



## ESTUDO COMPARATIVO DA RADIOGRAFIA CONVENCIONAL E COMPUTADORIZADA PARA ANÁLISE DE LIGAS METÁLICAS

Alessandra Silveira Machado

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

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2011

ESTUDO COMPARATIVO DA RADIOGRAFIA CONVENCIONAL E  
COMPUTADORIZADA PARA ANÁLISE DE LIGAS METÁLICAS

Alessandra Silveira Machado

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

Examinada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

---

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2011

Machado, Alessandra Silveira

Estudo Comparativo da Radiografia Convencional e  
Computadorizada para Análise de Ligas Metálicas/

Alessandra Silveira Machado. – Rio de Janeiro:  
UFRJ/COPPE, 2011.

XIII, 65 p., 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Nuclear, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 58-61

1. Radiografia Computadorizada 2. Gamagrafia 3. Image  
Plate. I. Lopes, Ricardo. II Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear III. Título.

*Este trabalho é dedicado aos meus pais e à minha irmã  
Ao meu namorado Leandro e ao meu sobrinho Teodoro*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar serenidade e coragem nos momentos de desafio e dificuldade.

Ao professor Ricardo Tadeu Lopes pela orientação, disponibilidade e atenção dada neste trabalho e, principalmente, pela amizade e confiança depositada em mim.

Aos colegas e funcionários do Laboratório de Instrumentação Nuclear.

Ao meu amigo Davi, pela paciência por compartilhar seus conhecimentos, me ajudando e participando diretamente em todos os meus trabalhos.

À amiga Aline por seu apoio e disposição em ajudar.

À empresa Confab Equipamentos em especial ao amigo Heleno, cuja ajuda foi indispensável na realização deste trabalho.

Aos meus pais e a toda minha família pelo carinho e apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado Leandro pela ajuda, o carinho compreensão e amor que me fizeram chegar até aqui.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

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

## ESTUDO COMPARATIVO DA RADIOGRAFIA CONVENCIONAL E COMPUTADORIZADA PARA ANÁLISE DE LIGAS METÁLICAS

Alessandra Silveira Machado

Fevereiro/2011

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Nesta dissertação é apresentado um estudo comparativo entre a técnica radiográfica convencional e computadorizada para análise de ligas metálicas (corpo de prova) avaliando parâmetros inerentes a imagem radiográfica. As ligas metálicas analisadas são utilizadas como revestimento, e tem por objetivo proteção contra corrosão e trincas. Um conjunto de sete amostras foi radiografado empregando a técnica de radiografia convencional, utilizando feixes de raios X e  $\gamma$  proveniente de fontes de  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{75}\text{Se}$ . Nas imagens radiográficas obtidas foram analisados parâmetros como contraste e densidade óptica (DO). Posteriormente, o mesmo conjunto de amostra foi radiografado utilizando a técnica radiográfica computadorizada com Image Plate HD-IP, para isso também foram empregados fontes de raios X e gama ( $^{192}\text{Ir}$ ). Nestas imagens foram avaliadas as resolução espacial básica (BSR), contraste e relação sinal-ruído normalizada ( $\text{SNR}_N$ ). Para os ensaios com radiografia computadorizada, utilizando fonte de radiação gama, todos os parâmetros ficaram acordados com a norma N-2821 (Petrobrás). Para os ensaios utilizando fonte de raios X os resultados obtidos para contraste satisfizeram a norma, mas a BSR apresentou um par de fios acima do exigido por norma, no entanto os resultados para  $\text{SNR}_N$  apresentaram-se dentro da norma.

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

## COMPARATIVE STUDY BETWEEN CONVENTIONAL RADIOGRAPHY AND COMPUTED RADIOGRAPHY APPLIED TO THE ANALYSIS OF ALLOYS

Alessandra Silveira Machado

February/2011

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

The present dissertation aims at presenting a comparative study between conventional radiography and computed radiography applied to the analysis of alloys (test subject). The comparison was made by evaluating the parameters which are inherent to the radiographic image. A set of seven samples was radiographed using conventional radiography. In the radiography images acquired through the tests, certain parameters such as contrast and optical density were analyzed. Afterwards, the same set of test samples was radiographed using computer radiography. For this purpose, HD-IP Image plates were used, as well as X-ray and gamma beams sources. Parameters such as Basic Spatial Resolution (BSR) and Normalized Signal-to-Noise ( $SNR_N$ ) were evaluated in the acquired images. Regarding the tests performed with computed radiography using the gamma radiation source, all the parameters were also compliant to the regulation N2821 (Petrobras). As for the tests performed with the X-ray source, the results were also compliant to the abovementioned regulation, but the BSR presented an extra pair of wires, exceeding the requirements established in the regulation. However, the  $SNR_N$  results were within the compliance range established in the regulation.

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>2.1 – RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA</b> .....                                   | <b>5</b>  |
| <b>2.1.1 – Raios X</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>2.1.2 – Raios Gama (<math>\gamma</math>)</b> .....                         | <b>8</b>  |
| 2.1.2.1 – Iridio ( $^{192}\text{Ir}$ ).....                                   | 8         |
| 2.1.2.2 – Selênio ( $^{75}\text{Se}$ ).....                                   | 10        |
| 2.1.2.3 – Equipamento de Gamagrafia .....                                     | 11        |
| <b>2.1.3 – Interação da Radiação com a Matéria</b> .....                      | <b>13</b> |
| 2.1.3.1 – Efeito Fotoelétrico.....  | 13        |
| 2.1.3.2 – Espalhamento Compton.....   | 14        |
| 2.1.3.3 – Produção de Pares .....   | 15        |
| 2.1.3.4 – Efeito Fotoelétrico, Compton e Formação de Par.....                 | 16        |
| <b>2.2 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)</b> .....                              | <b>16</b> |
| <b>2.2.1 – Técnica Radiográfica Parede Simples Vista Simples (PSVS)</b> ..... | <b>18</b> |
| <b>2.2.2 – Radiografia Convencional</b> .....                                 | <b>19</b> |
| 2.2.2.1 – Qualidade da Imagem.....  | 20        |
| <b>2.2.3 – Radiografia Computadorizada (RC)</b> .....                         | <b>21</b> |
| 2.2.3.1 – Qualidade da Imagem.....  | 21        |
| 2.2.3.1.1 – Resolução Espacial Básica (BSR).....                              | 22        |
| 2.2.3.1.2 – Relação Sinal Ruído Normalizada.....                              | 25        |
| 2.2.3.2 – Imagem Digital.....   | 26        |
| 2.2.3.3 – Sistema de Radiografia Computadorizada.....                         | 26        |
| 2.2.3.4 – Processamento da Imagem Digital .....                               | 30        |
| <b>2.3 – COMPARAÇÃO DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA E CONVENCIONAL</b> .....   | <b>32</b> |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>36</b> |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>3.1 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS</b> .....                                   | <b>36</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>                           | <b>38</b> |
| <b>3.2.1 – Radiografias Convencionais .....</b>                       | <b>38</b> |
| <b>3.2.2 – Radiografias Computadorizadas .....</b>                    | <b>40</b> |
| <b>3.3 - REQUISITOS DE QUALIDADE.....</b>                             | <b>41</b> |
| <b>CAPÍTULO 4.....</b>  | <b>44</b> |
| <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>4.1 - RESULTADOS OBTIDOS COM RADIOGRAFIA CONVENCIONAL .....</b>    | <b>44</b> |
| <b>4.2 - RESULTADOS OBTIDOS COM RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA .....</b> | <b>49</b> |
| <b>4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>                            | <b>54</b> |
| <b>CAPÍTULO 5.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>56</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                               | <b>58</b> |
| <b>ANEXO.....</b>   | <b>63</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2-1 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO, [7].....   | 5  |
| FIGURA 2-2 - COMPONENTES DE UM TUBO DE RAIOS X [8].....   | 6  |
| FIGURA 2-3 - ESQUEMA DE UM ESPECTRO DE RAIOS X .....  | 8  |
| FIGURA 2-4 - ESQUEMA DE DECAIMENTO DO $^{192}\text{Ir}$ [10].....   | 9  |
| FIGURA 2-5 - ESQUEMA DE DECAIMENTO DO $^{75}\text{Se}$ [10].....  | 10 |
| FIGURA 2-6 - FAIXA ÚTIL DE TRABALHO EM AÇO [12].....  | 11 |
| FIGURA 2-7 - ESQUEMA DO IRRADIADOR DE GAMAGRAFIA [13].....  | 12 |
| FIGURA 2-8 - REPRESENTAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO, [15]. .....  | 14 |
| FIGURA 2-9 - REPRESENTAÇÃO DO ESPALHAMENTO COMPTON, [15]. .....   | 14 |
| FIGURA 2-10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ESPALHAMENTO COMPTON, [16].....                                  | 15 |
| FIGURA 2-11 - REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE PAR [15].....  | 15 |
| FIGURA 2-12 - IMPORTÂNCIA DO EFEITO FOTOELÉTRICO, ESPALHAMENTO COMPTON E FORMAÇÃO DE PAR [15].              | 16 |
| FIGURA 2-13 - ESQUEMA DE ENSAIO RADIOGRÁFICO NA INDÚSTRIA .....   | 18 |
| FIGURA 2-14 – ARRANJO DE EXPOSIÇÃO COM A TÉCNICA PSVS. ....   | 19 |
| FIGURA 2-15 - INFLUÊNCIA DO LASER ESTIMULADOR NA RESOLUÇÃO ESPACIAL. ....                                   | 22 |
| FIGURA 2-16 - INFLUÊNCIA DO IP NA RESOLUÇÃO ESPACIAL .....  | 23 |
| FIGURA 2-17 - INDICADOR DE QUALIDADE DE FIO DUPLO, [27]. .....  | 23 |
| FIGURA 2-18 - PERFIL DE LINHA DE UM PAR DE FIOS MOSTRANDO A DIFERENÇA DE PELO MENOS .....                   | 24 |
| FIGURA 2-19 - COMPORTAMENTO ENTRE OS VALORES DE PIXEL E OS TONS DE CINZA, [4]. .....                        | 26 |
| FIGURA 2-20 - COMPOSIÇÃO DA PLACA DE FÓSFORO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM COMPUTADORIZADA, [31]. .....            | 27 |
| FIGURA 2-21 - RADIAÇÃO INTERAGINDO COM A ESTRUTURA DA REDE CRISTALINA DO IP, [4].....                       | 27 |
| FIGURA 2-22 - ELÉTRON APRISIONADO PELA ARMADILHA DE ELÉTRONS, [4].....                                      | 28 |
| FIGURA 2-23 - FEIXE DE LASER LIBERTANDO O ELÉTRON DA ARMADILHA, [4]. .....                                  | 28 |
| FIGURA 2-24 - GRÁFICO DE ABSORÇÃO EM FUNÇÃO DA ENERGIA DOS RAIOS X, [32].....                               | 29 |
| FIGURA 2-25 - ESQUEMA DO PROCESSO DE LEITURA DO IMAGE PLATE, [4].....                                       | 30 |
| FIGURA 2-26 - DIAGRAMA DE SEQUÊNCIA DO PROCESSAMENTO DIGITAL DA IMAGEM, [34].....                           | 31 |
| FIGURA 2-27 - CURVA DE RESPOSTA PARA UMA PLACA DE FÓSFORO COMPARADO COM .....                               | 33 |
| FIGURA 3-1 - CORPO DE PROVA, 7 PLACAS DE LIGAS METÁLICAS. ....  | 36 |
| FIGURA 3 2 - SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA .....   | 38 |
| FIGURA 3-3 - ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA RADIOGRAFIA CONVENCIONAL. ....                                       | 39 |
| FIGURA 3-4 - ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA A RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA,.....                                  | 41 |
| FIGURA 4-1 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DOS CPs A6 E A7 UTILIZANDO FONTES DE RAIOS X.....             | 45 |
| FIGURA 4-2 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DOS CPs A4 E A5 UTILIZANDO FONTES DE RAIOS X.....             | 45 |
| FIGURA 4-3 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CP A1 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X. ....                    | 46 |
| FIGURA 4-4 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CPs A6 E A7 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\gamma$ (Se-75). 47 |    |
| FIGURA 4-5 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CPs A2 E A3 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\gamma$ (Se-75). 47 |    |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4-6 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CP A1 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ (Se-75). ....  | 48 |
| FIGURA 4-7 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CPs A6 E A7 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ (Ir-192).48  |    |
| FIGURA 4-8 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CPs A2 E A3 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ (Ir-192).49  |    |
| FIGURA 4-9 - IMAGEM RADIOGRÁFICA CONVENCIONAL DO CP A1 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ (Ir-192). ....   | 49 |
| FIGURA 4-10 - IMAGEM RADIOGRÁFICA COMPUTADORIZADA DO CP A7 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X, MOSTRANDO A BSR DE 80 $\mu\text{m}$ NO SENTIDO PERPENDICULAR AO LASER DE LEITURA DO ESCÂNER. ....                      | 50 |
| FIGURA 4-11 - IMAGEM RADIOGRÁFICA COMPUTADORIZADA DO CP A7 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X, MOSTRANDO A BSR DE 100 $\mu\text{m}$ NO SENTIDO PARALELO AO LASER DE LEITURA DO ESCÂNER.....                           | 51 |
| FIGURA 4-12 - IMAGEM RADIOGRÁFICA COMPUTADORIZADA DO CP A6 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X. ....   | 51 |
| FIGURA 4-13 - IMAGEM DO CP A6 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X. ....  | 52 |
| FIGURA 4-14 - IMAGEM DO CP A6 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS X. CIRCULADO CONSTA O VALOR DE $\text{SNR}_N$ PARA A REGIÃO DE INTERESSE. A SETA VERMELHA MOSTRA O PAR DE FIOS 10 QUE É O PAR PRIMEIRO NÃO DISCERNÍVEL | 52 |
| FIGURA 4-15 - IMAGEM RADIOGRÁFICA COMPUTADORIZADA DO CP A7 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ , MOSTRANDO A BSR DE 160 $\mu\text{m}$ NO SENTIDO PARALELO AO LASER DE LEITURA DO ESCÂNER.....                   | 53 |
| FIGURA 4-16 - IMAGEM RADIOGRÁFICA COMPUTADORIZADA DO CP A2 UTILIZANDO FONTE DE RAIOS $\Gamma$ . AS SETAS VERMELHAS MOSTRAM O ARAME 8 E CIRCULADO ESTÁ O VALOR ENCONTRADO PARA $\text{SNR}_N$ . ....            | 54 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 2-1 - ENERGIAS E PROBABILIDADES DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO GAMA DO IR-192 [4].....                      | 9  |
| TABELA 2-2 - ENERGIAS E PROBABILIDADES DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO GAMA DO SE-75[4].....                        | 11 |
| TABELA 2-3 - PARÂMETROS DO INDICADOR DE QUALIDADE DE IMAGEM [27]. .....                                    | 24 |
| TABELA 3-1 - APRESENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....  | 37 |
| TABELA 3-2 - TÉCNICA PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RADIOGRAFIA CONVENCIONAL UTILIZANDO RAIOS X. 39         |    |
| TABELA 3-3 - TÉCNICA PARA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DE RADIOGRAFIA CONVENCIONAL UTILIZANDO RAIOS $\Gamma$ . 40 |    |
| TABELA 3-4 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA A AQUISIÇÃO DAS IMAGENS DOS CPS PARA RADIAÇÃO X E $\Gamma$ .....   | 41 |
| TABELA 3-5 - REQUISITOS DE QUALIDADE .....   | 42 |
| TABELA 4-1 - VALORES DE DO E CONTRASTE OBTIDOS COM FONTES DE RAIOS X. ....                                 | 44 |
| TABELA 4-2 - VALORES DE DO E CONTRASTE OBTIDOS COM FONTES DE RAIOS $\Gamma$ . ....                         | 46 |
| TABELA 4-3 - VALORES DE BSR, $SNR_N$ E CONTRASTE, OBTIDOS COM FONTES DE RAIOS X. ....                      | 50 |
| TABELA 4-4 - VALORES DE BSR, $SNR_N$ E CONTRASTE, OBTIDOS COM FONTES DE RAIOS $\Gamma$ . ....              | 53 |

## ACRÔNIMOS

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>ANSI</b>            | <i>American National Standard Institute</i>                         |
| <b>API</b>             | <i>American Petroleum Institute</i>                                 |
| <b>ASME</b>            | <i>American Society of Mechanical Engineers</i>                     |
| <b>ASTM</b>            | <i>American Society for Testing and Materials</i>                   |
| <b>BAM</b>             | <i>Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung</i>            |
| <b>BSR</b>             | <i>Basic Spatial Resolution</i> – Resolução Espacial Básica         |
| <b>CP</b>              | Corpo de Prova  |
| <b>DFD</b>             | Distância Fonte Detector  |
| <b>END</b>             | Ensaio Não Destrutivo   |
| <b>IP</b>              | <i>Image Plate</i>  |
| <b>IQI</b>             | Indicador de Qualidade de Imagem                                    |
| <b>PSL</b>             | <i>Photoestimulable Luminescence</i> – Luminescência Fotoestimulada |
| <b>PSVS</b>            | Parede Simples Vista Simples  |
| <b>RC</b>              | Radiografia Computadorizada   |
| <b>SNR</b>             | Relação Sinal Ruído   |
| <b>SNR<sub>N</sub></b> | Relação Sinal Ruído Normalizada                                     |
| <b>SR<sub>b</sub></b>  | Resolução Espacial Básica Máxima                                    |

# **Capítulo 1**

## **INTRODUÇÃO**

Os sistemas de tubulações em plantas industriais, principalmente no segmento petrolífero, requerem uma atenção especial não apenas pelos tipos de produtos que estão sendo transportados como pelas diversas condições internas de pressão e temperatura em que se encontram. Os riscos envolvidos, se não monitorados e controlados, colocam todo o ativo, seus operadores e a população ao redor em grande perigo. As grandes distâncias que geralmente são alcançadas pelos oleodutos e gasodutos aumentam as chances, com o passar do tempo, de problemas como corrosões, trincas e obstruções.

Por isso projetos de sistemas de tubulações em plantas industriais devem considerar fatores relevantes que devem servir como base para sua correta elaboração. Fatores estes como: revestimentos internos, dimensionamento, sistemas vibratórios, adequada suportação e principalmente escolha do material.

As tubulações industriais podem ser definidas como um conjunto de tubos e seus acessórios. Suas aplicações vão de distribuição de vapor, água, óleos combustíveis e lubrificantes, ar comprimido e gases ou líquidos industriais. Podem ser classificadas quanto ao uso interno e externo às instalações industriais. Quando utilizadas internamente geralmente fazem parte de algum processo, utilidade, drenagem ou instrumentação, e quando utilizadas externamente para transporte e distribuição [1].

Os processos de fabricação dependem de qual tipo de tubo se deseja. Os tubos sem costura são fabricados por 3 diferentes processos, sendo utilizado o processo de laminação para diâmetros grandes e o processo de fabricação por extrusão para diâmetros pequenos, além do processo de fundição para ambos. Os tubos com costura são fabricados pelo processo de soldagem.

Os materiais utilizados para a fabricação de tubos são muitos, podendo ser divididos em metálicos ferrosos (aço carbono, ferro fundido, aço liga, aço inox, etc.) e não ferrosos (cobre, alumínio, níquel, titânio, etc.), e não metálicos como plásticos, cimento, vidro e cerâmica, entre outros. Existem também os tubos com revestimento interno com esmalte asfáltico, borracha, ebonite, etc. Os principais fatores que influenciam a seleção desses materiais para a utilização nas indústrias são quanto ao fluido que será conduzido por esses tubos e em quais condições de temperatura e

pressão se encontrarão. Essas condições levarão os tubos e seus acessórios a esforços mecânicos dinâmicos e estáticos como flexão, tração, compressão, vibração e choques. Os níveis de tensão que o material desses tubos sofrerá devido a esses esforços, bem como dilatações térmicas e esforços de montagem, deverá ser compatível em termos de resistência e outras de suas propriedades, como resistência a corrosão, soldabilidade, conformabilidade, necessidade de tratamento térmico [2].

Um fator decisivo na escolha do material é o seu custo. O tempo de vida esperado de uma tubulação influencia na questão custo, pois a sua substituição e o tempo que pode levar de paralisação para as instalações industriais geram despesas que somadas à própria amortização do investimento inicial podem ser cruciais para uma empresa. A fabricação e montagem dessas tubulações em campo têm uma parcela significativa dentro do investimento total de um ativo, não só pelos materiais empregados, não esquecendo o tipo de acabamento e revestimento (pintura e isolamento) de determinadas linhas, mas toda a mão de obra que faz parte dos custos indiretos [2].

Alguns tubos de aço apresentam revestimentos aplicados em seu interior. Estes revestimentos internos podem ter as seguintes finalidades: revestimentos anticorrosivos, antiabrasivos, antierosivos e revestimentos refratários (isolamento térmico interno). O objetivo geral do emprego dos tubos com algum revestimento interno é sempre aliar as vantagens do baixo custo, boa resistência mecânica, boa soldabilidade e ampla disponibilidade de aço-carbono com propriedades de resistência à abrasão, às altas temperaturas e principalmente corrosão [3].

Podemos definir corrosão como a deterioração de um material geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associadas ou não a esforços mecânicos. Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e o desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo, nas indústrias químicas, petrolíferas, petroquímicas, construção civil, automobilísticas e outros.

As principais especificações de materiais para tubulações são de origem americana como a ASTM (American Society for Testing and Materials) e API (American Petroleum Institute). A norma ASME B.31 ressalta essa exigência que

garante a qualidade não só para os tubos como também para outros componentes como válvulas, conexões, acessórios, etc.

A normatização da ANSI (American National Standard Institute) define para os diferentes materiais os diâmetros, espessuras e tipos de pontas (lisa, chanfrada e rosqueada) comerciais para a tubulação. Os principais meios de ligação dos tubos são roscas, soldas, flanges, ponta e bolsa e outras patenteadas.

Para garantir qualidade na fabricação, assim como monitorar os risco e condições das tubulações com o passar dos anos são feitos os ensaios não destrutivos (END). A radiografia é uma técnica de inspeção não destrutiva, de aplicações importantes na área industrial. O princípio radiográfico está fundamentado nas interações da radiação (fótons de raios X e raios  $\gamma$ ) com o objeto a ser inspecionado, já que dependendo da densidade, da espessura e da composição do objeto ele poderá absorver, espalhar e transmitir esta radiação. Após as interações da radiação com o objeto esta será detectada por um filme radiográfico, formando assim a imagem latente que uma vez revelada permitirá analisar a estrutura do mesmo [4].

Com a chegada de novas tecnologias, a radiografia industrial passa por uma fase de avanços, transitando de uma técnica analógica para uma computadorizada. A Radiografia Computadorizada (RC), já vinha sendo utilizada na área médica desde a década de 80, mas sua utilização na área industrial é um pouco mais recente, começando ao final da década de 90. No Brasil a RC ficou restrita á área médica até o ano de 2000 quando a Petrobrás se interessou pelos testes em andamento na empresa ARCtest, que visavam utilizar os equipamentos desenvolvidos para área médica na área industrial. A primeira utilização industrial da técnica de RC foi para inspeção de tubulações na Refinaria de Paulínia (Petrobrás – Replan) [5].

A RC trás em sua utilização alguns benefícios como redução no tempo de exposição, reutilização do detector (*Image Plate*), não utilização de produtos químicos e aquisição de imagens digitais passíveis de serem manipuladas. Na RC, diferente do sistema convencional, após as interações da radiação com o objeto, esta será detectada por uma placa de fósforo chamada *Image Plate* (IP), que utiliza o Processo de Luminescência Fotoestimulada (PSL) para formação da imagem. O sistema de radiografia computadorizada além do IP compreende um escâner, monitor para visualização da imagem e software para analisá-las e manipulá-las. A radiografia computadorizada apresenta uma série de vantagens, algumas já mencionadas, contudo

deve ser utilizada com cuidado, pois ainda precisa evoluir em termos de qualidade de imagem obtida e detectabilidade. Os procedimentos de teste ainda se baseiam muito na experimentação, tentativas e erros, devido à falta de uma metodologia consagrada na escolha dos parâmetros como no caso da radiografia convencional [4].

Contudo, este trabalho baseia-se em um estudo comparativo entre a técnica radiográfica convencional e computadorizada para análises de ligas metálicas. Estas ligas metálicas são usadas como revestimento interno de tubulações com a finalidade de proteger contra corrosão e trincas. Um conjunto de sete amostras foi radiografado empregando a técnica de radiografia convencional e posteriormente a computadorizada, avaliando parâmetros como contraste e densidade óptica (DO), resolução espacial básica (BSR), e relação sinal-ruído normalizada ( $SNR_N$ ).

Para melhor entendimento a organização desta dissertação está dividida em capítulos como será descrito a seguir:

O capítulo 2 apresentará os princípios básicos de origem e interação das radiações X e gama, assim como a fundamentação teórica necessária para a compreensão de um sistema de radiografia computadorizada, descrevendo os processos de formação da imagem radiográfica computadorizada, leitura e parâmetros de qualidade desta imagem.

No capítulo 3 serão descritos os corpos de prova, os procedimentos experimentais, equipamentos e requisitos de qualidades adotados para realização deste estudo.

Nos capítulos 4 e 5 serão apresentados, respectivamente, os resultados e as conclusões alcançados a partir do estudo proposto, assim como algumas sugestões para futuros trabalhos.

## Capítulo 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 – RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação eletromagnética, independente da posição do espectro onde se encontre, pode ser caracterizada pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ), frequência ( $\nu$ ) ou energia equivalente ( $E$ ) e pode ser explicada como uma perturbação no vácuo ou na matéria de forma ondulatória. A partícula, ou onda, elementar associada ao fenômeno é o fóton, o qual possui campo elétrico e campo magnético perpendicular e em fase, propagando-se no espaço e transportando energia, como mostram as equações 1 e 2 [6].

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \text{Equação 01}$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{Equação 02}$$

onde:

$c$  = velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

$h$  = constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J.s)

A figura 2.1 apresenta o espectro eletromagnético que é classificado normalmente pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ).

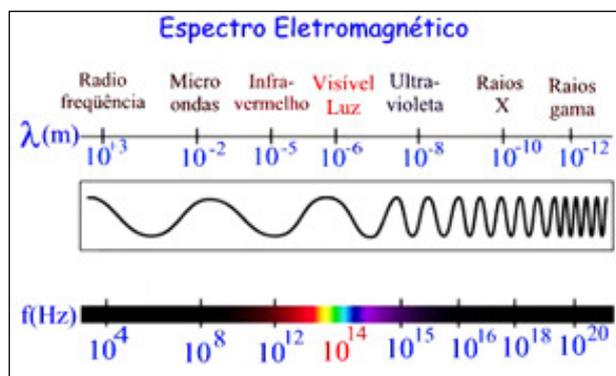


Figura 2-1 - Espectro eletromagnético, [7].

### 2.1.1 – Raios X

Os raios X originam-se da eletrosfera do átomo e são gerados quando elétrons são acelerados por um campo elétrico em direção a um alvo e ao interagirem com o alvo são desacelerados e tem a maior parte da sua energia cinética dissipada em calor sendo o restante transformado em energia eletromagnética.

Os raios X utilizados em ensaios não destrutivos são produzidos em tubos de raios X. Esse tubo, como mostra a figura 2.2 esquemática abaixo, é basicamente composto por uma ampola de vidro isolada em vácuo, um catodo (filamento) e um anodo (alvo) que pode ser giratório ou não. O tubo fica contido em uma carcaça que o protege e provê blindagem contra radiação. Esta carcaça contém um banho de óleo para fornecer isolamento elétrico e auxiliar a refrigeração do tubo.

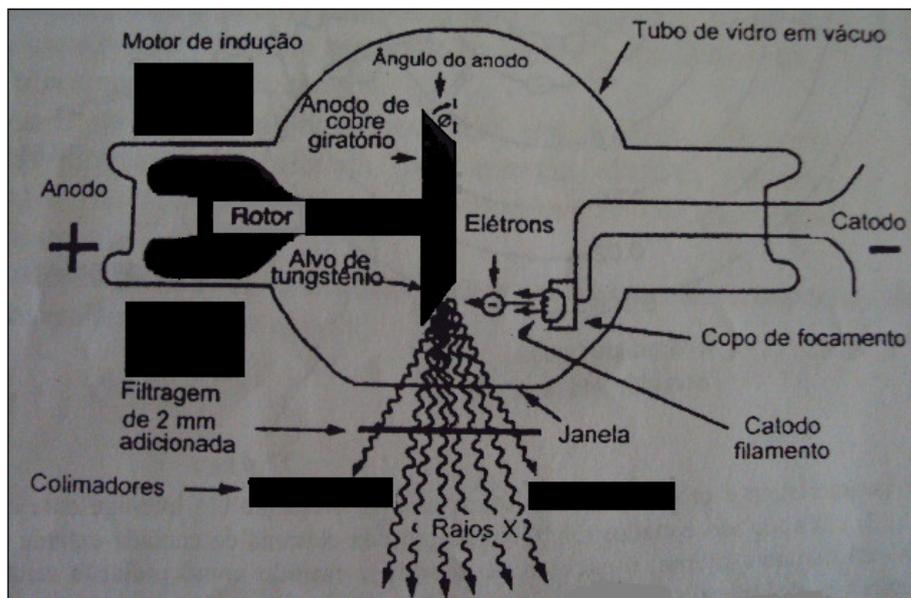


Figura 2-2 - Componentes de um tubo de raios X [8]

O catodo é o lado negativamente carregado contendo o filamento que serve como fonte de elétrons e é usualmente feito de tungstênio enrolado em forma de bobina. A maioria dos tubos tem dois filamentos para permitir a escolha de dois tamanhos de ponto focal. Um copo de foco cerca o filamento e ajuda a direcionar os elétrons em direção ao alvo. A alta resistência no filamento proporciona as temperaturas subirem (> 2200° C), resultando na emissão termiônica de elétrons [8].

O anodo é o lado positivo do tubo, é um condutor elétrico e serve de apoio mecânico para o alvo. O anodo deve ser um bom condutor térmico, pois mais de 99%

da energia cinética proveniente das interações dos elétrons com o alvo é convertida em calor. Anodos estacionários são usados em unidades de raios X portáteis. Equipamentos maiores usam anodos giratórios o que aumenta bastante a área do alvo e eleva a capacidade de dissipar calor [8].

Os elétrons acelerados na direção do anodo ganham energia cinética determinada somente pelo valor da tensão aplicada, e ao interagirem com os átomos do material alvo do catodo perdem energia rapidamente por ionização e excitação. Os raios X são gerados por dois processos diferentes conhecidos por *bremsstrahlung* e produção de raios X característicos.

Os raios X de *bremsstrahlung* (radiação de frenamento) são produzidos quando os elétrons incidentes com uma energia inicial  $E_1$  passam próximos a um núcleo atômico. A força atrativa do núcleo positivamente carregado obriga o elétron a mudar de direção e perder energia. O elétron agora tem uma energia mais baixa  $E_2$ . A diferença de energia ( $E_1 - E_2$ ) é liberada como um fóton de raios-X. Esses raios X apresentam um espectro contínuo de radiação, até uma energia máxima determinada pela energia cinética máxima do elétron incidente numericamente igual à tensão aplicada ao tubo de raios X [9].

Os raios X característicos são produzidos quando um elétron incidente interage com um elétron de uma camada interna do átomo do material alvo e ambos são ejetados. Quando um dos elétrons da camada externa se move para preencher a vacância da camada interna, o excesso de energia é emitido como radiação característica. Esse tipo de raios X apresenta um espectro discreto de energia. Algumas vezes o excesso de energia pode ser emitido na forma de elétrons *Auger* ao invés de radiação característica [9].

Podemos observar que o espectro de raios X é formado por duas partes distintas e combinadas: uma contínua devido aos raios X de *bremsstrahlung* e outra em linhas discretas. A Figura 2.3 mostra um esquema de um espectro de raios X. Nela, o termo  $k_\alpha$  representa a transição do elétron da camada L para a K e  $k_\beta$  a transição do elétron da camada M para a K.

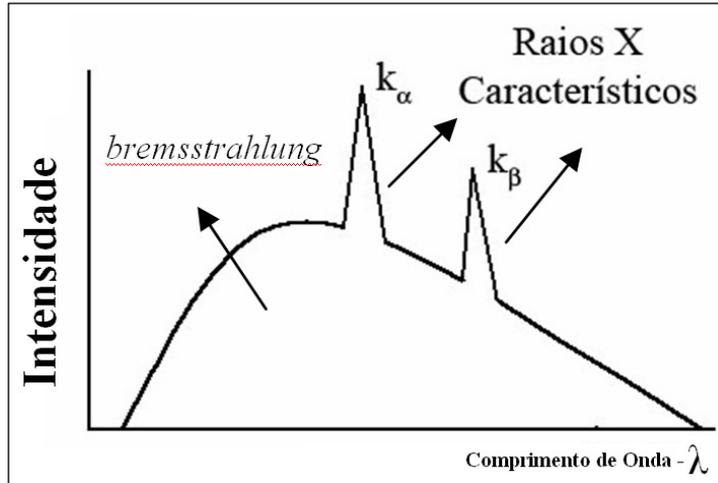


Figura 2-3 - Esquema de um espectro de raios X

### 2.1.2 – Raios Gama ( $\gamma$ )

Os raios gama originam-se geralmente de desintegrações no núcleo do átomo e são emissões espontâneas observadas em determinados elementos radioativos naturais e artificiais. Os raios gama também podem ter origem em processos subatômicos como a aniquilação de um par (pósitron-elétron ou próton-antipróton) e em fenômenos astrofísicos de grande violência. Os raios gama se caracterizam por uma série de emissões discretas em energia [9].

Em ensaios não destrutivos (END) os isótopos mais utilizados são o  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{75}\text{Se}$ , de acordo com a espessura que se deseja inspecionar. A seguir veremos algumas características do  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{75}\text{Se}$ .

#### 2.1.2.1 – Irídio ( $^{192}\text{Ir}$ )

O  $^{192}\text{Ir}$  é obtido a partir do bombardeamento com nêutrons do isótopo estável  $^{191}\text{Ir}$  [ $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$ ] ou do bombardeamento com deutério do elemento ósmio [ $^{192}\text{Os}(d,2n)^{192}\text{Ir}$ ]. Apresenta meia vida de 73,83 dias. O  $^{192}\text{Ir}$  decai por emissão  $\beta^-$  (95,13%) para níveis excitados da platina ( $^{192}\text{Pt}$ ) e por captura eletrônica (4,87%) para níveis excitados do ósmio ( $^{192}\text{Os}$ ), assim na transição destes elementos para seus estados fundamentais, ocorre à emissão de radiação gama. A figura 2.4 apresenta o esquema de decaimento e as principais transições energéticas de um isótopo de  $^{192}\text{Ir}$  [10].

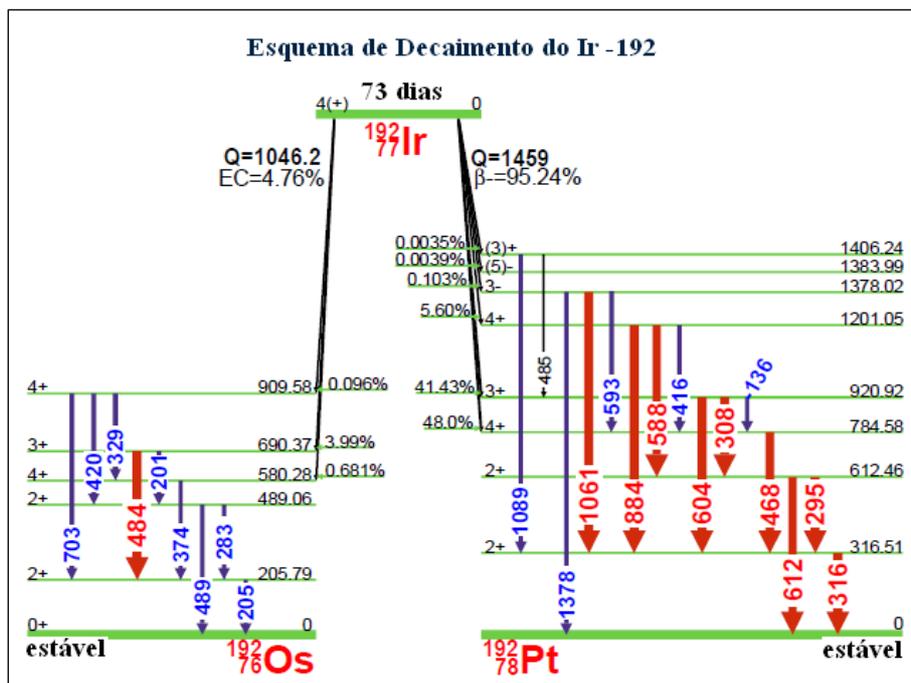


Figura 2-4 - Esquema de decaimento do  $^{192}\text{Ir}$  [10]

O  $^{192}\text{Ir}$  é uma das principais fontes radioativas utilizadas atualmente na gamagrafia industrial devido ao seu alto poder de penetração (de 12,5 a 62,5 mm de aço). A tabela 2.1 apresenta as energias mais intensas do  $^{192}\text{Ir}$  e suas respectivas probabilidades de emissão.

Tabela 2-1 - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do  $^{192}\text{Ir}$  [4].

| E (keV) | I (%)  |
|---------|--------|
| 205,796 | 3,300  |
| 295,958 | 28,670 |
| 308,457 | 30,000 |
| 316,508 | 82,810 |
| 468,072 | 47,830 |
| 484,578 | 3,184  |
| 588,585 | 4,515  |
| 604,415 | 8,230  |
| 612,466 | 5,309  |

### 2.1.2.2 – Selênio ( $^{75}\text{Se}$ )

O  $^{75}\text{Se}$  pode ser obtido através das seguintes reações:  $^{74}\text{Se}(n,\gamma)^{75}\text{Se}$ ,  $^{75}\text{As}(d,2n)^{75}\text{Se}$  e  $^{75}\text{As}(p,n)^{75}\text{Se}$ , apresenta meia vida de 119,79 dias e trabalha no intervalo de 5 a 30mm de aço. Maiores características gerais e benefícios destas fontes podem ser encontrados em [11].

O  $^{75}\text{Se}$  se desintegra totalmente por captura eletrônica para níveis excitados e para o estado fundamental do  $^{75}\text{As}$ , como mostra a figura 2.5. Na transição deste elemento para o estado fundamental ocorre a emissão da radiação gama, como mostra a tabela 2.2.

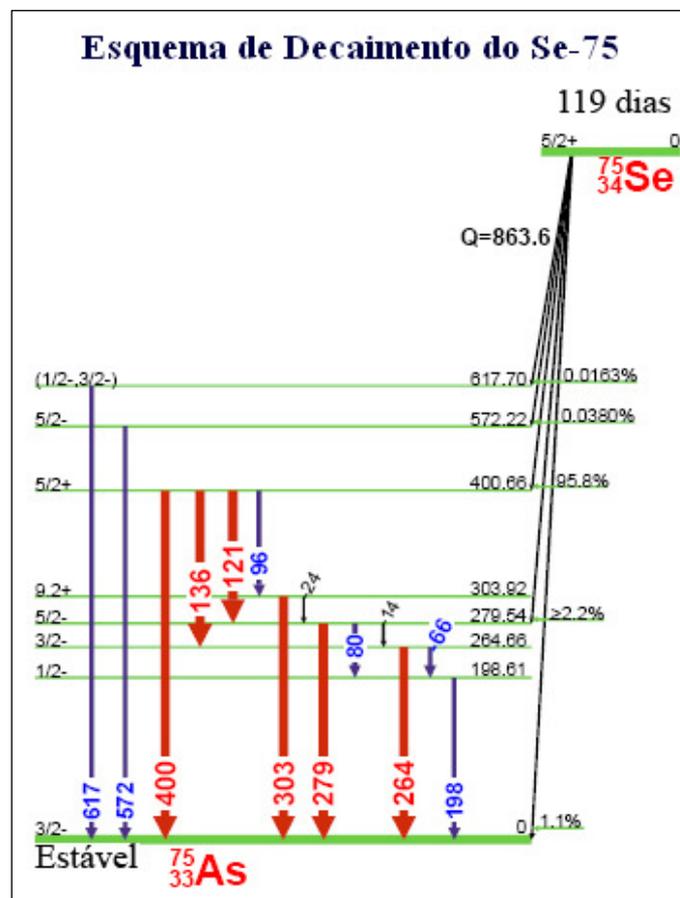
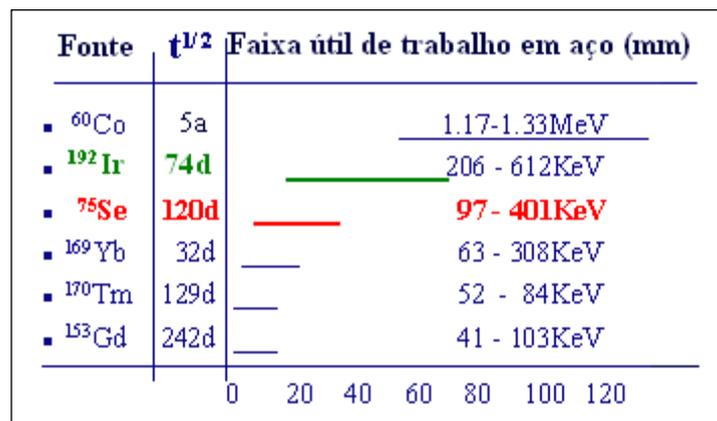


Figura 2-5 - Esquema de decaimento do  $^{75}\text{Se}$  [10]

**Tabela 2-2** - Energias e probabilidades de emissão de radiação gama do  $^{75}\text{Se}$  [4].

| E (keV) | I (%)  |
|---------|--------|
| 66,052  | 1,112  |
| 96,734  | 3,420  |
| 121,116 | 17,200 |
| 136,000 | 58,300 |
| 198,606 | 1,480  |
| 264,658 | 58,900 |
| 279,542 | 24,990 |
| 303,924 | 1,316  |
| 400,657 | 11,470 |

O  $^{75}\text{Se}$  proporciona vantagens em relação ao  $^{192}\text{Ir}$  como: meia-vida mais longa, maior segurança do operador, menor zona de exclusão operacional e alta qualidade de imagem, especialmente na faixa trabalho de (5-30 mm de aço). A figura 2.6 mostra a faixa útil de trabalho em aço para inspeções com  $^{192}\text{Ir}$  e  $^{75}\text{Se}$  [12].

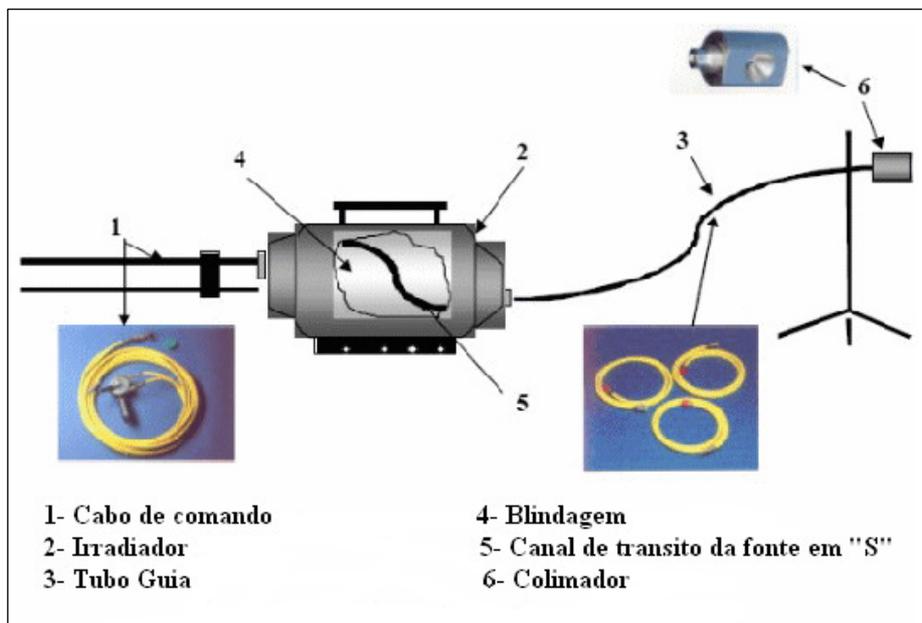


**Figura 2-6** - Faixa útil de trabalho em aço [12]

### 2.1.2.3 – Equipamento de Gamagrafia

Os equipamentos de gamagrafia devem oferecer uma blindagem contra as radiações emitidas pela fonte, quando esta não estiver sendo usada de modo que é necessário dotar essa blindagem de um sistema que permita retirar a fonte de seu interior para que a radiografia seja feita. Esse equipamento denomina-se Irradiador. Os irradiadores compõem-se basicamente de quatro componentes fundamentais: Uma

blindagem, uma fonte radioativa, um tubo guia e os comandos. A figura 2.7 apresenta com mais detalhes um irradiador.



**Figura 2-7 - Esquema do irradiador de gamagrafia [13]**

As blindagens podem ser construídas com diversos tipos de materiais, geralmente são feitas com chumbo ou urânio exaurido, sendo contida dentro de um recipiente de aço, que tem a finalidade de proteger a blindagem contra choques mecânicos. Como sabemos, as fontes de radiação podem ser fornecidas com diversas atividades e cada elemento radioativo possui uma energia de radiação própria. Assim cada blindagem é dimensionada para conter um elemento radiativo específico, com certa atividade máxima determinada. O tubo guia conduzirá a fonte desde a sua blindagem até o local exato da exposição. Os comandos são responsáveis pelo acionamento e controle da fonte, levando a fonte da blindagem até o local da exposição através do tubo guia, após o termino da exposição a fonte é recolhida novamente para a blindagem. Estes controles de exposição podem ser elétricos, pneumáticos e, mais comumente, manuais [13].

### 2.1.3 – Interação da Radiação com a Matéria

Quando um feixe de fótons de raios X ou raios gama atravessa um material, alguns destes fótons podem passar direto sem serem afetados ou serem absorvidos (e transferir sua energia ao meio absorvedor), ou serem espalhados (e mudar a sua direção e possivelmente perderem energia). Fatores importantes que afetam essas interações são a energia do fóton incidente e a densidade, espessura e o número atômico ( $Z$ ) do meio.

A seguir veremos os três tipos de interações mais comuns e importantes nos ensaios não destrutivos (END) que são:

- Efeito Fotoelétrico;
- Espalhamento Compton;
- Produção de Pares.

#### 2.1.3.1 – Efeito Fotoelétrico

No processo do efeito fotoelétrico como mostra a figura 2.8, um único elétron orbital do átomo absorve totalmente o fóton de raios X ou gama incidente que então desaparecerá, e este elétron será expelido do átomo com uma energia cinética  $E_c$  que é expressa pela Equação 03 [14]:

$$E_c = h_\nu - E_B \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

$h_\nu$  representa a energia do fóton incidente

$E_B$  a energia de ligação do elétron orbital.

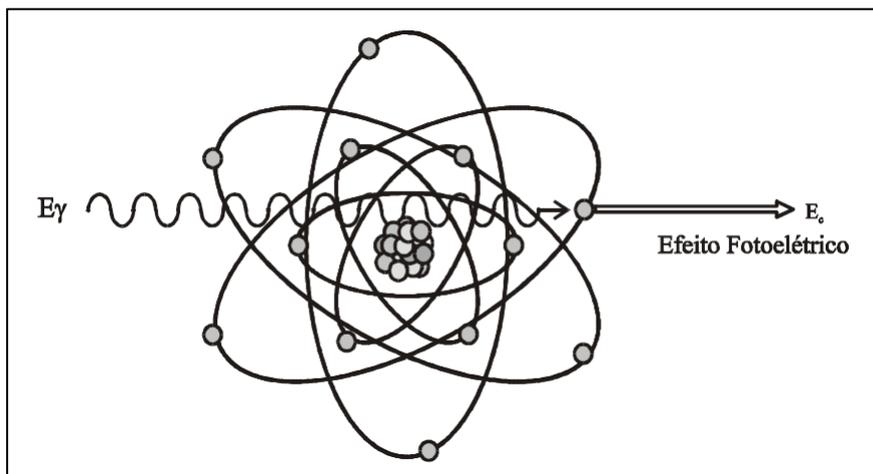


Figura 2-8 - Representação do efeito fotoelétrico, [15].

### 2.1.3.2 – Espalhamento Compton

No espalhamento Compton como mostra a figura 2.9, o fóton incidente com energia  $E_0$  cede parte de sua energia para um elétron fracamente ligado ao núcleo do átomo. Este elétron irá ganhar velocidade, contudo o fóton não é totalmente absorvido, como no efeito fotoelétrico e segue em uma nova direção [14].

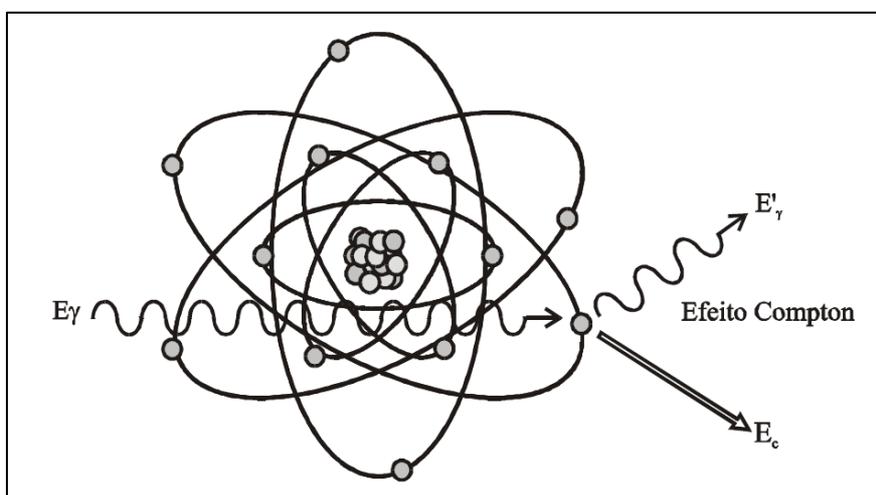
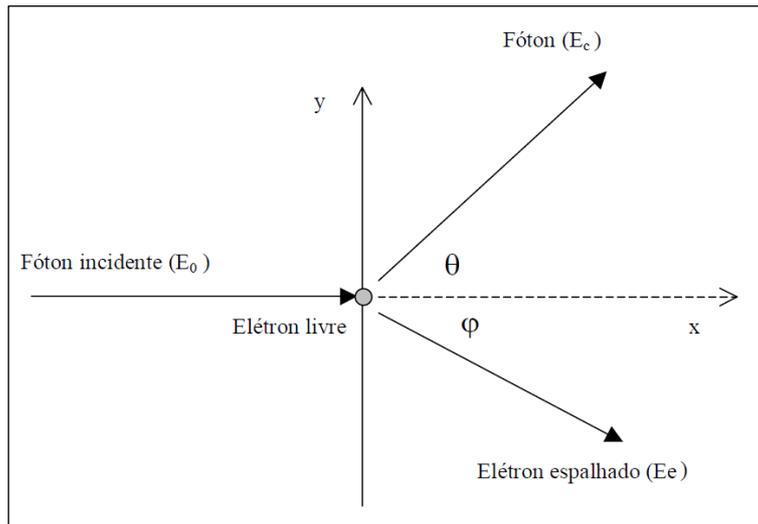


Figura 2-9 - Representação do espalhamento Compton, [15].

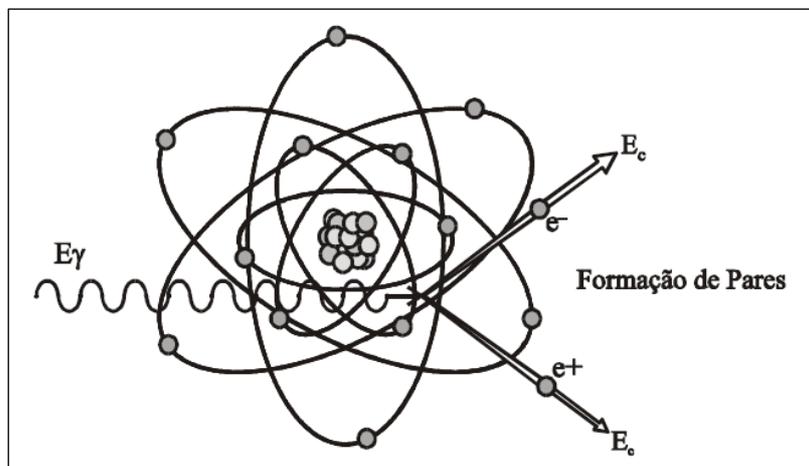
A conservação do momento linear e a energia durante o processo da interação estabelecem que um fóton incidente de energia  $E_0$ , que está expressa na Equação 02, ao transferir energia para o elétron, este deve recuar um ângulo  $\phi$  em relação ao fóton incidente, como mostra a Figura 2.10.



**Figura 2-10 - Representação esquemática do espalhamento Compton, [16].**

### 2.1.3.3 – Produção de Pares

A produção de pares ocorre quando um fóton de alta energia interage com o núcleo de um átomo de número atômico elevado. O fóton desaparece, e a energia é convertida em um elétron e um pósitron que apresentam certa energia cinética ( $E_c$ ) como mostra a figura 2.11. A produção de pares tem um limiar de energia de 1,022 MeV, que é a energia requerida para produzir um par elétron (511 keV) e pósitron (511 keV). 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 dois fótons, cada um com energia de 511 keV [9].



**Figura 2-11 - Representação da formação de par [15].**

### 2.1.3.4 – Efeito Fotoelétrico, Compton e Formação de Par

O efeito fotoelétrico predomina em fótons incidentes com energia suficientemente baixas para todos os materiais, conforme a energia aumenta, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o espalhamento Compton, e este acaba tornando-se o efeito predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons [6]. A figura 2.12 mostra a predominância de cada um desses com o aumento da energia e a variação de Z.

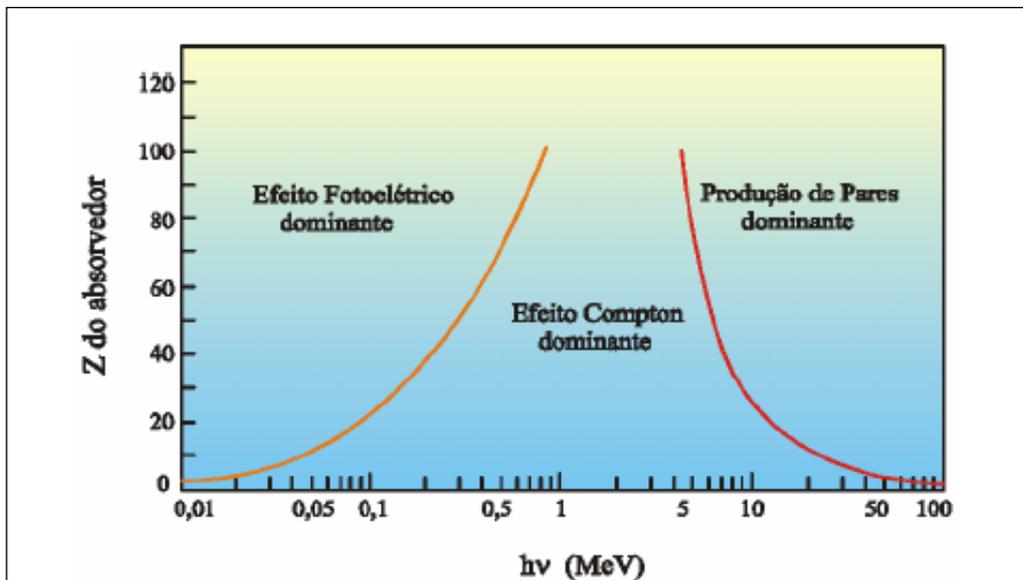


Figura 2-12 - Importância do Efeito Fotoelétrico, espalhamento Compton e Formação de Par [15].

## 2.2 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

Os avanços tecnológicos e a globalização fizeram com que os segmentos industriais aumentassem o número de projetos e produtos. Hoje é comum que aviões, plataformas e navios, por exemplo, sejam projetados em um país, construídos em outro e com equipamentos e matéria prima fornecidos por outros três ou quatro países. Desta forma para garantir que os materiais, componentes e os processos utilizados tenham a qualidade requerida, são necessários inspeções e conseqüentemente execução de ensaios

não destrutivos (END). Eles investigam a sanidade dos materiais sem, contudo destruí-los ou introduzir qualquer alteração nas suas características [17].

Um dos métodos mais importantes de ensaios não destrutivos utilizado na indústria moderna para inspeção é a radiografia industrial. Em especial, com advento da tecnologia digital, novas gerações de detectores têm sido desenvolvidos tais como a placa de fósforo denominada de *Imaging Plate* (IP), que possui uma série de características próprias tais como altíssima sensibilidade, várias dezenas de vezes mais que um filme de raios-X convencional, maior faixa dinâmica, linearidade superior, excelente resolução espacial e obtenção de imagens digitais diretamente da leitora permitindo um posterior processamento computacional das imagens [18].

As radiografias industriais podem ser feitas utilizando fontes de raios X, radiação gama, ambas em conjunto com detectores com a propriedade de coletar imagens radiográficas de peças e tubulações a serem ensaiadas, com o objetivo de identificar, por exemplo, a presença de falhas em soldas, estado de corrosão, bolhas, contrações internas, erosão. Na radiografia industrial é muito comum a utilização dessa técnica para inspeção de peças de médias e grandes espessuras, neste caso a gamagrafia mostra-se mais vantajosa devido a um maior poder de penetração, o que não se conseguiria utilizando uma fonte de raios X. Outra vantagem está nas reduzidas dimensão de um equipamento de gamagrafia, em comparação com um aparelho de raios X, possibilitando a inspeção em locais de difícil acesso [4].

A radiografia é um método de END e baseia-se na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Coloca-se o material a ser ensaiado entre uma fonte emissora de radiação e o detector. Uma parte dos raios emitidos é absorvida pelo material e a outra parte irá atravessá-lo, isso se dá devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação sensibilizará um detector produzindo nele uma imagem do material. A radiografia industrial é usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha. Dependendo da técnica de ensaio utilizada, podem-se detectar defeitos com pequenas espessuras em planos perpendiculares ao feixe.

A fonte de radiação é usualmente pequena (poucos milímetros ou inferior) para minimizar erros de projeção, já que a penumbra na radiografia depende do tamanho da fonte e de sua distância ao filme.

O que irá diferenciar a radiografia convencional da computadorizada é basicamente o detector utilizado. Enquanto a técnica convencional utiliza um filme radiográfico como detector a computadorizada utiliza uma placa de fósforo onde será formada a imagem latente. A figura 2.13 apresenta um esquema da técnica de ensaio radiográfico na indústria.

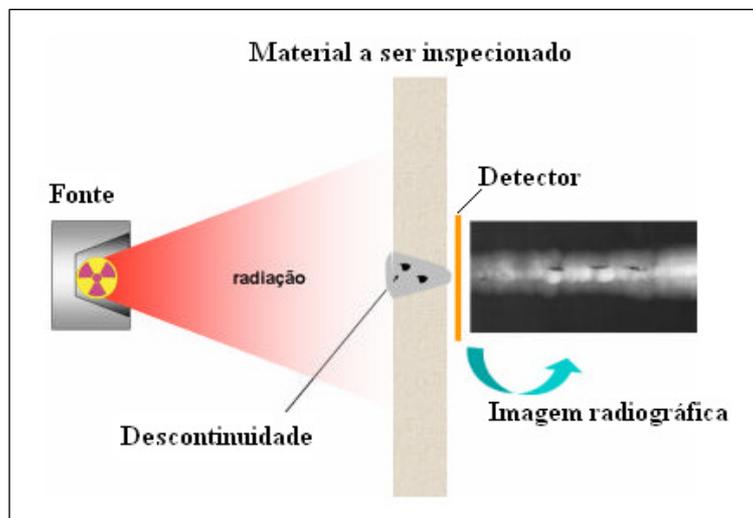


Figura 2-13 - Esquema de ensaio radiográfico na indústria

### 2.2.1 – Técnica Radiográfica Parede Simples Vista Simples (PSVS)

As disposições e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça, e o filme, devem seguir algumas técnicas especiais tais que permitam uma imagem radiográfica de fácil interpretação.

A técnica PSVS recebe este nome, pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e filme, somente a seção da peça que está próxima ao filme será inspecionada e a projeção será em apenas uma espessura do material (figura 2.14). É a principal técnica utilizada na inspeção radiográfica, e a mais fácil de ser interpretada [17].

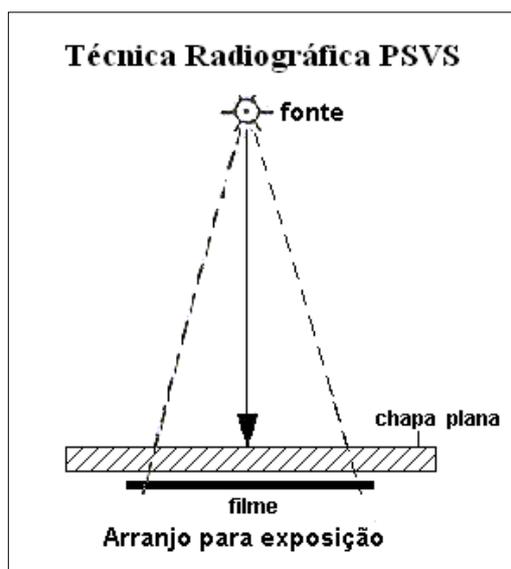


Figura 2-14 – Arranjo de exposição com a técnica PSVS.

### 2.2.2 – Radiografia Convencional

Na literatura encontramos uma extensa bibliografia sobre radiografia convencional [6,19-23], por isso este tema será abordado brevemente neste capítulo. Como foi dito anteriormente ao realizarmos um ensaio radiográfico convencional, após a exposição, o filme é processado fotograficamente. Ou seja, são empregados produtos químicos para revelação e fixação da imagem radiográfica. O filme radiográfico é sensível a luz visível, portanto para realizar a exposição ele deve ser colocado dentro do chassi e em alguns ensaios é necessário utilizar tela intensificadora.

A formação da imagem radiográfica no filme se dá quando o feixe de radiação que emerge do objeto interage com os elementos sensíveis presentes no filme. Ocorrerá então um fenômeno físico que faz a estrutura física dos microcristais de haletos de prata do filme radiográfico ser modificada, formando o que se conhece como imagem latente.

A visualização somente será possível pelo processo de revelação, que fará com que aqueles microcristais que foram sensibilizados sofram uma redução de maneira a se transformarem em prata metálica enegrecida. Maiores detalhes poderão ser encontrados em [20]. As diferenças na intensidade da radiação que atingiu o filme são percebidas através da densidade óptica (DO) que nada mais é que o grau de enegrecimento do filme. Assim as partes do filme que receberam mais radiação durante a exposição aparecem mais escuras, conseqüentemente as que receberam uma menor quantidade

aparecerão mais claras. O resultado de uma inspeção radiográfica corresponde a um mapa bidimensional da atenuação da radiação penetrante, X ou gama, ao longo do volume de material analisado [5].

### 2.2.2.1 – Qualidade da Imagem

A qualidade da imagem no filme pode ser assegurada por três fatores [19]:

- Contraste;
- Definição;
- Ruído.

O contraste é definido como a diferença de DO em áreas adjacentes de uma radiografia ou outro receptor de imagem. Também pode ser definido como a variação na DO. Quanto maior esta variação, maior o contraste. Quanto menor esta variação ou menor a diferença de DO de áreas adjacentes, menor o contraste. O contraste é função das variações na espessura e na densidade ou composição química (Z) e pode ser dividido em três tipos [8, 22]:

- Contraste do objeto;
- Contraste do sujeito;
- Contraste da imagem.

Para um objeto ser visível em uma imagem radiográfica, este objeto deve possuir contraste físico em relação ao meio no qual está inserido. Este contraste, denominado contraste do objeto, é função da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto em relação ao meio. Já o contraste do sujeito é a diferença na exposição entre vários pontos dentro da imagem área. Este é afetado, além do contraste do objeto, pelos fatores que influenciam na qualidade da radiação, tais como a tensão aplicada, o material do ânodo, o *ripple* e a filtração. E finalmente o contraste da imagem radiográfica depende basicamente das características das estruturas do objeto a ser inspecionado, como densidade e espessura, da distribuição de energia dos fótons, da

intensidade de fótons que emergem do objeto, das características do filme e do processamento da imagem. Os principais fatores que afetam o contraste são a radiação espalhada e a energia do feixe de radiação [8].

A definição pode ser descrita como a nitidez de estruturas na radiografia e esta relacionada à penumbra geométrica na imagem. Essa nitidez dos detalhes da imagem é demonstrada pela clareza de linhas estruturais finas e pelas bordas das estruturas. Tanto o contraste quanto a definição influenciam na detectabilidade [19]. O ruído fotográfico está relacionado com o tamanho e a distribuição dos grãos de prata do filme radiográfico, e pode acobertar pequenos detalhes na imagem. Portanto em uma inspeção onde se deseja detectar pequenas trincas, deve-se utilizar filme de granulação fina [19, 22].

O controle dos fatores descritos relaciona-se com parâmetros geométricos de ensaio e com o tempo de exposição. Tal controle influencia na habilidade da radiografia mostrar detalhes em uma imagem, por exemplo, corrosão [5].

Para garantir a qualidade da imagem radiográfica são utilizados os IQIs (indicadores de qualidade de imagem), que simulam possíveis defeitos na estrutura. Estes IQIs são escolhidos em função de parâmetros normativos, e os dois tipos mais utilizados são os de furo e fio [23].

### **2.2.3 – Radiografia Computadorizada (RC)**

A radiografia computadorizada parte dos mesmos princípios físicos da convencional, só que utiliza o *Image Plate* (IP) como detector. O IP é composto por material fotoluminescente, o qual armazena a imagem latente em sua estrutura, e após sua leitura nos revela a imagem radiográfica.

#### **2.2.3.1 – Qualidade da Imagem**

Na radiografia computadorizada, assim como na convencional, é imprescindível um controle de qualidade da imagem e permanece a necessidade do uso de IQIs. No entanto surgem novos parâmetros de qualidade que devem ser analisados [24]. Nesta seção apresentaremos esses novos parâmetros que são:

- Resolução espacial básica;
- Relação sinal-ruído normalizada.

### 2.2.3.1.1 – Resolução Espacial Básica (BSR)

A BSR na radiografia computadorizada está relacionada ao tamanho de pixel efetivo, sendo o menor detalhe resolvido perpendicularmente à direção de incidência do feixe de radiação. A resolução espacial da RC está relacionada a fatores como o *Image Plate* e o tamanho e a intensidade do laser estimulante. Observando a figura 2.15, vemos que quanto mais estreito o feixe do laser, uma pequena área será estimulada no IP, produzindo assim um pixel pequeno e bem definido. Pode ocorrer também a dispersão da luz proveniente do laser e estimular os grãos vizinhos. Contudo, a resolução não depende somente da dimensão do feixe estimulante, mas também do IP, pois poderá haver estimulação dos fósforos pela luz de luminescência emitida por outros grãos e reflexo da luz do feixe estimulante na camada de suporte da placa de fósforo, como mostra a figura 2.16 [4]. Por isso é importante utilizar um IP de boa qualidade, para garantir uma imagem radiográfica adequada.

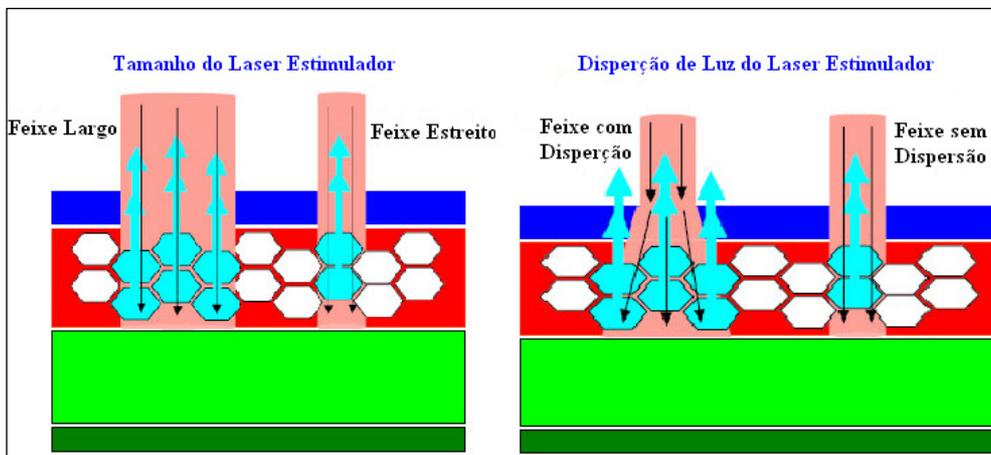


Figura 2-15 - Influência do laser estimulador na resolução espacial.

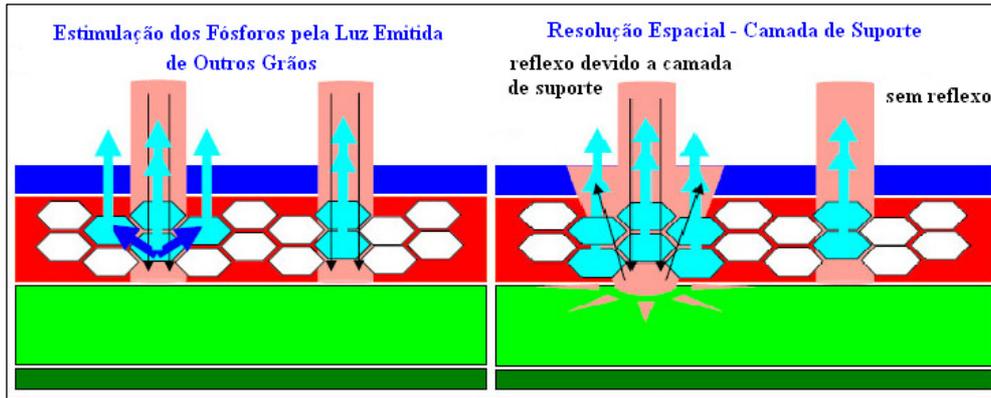


Figura 2-16 - Influência do IP na resolução espacial

De acordo com a norma Petrobras N-2821 [25] deve-se obter a Resolução Espacial Básica Máxima ( $SR_b$ ), que é o máximo valor de resolução espacial básica (em  $\mu\text{m}$ ) obtido dentre ambas as direções, ou seja tanto paralelo quanto perpendicular ao deslocamento do feixe de laser de varredura do escâner. Uma maneira simples e recomendada pelos comitês de normalização é o método do IQI de fio duplo [26].

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados conforme a figura 2.17. Os pares de fios correspondentes aos códigos de 1D à 3D são fabricados em Tungstênio, os outros são fabricados em Platina, e as dimensões devem corresponder ao especificado na norma. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro dos mesmos. A tabela 2.3 mostra a numeração dos elementos, a desfocagem geométrica correspondente ( $2d$ ), o espaçamento entre os fios ( $d$ ), a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm), [27].

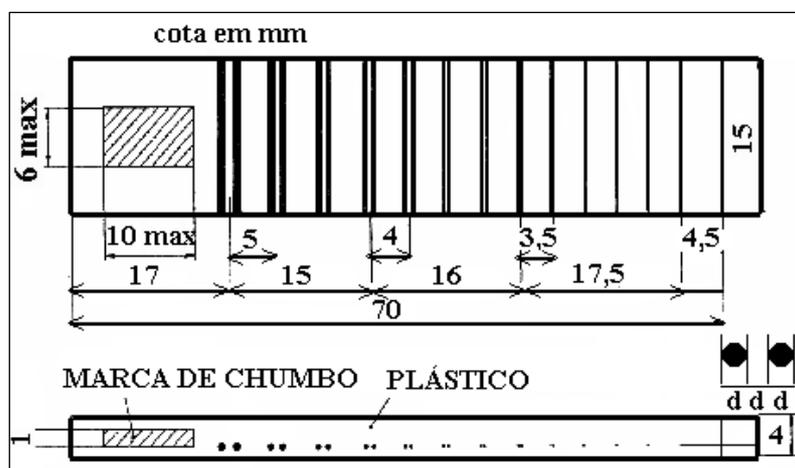
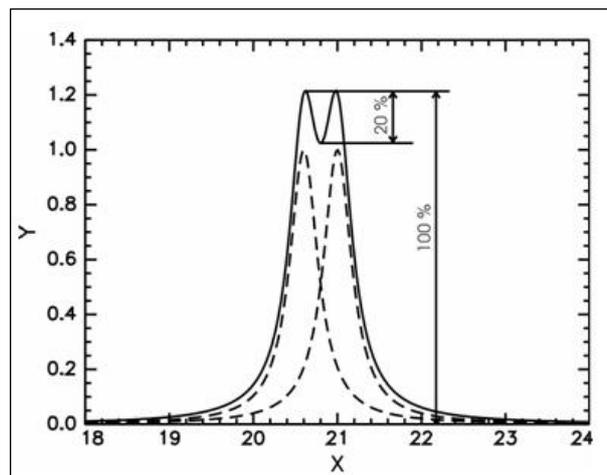


Figura 2-17 - Indicador de qualidade de fio duplo, [27].

**Tabela 2-3** - Parâmetros do Indicador de Qualidade de Imagem [27].

| Elemento | Desfocagem Geométrica (mm) | Diâmetro do fio (mm) | Tolerância | l/mm   |
|----------|----------------------------|----------------------|------------|--------|
| 13D      | 0,10                       | 0,050                | ± 0,005    | 10,000 |
| 12D      | 0,13                       | 0,063                |            | 7,936  |
| 11D      | 0,16                       | 0,080                |            | 6,250  |
| 10D      | 0,20                       | 0,100                |            | 5,000  |
| 9D       | 0,26                       | 0,130                |            | 3,846  |
| 8D       | 0,32                       | 0,160                | ± 0,01     | 3,125  |
| 7D       | 0,40                       | 0,200                |            | 2,500  |
| 6D       | 0,50                       | 0,250                |            | 2,000  |
| 5D       | 0,64                       | 0,320                |            | 1,563  |
| 4D       | 0,80                       | 0,400                |            | 1,250  |
| 3D       | 1,00                       | 0,500                | ± 0,02     | 1,000  |
| 2D       | 1,26                       | 0,630                |            | 0,794  |
| 1D       | 1,60                       | 0,800                |            | 0,625  |

O primeiro par de fios não resolvido é determinado quando a diferença entre os valores de máximo e mínimo da intensidade é menor do que 20% de sua intensidade total, conforme a Figura 2.18, sendo este o limite de discernibilidade do sistema [27]. De acordo com a Norma Européia [28], a resolução espacial básica é definida como metade da desfocagem geométrica em  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2-18** - Perfil de linha de um par de fios mostrando a diferença de pelo menos 20% dos valores máximo e mínimo de intensidade entre os dois fios, [28].

### 2.2.3.1.2 – Relação Sinal Ruído Normalizada

A SNR é a razão linear entre o valor médio da intensidade do sinal e o seu desvio padrão. Tipicamente o sinal está definido como a diferença entre o objeto e seu contraste, e o ruído, como já vimos, é representado pela incerteza com que o objeto foi registrado. A SNR é dada pela Equação 4.

$$SNR = \frac{C}{\sigma} \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

$C$  é a potência do sinal, que comumente é definido como a diferença entre o objeto e o meio (contraste);

$\sigma$  é a potência do ruído, que é definido como a incerteza com a qual o objeto é registrado.

Assim quanto maior for a SNR, maior a qualidade de visualização de detalhes a imagem apresentará.

A relação sinal-ruído normalizada ( $SNR_N$ ) é obtida quando a SNR é normalizada pela Resolução Espacial Básica Máxima ( $SR_b$ ) e é alcançado através da expressão:

$$SNR_N = \frac{SNR_{média} \cdot 88,6}{SR_b} \quad \text{Equação 05}$$

A  $SNR_N$  depende da dose de radiação e das características dos sistemas de radiografia computadorizada, podendo ser medida na direção paralela e na direção perpendicular ao deslocamento do feixe do laser de varredura do escâner [25]. Os filmes radiográficos de acordo com [29] são classificados como classe I quando o valor de  $SNR_N$  é igual ou superior a 70 e classe II quando esse valor está no intervalo de 60 a 70.

### 2.2.3.2 – Imagem Digital

A imagem digital é um conjunto de pontos ou pixels que formam uma matriz, onde cada pixel é definido por um valor numérico que simbolizará uma tonalidade de cor. A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados *bits*, cada *bit* pode admitir o valor 0 ou 1, um conjunto de 8 *bits* é denominado *byte*. Os *bits* ou *bytes* são usados para representar os pixels da imagem digital, [4]. Cada configuração de *bytes* representará as diversas tonalidades de grau de cinza nos pixels, como mostra a figura 2.19. O número de *bytes* da imagem determinará o espaço no disco.

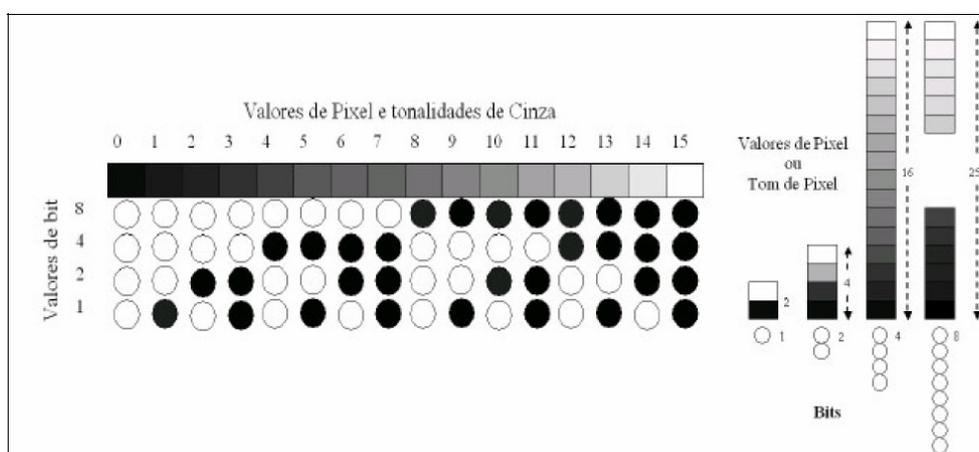


Figura 2-19 - Comportamento entre os valores de pixel e os tons de cinza, [4].

### 2.2.3.3 – Sistema de Radiografia Computadorizada

O sistema de radiografia computadorizada é constituído essencialmente pelo detector (IP), um escâner e uma estação de trabalho com um monitor de alta resolução.

O tipo de IP e o escâner utilizado definem um sistema de radiografia, qualquer alteração em um destes dois componentes configura um novo sistema.

O detector utilizado para radiografia digital é uma placa flexível de fósforo denominada *Image Plate*. Sua estrutura (figura 2.20) consiste em um suporte de poliéster, uma camada de fósforo, uma camada protetora e outros componentes que podem variar de acordo com o fabricante. A camada de fósforo é comumente constituída de cristais de  $BaFX:Eu^{+2}$  ( $X = Cl, Br, I$ ), [30]. As placas de fósforo, assim como os filmes radiográficos, apresentam distinção quanto a sua velocidade e resolução.

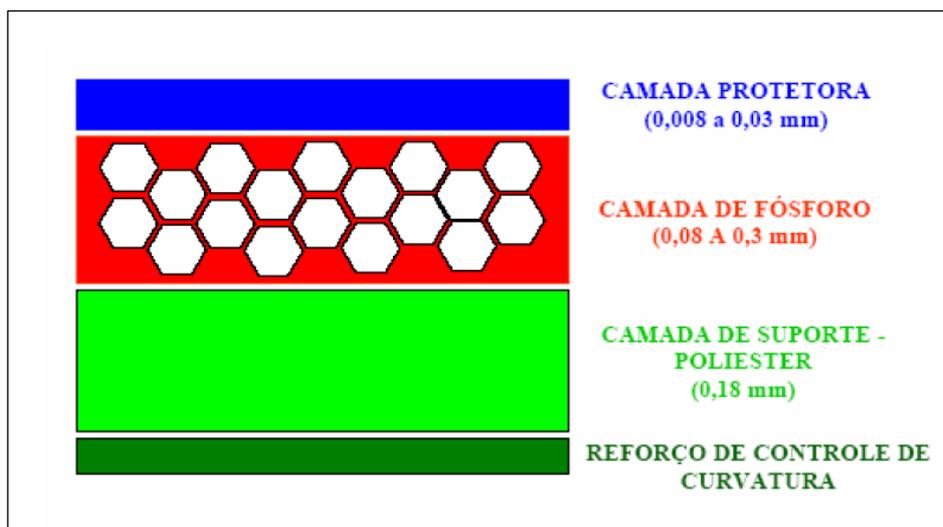


Figura 2-20 - Composição da placa de Fósforo de aquisição da imagem computadorizada, [31].

O processo de aquisição da imagem no IP compreende duas etapas:

- criação da imagem latente no IP;
- transformação da imagem latente em imagem radiográfica digital.

A criação da imagem latente no IP está baseada nos níveis de energia dos elétrons numa rede cristalina. Normalmente os elétrons da banda de valência encontram-se ligados aos íons de  $\text{Eu}^{+2}$ , assim quando a radiação interage com a estrutura cristalina do IP, ocorre a oxidação dos íons de  $\text{Eu}^{+2}$  transformando-os em  $\text{Eu}^{+3}$  elevando o elétron para a banda de condução conforme mostra a figura 2.21 [26].

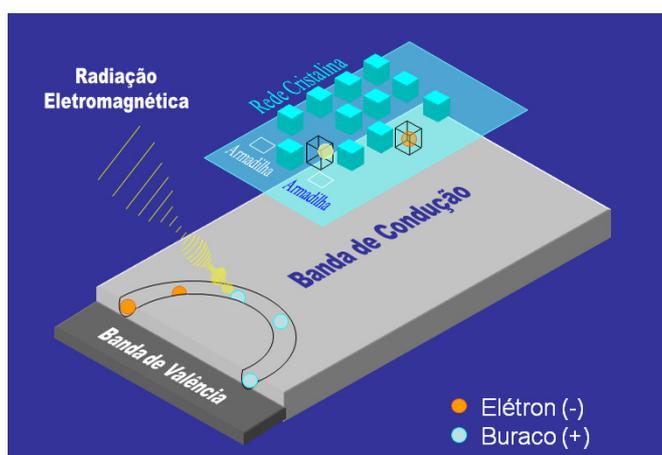


Figura 2-21 - Radiação interagindo com a estrutura da rede cristalina do IP, [4]

Os elétrons tendem a retornar ao seu estado fundamental e ao retornarem eles podem ser capturados pelas armadilhas existentes na rede cristalina conforme mostra a figura 2.22. A quantidade de elétrons presos nas armadilhas do IP reproduz a intensidade do campo de radiação eletromagnética que atinge o IP [31].

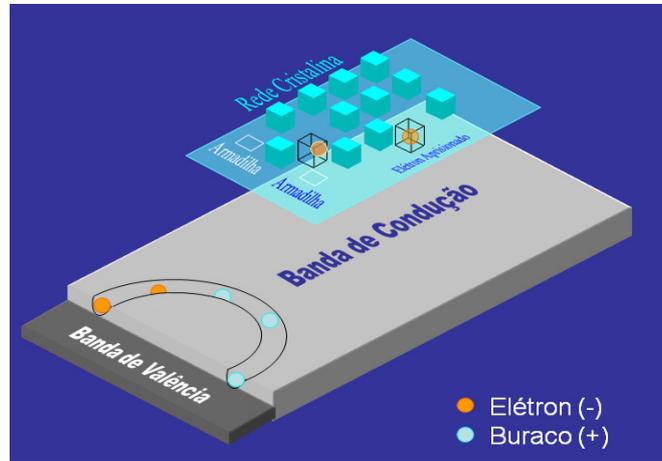


Figura 2-22 - Elétron aprisionado pela armadilha de elétrons, [4].

O IP é passado pelo escâner com um feixe de laser com energia suficiente para liberar os elétrons presos nas armadilhas. Uma vez liberados, estes migram para a banda de valência, transformando o  $\text{Eu}^{+3}$  em  $\text{Eu}^{+2}$  emitindo luz visível conforme mostra a figura 2.23. A intensidade dessa luz permite a reconstrução da imagem radiográfica [31].

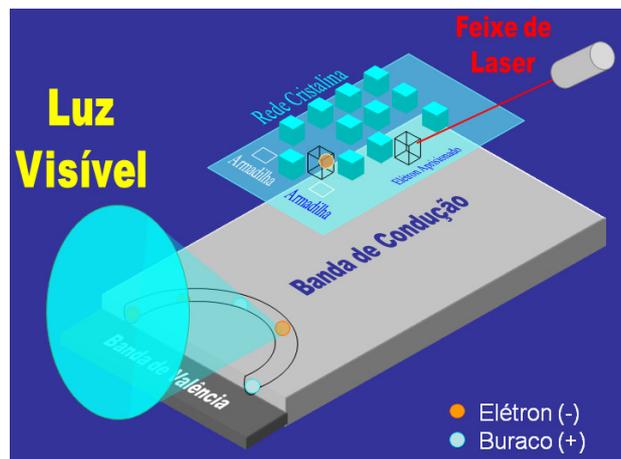


Figura 2- 23 - Feixe de laser libertando o elétron da armadilha, [4].

Na figura 2.24, observamos a absorção de raios X no IP, o gráfico 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, [32].

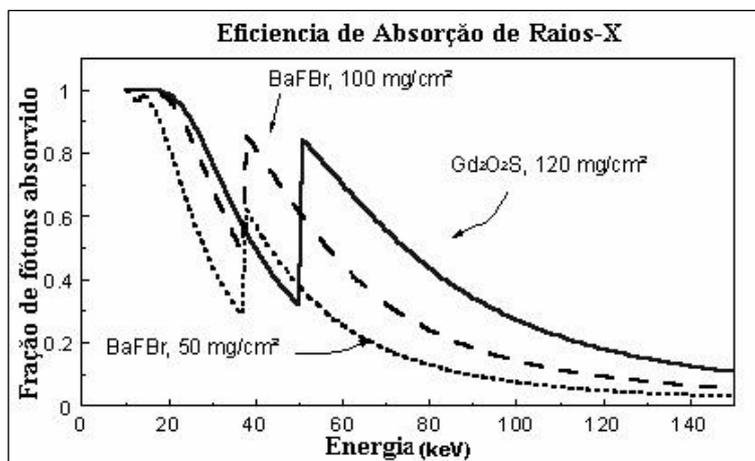


Figura 2-24 - Gráfico de absorção em função da energia dos raios X, [32].

Pode-se observar através do gráfico que a absorção é mais eficiente para fótons de baixas energias, aproximadamente 10keV. Verifica-se ainda que o fósforo de BaFBr:Eu apresenta eficiência melhor comparada com o fósforo de Gd₂O₂S:Tb (IP de terra rara). Analisando a curva de eficiência apresentada na Figura 2.23, o fósforo usado no IP apresenta pico próximo a 40keV devido à linha K de absorção do bário, [32].

O escâner para radiografia computadorizada é um dispositivo eletromecânico que incorpora todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução e exibição da radiografia final. No que se refere às características do escâner radiográfico, devem ser destacados três parâmetros relevantes: o tamanho do leitor óptico, tamanho do pixel do escâner e a faixa dinâmica. Um equipamento que apresente um leitor óptico de pequenas dimensões proporcionará melhor resolução espacial que outro que apresente um leitor maior, sob as mesmas condições. O tamanho do pixel (relacionado à resolução/velocidade de varredura) tem efeito análogo ao tamanho do leitor óptico: quanto menor esta dimensão, melhor será a resolução espacial da imagem [5].

O *design* do leitor admite uma variação de acordo com o fabricante. Contudo, todos os leitores devem realizar uma série de funções básicas. Um sistema de alimentação aceita a placa de fósforo numa velocidade uniforme, a leitura do IP é realizada linha a linha, e no final de cada linha o feixe retorna ao início da próxima linha. Outro sistema de transporte conduz a placa de imagem através do escâner, onde será estimulada por um feixe de laser. A terminologia utilizada para se referir à direção

ao longo do caminho de reflexão do laser é a direção de escaneamento, e a direção de sub-escaneamento refere-se à direção de movimento da placa. A luminescência fotoestimulada (PSL), 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 vezes mais intenso que a luminescência (dados da imagem). A intensidade da emissão é proporcional à carga presa, que por sua vez é proporcional à absorção original da radiação, [4].

O sinal analógico é amplificado por um fotomultiplicador, e convertido em sinal digital, sendo armazenado em um computador e a matriz em um buffer de imagem para as operações subseqüentes, como exibição, inserção de notas, análises, medição e armazenamento.

A figura 2.25 apresenta um esquema do processamento de leitura do IP.

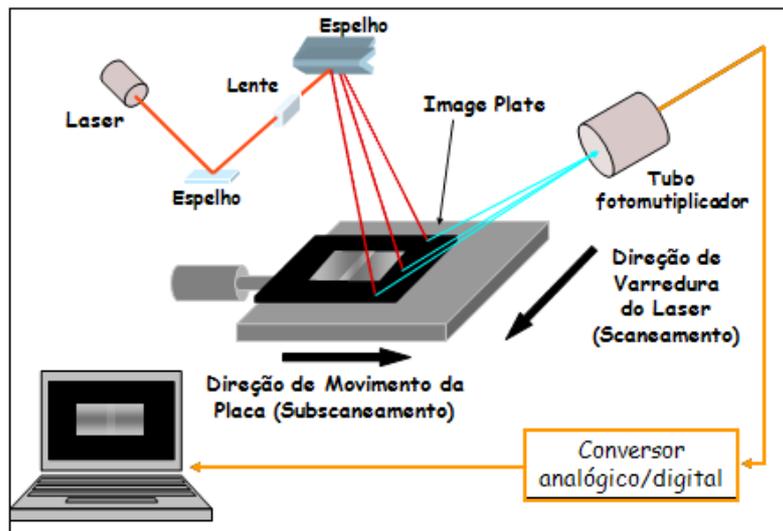
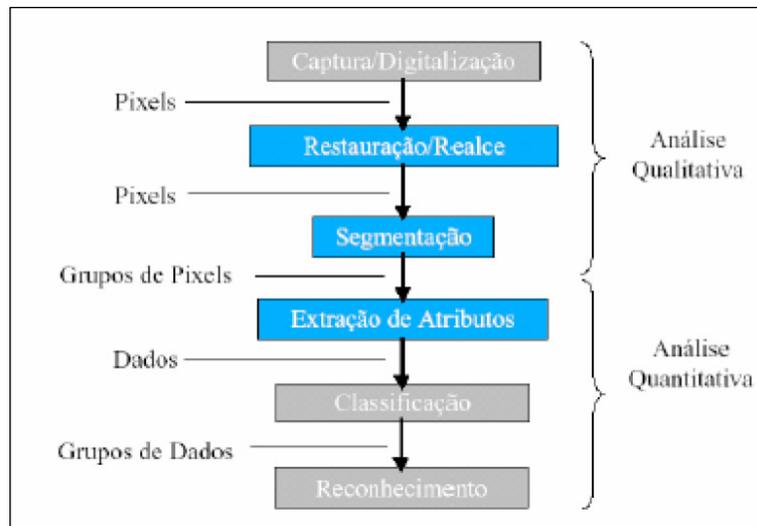


Figura 2-25 - Esquema do processo de leitura do Image Plate, [4].

#### 2.2.3.4 – Processamento da Imagem Digital

Processar uma imagem e transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair as informações nela contida é tão importante quanto obter a imagem, pois este processamento permitirá modificar, analisar e manipular as imagens digitais a partir de um computador.

As funções de processamento de imagens digitais podem ser classificadas por escopo, que está relacionado com técnicas de processamento, ou por resultado que está relacionado com os tipos de resultado de cada técnica, (figura 2.26).



**Figura 2-26 - Diagrama de sequência do processamento digital da imagem, [34].**

A seguir, serão descritas as etapas do processamento digital da imagem, [34]:

A restauração busca compensar distorções específicas, normalmente geradas no momento da aquisição. Quando se pode identificar experimentalmente a função que representa a deformação ou construir um modelo matemático adequado, é possível buscar a função inversa e aplicá-la sobre a imagem deformada. Mas a formulação matemática envolvida nesse processo é bastante complexa e conseqüentemente o custo computacional é muito alto.

Quando estamos no contexto de processamento de imagens científicas, o mais comum é ter como objetivo dados relacionados com os objetos presentes na imagem, então são necessárias 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.

Com os parâmetros descritos acima coletados, podem-se distinguir objetos na imagem agrupando parâmetros de acordo com a 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. 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.

Operações pontuais são operações em que um pixel da imagem resultante depende apenas do mesmo pixel da imagem original. Neste caso a única informação que temos é a cor do pixel. Qualquer operação pontual pode ser visualizada como mapeamento de pixels da imagem original para a imagem processada. 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 que é uma função estatística da imagem que, para cada nível de tonalidade, calcula quantos pixels existe naquela tonalidade.

Operações locais são operações onde um pixel da imagem resultante depende da vizinhança do mesmo pixel na imagem original. As operações locais mais comuns são as operações de filtragem que usam uma convolução com um *kernel* de dimensões  $n \times n$  onde  $n$  é tipicamente 3, 5, 18 e 7 podendo assumir qualquer um destes valores.

Operações globais são operações onde 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 *wavelets*, Transformada de Hough e a mais utilizada que é a Transformada de Fourier, que é a base fundamental para toda teoria de processamento de sinais e com ela pode-se realizar com a imagem uma série de operações muito importante.

No final do processo temos a imagem digital final, que corresponde à imagem processada e manipulada de acordo com os padrões de interesse. Então essa imagem pode ser impressa, armazenada em sistemas de arquivo digital, e até mesmo distribuída na rede.

### **2.3 – COMPARAÇÃO DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA E CONVENCIONAL**

Neste tópico será feita uma breve comparação entre a radiografia computadorizada e a convencional onde veremos que RC apresenta vantagens e desvantagens sobre o sistema convencional, mas sabe-se que até o presente momento não é possível substituir definitivamente os filmes convencionais, mas sim adotar a técnica de RC como complemento para inspeções.

Dentre as vantagens podemos citar [4,6]:

A capacidade dos IPs em detectar baixos níveis de radiação, devido a sua alta sensibilidade;

Os IPs são capazes de formar imagem com tempo de exposição inferior ao tempo dos filmes convencionais, o que é de suma importância para as inspeções industriais, pois permite a execução de várias radiografias em um curto espaço de tempo;

O sistema de radiografia computadorizada apresenta uma faixa dinâmica com resposta linear em relação à dose de exposição e extremamente ampla, como pode ser visto na figura 2.27. Isso permite a captura de imagens de objetos complexos numa única exposição, descartando a necessidade de realizar vários carregamentos de filme ou várias exposições;

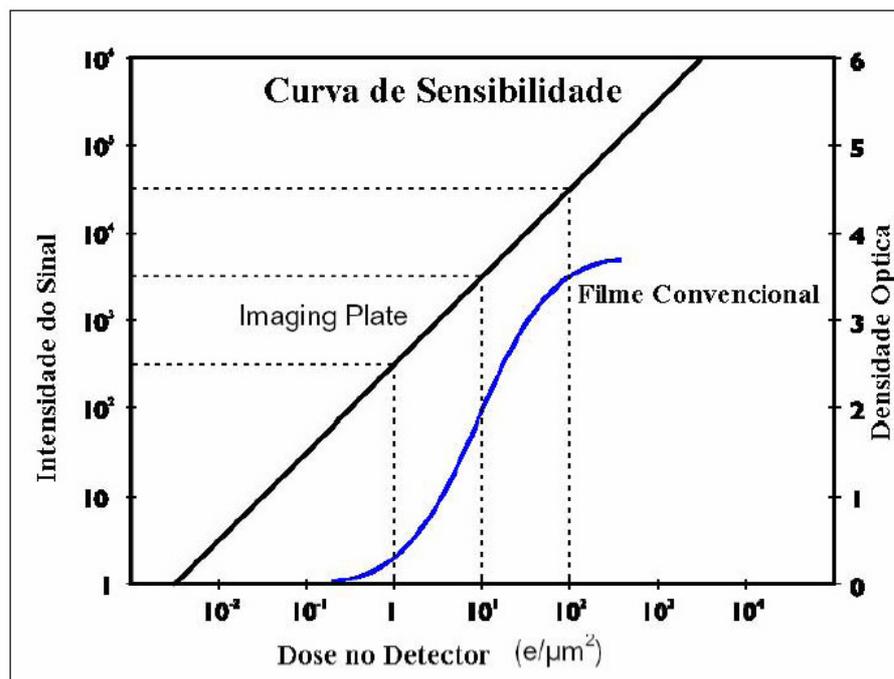


Figura 2-27 - Curva de resposta para uma placa de fósforo comparado com um filme de ISO 400 usando um écran de terra rara [4].

Assim como os filmes convencionais os IPs são bastante flexíveis, o que permite adaptação a praticamente qualquer geometria ou corpo de prova a ser radiografado.

Os IPs podem ser reutilizados por milhares de vezes, desde que sua manipulação seja adequada para que não haja desgaste físico do mesmo;

Não há necessidade de uma sala totalmente escura para alocação do sistema de RC, apenas deve-se tomar cuidado para que não haja luz diretamente sobre o equipamento no momento da realização da leitura;

Pelo fato da obtenção da imagem através da leitura do IP com laser, é eliminada a utilização de produtos químicos e água de lavagem, o que reduz o impacto ambiental;

A maioria dos equipamentos de RC necessita de um espaço pequeno para a realização da leitura das imagens, quando comparado ao espaço ocupado por uma câmara escura na revelação de filmes convencionais;

O tempo necessário para a visualização das imagens é o tempo necessário para a varredura do IP;

O processo de quantificação do sinal é direto, e acontece na conversão analógico–digital durante a leitura do IP;

O número de níveis de cinza, na RC depende do número de *bits* usado na quantificação, geralmente 12 ou 16 *bits*, ou seja, 4.096 ou 65.536 níveis de cinza. A manipulação da imagem em sistemas de RC permite a possibilidade de múltiplas operações, pelo fato da imagem ser baseada em dados digitais;

Na RC é possível catalogar, gerenciar e armazenar as imagens eletronicamente, com a vantagem de exigir menor espaço físico e de ter um custo menor;

A implementação de um sistema de RC não é barato, mas equivale ao custo da implementação de uma câmara escura, necessária para radiografia convencional. O que devemos considerar é a grande economia de custo em relação à execução e visualização das radiografias, processamento e armazenamento das imagens. Não podemos esquecer também que um único IP, que custa praticamente o mesmo que uma caixa de filme convencional é capaz de realizar um número muito maior de radiografia quando comparado com uma caixa de filme convencional.

Dentre as desvantagens podemos citar [4,5]:

Por apresentarem grande sensibilidade os IPs são muito vulneráveis a radiação espalhada, que contribui negativamente para a qualidade da imagem;

Os IPs disponíveis no mercado estão limitados a alguns tamanhos específicos, de acordo com cada fabricante e tipo de escâner;

A resolução nos sistemas de RC é limitada por fatores como tamanho do foco do laser e tamanho das placas de fósforo, sendo esta resolução compatível com os filmes de

granulação grossa, tendo em geral resolução em torno de  $100\mu\text{m}$ , podendo haver variações e infelizmente ainda não existe no mercado sistemas de RC ou IPs que tenham a mesma resolução que filmes convencionais de granulação fina;

Mudança de cultura imposta pela técnica, seja pela introdução de novos parâmetros de avaliação de qualidade de imagem (BSR e  $\text{SNR}_N$ ), seja pela presença de novos componentes, como os escâneres.

## **Capítulo 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresenta e descreve os corpos de prova, sistema de radiografia computadorizada e equipamentos utilizados neste trabalho. Assim como as técnicas empregadas tanto para as Radiográficas Computadorizadas quanto para as Convencionais.

#### **3.1 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

Os materiais e equipamentos utilizados durante o trabalho foram disponibilizados pelo Laboratório de Instrumentação Nuclear e pela empresa Confab Equipamentos.

Os corpos de prova (CP) representam sete placas de ligas metálicas, como mostra a figura 3.1, cujas dimensões podem ser observadas na tabela 3.1.



**Figura 3-1 - Corpo de prova, 7 placas de ligas metálicas.**

**Tabela 3-1 - Apresentação dos corpos de prova**

| Identificação | Número CP | Material      | Tamanho (mm) | Espessura (mm) |
|---------------|-----------|---------------|--------------|----------------|
| AB 666        | A1        | SSA 240/410S  | 10,1 X 10    | 25,2           |
| AH 771        | A2        | SA 240/UNS    | 10,2 X 10    | 13,5           |
| AJ 914        | A3        | S.AISI/316L   | 10,2 X 10    | 13             |
| AM 198        | A4        | SA 240/TP.304 | 10,1 X 10,1  | 13             |
| AN 593        | A5        | SA.240/TP.321 | 10,2 X 10    | 12,8           |
| AQ 463        | A6        | SA240/TP.347  | 10,1 X 10,1  | 10,2           |
| PQ 278        | A7        | SSA240/310SS  | 10, 2 X 10   | 10,8           |

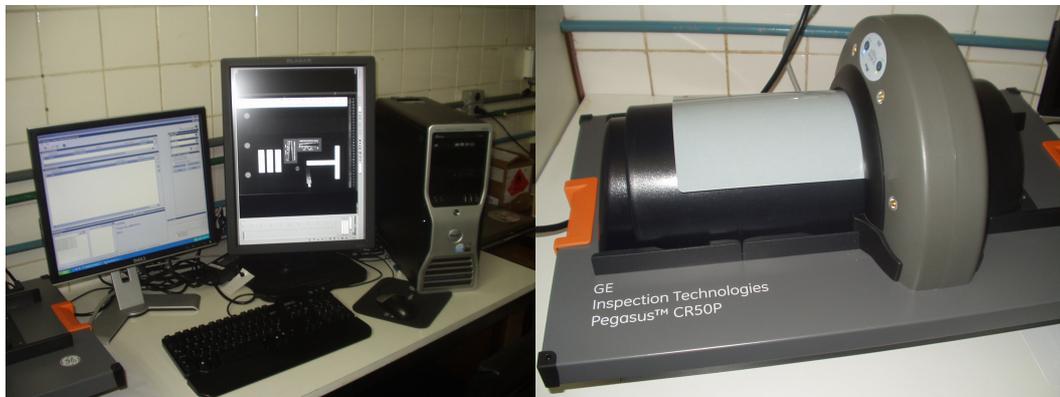
Como fonte de radiação, para aquisição das radiografias convencionais, empregaram-se um equipamento de raios X modelo MGC 41 fabricado pela YXLON Internacional e equipamento de gamagrafia com fonte de Irídio-192 com atividade de 2,41 TBq e Selênio-75, com atividade 1,13 TBq. Atividades estas calculadas no dia 26 de julho do ano de 2010.

Outros equipamentos utilizados foram filme radiográficos Classe II modelo AA400 fabricado pela Kodak, telas intensificadoras de 0,127 mm e 0,254 mm, chassi e IQIs de arame (ASTM) e de furo (ASME). Os filmes foram visualizados com emprego de negatoscópio Gagne, Inc 340 E modelo 1118 fabricado pela UL.

As radiografias computadorizadas foram obtidas utilizando um equipamento de raios X modelo Isovolto 450 Titam fabricado pela GE IP e equipamento de gamagrafia com fonte de <sup>192</sup>Ir com atividade de 0,48 TBq medida no dia dois de setembro do ano de 2010. IQIs de arame (ASTM) e de fio duplo (EN 462-5).

O sistema de radiografia computadorizada utilizado é composto por um escâner modelo CR50P, fabricado pela GE IT. O escâner é um dispositivo eletromecânico que incorpora todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução e exibição da radiografia final. Os parâmetros escolhidos para leitura foi ganho médio da fotomultiplicadora que corresponde a 600V, o tamanho de pixel foi de 50µm e o tamanho de foco do laser de 50µm. Após a leitura, o IP é apagado, e esta unidade utiliza 16 bits para codificação. Esse sistema possui também uma estação de trabalho que é composta de um computador pessoal fabricado pela DELL e monitor de alta resolução (2 mega pixels), utilizando como sistema operacional o *Windows XP*. A própria estação de trabalho fornece os programas *Rhythm Acquire* (GE) e *Rhythm Review* (GE), para aquisição e tratamento das imagens, respectivamente. Estes equipamentos descritos

podem ser observados na figura 3.2. O IP utilizado foi de alta resolução modelo HD-IP fabricado pela Durr NDT.



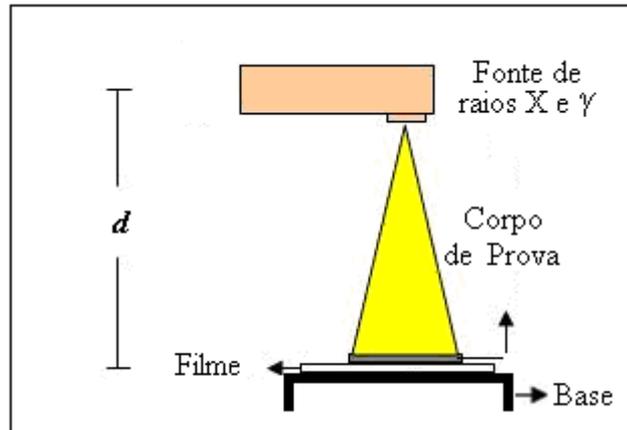
**Figura 3-2 - Sistema de Radiografia Computadorizada**

## **3.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O experimento aconteceu em duas etapas que correspondem à aquisição das radiografias convencionais e posteriormente aquisição das radiografias computadorizadas, de modo a se realizar comparações entre as imagens obtidas. Para ambas as aquisições foram utilizadas fontes de radiação X e Gama ( $\gamma$ ).

### **3.2.1 – Radiografias Convencionais**

Esta etapa foi realizada na empresa Confab Equipamentos. Foi montado um arranjo conforme mostra a figura 3.3, onde a distância fonte detector (DFD) é de 700 mm. As telas intensificadoras foram utilizadas nesta etapa, sendo a de 0,127 mm posicionada frontal ao filme e a de 0,254 mm atrás do filme e esse conjunto (tela+filme+tela) colocados dentro de um chassi. O chassi foi posicionado sobre a base a uma altura de aproximadamente 1000 mm do chão tendo o CP sobre ele.



**Figura 3-3 - Esquema experimental para radiografia Convencional.**

A técnica empregada para a aquisição das imagens para cada um dos CPs utilizando raios X e gama podem ser verificada nas tabela 3.2 e 3.3 respectivamente.

**Tabela 3-2 - Técnica para aquisição das imagens de radiografia convencional utilizando raios X.**

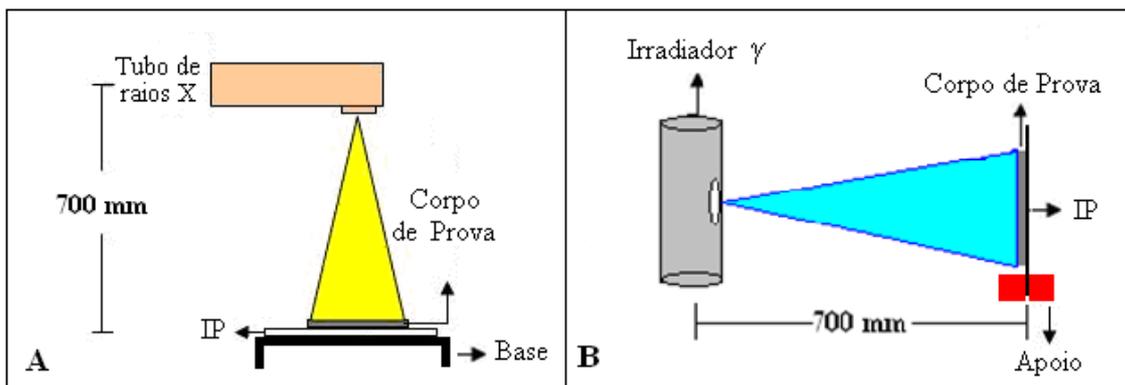
| Identificação | Número CP | Tensão (kV) | Corrente (mA) | Tempo (s) |
|---------------|-----------|-------------|---------------|-----------|
| AB 666        | A1        | 280         | 5             | 25        |
| AH 771        | A2        | 175         | 5             | 33        |
| AJ 914        | A3        | 175         | 5             | 46        |
| AM 198        | A4        | 175         | 5             | 33        |
| AN 593        | A5        | 175         | 5             | 44        |
| AQ 463        | A6        | 160         | 5             | 35        |
| PQ 278        | A7        | 160         | 5             | 45        |

**Tabela 3-3** - Técnica para aquisição das imagens de radiografia convencional utilizando raios  $\gamma$ .

| Identificação | Número CP | Iridio – 192 | Selênio – 75 |
|---------------|-----------|--------------|--------------|
|               |           | Tempo (s)    | Tempo (s)    |
| AB 666        | A1        | 190          | 1080         |
| AH 771        | A2        | 90           | 520          |
| AJ 914        | A3        | 90           | 520          |
| AM 198        | A4        | 105          | 520          |
| AN 593        | A5        | 105          | 520          |
| AQ 463        | A6        | 100          | 400          |
| PQ 278        | A7        | 100          | 400          |

### 3.2.2 – Radiografias Computadorizadas

Nesta etapa foram feitas as aquisições utilizando uma fonte de raios X e também apenas uma fonte de radiação  $\gamma$ . A figura 3.4 mostra o arranjo montado para esta etapa, onde é possível observar que a aquisição usando raios X segue o mesmo esquema de posicionamento da convencional, mas foi preciso uma pequena modificação de arranjo nas aquisições empregando raios  $\gamma$ . O IP, dentro de um chassi, foi colocado na vertical e se mantinha em pé devido a dois apoios, enquanto o CP foi colado com fita sobre o chassi, evitando que caísse durante a exposição. Todo este conjunto estava afastado aproximadamente 1500 mm da parede para evitar que radiação espalhada prejudicasse a qualidade da imagem. Como o objetivo é avaliar e comparar as técnicas convencionais e computadorizadas, parâmetros como DFD, tensão e corrente foram mantidos. A tabela 3.4 mostra os parâmetros utilizados para a aquisição das imagens dos CPs para radiação X e  $\gamma$ .



**Figura 3-4 - Esquema experimental para a radiografia computadorizada, A (fonte de raios X) e B (fonte de raios  $\gamma$ )**

**Tabela 3-4 - Parâmetros utilizados para a aquisição das imagens dos CPs para radiação X e  $\gamma$ .**

|               |       | Raios X     |               |           | Írídio – 192 |
|---------------|-------|-------------|---------------|-----------|--------------|
| Identificação | Nº CP | Tensão (kV) | Corrente (mA) | Tempo (s) | Tempo (s)    |
| AB 666        | A1    | 280         | 5             | 18        | 3700         |
| AH 771        | A2    | 175         | 5             | 22        | 2800         |
| AJ 914        | A3    | 175         | 5             | 23        | 2700         |
| AM 198        | A4    | 175         | 5             | 20        | 2700         |
| AN 593        | A5    | 175         | 5             | 20        | 2650         |
| AQ 463        | A6    | 160         | 5             | 19        | 2200         |
| PQ 278        | A7    | 160         | 5             | 20        | 2350         |

### 3.3 - REQUISITOS DE QUALIDADE

A avaliação do contraste nas radiografias convencionais foi feito através dos IQIs de furo (ASME números 17, 20 e 25) segundo a Norma ASME, Sec V E-1025 e de arame (ASTM 1B 11), segundo a Norma ASTM E-747, posicionados sempre sobre o CP do lado fonte.

A sensibilidade radiográfica deve ser verificada pelo uso de IQI, o qual deve apresentar na radiografia uma imagem perfeitamente definida, inclusive de seus números e letras de identificação, e o furo ou arame essencial bem visível. Para IQI de

arames, admite-se que o arame essencial é bem visível quando se visualiza, na área de interesse da radiografia, 10 mm do seu comprimento [35].

A densidade óptica, medida na área de interesse e na região do IQI, deve ser no mínimo de 2,0 e no máximo 4,0 H-D para raios  $\gamma$ . Já para raios X a DO medida na área de interesse e na região do IQI, deve ser no mínimo de 1,8 e no máximo 4,0 H-D [35].

**Tabela 3-5** - Requisitos de qualidade segundo as normas ASME E-1025 e ASTM E-747 [35].

| Faixa de espessura (mm) |      | DFD Mínima (mm) | IQI Furo ASME | IQI Arame ASTM | Lado  | Técnica Radiográfica | Classe do Filme |
|-------------------------|------|-----------------|---------------|----------------|-------|----------------------|-----------------|
| Maior que               | Até  |                 |               | Pol. - N°      |       |                      |                 |
| 3,0                     | 6,4  | 600             | 12-2T         | 0,008-5        | Fonte | PS/VS                | Classe I        |
| 6,4                     | 9,5  | 600             | 15-2T         | 0,010-6        | Fonte | PS/VS                | Classe II       |
| 9,5                     | 12,7 | 600             | 17-2T         | 0,013-7        | Fonte | PS/VS                | Classe II       |
| 12,7                    | 19,0 | 600             | 20-2T         | 0,016-8        | Fonte | PS/VS                | Classe II       |
| 19,0                    | 25,4 | 600             | 25-2T         | 0,020-9        | Fonte | PS/VS                | Classe II       |
| 25,4                    | 38,1 | 600             | 30-2T         | 0,025-10       | Fonte | PS/VS                | Classe II       |
| 38,1                    | 50,8 | 600             | 35-2T         | 0,032-11       | Fonte | PS/VS                | Classe II       |

A medição da BSR das imagens foi feita utilizando o IQI de fio duplo, sempre do lado fonte, e a análise utilizou o método do perfil linear. Considerou-se como não resolvido o primeiro par cuja diferença entre dois picos de máximo e mínimo era inferior a 20%. Na determinação da  $SNR_N$  adotou-se o valor de  $SR_b$  como visto na equação 5. Este valor corresponde à maior resolução do sistema, dentre as direções de varredura paralela e perpendicular [25, 37]. Já para as imagens feitas com fonte  $\gamma$  utilizou-se a BSR encontrada paralela a feixe de laser do escâner. O *software* de análise utilizado foi o executável ISee [38] que apresenta uma ferramenta que possibilita a medição da  $SNR_N$  através da abertura de uma região de interesse sobre a imagem. A dimensão adotada para esta janela (20x55 pontos e 55x20 pontos) baseou-se nos requisitos das normas adotadas, as quais aconselham um mínimo de 1100 pontos em uma área de medição [25, 37]. Finalmente, o contraste foi verificado pela análise visual do arame essencial na imagem, sem aplicação de filtros, admitindo-se como visível o fio que apresentava 10 mm do seu comprimento bem discerníveis na área de interesse da radiografia [35].

De acordo com a Norma Petrobras N-2820 [37] outro parâmetro de qualidade são as bordas da imagem que não devem apresentar saturação. Estas regiões não devem ultrapassar 90% do limite de saturação da faixa dinâmica do escâner.

## **Capítulo 4**

### **RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos neste trabalho segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

#### **4.1 - RESULTADOS OBTIDOS COM RADIOGRAFIA CONVENCIONAL**

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram os valores de densidade óptica (DO) e contraste, este último determinado com auxílio de IQIs de furo e arame, encontrados após análise das imagens radiográfica para as fontes de raios X e  $\gamma$  respectivamente. As figuras de 4.1 a 4.9 ilustram alguns dos resultados apresentados na tabelas 4.1 e 4.2, mostrando as imagens radiográficas convencionais, de alguns CPs, que foram digitalizadas.

**Tabela 4-1** - Valores de DO e contraste obtidos com fontes de raios X.

| CPs | Raios X |       |      |
|-----|---------|-------|------|
|     | DO      | Arame | Furo |
| A1  | 2,75    | 7     | 2T   |
| A2  | 2,30    | 7     | 2T   |
| A3  | 2,20    | 6     | 2T   |
| A4  | 2,23    | 6     | 2T   |
| A5  | 2,45    | 6     | 2T   |
| A6  | 2,18    | 6     | 2T   |
| A7  | 2,33    | 6     | 2T   |

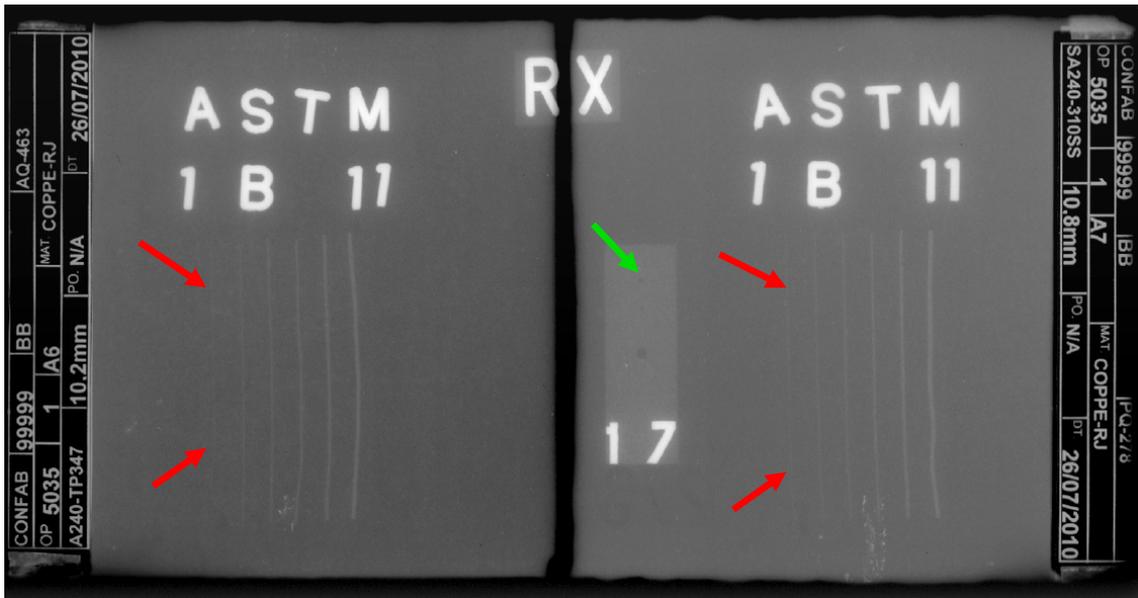


Figura 4-1 - Imagem radiográfica convencional dos CPs A6 e A7 utilizando fontes de raios X. As setas vermelhas indicam o arame 6 e a seta verde o furo essencial.

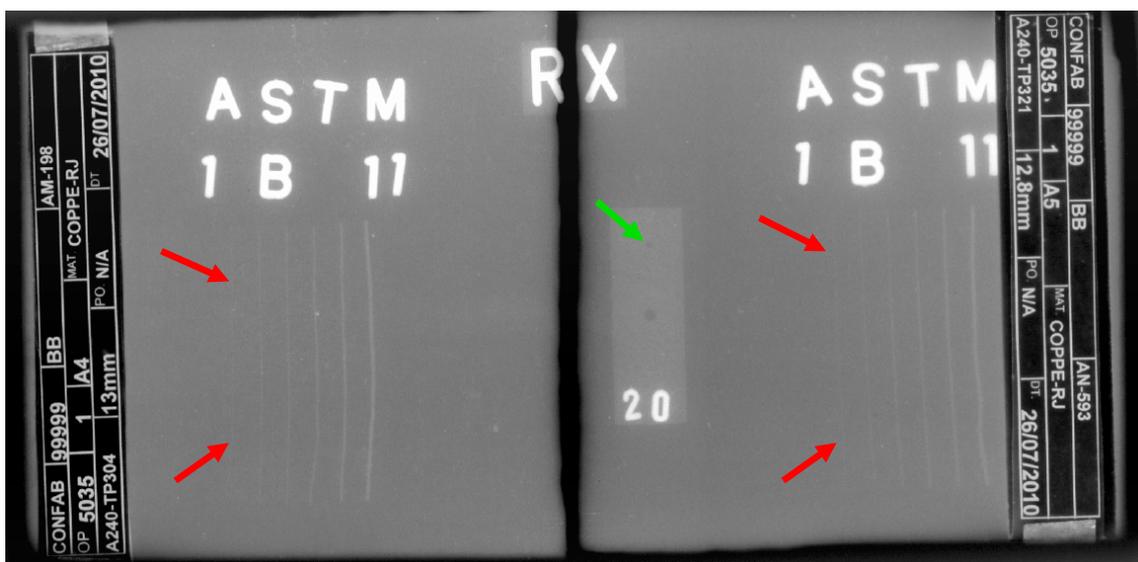
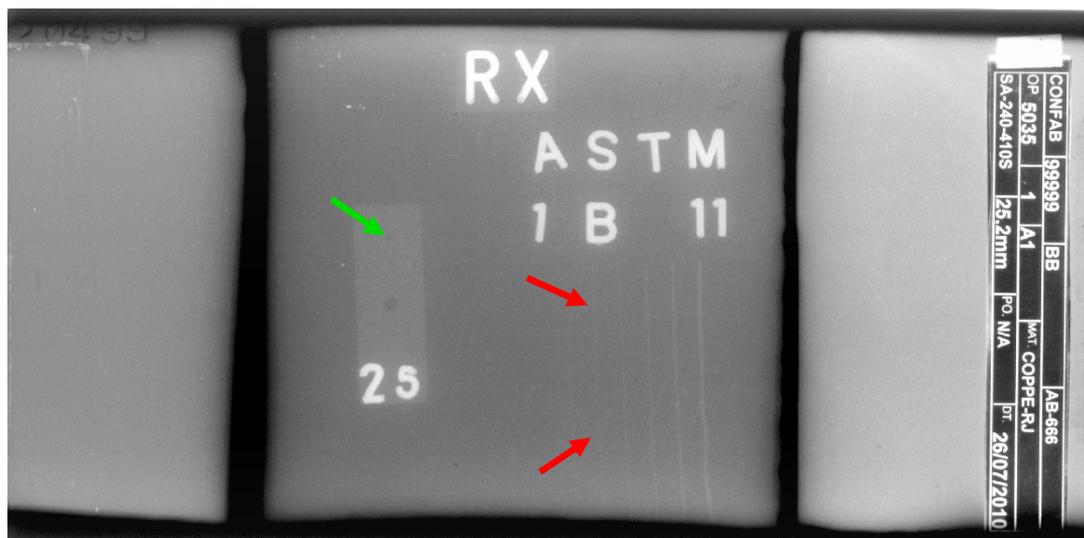


Figura 4-2 - Imagem radiográfica convencional dos CPs A4 e A5 utilizando fontes de raios X. As setas vermelhas indicam o arame 6 e a seta verde o furo essencial.



**Figura 4-3 - Imagem radiográfica convencional do CP A1 utilizando fonte de raios X.**  
 As setas vermelhas indicam o arame 7 e a seta verde o furo essencial.

**Tabela 4-2 - Valores de DO e contraste obtidos com fontes de raios  $\gamma$ .**

| CPs | Se-75 |       |      | Ir-192 |       |      |
|-----|-------|-------|------|--------|-------|------|
|     | DO    | Arame | Furo | DO     | Arame | Furo |
| A1  | 2,65  | 8     | 2T   | 2,65   | 9     | 2T   |
| A2  | 2,42  | 7     | 2T   | 2,42   | 7     | 2T   |
| A3  | 2,50  | 7     | 2T   | 2,52   | 7     | 2T   |
| A4  | 2,55  | 7     | 2T   | 2,55   | 7     | 2T   |
| A5  | 2,66  | 6     | 2T   | 2,64   | 7     | 2T   |
| A6  | 2,35  | 6     | 2T   | 2,35   | 7     | 2T   |
| A7  | 2,38  | 6     | 2T   | 2,39   | 7     | 2T   |

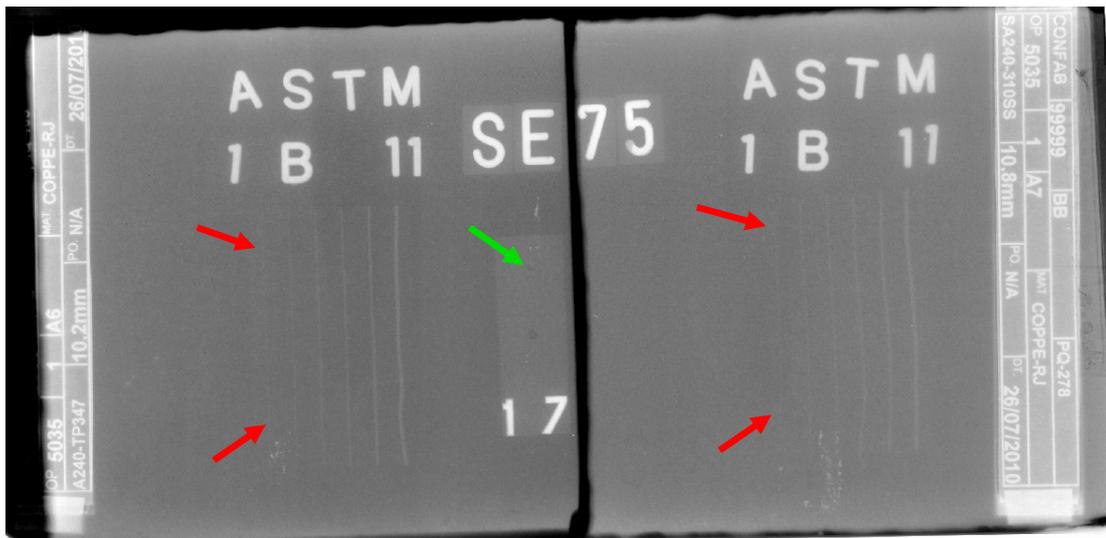


Figura 4-4 - Imagem radiográfica convencional do CPs A6 e A7 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Se-75).  
As setas vermelhas indicam o arame 6 no A4 e 6 no A5, e a seta verde o furo essencial.

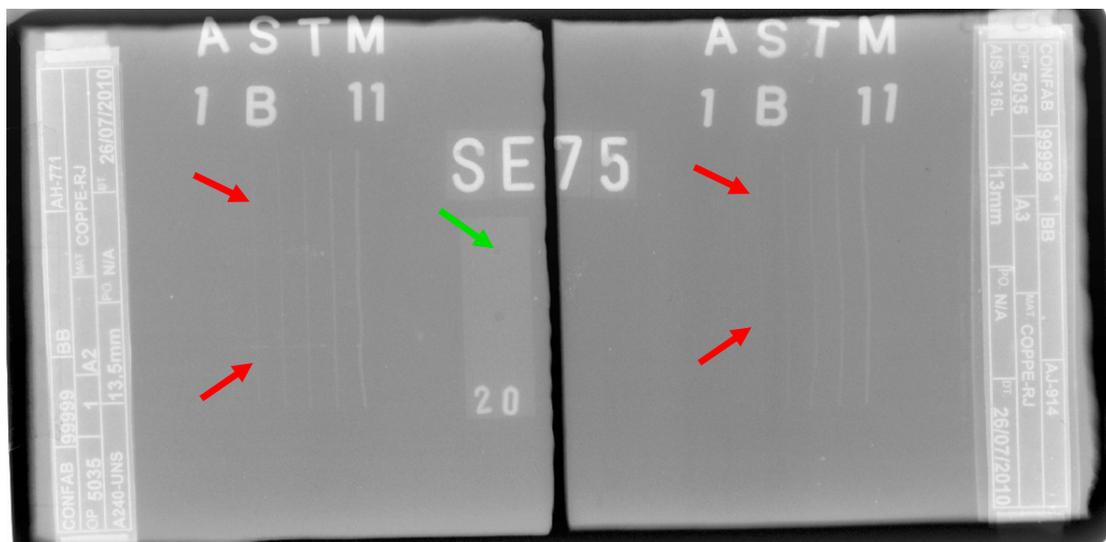
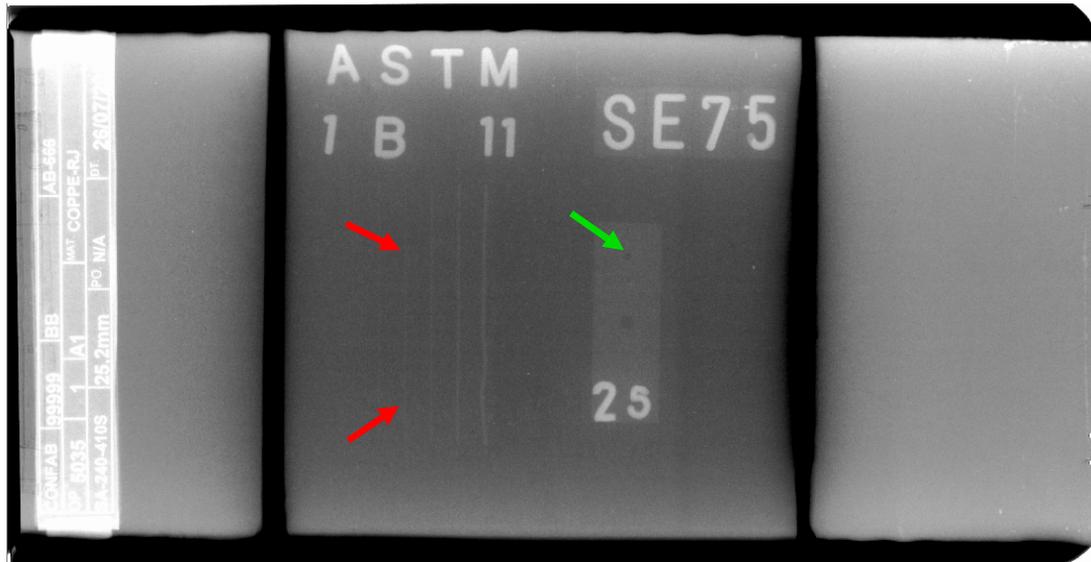
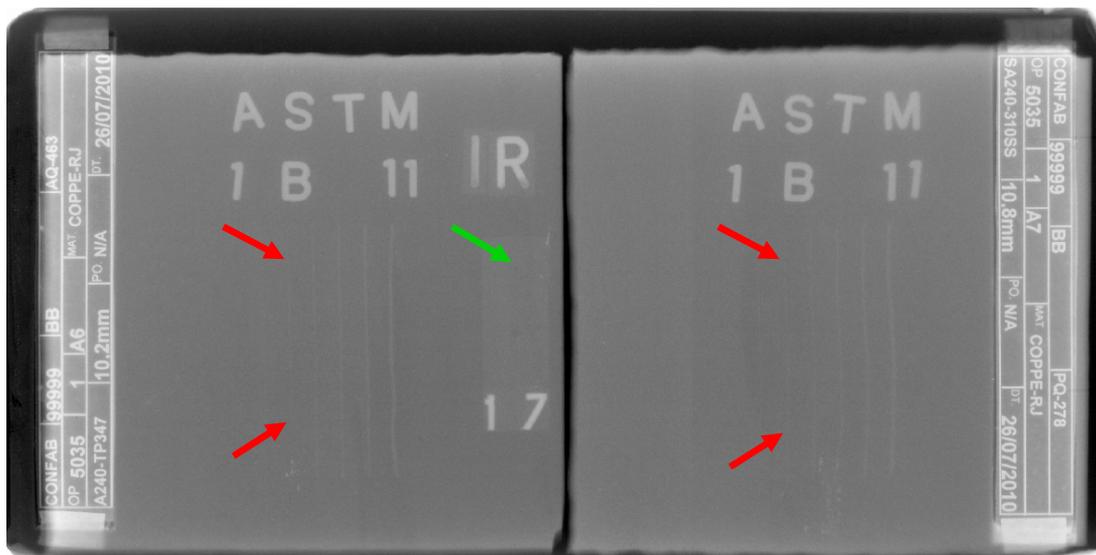


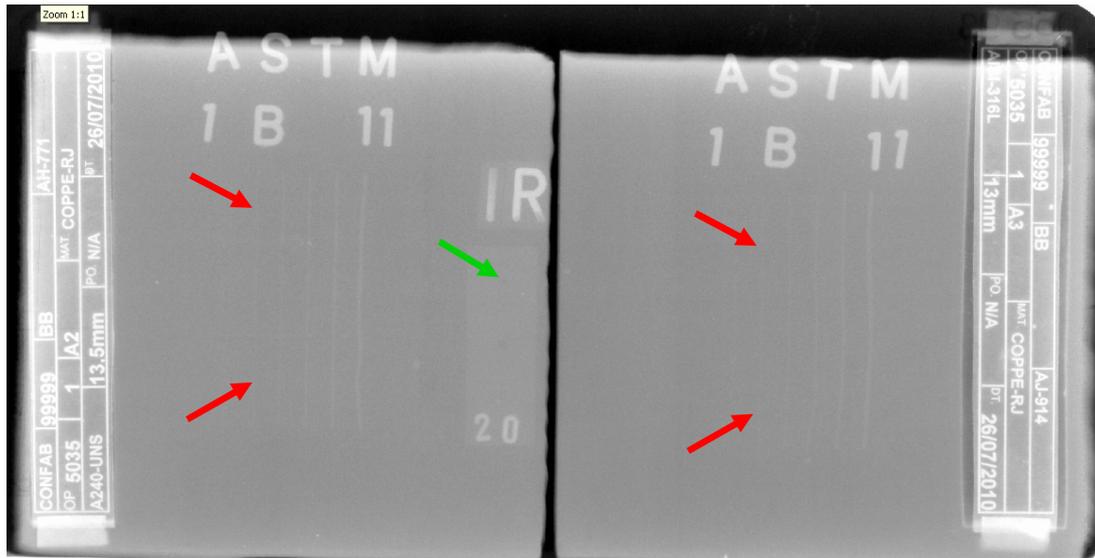
Figura 4-5 - Imagem radiográfica convencional do CPs A2 e A3 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Se-75).  
As setas vermelhas indicam o arame 7 e a seta verde o furo essencial.



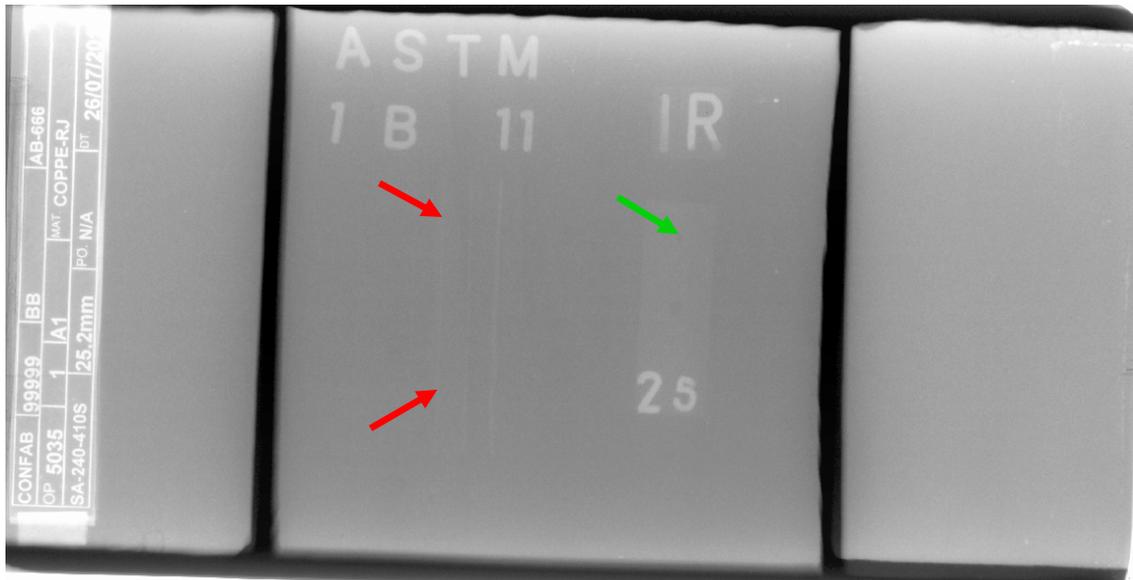
**Figura 4-6 - Imagem radiográfica convencional do CP A1 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Se-75).  
As setas vermelhas indicam o arame 8 e a seta verde o furo essencial.**



**Figura 4-7 - Imagem radiográfica convencional dos CPs A6 e A7 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Ir-192).  
As setas vermelhas indicam o arame 7 e a seta verde o furo essencial.**



**Figura 4-8 - Imagem radiográfica convencional do CPs A2 e A3 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Ir-192).  
As setas vermelhas indicam o arame 7 e a seta verde o furo essencial.**



**Figura 4-9 - Imagem radiográfica convencional do CP A1 utilizando fonte de raios  $\gamma$  (Ir-192).  
As setas vermelhas indicam o arame 9 e a seta verde o furo essencial.**

## 4.2 - RESULTADOS OBTIDOS COM RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

As tabelas 4.3 e 4.4 mostram os valores de  $SNR_N$ , BSR e contraste os dois últimos determinado com auxílio de IQIs fio duplo e arame respectivamente, encontrados após análise das imagens radiográfica para as fontes de raios X e  $\gamma$  através do *software* ISee. As figuras de 4.10 a 4.16 ilustram alguns dos resultados apresentados

na tabelas 4.3 e 4.4, mostrando as imagens radiográficas computadorizada, de alguns CPs.

**Tabela 4-3 - Valores de BSR, SNR<sub>N</sub> e contraste, obtidos com fontes de raios X.**

| CPs | RAIOS X  |               |                 |                  |             |
|-----|----------|---------------|-----------------|------------------|-------------|
|     | Paralelo | Perpendicular | Contraste Arame | SNR <sub>N</sub> | Intensidade |
| A1  | 130      | 100           | 7               | 83,16            | 30024       |
| A2  | 130      | 80            | 6               | 81,88            | 24829       |
| A3  | 130      | 80            | 6               | 91,90            | 31110       |
| A4  | 130      | 80            | 6               | 89,31            | 29165       |
| A5  | 130      | 80            | 6               | 87,93            | 30255       |
| A6  | 100      | 80            | 6               | 111,50           | 30854       |
| A7  | 100      | 80            | 6               | 110,27           | 28010       |



**Figura 4-10 - Imagem radiográfica computadorizada do CP A7 utilizando fonte de raios X, mostrando a BSR de 80 µm no sentido perpendicular ao laser de leitura do escâner.**

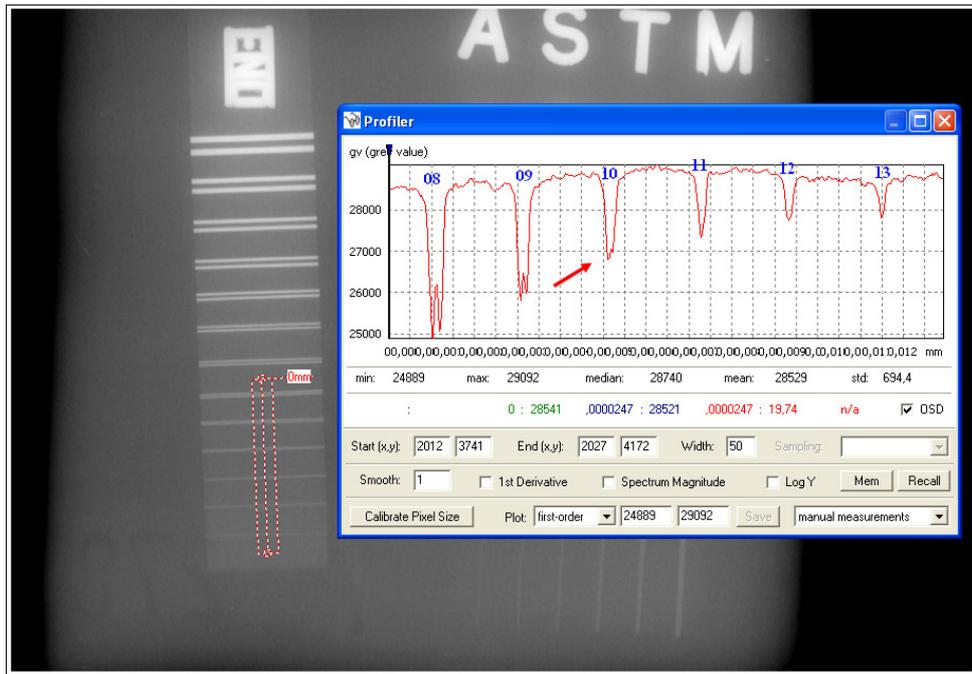


Figura 4-11 - Imagem radiográfica computadorizada do CP A7 utilizando fonte de raios X, mostrando a BSR de 100  $\mu$ m no sentido paralelo ao laser de leitura do escâner.

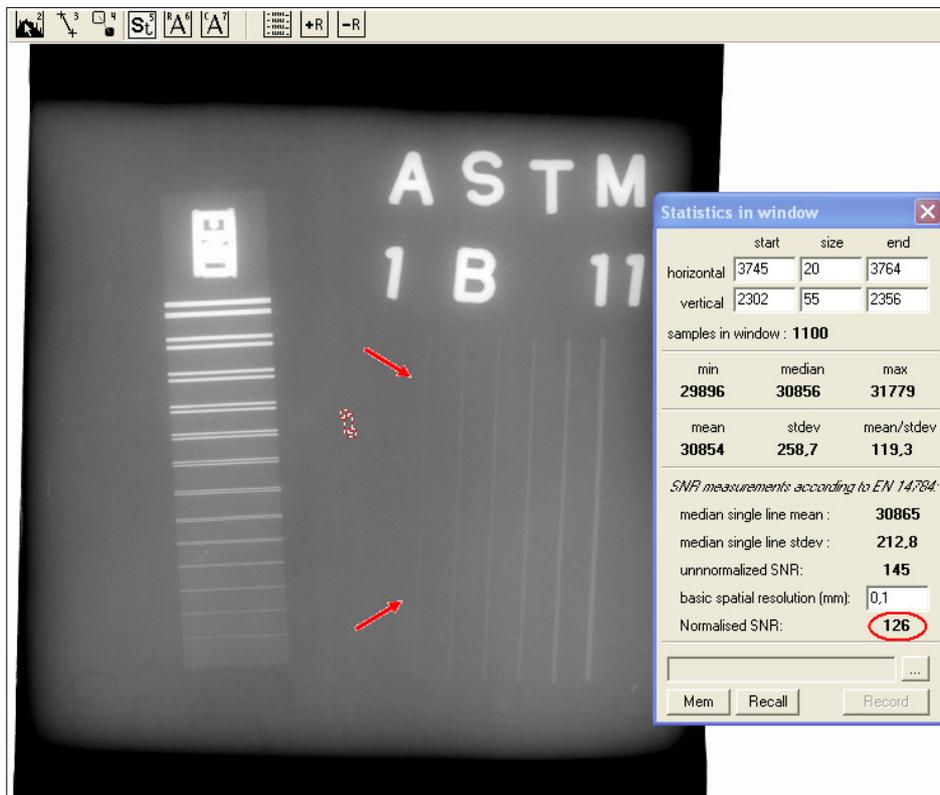


Figura 4-12 - Imagem radiográfica computadorizada do CP A6 utilizando fonte de raios X. As setas vermelhas mostram o arame 7 e circulado está o valor encontrado para  $SNR_N$ .

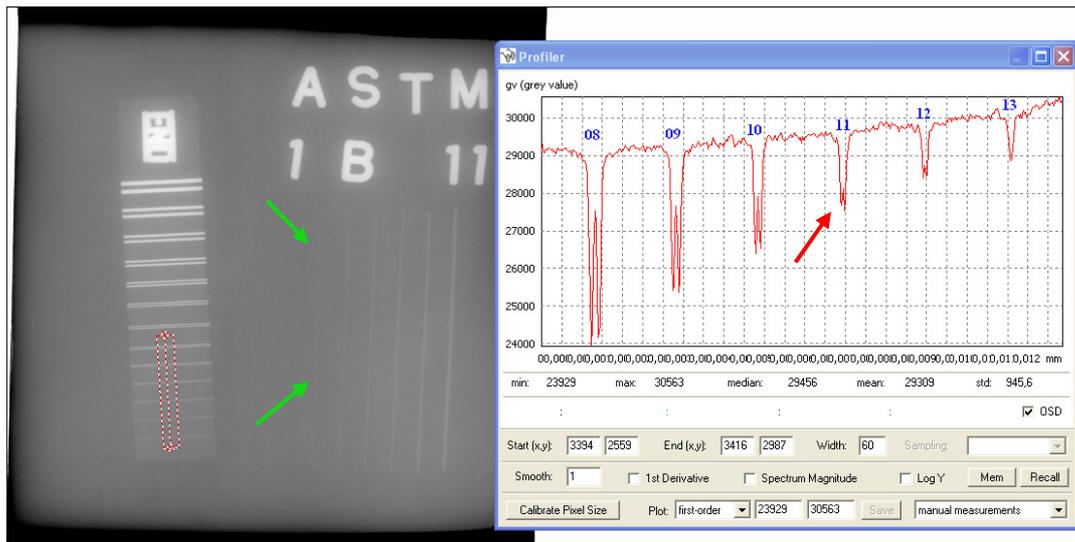


Figura 4-13 - Imagem do CP A6 utilizando fonte de raios X. As setas verdes mostram o arame 6. A seta vermelha mostra o par de fios 11 que é o par primeiro não discernível (BSR de 80  $\mu\text{m}$  no sentido perpendicular).

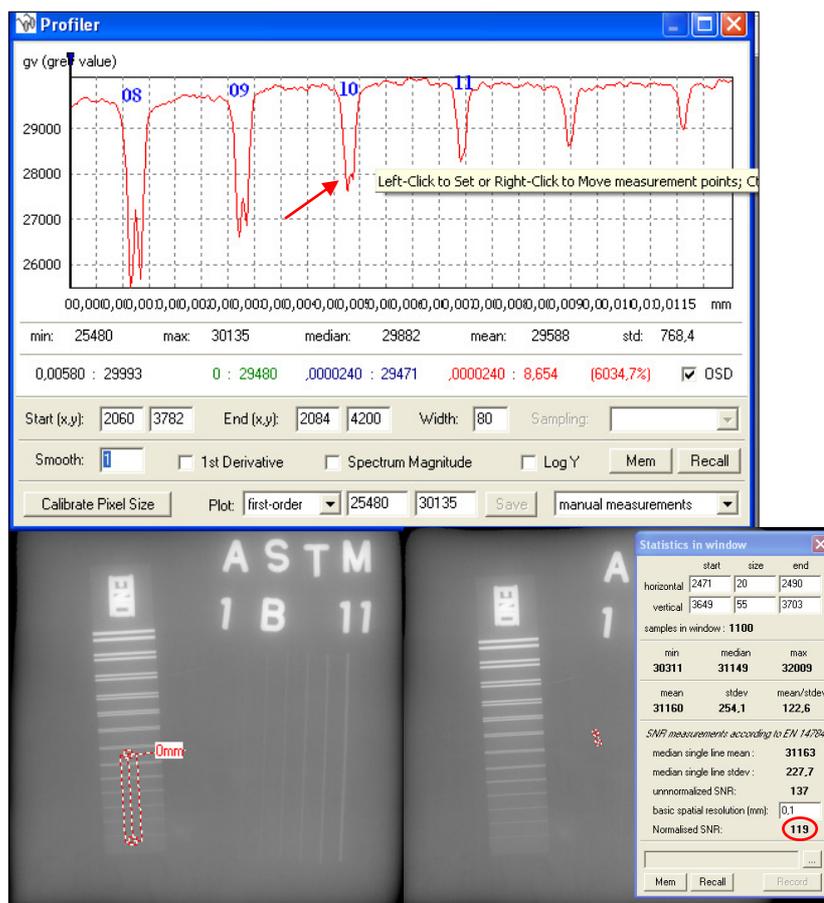


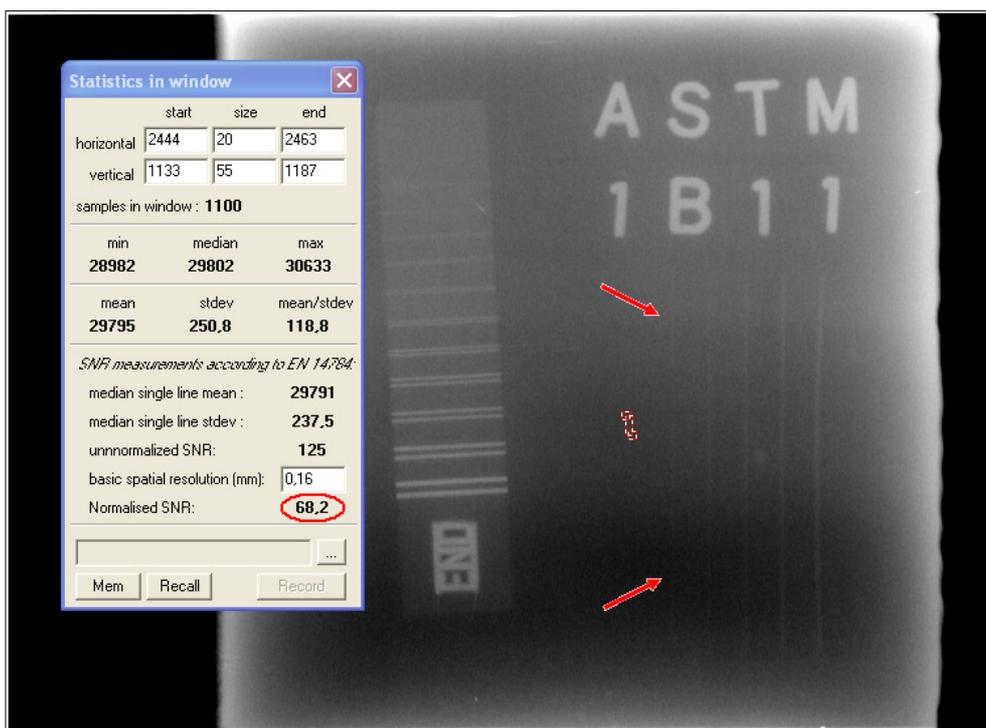
Figura 4-14 - Imagem do CP A6 utilizando fonte de raios X. Circulado consta o valor de  $SNR_N$  para a região de interesse. A seta vermelha mostra o par de fios 10 que é o par primeiro não discernível (BSR de 100  $\mu\text{m}$  no sentido paralelo).

**Tabela 4-4** - Valores de BSR, SNR<sub>N</sub> e contraste, obtidos com fontes de raios  $\gamma$ .

| CPs | RAIOS $\gamma$                    |                    |                  |             |
|-----|-----------------------------------|--------------------|------------------|-------------|
|     | BSR ( $\mu\text{m}$ )<br>Paralelo | Contraste<br>Arame | SNR <sub>N</sub> | Intensidade |
| A1  | 160                               | 8                  | 67,53            | 31952       |
| A2  | 160                               | 8                  | 68,28            | 29094       |
| A3  | 160                               | 8                  | 68,69            | 26938       |
| A4  | 160                               | 8                  | 69,17            | 27912       |
| A5  | 160                               | 8                  | 68,37            | 27508       |
| A6  | 160                               | 7                  | 68,04            | 24007       |
| A7  | 160                               | 7                  | 72,32            | 25791       |



**Figura 4-15** - Imagem radiográfica computadorizada do CP A7 utilizando fonte de raios  $\gamma$ , mostrando a BSR de 160  $\mu\text{m}$  no sentido paralelo ao laser de leitura do escâner.



**Figura 4-16 - Imagem radiográfica computadorizada do CP A2 utilizando fonte de raios  $\gamma$ . As setas vermelhas mostram o arame 8 e circulado está o valor encontrado para  $SNR_N$ .**

### 4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na análise das radiografias convencionais obtidas com raios X e  $\gamma$ , o parâmetro contraste esta dentro do requerido nas normas, tanto para IQI de arame (ASTM E-747) quanto para o IQI de furo (ASME, Sec V E-1025). A DO na região do IQI esta dentro do intervalo de no mínimo 1,8 e no máximo 4,0 H-D para raios X e de no mínimo 2,0 e no máximo 4,0 H-D pra raios  $\gamma$  [5].

A apreciação da BSR e da  $SNR_N$  nas radiografias computadorizadas, como foi dito anteriormente, usou como referência a Norma Petrobrás N-2821 que foi desenvolvida para análise de juntas soldadas, já que a N-2820 não limitavas valores para estes parâmetros. Pelo fato da N-2821 apresentar valores de BSR bastante rigorosos, podemos considerar que todos os CPs obtiveram valores aceitáveis de BSR.

A  $SNR_N$  foi medida em várias posições da imagem e o valor apresentado nas tabelas 4.3 e 4.4 foi a média dessas medidas que ficou acima dos valores mínimos estabelecidos pela norma. No entanto a variação de  $SNR_N$  medida na região central da

imagem quando comparada com a medida nas extremidades observou-se uma variação de aproximadamente:

- Fonte de raios  $\gamma$  – 45% para os CPs A1 e A3; 40% para o CP A2; 34% para os CPs A5 e A6; 31% para o CP A4; e 29% para o CP A7.
- Fonte de raios X - 55% para os CPs A3 e A7; 50% para os CPs A1 e A2; 39% para os CPs A5 e A6; e 35% para o CP A3.

Os valores de BSR e  $SNR_N$  para fonte de raios X, como era de se esperar, ficaram melhores, mas a baixa atividade da fonte de Ir-192 também contribuiu para este fator. Uma vez que o tempo de exposição foi bastante longo, acarretando grande quantidade de ruído a imagem radiográfica.

Como pode ser observado, optou-se em fazer as radiografias computadorizadas utilizando fonte de Ir-192 apenas com o IQI de fio duplo posicionado na direção paralela ao feixe de leitura do laser do escâner. Esta escolha se deu justamente devido à baixa atividade da fonte, pois a BSR na direção paralela é sempre pior quando comparada com a da direção perpendicular, assim seria suficiente as imagens atingirem um valor de BSR aceitável nesta direção.

Ainda não há uma metodologia consagrada para a escolha de tempos de exposição, sendo que os procedimentos de teste continuam muito baseados na experimentação, tentativas e erros.

## **Capítulo 5**

### **CONCLUSÃO**

As primeiras expectativas eram da plena substituição da radiografia convencional pela computadorizada, contudo isso ainda não ocorreu, seja no Brasil, seja em outros países. Mas a monitoração da corrosão é o maior impulsionador da RC tanto em nosso país quanto em outros.

Este trabalho vem de certa forma ratificar esta afirmação, pois mostra que é possível substituir a técnica convencional pela computadorizada, uma vez que os parâmetros de qualidade ficaram aceitáveis.

O contaste atendeu os valores para todos os CPs, tanto para as radiografias com fonte de raios X quanto para raios  $\gamma$ .

A BSR apesar de ter ficado acima da Norma (N-2821) para as radiografias com fonte de raios X, pode-se considerar os valores admissíveis, já que a N-2821 foi desenvolvida para análise de juntas soldadas e, portanto muito mais rigorosa. Contudo a  $SNR_N$ , para todos os CPs, ficou compatível com os filmes radiográficos Classe I, pois ficaram acima de 70.

Para as radiografias feitas com fonte de raios  $\gamma$ , a BSR atingiu os valores proposto pela norma (N-2821) para todos os CPs. A  $SNR_N$  para todos os CPs, ficou compatível com um filme radiográfico Classe II pois os valores ficaram compreendidos no intervalo entre 60 e 70, somente o CP A7 apresentou compatibilidade com filme Classe I pois ficou superior a 70. Deve-se levar em consideração para estes valores encontrados nas radiográficas computadorizada com fonte  $\gamma$  a baixa atividade da fonte quando comparada a fonte  $\gamma$  utilizada nas radiografias convencional.

Desta forma ao comparar a técnica radiográfica convencional e a computadorizada, pode-se concluir que é possível utilizar apenas a RC para inspeções de corrosão nesses materiais, beneficiando-se assim, das vantagens apresentadas pela RC.

Como trabalhos futuros, podem ser citados os seguintes projetos:

- Dar continuidade ao estudo confeccionando corpos de prova (tubos soldados), constituídos por estas ligas metálicas de revestimento, apresentando defeitos propositadamente inseridos no processo de soldagem. E inspecioná-los com a técnica radiográfica convencional e computadorizada á fim de compará-las.
- Verificar a viabilidades de inspecionar estes mesmos corpos de prova com radiográfica digital (*Flat Panel*).
- Realizar um estudo comparativo entre as três técnicas radiografia convencional, computadorizada e digital.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TELLES, P. S.; **“Tubulações Industriais, Material, Projeto, Montagem”**, 10ª Ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2007.
- [2] TELLES, P. S.; **“Materiais para Equipamentos de Processos”**, 5ª Ed., Interciência - Rio de Janeiro, 1994.
- [3] GENTIL, V.; **“Corrosão”**, 5ª Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2007.
- [4] OLIVEIRA, D. F.; **“Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos”**, Tese de Doutorado – Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Coppe, Dezembro, 2010.
- [5] MARINHO, C. A.; **”Radiografia Computadorizada Aplicada na Inspeção de Soldas de Tubulações nos Limites da Técnica de Parede Dupla Vista Dupla”**, Dissertação de Mestrado – Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Coppe, Rio de Janeiro, Março, 2009.
- [6] SILVA, A. S., **“Estudo da Otimização da Qualidade da Imagem Digital Através da Razão Sinal Ruído Diferencial”**, Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Coppe, Rio de Janeiro, Fevereiro de 2008.
- [7] UNESP Universidade Estadual Paulista, curso online – Show de Física – Ondas Eletromagnéticas, disponível no site:  
[http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99\\_Explor\\_Eletrizacao/paginas/20htmls/Ondas/20eletromag.htm](http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas/20htmls/Ondas/20eletromag.htm) acessado em 18/12/2010.
- [8] METALS HANDBOOK, DAVIS, J.R.; Desk Ed., 2nd Ed., ASM International, 1998.

[9] KNOLL, G.F., “**Radiation Detection and Measurement**”, 2<sup>a</sup> ed., New York, John Willey & Sons, 1989.

[10] HELMER, R. G.; “**Gamma-Ray Spectrum Catalogue – Ge and Si Detectors Spectra**”, Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, Idaho, USA, 1998.

[11] GRIMM, R.; “**Gamma radiography utilizing selenium-75**”, Insight, Vol. 38, em setembro 1996.

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

[13] Equipamento Gamagrafia. [<http://www.scribd.com/doc/3969975/Aula-25-Ensaio-por-raios-gama>].

[14] EISBERG R. M., RESNICK R.; “**Física Quântica**”, 4<sup>a</sup> Ed., Editora Campos, publicado em 1979.

[15] TAUHATA, L.; “**Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. Instituto de Radioproteção e Dosimetria**”, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5<sup>a</sup> revisão, Rio de Janeiro, 2003.

[16] ANJOS, M. J.; “**Análise de Solos Agrícolas por Fluorescência de Raios X por Dispersão em Energia**”, Tese de S.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro – Coppe, **Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.**

[17] ANDREUCCI, R.; “**Radiologia Industrial**”, disponível na internet no site <http://www.infosolda.com.br/andreucci> acessado em 15/08/2010.

[18] SHINOHARA, A.H., ACIOLI, E., KHOURY, H. J.; “**Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia**”, 6<sup>a</sup> COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Agosto/2002, Salvador, Brasil.

- [19] AGFA-GEVAERT GROUP, “Industrial Radiography”, Ed. Birmann, 1981.
- [20] HALMSHAW, R; “**Industrial Radiology - Theory and Practice**”, 2ª Ed., Londres,Chapman&Hall, 1995.
- [21] KODAK – EASTMAN KODAK COMPANY, “Radiology in Modern Industry”, 4ª Ed.,Rochester: Eastman Kodak Company, 1980.
- [22] LEITE, P., “**Curso de Ensaios Não Destrutivos**”, 4ª Ed., Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1973, p. 6.1-10.23.
- [23] HALMSHAW, R., KOWOL, T.; ”**Image Quality Indicators in Industrial Radiography**”, Technical Information, IE-NDT Ltd, 2001.
- [24] ASTM 2446 - Standard Practice for Classification of Computed Radiology Systems, 2005.
- [25] NORMA PETROBRAS N-2821 – Ensaio Não Destrutivo Radiografia Computadorizada de Juntas Soldadas, 2007.
- [26] EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K.; “**Replacement of Film Radiography by Digital Techniques and Enhancement of Image Quality**”, In: Proceedings of NDE 2005, National Seminar of Indian Society for NDT, Kalkutta, Índia, Decembre 2005.
- [27] PrEN 14784-1:2004 – Industrial Computed Radiography with Storage Phosphor Imaging Plates – Part 1: Classification of Systems, June/2004.
- [28] EUROPEAN STANDARD, EN 462-5, publicado por *European Committee for Standardization*, agosto 2005. Ou EN 426-1 - Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1 : image quality indicators (wire type), determination of image quality value, 1994.

[29] **ASTM E1815** - Standard Test Method for Classification of Film Systems for Industrial Radiography, **novembro 2008**.

[30] TAKAHASHI, K.; “Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX:Eu<sup>2+</sup> (X = Cl, Br, I) and Imaging Plates”, Journal of Luminescence, vol. 100, pp. 307-315, 2002.

[31] EWERT, U., ZSCHERPEL, U. e BAVENDIEKH, K., “**Strategies for Film Replacement in Radiography**” – Films and Digital Detectors in Comparison”, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, October/2008.

[32] MANGO, S. A.; “**How to Evaluate the Radiographic Performance Envelope of a Computed Radiography System**”, Materials Evaluation, v. 64, n° 3, pp.297-302 Canada 2006.

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

[34] SCURI, A. E.; “**Fundamentos da Imagem Digital**”, disponível na internet no site: [HTTP://mirrors.dotsrc.org/luu/curso-cgi/Notas\\_de\\_Aula/scuri.pdf](http://mirrors.dotsrc.org/luu/curso-cgi/Notas_de_Aula/scuri.pdf) acessado em [15/02/2010](http://mirrors.dotsrc.org/luu/curso-cgi/Notas_de_Aula/scuri.pdf).

[35] PR-007 – **Raios X e Gama Procedimento de END**, manual S-ER, Abende, março, 2004.

[36] ASTM E-747 – Standard Practice for Design, Manufacture and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology, 2004.

[37] NORMA PETROBRAS N-2820 – Ensaio Não Destrutivo Radiografia Computadorizada para Detecção de Corrosão, 2007.

[38] ISee – Software desenvolvido pelo **BAM** (Federal Institute for Materials Research and Testing), Berlin, Alemanha.

## ANEXO

### Liga 410S

A liga 410S (UNS S41008) apresenta um baixo teor de carbono que lhe confere uma baixa dureza. É uma modificação do aço 410 (UNS S41000), um aço inoxidável martensítico em geral com 12% de cromo. O baixo teor de carbono e uma pequena adição de elemento de liga minimiza a formação de austenita em altas temperaturas, restringindo a capacidade de endurecimento do aço 410S, permanecendo macio e dúctil, mesmo quando resfriados rapidamente. Essa característica de não-endurecimento ajuda a prevenir rachaduras quando o aço é exposto a altas temperaturas ou quando soldados. O aço 410S é completamente ferrítico na condição recozido. Ele exhibe resistência à corrosão adequada e semelhante ao aço 410, e boa resistência à oxidação. É resistente à corrosão em condições atmosféricas, água fresca, leves ácidos orgânicos e minerais, alcalóides e alguns produtos químicos.

A composição química segundo especificações das norma ASTM A-240-02 pode ser vista na tabela abaixo:

|                 |           |           |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> |
| Concentração %  | 0,021     | 0,002     | 0,013     | 0,300     | 0,690     | 0,410     |
| <b>Elemento</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Ti</b> | <b>N</b>  | <b>Co</b> | <b>Cu</b> |
| Concentração %  | 11,660    | 0,020     | 0,036     | 0,021     | 0,02      | 0,12      |

### Liga 304

A liga 304 (S30400) apresenta aproximadamente 18 % de cromo e 8% de níquel (cromo-níquel austenítica), é a liga mais familiar e mais frequentemente utilizada da família de aço inoxidável. Esta liga pode ser utilizada para uma ampla variedade de aplicações e está disponível em diferentes produtos, incluindo folhas, tiras e placas. São amplamente utilizados em equipamentos e utensílios para o processamento e manuseio de alimentos, bebidas e produtos lácteos. Trocadores de calor, tubulações, tanques e

outros equipamentos de processo em contato com a água doce também utilizam essas ligas.

Apresenta sua melhor característica de resistência à corrosão no estado solubilizado e com superfície finamente polida. Em temperatura ambiente, a liga 304 resiste ao ataque de diversos agentes corrosivos, como a maioria dos ácidos orgânicos e substâncias orgânicas em geral.

A composição química segundo especificações das norma ASTM A-240/A-240M 06C pode ser vista na tabela abaixo:

| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Concentração %  | 0,047     | 0,001     | 0,027     | 1,060     | 0,550     | 8,030     |
| <b>Elemento</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Al</b> | <b>Cu</b> |           |           |
| Concentração %  | 18,020    | 0,049     | 0,0024    | 0,0640    |           |           |

### **Liga 316L**

A liga 316L (S31603) é uma das portadoras de molibdênio nos aços inoxidáveis austeníticos. É mais resistente à corrosão que a liga 304, (cromo-níquel austenítica). Esta liga também pode oferecer maior fluência, maior resistência a ruptura por estresse, e a força de tração a temperaturas elevadas.

A composição química segundo especificações das norma ASTM A-240/A-240M 06 pode ser vista na tabela abaixo:

| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Concentração %  | 0,019     | 0,003     | 0,031     | 1,370     | 0,450     | 10,020    |
| <b>Elemento</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Al</b> | <b>B</b>  | <b>Cu</b> |           |
| Concentração %  | 16,510    | 2,011     | 0,0037    | 0,0017    | 0,0650    |           |

## Ligas 321 e 347

São ligas de aço inoxidável da família (cromo-níquel austenítica). A liga 321 é estabilizada com titânio para evitar precipitação de carbonetos em serviços sob alta temperatura ou durante a soldagem, evitando a corrosão intercrystalina e é indicada para aplicações que exigem soldagem: vasos de pressão, juntas de expansão e outros que sofrerão aquecimento intermitente entre 425°C e 900°C.

Já a liga 347 é estabilizada pela adição de nióbio e tântalo sendo indicada para equipamentos e peças sujeitos a aquecimentos intermitentes (427°C a 899°C) e que requerem soldagem sem tratamento posterior.

A composição química segundo especificações das norma ASTM A-240M da liga 321 pode ser vista na tabela abaixo:

| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Mn</b> | <b>Si</b>     | <b>Ni</b>  |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------|
| Concentração %  | 0,041     | 0,0029    | 0,023     | 1,831     | 0,436         | 9,012      |
| <b>Elemento</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Ti</b> | <b>N</b>  | <b>Ti/C+N</b> | <b>C+N</b> |
| Concentração %  | 17,340    | 2,011     | 0,257     | 0,0093    | 5,100         | 0,050      |

A composição química segundo especificações das norma ASME SA-240 da liga 347 pode ser vista na tabela abaixo:

| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> | <b>N</b>  |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Concentração %  | 0,040     | 0,007     | 0,026     | 1,550     | 0,420     | 9,220     | 0,040     |
| <b>Elemento</b> | <b>Cr</b> | <b>Nb</b> | <b>Co</b> | <b>Cu</b> | <b>Mo</b> | <b>Ti</b> | <b>Al</b> |
| Concentração %  | 17,400    | 0,640     | 0,120     | 0,420     | 0,037     | 0,003     | 0,02      |

## Liga 310SS

A liga 310SS aço inoxidável austenítico é normalmente utilizado para aplicações em temperaturas elevadas. Boa estabilidade à temperatura de soldagem, eletrodos de solda, equipamento para indústria química, peças de fornos e estufas. Resistente à oxidação até temperaturas de 1050°C ou 1100°C.

A composição química segundo especificações das norma ASTM A-167 e ASTM A-240 pode ser vista na tabela abaixo:

| <b>Elemento</b> | <b>C</b>  | <b>S</b>  | <b>P</b>  | <b>Cr</b>           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Concentração %  | 0,080     | 0,030     | 0,045     | 24.00 min/26.00 max |
| <b>Elemento</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> | <b>Mn</b> | <b>Ni</b>           |
| Concentração %  | 1,500     | 8,030     | 2,000     | 19.00 min/22.00 max |