e Restauração ou Deformação. A restauração busca compensar distorções específicas, normalmente geradas no momento de aquisição [40]. 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 conseqüências somente qualitativas.

2.5.4.2 Segmentação

Quando estamos no contexto de processamento de imagens científicas, o mais comum é queremos obter dados relacionados com os objetos presentes na imagem. Então são necessárias as operações de Segmentação que procurarão isolar regiões de *pixels*, e operações de Extração de Atributos que vão olhar para essas regiões e calcular uma série de parâmetros que as descreverão. A operação de segmentação mais comum é a limiarização por um tom de corte. Tudo que está acima deste tom vira branco, tudo que está abaixo vira preto, obtendo-se uma imagem binária.

2.5.4.3 Extração de Atributos

Utilizando imagens binárias é muito simples obter dados relevantes, ou atributos, das regiões segmentadas, tais como:

- Número total de objetos;
- Propriedades geométricas, do tipo: área, perímetro, centro de gravidade, largura máxima e mínima;
- Atributos relacionados à forma, tais como: circularidade e concavidade;
- Propriedades de luminância, tais como: nível de cinza médio de cada região (1º momento da distribuição), desvio padrão do nível de cinza (2º momento da distribuição), outros momentos estatísticos da distribuição de cada região (skewness e kurtosis);
- Propriedades associadas à textura.

As propriedades geométricas são medidas diretamente sobre a imagem binária. As de luminância são obtidas da imagem original, a partir da informação de posição dos diversos objetos, fornecida pela imagem binária [40].

2.5.4.4 Classificação

Uma vez com os parâmetros descritos acima coletados, podem-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.

Este processo é muito complexo e existem diversos níveis de automação. Os mais simples implicam em processos de agrupamento estatístico, para os quais a decisão humana é fundamental. Os mais sofisticados permitem ao computador reconhecer diferentes objetos através de técnicas de inteligência artificial com pouca ou nenhuma intervenção humana. Os processos que possuem intervenção são chamados de supervisionados.

Aqui, a palavra classificação não denota nenhum juízo de valor, mas apenas o agrupamento 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 [40].

2.5.4.5 Operações Pontuais

Operações pontuais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende apenas do mesmo *pixel* na imagem original. Neste caso a única informação que nós temos 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, correção gama, limiar (*threshold*), posterização, solarização, negativo, etc.

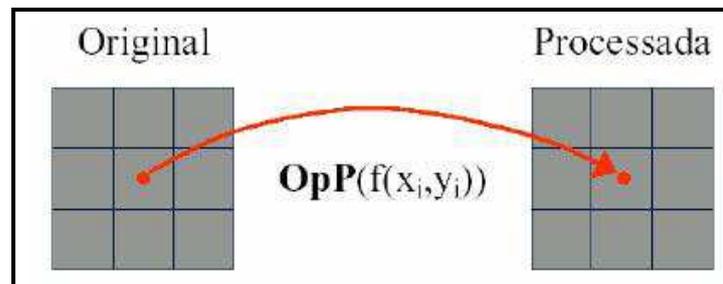


Figura 2.27 – Operações pontuais na imagem digital [40, 41].

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. Inclusive algumas operações bastante conhecidas são visualizadas nesse gráfico como funções muito simples. A operação pontual de identidade é simplesmente uma reta que mapeia todos os tons da imagem original nos mesmos tons na imagem processada. Transladando essa reta estamos simplesmente alterando o brilho na imagem. Alterando sua angulação estamos alterando o contraste, mas existem outras formas de se alterar o contraste como, por exemplo, usando uma função logarítmica que faria com que tons escuros fossem mapeados em um número maior de tons, realçando esses tons escuros, ou o inverso, uma função exponencial onde tons claros seriam realçados, Figura 2.28.

As operações pontuais que envolvem apenas uma imagem original são chamadas de unitárias, 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, divisão, etc de duas ou mais imagens. Embora as funções pontuais estejam restritas somente ao *pixel* sendo processado, o processamento em si pode levar em consideração dados globais da imagem, como por exemplo, o histograma.

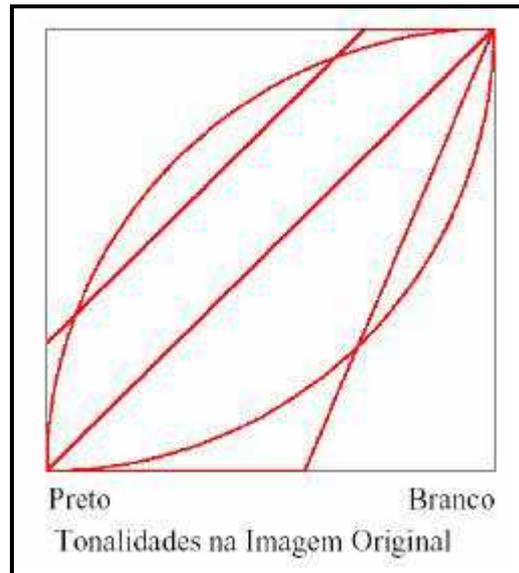


Figura 2.28 – Tonalidades na imagem digital [41].

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.

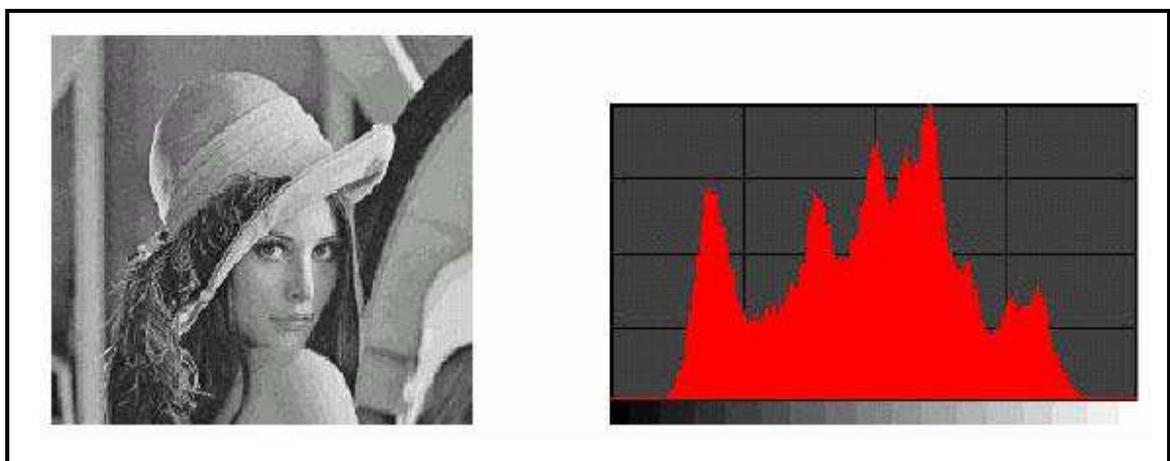


Figura 2.29 – Histograma de uma imagem monocromática [41].

2.5.4.6 Operações Locais

Operações pontuais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de uma vizinhança do mesmo *pixel* na imagem original. As operações locais mais comuns são as operações de filtragem que usam uma convolução com um *kernel* (núcleo ou cerne é o componente central do sistema operativo da maioria dos computadores) de dimensão $n \times n$, onde n é tipicamente 3, 5, 7 e 9, mas pode assumir qualquer valor. Por exemplo, no caso de $n=3$ é muito fácil de entender. Cada *pixel* da vizinhança 3×3 do *pixel* na imagem original é multiplicado por um valor e todos esses valores são somados resultando no *pixel* novo. Os valores que ponderamos a vizinhança são armazenados em uma matriz chamada, neste caso, de kernel de convolução. Operações de Blur, Sharpen, Detecção de Bordas e muitas outras são assim implementadas.

As operações que realizam deformações na grade de *pixels* utilizam como vimos à 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. Dentre as técnicas que usam interpolação podemos citar: Warping, Morphing, Resize, Stretch, Rotação, etc. [22].

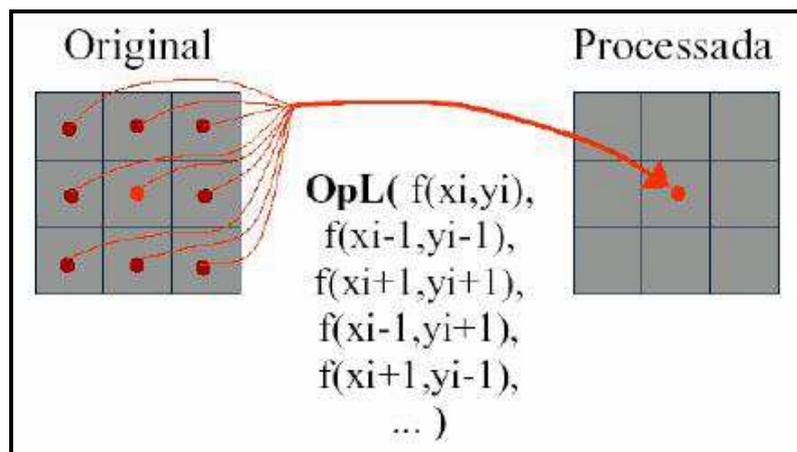


Figura 2.30 – Operações pontuais [40, 41].

Outro conjunto de operações que também podem ser consideradas como locais são as operações Morfológicas. São muito utilizadas por sistemas de processamento de imagens científicas para a etapa de segmentação, como já mencionado. Embora muito semelhantes à

convolução com um kernel, a forma com que os vizinhos são computados é ligeiramente diferente, pois usam operações lógicas, tais como *AND* e *OR*.

2.5.4.7 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* (que na realidade são muitas, dependem de que *wavelet* está sendo usada) e a Transformada de Hough. Todas essas transformadas nos dão informações muito interessantes sobre a imagem original. A Transformada de Fourier, por exemplo, é base fundamental para toda teoria de processamento de sinais e com ela pode-se realizar uma série de operações muito importantes com imagens. A Transformada de *Wavelets* irá decompor a imagem em uma estrutura de multiresolução, que é muito utilizada para compressão de imagens. A Transformada de Hough procura identificar formas geométricas na imagem, tais como retas e círculos. Esse grupo de operações é visto somente em programas de processamento de imagens científico [40].

2.5.4.8 Programa

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). 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 escâner, tais como inversão na escala de cor da imagem, realce de bordas (imagem em relevo), redução de ruído, medição de descontinuidades, e inclusive, geração de relatórios finais.

Existem diversos outros programas capazes de realizar o processamento de imagens digitais. Um exemplo desses programas é o *MatLab* que permite diversas operações de processamento da imagem, permitindo inclusive criação de programas próprios de processamento [22].

2.5.4.9 Processamento em Contraste

O objetivo do processamento em contraste é criar uma imagem com contrastes similares aos de imagens radiográficas convencionais ou aumentar a visibilidade de um detalhe específico. Esses processamentos são referidos como: Escalonamento de Tons (*Tone Scalling*), Gradação (*Gradation Process*) e Enriquecimento de Contraste (*Contrast Enhancement*).

Dentre os métodos de implementar o processamento em contraste, o mais comum consiste na técnica de re-mapear os valores individuais de cada *pixel* de acordo com um valor controlado pelo usuário. Este método utiliza uma série de parâmetros para controlar o processo, tais como:

- GT (curva básica fornecida por fabricantes de filmes),
- GC/GA (habilidade de aumentar ou diminuir o gradiente),
- GS (brilho geral).

Pode-se utilizar também a densidade média e valores controlados tabelas, ou ainda a técnica de processamento de amplificação multiescalonada de contraste da imagem (*Multi Scale Image Contrast Amplification – MUSICA*). Esse processo representa a imagem como um conjunto de coeficientes correspondente a características da imagem em diferentes níveis de decomposição. Na técnica MUSICA a imagem é decomposta de acordo com a transformada pirâmide de La Place. Dessa forma a variação do contraste é obtida com a modificação dos coeficientes de La Place [22].

2.5.4.10 Processamento em frequência

Com processamento em frequência, podem ser enriquecidos detalhes na imagem que são caracterizados pela sua frequência espacial específica. Algumas técnicas existem no mercado com esse objetivo, incluindo: Filtros Fourier, *Blurred Mask Subtraction* (Subtração de Máscara de Borrão) e filtros *Wavelet Filtering*.

Na técnica de *Blurred Mask*, uma cópia da imagem original é borrada por meio de convolução, então faz-se uma subtração dessa cópia sobre a imagem original, resultando em uma imagem que contém basicamente informações de alta frequência. Vale ressaltar que

informações de contorno e detalhes em uma imagem são representadas por altas frequências [22].

2.5.5 Características do *Image Plate*

Neste tópico serão apresentadas as principais características do *IP*, como a composição física, a eficiência de absorção dos raios X, curva característica de resposta [22].

2.5.5.1 Estrutura Física do *Image Plate*

A estrutura do *IP* consiste em um suporte de poliéster, camada de fósforo, camada protetora e outros componentes que podem variar de acordo com o fabricante. Na Figura 2.31, pode-se ver a disposição física das camadas do *IP*. A camada de fósforo é protegida por uma camada protetora EBC, que é composta por um pré-polímero de alta densidade com aproximadamente 10 μ m de espessura, garantindo assim maior proteção contra agentes mecânicos e químicos, que poderiam danificar o *IP* durante o processo de leitura ou manipulação pelos usuários.

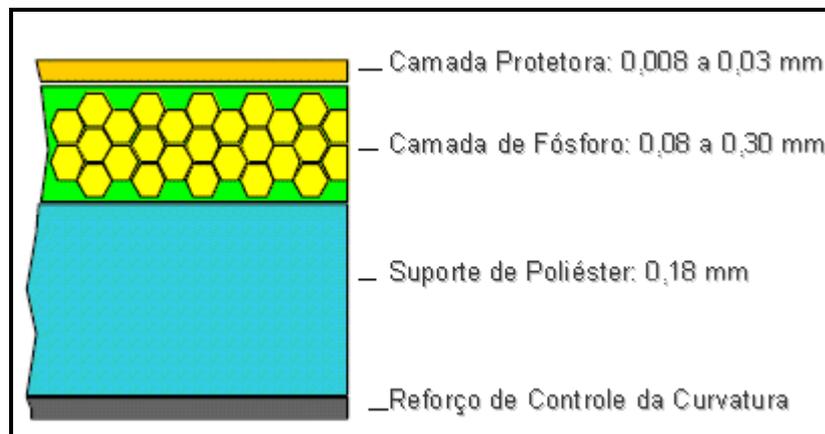


Figura 2.31 – Composição das camadas do IP [42].

A camada do fósforo fotoestimulável é comumente constituída de cristais de BaFBr:Eu²⁺, com grãos de aproximadamente 5 μ m. Essa camada além de conter os grãos de fósforo tem em sua composição um polímero orgânico de modo a unir os grãos e providenciar uma formação uniforme do filme.

A camada de suporte, entre 200 e 350 μm , além da função de proteção da camada do fósforo contra agentes externo, ela serve também para manter uma planificação do filme e apresenta uma flexibilidade. Ela é composta de polietileno (PET). 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. Em adição às camadas mencionadas acima, existem no mercado outras tecnologias, tais como, camadas eletro condutiva (que providenciam uma proteção contra eletrostática) e códigos de barra (de modo a providenciar uma numeração única ao *IP*).

Uma tecnologia patenteada pela AGFA é a camada anti-halo, que é uma camada azul que forma uma perfeita barreira contra a luz do laser, mais deixa a luminescência fotoestimulada sair, aumentando assim a sensibilidade do filme em aproximadamente 30% sem nenhuma diferença na definição. Essa camada é uma boa representação dos avanços tecnológicos na área de fluorescência.

Em geral os *IP* são oferecidos no mercado com alguns tamanhos específicos, como 35 cm x 43 cm (14"x 17"), 18 cm x 24 cm (8"x 10"), 10 cm x 43 cm (4" x 17"), embora existam outros tamanhos que variam de acordo com o fabricante e seus respectivos escaneres. Além disso, existem tipos diferentes de *IP* com relação a sua resolução, que podem ser escolhidos de acordo com a necessidade de cada usuário.

2.5.5.2 Eficiência de absorção de raios X no *Image Plate*

Conforme foi mencionado anteriormente, 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 fósforo fotoestimulável em função da energia dos fótons raios X. Na Figura 2.32, pode ser visto o gráfico, que mostra a variação da absorção em função da energia dos fótons incidentes, para dois tipos de fósforo diferentes e a variação da absorção dos fótons em função da densidade superficial para o BaFBr com densidades diferentes.

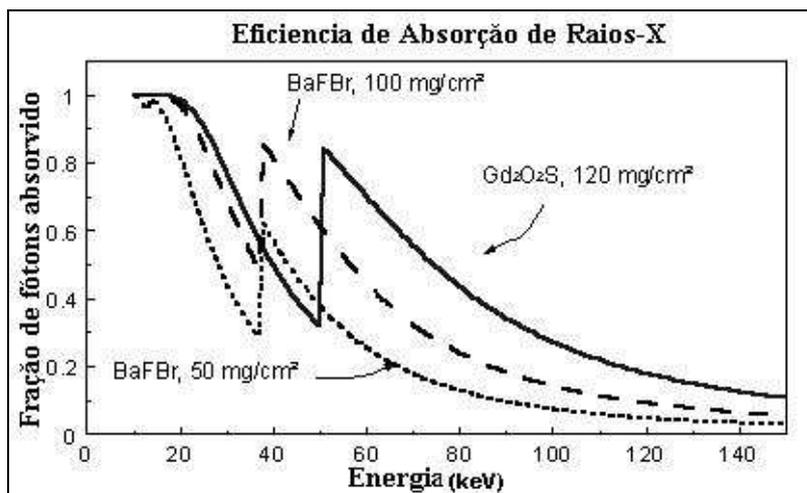


Figura 2.32 – Gráfico de absorção em função da energia dos raios X [43].

Observa-se que os fósforos 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 ambiental. Após um período de tempo sem usar o *IP*, é aconselhado que o mesmo, antes do próximo uso, seja “apagado”, 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 fósforo de BaFBr:Eu apresenta uma eficiência melhor comparada com o Gd₂O₂S:Tb (écran de terra rara), que foi uma das condições impostas durante a pesquisa do fósforo ideal: encontrar um fósforo fotoestimulável com eficiência igual ou superior aos écrans existentes. Segundo a curva de eficiência apresentada acima, o fósforo usado no *IP* 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 (μ/ρ , onde: μ representa o coeficiente de absorção do material e ρ a densidade do material). É observado que para o mesmo fósforo, porém, com densidades diferentes, existe uma variação na eficiência de absorção. O fósforo que tem uma densidade superficial maior (100mg/cm²) apresenta uma eficiência maior do que o fósforo com uma densidade superficial menor (50 mg/cm²). Dessa forma, é visto que a eficiência do fósforo pode ser aumentada com o aumento da densidade superficial (espessura do filme). Porém, como foi mencionado anteriormente, o aumento da camada do fósforo resulta na diminuição da resolução. Novas tecnologias têm estudado técnicas de aumentar a densidade superficial sem aumentar a espessura do filme.

2.5.5.3 Curva de Sensibilidade

A Figura 2.33 mostra a curva de resposta para um receptor típico de fósforo fotoestimulável comparado com um filme de ISO 400 usando um écran de terra rara. Podemos observar as principais características das placas de fósforo, como a linearidade entre a dose e a intensidade de luminescência, à ampla resposta à variação de exposição e a alta sensibilidade à radiação.

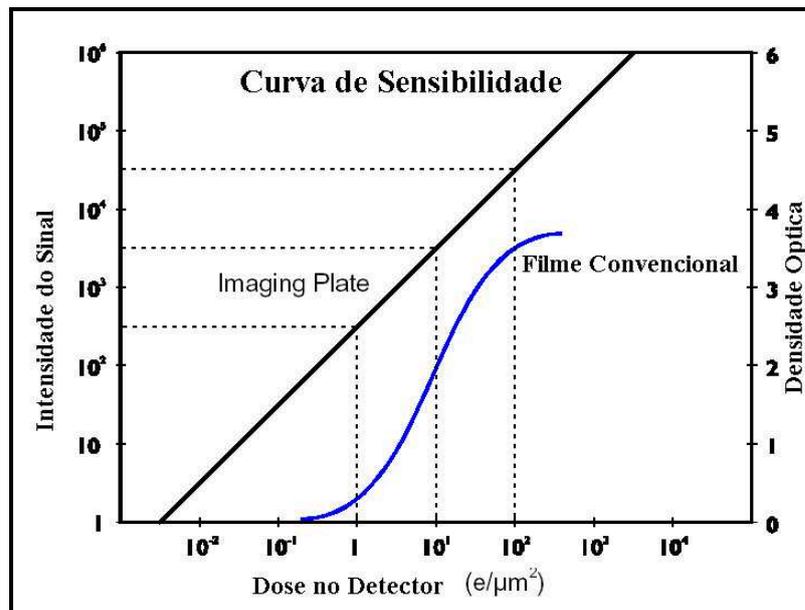


Figura 2.33 – Comparação da curva de sensibilidade entre os filmes radiográficos e *IP* [22].

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 (ISO) a faixa de exposição, para adquirir uma imagem com contraste ótimo e o mínimo de ruído. Já com *IP* isso não é necessário, devido ao fato da aquisição e a visualização da imagem ser eventos que ocorrem separadamente. Então, compensações para sub e sobre exposição são possíveis por meio de algoritmos aplicados aos dados digitais.

O fato de o *IP* ter uma ampla faixa de resposta à exposição, é possível a visualização de objetos com densidades distintas em uma mesma imagem. Devido a sua alta sensibilidade, aproximadamente 100 vezes mais sensível do que os filmes radiográficos convencionais, eliminam-se o longo tempo de exposição e também sendo capaz de detectar radiação onde filmes radiográficos convencionais não seriam.

2.5.6 Vantagens e desvantagens da Radiografia Computadorizada em comparação com Radiografia Convencional

Neste tópico serão mostradas as vantagens e desvantagens de sistemas de radiografia computadorizada e convencional, estabelecendo uma comparação entre ambos. Deve-se ressaltar que pelo menos por enquanto não é possível substituir definitivamente os filmes convencionais, mas sim adotar a técnica de radiografia computadorizada em caráter complementar, atendendo sempre as necessidades dos usuários [44, 45].

2.5.6.1 Detector

Devido a sua alta sensibilidade radiográfica, os *IP* são capazes de detectar radiações a baixos níveis, não necessitando de uma dose mínima para a obtenção da imagem. Porém, este fato torna os *IP* altamente vulneráveis a radiações espalhadas, que contribuem negativamente na qualidade da imagem.

Como citado acima, os *IP* são capazes de formar imagem com muito menos tempo de exposição inferior do que com filmes convencionais. Para inspeções industriais isso é de grande importância, pois há uma maior produtividade, permitindo a execução de várias radiografias em um curto espaço de tempo. Na área médica, a grande vantagem é a redução significativa da dose no paciente.

Assim como os filmes convencionais, os *IP* são bastante flexíveis, sendo capazes de se adaptar a praticamente qualquer geometria ou corpo de prova a ser radiografado. Com relação às dimensões, os *IP* estão limitados a alguns tamanhos específicos disponíveis no mercado, de acordo com cada fabricante e tipo de escâner. Já com filmes convencionais, é possível adaptar o seu tamanho as necessidades de cada ensaio.

Os *IP* são muito menos sensíveis a luz do que os filmes convencionais, podendo inclusive realizar radiografias sem chassis, desde que no local não haja luz excessiva. Além disso, os *IP* podem ser manipulados antes da exposição em locais iluminados, enquanto que os filmes convencionais só podem ser manipulados em locais totalmente privados de luz. Diferentemente dos filmes convencionais, os *IP* podem ser reutilizados por milhares de vezes, desde que sua manipulação seja adequada para que não haja desgaste físico do mesmo [22].

2.5.6.2 Obtenção, Processamento, Quantificação e Arquivamento das Imagens

Em sistemas de radiografia computadorizada, a obtenção da imagem é dada por escaneamento do *IP* com laser. Dessa forma, é eliminada a utilização de produtos químicos e água de lavagem, o que gera uma grande redução do impacto ambiental e de preocupações regulamentares.

Dependendo do equipamento de radiografia computadorizada, o espaço físico necessário para a realização do scaneamento das imagens é bastante pequeno, em comparação ao espaço ocupado por uma sala escura para revelação de filmes convencionais. Como já citado anteriormente, não é necessário uma sala totalmente escura para alocação do sistema de radiografia computadorizada, devendo apenas tomar cuidado para que não haja luz diretamente sobre o equipamento no momento da realização do escaneamento.

Na radiografia computadorizada, o tempo necessário para a visualização das imagens é bastante curto, basicamente o tempo necessário para scanear o *IP*. Já o processo de revelação de um filme convencional é bastante demorado, incluindo etapas de revelação, fixação, lavagem e secagem do filme antes que este possa ser visualizado.

Em sistemas de radiografia computadorizada, o processo de quantificação do sinal é direto, e acontece na conversão analógica – digital durante o escaneamento do *IP*. Para filmes convencionais, o processo de quantificação é bastante complicado e trabalhoso, incluindo equipamentos para digitalizar o filme e programas de processamento de imagem.

Com relação ao número de níveis de cinza, na radiografia computadorizada, este 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.

A manipulação da imagem em sistemas de radiografia computadorizada permite a possibilidade de múltiplas operações, devido ao fato da imagem ser baseada em dados digitais. 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 laudar as radiografias. Não há dúvida que este tipo de processo gere uma quantidade incerteza bem maior que um processo computadorizado.

O sistema de radiografia computadorizada apresenta uma faixa dinâmica com resposta linear com relação à dose de exposição e extremamente ampla, permitindo a captura de imagens de objetos complexos numa única exposição, descartando a necessidade de realizar vários carregamentos de filme ou várias exposições. Essa característica, aliada às citadas no

parágrafo anterior, também acaba poupando as radiografias mal expostas, evitando a necessidade de repetições. Na área industrial isso contribui para o aumento da produtividade das inspeções de campo, enquanto que na área médica, contribui para a redução da dose no paciente.

Na radiografia computadorizada é possível catalogar, gerenciar e armazenar as imagens eletronicamente, com a vantagem de exigirem menos espaço físico e de ter um custo menor. Além disso, as imagens podem ser recuperadas numa fração do tempo dos sistemas tradicionais de filme, mais uma vez facilitando e agilizando a tomada de decisões e as análises. Assim deixa de existir um espaço dedicado ao armazenamento de filmes radiográficos, adaptado as suas necessidades. Além disso, as imagens digitais podem ser transmitidas através da rede para qualquer usuário, evitando a necessidade de se transportar fisicamente os filmes radiográficos [22].

As imagens originais devem ser armazenadas em resolução total como liberadas pelo sistema detector. Somente imagem processamento conectada com a calibração do detector (por exemplo, correção de *off-set*, a calibração de ganho para detector, equalização e correção de pixel ruim para fornecer imagens livres de artefatos do detector será aplicados antes do armazenamento destes dados em bruto [46].

O armazenamento de dados deve ser redundante e apoiado por adequados *back-up* para garantir que os dados sejam mantidos sem perdas no armazenamento, pelo menos, 10 anos [46, 47].

A resolução dos sistemas de radiografia computadorizada é limitada por fatores como foco do laser de scaneamento e tamanho das placas de fósforo. A resolução dos sistemas de radiografias computadorizadas é comparável aos filmes de granulação grossa, tendo em geral resolução em torno de 100 μ m, podendo haver variações. Porém, ainda não há no mercado sistemas de radiografia computadorizada ou *IP* que tenham a mesma resolução que filmes convencionais de granulação fina.

2.5.7 Sistemas de aquisição da imagem digital

Existem diversos sistemas de aquisição de imagem digital, os principais são: a digitalização de filmes, dispositivos de aquisição de imagem indireta (silício amorfo) e direta (selênio amorfo) e o *Image Plate* – *IP* (Radiografia Computadorizada). Neste trabalho empregou-se a digitalização de filmes radiográficos convencionais e o *IP*.

A digitalização de filmes é um processo que consiste na conversão de uma imagem radiográfica convencional registrada em uma emulsão de filme radiográfico industrial em uma imagem digital. Esta conversão é feita através de escaneres especiais que detectam variações de intensidade de luz transmitida devido a diferentes graus de enegrecimento dos filmes radiográfico. Atualmente emprega-se a digitalização de filmes para guardar os registros das imagens.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais, instrumentos e métodos utilizados nas instalações das empresas Confab, Arctest e Nuclep.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu de uma seqüência de decisões: busca de colaboradores para que o trabalho fosse possível desenvolver, escolha do material, escolha do processo de fabricação entre fundição, forjamento e soldagem. Sendo o objetivo de este trabalho aplicar altas energias dos raios X e gama e a radiografia computadorizada – RC, necessitava ter corpos-de-prova com espessuras variando entre 50 a 200 mm para que fosse possível aplicar as radiações com altas energias e possuísse descontinuidades relevantes e não relevantes para se verificar a detectabilidade. Posteriormente, como foi obtido um CP proveniente do processo de fundição de cobre com espessura variando de 75 a 150 mm fabricado pela empresa Cecal que atendia as premissas acima. Com este CP viabilizou tanto a utilização de um acelerador linear de 4 MeV para a radiação X como também a radiação gama.

Como na Confab radiografa usando alta energia de um acelerador linear faltava ter mais uma energia de radiação para ampliar a pesquisa. A escolha recaiu por fontes de Co-60 especificada em normas para a análise da faixa de espessura do CP.

Com os apoios das empresas Arctest e Nuclep, associado à disponibilização do equipamento de radiografia computadorizada da Coppe - UFRJ o trabalho pode ser desenvolvido. As etapas dos experimentos foram executadas na seguinte ordem: primeiramente na Confab com a radiação X do acelerador linear, em seguida com radiação gama do Co-60 da Arctest e por último na Nuclep também com o Co-60. Para facilitar o entendimento das principais etapas envolvidas neste trabalho experimental, foi elaborado um fluxograma mostrando as principais etapas envolvidas neste trabalho, conforme pode ser visto na Figura 3.1.

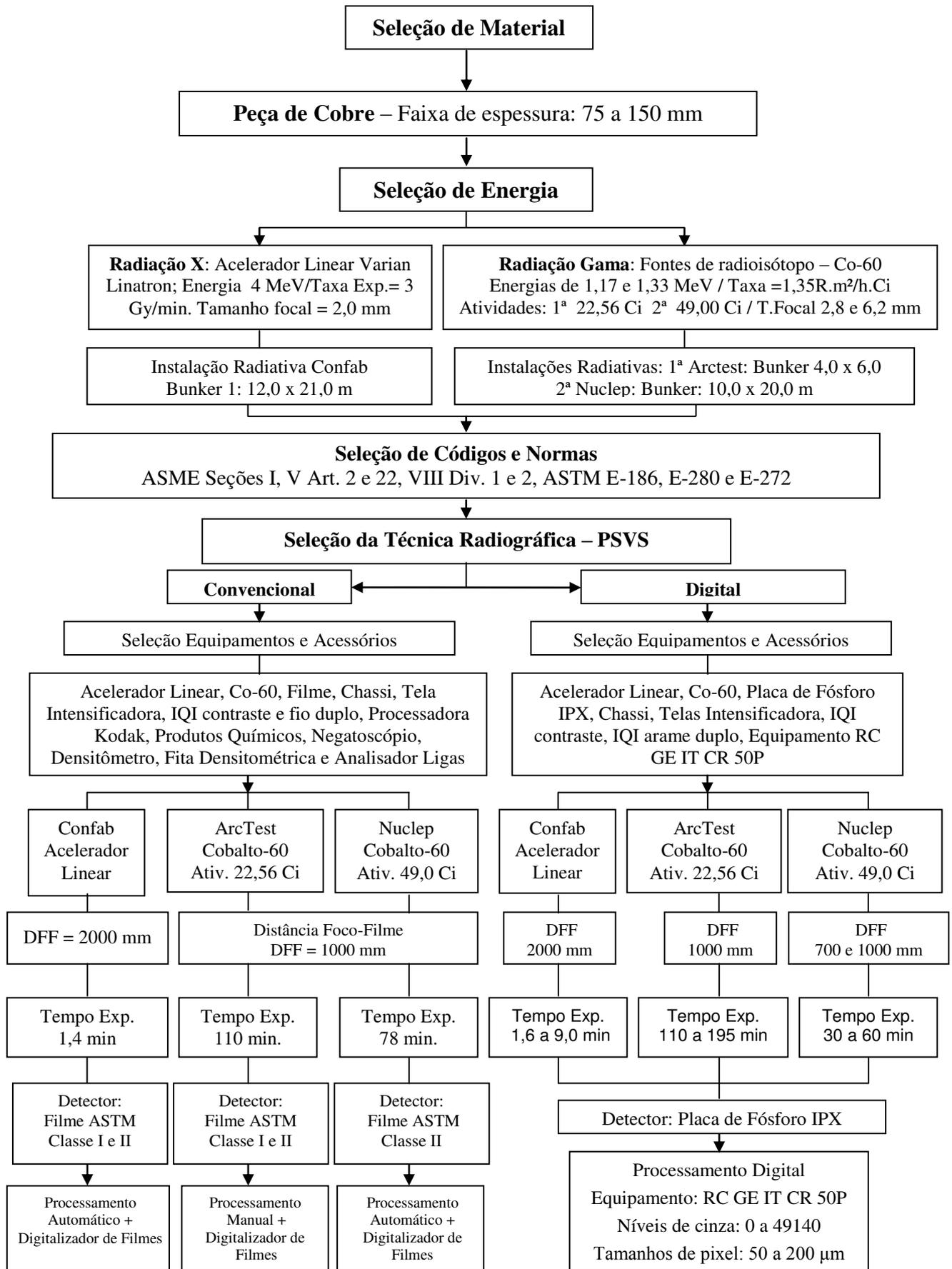


Figura 3.1 – Fluxograma geral da seqüência de etapas realizadas no presente trabalho.

3.2 MATERIAIS E INSTRUMENTOS

São apresentados os seguintes materiais e instrumentos: corpo-de-prova de cobre, as características dos equipamentos de raios X e gama, indicadores de qualidade de imagem – IQI de contraste e fio duplo, filme radiográfico industrial, telas intensificadoras de chumbo, processadoras automáticas de filmes, medidores de densidade, placas de fósforo – *Image Plate* (IP), escâner ou leitora, e programas de processamento de imagem digital.

3.2.1 Corpo-de-prova de cobre e o processo de fundição

As peças metálicas utilizadas nas construções de máquinas ou aparelhos utilizados industrialmente provêm de diversos processos de fabricação, por exemplo: forjamento, fundição, laminação, soldagem, etc. A fabricação de peças de formas complexas, econômica, requerendo poucas operações para a forma final se faz geralmente por fundição, que basicamente consiste vazar o metal em fusão nos moldes em areia ou metálicos.

Assim como em outros processos de fabricação na fundição também ocorrem discontinuidades provenientes de diversas causas. O exame das peças durante a produção é uma operação muito importante e que deve ser executada continuamente. Este é o único método que permite avisar o setor produtivo, quando surge a discontinuidade, para que se possam tomar, sem perda de tempo, todas as decisões adequadas para solucionar o problema. Cada peça com discontinuidade relevante deve ser examinada em detalhe para qualificação do processo. Exames superficiais e volumétricos permitirão estabelecer um diagnóstico adequado, e, portanto explicar as causas dos defeitos.

A importância destes exames é muito grande para o fundidor. Com efeito, a redução da percentagem de refugo desencadeia automaticamente uma série de vantagens: a qualidade da fabricação melhora; a percentagem de peças boas aumenta, e para o mesmo número de moldações, a tonelagem produzida aumenta; o custo da peça é mais baixo; os prazos de entrega podem ser mantidos constantes, e, por vezes, ser reduzidos; o rendimento da fábrica melhora e as relações entre o fundidor, os seus clientes e o seu pessoal tornam-se mais fáceis.

Os defeitos susceptíveis de serem recusados são devidos a fenômenos particularmente complexos e às vezes, é difícil definir as suas causas, bem como caracterizar os seus efeitos.

Com efeito, causas e efeitos interpenetram-se muitas vezes, e frequentemente parece mesmo, pode ocorrer uma contradição entre ambos. Por isso qualquer estudo cuidadoso de um defeito necessita, além de conhecimentos de base sólidos, paciência e bom senso.

O estabelecimento de uma classificação metódica dos defeitos é particularmente difícil. Com efeito, acontece frequentemente que alguns defeitos têm origens comuns. Pode, no entanto, ser estabelecida uma classificação em função das suas causas em três categorias principais: defeitos devidos ao metal; defeitos devidos à moldação e defeitos devidos ao acabamento das peças. O estudo de cada defeito pode ser dividido em três partes: quanto as suas origens; o seu aspecto e por último as soluções a aplicar.

O CP de nome bloco refrigerado foi fabricado em cobre atendendo a Tabela 1 – Cu-C (CC040A) da norma DIN EN 1982 [48], além da norma, são seguidos as orientações dos boletins técnicos da CEBRACO. O teor de cobre garante a propriedade de excelente material para condução térmica. No interior do bloco as serpentinas exercem outras funções. A serpentina de maior diâmetro (\varnothing 48,3 mm) é de material *inconel* por onde circula o ar de refrigeração. As ligas de inconel referem-se a uma família de ligas de Ni-Cr-Fe de alta resistência que tem excelentes propriedades de resistência térmica e à corrosão. Estas ligas contêm uma alta quantidade de níquel e podem ser consideradas como “super aços-inoxidáveis”. A finalidade da serpentina de menor diâmetro (\varnothing 17,2 mm) é para a colocação de termopar.

Durante a fabricação as superfícies externas das serpentinas devem ser posicionadas e travadas por meio de chapelins. O chapelin é um separador (espaçador) utilizado para apoiar, sustentar um núcleo na posição correta durante o vazamento do metal em fusão num molde. Chapelins habitualmente são feitos de aço revestidos de estanho ou cobre, para evitar a oxidação da superfície.

As superfícies das serpentinas devem estar com boa limpeza para uma adequada fusão com o material do bloco, sem, contudo que esta fusão danifique suas paredes. Sendo sua função principal de troca térmica é requisito básico que estas seções não apresentem discontinuidades identificadas como bolhas de gás e falta de fusão entre as paredes das serpentinas e o material do bloco para que a eficiência da troca térmica seja mantida conforme

projeto. Um dos requisitos do exame radiográfico foi também verificar o dimensionamento internos das serpentinas conforme projeto.

O CP usado na pesquisa foi fabricado na empresa Cecal Indústria e Comércio Ltda – localizada em Lorena – SP. O bloco mostrado nas Figuras 3.2 e 3.3 têm o cobre como elemento de liga de maior teor percentual.

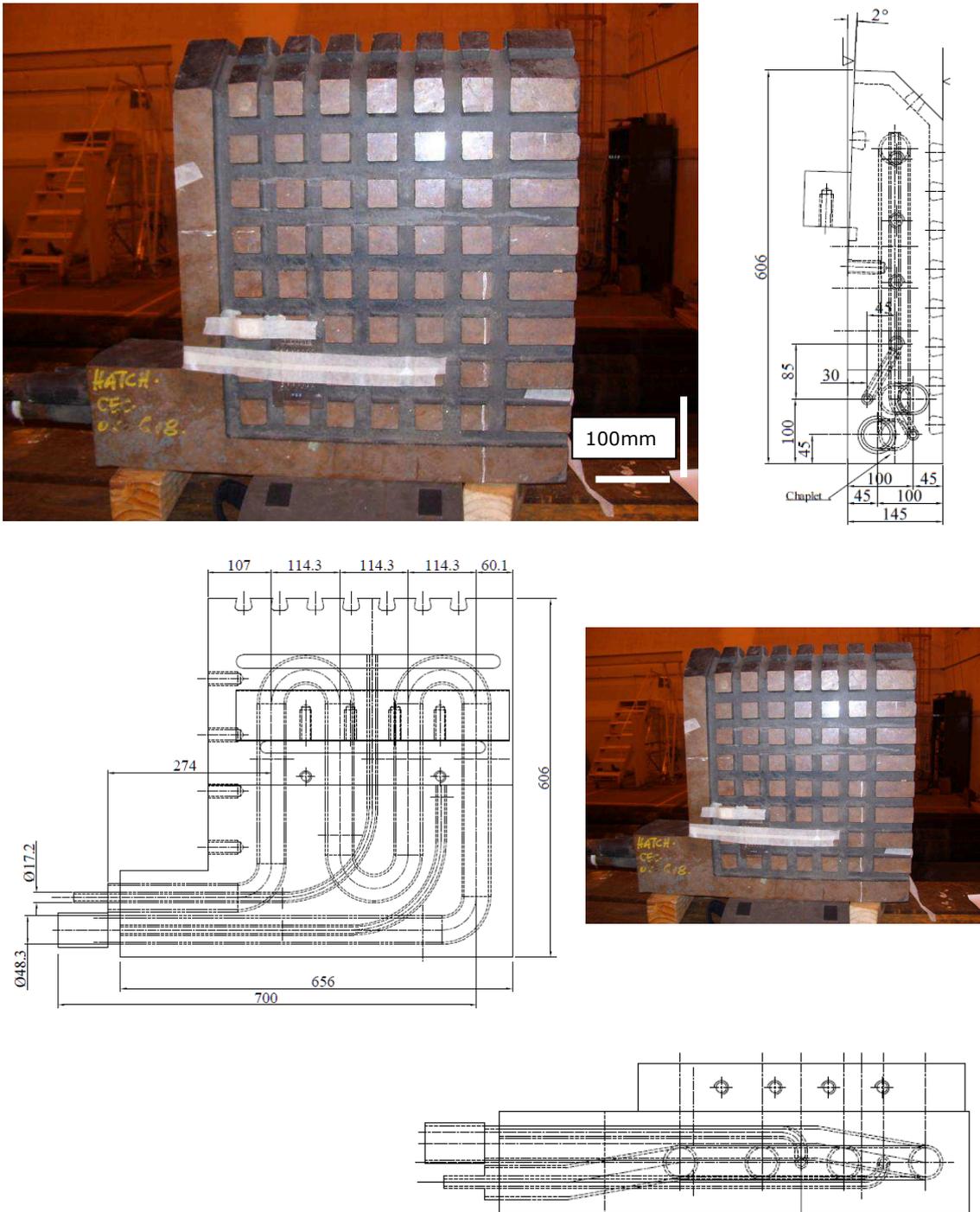


Figura 3.2 – Bloco refrigerado posicionado para ER, peso 460 kg, dimensões em mm.

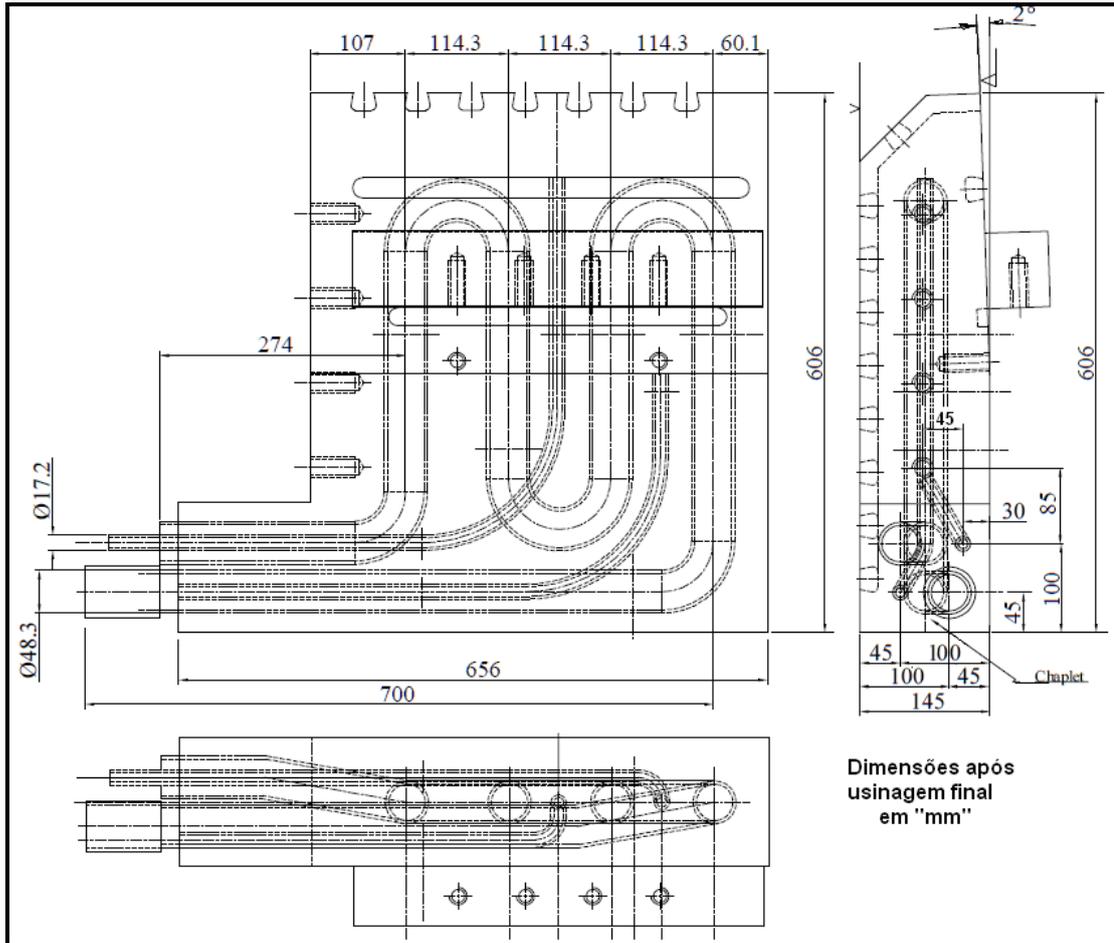


Figura 3.3 – Desenho do bloco refrigerado mostrando os detalhes das serpentinas.

Para o atendimento desta condição 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. Para a verificação dos materiais analisou-se a composição química por meio de um analisador de ligas por fluorescência dos raios X – Figuras 3.4 e 3.5. A Figura 3.4 mostra como o ensaio é realizado e a Figura 3.5 como a leitura é apresentada na tela do instrumento. O ensaio visa principalmente uma avaliação qualitativa, identificando o material ao comparar com as composições existentes na memória do instrumento. Os dados quantitativos são também disponibilizados na tela para quando houver uma incerteza na medição o controle da qualidade optar por ensaios de laboratório.



Figura 3.4 – Ensaio de PMI por meio da fluorescência de raios X.

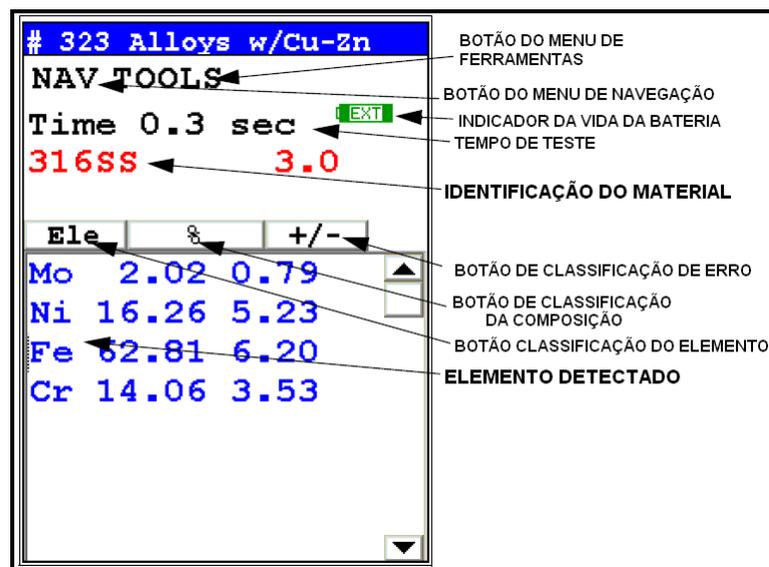


Figura 3.5 – Dados na tela do aparelho de uma amostra por meio do ensaio de PMI.

A Tabela 3.1 relata os teores dos elementos químicos encontrados no bloco, bem como no material das serpentinas. Dados obtidos por do ensaio de ensaio de PMI – *Positive Material Identification*, técnica de ensaio não destrutiva que emprega o aparelho Niton modelo XL 3t 800 [49].

Tabela 3.1 – Teores dos elementos de liga presentes no corpo-de-prova

| Elemento | Corpo do Bloco | % | |
|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Serpentina Ø 48,2 mm | Serpentina Ø 17,2 mm |
| Sb | 0,013 | 0,009 | 0,009 |
| Sn | 0 | 0,562 | 1,759 |
| Pd | 0,034 | 0,012 | 0,013 |
| Ag | 0,059 | 0,135 | 0,147 |
| Mo | 0,005 | 0,220 | 0,011 |
| Nb | 0 | 0 | 0,005 |
| Zr | 0 | 0 | 0,018 |
| Bi | 0,017 | 0 | 0 |
| Pb | 0,020 | 1,350 | 2,364 |
| Zn | 0,279 | 0 | 0,196 |
| Cu | 99,246 | 32,512 | 0,945 |
| Ni | 0 | 61,235 | 9,121 |
| Co | 0 | 0,573 | 0,020 |
| Fe | 0,253 | 1,979 | 67,81 |
| Mn | 0,007 | 0,908 | 1,148 |
| Cr | 0,032 | 17,396 | 0,070 |
| V | 0,020 | 0,004 | 0,052 |
| <i>Ti</i> | 0,013 | 0,021 | 0,651 |

Para determinadas composições de elementos químicos a leitura irá expressar dados que representam desvio na forma de “*Match Number*” ou número de correspondência na identificação da liga (adimensional). A faixa de leitura deste parâmetro pode ser expressa numa variação desde 0,0 até 10,0. Conforme o resultado da leitura é aplicado à seguinte correspondência:

- 0,0 – uma correspondência perfeita; entre 2,0 e 3,0 – correspondências prováveis (*Probable Matches*); > 2,0 até 4,0 – considerada uma boa correspondência (*good match*), e normalmente pode ser trazido mais perto de 0,0 com mais tempos de exposição da amostra ao feixe de raios X; números entre 3,0 e 4,0 como possíveis correspondências (*Possible Matches*), tendo freqüentemente um ou mais elementos fora de especificação.
- > 4,0 – resulta sem nenhuma correspondência (*no match*);

Os números “*match*” das leituras tanto do bloco como das serpentinas apresentaram valores entre 2,0 e 4,0.

3.2.2 Equipamento de raios X – acelerador linear

Os aceleradores lineares combinam as mais recentes vantagens conseguidas em mais de 40 anos de pesquisa básica em física nuclear, física de plasmas, propagação de microondas e tecnologia de alto vácuo. Os aceleradores lineares consistem basicamente de quatro partes fundamentais (Figura 3.6): canhão eletrônico, fonte de rádio frequência, tubo acelerador e uma fonte de alta tensão, normalmente designada modulador [50, 51].

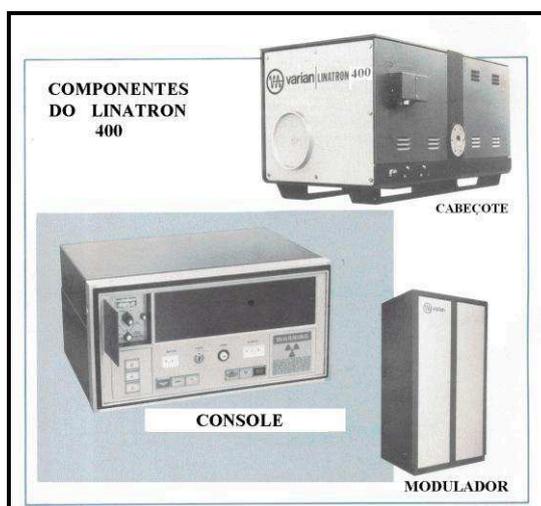


Figura 3.6 – Aceleradores Varian – partes principais do modelo Linatron 400 [50, 51].

Tabela 3.2 – Dados do Acelerador Linear Varian – Linac Modelo Linatron 400

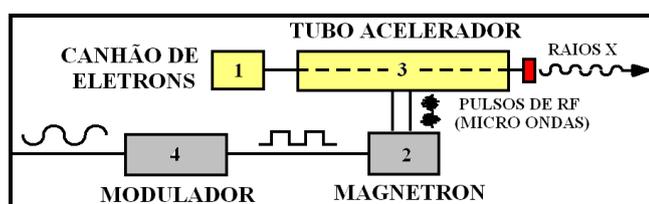
| <i>Componente</i> | <i>Cabeçote</i> | <i>Modulador</i> | <i>Console</i> |
|-------------------|-----------------|------------------|----------------|
| Altura (cm) | 74 | 222 | 25 |
| Largura (cm) | 71 | 122 | 51 |
| Profundidade (cm) | 168 | 75 | 38 |
| Peso (kg) | 900 | 680 | 27 |

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

Tabela 3.3 – Dados característicos e operacionais do acelerador [50, 51, 52]

| ACELERADOR LINEAR VARIAN – LINATRON 400 | |
|---|-------------------|
| Energia do feixe (MeV) | 4 |
| HVL – <i>Half Value Layer</i> para o aço (cm) | 2,5 |
| Raios X – em rad/min a 1 m – 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 |
| Dimensão do campo normal a 1,8 m (DFD) | 71 x 71 cm |

O canhão eletrônico atira elétrons dentro de estrutura do tubo acelerador, que consiste de um cilindro metálico especialmente desenhado, com cavidades ressonantes precisamente fabricadas. Simultaneamente, uma fonte de microondas de alta potência injeta ondas de energia eletromagnéticas dentro do tubo acelerador. Os elétrons absorvem então a energia das microondas e são acelerados até a velocidade muito próxima à da luz. O modulador fornece pulsos de alta tensão que sincronizam a potência do canhão eletrônico com a fonte de microondas (Figura 3.7) [50]. A Figura 3.7 mostra a configuração básica de um acelerador com Magnetron e tubo acelerador colinear com o feixe de radiação.

**Figura 3.7** – Configuração básica de acelerador com Magnetron e tubo acelerador [50, 51].

3.2.2.1 Fontes de microondas (Magnetron)

O Magnetron é um diodo de alto vácuo, onde é aplicado um campo magnético. Estruturalmente, o Magnetron consiste de um cátodo cilíndrico que é coaxial de um ânodo circular. Certo número de cavidades de ressonância é formado no ânodo. Essa configuração é mostrada pela Figura 3.8.

Em operação o Magnetron é pulsado com uma tensão negativa muito alta, com a carcaça do ânodo ao potencial de terra. Devido a esse pulso, o cátodo emite elétrons que se

movem no sentido espiral através do espaço de interação até o ânodo, devido à combinada influência do potencial entre o ânodo e cátodo, e um campo magnético estático aplicado externamente. Esses campos são mostrados em forma de diagramas na Figura 3.9. A Figura 3.8(b) mostra um corte seccional do Magnetron, onde podemos perceber as cavidades de ressonância e os campos magnéticos resultantes do imã permanente colocado externamente e os campos causados pelo movimento dos elétrons.

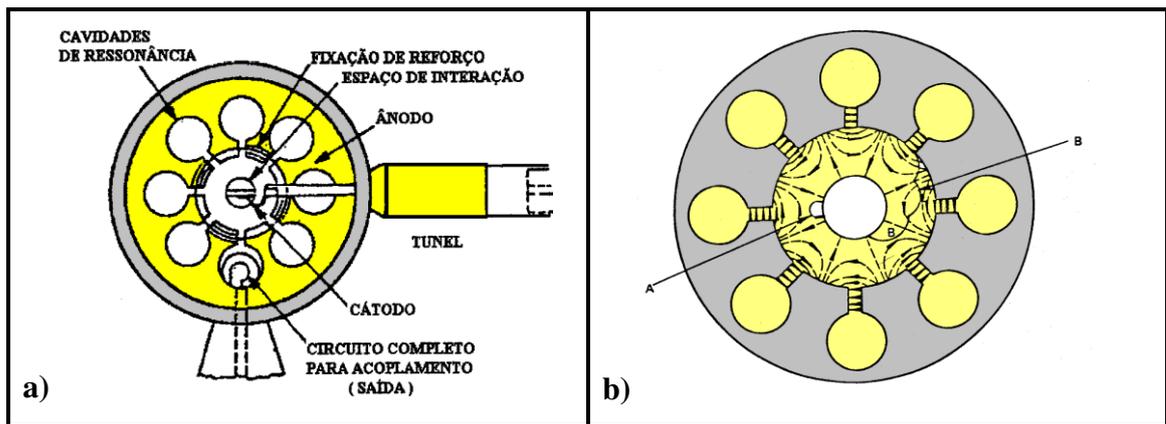


Figura 3.8 – (a) Magnetron (b) Corte seccional do Magnetron [50, 51].

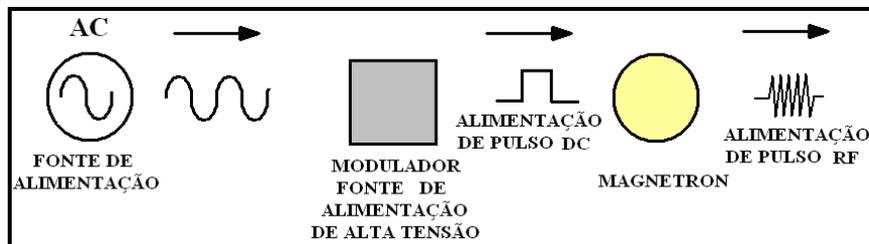


Figura 3.9 – Diagrama básico de um modulador por Magnetron.

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 [50, 51].

3.2.2.2 Planicidade e cobertura do campo de radiação

A Figura 3.10 mostra os gráficos das distribuições de intensidade dos raios X através dos feixes não compensados nas energias de 1, 2, 4 e 6 MeV. Estes gráficos ilustram o efeito radiante e o grau de nivelamento do campo. O aumento da distância fonte – filme reduz o efeito da radiação para um tamanho de determinado filme. A Figura 3.28 pode ser usada para determinar os limites desejados de intensidade na borda do campo e correspondente variação na densidade de filme que é produzido a partir do centro para a borda do campo [52].

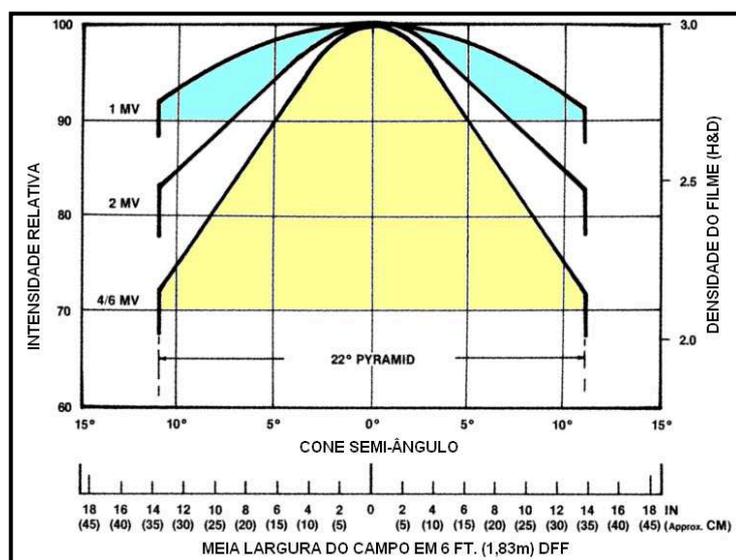


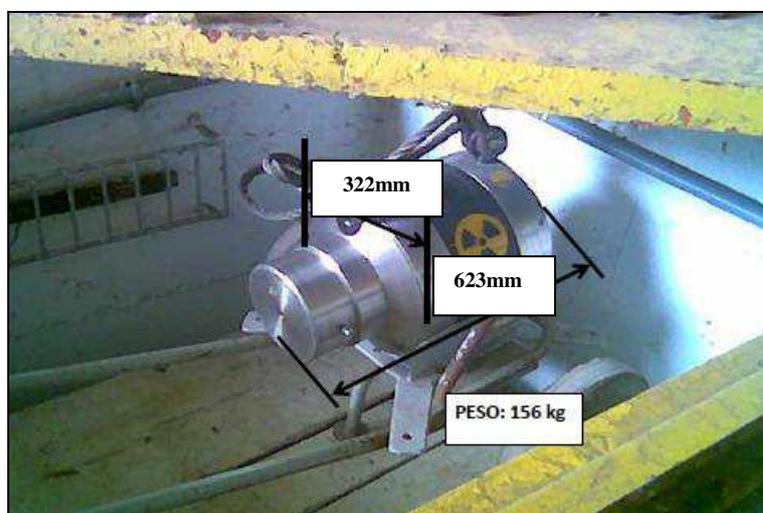
Figura 3.10 – Características das energias dos aceleradores Linatron [52].

3.2.3 Equipamento de raios gama – Cobalto- 60

As fontes de Co-60 têm muita utilização em controle de qualidade de peças fundidas, forjadas e juntas soldadas de grandes espessuras, colunas e vigas de concreto armado e outras estruturas. A Tabela 3.4 resume as características de uma fonte usada nos ensaios radiográficos. O isótopo é particularmente útil para aqueles que trabalham normalmente com raios X de 250 kv.p. (quilovolts-peak) e que têm demandas ocasionais para investigar seções mais espessas do que 2 polegadas. O Co-60 é equivalente a uma radiografia de raios X de gerador de 3 MeV, mas é claro que não é uma fonte de energia tão intensa. Ele pode ser usado para se obter boas radiografias de pelo menos 200 mm de aço [23]. A Figura 3.1 mostra o irradiador para fonte de Co-60 usado em radiografia industrial – gamagrafia.

Tabela 3.4 – Características das fontes de Cobalto-60 [23]

| <i>Elemento</i> | Cobalto |
|--|----------------------|
| 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 (Γ) | |
| mC/kg.h / GBq a 1 m / R/h.Ci a 1m ou mSv/h.GBq a 1m | 9,06 / 1,35 ou 0,351 |

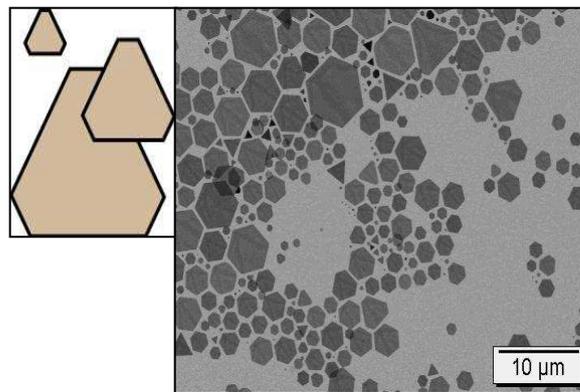
**Figura 3.11** – Irradiador da fonte de Co-60 com atividade 49,0 Ci.

3.2.4 Filmes radiográficos industriais

Os filmes radiográficos usados nos ensaios convencionais foram do fabricante Kodak. Os filmes radiográficos industriais utilizados foram os dos tipos AA 400, T 200 e M 100. A Tabela 3.5 descreve a classificação nas normas. Estes filmes Kodak possuem a tecnologia da emulsão de Grão T que conferem a película radiográfica melhor características sensitométricas que proporcionam: excelente qualidade de imagem, conversão de imagens mais eficazes, identificação de discontinuidades mais rápidas, emulsão mais estável e confiável, capacidade de processar a imagem em um ciclo automático mais reduzido e facilitar o processamento além de preservarem o meio ambiente - não utiliza metais pesados em sua formulação, Figura 3.12.

Tabela 3.5 – Classificação dos filmes radiográficos industriais utilizados [53, 54, 55]

| <i>Tipo</i> | Classificação | | |
|---------------|---------------|----------|-------------|
| | ASTM E 1815-1 | EN 584-1 | ISO 11699-1 |
| M 100 | Classe I | C2 | T1 |
| T 200 | Classe I | C4 | T2 |
| AA 400 | Classe II | C5 | T3 |

**Figura 3.12** – Filme Kodak e emulsão com a tecnologia Grão T [56].

3.2.5 Telas intensificadoras de chumbo

Durante as exposições foram usados telas intensificadoras de chumbo. Numa exposição, parte do feixe de radiação quando interage com a peça que está sendo examinada é absorvida pelo material, parte é espalhada pelo próprio material da peça, assim como parte é transmitida e denominada radiação primária que realmente interessa na formação da imagem da peça. Entretanto, ocorre que parte da radiação que pode ser espalhada em objetos que compõem o cenário da inspeção radiográfica.

Uma forma de atenuar esse efeito das radiações espalhadas e retro espalhadas no filme é por meio do uso de telas de chumbo. Essas telas, na verdade desempenham também uma função primordial que é a intensificação da radiação primária. Fisicamente elas são usadas na parte frontal intensificando a radiação primária proveniente da fonte e intensificadas devido ao arranque de elétrons das camadas eletrônicas do metal de chumbo por efeito fotoelétrico ou Compton. Estes elétrons também interagem com o filme radiográfico intensificando o efeito da radiação primária diminuindo os tempos de exposição.

Na parte traseira a função exclusiva é absorver a radiação retro espalhada e impedir que ela cause falta de definição na imagem. Há uma forma simples de controlar a incidência prejudicial da radiação retro espalhada no filme, que é por meio do uso da letra de chumbo B (*back*) colocada na tela posterior do filme [5]. O contato da telas de chumbo direto com o filme tem três efeitos principais:

- (1) Aumenta a ação fotográfica sobre o filme, em grande parte por causa dos elétrons emitidos e em parte pela radiação secundária gerada pelo chumbo.
- (2) Ela absorve a radiação de comprimento de onda mais dispersa mais do que o primário.
- (3) Intensifica mais radiação primária do que a radiação espalhada.

A Figura 3.13 mostra tela de chumbo da marca HEXALON que foram usadas nos ensaios radiográficos com base do filme de chumbo montado em plástico ou papelão flexível. Esta base é coberta com um plástico fino auto-adesivo para evitar danos durante o transporte e armazenamento, forte e flexível que por sua vez permitem um raio muito pequeno.



Figura 3.13 – Tela de chumbo: com o plástico de proteção e o papelão no verso.

3.2.6 Cálculo do tempo de exposição para fontes de Co-60

Para se conhecer o tempo de exposição para a técnica convencional empregam-se fórmulas ou régua de cálculo “*Radiographic Exposure Calculator*” da *Tech Ops (Technical Operations, Inc.)* mostrada na Figura 3.14. Usou-se esta régua e as etapas para se obter o tempo de exposição seguiram a seqüência abaixo:

- Após selecionar o tipo de fonte, filme e densidade obtiveram-se a dose em *Roentgens* “R” na tabela No. 1 que acompanha a régua;
- Com o cursor transparente coincida a linha vermelha no valor da dose da régua identificada com No. 2;

- Sem mover o cursor transparente, coincida o “0” da idade da fonte, No. 3;
- Sem mover a régua No. 3 selecionem a espessura a ser radiografada com a distância, ambas em polegada;
- Mantendo as seleções anteriores inalteradas, seleccione no No. 4 a atividade da fonte em Curies. O tempo de exposição pode ser extraído do lado oposto a atividade da fonte no No.5.

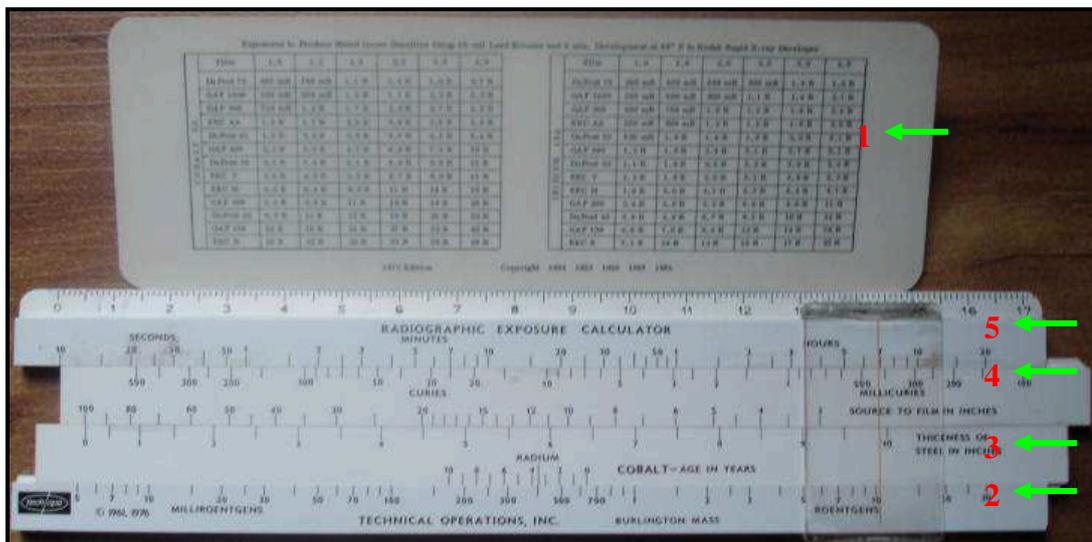


Figura 3.14 – Régua para Cálculo do tempo de exposição para o Co-60 e Ir-192.

3.2.7 Indicadores de qualidade de imagem – IQI

Para se conhecer a qualidade de imagem alcançada nas radiografias deste trabalho expressou-se em valores numéricos, o que se conseguiu mediante a utilização dos IQIs. Os IQIs são padrões referenciados nas normas que controlam a qualidade radiográfica sendo usados como uma prova de que a técnica adotada é apropriada para a finalidade a que se destina. São escolhidos conforme norma referenciada num código ou norma de construção [4, 5, 6].

3.2.7.1. IQI de furo

Os IQIs de furos são padronizados pelas normas SE-1025 ou ASTM E 1025 [57] e BS EN 462-2 [58]. Os IQIs ASTM, por exemplo, são pequenas placas metálicas de diferentes espessuras e contendo 3 furos de diâmetros 1T, 2T e 4T, sendo T a espessura da placa. A

identificação do IQI indica sua espessura em milésimos de polegadas. O material do IQI deve ser radiograficamente similar à peça radiografada e selecionado em 8 grupos de material baseado nas suas absorções da radiação e o elemento de liga predominante. Três grupos para materiais designados leves identificados como: 03 (Mg), 02 (Al), 01 (Ti) e cinco grupos para materiais designados pesados identificados como: 1 (aço carbono e aços inoxidáveis da série 300), 2 (bronze-alumínio), 3 (níquel-cromo-ferro), 4 (níquel-cromo) e 5 (bronze-estanho). A Figura 3.15 mostra um exemplo de um tipo de IQI de furo para aço.

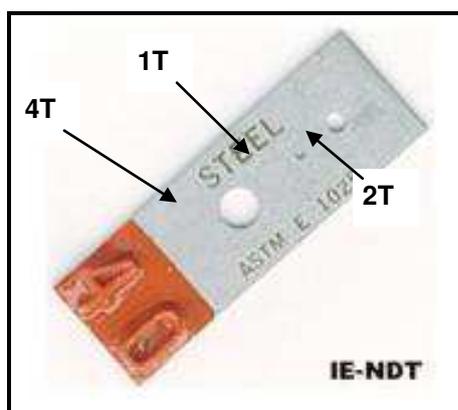


Figura 3.15 – IQI de furo – ASTM E - 1025 ou ASME SE - 1025 [57, 74].

A sensibilidade radiográfica neste caso é avaliada pelos furos que aparecem visíveis na imagem do IQI na radiografia e especificados pela norma de referenciada na norma de construção. O Código ASME Seção V, utiliza o IQI ASTM SE-1025 e define como padrão o nível de qualidade 2-2T, onde a espessura dos IQIs deve ser correspondente a 2% da espessura da peça radiografada quando usados pelo lado da fonte. Neste trabalho decidiu-se não usar este tipo de IQI.

3.2.7.2. IQI de arame

São padronizados pelas normas SE-747 ou ASTM E-747 [59] e BS EN 462-1 [60], consistem numa série de seis fios cujos diâmetros sucessivos variam em progressão geométrica. Os diâmetros dos fios são mostrados na Figura 3.16. Nos IQIs, os fios são equidistantes e embutidos em material plástico juntamente com alguns símbolos que o identificam. Por exemplo, para o IQI ASTM a identificação 02 representa o material alumínio e a letra B o jogo de arames conforme seus diâmetros. Na Figura 3.16, podem ser observados modelos de IQIs conforme as normas ASTM E-747 e BS EN 462-1. Neste trabalho foi usado o IQI da Figura 3.16 (a) que embora esta identificação não se use mais, permanece a mesma

correlação de diâmetros com a norma atual EN 462-1. O material do IQI deve ser radiograficamente similar à peça radiografada.

A sensibilidade ou contraste radiográfico é avaliado pela visualização do fio de menor diâmetro visível na área de interesse da imagem radiográfica especificado pela norma de projeto do equipamento. O Código ASME Seção V, Edição 2010 Adenda 2011, item T – 276 definem a mínima sensibilidade radiográfica que deve ser alcançada correlacionando faixas de espessura, localização e tipo de IQI utilizado para materiais [5].

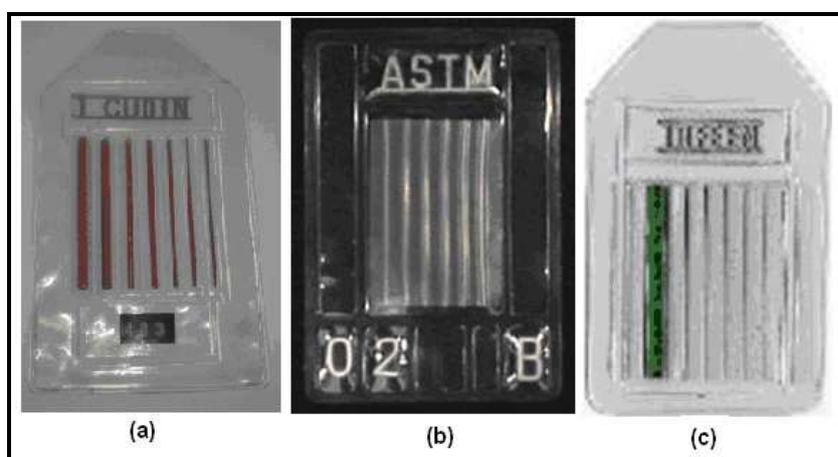


Figura 3.16 – IQIs de fio: (a) IQI de Cobre utilizado – (b) ASTM E – 747 e (c) BS-EN 462-1 [59, 60, 74].

3.2.8 Indicadores de qualidade de imagem para resolução espacial

Na radiografia computadorizada é necessário o uso de IQIs para permitir avaliações rápidas e precisas. Existem diversos tipos de IQI desenvolvidos para determinada análise como a obtenção da resolução básica espacial (SR_b). Para o levantamento da resolução espacial, faz-se uso do IQI de fio duplo, especificado na norma BS EN-462-5 [61] e ASTM E 2002 [62].

O IQI de fio duplo consiste em uma barra de plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados conforme mostrado na Figura 3.17 (b). Os pares de fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina. Suas dimensões devem corresponder ao especificado na Figura 3.17. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro dos mesmos. Na Tabela 3.6 pode ser encontrada a numeração dos elementos, a penumbra geométrica correspondente (2D), o espaçamento entre os fios (d), a

tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm). Pares de linha por milímetro é uma unidade de resolução ligada a um tamanho físico como, por exemplo, ao diâmetro do fio. O par de linhas é constituído de uma linha apagada e outra acesa.

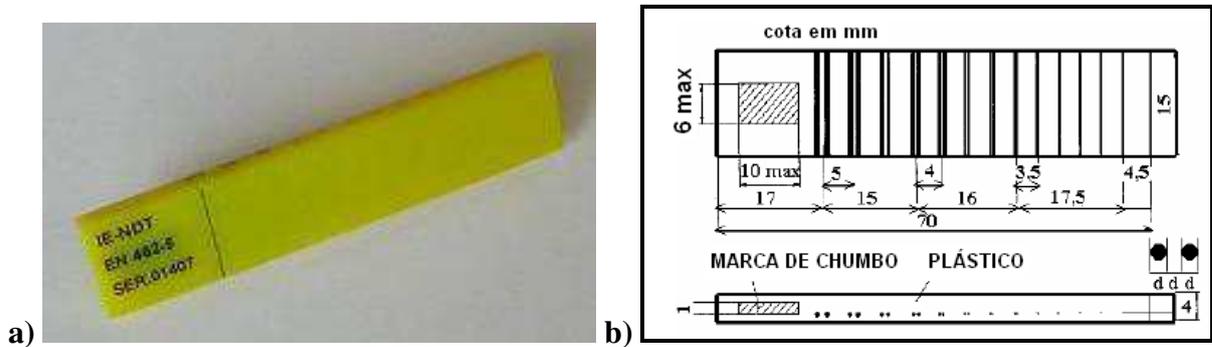


Figura 3.17 – Indicador de qualidade de fio duplo [61, 62, 74].

Tabela 3.6 – Dados do indicador de fio duplo de acordo com normas, em mm [61, 62]

| Elemento | Penumbra P_g | Diâmetro do fio ou espaço entre os fios | Tolerância da incerteza da medida | Pares de linha milímetro (pl/mm) |
|----------|-------------------|---|---|--|
| 13D | 0,10 | 0,050 | | 10,000 |
| 12D | 0,13 | 0,063 | | 7,936 |
| 11D | 0,16 | 0,080 | $\pm 0,005$ | 6,250 |
| 10D | 0,20 | 0,100 | | 5,000 |
| 9D | 0,26 | 0,130 | | 3,846 |
| 8D | 0,32 | 0,160 | | 3,125 |
| 7D | 0,40 | 0,200 | | 2,500 |
| 6D | 0,50 | 0,250 | $\pm 0,01$ | 2,000 |
| 5D | 0,64 | 0,320 | | 1,563 |
| 4D | 0,80 | 0,400 | | 1,250 |
| 3D | 1,00 | 0,500 | | 1,000 |
| 2D | 1,26 | 0,630 | $\pm 0,02$ | 0,794 |
| 1D | 1,60 | 0,800 | | 0,625 |

3.2.9 Processamento de filmes radiográficos industriais

O processamento químico dos filmes foi feito por meio manual e automático. Ele é uma etapa importantíssima na qualidade da imagem radiográfica, pois não sendo corretamente

realizado, pode ocasionar vários tipos de indicações que podem prejudicar o laudo radiográfico – Figura 3.18. O processamento químico dos filmes visa transformar a imagem latente gerada após a exposição em uma imagem visível. As etapas que constituem o processamento químico dos filmes executados manualmente estão distribuídas em 5 etapas: revelação, banho de parada, fixação, lavagem final e secagem. O processamento manual foi realizado na Arctest.

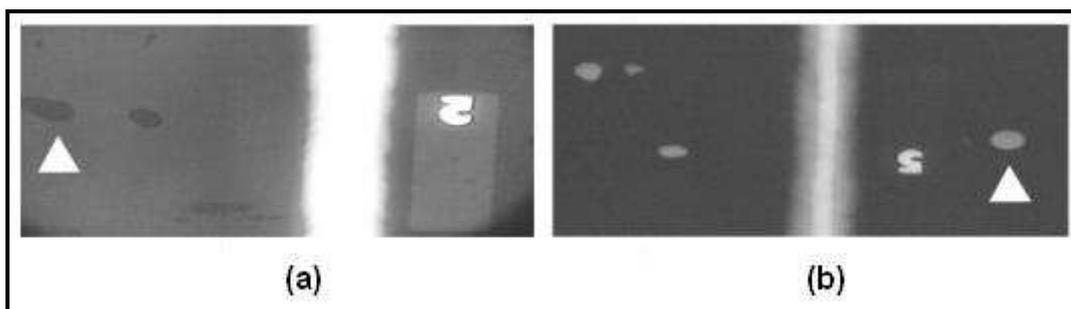


Figura 3.18 – Manchas provocadas por respingos (a) de revelador (b) do fixador, [63].

3.2.9.1 Processamento automático de filmes radiográficos

O processamento automático dos filmes por meio de máquinas próprias [6, 64] foi realizado na Confab e Nuclep. Estas máquinas por possibilitarem a correta agitação dos filmes e manterem as temperaturas das soluções, proporcionam ótima qualidade de filme revelado e são ideais para situações de grande quantidade de revelações para serem feitas, pois além de alta produtividade, diminuem os custos.

A processadora de filmes é uma máquina complexa contendo peças móveis, tais como engrenagens e rolos de transferência dos filmes entre os banhos do revelador, fixador e água usados no processamento. No processamento automático a etapa de parada é feita quando o filme é transferido entre o revelador e o fixador e etapa de secagem é feita após o filme passar pela água, Figura 3.19.

O ciclo de processamento pode ser ajustado. Na Confab devido à qualidade de imagem requerida o ciclo foi ajustado em 11 minutos, ou seja, ao colocar um filme de 430 mm de comprimento para processar ele estará pronto para laudo após 11 minutos. A processadora mostrada na Figura 3.19 (b) revela 60 filmes por hora.



Figura 3.19 – Processadora automática Colanta INDX 43 I [65].

3.2.10 Negatoscópio

Para a interpretação das imagens radiográficas convencionais utilizou-se de aparelhos conhecido como negatoscópio que são usados tanto na área médica como industrial. O negatoscópio é um aparelho dotado de iluminação especial de alta intensidade para perfeita observação dos negativos ou filmes radiográficos industriais após processados manualmente ou automaticamente, Figura 3.20.

Existem limites recomendados por normas para a intensidade mínima de luz do negatoscópio para a interpretação adequada das imagens, como exemplo, pode-se citar as recomendações do IIW: a luminância mínima deve ser de 3000 cd/m^2 (candela por metro quadrado) para um filme com densidade de 2,0 na área de interesse. Outra recomendação importante é que a luz seja branca e parcialmente difusa [6, 66]. Normas ASTM estabelecem requisitos para o negatoscópio e instalações [66, 67].



Figura 3.20 – Ilustrações do negatoscópio KOWOLUX[®] 3 [67].

Tabela 3.7 – Dados do negatoscópio KOWOLUX[®] 3 [67]

| <i>Dimensões</i> | mm |
|------------------|-------------|
| Altura | 260 |
| Largura | 150 |
| Comprimento | 600 |
| Peso | 9,0 kg |
| Densidade | Até 4,4 H&D |

3.2.11 Medidores de densidade de filmes radiográficos industriais

Para a medição da densidade radiográfica foi utilizado um densitômetro eletrônico calibrado a cada 90 dias [5, 68]. Os densitômetros eletrônicos usam uma célula fotoelétrica para medir a quantidade de luz transmitida por meio do filme, conforme é mostrado na Figura 3.21.



Figura 3.21 – Densitômetro eletrônico digital Konica Minolta PDA-100 [68].

Tabela 3.8 – Dados do densitômetro digital Konica Minolta PDA – 100 [68]

| <i>Dimensões</i> | mm |
|------------------|-----------------|
| Altura | 30 |
| Largura | 65 |
| Comprimento | 160 |
| Peso | 0,40 kg |
| Densidade | 0,0 Até 4,0 H&D |

3.2.12 Placas de fósforo – *Image Plate* (IP)

O *Image Plate* aplicado foi da GE IT, modelo IPX. Apesar de não ser o mais sensível disponível (em relação ao IPS), esse foi o que apresentou menos arranhões e imagens fantasmas (imagens latentes contidas no IP mesmo depois do mesmo ser apagado) durante os testes feitos para escolher qual seria o IP mais adequado. No processo de irradiação ele foi selado apenas no lado sensível, ou seja, lado em que a leitora faz uso do laser e coleta a luminescência com o guia coletor de luz. Para selar utilizou-se um plástico preto e fino, típico daquele de encadernação, na parte sensível e nas bordas usou-se fita isolante preta.

3.2.13 Leitora ou escâner

Este sistema consiste de uma unidade leitora de *IP*, com o apagador integrado, permitindo que após cada leitura, o *IP* seja apagado, estando pronto para uma nova exposição. O sistema comporta placas de fósforo de diversos tamanhos, com um máximo estabelecido em (14” x 17”). O IP deve ser introduzido diretamente no escâner. Portanto, o aparelho deve ser utilizado em um local em que não haja luz excessiva. Por ser um sistema relativamente

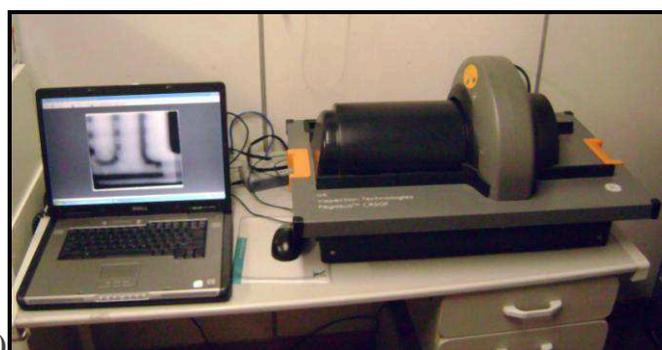
pequeno e leve, pode ser considerado um sistema portátil, o que facilita trabalhos de campo. Escaneando a placa de fósforo com tamanho do foco do laser de leitura de 50 mm gera imagens com tamanhos de *pixel* variáveis entre 50 e 200 μm e possui uma faixa de níveis de cinza que varia entre 0 e 49140. A Figura 3.22 (a) mostra um leitor de RC da GEIT modelo CR50P.

3.2.14 Estação de trabalho

A *workstation* (estação de trabalho) utilizada para processamento dos dados obtidos pela leitora é composta por um computador pessoal fabricado pela DELL, com processador Pentium 4, leitor/gravador de DVD integrado, entrada para cabo de rede, e monitor de alta resolução, utilizando como sistema operacional o Windows XP. A Figura 3.22(b) observa-se a estação de trabalho.



(a)



(b)

Figura 3.22 – (a) Equipamento de RC - GE CR50P (b) Estação de trabalho [70].

3.2.15 Programas de processamento de imagem digital.

A GEIT fornece dois programas, denominados *Rhythm Acquire* [71] e *Rhythm Review* [72] que foram utilizados na aquisição e processamento das imagens deste trabalho. O primeiro, responsável pela aquisição das imagens, fornece um arquivo em extensão .dcm, porém este só pode ser visualizado no programa *Rhythm Review*. Para a utilização em outros programas de imagem, o arquivo pode ser exportado em outros formatos, como tif ou jpeg. Este segundo programa é responsável pela visualização e processamento das imagens obtidas, possuindo para isso várias ferramentas e ainda algumas ferramentas específicas para utilização em END, como medidas de espessura de parede, medidas de profundidade, etc.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS NA CONFAB EQUIPAMENTOS

A primeira série de ensaios no corpo-de-prova de cobre foi na Confab Industrial S.A – Equipamentos, localizada no distrito industrial de Moreira César – município de Pindamonhangaba – SP. Inicialmente com a técnica de radiografia convencional utilizando uma fonte de radiação X de alta energia – o acelerador linear Varian modelo Linatron 400 de 4 MeV e como detector filmes radiográficos industriais. Na seqüência, com o mesmo arranjo com a técnica de PSVS os ensaios foram complementados usando as mesmas fontes de radiação, como detector placas de fósforo “*Image Plate*” e o equipamento leitor de radiografia computadorizada – RC CR 50P e outros equipamentos e acessórios para a execução do ensaio radiográfico.

Os ensaios radiográficos foram executados numa instalação fechada – um bunker para a realização das exposições para os ensaios radiográficos – Figura 3.23.



Figura 3.23 – Bunker 1 da Confab com dimensões L 12,0 x C 21,0 x H 12,0 m.

3.3.1 Acelerador linear

Os primeiros ensaios radiográficos executados comparando as técnicas convencionais e digitais executados foram usando como fonte de radiação um acelerador linear de fabricação da Varian, modelo Linatron – 400, com energia de 4 MeV, tamanho focal de 2 mm. O equipamento disponibiliza uma dose mínima de 0,1 Gy (10 rad), podendo ser ajustada de acordo com a aplicação em passos de 0,1 Gy no painel de controle do “console” mostrado na Figura 3.24.

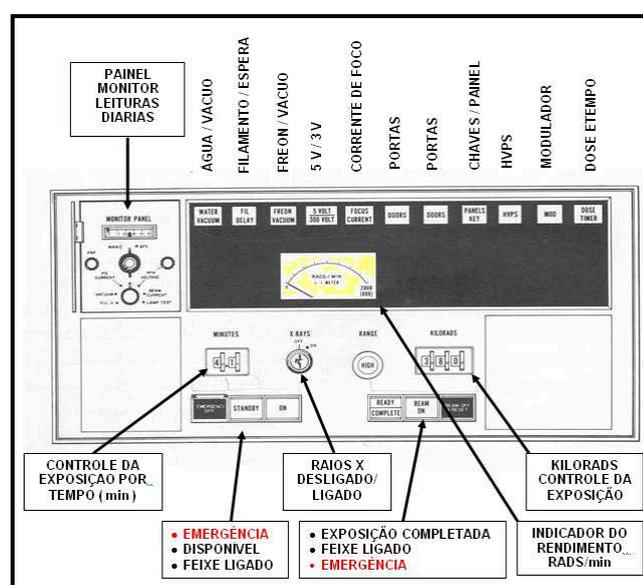


Figura 3.24 – Console onde são selecionados os parâmetros da exposição.

Após os cálculos da dose na unidade “rad” (rad corresponde a 100 erg de energia por grama de material) o operador coloca este dado ajustando no controle existente no console localizado na sala de operação do bunker. O tempo de exposição fica atrelado à dose e ao rendimento do aparelho que possui o valor máximo de até 6,0 Gy/min (600 rad/min). O manual do aparelho, modelo Linatron 400 recomenda que a operação deva ser realizada com um feixe com rendimento nominal de 4,0 Gy/min (400 rad/min). A Figura 3.25 mostra a foto do acelerador linear e na Tabela 3.9 apresenta os dados dimensionais do cabeçote localizado na sala de exposição.



Figura 3.25 – Acelerador linear Varian modelo Linatron 400 da Confab.

Os dados do acelerador linear Varian modelo Linatron 400 está descrito na Tabela 3.2 do capítulo anterior.

3.3.2 Outros equipamentos/instrumentos e acessórios

Os ensaios radiográficos na técnica convencional foram feitos de acordo com o ASTM – E 94 [5, 6] utilizados os seguintes itens: acelerador linear, IQI de contraste, IQI para resolução espacial, chassi, telas intensificadoras, filmes radiográficos industriais ASTM classe I e II, filtros de chumbo contra radiação traseira, marcadores de posição de chumbo, produtos químicos, processadora automática de filmes, negatoscópio, fita densitométrica e densitômetro. Na técnica computadorizada ocorre à substituição do filme radiográfico industrial pela placa de fósforo – IP, o processamento químico é substituído pelo computadorizado na leitora Figura 3.22(a). A etapa seguinte que é a interpretação das imagens ocorre à substituição do negatoscópio pelo *workstation* mostrado na Figura 3.22(b).

3.3.3 Aquisição e processamento das imagens dos filmes

Para a inspeção por radiografia convencional, nos ensaios com o acelerador linear, foram utilizados filmes de duas classes (ASTM classe I – Kodak M100 ou T200 e ASTM classe II – Kodak AA400), expostos em conjunto no mesmo chassi para se ter a vista composta (Figura 3.27) e separados para a técnica de vista simples.

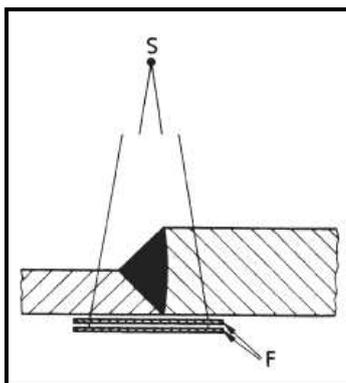


Figura 3.26 – Técnica de múltiplos filmes e vista composta [4, 5].

Para os ensaios, foi utilizado um CP de cobre com 150 mm de espessura máxima antes da usinagem final, contendo serpentinas internas, que causam na imagem grandes diferenças de absorção do feixe de radiação e por conseqüência grandes variações de densidade causando grandes dificuldades nas avaliações com uma exposição de um único filme, havendo a necessidade de várias exposições para atender cada faixa de densidade em determinada região do CP. As radiografias com acelerador linear foram realizadas a uma distância fonte-detector mantidas em 2000 mm. A dose de radiação do acelerador foi de 4,2 e 4,4 Gy (420 e 440 rad) para a radiografia convencional e 5 Gy (500 rad) para a radiografia computadorizada empregando a tensão da PMT de 600 V. Na mesma técnica foram feitos testes com a tensão da PMT de 450 V e doses de 20 e 27 Gy (2000 e 2700 rad). A Tabela 3.9 resume as doses e tempos de exposição para as duas técnicas.

Tabela 3.9 – Dose e tempos das exposições, acelerador linear, DFD de 2000 mm

| <i>Detectores</i> | <i>Dose para Técnica Convencional em Gy (tempo ≈ minutos)</i> | <i>Dose para Técnica Computadorizada em Gy (tempo ≈ minutos)</i> | |
|--|---|--|----------------------------|
| Filmes(F) Dimensões 355x430 mm | Vista Composta | | |
| 2 F: Cl. II(AA400) | 3,0 (1,0) | ----- | ----- |
| 2 F: Cl.I(M100)+ Cl. II(AA400) | 4,2 (1,4) | ----- | ----- |
| 2 F: Cl.I(T200)+ Cl. II(AA400) | 4,4 (1,47) | ----- | ----- |
| Placa de Fósforo IPX Dimensões 355x430 mm | | Tensão na PMT 450 V | Tensão na PMT 600 V |
| | ----- | 20,0 (6,7) e 27,0 (9,0) | 5,0 (1,7) |

Descontinuidades de diversas dimensões e formas, geradas durante o processo de fundição se localizam nas seções críticas eleitas aquelas juntas às paredes das serpentinas. A Figura 3.2 mostra o CP utilizado. A Figura 3.31 mostra o arranjo executado para a exposição nas duas técnicas. As exposições para a técnica convencional foram executadas sempre com a técnica de vista composta.

O ganho obtido com a técnica de vista composta é a redução do tempo de exposição. Nesta técnica, o tempo de exposição é calculado para a exposição com um único filme e em seguida é dividido pelo número de filmes colocado no chassi, caso sejam de mesma classe e tipo, ou seja, mesma sensibilidade. Por exemplo, se a exposição é feita com dois filmes Kodak AA 400 o tempo calculado é dividido por dois. 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 se obter a densidade mínima requerida no parágrafo T-282.1 *Density Limitations* [5]. A sensibilidade diferente de cada tipo de filme implica em dose integrada diferente ou tempos de exposição diferentes.

Considerando para o filme classe II (Kodak AA 400) com o fator básico 1,0 e 1,5 para o filme classe I (Kodak T200) e 3,5 para o filme classe I (Kodak M100). Pode-se, por exemplo, conforme as diferenças de espessura a composição ser feita usando o filme classe II de menor sensibilidade para as maiores espessuras e o de classe I para as espessuras menores.

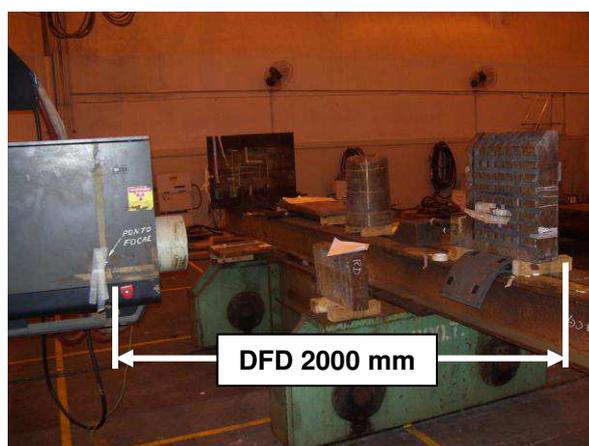


Figura 3.27 – Arranjo experimental para o ER com acelerador linear

3.3.4 Equipamento de Radiografia Computadorizada (RC)

O equipamento de radiografia industrial computadorizada utilizado foi o CR50P, de fabricação da GE IT. Para aquisição e processamento das imagens são utilizados os

programas *Rhythm Acquire* e *Rhythm Review* respectivamente. Esse sistema possui uma faixa de níveis de cinza que varia entre 0 e 49140, escaneando a placa de fósforo com tamanho do foco do laser de leitura de 50 μm e gerando imagens com tamanhos de *pixel* variáveis entre 50 e 200 μm .

3.3.4.1 Aquisição e processamento das imagens da RC

3.3.4.1.1 Placas de Fósforo:

Nesta técnica, de mesma forma no tratamento com os mesmos cuidados tomados com o manuseio do filme radiográfico industrial, o manuseio das placas de fósforo “*Image Plate*” é também um ponto fundamental para obter um resultado satisfatório na radiografia computadorizada – Figura 3.28. As placas de fósforo foram selecionadas observando a ausência de danos que gerem artefatos na imagem, como arranhões, pontos brilhantes ou quaisquer outros que venham a induzir erros de interpretação ou prejudicar a qualidade da imagem radiográfica computadorizada. As placas de fósforo selecionadas estavam armazenadas em ambiente e em condições para sempre garantir a integridade para uso nos ensaios subseqüentes. Os artefatos são defeitos no processamento do filme que comprometem o resultado final da imagem, podendo resultar em informações perdidas ou mascaradas. Há numerosos tipos de artefatos derivados de diversas fontes na aquisição da imagem, como o processador, o desempenho do técnico de radiologia, a leitora da placa de fósforo, todos resultando na degradação da imagem obtida.

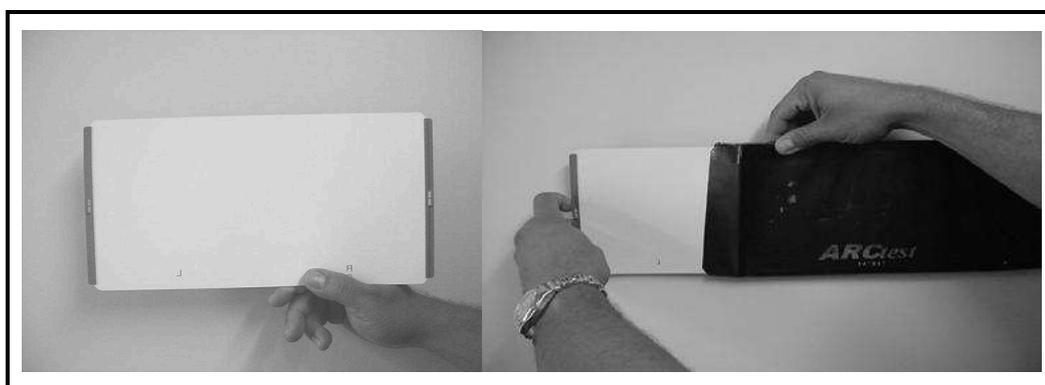


Figura 3.28 – Cuidados e armazenamento do *Image Plate* no chassi.

A remoção da imagem latente, para exposições subseqüentes foi feita com a exposição da placa de fósforo à luz branca de alta intensidade. Para a determinação da duração mínima do processo de remoção da imagem, ao final do processo de remoção da imagem as placas foram novamente lidas pelo escâner. Estes cuidados foram executados no início de cada etapa dos ensaios e realizados nas primeiras 5 (cinco) exposições, e a cada vez que houve mudanças em algum dos parâmetros de ensaio.

Atentou-se para a verificação da ausência na imagem lida de quaisquer resquícios de uma imagem anterior. As placas de fósforo que permaneceram mais que 2 (duas) semanas sem uso, foram novamente submetidas à luz branca de alta intensidade antes de uma nova exposição. Durante o escaneamento das placas de fósforo no equipamento leitor foram feitas em ambiente com luz indireta sobre a placa. O nível de iluminação máximo foi mantido em 10 lux.

3.3.4.1.2 *O processamento da Imagem da RC:*

Para a conversão da imagem latente em visível no escâner foi realizado em ambiente seco e limpo e com temperatura inferior a 28 °C como recomenda o fabricante. Observou-se um intervalo de tempo entre a exposição e a leitura das placas mantidas de no máximo dez minutos para se evitar o desvanecimento da imagem latente (“*fading*”).

3.3.4.1.3 *As condições para o laudo da RC:*

A sala utilizada na avaliação e laudo das imagens foi mantida uma iluminação máxima de 50 lux. Esta medida foi tomada a uma distância de 100 cm do monitor desligado. As placas de fósforo após a leitura foram reaproveitadas. Elas foram apagadas pelo próprio sistema leitor, e mantinham condição para reuso em uma nova exposição radiográfica computadorizada.

As Figuras 3.24 (a) e 3.24 (b) mostram o equipamento de radiografia industrial computadorizada CR50P. Nos ensaios foi utilizada uma placa de fósforo de alta resolução, denominada IPX, também fabricada pela GE IT. O tamanho do pixel do escâner foi mantido fixo em 50 μm e a tensão da fotomultiplicadora em 600 V.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS COM FONTE DE Co-60 DE 22,56 Ci

3.4.1 Fonte de Cobalto-60

A segunda série de ensaios foi realizada nas instalações da empresa Arctest Serviços Técnicos de Inspeção e Manutenção Industrial Ltda, município de Barão Geraldo – SP. Para estes ensaios comparativos entre as técnicas foi usada uma fonte radioativa de Cobalto-60 com atividade de 22,56 Ci e dimensão focal de 2,0 x 2,0 mm. Os ensaios foram realizados num bunker mostrado na Figura 3.29(a).



Figura 3.29 – (a) Bunker da Arctest, área de exposição de 3,0 x 3,0 (b) Arranjo para ER.

Poucos experimentos foram executados devida a espessura praticamente no limite superior da energia para fontes de Co-60, baixa atividade da fonte para esta espessura e tempos de exposição longos. As radiografias com Co-60 foram realizadas a distância fonte-detector foi mantida em 1000 mm. Os tempos de exposição foram de 110 minutos para a radiografia convencional em vista composta com filme ASTM classe II e 195 minutos com o filme classe I. Para a radiografia computadorizada o tempo de exposição foi de 150 minutos. Os dados estão descritos na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Dose e tempos das exposições, fonte Co-60 com 22,56 Ci, DFD de 1000 mm

| <i>Detectores</i> | <i>Dose para Técnica Convencional (tempo minutos)</i> | <i>Dose para Técnica Computadorizada (tempo minutos)</i> |
|--|---|--|
| Filmes (F) Dimensões 355x430 mm | Vista Composta | |
| 2 F: Cl. II (AA400) | (110,0) | ----- |
| 2 F: Cl.I (M100) + Cl. II (AA400) | (195,0) | ----- |
| Placa de Fósforo IPX Dimensões 355x430 mm | Tensão na PMT 600 V | |
| | ----- | (150,0) |

3.4.2 Detetores para a técnica convencional e digital

Nestes ensaios com a técnica convencional foi empregada a técnica de vista composta devido o tempo de exposição muito longo para um único filme, 220 minutos. Foram utilizados então dois filmes ASTM classe II tipo Kodak AA-400 que além de se beneficiar da técnica de vista composta para espessuras menores da região das serpentinas o tempo de exposição foi reduzido para 110 minutos. Após a obtenção das imagens e após processamentos manuais, estas foram digitalizadas.

Para avaliação das discontinuidades da técnica convencional empregou-se a interpretação empregando a técnica de vista simples nas seções de menores espessuras e da vista composta das seções com maiores espessuras. Máscaras foram feitas utilizando o negatoscópio. Depois de obtido os resultados na técnica convencional o CP foi radiografado com a técnica computadorizada empregando o equipamento de radiografia industrial computadorizada CR50P da GE IT.

3.4.3 Indicadores de qualidade de imagem

Além da peça a ser inspecionada, foram radiografados juntos com esta o IQI de arame de cobre (EN 462-1) [60], para determinar a sensibilidade da imagem e o IQI de fio duplo (EN 462-5) [61], para avaliar a resolução espacial da imagem. A Figura 3.29(b) mostra o arranjo experimental utilizado.

3.5 ENSAIOS REALIZADOS COM A FONTE DE Co-60 DE 49 Ci

A terceira série de ensaios foi realizada nas instalações da empresa Nuclep – Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A, Itaguaí – RJ utilizando uma segunda fonte de Co-60 de maior atividade que a fonte da Arctest. As radiografias com Co-60 foram realizadas também em um bunker apropriado de dimensões L 10,0 x C 20,0 x H 12,0 m. A fonte radioativa de Co-60 com dimensões de 4,2 x 4,6 mm e atividade de 49,0 Ci. A Figura 3.30 mostra a preparação do arranjo para os ensaios onde pode ser visto o irradiador contendo a fonte, a mangueira frontal até o colimador e o operador fixando o detector no CP.



Figura 3.30 – Preparação para o ensaio com o Co-60 nas instalações da Nuclep.

Para os exames, foi utilizado o mesmo um corpo-de-prova de cobre com 150 mm de espessura máxima. A Figura 3.31 mostra o corpo-de-prova utilizado, dimensões em mm..

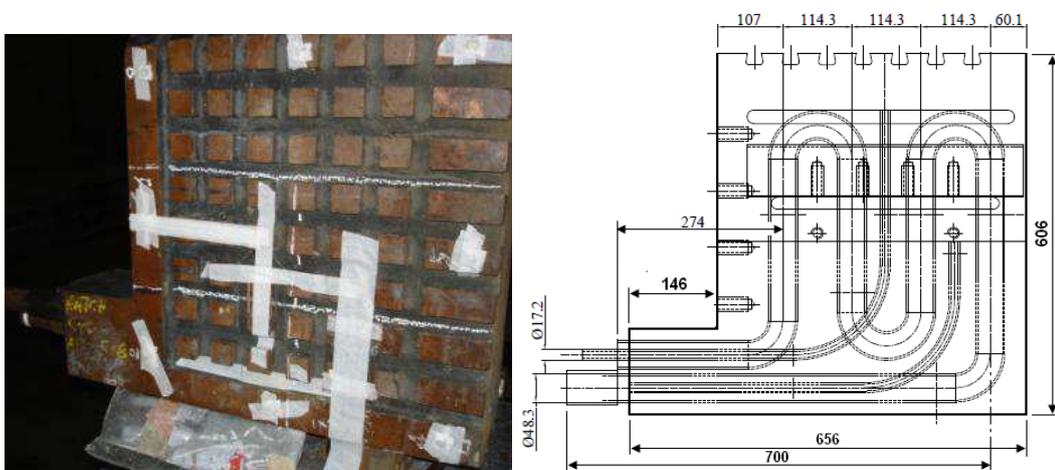


Figura 3.31 – CP preparado para o ER com o Co-60 antes da usinagem dos ressaltos – em mm.

Posteriormente foi eleita uma região preferencial da peça onde se concentraram as avaliações de sensibilidade e detectabilidade para ser usinada. O objetivo foi estender as avaliações com as duas técnicas retirando os ressaltos para ficar apenas com as interferências das serpentinas e também adequar a espessura de cobre para a energia do Co-60.

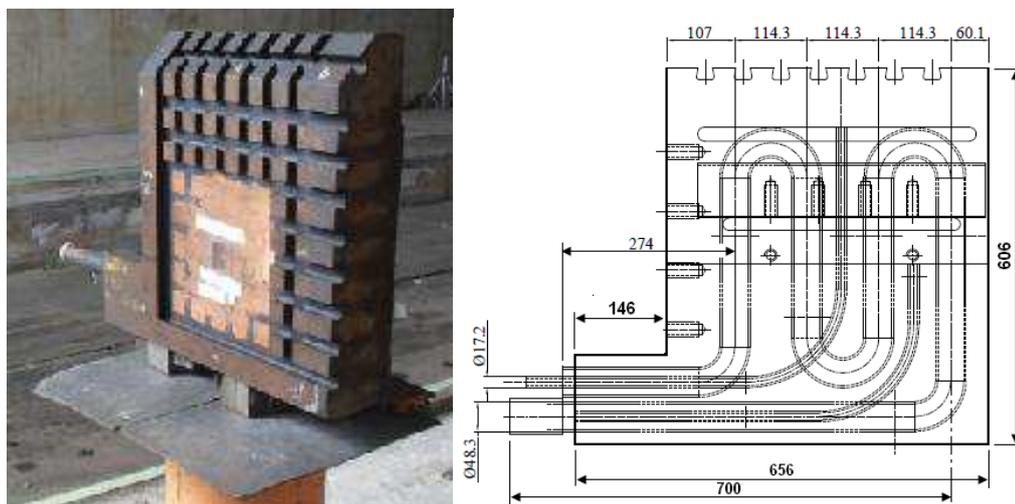


Figura 3.32 – CP preparado para o ER com o Co-60 após da usinagem dos ressaltos.

A distância fonte-detector (DFD) foi mantida em 1000 mm para a radiografia convencional e 700 mm para a RC. Os dados da exposição podem ser vistos na Tabela 3.11 abaixo. Para as radiografias computadorizadas foram utilizados o tempo de 30 minutos nas DFD de 1000 e 700 mm.

Tabela 3.11 – Dose e tempos das exposições, fonte Co-60 com 49,00 Ci, DFD de 1000mm

| <i>Detectores</i> | <i>Dose para Técnica Convencional (tempo minutos)</i> | <i>Dose para Técnica Computadorizada (tempo minutos)</i> |
|--|---|--|
| Filmes (F) Dimensões 355x430 mm 2 F: Cl. II (AA400) 2 F: Cl.I (M100) + Cl. II (AA400) | Vista Composta | |
| | (78,0) | ----- |
| | (78,0) | ----- |
| Placa de Fósforo IPX Dimensões 355x430 mm | | Tensão na PMT 600 V |
| | ----- | (60,0) |
| | ----- | (30,0) |
| | ----- | (30,0) DFD = 700 mm |

3.6 AVALIAÇÕES DAS DESCONTINUIDADES NAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS

3.6.1 – Interpretação das imagens

Após a execução das exposições e processamentos das radiográficas convencionais e computadorizadas, elas foram laudadas seguindo a norma de fabricação para o fundido ASTM E – 272 [12] aplicando os critérios de aceitação das descontinuidades. Os padrões radiográficos para peças fundidas são filmes radiográficos convencionais de peças com descontinuidades produzidas e radiografadas com fontes de energias adequadas a espessura do fundido. As imagens estão disponíveis em padrões e o seguinte procedimento para a avaliação das imagens:

- a) As radiografias de produção devem ser avaliadas comparando com as referências selecionadas. Descontinuidades mostradas que são iguais ou menos graves do que aquelas radiografias da referência aplicável, o fundido deve ser considerado radiograficamente aceitável, se as radiografias mostrarem uma descontinuidade de maior gravidade do que a radiografia de referência aplicável, o fundido deve ser rejeitado até que seja satisfatoriamente reparado.
- b) Se mais de um tipo de descontinuidade é mostrado na mesma radiografia, o tipo predominante de defeito isolado rege a aceitabilidade, a menos que a gravidade representada pela combinação de tipos de descontinuidade é tal para tornar o estado geral do fundido inaceitável para a aplicação pretendida.
- c) Quando duas ou mais categorias de descontinuidades estão presentes em igual extensão para o nível máximo permitido, como mostrado nas normas pertinentes para cada categoria, então, parte do fundido deve ser julgado inaceitável até que seja satisfatoriamente reparado.
- d) Em geral, não há limite quanto à extensão das descontinuidades aceitáveis em um fundido, desde que na área de 127 x 152 mm de todo o fundido contém descontinuidades que excedem a gravidade de defeitos nas radiografias de referência aplicável.

- e) Quando a imagem de referência consiste de uma coleção de descontinuidades, como no caso de porosidade, por exemplo, a aceitabilidade pode ser baseada nos seguintes itens:
- 1) O tamanho total das descontinuidades presentes em ambas a referência radiográfica e a radiografia de objeto;
 - 2) O presente tamanho máximo de defeito;
 - 3) O espaçamento entre descontinuidades, ou
 - 4) Uma combinação destes ou outros critérios. Estes critérios devem ser determinados com base na aplicação em particular ou em parte sob consideração e deve ser especificado por acordo entre o comprador e o fornecedor.
- f) Um padrão de difração mosqueada pode ocorrer em filmes de peças e seções onde o tamanho de grão é grande o suficiente para ser uma fração significativa da espessura do material. Se a difração mosqueada é suspeita, há uma série de maneiras de demonstrar sua presença. O padrão de difração mosqueado mostrado, nestes casos, é dependente principalmente da geometria e orientação dos cristais à radiação incidente. Portanto, para um modelo que, qualquer mudança nesta orientação vai afetar drasticamente o padrão de difração. Isso pode ser feito por uma ligeira inclinação da peça de 1 a 5° com relação ao feixe de radiação ou simplesmente mudando a linha central do feixe de radiação para um local um pouco diferente da primeira exposição.
- g) Indicações de qualquer porosidade, rechupe ou outra descontinuidade irá se mover apenas ligeiramente, enquanto qualquer apresentar padrões mosqueados vai mudar drasticamente. Se for necessário ou desejável eliminar as manchas, o kV pode ser aumentado para reduzir a quantidade de radiação de difração. No entanto, o cuidado deve ser usado para que o kV não seja aumentado ao ponto que a sensibilidade é reduzida em excesso. Se a difração mosqueada é demonstrada estar presente em uma radiografia, esta condição não deve ser considerada como prejudicial na avaliação da radiografia.

3.6.2 Descontinuidades presentes em peças fundidas de cobre

- a) Porosidades – aparecem na forma arredondada ou alongada, manchas escuras que podem ocorrer individualmente ou em grupos, ou distribuído ao longo da seção do

fundido. Elas geralmente são causadas por ar aprisionado ou gases do molde, Figura 3.33.

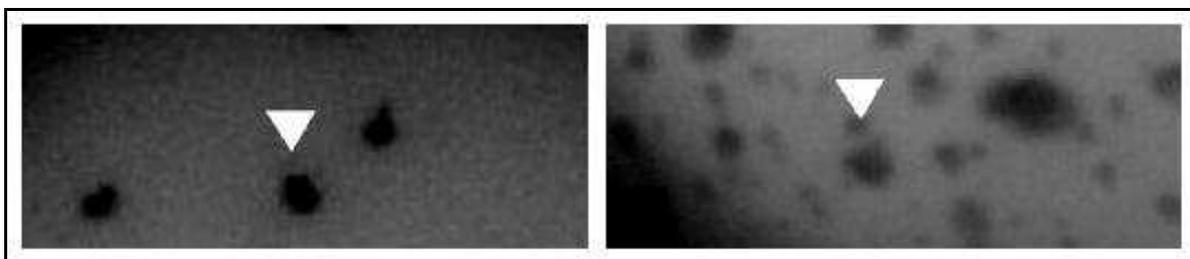


Figura 3.33 – Exemplo da imagem de porosidade [12, 13, 14, 63].

b) Rechupe - Contração geralmente associado com alimentação inadequada e se manifesta nas seguintes formas indicação diferente:

b.1) Rechupe esponja: encontrado em seções mais espessas, geralmente mais de 50 mm. Ele aparece na radiografia como uma área escura ou áreas, textura rendada, geralmente com um contorno difuso, Figura 3.34.

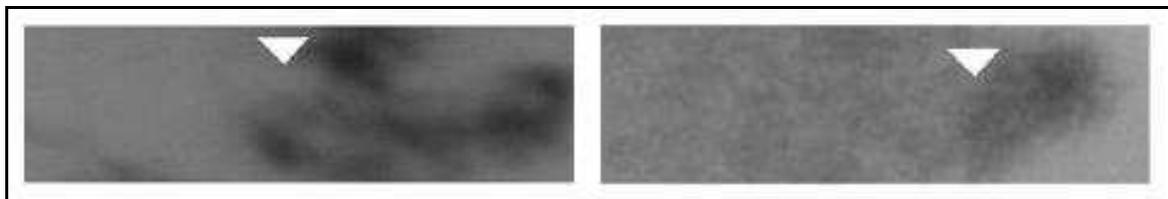


Figura 3.34 – Exemplo da imagem de rechupe do tipo esponja [12, 13, 14, 63].

b.2) Rechupe linear: normalmente, uma estrutura contínua de linhas conectadas, ramificados ou em rede de comprimento variável, largura e densidade, Figura 3.35.

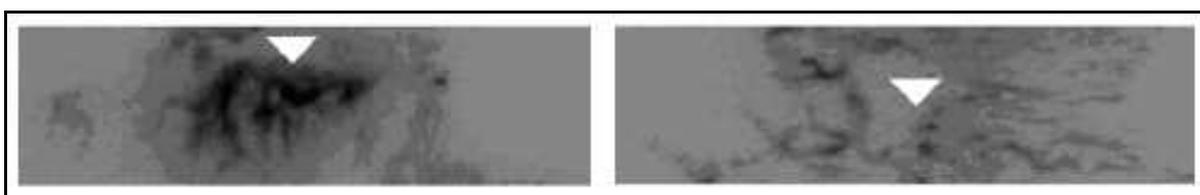


Figura 3.35 – Exemplo da imagem de rechupe do tipo linear [12, 13, 14, 63].

- c) Trinca de contração: similarmente aparecendo "trinca de contração" Figura 3.36 e "rechupe linear" têm características distintas. As informações da Tabela a seguir são apresentadas como um guia para intérpretes para minimizar a confusão na distinção trinca de contração do rechupe linear:

Tabela. 3.12 – Comparação entre as discontinuidades Trinca de Contração e Rechupe Linear.

| Trinca de Contratação | Rechupe Linear |
|---|---|
| Geralmente ocorrem isoladamente | Geralmente são indicações múltiplas |
| Propagam-se na ou perto da superfície | Aparece e se propagam na ou perto da metade da seção. |
| Geralmente ocorrem em locais quentes ou alterações seção | Ocorre freqüentemente em seções uniformes também |
| Ocorrem quando gradientes de temperatura são altos | Ocorre em gradientes de temperatura baixos |
| Ocorrem transversais à direção de maior tensão | |
| Só podem ser solucionadas, alterando o padrão de tensão ou padrão térmico | Rechupe sempre pode ser solucionado através de alimentação suficiente de metal. |



Figura 3.36 – Exemplo da imagem de trinca de contração [12, 13, 14, 63].

- d) Inclusões não metálicas:
- 1) Areia: indicações irregulares e em forma angular, mais denso do que o fundo, causada por aglomerados de partículas de areia presa ou seixos, Figura 3.37.

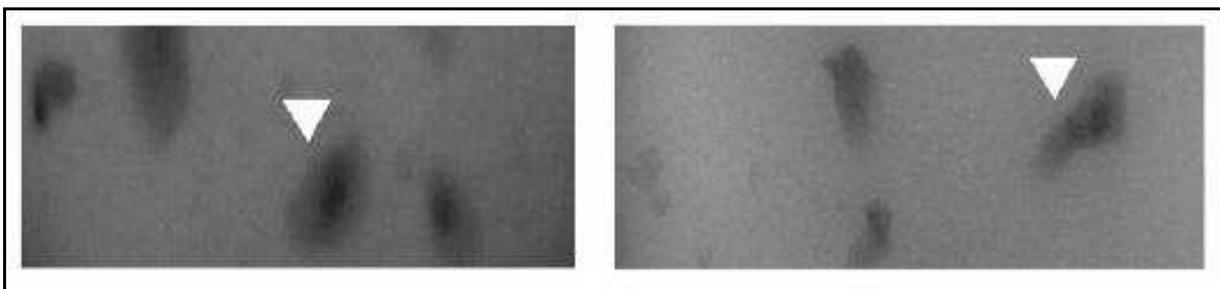


Figura 3.37 – Exemplo da imagem inclusões de areia [12, 13, 14, 63].

- 2) Escória: Uma série de linhas em um padrão de redemoinho às vezes combinada com aglomerados indicações irregular. Escória é geralmente considerado para representar metal oxidado.
- e) Suporte sem fundir: os suportes (usados para manter partes internas em sua posição durante o processo de fundição) que não se funde completamente com o metal fundido produzem descontinuidade, Figura 3.38.

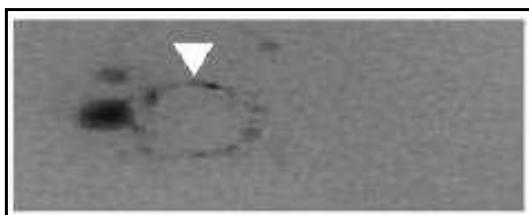


Figura 3.38 – Suporte sem fundir [12, 13, 14, 63] .

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho segundo a metodologia descrita no capítulo anterior e a discussão dos mesmos. Inicialmente colocaremos características do corpo-de-prova e como o método radiográfico atinge os melhores resultados de detecção das descontinuidades se aplicamos as melhores técnicas na execução do ensaio radiográfico convencional, pois para propor uma nova técnica por outra mais revolucionária devemos estar seguro que na comparação a aplicação da nova tecnologia apresentará vantagens se a técnica convencional consagrada atingiu seus melhores resultados.

4.1. CARACTERÍSTICAS DO CORPO-DE-PROVA DE MATERIAL COBRE

O corpo-de-prova é um protótipo de um bloco refrigerador construído em cobre de alta condutibilidade térmica para ser instalado em alto-forno de extração de minério. O CP foi recusado pelo fabricante devido não atender aos requisitos da norma ASTM E 272 [12]. Para analisar os resultados e os fatores que afetaram a qualidade da imagem convencional quanto ao contraste e definição, buscou-se atender as referências da Tabela 2.3. Os exames radiográficos foram executados numa das seções mais representativas do CP mostrado na Figura 4.1 dividendo as análises em duas áreas, onde se encontram distribuídas as descontinuidades aprovadas e as recusadas (defeitos)[73]. Em seguida mostramos na Figura 4.2 que nestas áreas está presente uma variação considerável de espessura que afetam os resultados. Na Tabela 4.1 estas variações de espessura e IQIs aplicáveis estão descritos.

A seleção do IQI foi feita conforme ASME Seção V, Artigo 2 parágrafo T – 276 [5]. Como foi usado o IQI de arames a prática SE – 747 [59] foi utilizada buscando o diâmetro correspondente da norma EN – 462-1 [60].

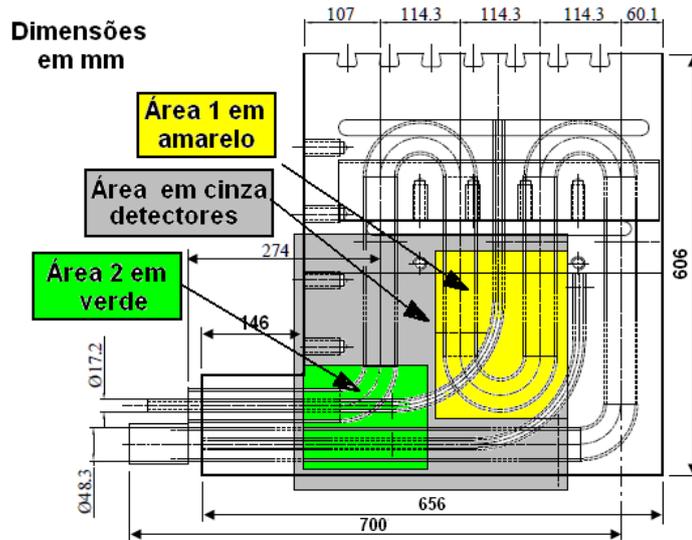


Figura 4.1 – Região de destaque no CP onde se concentram as descontinuidades para análise por meio do método de ensaio radiográfico [73].

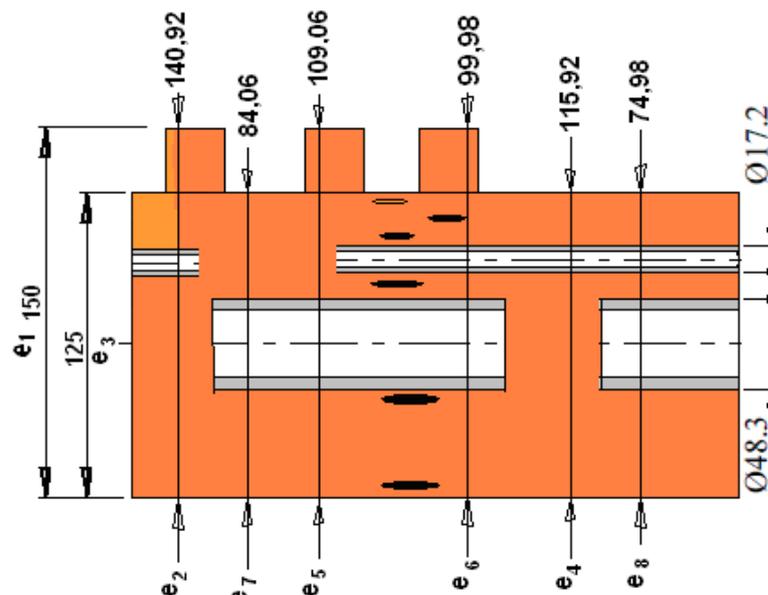


Figura 4.2 – Mostrando as variações de espessuras nas seções críticas do CP presentes nas áreas 1 e 2 da Figura 4.1

A partir das duas áreas destacadas nas cores amarela e verde do bloco refrigerado mostrado na Figura 4.1, foram realizadas radiografias com as fontes de radiação X e gama. A radiação X foi por meio de um acelerador linear de 4 MeV e a radiação gama com duas fontes de Cobalto-60, uma com a atividade de 22,56 Ci e dimensão focal de 2,0 x 2,0 mm e outra com atividade de 49,00 Ci e dimensão focal de 4,2 x 4,6 mm.

As áreas destacadas na Figura 4.1 podem ser vistas também na Figura 4.3 onde temos uma imagem radiográfica realizada com a técnica convencional mostrando vinte e uma descontinuidades detectadas no CP.

Tabela 4.1 – Variação de espessura e seleção do IQI conforme norma ASME V [5]

| Item | Região do CP contendo | | | Espessura (mm) | % | IQI | Ø | | |
|----------------|-----------------------|------------|---------|-------------------|-------|-------|--------------|--------------|---|
| | Res-saltos | Serpentina | | | | | | ASME V | Ø |
| | | Ø Menor | Ø Maior | | | | | | |
| | | | | | | T-276 | 462-1 | | |
| e ₁ | Sim | Não | Não | 150,00 | 100% | 1,06% | | | |
| e ₂ | Sim | Sim | Não | 140,92 | 93,9% | | W 14 | W 4 | |
| e ₃ | Não | Não | Não | 125,00 | 83,3% | | Ø 1,60 mm | Ø 1,60 mm | |
| e ₄ | Não | Sim | Não | 115,92 | 77,3% | | ± 0,02 | ± 0,02 | |
| e ₅ | Sim | Não | Sim | 109,06 | 72,7% | 1,46% | | | |
| e ₆ | Sim | Sim | Sim | 99,98 | 66,6% | 1,27% | W 13 | W 5 | |
| e ₇ | Não | Não | Sim | 84,06 | 56,0% | | Ø 1,27 mm | Ø 1,25 mm | |
| e ₈ | Não | Sim | Sim | 74,98 | 49,9% | 1,69% | ± 0,02 | ± 0,02 | |

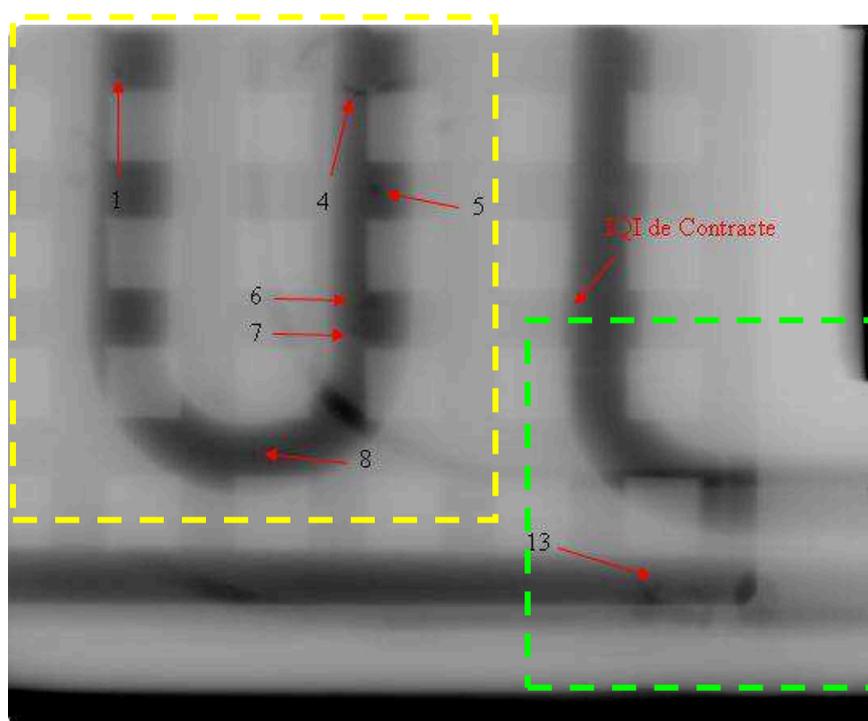


Figura 4.3 – Imagem radiográfica da técnica convencional com a radiação X de 4 MeV mostrando as duas áreas destacadas e as descontinuidades detectadas.

Na imagem as descontinuidades de número 1 a 11, 15 a 21 estão localizadas na área 1 destacada em amarelo na Figura 4.3, com exceção da descontinuidade de número 20, enquanto que as descontinuidades de número 12, 13 e 14 estão na área 2 em verde. Devido à falta de definição da imagem das descontinuidades nas figuras, identificamos que as descontinuidades de números 1, 5, 6, 16, 17, e 19 como sendo poros onde aparecem na forma arredondada ou levemente alongada, como referência ver Figura 3.33. As descontinuidades de números 2, 10, 11, 15, 18 e 21 foram enquadradas como rechupe do tipo esponja, ver Figura 3.34. As descontinuidades de números 3, 4, e 7 apresentam formas alongadas e contornos irregulares muito próximas a rechupe do tipo linear, ver Figura 3.35. As descontinuidades de números 9, 12, 13, 14 e 20 apresentam características próprias, pois indicam que estão localizadas entre as 2 serpentinas o que as tornam de difícil caracterização, mas muito próximas a rechupe e falta de fusão entre as duas paredes das serpentinas. Já a descontinuidade de número 8 é semelhante a da Figura 3.38, suporte sem fundir

4.2. ENSAIOS COM A RADIAÇÃO X – ENERGIA DE 4 MeV

Verifica-se que na primeira experiência para a detecção das descontinuidades utilizando a radiografia convencional com a técnica PSVS e vista composta, foram obtidas duas imagens com filmes de sensibilidades diferentes. O cálculo do tempo de exposição para o filme de menor sensibilidade (ASTM classe II) foi baseado na maior espessura da peça. Com base na energia do feixe e sua correspondente CSR ou HVL a seleção do filme de maior sensibilidade (ASTM classe I) o tempo de exposição foi baseado na menor espessura. Calculou-se o tempo para o filme ASTM classe II e aplicou-se o fator de 3,5. A dose do primeiro cálculo esteve próximo a do segundo. Para laudar, usou-se apenas um filme para determinadas áreas da peça, região das serpentinas no filme classe I e maiores espessura do CP o de classe II. As densidades nestas seções foram atendidas em cada filme, mínimo de 1,3 H & D.

A Figura 4.4 mostra a imagem com um filme ASTM classe II – Kodak AA 400, para observação das descontinuidades nas seções de maior espessura. A Figura 4.5 mostra a imagem com um filme ASTM classe I (especial) – Kodak M100, para detecção das descontinuidades em seções de menor quantidade de material devido ao canal formado pelas serpentinas. Nesta técnica ao usar o filme classe I pode-se obter uma melhor detectabilidade das descontinuidades. Ressalta-se que excluindo os vazios existentes nas descontinuidades temos no CP uma variação significativa de espessuras como está descrito na Tabela 4.1.

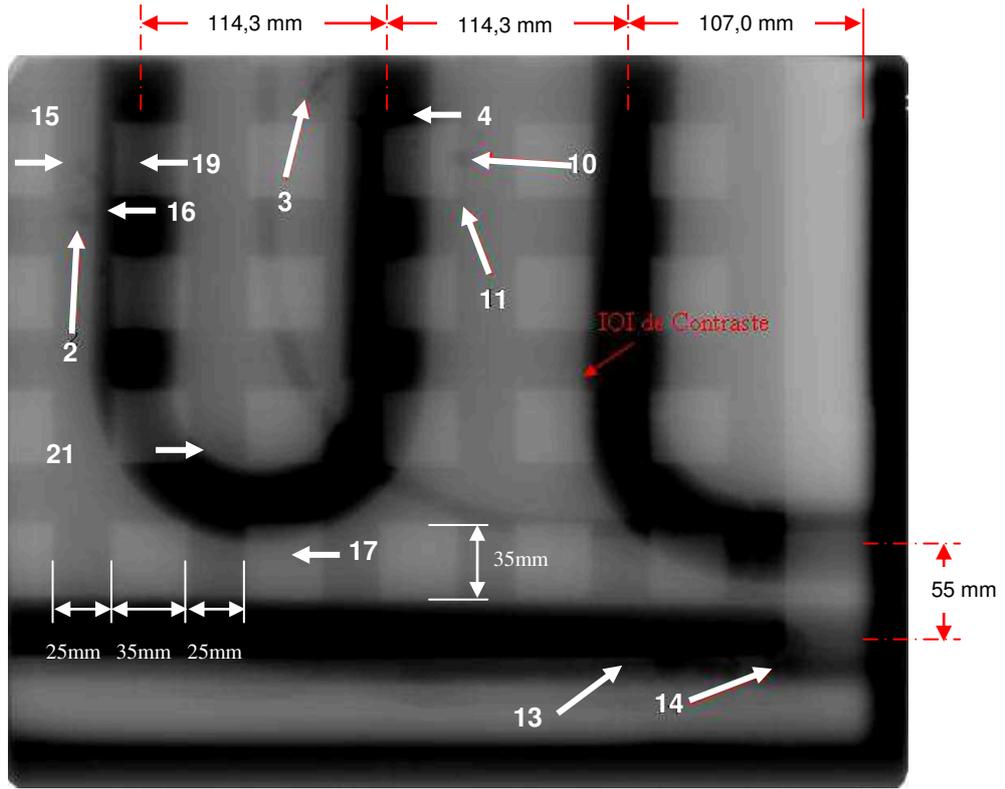


Figura 4.4 – Imagem obtida com filme ASTM classe II (dimensões 355 x 430 mm) mostrando descontinuidades nas seções de maiores espessuras.

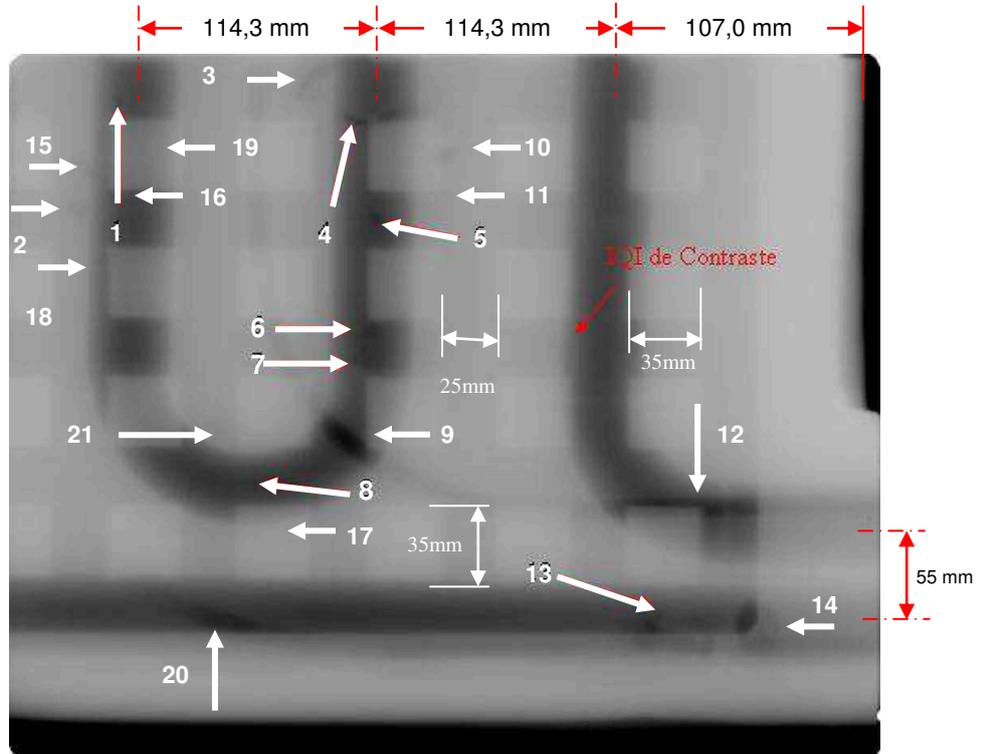


Figura 4.5 – Imagem obtida com filme ASTM classe I (dimensões 355 x 430 mm) mostrando descontinuidades das seções de menores espessuras.

No ensaio com a técnica RC foi obtida uma única imagem. Utilizando as ferramentas de processamento de imagem, foi possível detectar todas as descontinuidades do corpo-de-prova. A Figura 4.6 mostra a imagem radiográfica do CP, processada com o filtro “*Enhance Details*” e com ajuste de brilho e contraste.

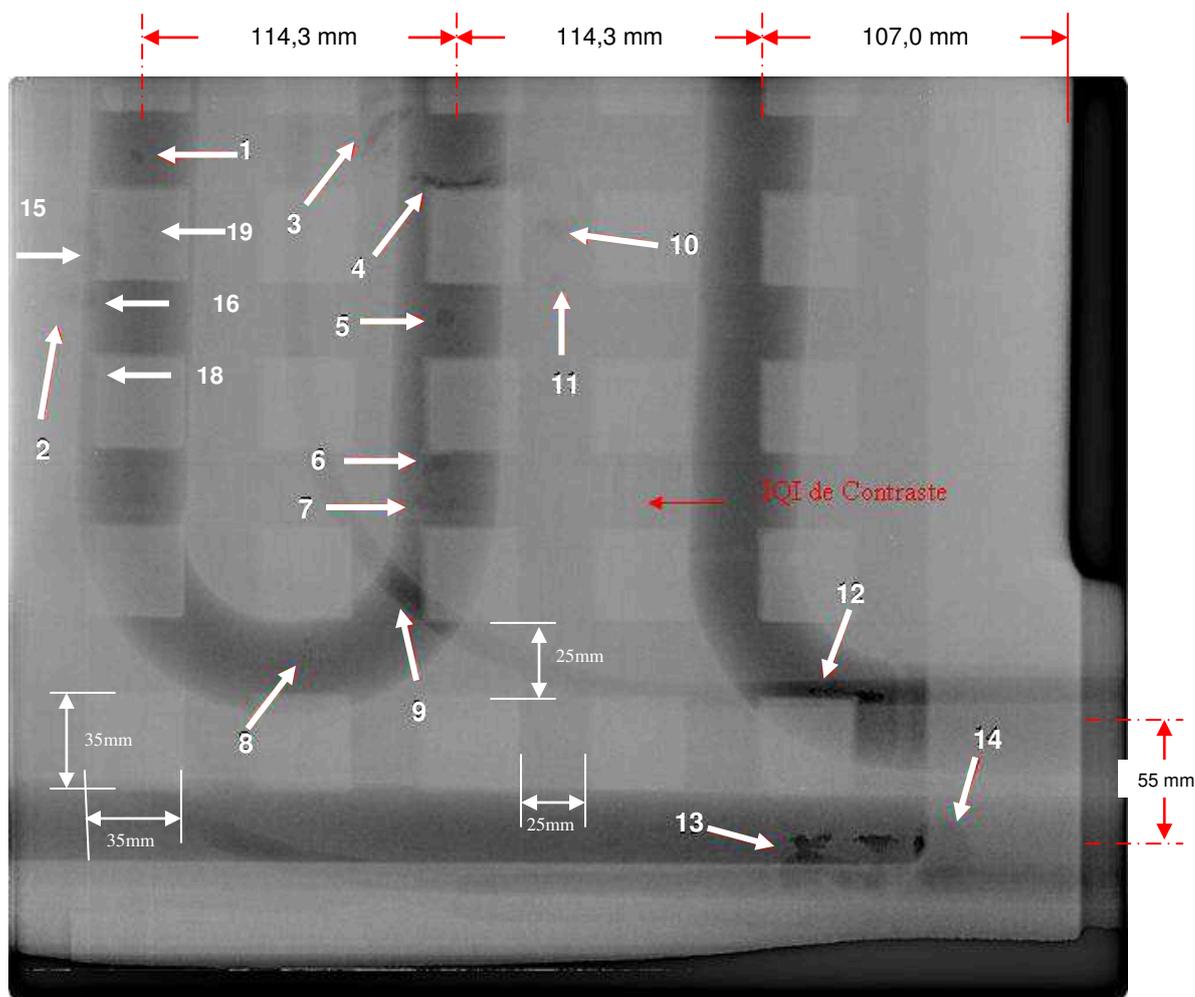


Figura 4.6 – Imagem obtida por radiografia industrial computadorizada com processamento matemático, IP (dimensões 355 x 430 mm).

Em todas as imagens, tanto na técnica radiográfica convencional quanto computadorizada, não foi possível a visualização do IQI de fio duplo, devido ao pequeno diâmetro dos fios em relação à espessura da peça e a energia da radiação. O IQI de fio duplo mostrou-se não ser adequado, assim, não foi possível obter o valor da resolução espacial básica. Com a técnica RC, foi visualizado o arame W4 do IQI de contraste posicionado lado da fonte atendendo a norma ASME Seção V, T-276 citada na Tabela 4.1, com a radiografia convencional, foi visualizado o arame W3 com o filme classe I, o arame W6 com o filme

classe II e o arame W6 com a vista composta com os filmes classe I e II, todos posicionados lado da fonte.

4.3. ENSAIOS COM RADIAÇÃO GAMA – FONTE DE COBALTO – 60 COM ATIVIDADE DE 22,56 Ci

Analogamente ao ensaio com a radiação X de 4 MeV do acelerador linear, foi planejado avaliar as técnicas usando também fontes de radiação gama de alta energia com o isótopo Co-60. O ensaio com radiografia industrial convencional foi realizado utilizando dois filmes de classe II ASTM e expondo-os com a técnica de vista composta para reduzir o tempo de exposição pela metade. Para o laudo, estes foram visualizados em conjunto para a detecção das descontinuidades em espessuras maiores e separadamente para a detecção em seções de menores espessuras, como os canais internos das serpentinas de menor quantidade de material. Suas imagens são mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

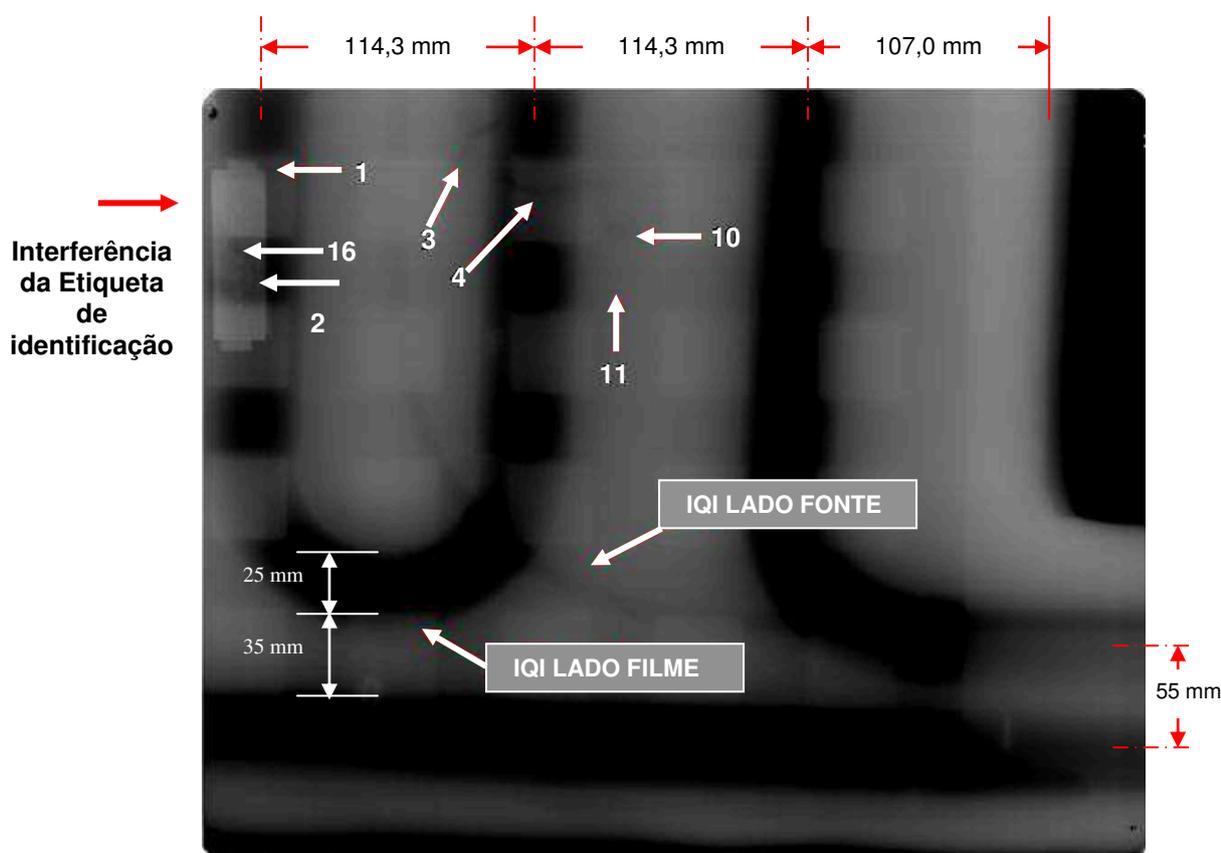


Figura 4.7 – Imagem radiográfica utilizando dois filmes ASTM classe II (técnica de vista composta).

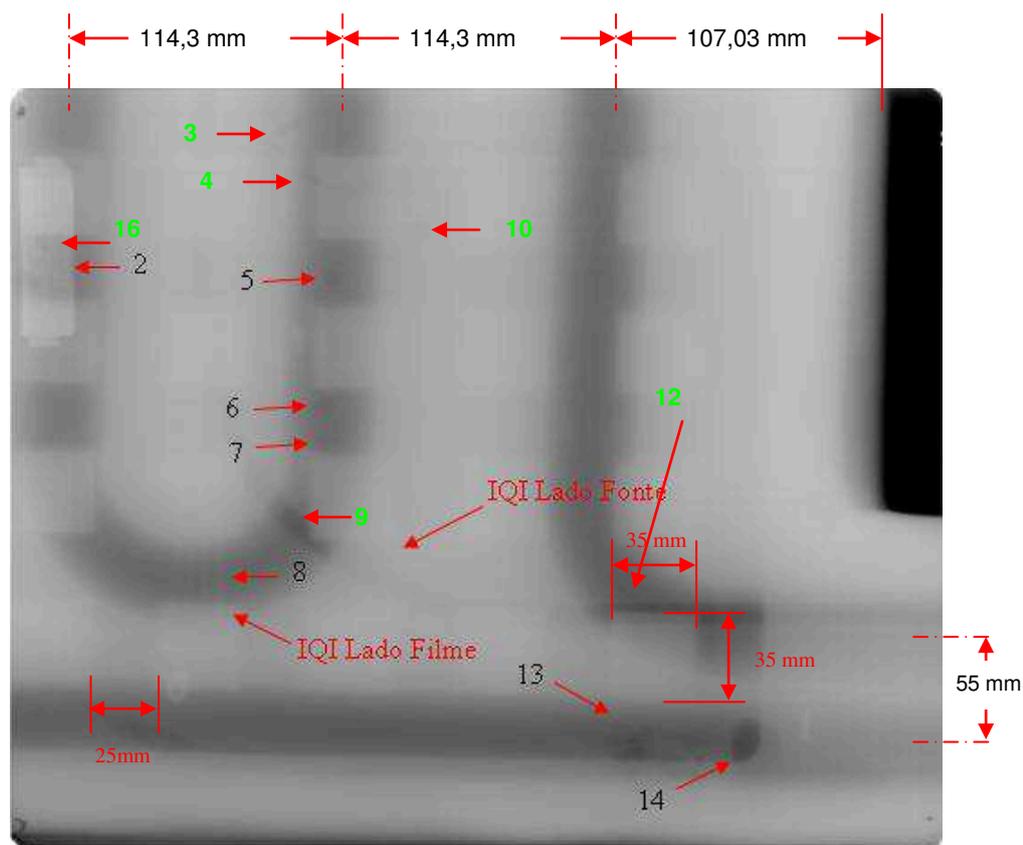


Figura 4.8 – Imagem radiográfica utilizando um filme classe II ASTM (técnica de vista simples).

No ensaio com radiografia industrial computadorizada – RC foi obtida uma única imagem, que foi processada com o filtro “*Enhance Details*” para a melhor visualização das descontinuidades, como mostra a Figura 4.9.

Com relação à avaliação do IQI de contraste, com a radiografia convencional, foi visualizado o arame W6 do lado do filme e W4 do lado da fonte para a vista simples e o arame W5 do lado do filme e W4 do lado da fonte para a vista composta. Com a radiografia computadorizada, foi visualizado o arame W4 do lado do filme e o W2 do lado da fonte.

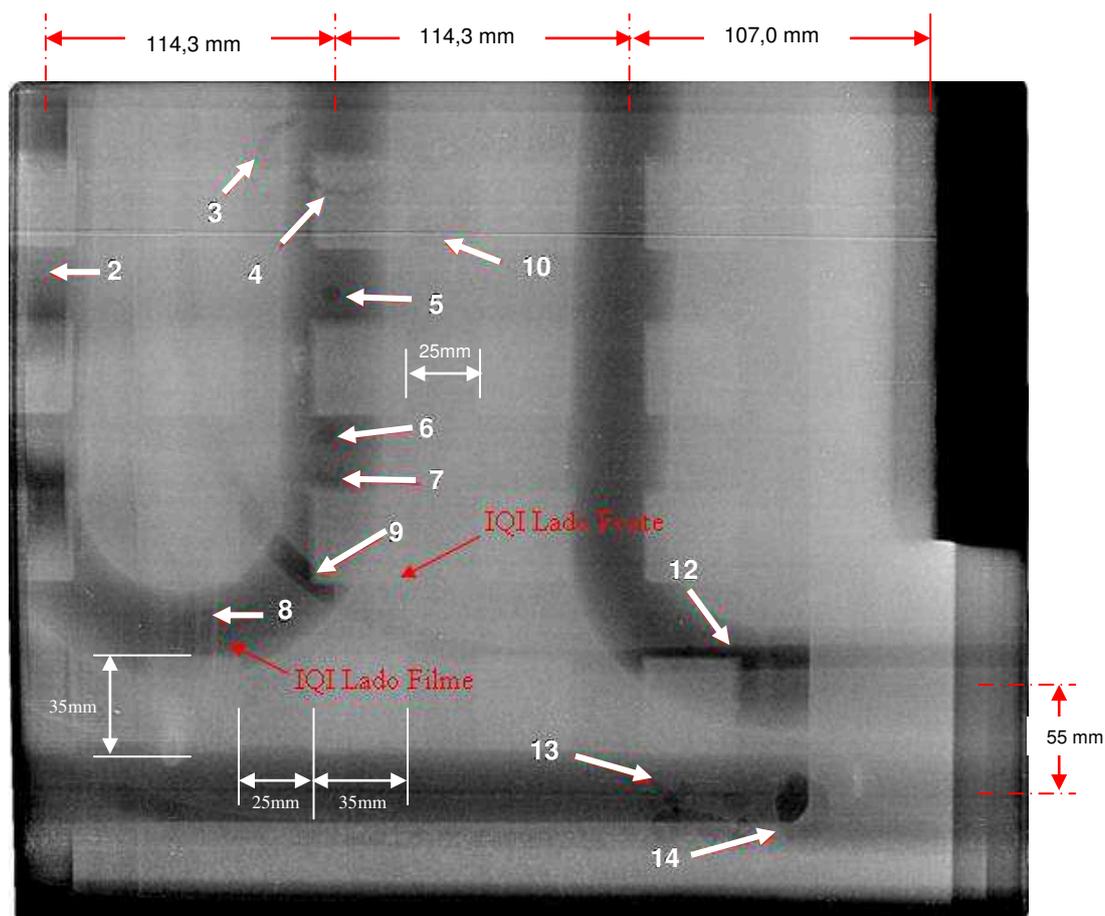


Figura 4.9 – Imagem da técnica RC utilizando fonte de Co-60 com 22,56 Ci de atividade

4.4. ENSAIOS COM RADIAÇÃO GAMA – FONTE DE COBALTO – 60 COM ATIVIDADE DE 49,00 Ci

Para a obtenção das imagens nesta terceira etapa e buscar a diminuição do tempo de exposição com as técnicas radiográfica convencional e computadorizada, o CP foi usado para remoção dos ressaltos de 35,0 x 35,0 mm e 25,0 mm de sua espessura original, pois foi verificado que a grande maioria das discontinuidades não estava localizada abaixo destes ressaltos e algumas discontinuidades nestas seções foram consideradas aprovadas. Outro motivo dessa usinagem foi buscar uma adequação nas espessuras do CP relatadas na Tabela 4.1 à energia do Co-60 para o cobre, diminuição do tempo de exposição utilizando uma fonte de maior atividade, gerando imagens com melhores definição e contraste radiográficos descritos da Tabela 2.3. Na técnica convencional foram obtidas duas imagens, com filmes de sensibilidades iguais – ASTM classe II tipo Kodak AA 400.

A Figura 4.10 mostra a imagem para observação das discontinuidades nas seções de menor espessura. Nota-se melhor detecção das discontinuidades de números 15 e 16,

enquanto que a Figura 4.11 mostra a imagem da vista composta para visualização das descontinuidades nas maiores espessuras onde foi verificada a detecção de mais uma descontinuidade, a de número 17, também não definida nas imagens anteriores. No ensaio com RC foi obtida uma única imagem, utilizando as ferramentas de processamento de imagem para auxiliar na detecção das descontinuidades do CP. A Figura 4.12 mostra a imagem radiográfica do CP, processada com o filtro “*Enhance Details*” e com ajuste de brilho e contraste.

Pode-se observar que a imagem obtida com a radiografia computadorizada Figura 4.12 foi prejudicada pela presença de artefatos da placa de fósforo que estão mostrados como exemplos na figura inseridos nas figuras tracejadas na cor verde. Mesmo assim, foi possível detectar as descontinuidades de todas as seções de maior interesse (serpentinhas), como também a visualização de outras descontinuidades de número 15 e 16 não detectadas nas outras imagens com as outras fontes. Estes mesmos artefatos podem ter prejudicado a detecção da descontinuidade de número 17.

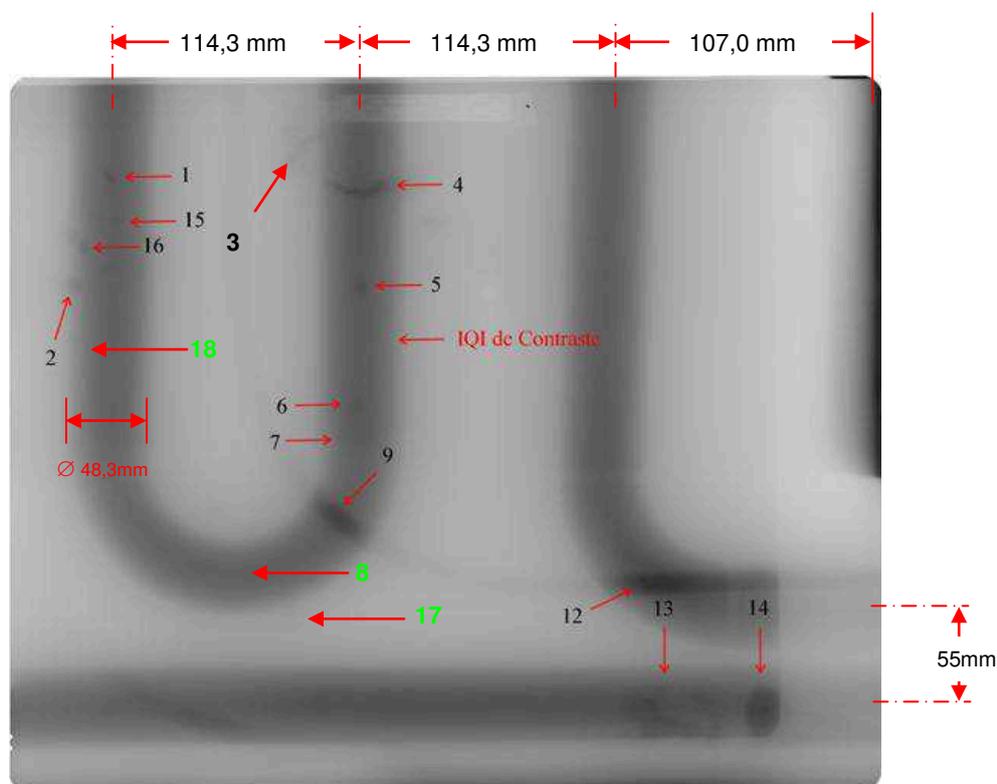


Figura 4.10 – Imagem obtida com filme ASTM classe II mostrando descontinuidades nas seções de menores espessuras (vista simples).

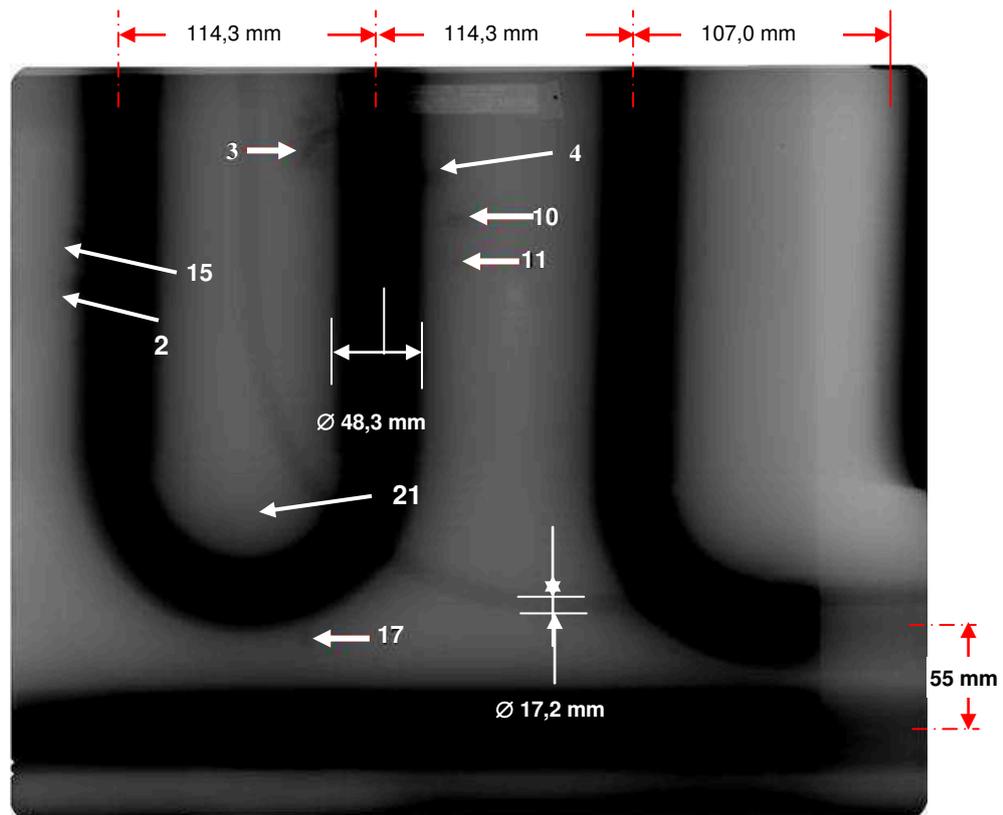


Figura 4.11 – Imagem obtida com dois filmes ASTM classe II mostrando descontinuidades nas seções de maiores espessuras (técnica de vista composta).

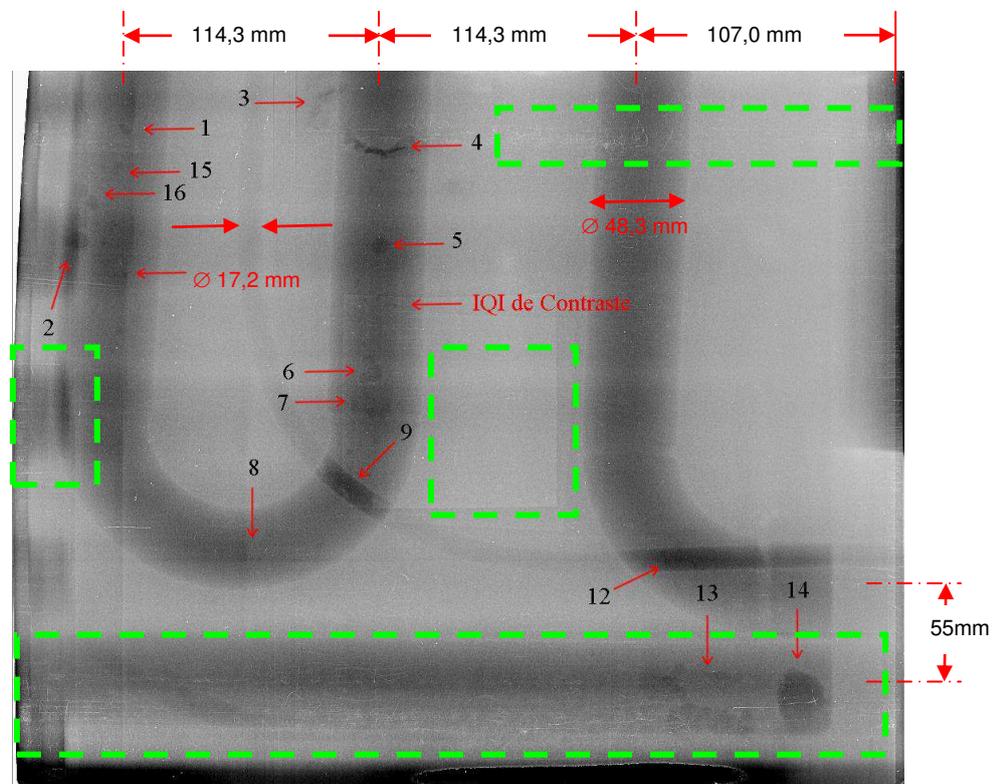


Figura 4.12 – Imagem obtida com a técnica RC com processamento matemático, as áreas delimitadas em verde mostram a presença de artefatos.

4.5. COMPARANDO OS ENSAIOS COM A RADIAÇÃO X DE 4 MEV E A GAMA DAS FONTES DE Co – 60 DE 22,56 E 49,00 Ci.

A partir da região destacada em cinza do bloco refrigerador mostrado na Figura 4.1, foi radiografada com as fontes de radiação X com o acelerador linear de 4 MeV e radiação gama com as fontes de Cobalto-60 com 22,56 Ci de dimensão focal de 2,0 x 2,0 Ci e 49,00 Ci de atividade e dimensão focal de 4,2 x 4,6.

O critério adotado na escolha de duas regiões em amarelo e verde dentro da região cinza do bloco foi onde havia concentrado as recusas das descontinuidades (defeitos) [73] e onde se estima ocorrerem às menores distorções nas imagens das descontinuidades com as fontes de Co-60 devido à distância fonte-detector e tamanho focal. Outro ponto é que o bloco possui espessuras superiores a 150 mm, atingindo 220 mm que ultrapassaria o limite com fontes de Co-60 até mesmo se o material fosse aço carbono [11].

Sendo um bloco refrigerador, sua função principal é trocar calor por meio da serpentina de maior diâmetro por onde passa o fluido refrigerante. Além de o ensaio radiográfico ser aplicado para avaliar a estabilidade dimensional das serpentinas, morfologias e dimensões das descontinuidades que não atenda a norma, localizadas próximas a parede da serpentina é relevante ao projeto construtivo do bloco. Entre o material do bloco e a superfície da serpentina deve-se ter fusão total para se ter a maior eficiência de troca térmica. Falta de fusão, danos nas paredes das serpentinas ou vazios junto a estas irá ocasionar perda de eficiência da troca térmica do bloco.

As Figuras 4.13, 4.15 e 4.17 mostram as imagens dos ensaios radiográficos realizados com a técnica computadorizada obtidos com as radiações X e gama destas duas regiões de destaque no bloco refrigerador, enquanto que as Figuras 4.14, 4.16 e 4.18 mostram em cada uma delas quatro gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14. Os valores de cinza foram obtidos na traçagem das linhas retas no sentido da parte inferior para a superior (verticais) e da esquerda para direita (horizontal).

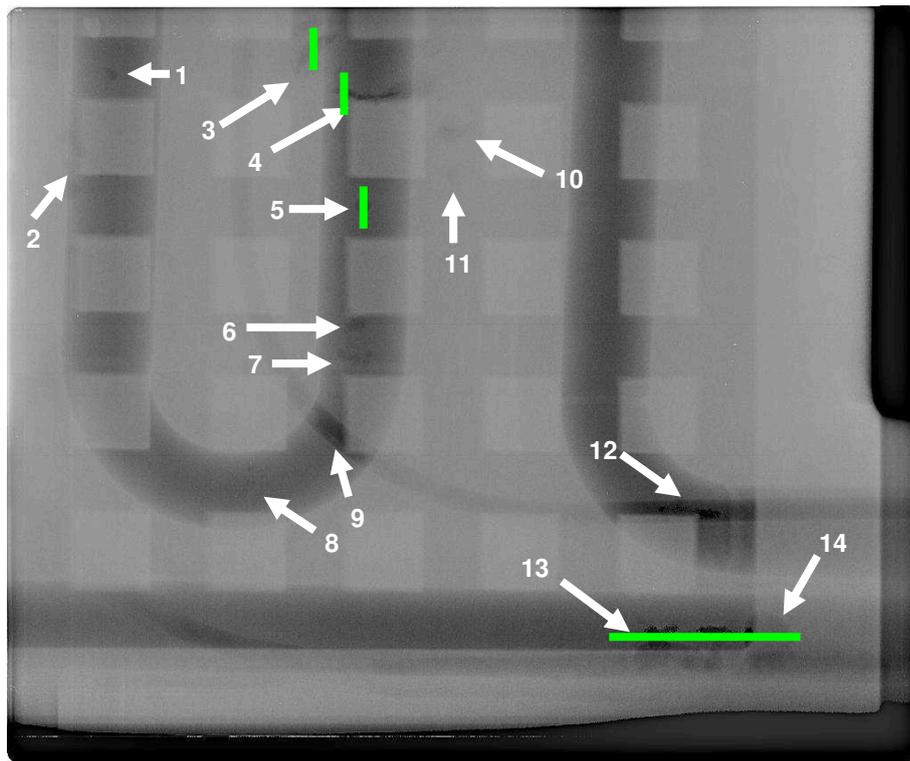


Figura 4.13 – Imagem da técnica RC com a radiação X do acelerador linear.

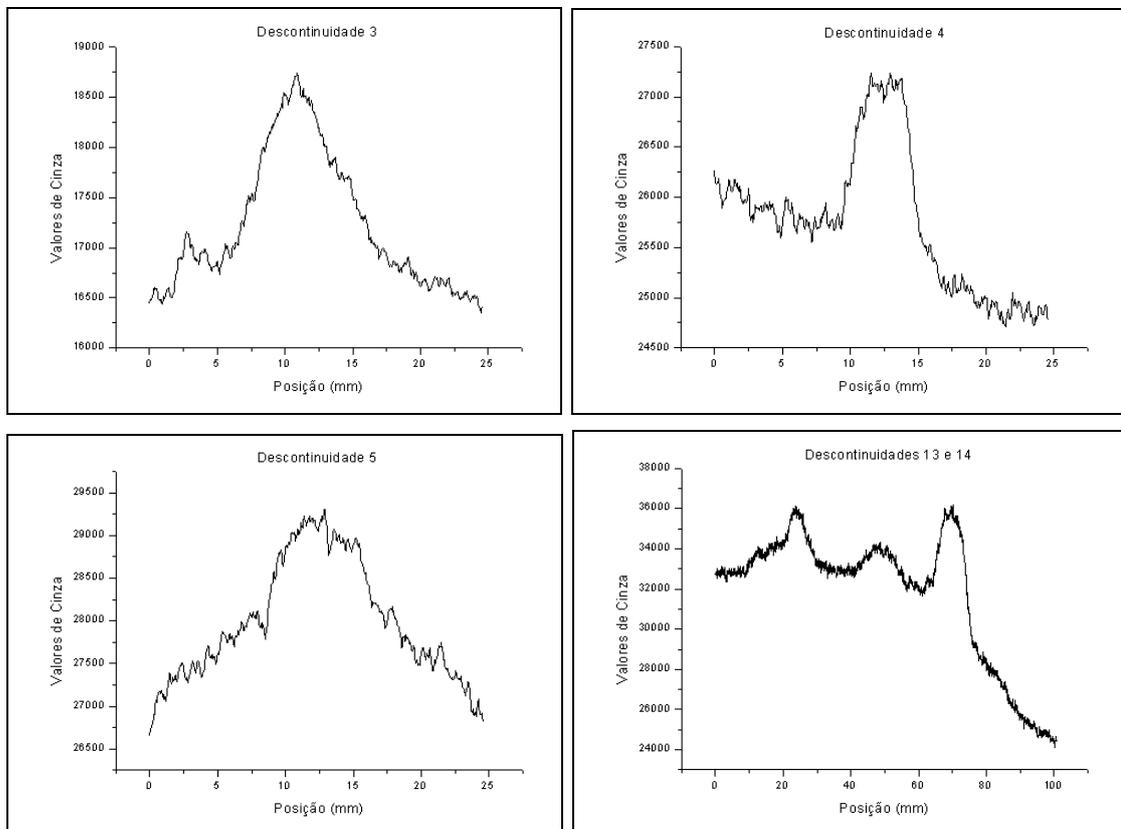


Figura 4.14 – Gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 resultado dos traçados das linhas na imagem da Figura 4.13.

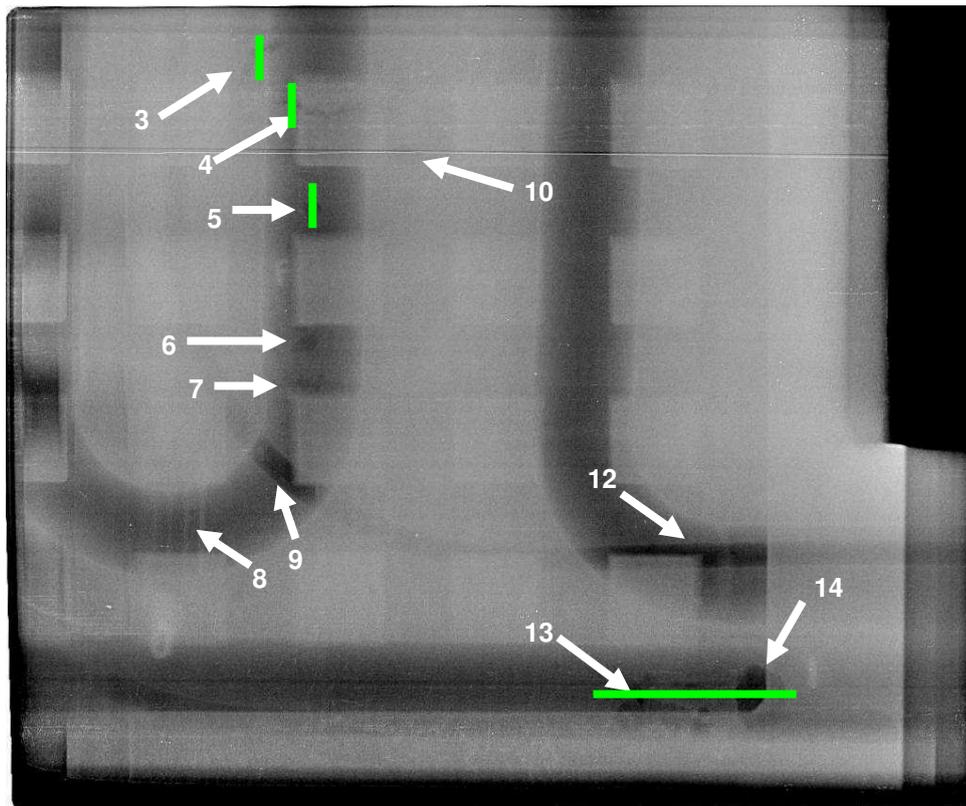


Figura 4.15 – Imagem da técnica RC com fonte de Co-60 de 22,56 Ci da Arctest.

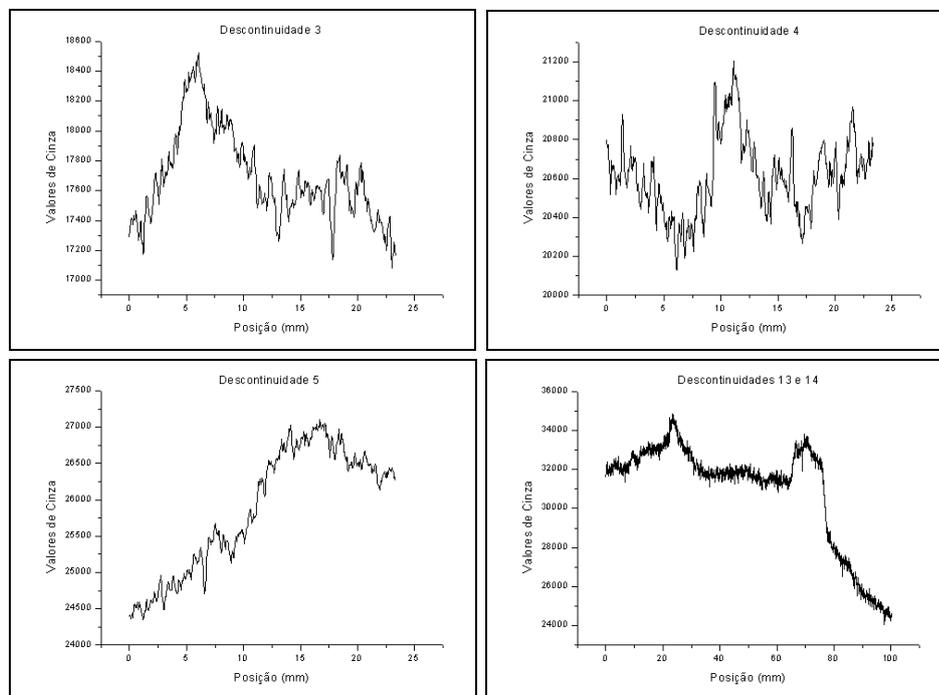


Figura 4.16 – Gráficos do perfil de tons de cinza resultado dos traçados das linhas sobre as descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 da Figura 4.15.

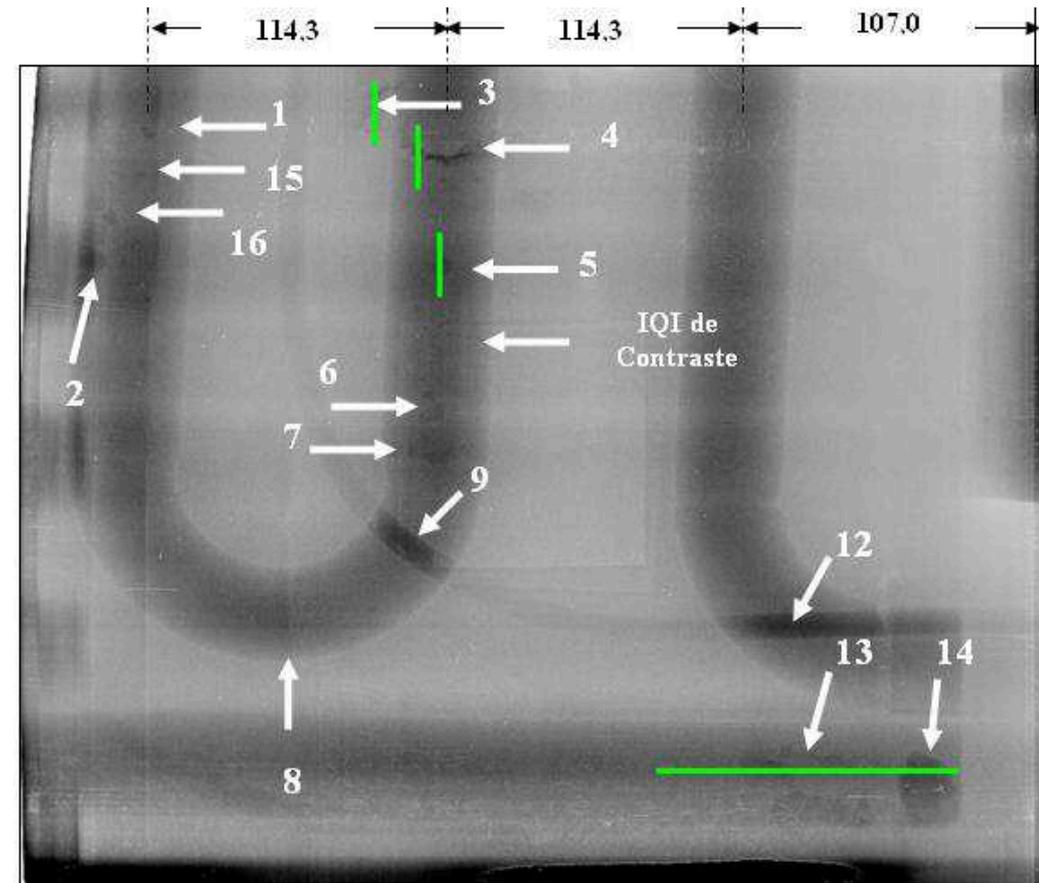


Figura 4.17 – Imagem da técnica RC com fonte de Co-60 de 49,00 Ci da Nuclep.

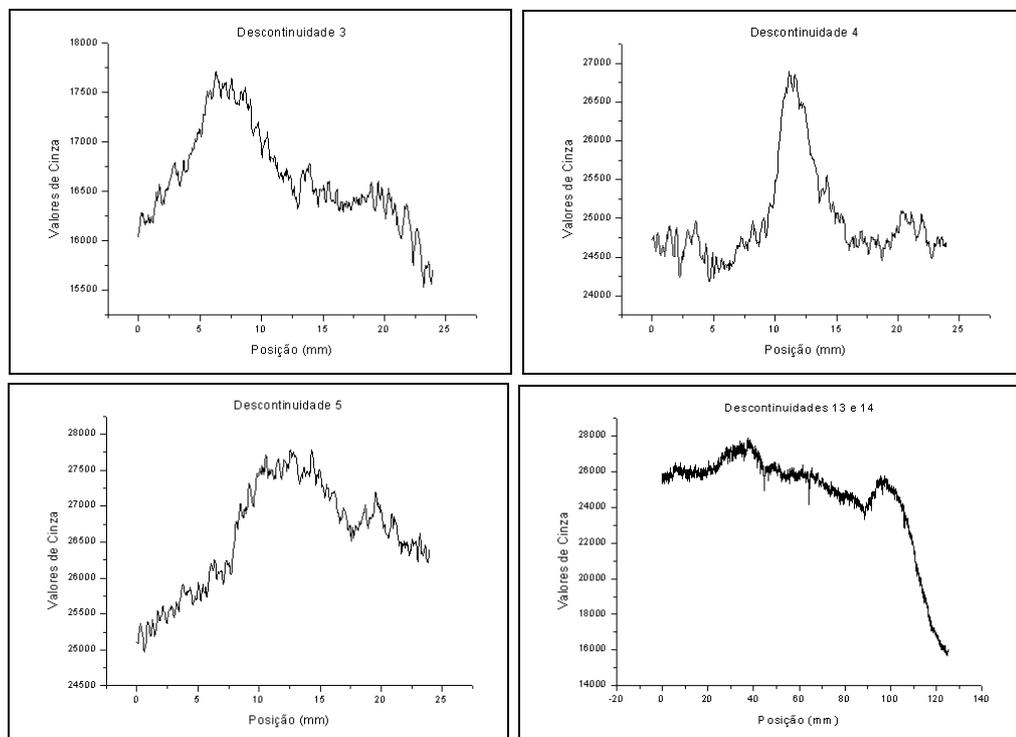


Figura 4.18 – Gráficos do perfil de tons de cinza resultado dos traçados das linhas sobre as descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 da Figura 4.17.

4.5.1. Avaliações das áreas 1 e 2 do CP por meio das fontes de radiação X e gama.

Nas Figuras 4.19 a 4.22 podem ser vista as imagens das áreas 1 e 2 do bloco demarcadas nas cores amarela e verde da Figura 4.1 eleitas como críticas [3]. Nestas imagens são feitas as comparações entre as regiões das radiografias obtidas com o acelerador linear e as duas fontes de Co-60. A fonte com 22,56 Ci antes da usinagem e após da usinagem somente com a fonte de 49,00 Ci. A usinagem na região de interesse dos estudos proporcionou estender a pesquisa para a energia do Co-60 versus espessuras e a remoção dos ressaltos não interferiu na detectabilidade da maioria das descontinuidades.

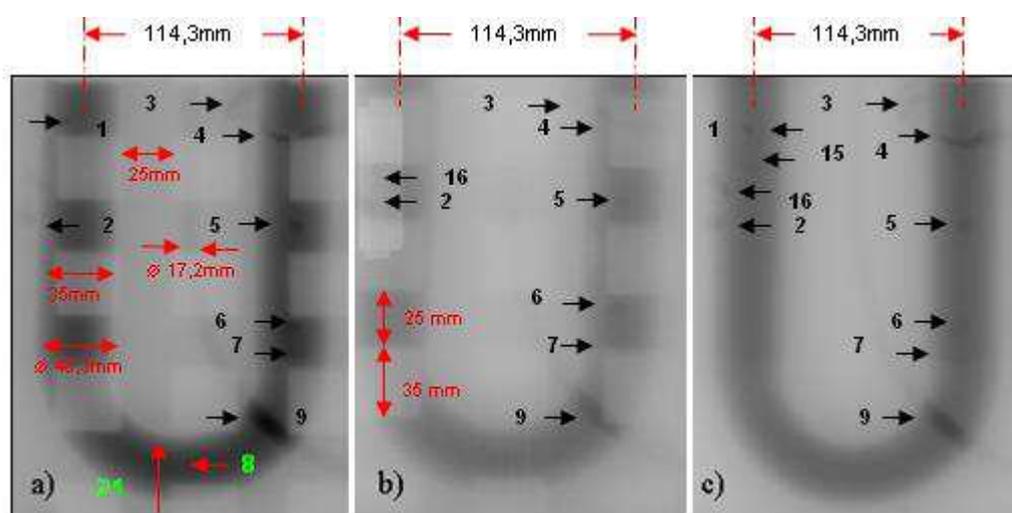


Figura 4.19 – Radiografia convencional da área 1 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem).

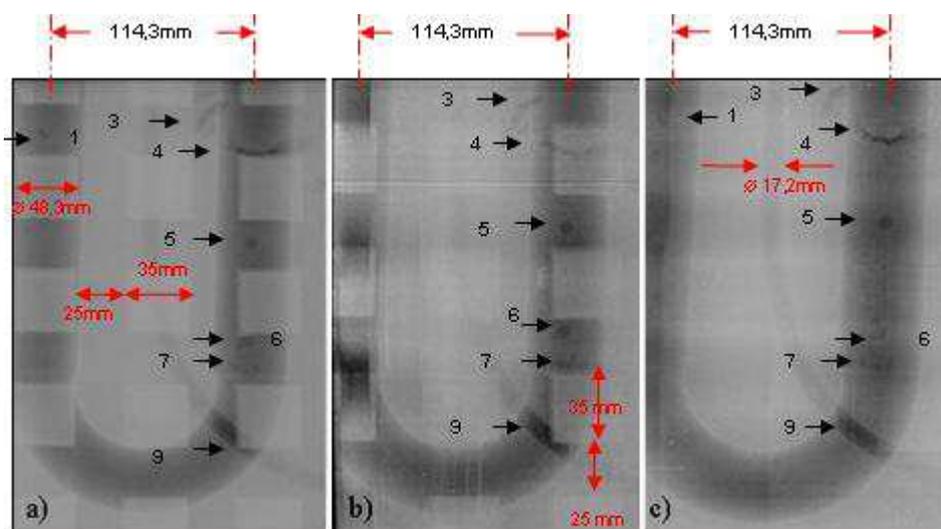


Figura 4.20 – RC da área 1 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem).

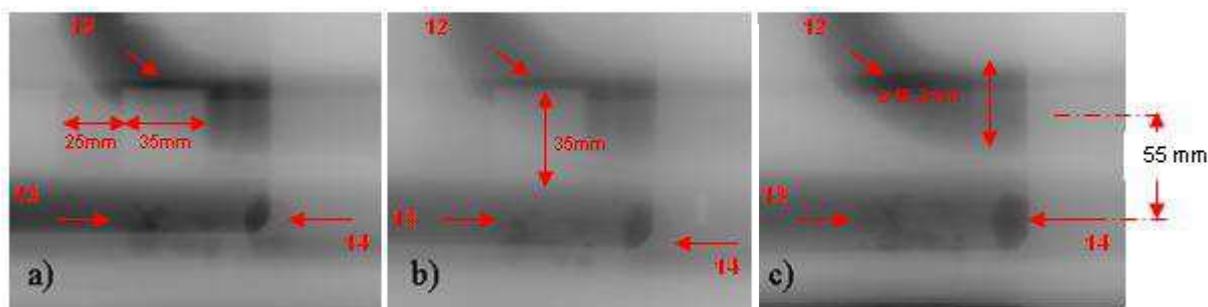


Figura 4.21 – Radiografia convencional da área 2 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem).

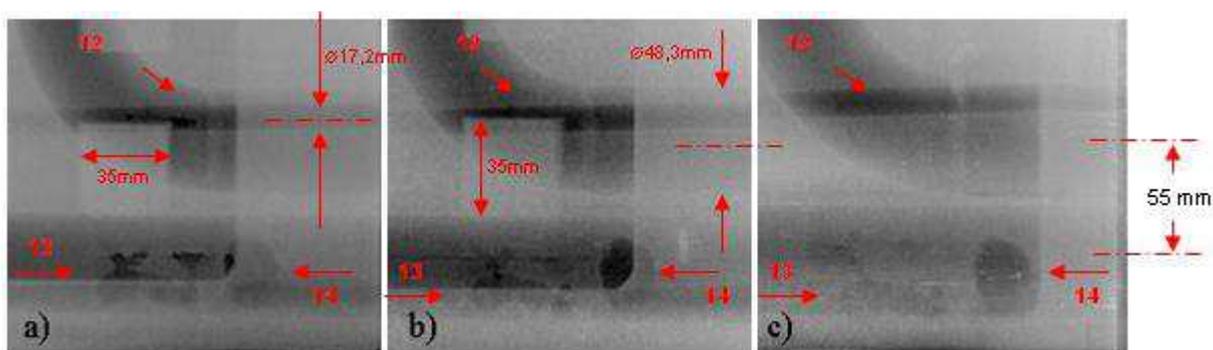


Figura 4.22 – RC da área 2 - a) acelerador linear, b) Co-60 com 22,56 Ci (antes da usinagem) e c) Co-60 com 49,00 Ci (após usinagem).

Pode-se observar a utilização do Co-60 apresentou melhorias nas imagens após a redução da espessura do CP. Foi possível visualizar melhor as discontinuidades nas seções críticas com a presença das serpentinas onde antes a quantidade de material era alta para a energia da fonte de Co-60. Com a usinagem da peça, esta passou a ter uma espessura máxima de 125 mm, reduzindo mais que uma CSR para a energia do Co-60. Como o bloco refrigerador possui duas serpentinas internas temos variações de espessura como mostrado na Figura 4.2 e descrito na Tabela 4.1.

4.5.2. Utilização dos recursos da técnica de RC – Resolução Espacial Básica.

Devido à alta espessura do bloco refrigerador, não houve resolução espacial suficiente para visualizar o IQI de arame duplo que atenda adequadamente a técnica computadorizada. Assim, não foi possível analisar a resolução espacial básica das imagens, tanto com a técnica de radiografia industrial computadorizada quando com a radiografia convencional. Foi visualizado o arame W3 do IQI de contraste pelo lado da fonte.

Mesmo não sendo possível obter a relação sinal ruído desejada é possível obter algum valor nas imagens. Quando a visualização do IQI de fio duplo ficar prejudicada nas imagens e precisamos do valor da resolução espacial para medir a SNR. Uma opção neste caso é utilizar a resolução espacial para a qual o equipamento foi certificado (80 microns) [35]. Não é a resolução espacial da imagem e sim do sistema e esse valor inclusive é para fonte de raios X, mas é um artifício que é utilizado pelos pesquisadores do BAM na Alemanha [20]. Nas imagens das Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 foram traçados os ROIs com dimensões de 20 x 55 pixels.

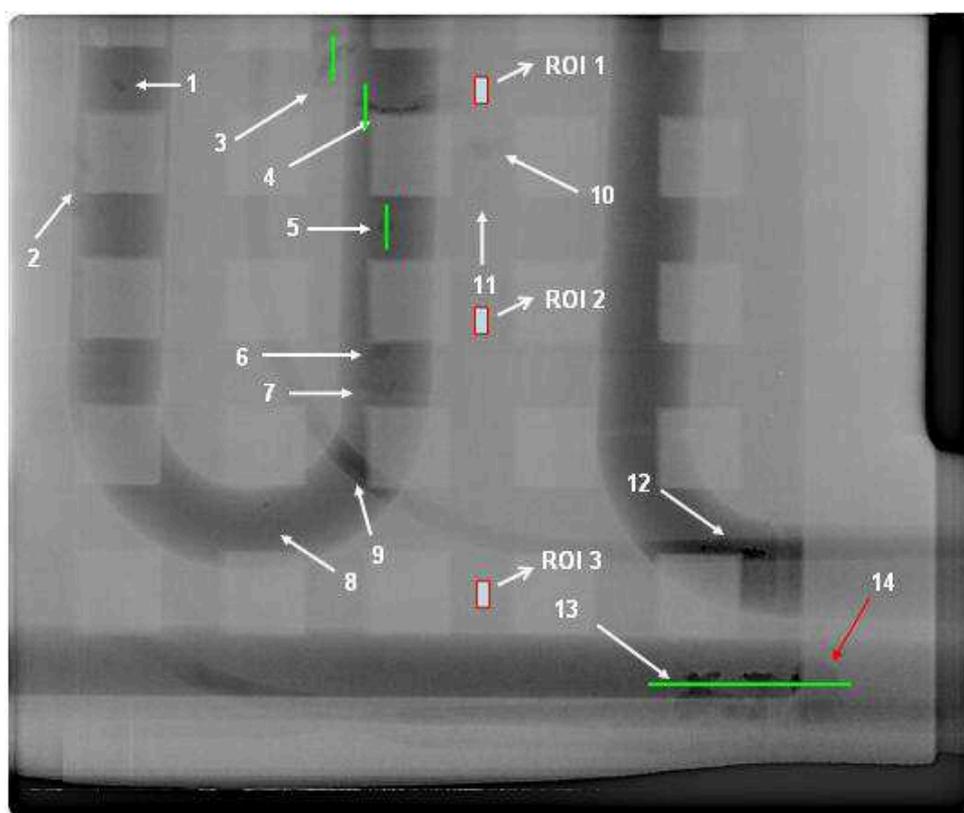


Figura 4.23 – RC com radiação X do acelerador linear mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs.

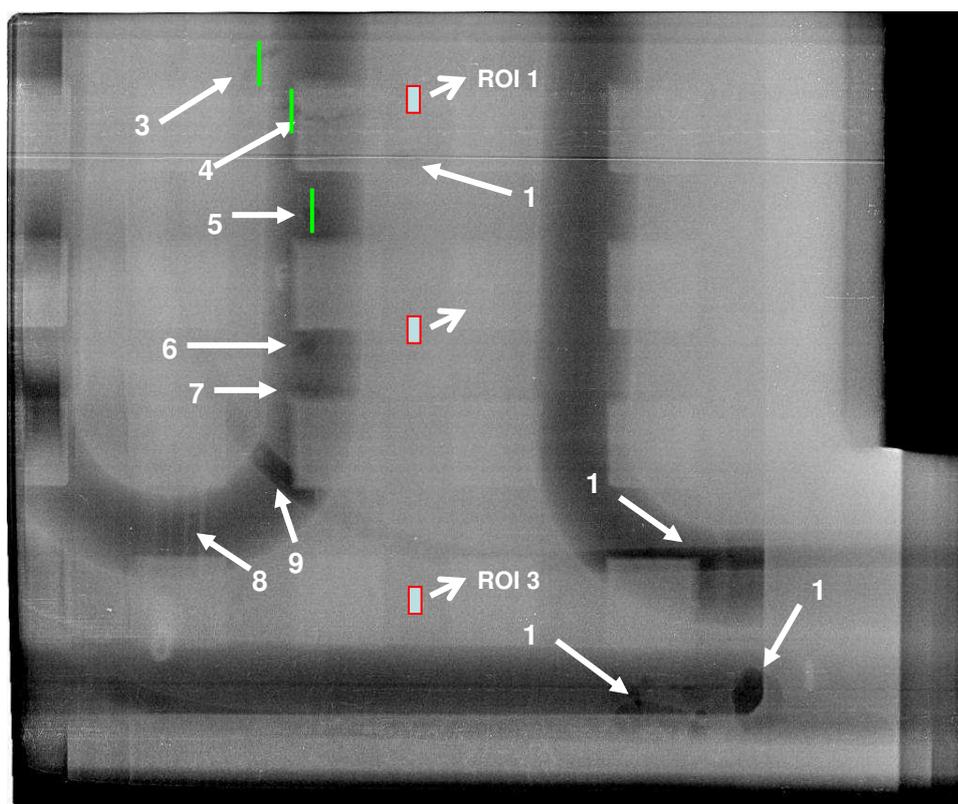


Figura 4.24 – RC com radiação gama da fonte de Co-60 de 22,56 Ci mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs.

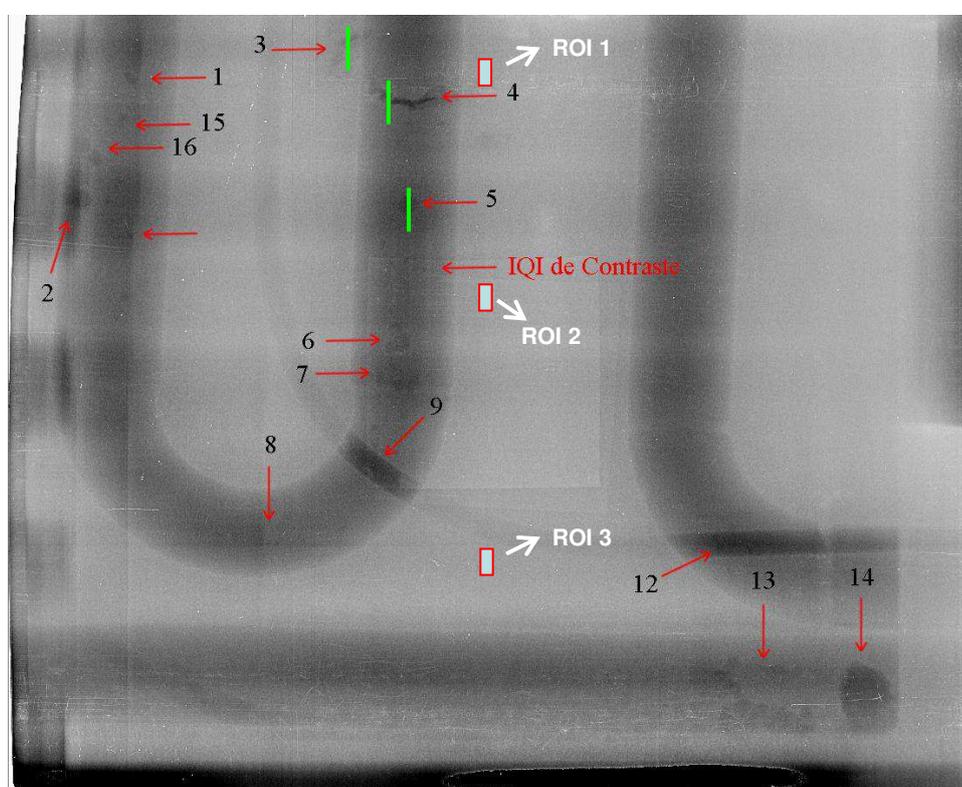


Figura 4.25 – RC com radiação gama da fonte de Co-60 de 49,00 Ci mostrando as regiões onde foram tomados os ROIs.

Tabela 4.2 – Valores de SNR_N com a radiação X e gama nas imagens da RC

| ROI | Acelerador Linear | Fonte de Co-60 de 22,56 Ci | Fonte de Co-60 de 49,00 Ci |
|--------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 140 | 105 | 92 |
| 2 | 151 | 105 | 84 |
| 3 | 163 | 112 | 88 |
| Média | 151 | 107 | 88 |

Os valores de SNR_N mostram que a imagem computadorizada com a fonte de 49,00 Ci ficou mais ruidosa, mesmo assim atendeu o valor para classe normal de $SNR \geq 70$ da norma. Para o acelerador e a fonte de Co-60 de 22,56 Ci atendeu a classe mais rigorosa $SNR \geq 100$ da norma ISO 10.893-7 [46].

4.5.3. Utilização dos recursos da técnica de RC – Perfis de Linha.

Na técnica computadorizada de forma a ajudar na detecção das descontinuidades, foi utilizado o recurso da ferramenta de perfil de linha, que fornece os valores de cinza ao longo de uma trajetória linear demarcada na imagem. Foram eleitas algumas descontinuidades e foi traçado o perfil sobre as descontinuidades de número 3, 4, 5, 13 e 14 com a radiação X do acelerador linear e radiação gama das fontes de Co-60 com atividades de 22,56 Ci e 49,00 Ci.

Este recurso apresenta uma considerável vantagem, eliminando incertezas no dimensionamento com uma melhor avaliação dos contornos das descontinuidades que podem estar sendo interferidas com manchas e artefatos das placas de fósforo. As Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 mostram três gráficos dos tons de cinza das descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14 eleitas quando do traçado do perfil de linha resultantes com cada tipo de fonte de radiação X e gama.

Os perfis de linha que estão nas posições verticais foram traçados de cima para baixo. Enquanto que os horizontais foram traçados da esquerda para direita e em todos os traçados foram feitos fora da região dos ressaltos não havendo interferência nas análises após a remoção dos mesmos.

Mesmo considerando que se tenham pequenas diferenças no traçado das linhas em cada imagem são feitas comparações destes perfis das descontinuidades eleitas. Nestas comparações podemos verificar que em todos os perfis das descontinuidades com o acelerador mostrou ser a de menor ruído, notado pelo contorno das linhas. Em contrapartida, as mais ruidosas foram das descontinuidades das exposições com as fontes de Co-60 de 22,56 Ci e 49,00 Ci.

Todas elas apresentam uma caracterização da morfologia das descontinuidades e também com a fonte de Co-60 uma acentuada incerteza em torno do pico dos valores de cinza por conta dos parâmetros da exposição – energia, tempo de exposição, tamanho focal e distância fonte-detector. Comparando os gráficos das fontes de Co-60 verifica-se uma incerteza maior com a fonte de 22,56 Ci devido o tempo de exposição longo gerando aumento de espalhamentos. A dimensão focal de 2,0 x 2,0 menor que a da fonte de 49,00 Ci não contribuiu para melhoria do perfil de tons de cinza menos incertos.

Os gráficos das descontinuidades 13 e 14 aparentam se tratar de apenas uma descontinuidade, mas verifica-se nas imagens que elas estão separadas.

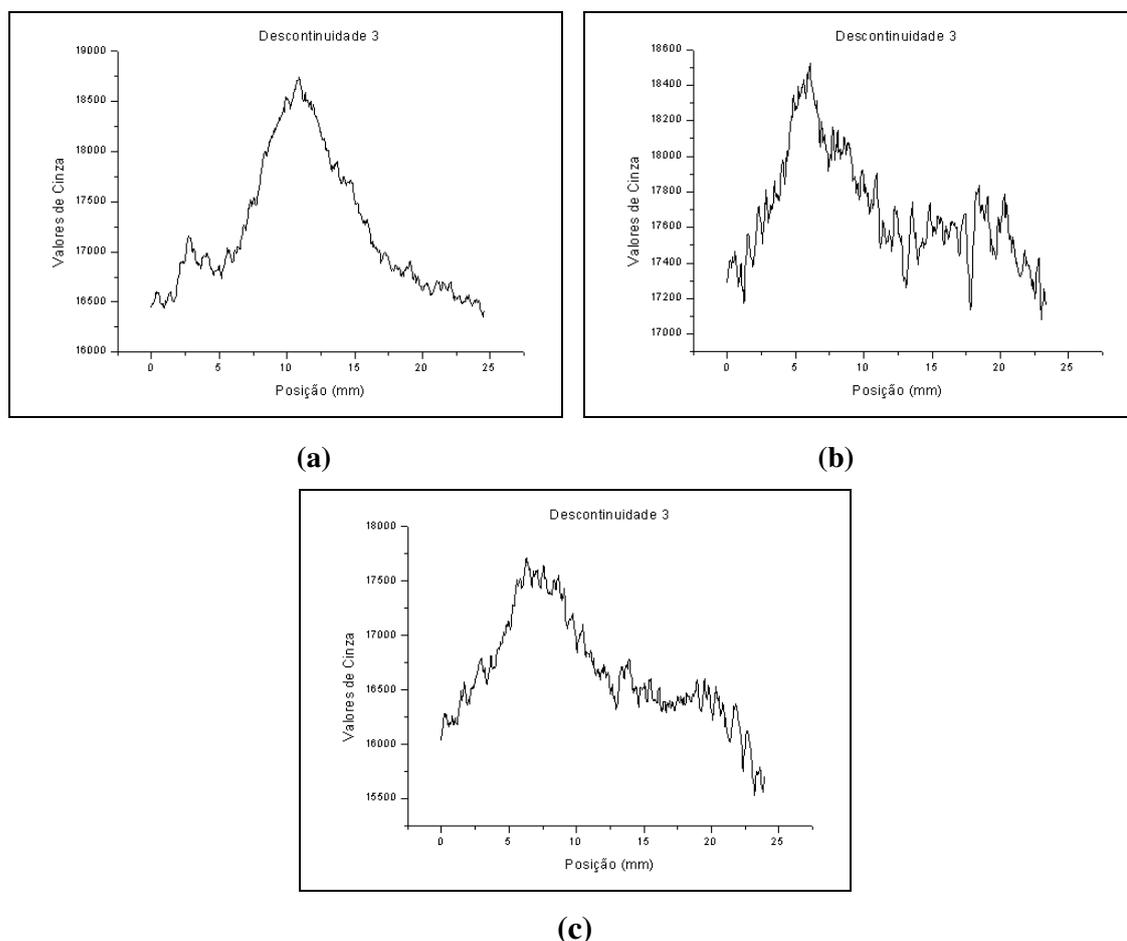


Figura 4.26 – Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 3: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci.

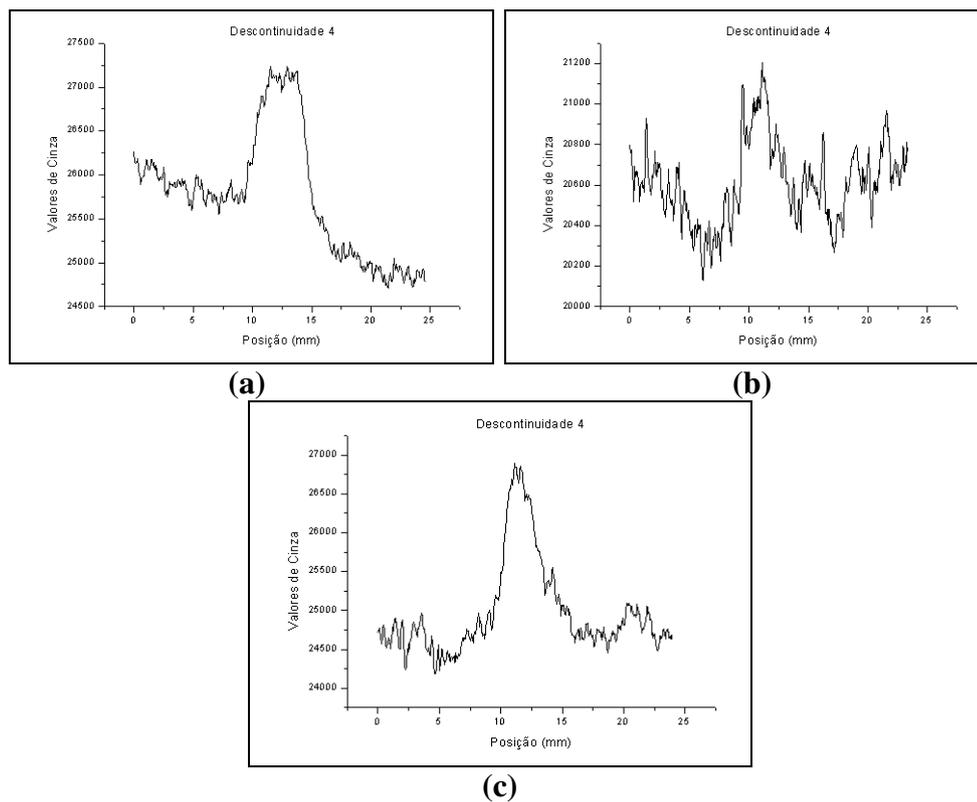


Figura 4.27 – Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 4: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci.

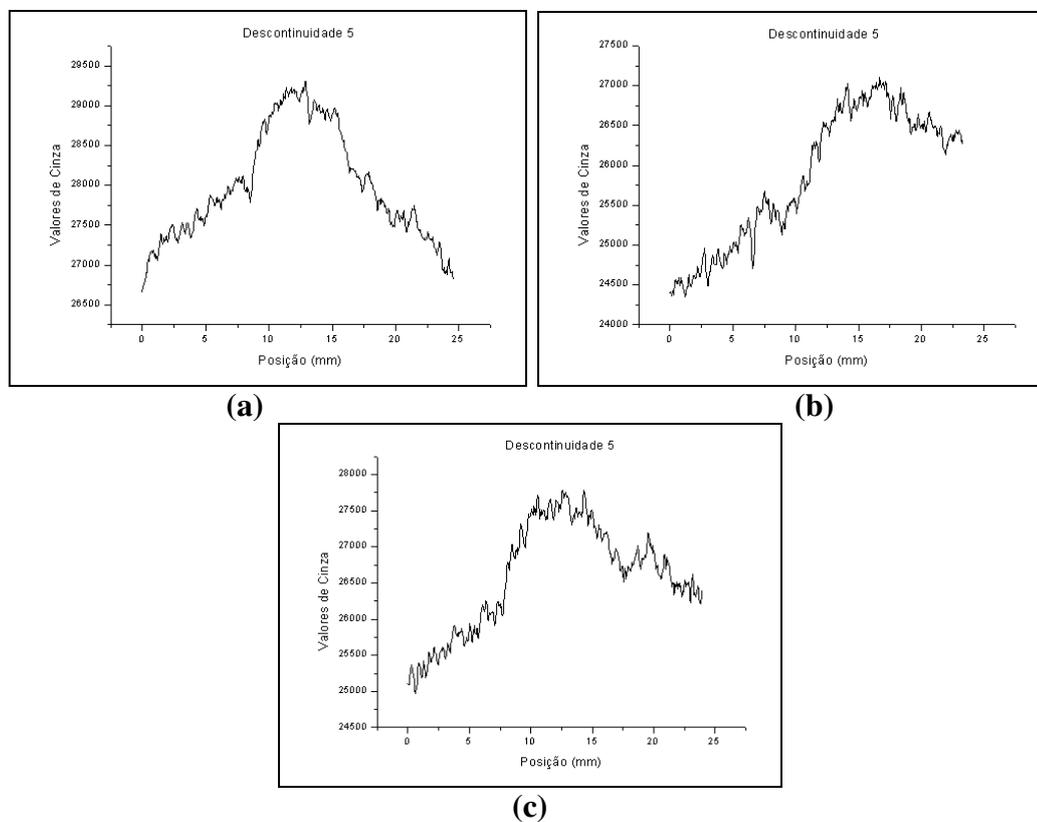


Figura 4.28 – Gráficos do perfil de tons de cinza da descontinuidade 5: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci.

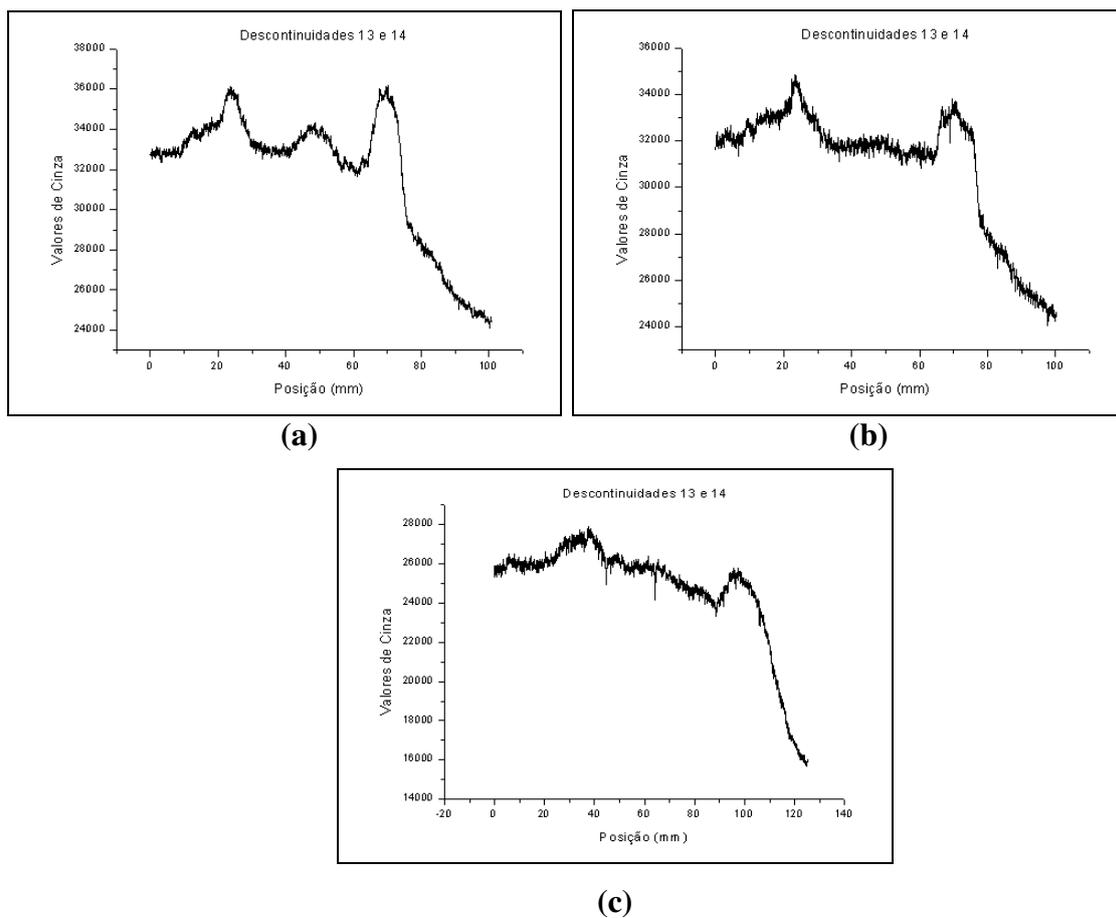


Figura 4.29 – Gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades 13 e 14: (a) com acelerador linear, (b) Co-60 de atividade 22,56 Ci e (c) Co-60 de atividade 49,00Ci.

4.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como o objetivo principal deste trabalho é estudar a técnica de radiografia computadorizada empregando energias provenientes da radiação X e gama, comparando duas técnicas radiográficas, apenas um sistema de RC e tipo de placa de fósforo. Tivemos oscilações entre a qualidade da imagem empregando fontes versus técnica radiográfica convencional e computadorizada, mas os resultados podem ser confiáveis se comparados às condições das execuções, poucos experimentos, destacamos os seguintes resultados:

4.6.1. Quanto ao material cobre do bloco refrigerador

4.6.1.1. Devido à diferença de absorção do cobre, mesmo os resultados terem sido atendidos, poderíamos ter resultados mais favoráveis se o material fosse do CP fosse aço carbono. O material cobre por sua formação cristalina pode ter gerado mais espalhamento interno com as fontes de Co-60. Na Figura 4.30 é mostrado um diagrama esquemático de alguns dos modos de energia dos raios X ou gama dissipada ao passar através da matéria. Elétrons a partir de amostras geralmente são considerados sem importância radiograficamente, aqueles a partir de telas de chumbo são muito importantes [26].

4.6.1.2. No CP foram demarcadas 2 áreas onde devido à grande variação de espessura o fator contraste do objeto foi significativamente afetado tanto pela espessura como pela densidade do cobre ser maior que o aço.

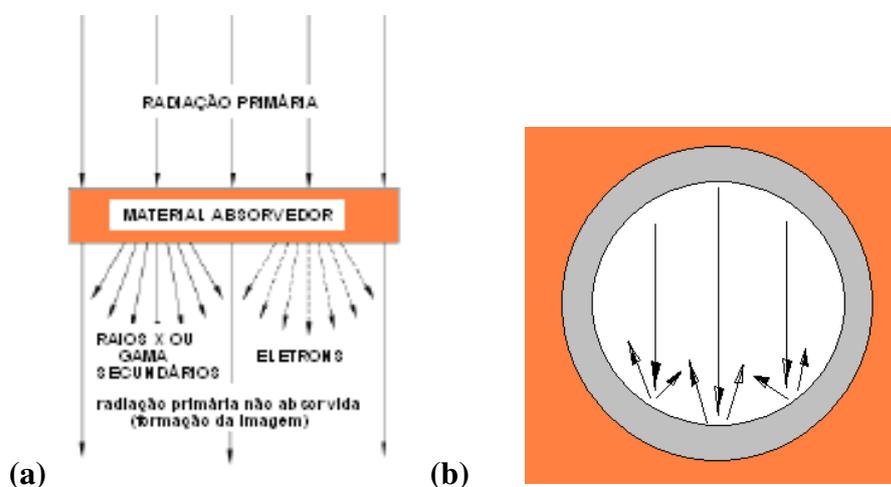


Figura 4.30 – (a) Diagrama esquemático de alguns dos modos de energia da radiação X ou gama, (b) Radiação X ou gama secundários resultante do espalhamento no interior das serpentinas [26].

4.6.1.3. Nas 2 áreas demarcadas na Figura 4.1 temos presente às maiores e menores espessuras atingindo 49,9%, estabelecendo nestas condições ser impraticável numa única exposição com a técnica convencional de vista simples obter uma avaliação completa do bloco refrigerador. O que não ocorreu com a técnica computadorizada devido seus recursos.

4.6.1.4. O método utilizado para obter a espessura equivalente de aço para posteriormente calcular o tempo de exposição foi satisfatório. Empregou-se a equação (4.1) para os cálculos. Na Tabela 4.3 estão relatadas as espessuras equivalentes no material aço carbono. O material cobre apresenta uma densidade de 8930 kg/m^3 enquanto que o aço a densidade é de 7850 kg/m^3 . Foi aplicada a equação abaixo:

$$d_1 \times e_1 = d_2 \times e_2 \quad (4.1)$$

Onde: d_1 e e_1 - densidade e espessura do cobre, d_2 e e_2 a densidade e espessura do aço.

Tabela 4.3 – Espessuras correspondentes entre cobre e aço e seleção do IQI

| <i>Item</i> | <i>Espessura em Cobre (mm)</i> | <i>Correspondente Espessura em Aço (mm)</i> | Seleção IQI ASME V TABELA T-276 (W na EN 462-1) |
|-------------|--------------------------------|---|--|
| e_1 | 150,00 | 170,63 | |
| e_2 | 140,92 | 160,30 | |
| e_3 | 125,00 | 142,19 | W 14 Ø 1,60 mm (W 4) |
| e_4 | 115,92 | 131,86 | |
| e_5 | 109,09 | 124,09 | |
| e_6 | 99,98 | 113,73 | W 13 |
| e_7 | 84,06 | 95,62 | Ø 1,27 mm |
| e_8 | 74,98 | 85,29 | (W 5) |

4.6.1.5. Quando não temos dados de cálculo de um material em normas, mas conhecendo sua densidade pode ser empregado o método de cálculo apresentado para obter o tempo de exposição correlacionando com o aço.

4.6.2. Quanto às energias das fontes utilizadas

4.6.2.1. Em decorrência do fator diferença de absorção relatado na Tabela 4.3, a seleção da energia, de fundamental importância, direcionou-se para a análise da seleção envolvendo a CSR ou HVL presente no CP. Esta seleção tomou como base a norma ASTM E – 94 Parágrafos 7.1 [6], onde é colocado que resultados satisfatórios podem ser normalmente obtidos com energias de raios X entre 100 kV a 500 kV no intervalo entre 2,5 a 10 CSR de espessura do material. Este intervalo pode ser expandido por um fator de 2, em algumas situações para as energias de raios X ou gama de 1 a 25 MeV, principalmente por causa da dispersão reduzida do feixe de radiação. Comprova-se que em comparação com as fontes de Co-60 a energia de 4 MeV do acelerador os resultados são melhorados.

4.6.2.2. Com base nas energias das fontes utilizadas e nos dados disponíveis temos um resumo na Tabela 4.4 dos valores de CSR para as energias envolvidas com as fontes X e gama verifica-se que são adequadas, mas depende da taxa de dose que cada fonte fornece, ou seja, o tempo de exposição e DFD irão interferir no processo de formação da imagem.

Tabela 4.4 – CSR nas energias das fontes de radiação utilizadas

| Item | Espessura em Cobre (mm) | Espessura em Aço (mm) | Nr. de CSR do Co ⁶⁰ no Aço 20,3 mm | Nr. de CSR do RX de 4 MeV no Aço 25,4 mm |
|----------------|-------------------------|-----------------------|---|--|
| e ₁ | 150,00 | 170,63 | 8,4 | 6,7 |
| e ₂ | 140,92 | 160,30 | 7,9 | 6,3 |
| e ₃ | 125,00 | 142,19 | 7,0 | 5,6 |
| e ₄ | 115,92 | 131,86 | 6,5 | 5,2 |
| e ₅ | 109,09 | 124,09 | 6,1 | 4,9 |
| e ₆ | 99,98 | 113,73 | 5,6 | 4,5 |
| e ₇ | 84,06 | 95,62 | 4,7 | 3,7 |
| e ₈ | 74,98 | 85,29 | 4,2 | 3,3 |

4.6.2.3. Se aplicarmos os fatores da Tabela 4.5 recomendado pelo ASME V Artigo 22, SE-94 Tabela 2 [6] as CSR terão novos valores descritos na Tabela 4.6. Verifica-se ao comparar na tabela com dados de densidade [6], que o número de CSR só ocorre variações na ordem de décimos. O que torna adequado a aplicação de cálculo da

equação (4.1) quando não tiver dados tabelados em normas como temos para o aço, mas conhecemos sua densidade.

Tabela 4.5 – Fatores radiográficos aproximados de equivalência para o cobre em relação ao aço nas fontes de altas energias [6]

| Material | Nível de Energia | | | |
|-----------------------|------------------|-------|------------|------------------|
| | 1 MeV | 2 MeV | 4 a 25 MeV | ⁶⁰ Co |
| Ferro e todos os aços | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Cobre | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 |

4.6.2.4. Reforça-se que deve ser observado na Tabela 4.5 o valor aproximado de equivalência para as energias de 1 e 2 MeV é o mesmo para o Co-60.

Tabela 4.6 – Valores de CSR empregando os fatores da Tabela 4.5

| Item | Espessura em Cobre (mm) | Espessura Correspondente de Aço com ⁶⁰ Co(mm) | Espessura Correspondente de Aço com 4MeV(mm) | Nr. de CSR do Co ⁶⁰ no Aço 20,3 mm | Nr. de CSR Do RX de 4 MeV no Aço 25,4 mm |
|----------------|-------------------------|--|--|---|--|
| e ₁ | 150,00 | 165,00 | 180,00 | 8,12 | 7,08 |
| e ₂ | 140,92 | 155,01 | 169,10 | 7,63 | 6,65 |
| e ₃ | 125,00 | 137,50 | 150,00 | 6,77 | 5,90 |
| e ₄ | 115,92 | 127,51 | 139,10 | 6,28 | 5,47 |
| e ₅ | 109,09 | 119,99 | 130,90 | 5,91 | 5,15 |
| e ₆ | 99,98 | 109,97 | 119,97 | 5,41 | 4,72 |
| e ₇ | 84,06 | 92,46 | 100,87 | 4,55 | 3,97 |
| e ₈ | 74,98 | 82,47 | 89,97 | 4,06 | 3,54 |

4.6.3. Quanto à radiação espalhada

4.6.3.1. Nos ensaios radiográficos quando um feixe de raios X ou gama atinge qualquer objeto, parte da radiação é absorvida, alguns se dispersa e alguns passa direto (Figura 4.30). Os elétrons dos átomos que constituem a radiação dispersa pelo objeto são espalhados em todas as direções, ver exemplo na Figura 4.30 b onde até as paredes internas das serpentinas espalham o feixe primário. Os comprimentos de onda de grande parte da radiação são aumentados pelo processo de espalhamento e,

consequentemente, a dispersão é sempre um pouco menos penetrante, que a radiação não dispersa primária causando ruídos inerentes ao processo de formação da imagem.

4.6.3.2. Qualquer material, o espécime de teste, cassete, parede, ou no chão que recebe a radiação direta é uma fonte de radiação espalhada. E quanto maior o tempo de exposição mais espalhamentos teremos. A não ser que sejam tomadas as devidas medidas para reduzir os efeitos de dispersão, que irá reduzir o contraste ao longo de toda a imagem ou partes da mesma.

4.6.3.3. Com a fonte de 22,56 Ci, devido o tempo de exposição mais longo e o arranjo da exposição próximo ao solo tivemos os maiores espalhamentos se comparado com o arranjo com a fonte de Co-60 de 49,00 Ci.

4.6.4. Quanto aos fatores geométricos: dimensão focal, distância fonte-detector (dfd), distância objeto-detector (dod)

4.6.4.1. As fontes utilizadas possuíam as seguintes dimensões focais: acelerador linear 2,0 mm, fonte de Co-60 de 22,56 Ci com 2,0 x 2,0 (2,82 mm) e a fonte de Co-60 de 49,00 Ci com 4,2 x 4,6 (5,94 mm). Com estes valores de dimensão focal e o valor de penumbra de 1,78 mm do ASME Seção V, parágrafo T-274, verifica-se na Tabela 4.7 como deveria ser as distâncias mínimas DFD para atender as normas ASME Seção V, Artigo 2, Parágrafo T-274, Petrobras N-2821 e BS EN 14784-2 [75].

Tabela 4.7: Valores das distâncias mínimas foco-detector calculados – DFD

| Dimensão Focal das Fontes (mm) | | Acelerador Linear - 2,0 | Co-60 22,56 Ci - 2,82 | Co-60 49,00 Ci - 6,22 |
|--------------------------------|---|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| DFD (mm) experimental | | 2.000 | 1.000 | 1.000 |
| Norma | Equação | | | |
| ASME V Artigo 2 | $Ug = \frac{F.d}{D}$ | 319 | 388 | 653 |
| PB N-2821 | $Dfd = \frac{f.e}{p} + d$ | 319 | 388 | 653 |
| EN 14782-2 | $\frac{f}{d} \geq 7,5(b)^{\frac{2}{3}}$ | 574 | 748 | 1410 |

4.6.4.2. As distâncias experimentais aplicadas atenderam as normas ASME e PB para as três fontes, mas não atendeu a norma BS EN 14784-2 com a fonte de Co-60 de 49,00 Ci. A dimensão focal desta fonte é maior 2,97 vezes a do acelerador e 2,1 vezes a dimensão focal da fonte de Co-60 de 22,56 Ci.

4.6.5. Quanto aos dados dos ensaios realizados com as três fontes e as duas técnicas relatados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados na detectabilidade das descontinuidades

| Técnica Filme/IP | Radiação X 4 MeV | | | Radiação Gama Co – 60 de Atividade | | | | | | LAUDO | |
|---------------------|---------------------|----------------|-----------|------------------------------------|----------------|-----------|----------------|----------------|-----------|----------|--------------|
| | CVS (Cl. I) | CVS (Cl.II) | RC IPX | CVS (Cl.II) | CVC (Cl.II) | RC IPX | CVS (Cl.II) | CVC (Cl.II) | RC IPX | | |
| DFD (mm) | 2000 | 2000 | 2000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | |
| Te (minutos) | 1,4 | 1,0 | 1,7 | 110,0 | --- | 150,0 | 78,0 | --- | 30,0 | | |
| Nr. IQI Exigido | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| Nr. IQI Obtido | 3 | 6 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| ND | E | D | D | D | D | D | D | D | D | D | LAUDO |
| 1 | 84,06 | S | N | S | S | S | S | S | N | S | A |
| 2 | 125,0 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | A |
| 3 | 125,0 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | R |
| 4 | 84,06 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | R |
| 5 | 84,06 | S | N | S | S | S | S | S | N | S | A |
| 6 | 84,06 | S | N | S | S | S | S | S | N | S | A |
| 7 | 84,06 | S | N | S | S | S | S | S | N | S | R |
| 8 | 84,06 | S | N | S | S | S | S | S | N | S | A |
| 9 | 74,98 | S | N | S | S | N | S | S | N | S | R |
| 10 | 125,00 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | A |
| 11 | 125,00 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | A |
| 12 | 74,98 | S | N | S | S | N | S | S | N | S | R |
| 13 | 84,06 | S | S | S | S | S | S | S | N | S | R |
| 14 | 84,06 | S | S | S | S | S | S | S | N | S | R |
| 15 | 125,00 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | A |
| 16 | 84,06 | S | S | S | S | S | S | S | N | S | A |
| 17 | 140,92 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | A |
| 18 | 84,06 | S | N | S | N | N | S | S | N | S | A |
| 19 | 109,06 | S | S | S | N | N | S | S | N | S | A |
| 20 | 115,92 | S | N | S | S | N | S | S | N | S | R |
| 21 | 125,00 | S | S | S | N | N | S | S | N | S | A |
| TOTAL (S) | | 21 | 12 | 21 | 18 | 15 | 21 | 21 | 7 | 21 | |

Legenda aplicável a Tabela 4.8:

Técnicas: CVS – Convencional Vista Simples; CVC – Convencional Vista Composta; RC – Computadorizada; Te – Tempo de exposição; IPX – Tipo de *IP* ; ND – Número da Descontinuidade; E – Espessura do CP no local da descontinuidade; D – Detectabilidade: S – Sim, N – Não; Laudo: A – Aprovado, R – Reprovado.

- 4.6.5.1. Verifica-se a efetividade da técnica computadorizada com as fontes de radiação X e gama, obtendo detectabilidade em todas as vinte e uma descontinuidades detectadas no bloco refrigerador.
- 4.6.5.2. As fontes de Co-60 não poderiam ter o mesma DFD usada na exposição com o acelerador, pois teríamos os tempos de exposição quadruplicados na convencional. Na computadorizada também iria aumentar para atender os parâmetros essenciais [2, 20, 76].
- 4.6.5.3. As descontinuidades de números 9, 12 e 21 não foram recusadas nos laudos da prestadora de ensaio radiográfico convencional no fabricante. Estas descontinuidades foram mais bem identificadas com a RC.
- 4.6.5.4. Nas avaliações com a técnica identificada como CVC a efetividade “N” é devido quando da sobreposição dos filmes a densidade nas seções de menores espessuras ultrapassa a 4,0 H&D tornando a visualização das descontinuidades comprometidas. Estas não deixaram de serem detectadas na técnica computadorizada.
- 4.6.5.5. Na avaliação com a técnica identificada como CVS com a radiação X e filme ASTM classe II a efetividade “N” é devido que a exposição teve como objetivo mostrar as áreas de maiores espessuras ficando as seções das serpentinas com densidades ultrapassando a 4,0 H&D tornando de modo idêntico a CVC explicado no parágrafo anterior.
- 4.6.5.6. A imagem do IQI de contraste na RC com as fontes de Co-60 não atendeu plenamente a norma, ela foi comprometido pelas interferências geradas com as diferentes espessuras nas seções críticas, ressaltos e os vazios no interior das serpentinas. O posicionamento do IQI foi buscando a melhor região para sua fixação, mas sem conhecer as regiões internas do CP.
- 4.6.5.7. Tem-se verificado que a exigência da SRb tem sido para a inspeção de solda. Na norma Petrobrás para corrosão N-2820 [10], por exemplo, nem cita que deve ser utilizado o IQI de fio duplo. O trabalho teve esta premissa como escopo, mas deve-se considerar apenas o valor da resolução do sistema e os valores obtidos da SNR.
- 4.6.5.8. Com as fontes de Co-60 o tempo de exposição poderia ser reduzido (testado) desde que a DFD e a área de interesse fosse reduzida em ambas as técnicas. A DFD mínima atendeu plenamente ao Código ASME Seção V Artigo 2, parágrafo T – 274 [6] e Petrobrás N-2821 [11], exceto a norma BS EM 14784-2 [75] ou DIN EN 1425 [4].

4.6.6. Quanto aos dados dos gráficos do perfil de tons de cinza das descontinuidades de número 3, 4, 5, 13 e 14 relatados na.

Tabela 4.9 – Dados dos perfis de tons de cinza das descontinuidades 3, 4, 5, 13 e 14

| Tipo Radiação | ND | Faixa dos Valores de Cinza | D1 | Intervalo | | ROI _M | TD | NF | Item |
|--------------------------|-------|----------------------------|-------|--------------|------|------------------|----|------|------|
| | | | | Posição (mm) | D2 | | | | |
| X 4 MeV | 3 | 18750-16750 | 1000 | 5,0-17,5 | 12,5 | 151 | R | 4.14 | 1 |
| | 4 | 27250-25300 | 1950 | 9,0-17,0 | 8,0 | | R | | 2 |
| | 5 | 29300-27250 | 2050 | 1,5-22,5 | 21,0 | | PO | | 3 |
| | 13-14 | 36000-33000 | 3000 | 10,0-72,0 | 62,0 | | R | | 4 |
| Gama Co-60 22,56Ci | 3 | 18500-17200 | 1300 | 1,5-13,0 | 11,5 | 107 | R | 4.16 | 5 |
| | 4 | 21200-20100 | 1100 | 6,0-17,0 | 11,0 | | R | | 6 |
| | 5 | 27100-24500 | 2600 | 23,0-3,0 | 20,0 | | PO | | 7 |
| | 13-14 | 34400-28000 | 6400 | 10,0-80,0 | 70,0 | | R | | 8 |
| Gama Co-60 49,00Ci | 3 | 17750-16250 | 1500 | 13,0-0 | 13,0 | 88 | R | 4.18 | 9 |
| | 4 | 27850-24500 | 3350 | 16,0-7,0 | 11,0 | | R | | 10 |
| | 5 | 27750-25000 | 2750 | 17,5-0 | 17,5 | | PO | | 11 |
| | 13-14 | 28000-18000 | 10000 | 118,0-20 | 98,0 | | R | | 12 |

Legenda:

D1 e D2 – Diferenças 1 e 2; ND – Número da descontinuidade; ROI_M – ROI médio;
TD – Tipo de descontinuidade; NF – Número da figura; PO – Poro; R – Rechupe

- 4.6.6.1. De acordo com os padrões de aceitação as descontinuidades 3, 4, 13 e 14 são inaceitáveis e, portanto são defeitos recusados por norma do produto.
- 4.6.6.2. Verifica-se que nos perfis de tons de cinza das descontinuidades com o acelerador os intervalos dos picos são menores indicando baixo ruído em relação às fontes de Co-60. Estes perfis foram tomados como referência para análise dos demais – itens 1 a 4.
- 4.6.6.3. As descontinuidades de número 3 e 4 embora apresentem morfologias semelhantes e próximas apresentam tons de cinza diferenciada devido à descontinuidade de número 4 estar sendo interferida com a serpentina de diâmetro maior promovendo aumento no ruído – item 1 e 2.

- 4.6.6.4. Na descontinuidade de número 5 os valores de tons de cinza ultrapassaram os valores da descontinuidade 4. Pelo mesmo motivo citado acima é devido estar sendo somado com os tons de cinza da serpentina e o valor ligeiramente maior é devido ser uma descontinuidade do tipo poro com um diâmetro aproximado de 10,0 mm. Uma descontinuidade de um poro apresenta contornos bem definidos devido ser um vazio – item 3.
- 4.6.6.5. Em todas as imagens, as descontinuidades 13 e 14 estão próximas. Elas estão com interferência da serpentina de diâmetro maior que eleva o nível de cinza, por isto, elas apresentam não ter separação – item 4.
- 4.6.6.6. O valor de ROI médio caracteriza que as imagens de menor ruído com relação às imagens com fontes de Co-60 são as do acelerador devido principalmente a energia do feixe e a maior DFD – itens de 1 a 4.
- 4.6.6.7. Observa-se que as diferenças relatadas na coluna D1 foram aumentando de uma fonte para outra. Sendo menor para o acelerador e maior para fonte de 22,56 Ci e maior ainda para fonte de 49,00 Ci – itens de 1 a 12.
- 4.6.6.8. Os perfis de tons de cinza das descontinuidades com a fonte de 22,56 Ci apresentam intervalos mais discretos que das outras fontes, devido ao longo tempo de exposição o ruído gerado foi maior pela própria descontinuidade e o espalhamento produzido internamente pelo material do bloco – itens 5 a 8.
- 4.6.6.9. No perfil de tons de cinza da descontinuidade número 4 com a fonte de 22,56 Ci os intervalos foram ainda mais discretos com conseqüente perda de informação e a diferença deve ter sido menor devido à referência tomada na traçagem da linha – item 6.
- 4.6.6.10. Os perfis de tons de cinza das descontinuidades com a fonte de 49,00 Ci deveriam ter intervalos menores e menos discretos, se aproximando aos perfis com a imagem do acelerador. Este resultado não foi conseguido devido à imagem estar mais ruidosa confirmada pelo valor de ROI médio de 88. Esta fonte com atividade maior que a anterior, teve seu resultado comprometido devido ter artefatos e a sua dimensão focal de 4,2 x 4,6 mm, mesmo a exposição ter sido feita com a fonte no terminal projetando o feixe na face de 4,2 x 4,2 mm, Figura 3.30 – itens 9 a 12.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos nesse trabalho, foi possível verificar a viabilidade do emprego da RC na inspeção de peças de materiais, neste caso proveniente do processo de fundição de cobre utilizando fontes de radiação de alta energia da radiação X de um acelerador linear de 4 MeV e gama de fontes de Co-60 e peças com variação de espessura como o do CP estudado. Pode-se concluir:

1. A RC foi capaz de detectar todas as descontinuidades nas seções críticas da peça com apenas uma exposição o que não seria possível na técnica convencional com a técnica de vista simples;
2. A técnica RC atendeu o objetivo da especificação do produto avaliando com maior propriedade as seções mais críticas da peça;
3. A qualidade da imagem com RC e fonte de Co-60 mesmo em desvantagem devido ao seu espectro discreto, a imagem final dotada de certa quantidade de ruído, prejudicando os parâmetros de análise da qualidade da imagem, como a SRb e SNR, há necessidade de outros critérios de avaliação da imagem.
4. Com a técnica computadorizada ocorreu uma redução no tempo de exposição quando comparada com a técnica de vista simples e filme ASTM Classe II. Os tempos de exposição foram reduzidos em: 15% com o acelerador linear, 31,8% com a fonte de Co-60 de 22,56 Ci e 80% com a fonte de Co-60 com 49,00 Ci;
5. A redução do tempo de exposição descrita no item acima contribui para redução de doses nos operadores, consequentemente contribui com a radioproteção com ganhos para preservação da saúde do operador.
6. Com a técnica computadorizada ocorre a preservação do meio ambiente com a eliminação de produtos químicos, resíduos pesados e filmes radiográficos.

7. Com a técnica computadorizada eliminam-se os arquivos de filmes radiográficos industriais além de proporcionar acompanhamento imediato dos ensaios radiográficos com envio de imagens por meios eletrônicos.
8. A ferramenta da técnica computadorizada com o traçado de linhas para se obter um gráfico de tons de cinza permite eliminar e até mesmo diminuir as incertezas de existência e no dimensionamento das descontinuidades obtendo ganhos nas interpretações das imagens e confiabilidade do produto;
9. Considera-se a potencialidade da técnica de computadorizada com a utilização de fontes de Co-60, devido ser esta energia a de maior disponibilidade no mercado e de um custo inferior ao dos aceleradores lineares.
10. Obteve-se um ganho de resultado com a utilização das ferramentas de processamento de imagem, onde foi possível detectar todas as descontinuidades do CP processada com o filtro “*Enhance Details*” e com ajuste de brilho e contraste o que não é possível completamente com a técnica convencional por meio de um negatoscópio. Verificou-se com esta ferramenta a medição das dimensões e morfologia das descontinuidades é mais efetiva além de possibilitar verificar a presença do nível de ruído e tratamento a imagem.
11. Para a técnica radiográfica convencional, principalmente em peças de grandes variações de espessura, deve ser mantida a técnica de vista composta. Nesta técnica podem ser usados filmes de mesma ou diferente sensibilidade;
12. A fonte de Co-60 com 49,00 Ci obteve melhor resultado com a espessura de 125,0 mm de peças fundidas de cobre, após a usinagem para remoção dos ressaltos;
13. A atividade da fonte de Co-60 deve, preferencialmente, estar no mínimo com 49,00 Curies;
14. A recomendação dos valores de CSR ou HVL de acordo com a norma ASTM E-94 para a energia de 4 MeV do acelerador linear pode ser utilizada para o cobre, desde que seu valor de 25,4 mm para o aço seja ajustado. Aplicando-se o fator de 1,2 estima-se um HVL de 21,16 para o cobre.
15. Verificou-se que para a espessura de 150 mm, interferências externas e internas e do material da peça o IQI de arame duplo não mostrou adequado, requerendo a adequação

de um novo padrão normalizado para espessuras acima de 75,0 mm (menor espessura do bloco refrigerador).

- 16.** A recomendação da norma Petrobras N-2821 [11] quanto à faixa de espessura a radiografar com fontes de Co-60 está adequada para aço, mas para o material cobre recomenda-se que a faixa seja reduzida pelo fator descrito na Tabela 4.5 reduzindo a espessura máxima para 135 mm.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Para a técnica radiográfica convencional, deve ser mantida a técnica de vista composta, pois não é possível com apenas um filme detectar as discontinuidades existentes em peças com várias espessuras e contendo seções críticas. Nesta técnica pode ser usados filmes de mesmas ou diferentes sensibilidades.
2. Quando for usada a técnica convencional em peças com grande variação de espessura recomenda-se usar sempre a técnica de vista composta com múltiplos filmes e em números pares de filmes. A técnica convencional para este tipo de peça com várias espessuras a composição com quatro filmes de mesma sensibilidade, por exemplo, pode ser aplicada, desde que nas seções críticas sejam avaliadas progressivamente, mantendo a densidade mínima de 1,3 H&D como recomendada pela norma DIN EN 1435 e Código ASME Seção V e [4, 5];
3. Para o acelerador linear de 4 MeV devido serem um feixe monocromático não terá resultados desfavorável até 250 mm seguindo as recomendações do ASTM E-94. Outros sistemas digitais devam ser testados para buscar resultados idênticos ou melhores daqueles apresentados neste trabalho, bem como usar energias do acelerador Varian Linatron modelo M-3A com as energias de 1 e 3 MeV. Estima-se que devemos ter outros ganhos com a RC com estas energias.
4. Experimentar placas de fósforo padrões que irá proporcionar uma diminuição no tempo de exposição aproximadamente em 50%, permitindo ter uma adequação a avaliação de peças fundidas de cobre ou de aço e ainda verificar que na técnica utilizando fontes de Co-60 cujas energias são altas deve ser estudado o seu retro espalhamento que pode ser sensível a placa de fósforo.
5. Com fontes de Co-60 com o objetivo de melhorar os resultados nas imagens recomenda-se usar filtros metálicos recomendados pela norma BS EN 14784-2 [75], bem como outras recomendações, por exemplo, o cálculo da distância foco-detector mínima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOHR, G.; WILLEMS, P.; “**Factors affecting Probability of Detection with Computed Radiography**” in 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct. 2008, Shanghai, China. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/18.pdf>. Acesso em: 15 maio 2012.
- [2] EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; BAVENDIEK, K.; “**Replacement of Film Radiography by Digital Techniques and Enhancement of Image Quality**”. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v12n06/ewert.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2012.
- [3] ASME Code Section VIII, Division 1 – **Rules for Construction of Pressure Vessels – Mandatory Appendix 7, Examination of steel castings** – 2010 Edition 2011a Addenda.
- [4] DIN EN 1435 **Radiographic testing of welded joints** – September 2002.
- [5] ASME Code Section V, **Nondestructive Examination – Article 2 Radiographic Examination Method and Mandatory Appendix VIII – Radiography using phosphor imaging plate**, 2010 Edition 2011a Addenda.
- [6] ASME Code Section V, **Nondestructive Examination – Article 22, Radiographic Standards, SE – 94 Standard Guide for Radiographic Examination** 2010 Edition 2011a Addenda. Identical with ASTM Specification E 94 – 2004.
- [7] ASME Code **Case 2476, Radiography Using Phosphor Imaging Plate**, approval date: October 8, 2004.
- [8] Gentil, V., **Corrosão**, 4.^a Edição, LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A – 2003.
- [9] API RP-571 - **Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**, December 2003.
- [10] Petrobras N-2820, **Ensaio Não Destrutivo - Radiografia Computadorizada para detecção de corrosão**. Rio de Janeiro, 2007.
- [11] Petrobras N-2821, **Ensaio Não Destrutivo - Radiografia Computadorizada em Junta Soldada**. Rio de Janeiro, 2007.
- [12] ASTM E-272, **Standard Reference Radiographs for High-Strength Copper-Base and Nickel-Copper Alloy Castings**, 1999.
- [13] ASTM E-186, **Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 41/2-in.) (51 to 114 mm) Steel Castings**, 1998 (R2004).
- [14] ASTM E 280 – **Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (41/2 to 12-in.) (114 to 305 mm) Steel Castings**, 2010.

- [15] ASME Section V , Article 22, SE – 1030 **Standard Test Method for Radiographic – Examination of Metallic Castings** – 2010 Edition 2011 Addenda.
- [16] AQUINO, J. O., “**Procedimentos de Proteção Radiológica em Aplicações Industriais da Radiografia Computadorizada**”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [17] EWERT U.; ZSCHERPEL U.; REDMER B.; BAM Berlin, Germany; SÖLTER B., DGZfP, Berlin, Germany, “**Reduction of Radiation Exposure by Modern Methods of Digital Industrial Radiography**”, 9th European Conference on NDT, ECNDT, September 25-29, Berlin 2006. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.3.5.2%20Abstract.pdf>. Acesso em: 15 maio 2012.
- [18] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN-NN-3.01, **Diretrizes básicas de proteção radiológica**, 27 p, D.O.U., Janeiro, 2005.
- [19] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN-NN-6.04, **Funcionamento de serviços de radiografia industrial**, 35 p, D.O.U., Janeiro, 1989.
- [20] EWERT U.; ZSCHERPEL U.; JECHOW L, M.; “**Essential Parameters and Conditions for Optimum Image Quality in Digital Radiology**”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa. Disponível em: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/595_wcndtfinal00594.pdf, Acesso em: 15 maio 2012.
- [21] ANDREUCCI, R., **Radiologia Industrial**. Disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/ER.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2012.
- [22] OLIVEIRA, D. F., **Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas**, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- [23] McMASTER, R.C., “**Nondestructive Testing Handbook**”, Vol. I – Edited for the Society for Nondestructive Testing - 1959.
- [24] TAUHATA, L., et. al., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.
- [25] HALMSHAW, R., **Industrial radiology - Theory and Practice** 2 ed. Londres: Chapman&Hall, 1995. 320 p.
- [26] KODAK - EASTMAN KODAK COMPANY, “**Radiography in modern industry**” 4 ed. Rochester: Eastman Kodak Company, 1980. Disponível em: www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf. Acesso em: 11 set. 2012.
- [27] GE. Standard Film Systems. Disponível em: http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/film/Film/GEIT-40007EN_ndt-film-brochure.pdf. Acesso em: 12 set. 2012.

- [28] HELMER, R. G., et. al., **Gamma_ray Spectrum Catalogue** – Ge and Si Detectors Spectra, Idaho National Engineering & Environmental, Idaho, USA, 1998.
- [29] BELTRAN, D.J.M.C., “**Estudo da Influência do Retroespalhamento de Raios X em Materiais na Qualidade de Imagem da Radiografia Computadorizada**”. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto de 2010.
- [29] MANGO, S. A., “**Transitioning to Digital Radiography – When does it make sense?**”, 16th WCNDT – Word Conference on NDT, August-September/2004, Montreal, Canada.
- [30] Film Characteristic Curves. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/Sensitometric.htm>. Acesso em: 12 set. 2012.
- [31] TAKAHASHI, K., “**Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX: Eu²⁺ (X = Cl, Br, I) and Imaging Plates**”, Journal of Luminescence, vol. 100, pp. 307-315, 2002.
- [32] GURVICH, A. M.; HALL, C.; KAMENSKIKH, I. A.; et. al., “**Phosphors for Luminescent Image Plates**”, Journal of X-ray Science and Technology, vol. 6, pp. 48-62, 1996.
- [33] SELVASEKAPAPANDIAN, S.; SUBRAMANIAM, N.G.; SAVITHA, T.; et. al., “**Time-dependent PSL studies on CsBrCl:Eu²⁺: a promising image screen phosphor**”, Materials Chemistry and Physics, v. 89, pp 300-304, 2005.
- [34] SEGGERN, H., “**Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of present understanding**”, Brazilian Journal of Physics, vol. 29, pp. 254-268, 1999.
- [35] ROUSSILHE, J.; MANGO, S. A.; FALLET, E., “**Performance evaluation of a computed radiography system**”, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June/2007, Lyon, França.
- [36] DATABIS, “**DATABIS Imaging Plate Tecnology for all Applications in Transmission Eletronic Microscopy**”, Disponível em: <http://www.databis.com> . Acesso em: 12 set. 2012.
- [37] SILVA, M.C.; LAMMOGLIA, P.; HERDADE, S.B.; et. al., “**Determinação da Tensão aplicada a Tubos de Raios X através do Espectro de Bremsstrahlung obtido com Fotodiodo PIN**”, Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, v.16, pp. 13-20,2000.
- [38] SPRAWLS, P., “**Physical Principles of Medical Imaging, Madison, Wisconsin: Medical Physics**”, 2 ed., Wisconsin, USA, 1995.
- [39] Olshausen B. A., PSC – 129 Sensory Process, October 10 / 2000, “**Aliasing**”. Disponível em: <http://redwood.berkeley.edu/bruno/npb261/aliasing.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2012.

- [40] SCURI, A. E., **Fundamentos da Imagem Digital**, disponível em: <http://mirrors.dotsrc.org/luu/curso-cgi/Notas de Aula/scuri.pdf em 15/1/2007>. Acesso em 2 nov. 2012.
- [41] Operações Pontuais. Disponíveis em: <http://paginas.fe.up.pt/~padilha/PAI/ficheiros/Cap3-ac.pdf>. Acesso em 3 nov. 2012.
- [42] Oliveira, D.F.; Lopes, R. T.; Marinho, C. A.; Camerini, C. S.; **Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates**. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Outubro 2007. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/40.pdf>. Acesso em 2 nov. 2012.
- [43] SEIBERT, J. A., “**Physics of Computed Radiography**”, 41st Annual Meeting of the American Association of Physicists in Medicine, July/1999, Nashville, USA.
- [44] DEPRINS, E., “**Digital Radiography in NDT Applications**”, 2nd MENDT Proceedings, June/2004, Jubail City, Saudi Arabia.
- [45] EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; WILLEMS, P., “**Recent Trends in Digital Industrial Radiology**”, National Seminar of ISNT, December/2002, Chennai, India.
- [46] ISO 10.893-7, Non destructive testing of steel tubes - Part 7: **Digital radiographic testing of the weld seam of welded steel tubes for the detection of imperfections**, 2011.
- [47] ASTM E 2339: **Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE)** - 2011.
- [48] DIN EN 1982, **Copper and copper alloys – Ingots and Castings**, Aug. 2008.
- [49] Thermo Scientific - Niton XRF Analyzers, Disponível em: <http://www.niton.com/Metal-and-Alloy-Analysis/Applications/pmi.aspx?sflang=en>. Acesso em: 11 set. 2012.
- [50] Varian Associates, Inc., Radiation Division, 611 Hansen Way, Palo Alto, Calif., USA **LINATRON – 200 / 400 /2000 Maintenance Course**; May 19 – 23 , 1980.
- [51] LINATRON 2000, “**Operation and Maintenance Course**”. Palo Alto California; 1980.
- [52] **High Energy X-Ray application** - Varian Radiation Division, 2010.
- [53] ASTM E 1815-1, **Test Method for Classification of Film Systems for Industrial Radiography**, 1996 (Reapproved 2001).
- [54] EN 584-1, **Non-destructive testing – Industrial radiographic film – Part 1: Classification of film systems for industrial radiography**, 2006.
- [55] ISO 11699-1, **Non-destructive testing - Industrial radiographic film - Part 1: Classification of film systems for industrial radiography**, Genebra, 2008.

- [56] Castro L., **Benefícios da Tecnologia de Grãos-T nas Películas de Radiografia Industrial**. Disponível em: http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/Peliculas_Radiograficas_com_Gr_os-T.pdf. Acesso em: 12 out. 2012.
- [57] ASME Code Section V, Article 22, SE 1025, Identical with ASTM E1025, **Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology**, 2005.
- [58] BS EN 462-2, Non-destructive testing – **Image quality of radiographs. Image quality indicators (step/hole type). Determination of image quality value - Part 2**, 1994.
- [59] ASME Code Section V, Article 22, SE 747, Identical with ASTM 747 – **Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Wire Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology** – 2004.
- [60] BS EN 462-1 **Non-destructive testing - Image quality of radiographs. Image quality indicators (wire type). Determination of image quality value** – Part 1, 1994.
- [61] BS EN 462-5 **Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value**, 1996.
- [62] ASTM E 2002, **Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness in Radiology**, 2003.
- [63] Carestream Health. Disponível em: <http://www.carestream.com/ndt-resources.html>. Acesso em: 02 nov. 2012.
- [64] ASME SECTION V Article 2 and 22 SE 999, 2010 Edition 2011 Addenda, Identical ASTM E 999 **Guide for Controlling Quality of Industrial Radiographic Film Processing** – 2005.
- [65] Disponível em: <http://www.colenta.at/color/filmprocessors/filmprocessors.php>. Acesso em 08 jan. 2012.
- [66] ASTM E 1390, **Guide for Illuminators Used for Viewing Industrial Radiographs** – 2012.
- [67] ASTM E 1079, **Practice for Calibration of Transmission Densitometers** – 2010.
- [68] Disponível em: <http://ndtsupply.7strategydev1.com/index.php/ndt-konica-minolta-pda-100.html>. Acesso em 06 dez. 2011.
- [69] Phosphor Imaging Plates Computed Radiography. Disponível em: http://www.gemcs.com/download/x-ray/digital-x-ray/Phosphor-Imaging-Plates/GEIT-20044EN_phosphor-plates.pdf. Acesso em 03 nov. 2012.

- [70] Disponível em: <http://www.gewscencenter.com/imagelibrary/detail.aspx?mediadetailsid=2147>. Acesso em 06 dez. 2011.
- [71] Disponível em: <http://www.intechnde.com/store/downloads/Rhythm%20Software%20Brochure.pdf>. Acesso em 07 dez 2011.
- [72] Disponível em: <http://www.ge-mcs.com/pt/ndt-software/rhythm-software-suite/rhythm-review-.html>. Acesso em 03 nov. 2012.
- [73] ASME SECTION V Article 30 SE 1316, 2010 Edition 2011 Addenda, Identical ASTM E 1316 **Standard Terminology for Nondestructive Examinations** – 2002a.
- [74] IE NDT accessories for industrial radiography. Disponível em: <http://www.ie-ndt.co.uk/685a8faf-666f-4d79-9168-0cfc8e648aff-9.html>. Acesso em 14 out. 2012.
- [75] BS EN 14784-2, **Non-destructive testing – Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates**. Part 2: General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays – 2005.
- [76] EWERT, U; ZSCHERPEL, U; BAVENDIEK, K; “**Strategies for Film Replacement in Radiography - Films and Digital Detectors in Comparison**”, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/68.pdf>. Acesso em 04 nov. 2012.