

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Ruy de Macedo Minari**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE  
IMAGEM COM FONTE DE RAIOS X EM PEÇAS  
DE FERRO FUNDIDO**

**Taubaté – SP**

**2009**

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Ruy de Macedo Minari**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE  
IMAGEM COM FONTE DE RAIOS X EM PEÇAS  
DE FERRO FUNDIDO**

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

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

Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo.

**Taubaté – SP**

**2009**

M663a Minari, Ruy de Macedo.  
Avaliação de sistemas de captação de imagem com fonte de raios x em peças de ferro fundido. / Ruy de Macedo Minari. – Taubaté: Unitau, 2009.

96f. :il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: José Rubens de Camargo.

1. Raios-X: equipamento. 2. Captação de Imagem. 3. Tecnologia de Materiais. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 621.112

**RUY DE MACEDO MINARI**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE IMAGEM COM FONTE DE  
RAIOS X EM PEÇAS DE FERRO FUNDIDO**

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

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

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Dr. Silvio Fazolli

CTA/IAE

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eduardo Hidenori Enari

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos meus filhos Ricardo, Gustavo, Lívia, e em particular ao Rafael, que me acompanhou no meu dia a dia dos trabalhos de campo, e à minha esposa Neila, pela compreensão e apoio desde os tempos de namoro.

## **AGRADECIMENTOS**

À Avibras Indústria Aeroespacial S.A, pela experiência adquirida em 25 anos de trabalho na área de conhecimento em radiografia industrial e disponibilização dos cdp's, e pelos recursos de inspeção das peças nas técnicas de radiografia computadorizada e fluoroscopia analógica.

Ao Instituto de Fomento Industrial - IFI/CTA, na pessoa do Eng. João Carlos Matarezi e equipe, pelos recursos dados de inspeção das peças nas técnicas de radiografia convencional.

À GE Inspection Technologies, nas pessoas de Silvana Abreu Santos e Eugenio Solda, pelo empréstimo do equipamento de radiografia computadorizada e recursos dados de inspeção das peças nas técnicas de radiografia convencional e computadorizada.

À Fundação Tupy, na pessoa do Sr. Jucemar Bonote, pelos recursos dados de inspeção das peças na técnica de radiografia digital.

À Diagnostic, na pessoa do Sr. Hélio Terni, pelos recursos dados de inspeção das peças na técnica de fluoroscopia digital.

À Petrobrás/Cequi, na pessoa do Ms. Eng. José Maurício Barbosa Rabello, que executou o escaneamento das radiografias convencionais.

À Compoende, na pessoa do Eng. Nelson do Val Lacerda, pelo apoio e disponibilidade das horas de trabalho na empresa dedicadas a este trabalho.

Ao incansável e sempre disponível Professor Doutor José Rubens de Camargo, pelo empenho na orientação deste trabalho.

Eis que venho sem demora; guarda o que tens, para que ninguém tome a tua coroa.

Ap. 3:11

SENHOR JESUS

## RESUMO

Atualmente, no Brasil e exterior, as avaliações de peças industriais nos sistemas radiográficos são feitas durante ou após a fabricação de maneira a verificar a integridade interna das mesmas. Esses ensaios são de suma importância para atender os requisitos de normas, de projetos e de utilização, garantindo a qualidade e confiabilidade, reduzindo os riscos de quebra de equipamentos e para vidas humanas. Os ensaios radiográficos e fluoroscópicos industriais são métodos de ensaios não destrutivos que se baseiam na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo ensaiada. Essa variação na quantidade de radiação absorvida é detectada através de um meio que irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma descontinuidade interna. Este trabalho tem por objetivo fornecer uma base de dados concreta, baseada em experimentos práticos e reais, que gere conhecimento de suporte ao responsável pela instalação radioativa neste momento decisório através da comparação das diversas técnicas no ensaio de peças de ferro fundido nodular. Os ensaios de campo foram executados com equipamentos de raios X de energia máxima de 320 kV com potencial constante, em 15 peças de ferro fundido nodular, utilizando 05 técnicas de captação de imagem, que são: radiografia convencional, radiografia computadorizada, radiografia digital, fluoroscopia analógica e fluoroscopia digital. As radiografias resultantes dos diversos tipos de captação de imagem foram laudadas por inspetores qualificados pela norma de qualificação de pessoal na área aeronáutica (NAS 410, 2008), e os resultados dos ensaio, para verificar a melhor aderência de cada sistema de imagem com a Norma Nuclear CNEN-NE-3.01, onde qualquer atividade envolvendo radiação deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício líquido positivo. O nível da aceitabilidade das descontinuidades para que o inspetor possa laudar as radiografias é um acordo entre cliente e fornecedor e, neste caso, foi determinado o nível de qualidade de imagem de 2:4T um nível adequado de qualidade, 2:2T um nível bom e 2:1T um nível ótimo de qualidade de imagem.

Palavras-chave: radiografia convencional, radiografia computadorizada, radiografia digital, fluoroscopia analógica, fluoroscopia digital.

## ABSTRACT

Now a days, in Brazil and exterior, the evaluations of industrial parts through X-rays systems are made during or after producing verifying the internal integrity of them. Those testing are sum important for the norms requirements, of projects and utilization, guaranteeing the quality and reliability, reducing the equipment break risks and for human lives. The radiográficos and fluoroscópicos industrial testing are methods of non destructive testing that is based on the differentiated absorption of penetrating radiation by the part that is being tested. That variation in the radiation quantity absorbed is detected through an indicate environment, between other things, the existence of an internal descontinuidade. This paper has for objective supply a base of concrete facts, based in real and practical experiments, that manages knowledge of support to the responsible for the radioactive installation in this decisive moment through the comparison of diverse techniques tested in nodular cast iron parts. The field practice were performed with equipment of X-rays 320 kV maximum energy with constant potential, in 15 pieces nodular cast iron, utilizing 05 image collection techniques, that are: conventional x-ray, x-ray computerized, digital x-ray, fluoroscopia analog and fluoroscopia digital. The resultant x-rays of the diverse image collection kinds were attested by inspectors qualified by t personals qualification norm in the aeronautic area (IN THE 410, 2008), and the results of the testing, verify the better adhesion of each system of image to the Nuclear Norm CNEN-NE-3.01, where any activity involving radiation should be justified regarding other alternatives and produce a positive liquid benefit. The level of the acceptability of the descontinuidades for that the inspector be able to laudar the x-rays is an agreement between client and supplying and, in that case, was determined the image quality level of 2:4T, an adequate level of quality is 2:2T and great level of quality of 2:1T.

Keywords: conventional x-ray, x-ray computerized, digital x-ray, fluoroscopia analog, fluoroscopia digital.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vazamento de metal líquido em molde	18
Figura 2 - Peças produzidas por fundição	19
Figura 3 - Radiografia de porosidades em alumínio fundido	20
Figura 4 - Radiografia de bolhas de gás em alumínio fundido	21
Figura 5 - Radiografia de inclusões não metálicas em alumínio fundido	21
Figura 6 - Radiografia de inclusões metálicas em alumínio fundido	22
Figura 7 – Segregação em um material ferro fundido nodular	23
Figura 8 – Radiografia de rechupes em alumínio fundido	23
Figura 9 - Concavidade de contração em peça de ferro fundido nodular	24
Figura 10 – Radiografia de gota quente em alumínio fundido	25
Figura 11 – Gota fria em um material ferro fundido nodular	25
Figura 12 – Alimentação insuficiente em uma peça de ferro fundido nodular	26
Figura 13 - Ampola de vidro com os componentes	29
Figura 14 - Diagrama de bloco de um equipamento de raios X	29
Figura 15 - Radiografia da mão da esposa de Roentgen	30
Figura 16 - Esquema do fundamento da radiografia	32
Figura 17 - Filme radiográfico	33
Figura 18 - Emulsão não exposta	34
Figura 19 - Emulsão exposta e revelada	34
Figura 20 - Curva característica de filmes radiográficos	36
Figura 21 - Disposição geométrica entre fonte-filme-objeto	41
Figura 22 - IQI tipo furos da norma	42
Figura 23 - Técnica de exposição parede simples - vista simples	43
Figura 24 - Técnica de exposição parede dupla - vista simples	44
Figura 25 - Técnica utilizada para verificação de radiografias PD-VD	44
Figura 26 - Placa de fósforo	50
Figura 27 - Arquitetura do escaneamento	50
Figura 28 - Placa de fósforo	53
Figura 29 – Scanner GE modelo Pegasus TM CR 50P	54
Figura 30 - <i>Flat Panel</i>	55
Figura 31 - Cabine de raios X	55
Figura 32 - Técnica de radiografia digital	56
Figura 33 - Método cintilador – Fósforo	58
Figura 34 - Esquema de um detector plano	58
Figura 35 - Tubo intensificador de imagem, visto internamente	61
Figura 36 - Detalhe do intensificador de imagem, visto externamente	61
Figura 37 - Fluoroscopia/radioscopia óptica	62
Figura 38 - Esquema da instalação fechada de fluoroscopia	63
Figura 39 - Esquema da instalação fechada do tipo cabine	63
Figura 40 - Esquema de uma inspeção por Raios X, utilizando fluoroscopia digital	64
Figura 41 - Vista interna de uma cabine de raios X e uma imagem radioscópica de peça automotiva	65
Figura 42 - Fluxograma da metodologia aplicada.	67
Figura 43 - Exemplo de um IQI's de furo	69
Figura 44 - Técnica de parede simples vista simples (PS-VS)	70
Figura 45 - Técnica de parede dupla vista simples (PD-VS).	71
Figura 46 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia convencional	75

Figura 47 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia computadorizada	77
Figura 48 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia digital	79
Figura 49 - Resumo dos resultados dos IQI's – Fluoroscopia analógica	81
Figura 50 - Resumo dos resultados dos IQI's – Fluoroscopia digital	83
Figura 51 - Valores das médias ponderadas com os respectivos desvios padrões dos resultados das tensões	84
Figura 52 - Valores das médias ponderadas com os respectivos desvios padrões dos resultados das correntes	85
Figura 53 - Valores das médias ponderadas com os respectivos desvios padrões dos resultados dos tempos	86
Figura 54 - Configuração de uma tomografia computadorizada	90
Figura 55 - Montagem do IQI de fio duplo	90

## LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia convencional	74
Tabela 2 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia computadorizada	76
Tabela 3 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia digital	78
Tabela 4 resultados dos parâmetros dos ensaios da fluoroscopia analógica	80
Tabela 5 resultados dos parâmetros dos ensaios da fluoroscopia digital	82
Tabela 6 resultados dos parâmetros dos ensaios da fluoroscopia digital	85
Tabela 7 valores em ordem crescente para as 5 técnicas de captação de imagem	86

## ABREVIATURAS

Abreviaturas	Descrição das abreviaturas e símbolos
END	Ensaio Não destrutivo
R.Conv.	Radiografia Convencional
R.Comp.	Radiografia Computadorizada
RD	Radiografia Digital
FA	Fluoroscopia Analógica
FD	Fluoroscopia Digital
ASME	American Society of Mechanical Engineers
PS-VS	Parede Simples – Vista Simples
PD-VD	Parede Dupla – Vista Dupla
Pg	Penumbra geométrica
Dfo	Distância da fonte ao objeto
F	Tamanho da fonte
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
ASTM	American Society of Testing Materials
NAS	National Aerospace Standard
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	17
2.1 Ferro fundido.....	17
2.1.1 Introdução do processo de fundição de ferro .....	17
2.1.2 Descontinuidades encontradas no processo de fundição de ferro .....	19
2.1.2.1 Caracterização da porosidade nas radiografias .....	20
2.1.2.2 Caracterização das bolhas de gás nas radiografias .....	20
2.1.2.3 Caracterização das inclusões não metálicas nas radiografias .....	21
2.1.2.4 Caracterização das inclusões metálicas nas radiografias .....	22
2.1.2.5 Caracterização de segregação em peças fundidas .....	22
2.1.2.6 Caracterização de rechupes (externos) ou vazios (internos) nas radiografias .....	23
2.1.2.7 Microcavidades de contração em peça fundida.....	24
2.1.2.8 Caracterização de gota quente ( <i>hot tear</i> ) nas radiografias.....	24
2.1.2.9 Caracterização de gota fria ( <i>cold shut</i> ) nas radiografias.....	25
2.1.2.10 Alimentação insuficiente em peça fundida .....	26
2.1.3 Interpretação dos resultados das radiografias .....	26
2.2 Ensaio radiográficos.....	27
2.2.1 Normas nucleares para instalações radioativas industriais .....	28
2.3 Equipamentos de raios X.....	28
2.4 Sistemas de captação de imagem .....	30
2.4.1 Radiografia convencional .....	30
2.4.1.1 Filmes radiográficos .....	32
2.4.1.2 Processamento do filmes radiográficos .....	37
2.4.1.3 Definição Radiométrica .....	40
2.4.2 Radiografia computadorizada .....	44
2.4.3 Radiografia digital.....	54
2.4.3.1 Benefícios da radiografia digital .....	55
2.4.4 Fluoroscopia analógica e digital.....	59
3 PROPOSIÇÃO.....	66
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
4.1 Materiais .....	68
4.1.1 Corpos-de-prova.....	68
4.2 Métodos .....	68
4.2.1 Fontes de radiação utilizadas para os ensaios radiográficos.....	68
4.2.2 Normas ASTM utilizadas nas radiografias.....	68
4.2.3 Indicadores da Qualidade da Imagem - IQI's (Penetrâmetros) .....	69
4.2.4 Densidade radiográfica .....	69
4.2.5 Técnicas de Exposição Radiográfica.....	70
4.2.5.1 Técnica de Parede Simples Vista Simples (PS-VS).....	70
4.2.5.2 Técnica de Parede Dupla Vista Simples (PD-VS) .....	70
4.2.6 Sistemas de captação de imagem .....	71
4.2.6.1 Radiografia convencional .....	71
4.2.6.2 Radiografia computadorizada .....	71
4.2.6.3 Radiografia digital.....	72
4.2.6.4 Fluoroscopia analógica .....	72
4.2.6.5 Fluoroscopia digital .....	72

4.2.7 Avaliação das radiografias (Laudos) .....	73
4.2.8 Imagens radiográficas.....	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	74
5.1 Radiografia convencional (parâmetros, qualidade de imagem e laudo).....	74
5.1.1 IQI's (qualidade de imagem) .....	75
5.2 Radiografia computadorizada (parâmetros, qualidade de imagem e laudo).....	76
5.2.1 IQI's (qualidade de imagem) .....	77
5.3 Radiografia digital (parâmetros, qualidade de imagem e laudo) .....	78
5.3.1 IQI's (qualidade de imagem) .....	79
5.4 Fluoroscopia analógica (parâmetros, qualidade de imagem e laudo) .....	80
5.4.1 IQI's (qualidade de imagem) .....	81
5.5 Fluoroscopia digital (parâmetros, qualidade de imagem e laudo) .....	82
5.5.1 IQI's (qualidade de imagem) .....	83
5.6 Comparações dos valores das médias aritméticas dos parâmetros de ensaios com os desvios padrões respectivos, entre as 05 técnicas de captação de imagem. ....	84
5.6.1 Análise da tensão (kV).....	84
5.6.2 Análise da Corrente (mA).....	84
5.6.3 Tempo (min).....	85
5.6.4 – Visibilidade dos furos do IQI.....	86
5.6.5 Tabela com a síntese dos dados nas 5 técnicas radiográficas .....	87
5.7 Resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's).....	88
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	89
6.1 Conclusões .....	89
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	90
Referências .....	91
APÊNDICE 1 - DESCRIÇÃO E FOTOS DAS PEÇAS.....	97
APÊNDICE 2 - RADIOGRAFIA CONVENCIONAL .....	102
APÊNDICE 3 - RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA .....	107
APÊNDICE 4 - RADIOGRAFIA DIGITAL .....	112
APÊNDICE 5 - FLUOROSCOPIA ANALÓGICA.....	117
APÊNDICE 6 - FLUOROSCOPIA DIGITAL.....	122
APÊNDICE 7 - RESULTADO DOS IQI'S POR PEÇA .....	127

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas de END (Ensaio não Destrutivos), a radiografia convencional (filme com cristais de prata) tem sido a mais tradicional e antiga técnica utilizada nas indústrias em geral. Com o desenvolvimento tecnológico obtido com o passar do tempo, novas tecnologias passaram a apresentar uma boa relação custo benefício, conquistando gradualmente mercados que antes eram somente dos filmes radiográficos convencionais. Dentre estas novas tecnologias podemos citar as radiografias computadorizadas, que utilizam filmes de fósforo, as radiografias digitais (flat panel), as fluoroscopias analógicas (intensificadores de imagem com câmera CCD analógica) e as fluoroscopias digitais (intensificadores de imagem com câmera CCD digital).

Com a popularização das técnicas mencionadas, atualmente, os responsáveis pelas instalações radioativas enfrentam um dilema no momento de escolher qual a melhor técnica a ser utilizada em determinada situação, dado as necessidades e restrições do momento de tomada de decisão. Em partes, este dilema advém da dificuldade de se encontrar estudos práticos e abrangentes que forneçam base de conhecimento que auxiliem o processo de tomada de decisão da técnica de radiografia mais adequada.

Este trabalho tem por objetivo fornecer uma base de dados concreta, baseada em experimentos práticos e reais, que gere conhecimento de suporte ao responsável pela instalação radioativa neste momento decisório através da comparação das diversas técnicas no ensaio de peças de ferro fundido nodular.

É importante mencionar que o presente trabalho pretende analisar especificamente, e somente, os ambientes de instalações radiográficas fechadas, que utilizam equipamentos de raios X com potencial constante.

Para tal finalidade, o Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura.

O Capítulo 3 apresenta a proposição desta dissertação.

No Capítulo 4, são apresentados os materiais, corpos-de-prova, técnicas, equipamentos e metodologias aplicadas em cada uma das cinco (5) técnicas.

No Capítulo 5, são apresentados, por meio de tabelas e gráficos, o resumo dos resultados obtidos em cada técnica e sua discussão, e os dados detalhados e imagens nos apêndices de 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas do trabalho.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Ferro fundido**

O termo ferro fundido em geral é aplicado ao grupo de ligas de base ferrosa contendo acima de 2% de carbono, bem como outros elementos de liga como o silício, manganês, níquel e cromo. As propriedades mecânicas, bem como as magnéticas dos materiais de ferro, são sensíveis aos seus teores de carbono, tipo de liga de fundição, bem como tratamento térmico, corrosão ou propriedades físicas, como resistência elétrica. O ferro fundido nodular é conhecido por sua ductilidade, mas a vantagem mais importante tem sido seu alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, em combinação com resistência à corrosão, fácil fundição e usinabilidade. Esse material apresenta uma microestrutura típica caracterizada por nódulos ou esferas de grafita. A matriz metálica que envolve essas partículas pode ser grafítica ou perlítica, ou ainda uma mistura desses dois elementos, dependendo do tratamento térmico dado (FEISTE et.al., 2002).

#### **2.1.1 Introdução do processo de fundição de ferro**

Fundição é um processo de fabricação no qual um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado em um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida, como mostra a Figura 1. A peça produzida por fundição pode ter as formas e dimensões definitivas ou não. Em muitos casos após a fundição, a peça é usinada para serem feitos ajustes dimensionais ou mesmo conformada mecanicamente (por exemplo, ser forjada), para que as formas e dimensões finais sejam obtidas (MACHADO, 2009).



Figura 1 - Vazamento de metal líquido em molde (MACHADO, 2009)

Os processos de fundição apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de processos de fabricação, como no caso da produção de peças complexas e com cavidade internas, ou na produção de peças muito grandes.

Por outro lado, as propriedades mecânicas de peças fundidas geralmente são inferiores às propriedades de peças conformadas mecanicamente. Além disso, durante o processo de solidificação pode haver formação de porosidade.

A Figura 2 mostra peças produzidas por fundição e os fatores que devem ser considerados para se escolher adequadamente os processos de fabricação, que são: quantidade de peças a produzir, projeto da fundição, tolerâncias requeridas, grau de complexidade, especificação do metal, acabamento superficial desejado, custo do ferramental, comparativo econômico entre usinagem e fundição, limites financeiros do custo de capital, requisitos de entrega (MACHADO, 2009).



Figura 2 - Peças produzidas por fundição (MACHADO, 2009)

O processo de fundição aplica-se a vários tipos de metais, tais como aços, ferros fundidos, alumínio, cobre, zinco, magnésio e respectivas ligas.

Porém existem também desvantagens. Os aços fundidos, por exemplo, podem apresentar elevadas tensões residuais, microporosidades, zoneamento e variações do tamanho de grão.

Tais fatores resultam em menor resistência e ductibilidade, quando comparados aos aços obtidos por outros processos de fabricação como conformação a quente (ANDEUCCI, 2008).

### **2.1.2 Descontinuidades encontradas no processo de fundição de ferro**

As descontinuidades em fundidos variam em forma, tamanho e aparência dependendo de muitas variáveis incluindo tipo de material, forma do molde, processo de fusão, controle do processo e tamanho da peça (STRABEL, 2002).

Essas descontinuidades em peças fundidas podem ser caracterizadas nas radiografias.

### 2.1.2.1 Caracterização da porosidade nas radiografias

A Figura 3 mostra as porosidades que ocorrem quando há gás dissolvido no metal introduzido pela turbulência ao derramar o metal fundido ou fornecido pelo material do molde que permanece preso na peça ao solidificar.

A porosidade pode ser diferenciada na radiografia como sendo pontos mais escuros que a matriz, definido como pequenos vazios globulares que podem variar em tamanho e concentração. A classificação das porosidades pode ser superficial ou interna à peça (STRABEL, 2002; ASTM E 155, 2005).

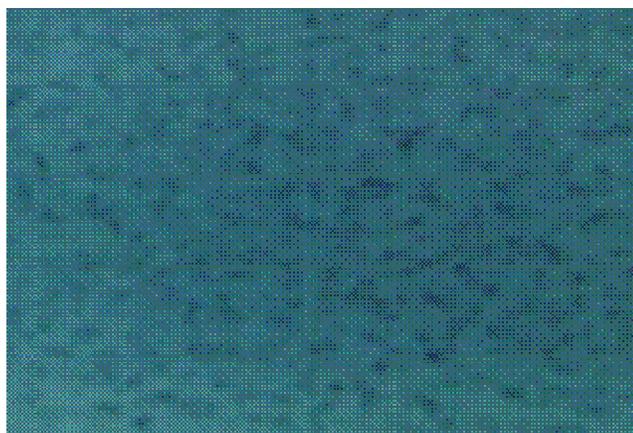


Figura 3 - Radiografia de porosidades em alumínio fundido (ASTM E 155, 2005)

### 2.1.2.2 Caracterização das bolhas de gás nas radiografias

A Figura 4 mostra a existência de bolhas de gás que é uma descontinuidade mais grave que as porosidades. Na radiografia, a bolha de gás aparece mais escura que a porosidade, assemelhando-se a um buraco em que a forma é determinada pela tendência do gás subir à superfície da peça durante a solidificação do metal devido às diferenças de densidade. Ocorre quando o metal fundido extremamente quente é depositado em um molde contendo umidade ou outras impurezas, provoca no metal mudança rápida de estado, vaporizando-se e desenvolvendo uma série de vazios lineares que se propagam no metal (STRABEL, 2002; ASTM E 155, 2005).

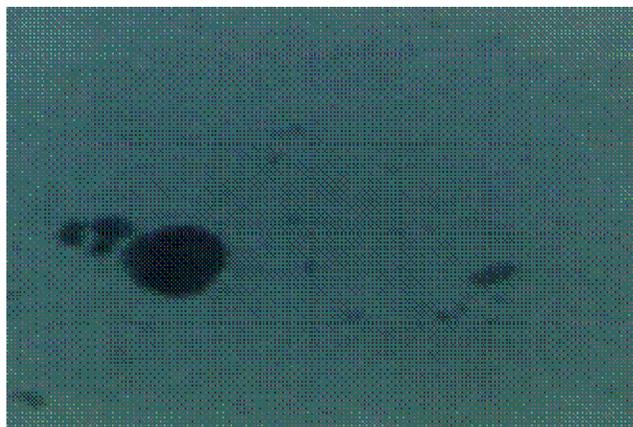


Figura 4 - Radiografia de bolhas de gás em alumínio fundido (ASTM E 155, 2005)

### 2.1.2.3 Caracterização das inclusões não metálicas nas radiografias

A Figura 5 mostra a existência das inclusões não metálicas de partículas de areia que se soltaram do molde. Nas radiografias, elas lembram uma bolsa de areia com um aspecto granulado mais escuro quando observado cuidadosamente (STRABEL, 2002; ASTM E 155, 2005).



Figura 5 - Radiografia de inclusões não metálicas em alumínio fundido (ASTM E 155, 2005)

#### 2.1.2.4 Caracterização das inclusões metálicas nas radiografias

A Figura 6 mostra a existência de uma impureza introduzida no molde com o metal derretido que pode ser resultado de oxidação ou partículas que não subiram à superfície antes da solidificação. Nas radiografias, elas são mais claras que a matriz, devido a sua maior massa específica (STRABEL, 2002; ASTM E 155, 2005).



Figura 6 - Radiografia de inclusões metálicas em alumínio fundido (ASTM E 155, 2005)

#### 2.1.2.5 Caracterização de segregação em peças fundidas

A Figura 7 mostra a morfologia das segregações com uma diferenciação localizada e centralizada da composição geral do material da peça fundida.

Certas ligas metálicas, assim como o cobre, apresentam, com uma maior frequência, segregações devido à diferença de temperatura de solidificação dos componentes da liga.

A segregação aparece nas radiografias de forma centralizada como áreas manchadas de maior ou menor densidade, dependendo do material segregado.

A segregação detectável radiograficamente é uma preocupação da engenharia dependendo da severidade do local e da utilização da peça (STRABEL, 2002; MATAREZI, MOISÉS, 2006).

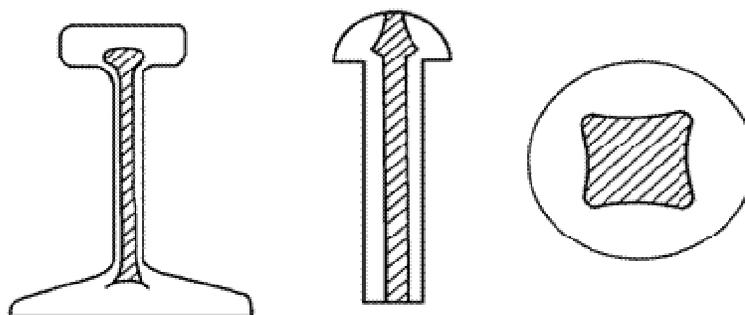


Figura 7 – Segregação em um material ferro fundido nodular (MATAREZI, MOISÉS, 2006)

#### 2.1.2.6 Caracterização de rechupes (externos) ou vazios (internos) nas radiografias

A Figura 8 mostra a existência de vários rechupes, oriundos do metal derretido, que foram criados devido à redução do seu volume ao solidificar internamente no molde e que continua a se contrair quando resfriado muito abaixo do ponto de fusão.

Os rechupes são vazios que ocorrem quando não há metal líquido o suficiente para compensar a redução de volume do metal ao se solidificar.

Existem várias formas de rechupes, podendo ser superficiais ou internos à peça e nas radiografias aparecem como grandes vazios irregulares ou como ramificações ásperas que podem ser confundidas com trincas ou gotas quentes (STRABEL, 2002; ASTM E 155, 2005).



Figura 8 – Radiografia de rechupes em alumínio fundido (ASTM E 155, 2005)

### 2.1.2.7 Microcavidades de contração em peça fundida

A Figura 9 mostra uma peça que contém macrocavidades e microcavidades de contração ou microrrechupes que são pequenos vazios de aparência esponjosos. Os pequenos vazios formados são de difícil detectabilidade a olho nu e também nas radiografias, ocorrendo em muitos tipos de ligas metálicas e materiais sinterizados (STRABEL, 2002; MATAREZI, MOISÉS, 2006).

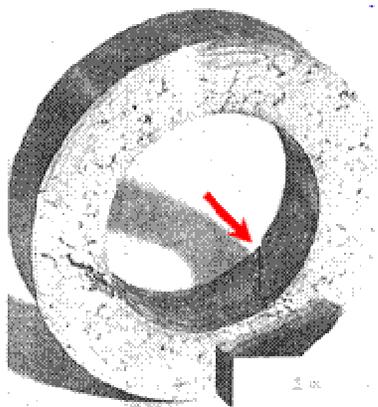


Figura 9 - Concavidade de contração em peça de ferro fundido nodular (MATAREZI, MOISÉS, 2006)

### 2.1.2.8 Caracterização de gota quente (*hot tear*) nas radiografias

A Figura 10 mostra a existência de gotas quentes que são fissuras que ocorrem antes de contemplar a solidificação do metal. Elas são geralmente causadas devido aos respingos de metal ocorridos durante o enchimento do molde e por tensões resultantes da desigualdade de resfriamento de um grande volume de metal adjacente a um menor volume de metal. Geralmente, são abertas à superfície com bordas arredondadas.

Radiograficamente, as gotas quentes aparecem como indicações lineares e algumas vezes ramificadas (STRABEL, 2002; ASTM E 192, 2004).

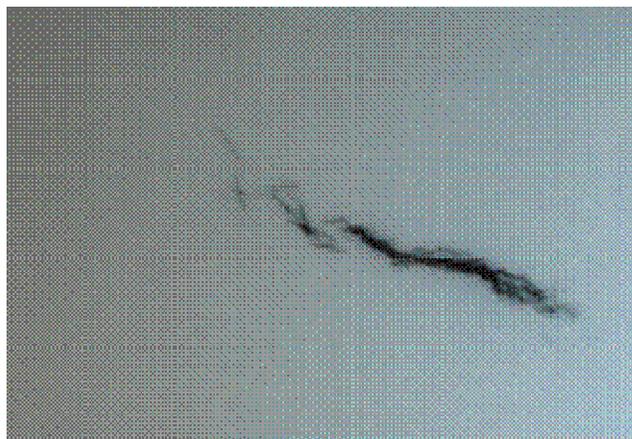


Figura 10 – Radiografia de gota quente em alumínio fundido (ASTM E 192, 2004)

#### **2.1.2.9 Caracterização de gota fria (*cold shut*) nas radiografias**

A Figura 11 mostra a existência de gotas frias causadas por uma falta de fusão entre as porções adjacentes do metal fundido.

Elas podem também ser causadas pelo excesso de oxidação de uma ou mais porções do metal fundido, por uma baixa temperatura e/ou por presença de escórias ou impurezas entre as porções adjacentes do metal líquido. Nas radiografias, elas aparecem normalmente como linhas retas ou curvas (STRABEL, 2002; ASTM E 192, 2004).

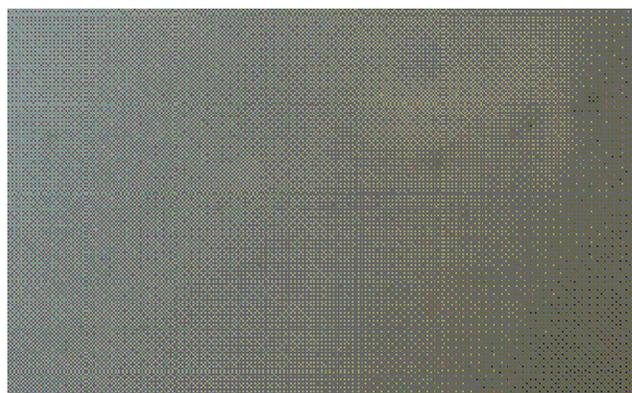


Figura 11 – Gota fria em um material ferro fundido nodular (ASTM E 192, 2004)

### 2.1.2.10 Alimentação insuficiente em peça fundida

A Figura 12 mostra uma peça em que houve uma falha de preenchimento do molde pelo metal derretido devido à presença de gases presos no interior ou por insuficiência de metal derretido devido a estrangulamento no canal de alimentação. É de fácil detecção nas radiografias, e quando está aberta à superfície pode ser observada visualmente (STRABEL, 2002; MATAREZI, MOISÉS, 2006).

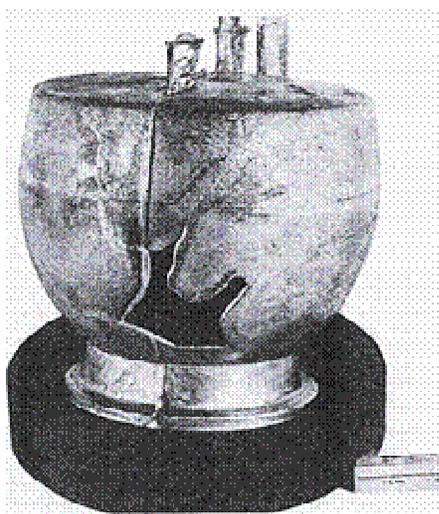


Figura 12 – Alimentação insuficiente em uma peça de ferro fundido nodular (MATAREZI, MOISÉS, 2006)

### 2.1.3 Interpretação dos resultados das radiografias

A interpretação dos resultados das radiografias para ser significativa deve ser feita com o total conhecimento do material, dimensões e configuração da peça, técnica de radiografia utilizada, técnica de processamento utilizado, nível de aceitabilidade e quaisquer outras informações desejadas para o ensaio radiográfico.

O julgamento deve ser baseado no total conhecimento da técnica utilizada e da peça em questão, juntamente com extensa interpretação radiográfica, experiência e treinamento (STRABEL, 2002).

As descontinuidades são quaisquer variações na homogeneidade de uma peça ou material, tanto na sua estrutura como em sua forma.

As normas passarão a definir os critérios de aceitabilidade mediante a análise da influência que a descontinuidade terá sobre a utilização do material ou do equipamento.

As descontinuidades podem ser atribuídas a diferentes causas e podem ocorrer durante o próprio processo de fabricação do material como, por exemplo, durante a fundição, solidificação, etc, ou durante o uso de equipamento em serviço como, por exemplo, durante a aplicação de esforços mecânicos ou a corrosão (ANDREUCCI, 2008).

## **2.2 Ensaio radiográficos**

Os ensaios radiográficos estão inseridos em ensaios não destrutivos, que ao serem realizados sobre peças semiacabadas e acabadas não as prejudicam nem interferem em seu uso futuro (VILHENA, 2000).

Tem como vantagens em relação aos outros ensaios não destrutivos ser o único método que apresenta registro permanente por meio de filme ou de imagem digital de fácil compressão, facilitando a situação de análise, laudo e documentação. A fluoroscopia industrial tem grande vantagem de visualizar as descontinuidade, em tempo real, se a peça for manipulada dentro do feixe de radiação.

Tem como desvantagem a limitação na detecção de descontinuidade planares (trincas), que são as mais graves em termos de afetar a integridade dos materiais.

É um ensaio com potencial nocivo à saúde, aos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE's) e o Público em geral; exige cuidados de radioproteção que incluem o isolamento da área.

Para a execução do serviço deve-se seguir e aplicar as normas nucleares de proteção radiológica, inclusive com a presença de instrumentos de medição de radiação calibrados conforme Norma Nuclear (BASTOS, ALVES, BUENO, 2008).

Os profissionais devem conhecer dominar e utilizar as normas nucleares (NN's), que em primeira instância regem os preceitos de segurança de radioproteção.

### 2.2.1 Normas nucleares para instalações radioativas industriais

Os princípios de radioproteção e segurança em que a norma está baseada são aqueles estabelecidos pela ICRP (International Commission on Radiological Protection) e pelo INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group).

A prática deve ser justificada;

A proteção e a segurança devem ser otimizadas;

As doses individuais causadas por todas as práticas relevantes não devem exceder limites de dose especificados (CNEN NN 3.01, 2005).

Os serviços de radioproteção devem ter todas as atividades realizadas em instalações radioativas fechadas e as atividades precisam ser desenvolvidas por técnicos credenciados pela CNEN, segundo item 5, sub. item 5.1 e 5.2, que diz respeito à qualificação de pessoal (CNEN- NE-3.02, 1988).

O licenciamento de instalações radioativas deve ter instalações radioativas aprovadas pela CNEN para realizar os ensaios radiográficos (CNEN-NE-6.02, 1998).

### 2.3 Equipamentos de raios X

Os raios X destinados ao uso industrial e médico são gerados numa ampola de vidro, denominada tubo de Coolidge, que possui duas partes distintas: **o ânodo e o cátodo**, conforme mostra a Figura 13, estes quando são submetidos a uma tensão elétrica da ordem de milhares de volts, sendo o polo positivo ligado ao ânodo e o negativo ao cátodo. O ânodo é constituído de uma pequena parte fabricada em tungstênio, também denominada de alvo, e o cátodo de um pequeno filamento, tal qual uma lâmpada incandescente, por onde passa uma corrente elétrica da ordem de miliamperes.

Quando o tubo é ligado, a corrente elétrica do filamento se aquece e passa a emitir espontaneamente elétrons que são atraídos e acelerados em direção ao alvo. Nessa interação dos elétrons com os átomos de tungstênio, ocorre a desaceleração repentina dos elétrons, transformando a energia cinética adquirida em calor e em raios X, como mostra a Figura 13 (ANDREUCCI, 2007b).

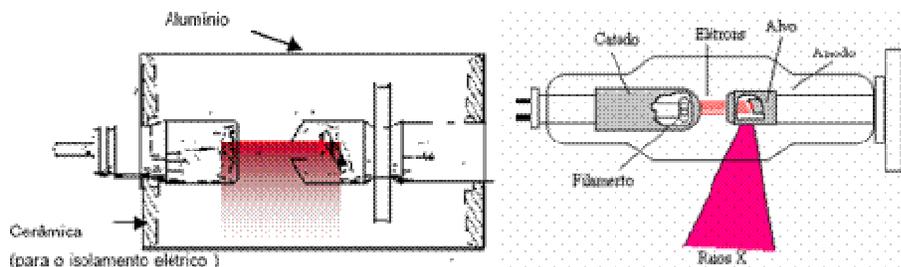


Figura 13 - Ampola de vidro com os componentes (ANDREUCCI, 2007b)

Os equipamentos de raios X industriais se dividem geralmente em dois componentes: o painel de controle e o cabeçote, ou unidade geradora. O painel de controle consiste em uma caixa na qual estão alojados todos os controles, indicadores, chaves e medidores, além de conter todo o equipamento do circuito gerador de alta tensão. É por meio do painel de controle que se fazem os ajustes de voltagem e amperagem, além de comando de acionamento do aparelho.

A voltagem se refere à diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo e é expressa em quilovolts (kV). A amperagem se refere à corrente do tubo e é expressa em miliampères (mA) (ANDREUCCI, 2007b).

A Figura 14 mostra o diagrama de bloco contendo as partes do equipamento de raios X de 320 kV, contendo duas unidades geradoras de alta tensão, um circuito de refrigeração de óleo, um tubo de emissão de raios X à esquerda da blindagem e à direita, a unidade de controle (MINARI, et. al. 2008a).

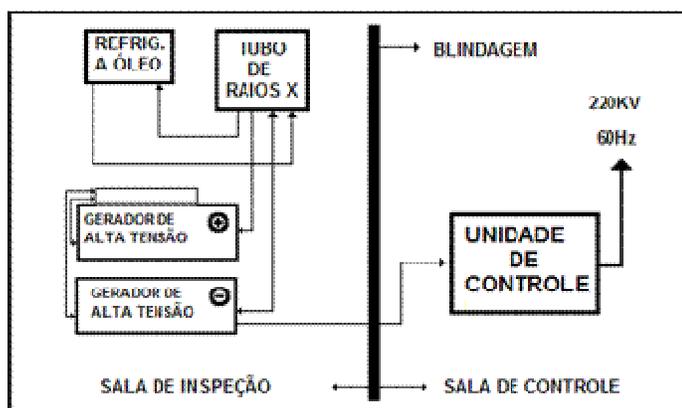


Figura 14 - Diagrama de bloco de um equipamento de raios X (MINARI, et. al. 2008a)

## 2.4 Sistemas de captação de imagem

Os mais utilizados sistemas de captação de imagem industriais são a radiografia convencional, a radiografia computadorizada, a radiografia digital e as fluoroscopias analógica e digital (ANDREUCCI, 2007b).

### 2.4.1 Radiografia convencional

Com a descoberta dos raios X pelo físico W. C. Roentgen em 1895, imediatamente se iniciam os estudos sobre as emissões de partículas, provenientes de corpos radioativos, observando suas propriedades e interpretando seus resultados.

Nessa época, destacaram-se dois cientistas, Pierre e Marie Curie, pela descoberta do polônio e do radium, e ainda se deve a eles a denominação “Radioatividade” (propriedade de emissão de radiações por diversas substâncias).

No começo do século XX, em 1903, Rutherford, após profundos estudos, formulou a hipótese sobre as emissões radioativas. Convém frisar que, naquela época, ainda não se conhecia o átomo e os núcleos atômicos e coube a este cientista a formulação do primeiro modelo atômico criado, o qual permanece até hoje (ANDREUCCI, 2007b).

A Figura 15 mostra a radiografia da mão da esposa de Roentgen.



Figura 15 - Radiografia da mão da esposa de Roentgen (ANDREUCCI, 2007b)

O ensaio radiográfico caracteriza-se por um método de ensaio não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades que se encontrem na massa dos

materiais e das variações de uma região de determinado material que apresente uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha (KODAK, 1980).

Quando se deseja inspecionar peças com a finalidade de investigar defeitos internos, a radiografia é um poderoso método que pode detectar com alta sensibilidade descontinuidades com poucos milímetros de extensão. É usada principalmente nas indústrias de petróleo, petroquímica, nuclear, alimentícia, farmacêutica, geração de energia, inspeção principalmente de soldas e fundidos, e ainda na indústria bélica para inspeção de explosivos, armamento e mísseis. A radiografia desempenha papel importante na comprovação da qualidade da peça ou componente em conformidade com os requisitos das normas, especificações e códigos de fabricação. Usada também na qualificação de soldadores e operadores de soldagem, a radiografia proporciona registro importante para a documentação da qualidade.

Em juntas soldadas, a radiografia é um método frequentemente referenciado pelos códigos de fabricação de peças ou estruturas de responsabilidade para determinação da eficiência da base de cálculo pela engenharia.

No Brasil, o mais importante sistema de certificação de pessoal é o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal em END (SNQC/END), gerenciado pela Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção (ABENDE), com reconhecimento do Inmetro. As certificações de pessoal são dirigidas a segmentos industriais, tais como Siderurgia, Aeronáutica, Caldeiraria, Petróleo e Petroquímica e outros (ANDREUCCI, 2003).

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma mesma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada de radiação poderá ser detectada por meio de um filme, ou de um tubo de imagem ou medida por detectores eletrônicos de radiação. Essa variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um meio, irá indicar, entre outras coisas, a existência de um defeito interno em determinado material,. Na Figura 16, pode-se observar um esquema ilustrativo de uma peça com uma descontinuidade que, certamente, poderá causar uma maior sensibilidade no filme devido à maior quantidade de radiação recebida (ANDREUCCI, 2003).

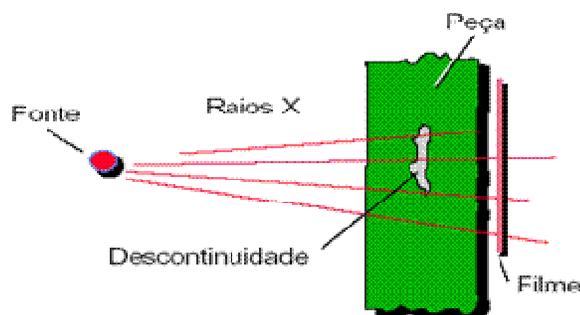


Figura 16 - Esquema do fundamento da radiografia (ANDREUCCI, 2003; KODAK, 1980)

#### 2.4.1.1 Filmes radiográficos

A Figura 17 mostra um filme para radiografia industrial que consiste de uma emulsão (gelatina) contendo um composto de prata fotossensível (brometo de prata) sobre uma base azul flexível e transparente. Normalmente, a emulsão cobre os dois lados da base em camadas de aproximadamente 0,0127 mm de espessura. A aplicação da emulsão fotossensível em ambos os lados dobra a quantidade de prata, aumentando, desse modo, a velocidade do filme. Ao mesmo tempo, a camada de emulsão fina proporciona uma revelação, fixação e secagem em um tempo razoável (KODAK, 1980).

A imagem de uma peça é registrada por meio do uso de filmes radiográficos, no qual a informação é revelada como uma variação da quantidade de depósito de prata ao longo do filme, produzindo um registro permanente – a radiografia.

A camada fotossensível é unida à película de acetato por uma fina camada de adesivo, sendo também protegida por uma camada de gelatina dura (HALMSHAW, 1995).

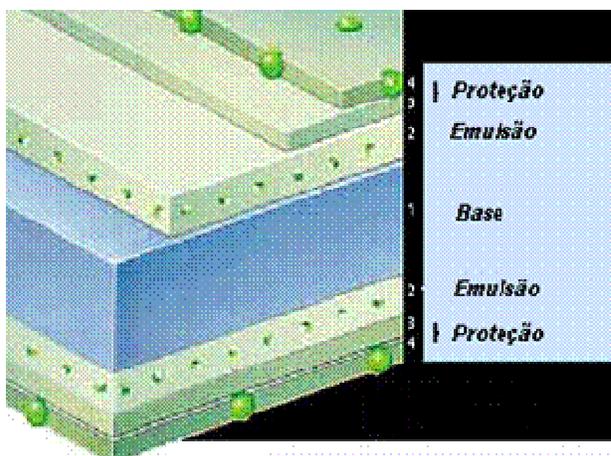


Figura 17 - Filme radiográfico (GE, 2006)

Quando os raios X, raios  $\gamma$ , ou luz atingem os grãos de prata da camada fotossensível, uma mudança acontece na estrutura física dos grãos. Essa transformação é de tal natureza que a imagem não pode ser detectada por métodos físicos triviais. A quantidade de prata da camada fotossensível transformada é determinada em função do maior ou menor grau de exposição à radiação. Quando o filme exposto é tratado com uma solução química (revelador), uma reação acontece causando a transformação da prata iônica para a prata metálica negra. A prata contida na gelatina em ambos os lados da base é que forma a imagem radiográfica. Uma imagem pode ser formada pela luz ou por outras formas de radiação, como por exemplo os raios X ou os raios  $\gamma$ . A emulsão é específica para cada tipo de aplicação. A emulsão utilizada para a fabricação de filmes radiográficos é diferente da emulsão utilizada para a fabricação de filmes fotográficos (KODAK, 1980).

A Figura 18 mostra a seção transversal de um filme para radiografia industrial com emulsão não exposta e a Figura 19 mostra a seção transversal de um filme para radiografia industrial exposto e revelado. As figuras mostram a distribuição dos grãos (emulsão exposta para se obter uma densidade radiográfica moderada) (KODAK, 1980).

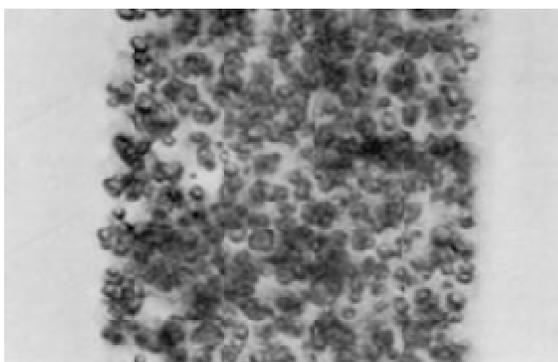


Figura 18 - Emulsão não exposta (KODAK, 1980)

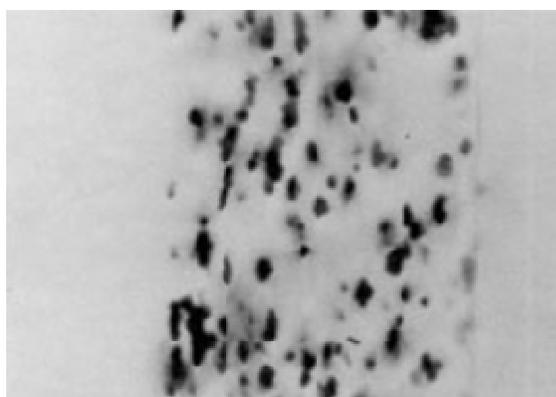


Figura 19 - Emulsão exposta e revelada (KODAK, 1980)

Desde o início da utilização dos filmes radiográficos, as mais importantes inovações foram o desenvolvimento dos filmes emulsionados por ambos os lados, a utilização das telas intensificadoras e os chassis flexíveis que são embalados a vácuo. A qualidade dos filmes foi melhorada ao longo dos anos, mas com características diferentes para o campo da medicina e para o campo industrial. Os filmes para a área médica são otimizados para baixa dose no paciente e no meio ambiente, mas com qualidade de imagem suficiente. Existem filmes médicos especiais, que proporcionam uma alta qualidade de imagem (filmes para mamografia). Os filmes para a área industrial proporcionam uma qualidade de imagem excelente, mas precisam de uma taxa de dose que variam de 10 a 100 vezes dos filmes da área médica.

Os filmes para a área industrial são expostos para uma faixa de densidade óptica (D) entre 2,0 e 4,0, que é o dobro do valor típico para aplicações médicas. Objetos sob exame dos ensaios não destrutivos, como, por exemplo, os fundidos e soldas, exigem uma boa

visualização das trincas e de variação de espessura de parede, portanto leva para maiores exigências de nitidez e de contraste de imagem (EWERT, ZSCHERPEL, BAVENDIEK, 2004; REBELLO, 2008).

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

Quanto à classificação dos filmes, pode-se dizer que a grande variedade de condições e a heterogeneidade de materiais encontrados na radiografia industrial levaram os fabricantes a produzir vários tipos de filmes. Uma classificação dos filmes foi estabelecida pela ASTM, que identifica os tipos de filmes pela velocidade de exposição e sensibilidade. Os mais empregados na área industrial são os da Classe 1 e 2 por possuírem características de sensibilidade, velocidade e resistência adequadas (ASTM E-1815, 2006; MOREIRA, 2007).

A curva característica de um filme, também chamada de curva sensitométrica ou curva H & D (Hurter-Driffield), relaciona a exposição dada a um filme com a densidade resultante. Por meio das curvas características, podem-se comparar qualitativamente filmes diferentes, estabelecendo critérios para corrigir densidades obtidas para uma dada exposição, conforme apresentado na Figura 20. As curvas são em geral fornecidas pelo fabricante do filme e são obtidas mediante as exposições sucessivas do filme, tendo suas densidades medidas em cada exposição. Os valores são plotados em um gráfico de densidades em função do logaritmo da exposição relativa (KODAK, 1980).

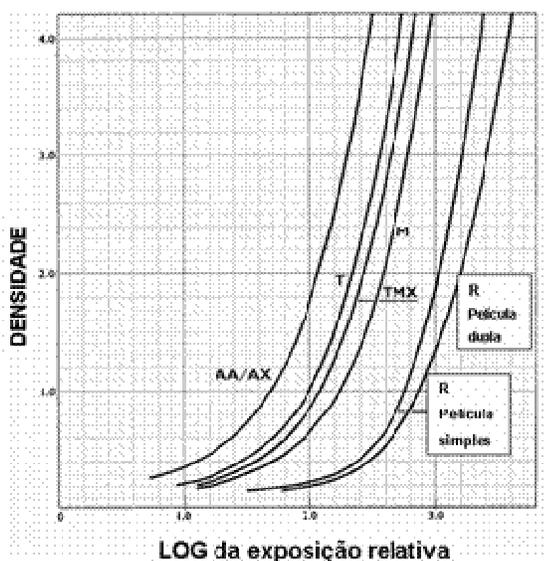


Figura 20 - Curva característica de filmes radiográficos (KODAK, 1980)

Quanto ao contraste para que se forme uma imagem no filme, é necessário que ocorram variações na densidade ao longo dele, pois uma imagem é formada a partir de áreas claras e escuras. A diferença de densidades entre duas regiões adjacentes no filme é denominada contraste. O contraste pode também ser entendido como a capacidade de o filme detectar intensidade e energias diferentes de radiação. Imagens com alto contraste permitem em geral melhor qualidade e segurança na interpretação da radiografia (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

Normalmente, em toda radiografia é possível notar mudanças de densidades de uma área a outra, e isso não se faz de maneira brusca. A imagem de um objeto apresenta uma região de transição nas suas bordas, com uma densidade intermediária entre a densidade da imagem e a de fundo. Quanto mais estreita for essa faixa de transição, melhor será a definição dessa imagem (ANDREUCCI, 2005).

### 2.4.1.2 Processamento do filmes radiográficos

Processar um filme significa obter por meios químicos uma imagem visível e permanente no filme que foi submetido à ação da radiação.

O processamento dos filmes e dos banhos deve seguir algumas considerações necessárias ao bom desempenho dessa tarefa. No manuseio do filme, a limpeza é essencial. A câmara escura, os acessórios e equipamentos devem ser mantidos rigorosamente limpos e usados somente para o propósito aos quais eles se destinam. Os banhos de processamento e a revelação devem ser controlados quanto à temperatura e tempo de duração de acordo com a recomendação do fabricante e podem ser processados manualmente ou em processadoras automáticas (MOISÉS, MATAREZI, 2001).

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

#### a1) Revelação

Quando um filme exposto é imerso no tanque contendo o revelador, essa solução age sobre os cristais de brometo de prata expostos, reduzindo a prata iônica e levando-a para o estado metálico produzindo a imagem no filme. Devido a fatores eletroquímicos, as moléculas dos agentes reveladores atingem os cristais que ficam como que revestidos. A visibilidade da imagem, o contraste, a densidade de fundo e a definição dependem do tipo de revelador usado, do tempo de revelação e da temperatura do revelador. Dessa forma, o controle temperatura é de fundamental importância para se obter uma radiografia de boa qualidade. A revelação deve ser feita com agitação permanente do filme no revelador, a fim de que se obtenha uma distribuição homogênea do líquido em ambos os lados da emulsão, evitando-se a sedimentação do brometo e outros sais que podem provocar manchas susceptíveis podendo mascarar possíveis discontinuidades (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

#### a2) Banho de parada

Quando o filme é removido da solução de revelação, uma parte do revelador fica em contato com ambas as faces do filme, fazendo com que a reação de revelação continue. O

banho interruptor tem, então, a função de interromper essa reação a partir da remoção do revelador residual (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

### a3) Fixação

Após o banho de parada, o filme é colocado em um terceiro tanque, que contém uma solução chamada de “fixador”. A função da fixação é remover o brometo de prata das porções não expostas do filme, sem afetar as que foram expostas à radiação. O fixador tem também a função de endurecer a emulsão gelatinosa, permitindo a secagem ao ar aquecido. O tempo de fixação normalmente não deve exceder a 15 minutos. Os filmes devem ser agitados quando colocados no fixador durante pelo menos 2 minutos, para garantir uma ação uniforme desse produto. O fixador deve ser mantido a uma temperatura igual ao do revelador, ou seja, cerca de 20°C (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

### a4) Lavagem dos filmes

Após a fixação, os filmes seguem para o processo de lavagem em água corrente para remover o fixador da emulsão. O tanque de lavagem deve ser suficientemente grande para conter os filmes que passam pelo processo de revelação e fixação sendo que se deve prover uma vazão de água de maneira que o volume do tanque seja de 4 a 8 vezes renovado a cada hora. Cada filme deverá ser lavado por um período de aproximadamente 30 minutos. Quando se emergem as colgaduras carregadas no banho de lavagem, deve ser adotado o seguinte procedimento: as colgaduras devem ser colocadas próximas ao dreno de saída (água mais suja) e a sua posição ser mudada durante o tempo de lavagem de maneira que se termine o banho o mais próximo possível da região de entrada da água, onde se encontra mais limpa.

A temperatura da água no tanque de lavagem é um fator muito importante. Os melhores resultados são obtidos com temperaturas por volta de 20 graus centígrados. Se ela tiver altos valores, pode causar efeitos danosos ao filme, assim como valores baixos poderão reduzir a eficiência.

Além das etapas acima relacionadas, é aconselhável, após a lavagem, passar os filmes durante mais ou menos 30 minutos por um quinto banho que tem a finalidade de quebrar a

tensão superficial da água, facilitando assim a secagem e evitando que pequenas gotas de água fiquem presas à emulsão, o que iria acarretar manchas nos filmes depois de secos.

Antes de o filme ser colocado no secador, devem-se dependurar as colgaduras em um escorredor por cerca de 2 a 3 minutos (ANDREUCCI, 2005).

#### a5) Secagem dos filmes

A secagem deve ser feita em cabines especiais, com circulação de ar quente, seco e livre de impurezas. O filme só poderá ser manuseado após estar perfeitamente seco.

Para garantir boas condições de processamento, recomenda-se, sempre que possível, o uso de instalações padronizadas (câmaras escuras) com equipamentos de revelação (tanques) iluminação (filtros) e equipamentos adicionais apropriados (MOISÉS, MATAREZI, 2001).

#### a6) Manuseio de filmes

Toda câmara escura deve ser dividida em duas partes: a parte seca, na qual se realiza o manuseio do filme virgem, preparo e corte, e a parte úmida, na qual se faz a revelação, fixação e lavagem dos filmes. Essa divisão é muito importante para que os filmes não apresentem manchas.

A câmara escura deve possuir uma ou mais luzes de segurança, com os filtros apropriados que devem ser colocados obedecendo às recomendações dos fabricantes de filmes e das normas específicas.

Os tanques com produtos químicos (revelador e fixador) devem necessariamente estar separados para que não haja contaminação de um produto sobre o outro, uma vez que o revelador é uma substância química básica e o fixador um ácido (MOISÉS, MATAREZI, 2001).

### 2.4.1.3 Definição Radiométrica

#### a1) Telas intensificadoras (*Ecrans*)

As telas intensificadoras (*Ecrans*) têm como principal finalidade diminuir o tempo de exposição em ensaios radiográficos industriais. Nesses casos, usam-se finas folhas de metal (geralmente chumbo) como intensificadoras da radiação primária emitida pela fonte. O fator de intensificação, além de ser função da natureza e da espessura da tela, depende do contato efetivo entre as telas intensificadoras e o filme. Quando se aumenta a espessura da tela de chumbo, a radiação primária e os elétrons emitidos pela face oposta dessa tela sofrem atenuação e, como consequência, o fator de intensificação diminui. O grau de intensificação das telas de chumbo depende da natureza e da espessura do material a ensaiar, da qualidade da fonte emissora de radiação e do tipo de filme usado (KODAK, 1980).

Essas telas nem sempre são fabricadas com chumbo comercialmente puro. Existem também telas fabricadas de ligas de chumbo com antimônio. As telas são sempre utilizadas em pares, uma na parte anterior do filme e a outra na parte posterior. A tela frontal deve necessariamente ser mais fina que a posterior, para que não reduza significativamente a intensidade da radiação principal. A espessura da tela frontal depende da energia da radiação utilizada.

A tela posterior deve ser mais espessa, para absorver as radiações secundárias, desordenadas e em todas as direções, provenientes do “espalhamento” provocado por objetos próximos posicionados atrás da peça por radiografar.

Não é recomendável o emprego de telas de chumbo para tensões inferiores a 120KV, já que, nesse caso, a tela tenderia a absorver a maior parte da radiação principal.

A maior parte da ação intensificadora das telas de chumbo é resultante da emissão de elétrons deslocados pela radiação principal.

Visto que os elétrons são facilmente absorvidos por qualquer material, a superfície da tela e a do filme em contato com ela devem estar completamente livres de qualquer material estranho (VILHAÇA, et. al.,1999).

## a2) Penumbra

Para avaliar a penumbra, supondo o diâmetro da fonte emissora de radiação com dimensão  $F$  deve ser a menor possível e pode, para efeitos didáticos, ser considerada um ponto. Nesse caso, colocando-se um objeto entre o foco puntiforme e um filme radiográfico ter-se-á uma imagem muito nítida, conforme apresentado na Figura 21a. Se for aumentada a dimensão do foco para o valor  $F$ , mantendo-se a distância da fonte ao objeto, obter-se-á uma imagem no filme com uma zona de penumbra, reduzindo a nitidez (definição) da imagem, conforme é apresentado na Figura 21b. Se for mantida a dimensão do foco para o valor  $F$  e reduzida a distância da fonte ao objeto, obter-se-á uma imagem no filme com uma zona de penumbra muito maior, e a nitidez da imagem será perdida, conforme é apresentado na Figura 21c. A ampliação está relacionada com fatores geométricos e com a nitidez, e a definição é função da fonte emissora de radiação e da posição do material situado entre a fonte e o filme. Quando a fonte possui diâmetro considerável ou está muito próxima do material, a imagem não é bem definida e sua forma poderá ser diferente da real se o ângulo do plano do material variar em relação aos raios incidentes, produzindo, nesse caso, uma distorção da imagem (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

Para obtenção de imagens bem definidas ou próximas ao tamanho do objeto, devem-se utilizar as menores dimensões de fonte de radiação possíveis, as quais devem estar posicionadas o mais afastado possível do material a ensaiar. O filme radiográfico deve estar mais próximo possível do material, o feixe de radiação deve estar o mais perpendicular possível em relação ao filme e o filme/peça deve estar paralelo, como mostra a Figura 21. A distorção da imagem não pode ser totalmente eliminada em virtude dos formatos complicados das peças e dos ângulos de que se dispõe para a realização do ensaio radiográfico (ANDREUCCI, 2005; KODAK, 1980).

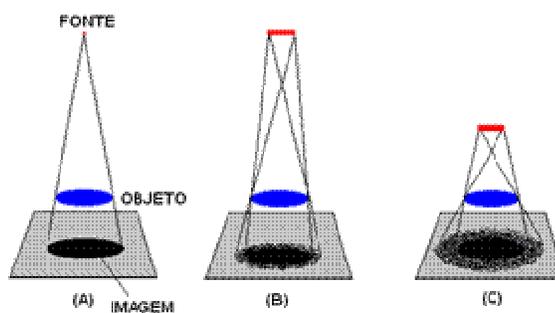


Figura 21 - Disposição geométrica entre fonte-filme-objeto (KODAK, 1980)

### a3) Indicador de qualidade de imagem (IQI)

Para que se possa julgar a qualidade da imagem de uma radiografia, são empregadas pequenas peças chamadas Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), que são colocadas sobre o objeto radiografado. Os IQI's são também chamados de “Penetrâmetros”. O tipo ou norma de fabricação do IQI deve ser aquele exigido no projeto de construção do equipamento a ser radiografado. O IQI é uma pequena peça construída com um material radiograficamente similar ao material da peça ensaiada, com uma forma geometricamente simples e contém algumas variações de forma bem definidas, tais como furos ou entalhes (KODAK, 1980; KODAK, 2007).

Sempre que possível, o IQI deverá ser colocado no lado da peça, voltado para a fonte. Caso isso não seja possível, o IQI poderá ser colocado no lado voltado para o filme, sendo nesse caso acompanhado por uma letra “F”, de material de chumbo. Geralmente, apenas um IQI é usado para cada radiografia se variações de espessura provocarem uma variação de - 15 % ou + 30% da densidade vista através do corpo do IQI tipo furos, à área de interesse de uma radiografia, conforme recomenda a ASME (ASME V, 2007).

O tipo ou norma de fabricação do IQI deve ser aquela que o projeto de construção do equipamento a ser radiografado requer ou mesmo especificações contratuais. Na Figura 22, é visualizado o IQI's tipo furo de acordo com a norma ASTM E-1742 (2005).

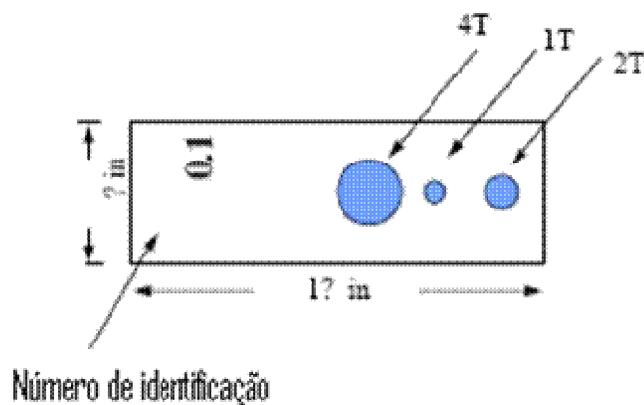


Figura 22 - IQI tipo furos da norma (ASTM E-1742, 2005)

O IQI é fabricado no formato retangular, contendo 3 furos com diâmetro T, 2T e 4T, em que T é a espessura do mesmo. Normalmente, a qualidade especificada em uma

radiografia de rotina é 2-2T. Essa indicação mostra a possibilidade de visualização de 1/50 (2% por cento) da espessura do material radiografado (KODAK, 2007).

O IQI é selecionado de acordo com a espessura da peça a ser inspecionada e a partir de tabelas que indicam qual o furo a ser observado na radiografia. A imagem é tida como adequada quando o furo designado pela norma aplicável for visualizado na imagem radiográfica. Caso isso não ocorra, a radiografia deve ser rejeitada e repetida novamente.

Outro fator que está associado à qualidade da imagem é o grau de escurecimento da imagem, que é denominado densidade óptica. Esse parâmetro deve ser medido e comparado com os critérios estabelecidos por normas ou códigos (ANDEUCCI, 2007a).

#### a4) Técnicas de exposição

A técnica de parede simples - vista simples (PS-VS) - é assim chamada, 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. Essa é a principal técnica utilizada na inspeção radiográfica, e a mais fácil de ser interpretada, como mostra a Figura 23 (ANDREUCCI, 2005).

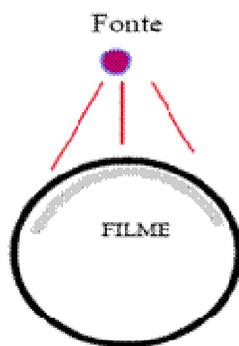


Figura 23 - Técnica de exposição parede simples - vista simples (ANDREUCCI, 2005)

A técnica de parede dupla - vista simples (PD-VS) - é assim chamada, pois o feixe de radiação, proveniente da fonte, atravessa duas espessuras da peça, entretanto projeta no filme somente a seção da peça que está mais próxima a ele. Frequentemente essa técnica é utilizada em inspeções de juntas soldadas, as quais não possuem acesso interno, por exemplo, tubulações com diâmetros maiores que 3½ polegadas, vasos fechados e outros. É importante lembrar que essa técnica requer que a radiação atravesse duas espessuras da peça e, portanto,

o tempo de exposição será maior que a inspeção pela técnica de parede simples. Assim, essa opção deverá ser selecionada quando outra técnica não for possível ou permitida, como mostra a Figura 24 (ANDREUCCI, 2005).

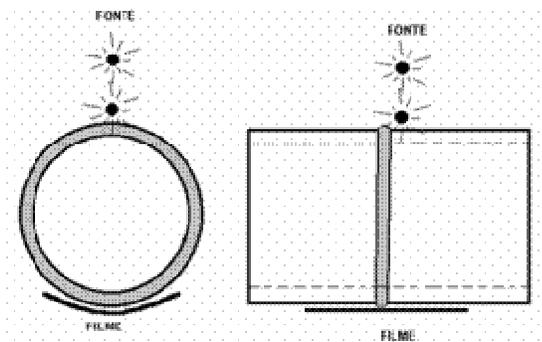


Figura 24 - Técnica de exposição parede dupla - vista simples (ANDREUCCI, 2005)

A técnica de parede dupla - vista dupla (PD-VD) - é assim chamada, pois a radiação atravessa as duas paredes e proporciona, para efeito de análise, a imagem em ambas as paredes como mostra a Figura 25 (CASTRO, GODWIN NETO, 2022).

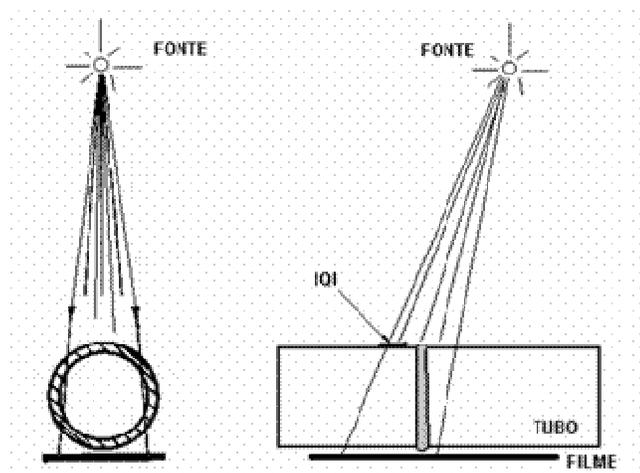


Figura 25 - Técnica utilizada para verificação de radiografias PD-VD (CASTRO, GODWIN NETO, 2022)

## 2.4.2 Radiografia computadorizada

A radiologia digital médica apresenta uma série de vantagens em relação às imagens convencionais, tais como: maior sensibilidade, melhor resolução espacial, redução do índice

de repetições dos exames, possibilidade de modificar o contraste e brilho da imagem de modo a obter uma melhor qualidade necessária para o diagnóstico.

Após seu desenvolvimento para a área médica, os detectores começaram a ser utilizados na área industrial em materiais com suas diversas formas e características diferentes. Essa tecnologia foi desenvolvida para aplicações médicas, entretanto existem alguns riscos. Seu ponto mais fraco é a baixa resolução espacial da maioria dos novos sistemas digitais de detecção em comparação com os filmes industriais.

No Brasil, a inspeção volumétrica de soldas de tubulações é tradicionalmente dominada pelo ensaio radiográfico. Para esse ensaio, são utilizadas fontes de radiação, normalmente Ir192, filmes radiográficos e sua revelação é obtida por meio de processamento químico.

Dentre os sistemas digitais existentes para a área industrial, destacam-se os sistemas com placas de imagem (*Imaging Plate Systems*). Esses sistemas consistem do sensor de radiação e armazenamento da imagem, formado pelas placas de fósforo e escâner que converte as informações contidas na placa de fósforo em imagem digital. A radiação quando incide nas placas irá produzir a excitação dos cristais, formando a imagem latente. Quando expostos a um feixe de laser, os cristais liberam a energia armazenada sob a forma de luz, cuja intensidade é proporcional à radiação recebida. A imagem produzida dependerá dos parâmetros de irradiação, das características dos fósforos que constituem as placas, bem como dos procedimentos de manuseio das placas, das condições ambientais e do tempo decorrido entre a exposição à radiação e ao escaneamento das placas. Essa técnica denomina-se radiografia computadorizada.

As empresas de ensaios não destrutivos que utilizam essa técnica relatam a redução do tempo de exposição de 5% a 25%, em comparação com a exposição dos filmes radiográficos. Entretanto, não é seguro dizer de forma absoluta que esses detectores são melhores do que os filmes. Para cada aplicação, é necessário otimizar as condições de aquisição de maneira a se conseguir imagens com a qualidade requerida (RABELLO, et. al. 2007).

A técnica de radiografia computadorizada foi inicialmente utilizada somente na área médica, mas recentemente vem ganhando espaço também na área industrial. Atualmente, existem algumas empresas especializadas na fabricação de equipamentos e placa de fósforo para utilização específica na área de ensaios não destrutivos. Entretanto, para aplicações industriais, a qualidade da imagem deve ser capaz de avaliar parâmetros, como a resolução espacial e a relação sinal-ruído nessas imagens, de forma a sempre obter uma melhor qualidade na imagem final (OLIVEIRA, 2007).

Devido aos avanços tecnológicos na área de ensaio não destrutivo - END, a radiografia computadorizada surge como uma técnica alternativa aos métodos radiográficos convencionais. Dessa forma, pode-se pensar que o desenvolvimento da radiografia computadorizada (RC), usando o fósforo fotoestimulável, também conhecido como *Image Plate* – IP, tem duas razões. A primeira seria garantir que o novo sistema se adapte bem aos métodos presentes de radiografia convencional e a segunda é desenvolver um sistema que complemente as técnicas atuais e que irá substituir essas técnicas gradativamente.

O sistema de radiografia computadorizada faz uso do *Image Plate*, que é um detector bidimensional, e sua composição é baseada em fósforos de Haletos de Bário Flúor dopado com o elemento Európio (BaFX:Eu<sup>2+</sup>, onde X pode ser Br - Bromo, Cl - Cloro, ou I - Iodo). Esses fósforos são capazes de armazenar energia das radiações ionizantes, através da presença dos F-centros, em que o F centro consiste em um elétron aprisionado em uma vacância de um íon halogênio. A energia é armazenada de modo que possa ser liberada em um processo de excitação secundária. No processo de excitação dos átomos, a energia armazenada é liberada em forma de luz. Essa luz é então capturada por sistemas ópticos e convertida em um sinal elétrico analógico, sendo posteriormente esse sinal convertido em um sinal digital para dar origem à imagem radiográfica.

Devido ao fato da imagem obtida ser uma imagem digital, o sistema de radiografia computadorizada apresenta uma série de vantagens com relação aos sistemas convencionais. Contudo, a principal vantagem advém do fato da possibilidade de manipulação da imagem por sistemas computacionais, permitindo o processamento da imagem. Porém, ainda hoje, os sistemas de radiografia computadorizada, com uso de fósforos fotoestimuláveis, apresentam uma desvantagem com relação aos convencionais, que é o fato de ter uma resolução espacial inferior. Dessa forma, como não existe um sistema ideal, o usuário final deve compreender as limitações de cada sistema e decidir qual deles lhe trará maiores benefícios (OLIVEIRA, et. al. 2007).

A radiografia computadorizada (RC) utilizando placas de fósforo (IP) ou (*filmless radiography*) utiliza basicamente os mesmos recursos para execução da radiografia convencional, porém com a diferença básica de que o filme radiográfico é substituído por outra placa de material sensível à radiação ionizante (placa de fósforo flexível). Essa placa de fósforo contém cristais cujos elétrons se posicionam em órbitas de alta energia após serem estimulados por uma radiação ionizante.

Tais elétrons, instáveis, podem reverter à situação de equilíbrio devido ao princípio da luminescência fotoestimulada que possui certos materiais de absorver energia e liberá-la em forma de luz.

Na radiografia computadorizada (RC) a placa sensível à radiação contém partículas que absorvem a radiação emitida por uma fonte adequada (fonte de raios X ou radiação gama). Essas partículas posteriormente são excitadas por um feixe de laser emitindo luz. A luz emitida fica captada num fotomultiplicador e gera uma imagem digital que é exposta numa tela de computador.

A utilização da técnica traz grandes vantagens:

Possibilidade de reutilização das placas de fósforo;

Menos tempo de exposição (as telas de fósforo são sensibilizadas com até 20 vezes menos radiação do que os filmes Classe 1);

Eliminação das etapas demoradas de revelação e fixação dos filmes convencionais (dispensa-se câmara escura necessitando apenas de sala com penumbra de aproximadamente 10 lux);

Não requer equipamento sofisticado para mostrar as imagens (permite gerar imagens em computadores pessoais). Também é importante frisar que permite utilizar fontes de raios gama de baixíssima atividade:

18,5 GBq à 370 GBq (0.5 à 10 Ci) de Se-75:

370 GBq (10 Ci) de Ir-192 (VIDEIRA JOSÉ et. al., 2003).

Um sistema de radiografia computadorizada é constituída por três componentes: placa de fósforo, escâner e sistema de processamento de imagens ou software de análise (MARINHO et. al., 2007).

A radiografia computadorizada emprega placas de material fotoluminescente, ditas placas de fósforo ou imaging plates (IP), as quais armazenam a imagem latente em sua estrutura (sem sentido, incompleto). Simplificadamente pode-se dizer que esse armazenamento é função da energia da radiação incidente, proporcionalmente à dose recebida. Quando da leitura de uma IP, através de um laser de comprimento de onda adequado, ocorre emissão de energia na forma de luz azul, segundo o mecanismo conhecido por PSL-*Photostimulated Luminescence* ou Luminescência Fotoestimulada.

O escâner radiográfico, além de extrair da imagem latente via PSL, converte a resposta emitida em uma imagem digital, que pode ser prontamente observada na tela de um

computador. Ao final do processo de varredura, a placa deve ser submetida à luz branca intensa, de modo que sejam eliminados quaisquer resquícios de imagem. Com isso, a placa poderá ser utilizada em uma nova exposição radiográfica.

Placas comuns, *Standard Type* (ST), são espessas, requerendo menor tempo de exposição e gerando imagens de menor qualidade devido ao espalhamento interno da luz fotoestimulada ao longo da espessura. Placas finas são de alta qualidade, *High Resolution* (HR), devido à reduzida dispersão, mas exige um aumento no tempo de exposição por conta da menor eficiência na absorção dos fótons da radiação incidente; como consequência, a resolução em contraste é empobrecida. Como placas de alta qualidade destacam-se as placas azuis ou *blue plates*.

O escâner radiográfico apresenta três características principais que influem no seu desempenho: o tamanho do leitor ótico (*laser spot size*), o tamanho do pixel do escâner e a faixa dinâmica (*range bits*).

O sistema de processamento de imagens é o programa utilizado como interface de comunicação entre o escâner e o usuário durante a etapa de leitura das placas, bem como durante a análise/tratamento das imagens armazenadas no computador. Os escâneres são vendidos conjuntamente com um software proprietário e exclusivo do fabricante, mas existem diversos outros programas capazes de realizar o processamento de imagens digitais. É importante que o usuário busque trabalhar com formatos de arquivamento, por ocasião da exportação das imagens, que não acarretem perda de dados, como o TIFF, de modo que a análise não seja comprometida.

Os requisitos mínimos para um sistema de radiografia são função da aplicação ao qual se destina. Para inspeção de soldas, os requisitos variam em função da espessura do material a radiografar e da energia ou atividade da fonte de radiação, porém sabe-se que a configuração necessária para atingir a qualidade requerida em todas as situações de diâmetros e espessuras é aquela em que o laser é igual ou inferior a 12,5m e o tamanho de pixel igual ou inferior a 30m (2,3,4). À medida que o tamanho do leitor ótico aumenta, haverá restrições de atendimento aos requisitos, no que se refere a limitações na faixa de diâmetro e espessura inspecionáveis. Esse relacionamento entre especificação de equipamento e limitações na inspeção radiográfica ainda não está bem definido na literatura e experiência de laboratório e campo, sendo um fator gerador de risco à qualidade da inspeção e probabilidade de detecção de defeitos. A faixa dinâmica recomendada deve ser superior a 12 bits; no mínimo, este valor. O monitor utilizado para a visualização e laudo das imagens radiográficas deve atender sempre os seguintes requisitos mínimos: luminância de 100 cd/m<sup>2</sup>, resolução igual ou maior

que 1280 x 1024 pixels, tamanho máximo de pixel de 300  $\mu$ m e razão para luminância exibível (luminância máxima/luminância mínima) maior ou igual a 100:1. (MARINHO et. al., 2008b).

Apesar de sua natureza robusta, é importante manusear as placas de imagem com cuidado, em ambiente limpo e de acordo com as normas dos fabricantes para obter delas o bom desempenho e o ótimo tempo de vida. Quando manuseada com cuidado e usada com um sistema de radiografia computadorizada de alta qualidade, a placa de imagem proporciona melhor sensibilidade do que a técnica convencional (MOREIRA, 2007).

Tipicamente, um *IP* irá perder cerca de 25% do sinal aprisionado em um período que pode variar de 10 minutos a 8 horas, resultando em uma diminuição da quantidade de luminescência fotoestimulada. Após um intervalo de tempo maior, o sinal continuará a desvanecer, contudo de modo mais lento.

Quando uma exposição aos raios X é necessária por um longo período de tempo, a linearidade entre o tempo de exposição e a quantidade de luminescência liberada pode ser prejudicada pelo desvanecimento.

Como mencionado anteriormente, o desvanecimento do sinal depende da temperatura ambiente em que o *IP* se encontra antes da leitura e do comprimento de onda do laser no segundo estímulo. O grau de desvanecimento do sinal tende a aumentar com o aumento da temperatura e do comprimento de onda da luz estimulada. Por exemplo, o desvanecimento do sinal, quando realizada a varredura com um laser de diodo com comprimento de onda de 650 nm, é maior do que quando realizada a varredura com um laser He-Ne, com comprimento de onda de 630 nm (SADDOCK, et. al., 2008).

A Figura 26 mostra a seção transversal de uma placa de fósforo, evidenciando as principais camadas.

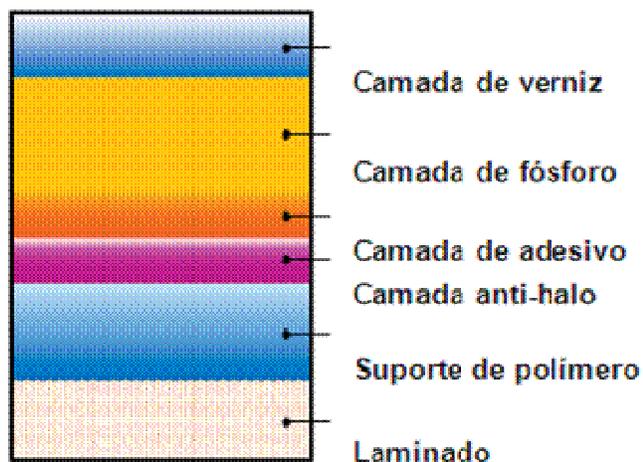


Figura 26 - Placa de fósforo (GE, 2006)

A Figura 27 mostra a arquitetura do escaneamento e o processo de aquisição de dados das placas de imagem.

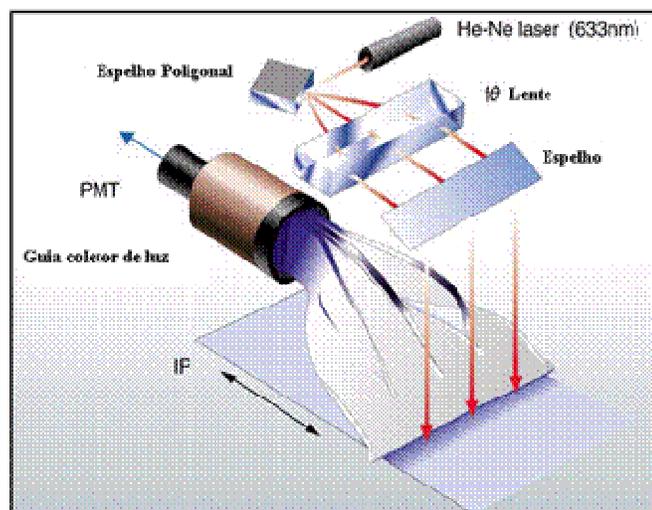


Figura 27 - Arquitetura do escaneamento (RABELLO, 2007)

O procedimento de escaneamento pode demorar entre três e doze minutos dependendo do tamanho da placa de imagem e da definição requerida. A imagem latente é criada quando os raios X atingem os cristais de fósforo da estrutura da placa. Essa energia é absorvida pelo

átomo e então liberada no escâner por um laser vermelho He-Ne (633 nm). Esse laser libera uma quantidade da luz azul (390 nm), que é detectada por um tubo foto-multiplicador (*Photo Multiplier Tube* – PMT). A quantidade de luz azul é uma medida linear da “densidade radiográfica” naquele ponto. Os passos de varredura típicos dos escâneres são 50-150  $\mu\text{m}$ . A tensão através do PMT pode ser variada como o “ganho”. Um valor elevado do ganho durante a aquisição da imagem resultará em uma radiografia mais escura. Essa ferramenta pode ser utilizada para reduzir tempos da exposição, porém leva naturalmente a uma baixa sensibilidade. Um valor mais baixo do ganho resultará em uma imagem mais clara. Com o objetivo de conseguir os níveis de cinza requerido, é necessário expor a placa de imagem por um período mais longo, o que irá aumentar a sensibilidade. A imagem latente pode ser apagada colocando a placa da imagem latente em uma caixa de luz branca por cinco minutos. Uma vez que a imagem tenha sido apagada inteiramente, a placa pode ser reutilizada. As placas de imagem são particularmente sensíveis a energias mais baixas, porque foram originalmente projetadas para o campo odontológico e médico, e posteriormente adaptadas para o Ensaio Não Destrutivo industrial. Essa sensibilidade às energias baixas é vantajosa, mas podem ocorrer problemas com o espalhamento em objetos de paredes mais espessas. (BLAKELEY, 2004).

A Radiografia computadorizada (RC) pode ser realizada em:

- a) Tempo real - método direto: Utilizando-se placas de semicondutores ligadas diretamente a computadores.
- b) Tempo próximo - método indireto: Utilizando-se sensores (TELAS ou PLACAS) de compostos de fósforo os quais são ativados através de radiação ionizante e lidos através de leitor de imagem (SCANNER) e processados no computador.

Esta última é mais econômica e prática do ponto de vista operacional e já vem sendo utilizada nos países do primeiro mundo com níveis satisfatórios de qualidade, atendendo a critérios técnicos específicos da área.

No método indireto as imagens em computadores convencionais proporcionando laudos praticamente *On-line*, ou seja, laudo assim que a imagem é gerada na tela do vídeo. Dispensa-se câmara escura, necessitando apenas de sala com penumbra de aproximadamente 10 Lux.

Também é importante frisar que as telas de fósforo são sensibilizadas com até 20 vezes menos radiação do que os filmes Classe 1, no processo de radiografia convencional, proporcionando rapidez no processamento e permitindo utilizar fontes de baixíssima atividade, tanto de Ir-192 quanto de Se-75 (VIDEIRA JOSÉ et. al., 2003).

Quanto mais radiação chegar aos cristais de fósforo, maior será a densidade de aprisionamento, conseqüentemente, mais centros *PSL* são gerados e mais luz visível será emitida durante a varredura com o feixe de laser. Após o processo de "zerar" as informações, o filme *IP* pode ser reutilizado por cerca de 1.000 vezes. A leitura de imagens de radiação é feita num scanner de filme *IP* e, dependendo do objetivo, a densidade de leitura pode ser selecionada entre 5 e 40 pixels/mm (YANAGUIZAWA, et. al., 2007).

O *PSL* de 400 nm emitido durante a varredura do laser é coletado por um tubo fotomultiplicador (PMT) e posteriormente convertido em sinais elétricos em ordem cronológica. Por fim, esses sinais elétricos são convertidos em sinais digitais de 8 a 16 bits (SHINOHARA, ACIOLO, KHOURY, 2002).

A Figura 28 mostra a sequência de exposição e reutilização de uma placa de fósforo.

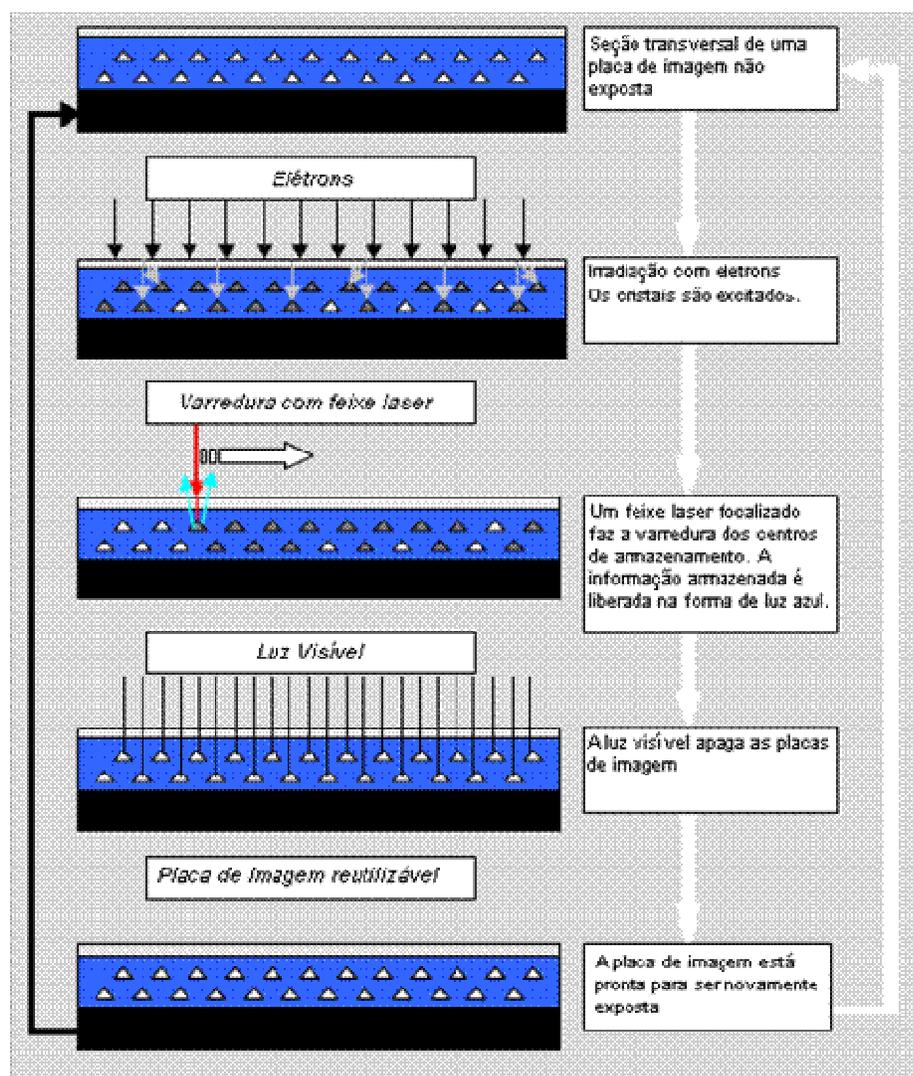


Figura 28 - Placa de fósforo (DATABIS, 2005)

A Figura 29 mostra um modelo de scanner de radiografia computadorizada do modelo CR50P de fabricação da GEIT.

Para aquisição e processamento das imagens, são utilizados os programas Rhythm Acquire e Rhythm Review, respectivamente. Esses sistemas possuem um range de níveis de cinza que varia entre 0 e 49140, escaneando a placa de fósforo com tamanho do foco do laser de leitura de 50  $\mu\text{m}$  e gerando imagens com tamanhos de pixel variáveis entre 50 e 200  $\mu\text{m}$  (SIMÕES, et. al., 2008).

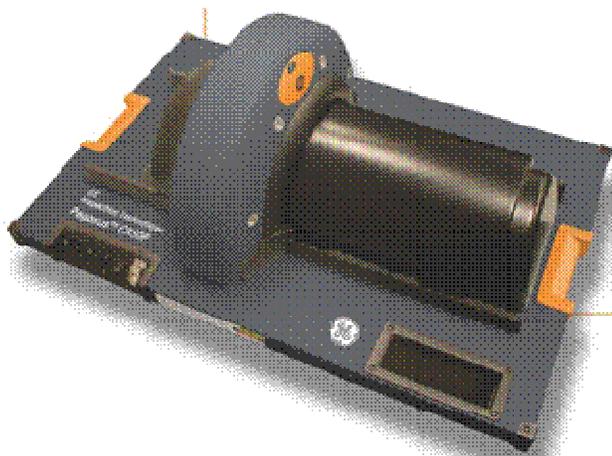


Figura 29 – Scanner GE modelo Pegasus TM CR 50P (MINARI et. al., 2009)

Existem medidas adicionais de interesse que têm uma relação mais estreita com o leitor de CR. Diferentemente da física de exposição, o hardware do sistema de CR está mais sujeito à degradação e à deterioração, portanto existem várias ferramentas e medidas que podem ser utilizadas para estabelecer uma linha de base de desempenho inicial e monitorar o desempenho e a estabilidade do sistema a longo prazo. Essas ferramentas são a base de um novo padrão do setor que foi publicado no final de 2005, o ASTM E2445, "*Standard Practice for the Qualification and Long Term Stability of Computed Radiology Systems*" (MANGO, 2005).

### **2.4.3 Radiografia digital**

A conversão de filmes radiográficos para tecnologias digitais apresenta muitos benefícios, incluindo aumento da capacidade de detecção, maior produtividade e operações simplificadas. No entanto, a conversão com êxito requer considerações de ambas as técnicas e de fatores financeiros, determinando assim se a solução digital é economicamente viável.

O excelente desempenho das imagens do detector *flat panel*, com sensibilidade equivalente ao filmes radiográficos tem contribuído para a mudança da técnica. As Empresas normalmente fornecem rotineiramente as projeções do custo total para aplicações específicas para cada cliente, sendo que essas projeções incluem fatores como ganhos de produtividade, vida média de desgaste do detector plano, etc (ZEKOAKI, CONSTAIN, 2008).

### 2.4.3.1 Benefícios da radiografia digital

O ensaio radiográfico convencional tem utilizado filmes por mais de um século e nos últimos tempos o uso da radiografia digital tem sido implementado nos segmentos da medicina, aeroespacial, segurança, automobilístico, petróleo, petroquímico, entre outros.

Atualmente, devido ao alto nível tecnológico dessa técnica, o segmento industrial tem procurado a melhor aplicação para seus produtos. Dentro dessas opções atuais, o detector digital plano é considerado como uma das soluções para substituições dos filmes assim como para a redução do tempo de ciclo de inspeção (MOREIRA, et. al., 2007).

A Figura 30 mostra um *flat panel* e a Figura 31 mostra uma cabine de raios X que utiliza um sistema de captação de imagem *flat panel* (MINARI et. al., 2008b).



Figura 30 - *Flat Panel* (MOREIRA, et. al., 2007)

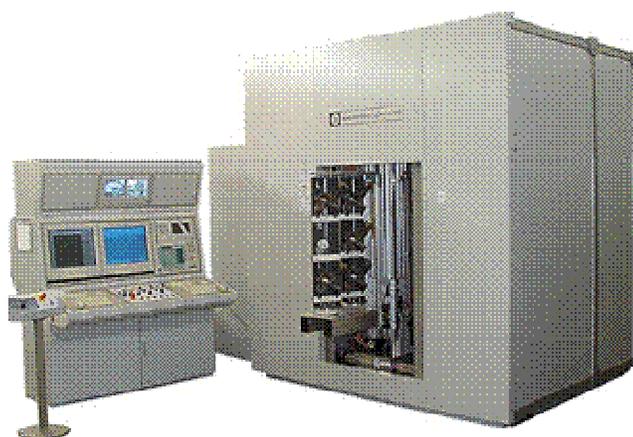


Figura 31 - Cabine de raios X (FUNDIÇÃO TUPY, 2008)

A Figura 32 mostra um sistema de radiografia digital com processamento de imagem. (MOREIRA, et. al., 2007).

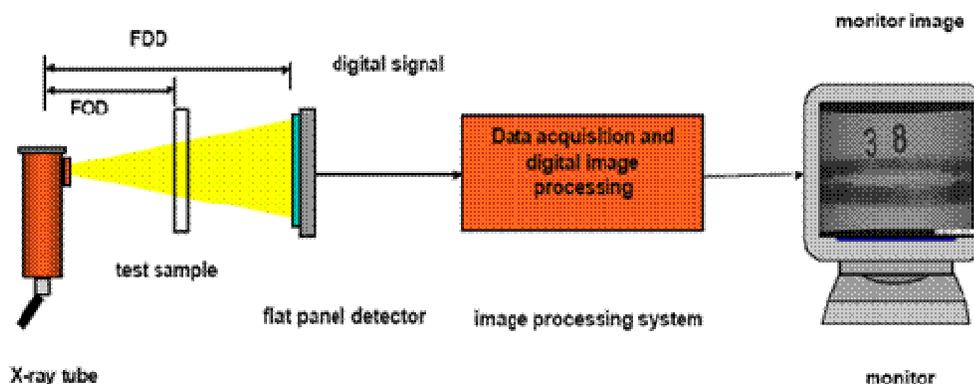


Figura 32 - Técnica de radiografia digital (MOREIRA, et. al., 2007)

A técnica da radiografia digital geralmente proporciona economia de custos, bem como diminuição do tempo de inspeção, com incremento da produtividade e com retorno financeiro. O benefício mais óbvio é a redução do consumo associado à utilização de filmes radiográficos, o que inclui, nesse caso, filmes, produtos químicos, o gerenciamento de produtos químicos quanto ao seu manuseio e ao transporte, além da preservação do meio ambiente, o mais importante neste momento.

Essa tecnologia permite uma redução das distâncias da área do balizamento, pois as exposições terão energias (kV) e correntes (mA) muito menores, possibilitando que o trabalho possa continuar em áreas circunvizinhas.

A produtividade da técnica da radiografia digital é determinada pela redução do tempo de exposição, com a mesma qualidade de imagem, chegando às vezes a ser até 90% mais rápida do que o filme radiográfico, permitindo assim que o trabalho seja concluído com muito mais rapidez.

Essa técnica possibilita um gerenciamento das imagens mais rápido e no local. Se o material inspecionado tiver que ser retrabalhado, isso pode ser feito imediatamente, ao contrário dos filmes radiográficos que devem ser transportados do local onde foram expostos para a sala de revelação para serem processados, sendo esse tempo totalmente improdutivo em relação à radiografia digital.

O processamento das imagens também agiliza na tomada de decisão se o material vai ou não sofrer um retrabalho, pois o software embarcado no sistema, como, por exemplo, inversão dos tons de cinzas, ajuste eletrônico do brilho e contraste, assim como a possibilidade de medição eletrônica das descontinuidades, ajuda nessa decisão.

Dados digitais permitem que imagens arquivadas em servidores, CD's, DVD's e podem também ser compartilhadas globalmente via correio eletrônico (PINCU, 2008).

A radiografia digital é atualmente o “estado da arte” baseado nos detectores planos (*flat panel*) em que as imagens recebidas são mostradas diretamente em um monitor de um computador, sem sistemas óticos intermediários, como, por exemplo, os scanners no sistema de radiografia computadorizada e os intensificadores de imagens das fluoroscopias.

Os raios X incidentes são convertidos internamente através de um sensor interno e fornece imagens digitais de alta qualidade, mesmo quando comparado aos filmes radiográficos, fornecendo uma sensibilidade elevada para a aplicação radiográfica industrial.

Dois tecnologias distintas estão disponíveis para detectores planos: a conversão indireta e a direta. O primeiro projeto é baseado em uma matriz de diodo e a imagem será lida pelos transistores (sistemas eletrônicos), que são componentes fabricados de silicone amorfo e são resistentes às altas tensões. Os raios X incidem primeiramente no cintilador de iodeto de cério que os converte em luz.

Os benefícios da tecnologia de iodeto de cério são excelentes, quanto à qualidade das imagens. A luz passa então por uma matriz de fotodiodos do silicone amorfo e os sinais elétricos são amplificados e digitalizados. A luz é dirigida no silicone sem difusão lateral, o que assegura a qualidade da imagem.

Os dados digitais são processados através de uma imagem de tons de cinza, proporcional ao valor digital e entregue ao computador, que exibe as imagens, sendo que o sistema oferece vantagens adicionais do pós-processamento e arquivamento das imagens eletronicamente. A Figura 33 mostra a tecnologia da matriz de diodo (PARDIKAR, 2008).

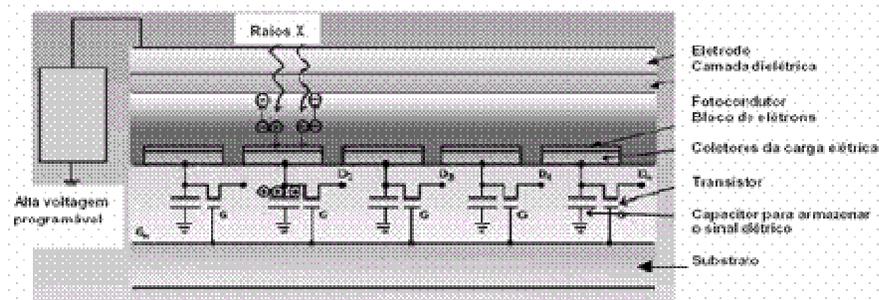


Figura 33 - Método cintilador – Fósforo (BAVENDIEK, 2005)

O segundo tipo de detector plano é baseado em um condutor de selênio amorfo ou Cd-Te em uma multimicro placa eletrônica. Esse tipo de tecnologia resulta em uma melhor qualidade de imagem (*high-resolution*) e tem um potencial para competir com o filme radiográfico convencional, quanto à qualidade da imagem.

Os fótons, quando incidem no condutor de selênio amorfo, são convertidos diretamente em sinais eletrônicos que são amplificados e digitalizados, porque não existe o cintilador ou fósforo. A Figura 34 mostra a tecnologia do detector plano. Essa é a diferença importante entre a construção direta e a indireta (PARDIKAR, 2008).

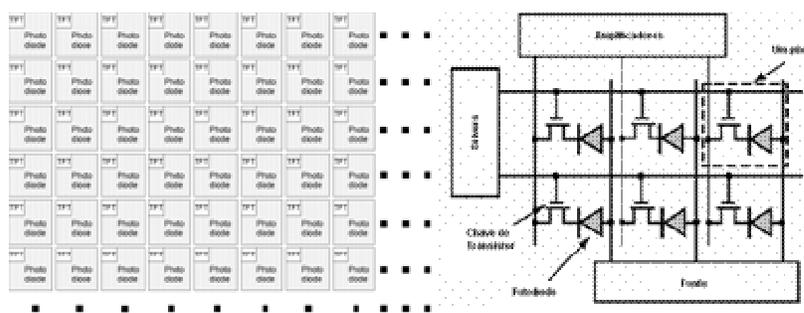


Figura 34 - Esquema de um detector plano (BAVENDIEK, 2005)

A radiografia digital (Radiografia Direta - DR) oferece imagem com alta velocidade. São obtidos tempos de exposição típicos de 10-25% dos praticados com filmes e faixas de velocidade de transferência de dados desde em tempo real até poucos segundos (EWERT, ZSCHERPEL, BAVENDIEK, 2004).

Um único detector pode tomar o lugar de filmes múltiplos e ser utilizado com sistemas automáticos de manipulação (BUENO, 2002).

Testes têm sido realizados e os detectores planos têm mostrado um desempenho melhor quando comparados a filmes quanto a defeitos finos e volumétricos (BAVENDIEK, 2006; PURSCHKE, 2004).

O computador também pode controlar o manipulador que coloca a peça em exame na posição desejada, embora essa tarefa seja normalmente executada por um controlador lógico programável. Atualmente, são usados detectores planos de silício amorfo como sensores de imagens em alguns sistemas para ensaios industriais (GORNI, 2006).

#### **2.4.4 Fluoroscopia analógica e digital**

Radiografia é um dos mais versáteis ensaios não destrutivos utilizados para identificar discontinuidades. Entretanto, o filme radiográfico é um método lento e caro.

A inspeção em tempo real (*real time radiology, RTR*) é uma alternativa para o filme radiográfico, considerando os custos e os tempos de processamento.

Inspeção em tempo real, utilizando um equipamento de raios X, é uma opção na caldeiraria para inspecionar tubos com soldas MIG. As imagens dos raios X mostram as soldas em um monitor e as imagens são verificadas constantemente.

A qualidade da solda é verificada imediatamente, e se algum problema ocorrer os parâmetros das soldas são ajustados imediatamente.

Inspeção em tempo real, quando comparada com a radiografia convencional, tem duas desvantagens, a saber: baixo contraste e resolução limitada. A absorção da radiação dos raios X não é uniforme nos tubos intensificados e os sistemas ópticos contribuem para aumentar o desequilíbrio luminoso. O tamanho do ponto focal da ampola de raios X e a penumbra limitam a resolução espacial no tubo intensificador de imagem, juntamente com a câmera.

As estatísticas mostram que os fótons causam um ruído e como consequência uma qualidade de imagem mais pobre, quando comparada a do filme radiográfico, sendo que necessita ser melhorada.

A norma ASME incluiu inspeção em tempo real na Sec. V 1989 e dá as diretrizes para a sensibilidade dos ensaios.

Um microcomputador com processamento de imagens é intercalado com os sistemas de imagem em tempo real (REVATHI, CYNTHIA, MEENAKSHI 2009).

A fabricação de peças fundidas de ligas leves produzidas para a indústria automotiva, tais como aros para rodas, articulações e caixas para redutores do sistema de direção, são consideradas componentes importantes para o desempenho de um veículo automotivo. Para se garantir a segurança da construção desses componentes, é necessário examinar todos cuidadosamente.

A radioscopia/fluoroscopia rapidamente tomou a forma aceita para o controle de peças fundidas sob pressão por meio da análise de imagens obtida por raios X, visual ou auxiliada por computador. O objetivo desse método de ensaio não destrutivo consiste em identificar as discontinuidades que podem estar localizadas no interior da peça e, portanto, não detectáveis a olho nu.

O ensaio radioscópico/fluoroscópico automatizado de peças fundidas é uma atividade de controle de qualidade que determina se o componente tende a cumprir um dado conjunto de especificações e de segurança do produto. Ao longo das últimas décadas, foram introduzidos sistemas radioscópicos/fluoroscópicos na indústria automotiva que detectam discontinuidades sem que haja interação humana.

Mais recentemente, os sistemas de radioscopia/fluoroscopia automatizada não só tiveram sua qualidade melhorada a partir de repetidos testes objetivos e processos mais eficientes, como também tiveram sua produtividade e lucratividade elevada em função da redução nos custos de mão-de-obra.

Os principais aspectos de uma unidade para ensaio automatizado usando raios X estão relacionados abaixo:

- um manipulador para manusear a peça a ser testada;

- uma fonte de raios X a qual irradia a peça a ser testada com um raio cônico, gerando sua imagem por meio da passagem da radiação;

- um intensificador de imagem o qual transforma a imagem invisível gerada pelos raios X numa representação visível;

- uma câmara CCD que capta a luz visível e transforma em sinal analógico ou digital;

- um computador para efetuar o processamento digital da imagem visível gerada pelo sistema de imagem;

- Monitor para verificação da integridade interna da peça, aceitando-a ou rejeitando-a.

Os tubos intensificadores de imagem tiveram uma evolução contínua durante os últimos 50 anos. Esses tubos estão agora disponíveis com janelas circulares de entrada de até 400 mm de diâmetro com uma primeira tela do césio iodeto concebida para ser eficiente com energias de raios X para fins industriais, como mostra a Figura 35 (BUENO, 2002).

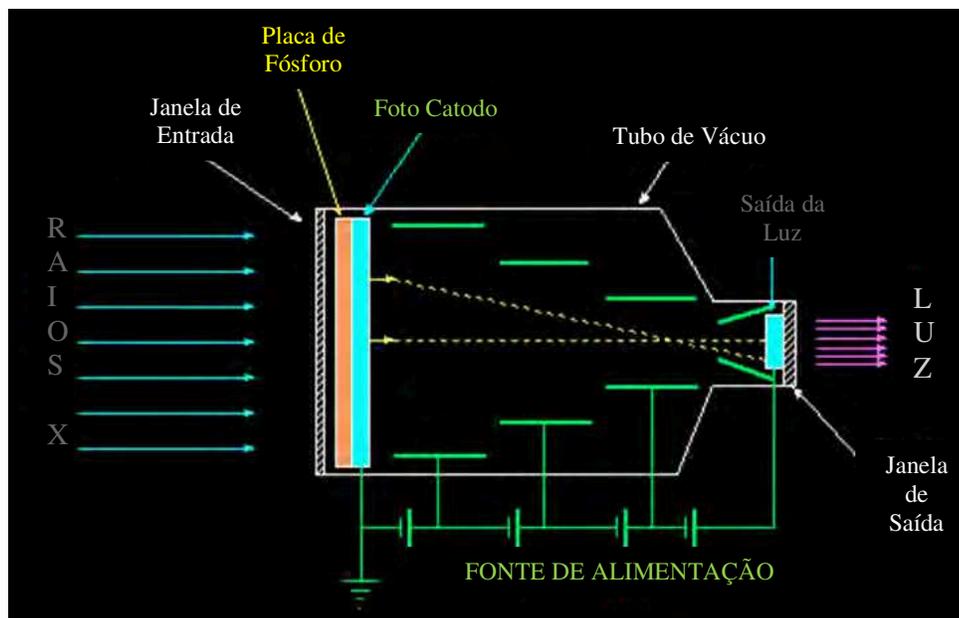


Figura 35 - Tubo intensificador de imagem, visto internamente (BUENO, 2002)

A Figura 36 mostra a secção transversal de uma placa de fósforo utilizada em um intensificador de imagem vista externamente com detalhe.

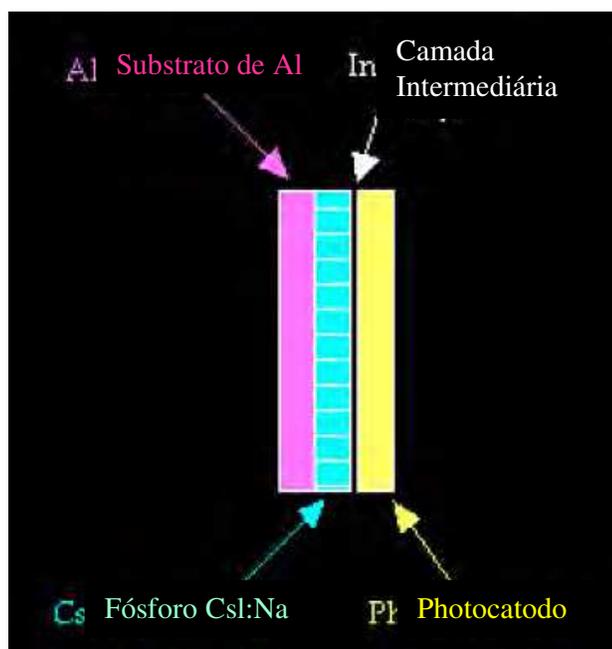


Figura 36 - Detalhe do intensificador de imagem, visto externamente (BUENO, 2002)

A fluoroscopia baseia no princípio de que determinados sais (tungstato de cálcio, por exemplo) possuem a propriedade de emitir luz em intensidade mais ou menos proporcional à intensidade de radiação que incide sobre eles. A radiação é emitida a partir de um tubo de raios X, atravessando a peça e atingindo a tela fluorescente.

Este, por sua vez, transforma as intensidades de radiação que emergem da peça em luz de diferentes intensidades, formando na tela a imagem da peça. Essa imagem, refletida em um espelho ou captada e transmitida a um monitor, é examinada pelo inspetor à procura de possíveis defeitos (PURSCHKE, REIMER, 2003).

A Figura 37 mostra um esquema de sistema de fluoroscopia/radioscopia óptica e um sistema com câmara com captura digital da imagem (ANDREUCCI, 2003).

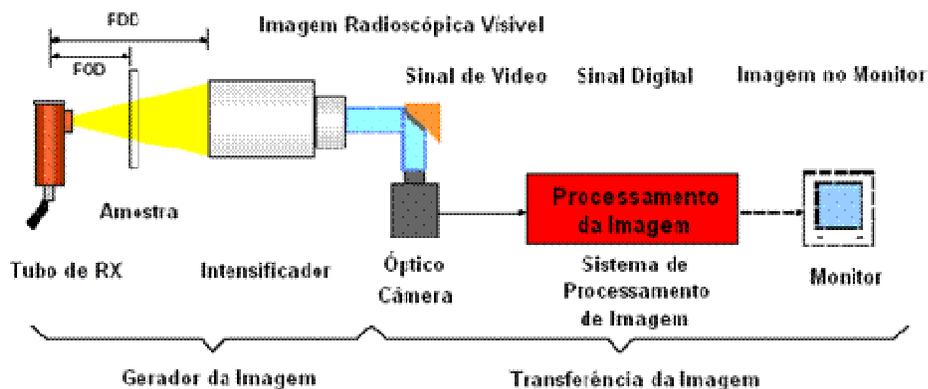


Figura 37 - Fluoroscopia/radioscopia óptica (ANDREUCCI, 2003)

O ensaio de radioscopia/fluoroscopia consiste das seguintes etapas: uma sequência de imagens em movimento é obtida e possíveis discontinuidades são detectadas e classificadas.

As vantagens dos sistemas de radiografias digitais podem ter as seguintes facilidades: exibição da imagem, redução das doses de raios X, processamento, aquisição, armazenamento e recuperação da imagem. Assim, toda a operação é simplificada desde a obtenção das imagens até o tempo de ciclo para se obter, avaliar e arquivar cada imagem com garantia de rastreabilidade.

As instalações da Avibras e do IFI/CTA são instalações radioativas fechadas com paredes de concreto revestidas de chumbo, com portas de ferro revestidas de chumbo, como mostra a Figura 38 (MINARI, et. al. 2008a).

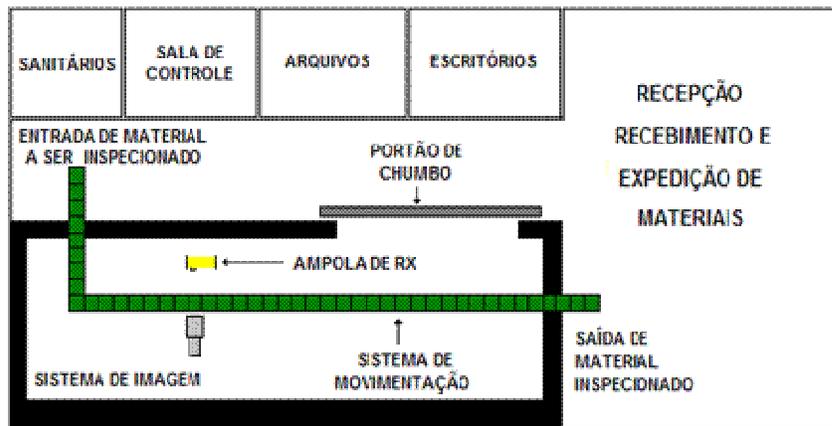


Figura 38 - Esquema da instalação fechada de fluoroscopia (MINARI, et. al. 2008<sup>a</sup>)

As instalações da Tupy Fundições e da Diagnostic são instalações tipo cabines de ferro revestidas de chumbo, conforme mostra a Figura 39 (MINARI, et. al. 2008a).

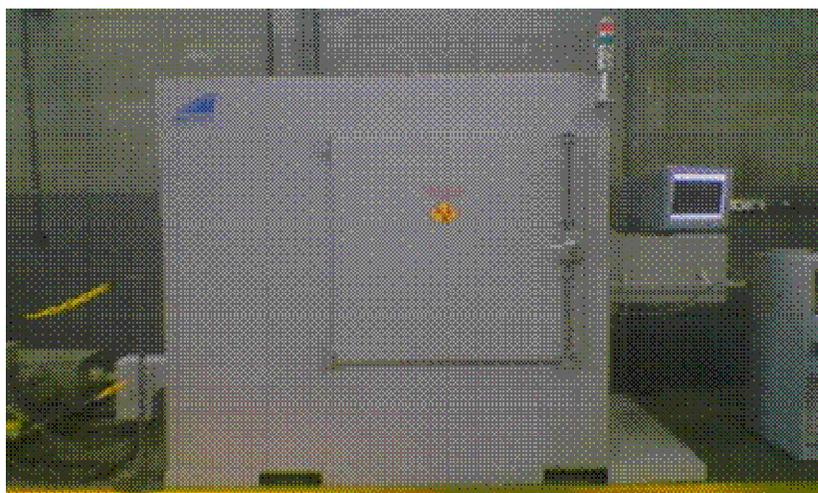


Figura 39 - Esquema da instalação fechada do tipo cabine (DIAGNOSTIC, 2008)

Usando o método das imagens em tempo real, as verdadeiras discontinuidades podem ser detectadas com muita segurança na inspeção automática em peças de alumínio, como mostra a Figura 40 (MERY, FILBERT, 2002).

Usando o método das imagens em tempo real, as verdadeiras descontinuidades podem ser detectadas com muita segurança na inspeção automática em peças de alumínio, como mostra a Figura 40 (MERY, FILBERT, 2002).

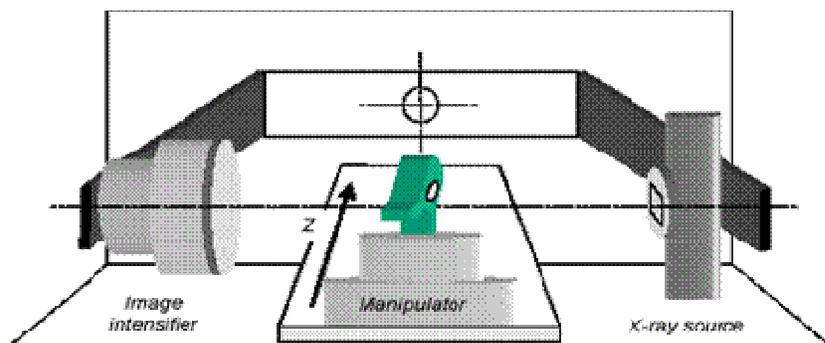


Figura 40 - Esquema de uma inspeção por Raios X, utilizando fluoroscopia digital (MERY, FILBERT, 2002)

A Figura 41 mostra o interior de uma cabine com proteção à radiação, por chumbo, contendo internamente um manipulador mecânico e acima uma imagem radioscópica de uma peça automotiva.

A avaliação do contraste da imagem da fluoroscopia permite a detecção de descontinuidades de dimensões mínimas de aproximadamente 1% da espessura da peça que está sendo inspecionada.

A resolução da imagem recebida depende do ponto focal, do fator de magnificação e de fatores geométricos (BUSCHKE, ROYE, DAHMEN, 2005).

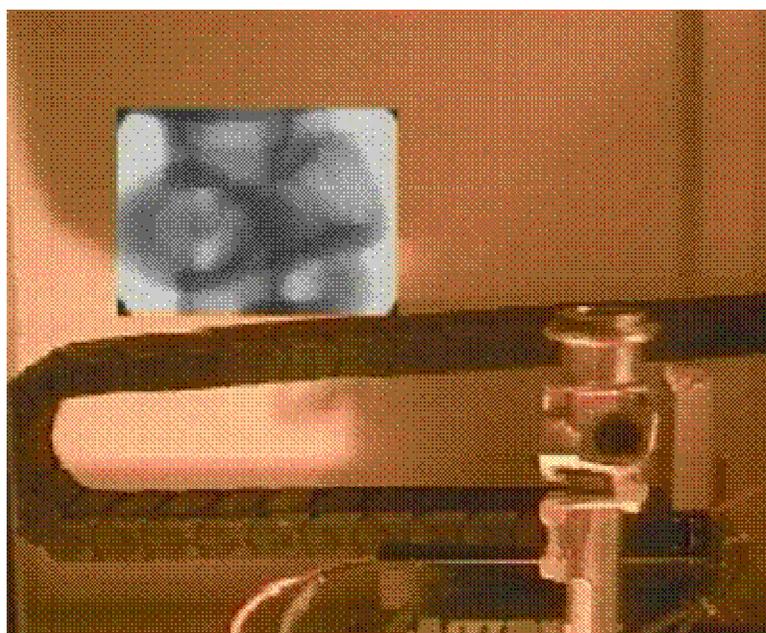


Figura 41 - Vista interna de uma cabine de raios X e uma imagem radioscópica de peça automotiva

(BUSCHKE, ROYE, DAHMEN 2005)

Essa técnica proporciona:

A inspeção ser em tempo real e capacidade de inspecionar altas cadências de produção diária;

As maiores limitações desse sistema de imagem são os baixos níveis de sinal/ruído, baixo contraste, sem linearidade, range dinâmico limitado.

Entretanto, se forem utilizadas técnicas de processamento de imagem, a qualidade dela será melhorada consideravelmente a ponto de ser comparada com a radiografia convencional, utilizando filme radiográfico.

Existe uma degradação natural do tubo intensificador de imagem e por consequência uma degradação da imagem, em que o processamento da imagem não consegue manter a mesma qualidade requerida.

Por essa razão, o tempo de utilização dos tubos intensificadores é baixo e tem de ser trocado de 3 a 4 anos (PARDIKAR, 2008).

### 3 PROPOSIÇÃO

Comparar as 5 técnicas de captação de imagem, utilizando radiação penetrante com o uso de equipamentos de raios-X com energias máxima de 320kV, em instalações fechadas.

As cinco técnicas serão aplicadas a 15 peças de ferro fundidos nodular, com o objetivo de observar as variáveis energia (kV), corrente (mA), tempo (min) e o IQI (Indicador de Qualidade de Imagem), em cada um dos casos. Após as atividades de experimentação, será realizada a análise dos dados em observância com a Norma Nuclear CNEN-NE-3.01 (Diretrizes Básicas de Radioproteção).

Sendo assim, foi considerado que maiores valores de energia implica em maior espalhamento de radiação, maiores valores de corrente implica em maiores taxas de exposição, maiores valores de tempo com o equipamento de raios X ligado implica em maiores tempos expostos a radiação (quer Indivíduo Ocupacionalmente Expostos ou Indivíduos do Público).

Portanto, quanto menor os valores encontrados em cada parâmetro analisado, melhor será o sistema de captação de imagem a ser escolhido. Deve-se ressaltar que mesmo não podendo manter a dff constante, fato que influencia diretamente o resultado obtido, a comparação ainda se mantém válida, pois cada técnica impõe uma faixa de dff para que todo o aparato possa ser montado.

A partir desta análise, o leitor terá em mãos uma base de conhecimento prático, baseado em experimentação, que auxiliará no processo decisório da escolha do tipo de técnica de radiografia mais adequado às condições e restrições de sua instalação radiográfica, do ponto de vista da proteção radiológica.

Por fim, a conclusão apresentará um resumo dos resultados e o fechamento da proposta apresentada.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 43 mostra a metodologia aplicada para atender os objetivos do trabalho desde a obtenção dos corpos-de-prova até a elaboração dos laudos, para posterior análise dos dados e discussão.

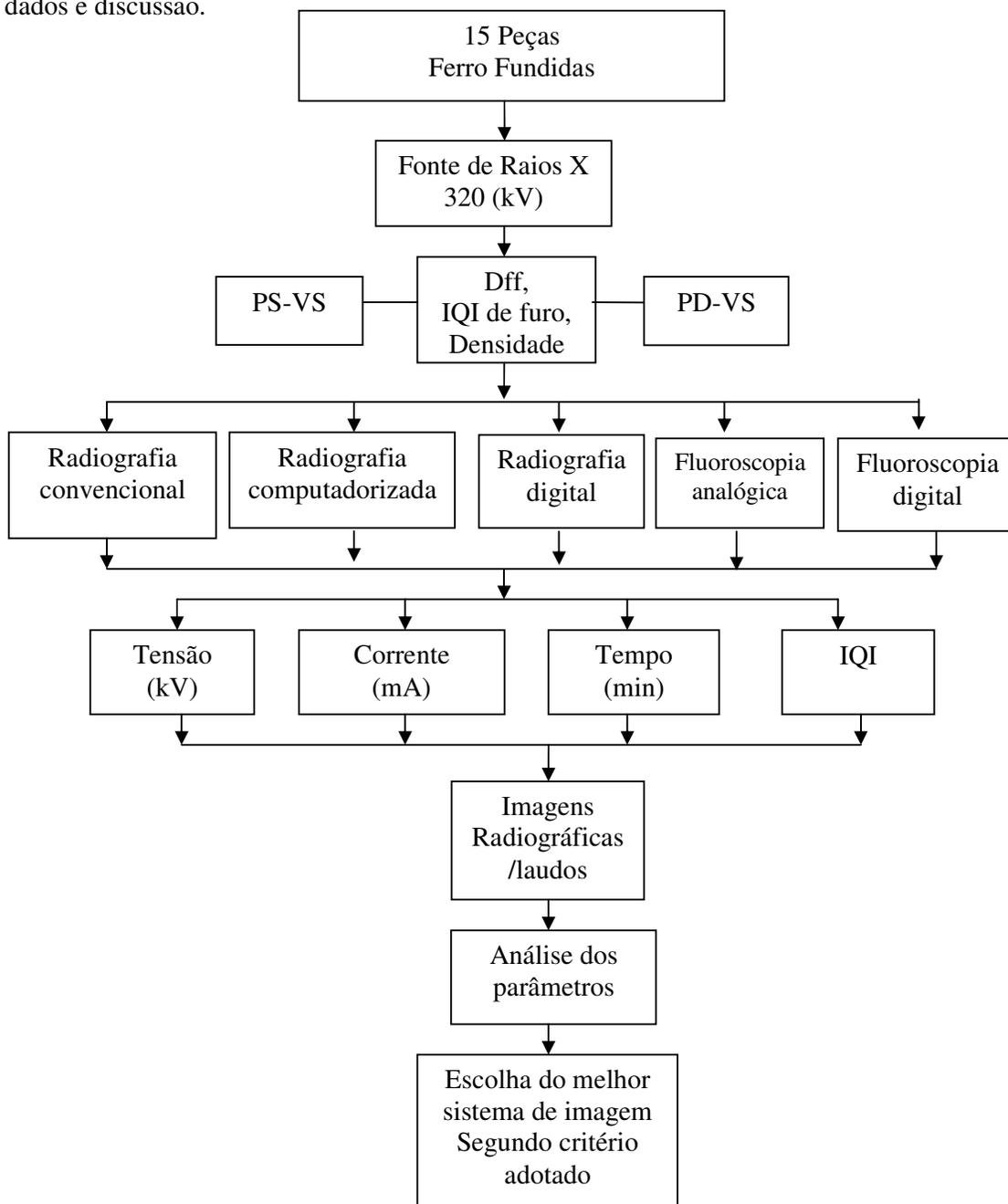


Figura 42 - Fluxograma da metodologia aplicada.

## **4.1 Materiais**

### **4.1.1 Corpos-de-prova**

Para a realização dos ensaios radiográficos foram escolhidas 15 peças de ferro fundido utilizadas no segmento aeronáutico e automobilístico, sendo que 12 peças continham descontinuidades como poros, trincas e rechupes e 3 isentas de descontinuidades.

As peças foram cortadas para facilitar o manuseio durante o ensaio, transporte, redução de peso e menor área para ser radiografada.

No apêndice 01, estão todas as descrições das peças e as fotos nas duas posições em que foram radiografadas.

## **4.2 Métodos**

### **4.2.1 Fontes de radiação utilizadas para os ensaios radiográficos.**

Todos os ensaios radiográficos foram realizados com equipamentos de raios X de potencial constante com energia máxima de 320 kV.

### **4.2.2 Normas ASTM utilizadas nas radiografias**

Para a avaliação das imagens radiográficas para as 5 técnicas radiográficas, foram utilizadas a norma ASTM Secção V, que dita os procedimentos de ensaios por raios X.

Os laudos foram executados por dois inspetores nível 2, qualificados pela norma NAS 410 do segmento aeronáutico.

### 4.2.3 Indicadores da Qualidade da Imagem - IQI's (Penetrômetros)

Os IQI's de furos são padronizados pelas normas (ASTM E1025, 2005) e são pequenas placas metálicas de diferentes espessuras, contendo 3 furos de diâmetros T, 2T e 4T, sendo T a espessura da placa.

As 15 peças foram radiografadas utilizando os IQI's de furo, como mostra a Figura 44.



Figura 43 - Exemplo de um IQI's de furo (ASTM E 1025, 2005)

A sensibilidade radiográfica é avaliada pelos furos que aparecem visíveis na imagem do IQI na radiografia e especificada pela norma de projeto do equipamento, também pode ser especificada com um acordo entre comprador e fornecedor, dependendo da criticidade da sua utilização.

### 4.2.4 Densidade radiográfica

A densidade óptica deve ser medida a partir de aparelhos eletrônicos (densitômetro), ou fitas densitométricas, calibradas, especialmente feitas para essa tarefa. A densidade deve ser sempre medida sobre área de interesse, por exemplo, sobre a imagem do cordão de solda, no caso de juntas soldadas, e o valor numérico é normalmente recomendado entre uma faixa de 1,8 a 4,0 HD para radiografias feitas com raios X e de 2,0 a 4,0 HD para raios gama, sendo que a faixa mais usual é de 2,0 a 3,5 HD. Procedimentos para calibração do densitômetro e da fita densitométrica são recomendados pelo ASME Sec. V, Art.2.

## 4.2.5 Técnicas de Exposição Radiográfica

### 4.2.5.1 Técnica de Parede Simples Vista Simples (PS-VS)

As disposições e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça e o filme, devem seguir algumas técnicas especiais que permitam uma imagem radiográfica de fácil interpretação e localização das discontinuidades. Algumas dessas técnicas que foram apresentadas são largamente utilizadas e recomendadas por normas e especificações nacionais e internacionais. Essa técnica é assim chamada de parede simples vista simples (PS-VS), 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, conforme mostra a Figura 45.

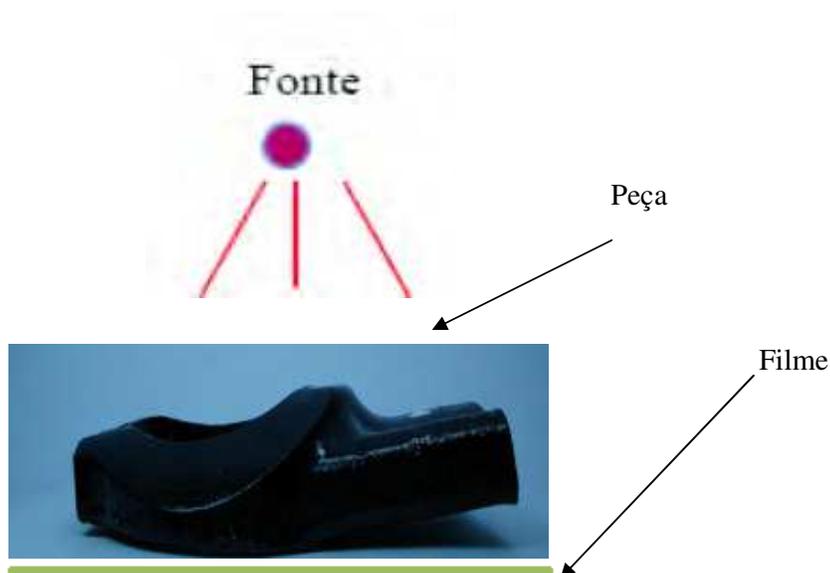


Figura 44 - Técnica de parede simples vista simples (PS-VS)

### 4.2.5.2 Técnica de Parede Dupla Vista Simples (PD-VS)

Na técnica de parede dupla vista simples, o feixe de radiação proveniente da fonte atravessa duas espessuras da peça, entretanto projeta no filme somente a seção da peça que está mais próxima a ele, conforme mostra a Figura 46. Frequentemente essa técnica é

utilizada em inspeções de juntas soldadas, as quais não possuem acesso interno, como, por exemplo, tubulações com diâmetros maiores que 3½ polegadas, vasos fechados e outros.

É importante lembrar que essa técnica requer que a radiação atravesse duas espessuras da peça e, portanto, o tempo de exposição será maior que a inspeção pela técnica de parede simples. Assim, essa opção deverá ser selecionada quando outra técnica não for possível ou permitida.

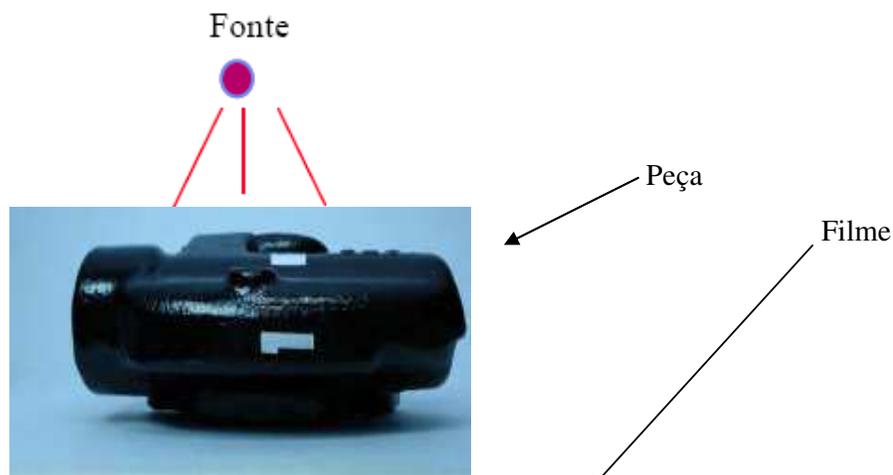


Figura 45 - Técnica de parede dupla vista simples (PD-VS).

## 4.2.6 Sistemas de captação de imagem

### 4.2.6.1 Radiografia convencional

A radiografia convencional nas 15 peças de ferro fundido foi realizada no laboratório de ensaios não destrutivos do CTA/IFI, utilizando-se filmes radiográficos da marca AGFA, filmes tipo 1 (granulação ultrafina, alto contraste e qualidade) doados pela empresa GE Inspection Technologies. As radiografias foram reveladas pelo método de processamento manual. No apêndice 02, as descrições e radiografias das peças.

### 4.2.6.2 Radiografia computadorizada

A radiografia computadorizada nas 15 peças de ferro fundido foi realizada no laboratório de ensaios não destrutivos da empresa Avibras - Indústria Aeroespacial, utilizando-se filmes de fósforos e software da empresa GE Inspection Technologies, modelo

GR50P. As imagens, após escaneadas, foram gravadas na memória do computador e em seguida em um DVD. No apêndice 03, estão descrições e radiografias das peças.

#### **4.2.6.3 Radiografia digital**

A radiografia digital nas 15 peças de ferro fundido foi realizada no laboratório de ensaios não destrutivos da empresa Fundições Tupy S.A., utilizando-se um sistema de captação de imagem com radiografia digital (flat panel), modelo Radioscopic Inspection System DP 435.53P. As imagens depois de visualizadas foram gravadas na memória do computador e em seguida em um DVD.

No apêndice 04, estão as descrições e radiografias das peças.

#### **4.2.6.4 Fluoroscopia analógica**

A fluoroscopia analógica nas 15 peças de ferro fundido foi realizada no laboratório de ensaios não destrutivos da empresa Avibras - Indústria Aeroespacial, utilizando-se um sistema de captação de imagem com tubo intensificador adaptado a um conjunto de lentes e uma câmera analógica da fabricante YXLON, modelo XRS – 232. As imagens depois de visualizadas foram gravadas na memória do computador e em seguida em um DVD.

No apêndice 05, estão as descrições e radiografias das peças.

#### **4.2.6.5 Fluoroscopia digital**

A fluoroscopia digital nas 15 peças de ferro fundido foi realizada no laboratório de ensaios não destrutivos da empresa Diagnostic, utilizando um sistema de captação de imagem com tubo intensificador adaptado a um conjunto de lentes e com uma câmera digital da marca Talhes, modelo 594428. As imagens depois de visualizadas foram gravadas na memória do computador e em seguida em um DVD.

No apêndice 06, estão as descrições e radiografias das peças.

#### **4.2.7 Avaliação das radiografias (Laudos)**

Após a análise das imagens obtidas de cada ensaio, foram feitas as avaliações para validar as radiografias, verificando-se o contraste, brilho e o IQI, seu contorno e o furo essencial visível, a menos da radiografia convencional que é verificado a sua densidade.

No apêndice 07, estão os resultados dos IQI's por peças.

#### **4.2.8 Imagens radiográficas**

As imagens obtidas de cada técnica (radiografias), após a avaliação da qualidade da imagem, foram arquivadas em DVD.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Radiografia convencional (parâmetros, qualidade de imagem e laudo)

A Tabela 1 mostra os valores obtidos dos ensaios radiográficos convencionais para as 15 peças de ferro fundido e os resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)

Tabela 1 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia convencional.

<b>Radiografia Convencional</b>						
Parâmetros dos Ensaios						
Peças	Espessuras (mm)	Tensão (kV)	Amperagem (mA)	Tempo (s)	IQI ASME	Qualidade de Imagem /laudo
01	16	180	6	240	17	2:2T
02	10	170	6	240	15	2:1T
03	16	160	6	180	17	2:4T
04	5,5	150	6	150	10	2:1T
05	36	210	6	300	25	2:1T
06	16	210	6	285	17	2:1T
07	5,5	150	6	150	10	2:1T
08	10	190	6	210	15	2:1T
09	10	180	6	210	15	2:1T
10	19	200	6	240	20	2:1T
11	32	200	6	225	25	2:1T
12	32	180	6	255	25	2:4T
13	12	170	6	180	15	2:1T
14	16	180	6	240	17	2:2T
15	23	215	6	270	20	2:2T
Distância fonte filme – 1000 mm						

### 5.1.1 IQI's (qualidade de imagem)

A Figura 46 mostra o resumo dos resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's), encontrados na técnica de radiografia convencional para as 15 peças de ferro fundido na posição 0°.

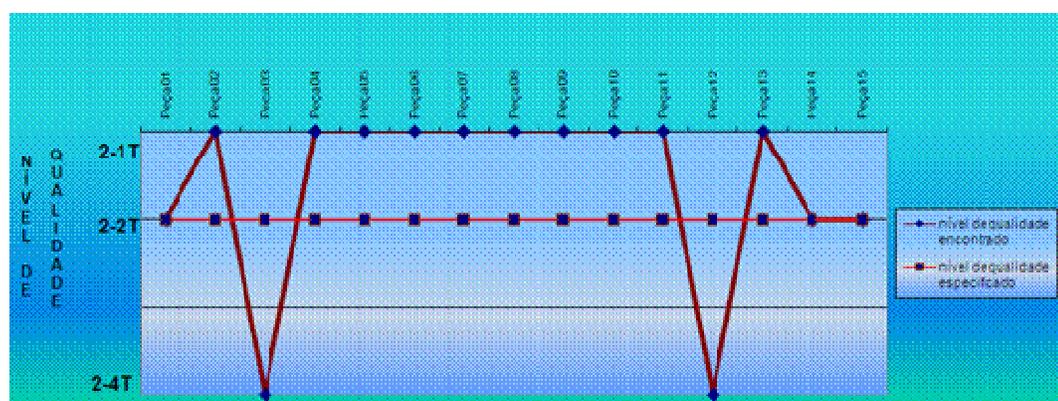


Figura 46 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia convencional

Após a elaboração do gráfico dos IQI's na técnica de radiografia convencional nas 15 peças, pode-se observar que 10 peças foram encontrados os furos essenciais de 2:1T, 3 peças os furos 2:2T e 2 peças o furo 2:4T.

## 5.2 Radiografia computadorizada (parâmetros, qualidade de imagem e laudo)

A Tabela 2 mostra os valores obtidos dos ensaios da radiografia computadorizada para as 15 peças de ferro fundido e os resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)

Tabela 2 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia computadorizada.

<b>Radiografia Computadorizada</b>						
Parâmetros dos Ensaios						
Peças	Espessuras (mm)	Tensão (kV)	Amperagem (mA)	Tempo (s)	IQI ASME	Qualidade de Imagem /laudo
01	16	145	4	75	17	2:1T
02	10	175	3,5	72	15	2:1T
03	16	170	3,65	75	17	2:1T
04	5,5	147,5	3,3	75	10	2:1T
05	36	307,5	2,05	75	25	2:1T
06	16	252,5	2,6	99	17	2:1T
07	5,5	130	2,5	60	10	2:1T
08	10	175	3,6	72	15	2:1T
09	10	175	3,6	72	15	2:1T
10	19	180	3,6	90	20	2:2T
11	32	285	2,2	90	25	2:1T
12	32	255	2,5	81	25	2:1T
13	12	150	3	78	15	2:1T
14	16	145	3,5	75	17	2:1T
15	23	210	2,9	90	20	2:1T
Distância fonte filme – 700 mm						

### 5.2.1 IQI's (qualidade de imagem)

A Figura 47 mostra o resumo dos resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's), encontrados na técnica de radiografia computadorizada para as 15 peças de ferro fundido na posição 0°.

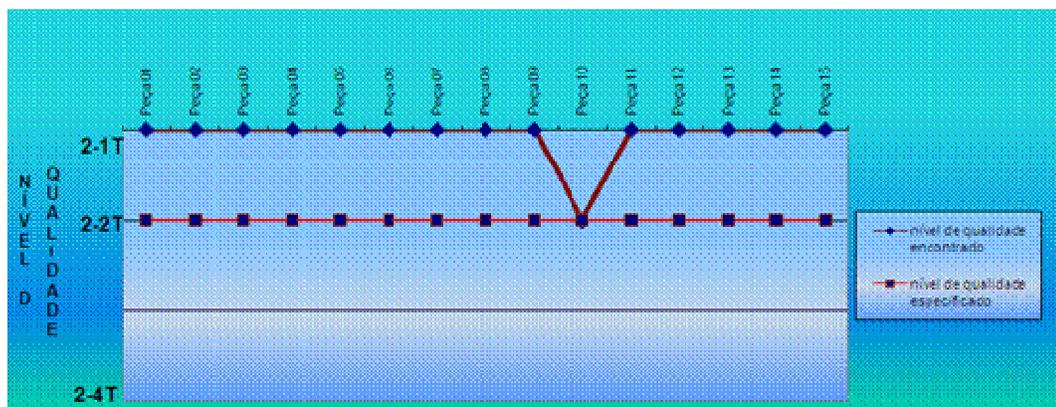


Figura 47 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia computadorizada

Após a elaboração do gráfico dos IQI's na técnica de radiografia computadorizada nas 15 peças, pode-se observar que a peça 14 foram encontrados o furo essencial de 2:1T e 1 peça foi encontrado 2: 2T.

### 5.3 Radiografia digital (parâmetros, qualidade de imagem e laudo)

A Tabela 3 mostra os valores obtidos dos ensaios da radiografia digital para as 15 peças de ferro fundido e os resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)

Tabela 3 resultados dos parâmetros dos ensaios da radiografia digital.

<b>Radiografia Digital</b>						
Parâmetros dos Ensaios						
Peças	Espessuras (mm)	Tensão (kV)	Amperagem (mA)	Tempo (s)	IQI ASME Tipo placa	Qualidade de Imagem /laudo
01	16	300	4	60	17	2:1T
02	10	310	4	60	15	2:2T
03	16	320	4	60	17	2:1T
04	5,5	150	4	60	10	2:4T
05	36	300	4	60	25	2:1T
06	16	300	4	60	17	2:1T
07	5,5	200	4	60	10	2:1T
08	10	200	4	60	15	2:1T
09	10	250	4	60	15	2:2T
10	19	320	4	60	20	2:2T
11	32	320	4	60	25	2:1T
12	32	320	4	60	25	2:1T
13	12	200	4	60	15	2:1T
14	16	200	4	60	17	2:1T
15	23	320	4	60	20	2:1T

Distância fonte flat panel – 1.200 mm

### 5.3.1 IQI's (qualidade de imagem)

A Figura 48 mostra o resumo dos resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's) encontrados na técnica de radiografia digital (*flat panel*) para as 15 peças de ferro fundido na posição 0°.

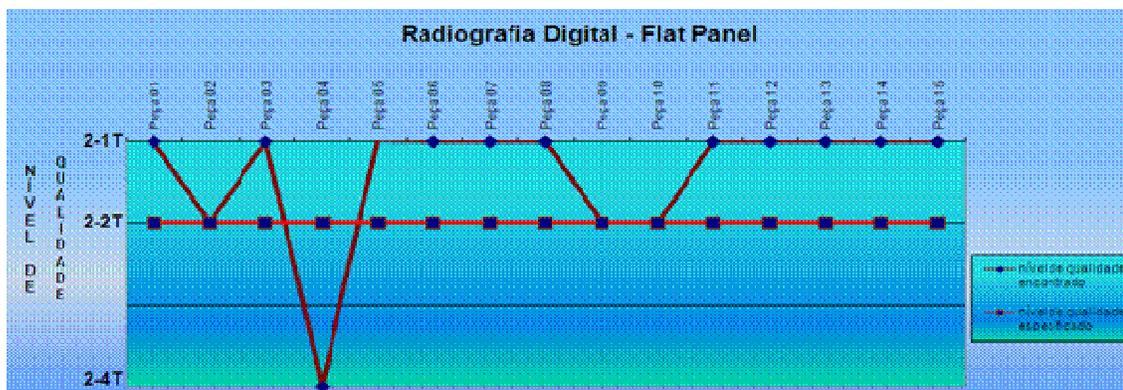


Figura 48 - Resumo dos resultados dos IQI's – Radiografia digital

Após a elaboração do gráfico dos IQI's na técnica de radiografia digital nas 15 peças, pode-se observar que as peças 11 peças foram encontrados os furos essenciais de 2:1T, 3 peças foram encontrados 2-2T e 01 peça o furo 2:4T.

#### 5.4 Fluoroscopia analógica (parâmetros, qualidade de imagem e laudo)

A Tabela 4 mostra os valores obtidos dos ensaios da fluoroscopia analógica para as 15 peças de ferro fundido e os resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)

Tabela 4 resultados dos parâmetros dos ensaios da fluoroscopia analógica.

<b>Fluoroscopia Analógica</b>						
Parâmetros dos Ensaios						
Peças	Espessuras (mm)	Tensão (kV)	Amperagem (mA)	Tempo (s)	IQI ASME Tipo placa	Qualidade de Imagem /laudo
01	16	101	3	60	17	2:1T
02	10	106	3	60	15	2:1T
03	16	106	3	6	17	2:1T
04	5,5	96,5	3	60	10	2:1T
05	36	200	2,9	60	25	2:1T
06	16	123	3	60	17	2:1T
07	5,5	90	3	60	10	2:1T
08	10	123	3	60	15	2:1T
09	10	123	3	60	15	2:1T
10	19	203	3	60	20	2:1T
11	32	168	3	60	25	2:1T
12	32	168	2,9	60	25	2:1T
13	12	114	3	60	15	2:1T
14	16	101	3	60	17	2:1T
15	23	155	3	60	20	2:1T
Distância fonte intensificador – 650 mm						

### 5.4.1 IQI's (qualidade de imagem)

A Figura 49 mostra o resumo dos resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's), encontrados na técnica de fluoroscopia analógica para as 15 peças de ferro fundido na posição 0°.

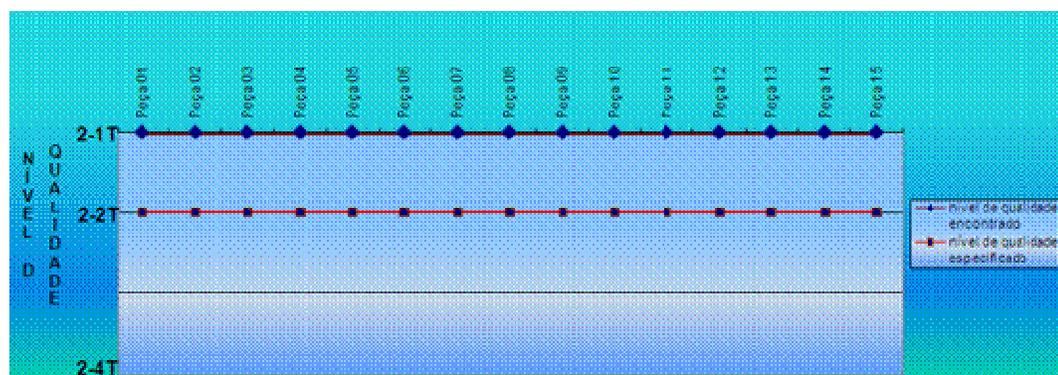


Figura 49 - Resumo dos resultados dos IQI's – Fluoroscopia analógica

Após a elaboração do gráfico dos IQI's na técnica de fluoroscopia analógica nas 15 peças, pode-se observar que todas as radiografias foram encontrados os furos essenciais de 2-1T.

### 5.5 Fluoroscopia digital (parâmetros, qualidade de imagem e laudo)

A Tabela 5 mostra os valores obtidos dos ensaios da fluoroscopia digital para as 15 peças de ferro fundido e os resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)

Tabela 5 resultados dos parâmetros dos ensaios da fluoroscopia digital.

<b>Fluoroscopia Digital</b>						
Parâmetros dos Ensaios						
Peças	Espessuras (mm)	Tensão (kV)	Amperagem (mA)	Tempo (s)	IQI ASME Tipo placa	Qualidade de Imagem /laudo
01	16	100	3	60	17	2:1T
02	10	105	3	60	15	2:1T
03	16	106	3	6	17	2:1T
04	5,5	100	3	60	10	2:1T
05	36	200	3	60	25	2:1T
06	16	120	3	60	17	2:1T
07	5,5	90	3	60	10	2:1T
08	10	125	3	60	15	2:1T
09	10	125	3	60	15	2:1T
10	19	200	3	60	20	2:1T
11	32	170	3	60	25	2:1T
12	32	170	3	60	25	2:1T
13	12	110	3	60	15	2:1T
14	16	105	3	60	17	2:1T
15	23	157	3	60	20	2:1T
Distância fonte intensificador – 650 mm						

### 5.5.1 IQI's (qualidade de imagem)

A Figura 50 mostra o resumo dos resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's) encontrados na técnica de fluoroscopia digital para as 15 peças de ferro fundido na posição 0°.

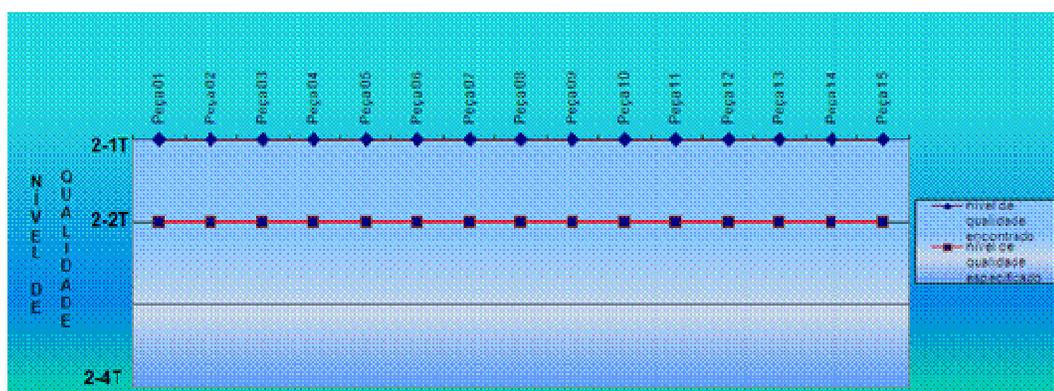


Figura 50 - Resumo dos resultados dos IQI's – Fluoroscopia digital

Após a elaboração do gráfico dos IQI's na técnica de fluoroscopia digital nas 15 peças, pode-se observar que todas as radiografias foram encontrados os furos essenciais de 2-1T.

## 5.6 Comparações dos valores das médias aritméticas dos parâmetros de ensaios com os desvios padrões respectivos, entre as 05 técnicas de captação de imagem.

### 5.6.1 Análise da tensão (kV)

A Figura 51 mostra o resumo dos valores das médias aritméticas com os respectivos desvios padrões dos resultados das tensões das 5 técnicas de captação de imagem.

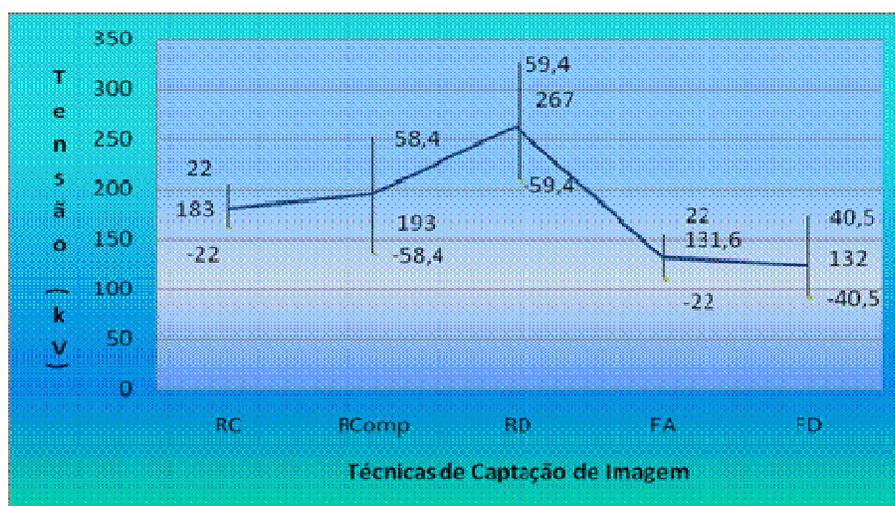


Figura 51 - Valores das médias aritméticas com os respectivos desvios padrões dos resultados das tensões

Pode-se observar que a técnica da radiografia digital apresentou o maior valor de tensão (267,3 kV) e as fluoroscopias analógica e digital as menores tensões (aproximadamente 132 kV), na página 87, Tabela 7 foi calculado os Coeficientes de Variação das tensões, como sendo o desvio padrão dividido pela média aritmética de cada valor, obtendo assim um dado mais expressivo para comparação entre os sistemas de captação de imagem.

### 5.6.2 Análise da Corrente (mA)

A Figura 52 mostra o resumo dos valores das médias aritméticas com os respectivos desvios padrões dos resultados das correntes das 5 técnicas de captação de imagem.

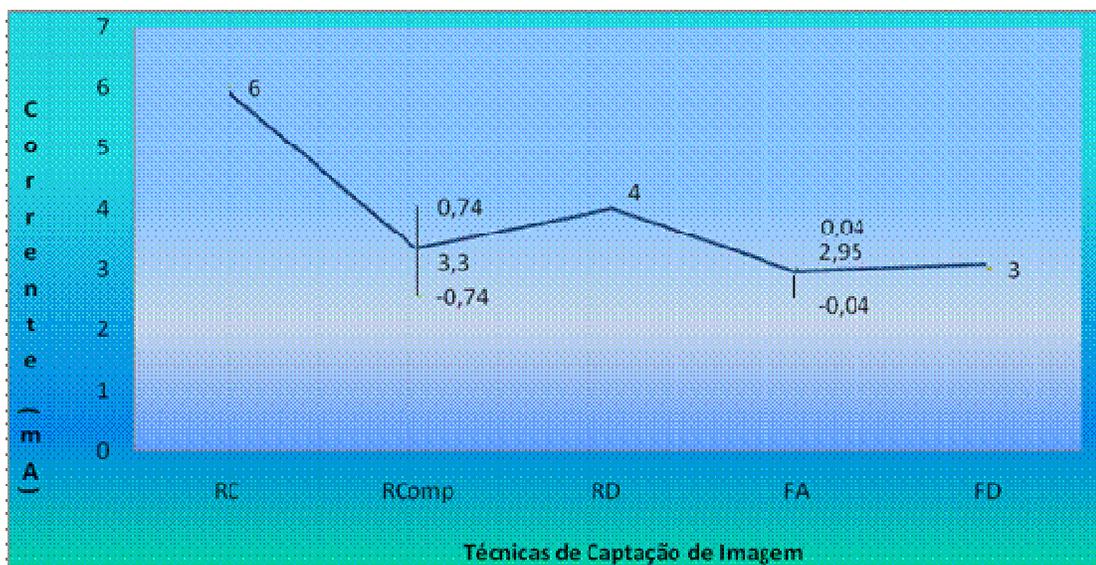


Figura 52 - Valores das médias aritméticas com os respectivos desvios padrões dos resultados das correntes

Após a elaboração do gráfico, pode-se verificar que o maior valor de corrente utilizado foi o da técnica de radiografia convencional (6 mA), sendo praticamente o dobro das demais técnicas, na página 87, Tabela 7 foi calculado os Coeficientes de Variação das correntes, como sendo o desvio padrão dividido pela média aritmética de cada valor, obtendo assim um dado mais expressivo para comparação entre os sistemas de captação de imagem.

### 5.6.3 Tempo (min)

A Figura 53 apresenta os dados estatísticos dos valores do tempo para as 5 técnicas de captação de imagem com os dados das médias aritméticas e do desvio padrão.

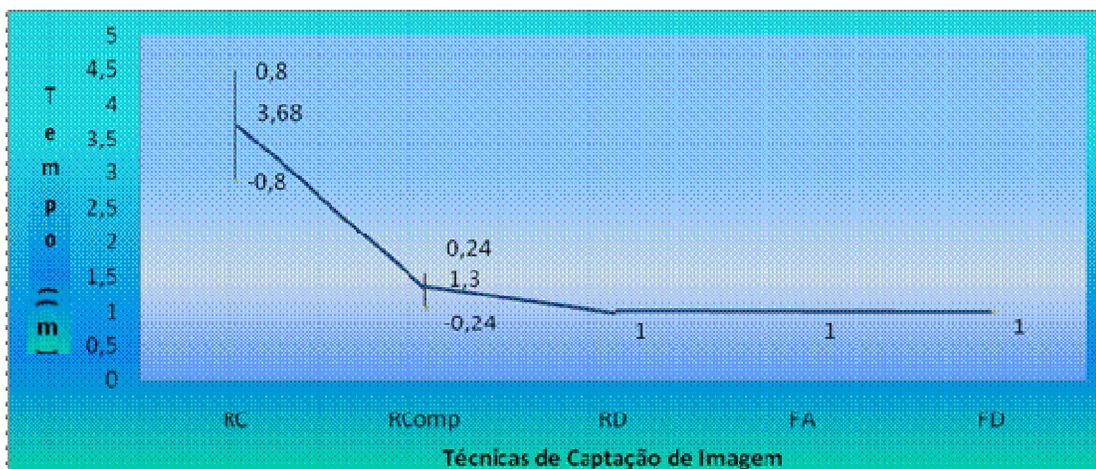


Figura 53 - Valores das médias aritméticas com os respectivos desvios padrões dos resultados dos tempos

Após a elaboração do gráfico, pode-se verificar que o maior valor de tempo utilizado foi o da técnica de radiografia convencional (3,66 min), sendo praticamente o triplo das demais técnicas, na página 87, Tabela 7 foi calculado os Coeficientes de Variação dos tempos, como sendo o desvio padrão dividido pela média aritmética de cada valor, obtendo assim um dado mais expressivo para comparação entre os sistemas de captação de imagem.

#### 5.6.4 – Visibilidade dos furos do IQI

A Tabela 6 permite visualizar os resultados finais da visibilidade dos furos do IQI de cada técnica utilizada.

Tabela 6 mostra a visibilidade dos furos do IQI de cada técnica utilizada.

Sistemas de captação de imagem	2-1T	2-2T	2-4T
Radiografia convencional	10	3	2
Radiografia computadorizada	14	1	
Radiografia digital	11	3	1
Fluoroscopia analógica	15		
Fluoroscopia digital	15		

### 5.6.5 Tabela com a síntese dos dados nas 5 técnicas radiográficas

A Tabela 7 mostra o resumo dos parâmetros dos ensaios em ordem crescente, levando-se em consideração a hipótese formulada, isto é, a escolha do melhor sistema de imagem, para instalação fechada e raios X de potencial constante.

Tabela 7 valores em ordem crescente para as cinco técnicas radiográficas, com os seus respectivos coeficientes de variação.

Sistema de captação de imagem	Energia (kV)	Coeficientes de Variação
F A	131	0,167
F D	132	3,259
R. Conv.	183	0,12
R. Comp.	193	0,302
R D	267	0,222

Sistema de captação de imagem	Corrente (mA)	Coeficientes de Variação
F A	2,95	0,01
F D	3	0,0
R. Comp.	3,3	0,224
R D	4	0,0
R. Conv.	6	0,0

Sistema de captação de imagem	Tempo (min)	Coeficientes de Variação
R D, F A, F D	1	0,0
R. Comp.	1,3	0,184
R. Conv.	3,68	0,217

Sistema de captação de imagem	Furo essencial encontrado nas radiografias		
	2:1T	2:2T	2:4T
F A, F D	15		
R. Comp.	14	1	
R. D	11	3	1
R. Conv.	10	3	2

### **5.7 Resultados dos indicadores de qualidade de imagem (IQI's)**

O apêndice 7 mostra os resultados dos IQI's por peça para todas as técnicas utilizadas neste trabalho.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 Conclusões

Após as análises de todos os parâmetros dos ensaios que foram realizados no campo, pode-se afirmar:

A fluoroscopia analógica foi o sistema de imagem que alcançou os melhores resultados em todos os parâmetros analisados, tendo, portanto, a maior aderência a Norma Nuclear CNEN-NE-3.01, ou seja, a técnica que apresentou os melhores resultados dentro das condições de ensaio propostas neste trabalho.

A fluoroscopia digital apresentou resultados similares a analógica, porém nas análises de energia e corrente os resultados foram menos satisfatórios que na fluoroscopia analógica, mesmo porque o coeficiente de variação foi maior.

A radiografia computadorizada também apresentou bons resultados, apesar de menos satisfatórios que das fluoroscopias. Dentre as técnicas foi a que demandou maior tempo de aprendizado para ajuste de máquinas e software, já que trata-se de um ambiente novo para os profissionais deste mercado.

A radiografia digital foi o 4º sistema de imagem na classificação geral. Nesta técnica foi necessária a utilização de altas energias para se conseguir boas qualidade de imagem, fato que pode ter sido gerado pelo tempo de operação do sistema, em funcionamento a mais de 3 anos, em 3 turnos.

A radiografia convencional foi à técnica que apresentou menor aderência a Norma Nuclear e, logo, o sistema menos capaz dentro dos parâmetros e condições analisadas. Isto já era esperado pelo trabalho, pois apesar de ser a técnica mais utilizada ainda no mercado, trata-se da mais antiga e menos evoluída tecnologicamente.

Portanto, esse trabalho fornece ao leitor um conjunto de dados que constitui uma base de conhecimento que auxiliará o responsável pela instalação radiográfica a decidir pela técnica mais adequada, quando em ambientes de instalações fechadas, utilizando equipamentos de raios X de potencial constante, do ponto de vista da Proteção Radiológica.