



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS EM PROFUNDIDADE  
(ESTEREORADIOGRAFIA)**

**GILBERTO CARVALHO**

Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientador:  
Dr. Gian Maria A.A. Sordi

**São Paulo  
2001**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS EM PROFUNDIDADE**  
**(ESTEREO RADIOGRAFIA)**

**GILBERTO CARVALHO**



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

**Orientador:**

**Dr. Gian Maria A. A. Sordi**

**São Paulo**

**2001**

**À Zuleika, gostaria de dedicar este trabalho**

**Sem sua paciência, compreensão e  
incentivo, a execução deste projeto  
teria sido bem mais difícil.**

## **AGRADECIMENTOS**

**Agradeço ao meu orientador, Dr. Gian-Maria A. A. Sordi, pelo tempo e confiança dedicados à realização deste trabalho.**

**Agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a consecução deste trabalho, em especial aos colegas Sueli Ivone Borrely e Nelson Minoru Omi, sem os quais este trabalho não seria realizado a contento.**

**Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, por ter me proporcionado esta oportunidade.**

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Gamagrafia</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Comparação com os raios-X</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Radiografias bidimensionais e tridimensionais (estereoradiografia)</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Finalidade e objetivos</b>	<b>10</b>
<b>2 TEORIA: DESCONTINUIDADES METÁLICAS E FILMES RADIOGRÁFICOS</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Categorias de descontinuidades metálicas</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1 Descontinuidades metálicas inerentes</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2 Descontinuidades metálicas de processamento</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3 Descontinuidades metálicas de esforço em serviço</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Processos de fundição</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1 Fundição em areia</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Fundição em cera perdida</b>	<b>15</b>
<b>2.2.3 Fundição sob pressão</b>	<b>15</b>

<b>2.2.4 Fundição em casca</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Descontinuidades metálicas encontradas em peças fundidas</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1 Inclusões de escória</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Inclusões de areia</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3 Bolhas gasosas</b>	<b>18</b>
<b>2.3.4 Vazios de contração</b>	<b>19</b>
<b>2.3.5 Porosidades</b>	<b>19</b>
<b>2.3.6 Rachaduras</b>	<b>20</b>
<b>2.3.7 Trincas de contração</b>	<b>20</b>
<b>2.3.8 Peça incompleta</b>	<b>21</b>
<b>2.3.9 Gotas frias</b>	<b>21</b>
<b>2.3.10 Segregação</b>	<b>22</b>
<b>2.3.11 Chapelins não fundidos</b>	<b>22</b>
<b>2.3.12 Interrupção de vazamento</b>	<b>23</b>
<b>2.3.13 Resfriadores</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Considerações sobre alguns processos de forjamento</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1 Forjamento com matriz fechada</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2 Forjamento com matriz aberta</b>	<b>24</b>
<b>2.4.3 Equipamentos usados em forjamento</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3.1 Martelos</b>	<b>25</b>

<b>2.4.3.2 Prensas</b>	<b>25</b>
<b>2.5 Descontinuidades encontradas em peças forjadas</b>	<b>26</b>
<b>2.5.1 Dobras</b>	<b>26</b>
<b>2.5.2 Inclusões</b>	<b>27</b>
<b>2.5.3 Estratificações</b>	<b>27</b>
<b>2.5.4 Rachaduras</b>	<b>27</b>
<b>2.5.5 Trincas térmicas</b>	<b>28</b>
<b>2.5.6 Trincas de solubilidade</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Considerações sobre alguns processos de soldagem</b>	<b>29</b>
<b>2.6.1 Soldagem por fusão</b>	<b>29</b>
<b>2.6.1.1 Soldagem a arco submerso</b>	<b>29</b>
<b>2.6.1.2 Soldagem a arco com gás ativo e metal de adição - Gas Metal Arc(GMA) ou MAG</b>	<b>30</b>
<b>2.6.1.3 Soldagem a arco com gás inerte e sem metal de adição - Gas Tungsten Arc(GTA) ou TIG</b>	<b>31</b>
<b>2.6.1.4 Soldagem a plasma</b>	<b>31</b>
<b>2.6.1.5 Soldagem com feixe eletrônico</b>	<b>32</b>
<b>2.6.1.6 Soldagem a laser</b>	<b>32</b>
<b>2.6.2 Brazagem</b>	<b>33</b>
<b>2.6.3 Soldagem no estado sólido</b>	<b>33</b>
<b>2.6.3.1 Difusão controlada</b>	<b>33</b>

<b>2.6.3.2</b>	<b>Deformação controlada</b>	<b>34</b>
<b>2.7</b>	<b>Descontinuidades encontradas em peças soldadas</b>	<b>34</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Bolhas gasosas</b>	<b>35</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Porosidades</b>	<b>35</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Falta de penetração</b>	<b>36</b>
<b>2.7.4</b>	<b>Falta de fusão</b>	<b>37</b>
<b>2.7.5</b>	<b>Inclusões de escória</b>	<b>37</b>
<b>2.7.6</b>	<b>Fissuras</b>	<b>38</b>
<b>2.7.7</b>	<b>Mordeduras</b>	<b>39</b>
<b>2.8</b>	<b>Filmes radiográficos</b>	<b>39</b>
<b>2.8.1</b>	<b>Descrição de um filme radiográfico</b>	<b>39</b>
<b>2.8.2</b>	<b>Tipos de filmes comerciais</b>	<b>40</b>
<b>2.9</b>	<b>Considerações sobre a sensibilidade radiográfica</b>	<b>43</b>
<b>2.10</b>	<b>Estudo da sensibilidade radiográfica em função da forma das descontinuidades e de sua disposição em relação à direção do feixe incidente</b>	<b>45</b>
<b>2.11</b>	<b>Efeito da radiação espalhada sobre a sensibilidade radiográfica</b>	<b>47</b>
<b>2.12</b>	<b>Variação da sensibilidade radiográfica em função da energia da radiação, da densidade e da espessura do material</b>	<b>50</b>
<b>2.13</b>	<b>Influência da geometria da fonte e da distância fonte-filme sobre a sensibilidade radiográfica</b>	<b>54</b>
<b>2.14</b>	<b>Relação entre a densidade óptica de um filme exposto à radiação e a sensibilidade radiográfica</b>	<b>58</b>



<b>2.15 Efeito das telas intensificadoras de exposição sobre a sensibilidade radiográfica</b>	<b>59</b>
<b>3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Sistema de irradiação e seu controle da qualidade</b>	<b>60</b>
<b>3.1.1 Porta-fonte</b>	<b>60</b>
<b>3.1.2 Ensaio dimensional do porta-fonte</b>	<b>61</b>
<b>3.1.3 Inspeção óptica do porta-fonte</b>	<b>61</b>
<b>3.1.4 Identificação do porta-fonte</b>	<b>62</b>
<b>3.1.5 Ensaio de tração do porta-fonte</b>	<b>63</b>
<b>3.1.6 Fonte de radiação gama</b>	<b>64</b>
<b>3.1.7 Soldagem da cápsula no porta-fonte</b>	<b>64</b>
<b>3.1.8 Irradiador gama</b>	<b>65</b>
<b>3.2 Sistema de captação de imagens</b>	<b>65</b>
<b>3.2.1 Seleção dos filmes radiográficos</b>	<b>65</b>
<b>3.2.2 Telas intensificadoras de exposição</b>	<b>66</b>
<b>3.2.3 Indicadores da qualidade de imagem (IQI)</b>	<b>66</b>
<b>3.2.4 Processamento fotográfico</b>	<b>67</b>
<b>3.2.5 Densitômetro</b>	<b>68</b>
<b>3.2.6 Negatoscópio</b>	<b>69</b>
<b>3.3 Materiais</b>	<b>69</b>
<b>3.3.1 Corpos-de-prova</b>	<b>69</b>

# DETERMINAÇÃO DE DEFEITOS EM PROFUNDIDADE (ESTEREO RADIOGRAFIA)

**Gilberto Carvalho**

## RESUMO

Após a identificação de um defeito interno, mediante o emprego do processo radiográfico, pode ser necessário determinar a sua posição, tanto para avaliar a sua importância em serviço, quanto para decidir de qual lado da solda deve ser cortada a peça, de modo a reduzir a quantidade de material a ser removido, diminuindo em muito o custo do reparo. A visão radiográfica simples não possui perspectiva, não podendo dar a impressão de profundidade, não indicando claramente as posições relativas das várias partes da peça, ao longo da direção da visão. A Estereoradiografia foi idealizada para superar essa deficiência da radiografia comum e requer a realização de duas radiografias, feitas em duas posições diferentes, realizadas com um tubo de raios-X ou uma fonte de radiação gama, posições essas que devem estar separadas por uma distância igual a distância interpupilar normal. No presente trabalho, utilizamos a técnica em um defeito simulado, defeito esse comumente encontrado nos processos de soldagem, no caso poro e apresentamos a eficiência da técnica, suas vantagens e limitações. O material empregado foi o aço comum, 1020, em corpos-de-prova de várias espessuras, abrangendo praticamente todo o intervalo de espessuras de utilização do radioisótopo ( $^{192}\text{Ir}$ ) e poros simulados de diversos diâmetros.

## **DETERMINATION OF DEFECTS IN DEPTH (STEREORADIOGRAPHY)**

**Gilberto Carvalho**

### **ABSTRACT**

After the identification of an internal defect by means of a single radiographic process, it can be necessary to determine its position, to evaluate the importance of the service and to specify which side of the weld should be cut in order to reduce the amount of material and to reduce the repairing cost. The single radiography image does not have perspective and cannot show the tridimensional vision, and therefore, it does not clearly indicate the relative positions of the various parts of the object in the vision line. Stereoradiography was idealized to overcome that limitation of the standard radiography and it requires two exposures separated by the normal interpupillary distance. In the present work, it was used this technique in a simulated pore defect, commonly found in the welding processes. Additionally, we present the efficiency of the technique and also its advantages and limitations. The material used was SAE 1020 steel, in pieces of several thickness covering the thickness range limited by the  $^{192}\text{Ir}$  source .

## 1 INTRODUÇÃO

Na Engenharia de um modo geral e em particular nos ramos que se ocupam com máquinas e estruturas, é necessário que os materiais envolvidos tenham um grau de qualidade compatível com os usos a que se destinam, sob pena de provocarem acidentes, às vezes graves, pondo em risco patrimônios valiosos e principalmente, vidas humanas.

As características desses materiais devem ser bem conhecidas e isso se consegue mediante ensaios que permitem determinar propriedades químicas, mecânicas, térmicas, elétricas, ópticas, etc.

Assim como muitos desses ensaios exigem a destruição dos corpos-de-prova e protótipos, há outros ensaios, chamados de não destrutivos, END<sup>(2,9,12,22,24,29)</sup>, que após suas realizações, não deixam quaisquer vestígios ou provocam quaisquer danos nas peças ensaiadas. Dentre as múltiplas técnicas END, existem aquelas que envolvem a radiação X e gama<sup>(10,15,21,22)</sup>. Estas técnicas são amplamente conhecidas, sendo intensivamente utilizadas industrialmente. No caso da radiação gama, o radioisótopo mais utilizado, na maioria dos ensaios, é o  $^{192}\text{Ir}$ <sup>(19,23,25)</sup>, principalmente em peças soldadas. A técnica que emprega a radiação gama, é conhecida como gamagrafia.

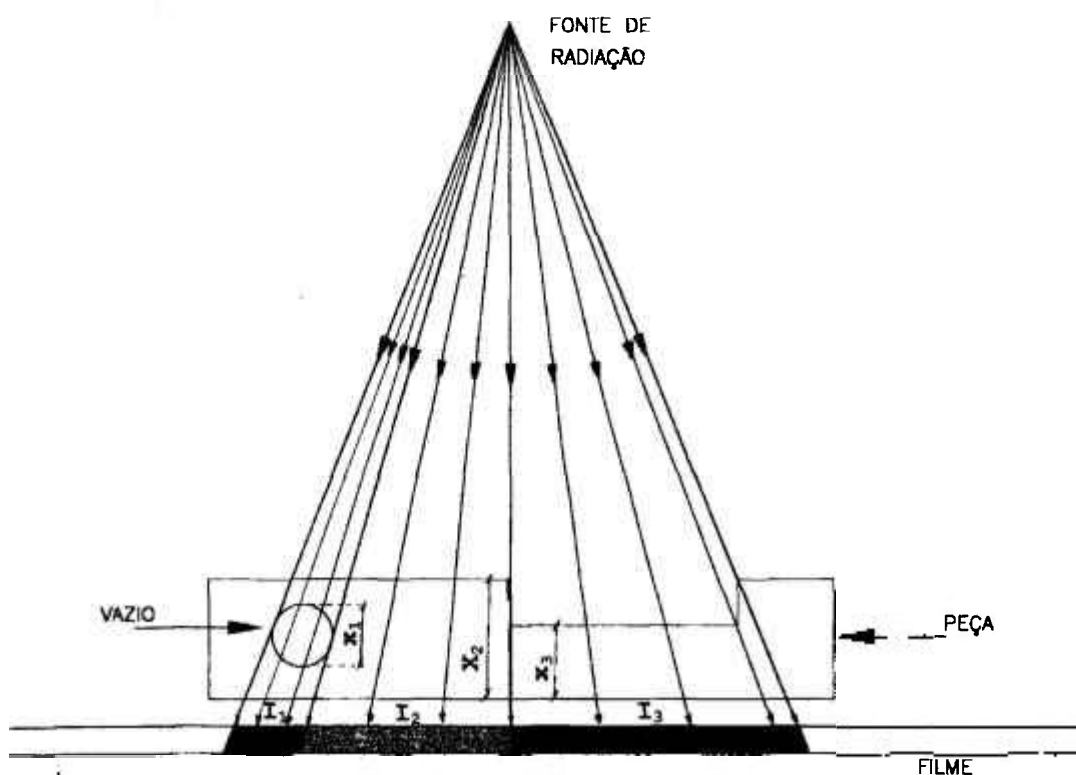
Os termos em **negrito** estão definidos no **ANEXO**, a partir da página 92.

## 1.1 Gamagrafia

A gamagrafia<sup>(2,8,9,19,25,26)</sup> é um método não destrutivo que utiliza a capacidade de penetração dos raios gama na matéria, para detectar eventuais descontinuidades, por meio do maior ou menor poder de atenuação da radiação na matéria, com o objetivo de fornecer as informações indispensáveis ao controle da qualidade do produto ensaiado. Esta técnica caracteriza-se por produzir uma imagem visível, em filme radiográfico, de toda a estrutura interna dos materiais ensaiados.

Assim, para a realização de um ensaio pela técnica da gamagrafia, precisa-se basicamente, de uma fonte de radiação gama, uma peça, que pode ser um conjunto lacrado, um fundido ou uma solda e um filme radiográfico, para registro do ensaio.

Supondo uma fonte de radiação gama, que emita um feixe de radiação, de intensidade  $I_0$ . Ao interagir com uma peça de espessura  $x_2$ , que contem uma descontinuidade de espessura  $x_1$  e uma secção rebaixada, com espessura  $x_3$ , a radiação é atenuada diferentemente em cada uma dessas espessuras, provocando variações nas intensidades dos feixes emergentes,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , que atingem o filme radiográfico, causando maior ou menor escurecimento no filme (**densidades ópticas** diferentes) após processamento, conforme é mostrado na Figura 1. São essas diferenças nas densidades ópticas que permitem analisar a estrutura da peça. Este é o princípio básico de um ensaio por gamagrafia.



$x_1$  - espessura da descontinuidade

$x_2$  - espessura da peça

$x_3$  - espessura da seção rebaixada da peça

$I_1$  - intensidade do feixe de radiação gama que incide sobre o filme radiográfico após passar pela descontinuidade

$I_2$  - intensidade do feixe de radiação gama após passar pela espessura da peça

$I_3$  - intensidade do feixe de radiação gama após passar pela seção rebaixada

Figura 1 - Princípio do ensaio radiográfico

As principais fontes de radiação gama de uso corrente em gamagrafia estão listadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Fontes de radiação gama de uso corrente**

Fontes Gama	Número de Massa	Meia-vida	Constante específica (*)	Energias (MeV)	Espessuras máximas de ensaio (mm de aço)
Césio (Cs)	137	30 anos	2,440	0,66	88,9
Cobalto (Co)	60	5,3 anos	9,134	1,17 e 1,33	228,6
Írídio (Ir)	192	74 dias	3,347	0,137 a 0,651	63,5
Túlio (Tm)	170	128 dias	0,174	0,084 e 0,054	12,7
Itérbio (Yb)	169	32 dias	0.871	0,063 a 0,308	15,0
Selênio (Se)	75	120 dias	1,415	0,066 a 0,410	30,0

(\*)Constante específica no ar em  $\frac{\mu\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{kg} \cdot \text{h} \cdot \text{GBq}}$ .

Os laudos técnicos decorrentes de um ensaio não destrutivo, pela técnica da gamagrafia permitem:

- a) indicar o grau da qualidade do material ensaiado, sem prejuízo de sua estrutura;
- b) separar os materiais que têm qualidade aceitável, dos demais, levando-se em conta, critérios estabelecidos por meio de comparações, com padrões pré-determinados;
- c) identificar a presença de falhas, nos processos de fabricação;
- d) classificar a natureza das descontinuidades estruturais, que podem se transformar em futuras falhas mecânicas, quando a peça ensaiada for colocada em serviço.

As principais vantagens na utilização da gamagrafia, como técnica não destrutiva, são:

- a) possibilitar o controle da qualidade da grande maioria dos materiais metálicos;
- b) possibilitar a manutenção de um registro duradouro do ensaio, por meio da impressão da imagem do corpo de prova em filme radiográfico;
- c) permitir a visualização da estrutura interna dos materiais, sem danificá-los;
- d) fornecer informações que permitam identificar falhas em processos de fabricação, possibilitando ações corretivas.

Por outro lado, considera-se a existência de dois tipos de limitações na utilização da gamagrafia, um de natureza física e outro de caráter econômico.

As limitações de natureza física dizem respeito à sensibilidade desejada na obtenção da qualidade radiográfica e podem ser subdivididas em relação a geometria e tamanho.

- a) Algumas peças, de geometria complexa, são difíceis de serem ensaiadas por gamagrafia, pois não se consegue a sensibilidade desejada.
- b) Peças com espessura superior a 60 mm **equivalentes ao aço**, limitam e tornam a qualidade radiográfica inaceitável, ainda que se utilize filmes de granulação mais fina e portanto com a qualidade de imagem melhorada.



As principais limitações econômicas são de natureza variada e pode-se, dentre elas, citar a necessidade de: se ter vários tipos de fontes de radiação, sua troca periódica (de acordo com as meias-vidas), obediência a normas<sup>(14,15)</sup>

e regulamentos, uso de equipamentos sofisticados, exigências de calibração, mão de obra qualificada, etc.

## 1.2 Comparação com os raios-X

Como os dois tipos de equipamentos utilizados para END são similares, justifica-se confrontá-los pois pode-se avaliar quando um é preferível ao outro. Para tanto, confrontar-se-á os parâmetros em jogo, para a realização do END pelos dois tipos de equipamentos (Ver Tabela 2) <sup>(8,9,11,26)</sup>.

Tabela 2 – Comparação entre os parâmetros que influem no ensaio radiográfico, por raios-X e raios gama

<b>Parâmetros</b>	<b>Raios-X</b>	<b>Raios gama</b>
Definição de imagem	Excelente	Boa
Mobilidade do equipamento	Pequena	Grande
Refrigeração	Necessária	Desnecessária
Alimentação elétrica	Necessária	Desnecessária
Acompanhamento da operação	Necessária	Desnecessária
Contaminação radioativa	Nenhuma	Possível
Blindagem em operação	Necessária	Necessária
Blindagem após a operação	Desnecessária	Necessária
Segurança de operação	Rígida	Rígida
Investimento inicial	Maior	Menor
Manutenção	Maior	Menor

Da Tabela 2 deduz-se que, se a aplicação do ensaio for executado em fábrica, os raios-X são mais vantajosos, desde que seja respeitada a relação de sua energia com aquela da energia gama, em termos de penetração na matéria, sua definição de imagem é melhor, não há perigo de contaminação radioativa e não há necessidade de local especial para guarda do equipamento, pois uma vez desligado da tomada, não produz radiação residual.

Ao contrário, se a peça a ensaiar apresentar formas mais complexas e além disso, o ensaio for no campo, sem a existência de alimentação elétrica, o uso da radiação gama, é a opção correta e melhor.

### **1.3 Radiografias bidimensionais e tridimensionais (estereoradiografia)**

A imagem radiográfica comum é apresentada em apenas duas dimensões, comprimento e largura, faltando portanto uma terceira dimensão, a profundidade.

Quando se fizer necessário, a utilização desse recurso, deve-se lançar mão da estereoradiografia<sup>(9,10,25,26)</sup>.

Os objetos vistos com um par de olhos normais aparecem na sua perspectiva tridimensional e em sua correta relação espacial. No entanto, cada olho recebe uma imagem, ligeiramente diferente do outro e que, por processos cerebrais envolvidos na visão, são combinadas, para dar a sensação de três dimensões. Esta perspectiva tridimensional é conseguida em decorrência da natural visão estereoscópica do indivíduo.

Uma imagem radiográfica simples não se apresenta em perspectiva, impedindo que o observador tenha a sensação de profundidade. Assim, ela deixa de indicar claramente, as posições relativas das várias partes do objeto, ao longo da direção da visão. A estereoradiografia, idealizada para superar essa deficiência da radiografia comum, requer duas radiografias feitas em duas posições, separadas por uma distância igual à distância interpupilar, portanto, tenta-se simular o par de olhos.

Essas radiografias devem ser vistas em um estereoscópio, instrumento formado por prismas e espelhos e mediante um determinado arranjo, cada olho visualiza uma única radiografia, do par que constitui a estereoradiografia. De modo análogo ao processo comum da visão, o cérebro funde as duas imagens em uma única, onde as várias partes do objeto se projetam em relevo, proporcionando uma perspectiva real e sua correta relação espacial.

A radiografia exposta na posição que corresponde à direita da fonte emissora de radiação, é vista pelo olho direito e a que foi exposta pelo lado esquerdo, é vista pelo olho esquerdo. A visão das radiografias deve ser exatamente análoga a que se obteria, quando os olhos do observador ocupassem as mesmas posições que a fonte radioativa, nas duas posições de exposição. Os olhos do observador vêem a imagem radiográfica do objeto, de maneira análoga como a fonte radioativa “vê” o objeto real, por ocasião das exposições. Na Figura 2 mostra-se a representação esquemática do método estereoradiográfico e o diagrama de um visor estereoscópico, na Figura 3.

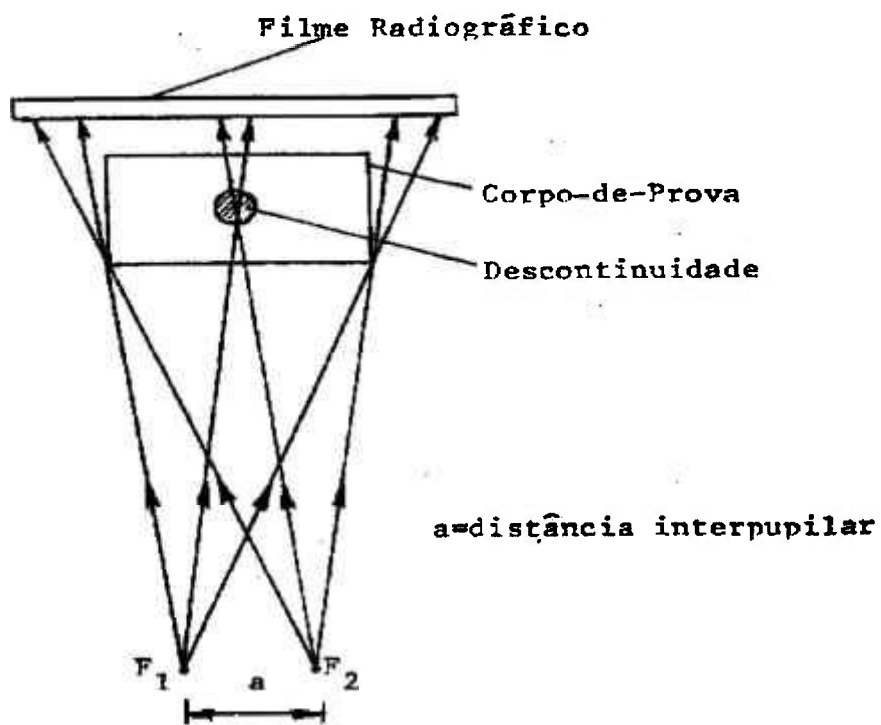


Figura 2 – Representação esquemática do método estereoradiográfico

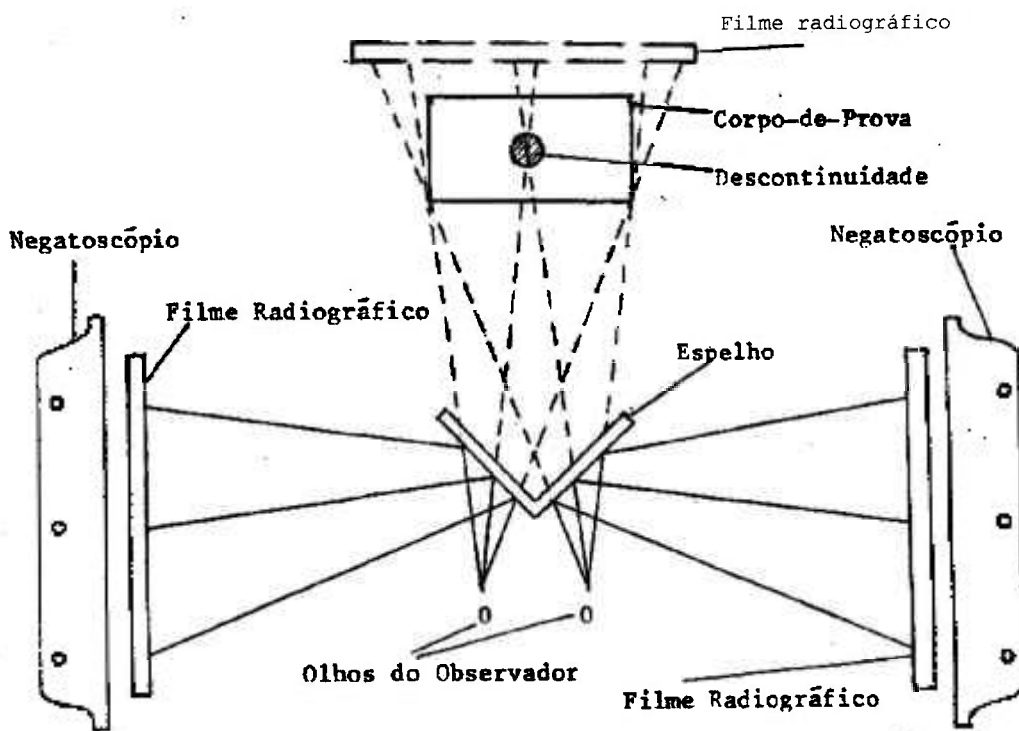


Figura 3 – Diagrama de um visor estereoscópico

## 1.4 Finalidade e objetivos

A finalidade do presente trabalho é demonstrar a aplicabilidade da técnica da estereoradiografia<sup>(8,9,25)</sup>, na avaliação da profundidade de **defeitos** detectados pela gamagrafia, por meio da simulação de **defeitos** induzidos em peças metálicas, especialmente àquelas submetidas a processos de soldagem. Além disso, estudar-se-á a sensibilidade do método, principalmente com relação as limitações físicas mencionadas no item 1.1.

Para tanto, devemos alcançar os seguintes objetivos, que conduzirão à finalidade proposta com relação as características das descontinuidades e os diferentes tipos de filmes radiográficos:

- Enumerar as categorias de descontinuidades metálicas;
- Descrever os processos de fundição e suas descontinuidades;
- Descrever os processos de forjamento e descontinuidades encontradas;
- Descrever os principais processos de soldagem e suas descontinuidades;
- Identificar as características dos filmes comerciais e sua variação de sensibilidade em função: das características das descontinuidades, da energia da radiação, da densidade e espessura do material, da geometria de irradiação, da radiação espalhada, da **densidade óptica** e das diferentes espessuras das **telas intensificadoras** de exposição.

Com relação ao porta-fonte e a fonte propriamente dita, dever-se-á ensaiá-los em conformidade com as normas internacionais, para a sua aptidão em uso.

Deve-se construir os corpos-de-prova, a serem usados na experiência e também as **telas intensificadoras** e ensaiá-las para se verificar a sua integridade e adequabilidade para a geometria de irradiação.

Por fim, deverão ser efetuados ensaios preliminares com todos os corpos-de-prova, para poder-se obter as especificações para a realização do ensaio estereoradiográfico<sup>(9,10,25,26)</sup> final.

## **2 TEORIA: DESCONTINUIDADES METÁLICAS E FILMES RADIOGRÁFICOS**

Como a gamagrafia visa detectar eventuais descontinuidades na matéria, estudar-se-á neste capítulo em primeira instância, as principais categorias de descontinuidades metálicas, para em seguida se analisar os processos de formação das peças, em decorrência da tecnologia de fabricação, ou do processo de usinagem da peça e as principais descontinuidades encontradas nesses dois processos. Em segunda instância estudar-se-á as características do filme radiográfico e o seu comportamento com relação à visualização das diferentes descontinuidades metálicas.

### **2.1 Categorias de descontinuidades metálicas<sup>(2,9,25,26)</sup>**

As descontinuidades metálicas podem ser divididas em três categorias principais, a saber, inerentes, de processamento e de esforço em serviço.

## **2 TEORIA: DESCONTINUIDADES METÁLICAS E FILMES RADIOGRÁFICOS**

Como a gamagrafia visa detectar eventuais descontinuidades na matéria, estudar-se-á neste capítulo em primeira instância, as principais categorias de descontinuidades metálicas, para em seguida se analisar os processos de formação das peças, em decorrência da tecnologia de fabricação, ou do processo de usinagem da peça e as principais descontinuidades encontradas nesses dois processos. Em segunda instância estudar-se-á as características do filme radiográfico e o seu comportamento com relação à visualização das diferentes descontinuidades metálicas.

### **2.1 Categorias de descontinuidades metálicas<sup>(2,9,25,26)</sup>**

As descontinuidades metálicas podem ser divididas em três categorias principais, a saber, inerentes, de processamento e de esforço em serviço.



### **2.1.1 Categorias metálicas inerentes**

As descontinuidades metálicas inerentes estão relacionadas com a solidificação do metal e podem ser encontradas em peças fundidas e forjadas.

Em peças fundidas, elas se formam durante os processos de fusão, fundição, e solidificação. Incluem-se nesta categoria, as descontinuidades provenientes do enchimento incorreto dos moldes, das temperaturas envolvidas, dos sistemas de vazamentos do metal, da retenção dos gases, etc.

Em peças forjadas, elas aparecem durante os processos de fusão e solidificação originais, do metal e do lingote.

### **2.1.2 Descontinuidades metálicas de processamento**

As descontinuidades metálicas que aparecem durante o processamento das peças, estão relacionadas com os diferentes processos de fabricação, tais como, a extrusão, a soldagem, a laminação, o tratamento térmico, etc.

### **2.1.3 Descontinuidades metálicas de esforço em serviço**

As descontinuidades metálicas provenientes das condições de serviço, a que são submetidas as peças, estão relacionadas com o ambiente

corrosivo, o excesso de tensão aplicada, a fadiga acentuada, compressão excessiva, pressão, etc.

## **2.2 Processos de fundição**

Os vários processos de fundição<sup>(2,4,9,26)</sup>, consistem em verter metal fundido no interior de um molde, com o formato da peça desejada. Os principais processos de fundição, são os seguintes: fundição em areia, fundição em cera perdida, fundição sob pressão e fundição em casca.

Discorreremos sucintamente sobre eles, com a finalidade de fornecer informações que permitam um melhor entendimento do processo de formação das descontinuidades metálicas.

### **2.2.1 Fundição em areia**

É dentre todos os processos, o mais comum e mais econômico, pois dispensa a secagem do molde em estufa. Essa secagem onera o processo, porque depende do teor de umidade da areia, da temperatura, da capacidade calorífica da estufa e do tamanho do molde.

Para a moldagem são usadas duas caixas, uma superior e outra inferior. O plano ou superfície das caixas que se mantêm em contato, recebe a denominação de plano de apartação. A forma da peça é obtida por meio de um modelo, ao redor do qual, a areia é socada. Após a retirada desse modelo, tem-

se a cavidade do molde, pronta para ser preenchida com o metal fundido, o que é feito mediante o uso de um canal vertical de entrada, chamado canal de descida. Esse canal comunica-se com outro, situado no plano de apartação, que se liga à cavidade do molde. Quando for indispensável o uso de mais um canal de entrada, usa-se um canal horizontal, chamado de distribuidor.

### **2.2.2 Fundição em cera perdida**

Este processo também é conhecido pela denominação de fundição de precisão. Consiste em fabricar um modelo de cera, revestido com material apropriado, como a sílica e com um pó aglutinante.

Depois da secagem do revestimento, o molde é invertido e colocado em forno, para a fusão da cera, que escoar por um orifício, permitindo com isso, a reprodução exata da cavidade do molde. Peças fundidas para uso industrial, são obtidas por esse processo, variando desde poucas gramas até quilos, com espessuras mínimas, de até 0,3 mm e tolerância de mais ou menos 0,03 mm. É um processo muito utilizado na fabricação de peças de geometria complexa e de difícil usinagem, como lâminas de compressores para motores a jato, partes de carburadores de aviões, garras de projetores de cinema, etc.

### **2.2.3 Fundição sob pressão**

Na fundição sob pressão, o metal não ferroso é introduzido, no estado líquido, em um molde metálico, chamado matriz. Para a injeção do

metal líquido, usa-se uma máquina especial, de fundição sob pressão. A velocidade de entrada do metal líquido deve ser elevada mas insuficiente para provocar a pulverização do metal líquido. O ar que se encontra na matriz deve ser expulso pelas ranhuras existentes, que por apresentarem mudanças bruscas de direção, impedem o metal líquido de atingir o operador.

Quando a velocidade de solidificação é muito grande, não se usa alimentadores, como acontece na fundição em areia e em moldes permanentes. Assim, torna-se necessário dispor de secções finas, que apresentam cavidades de contração de eixo central. A fundição sob pressão proporciona vantagens de economia de material e de mão de obra, além de aumento na velocidade de produção. As porosidades encontradas em peças fabricadas por esse processo, podem ser provenientes do acúmulo de grande volume de metal, em determinado ponto, de impurezas contidas na matriz ou no metal injetado ou ainda , de gases contidos no metal. Ao contrário da fundição em areia, a espessura máxima admissível é de 5 mm, aproximadamente. A espessura mínima depende do tipo de máquina, do metal usado e do desenho da peça. As principais ligas usadas são as de zinco e mais recentemente, as de alumínio.

#### **2.2.4 Fundição em casca**

O processo conhecido como fundição em casca (shell molding) consiste na fabricação de um molde com casca refratária, por meio de areia e resina, com baixa rugosidade, alta permeabilidade e isenta de umidade.

O espaço situado entre a casca e a caixa de moldagem, é preenchido com cascalho ou areia. Basicamente, o processo é realizado nas etapas seguintes:

- fabricação de modelo metálico, com canais, em que uma parte é presa a uma matriz, também metálica, de acordo com o plano de apartação;
- aquecimento;
- colocação sobre uma caixa depósito, contendo mistura areia-resina;
- giro do conjunto, provocando queda de mistura sobre o modelo, formando a casca;
- aquecimento da casca(cura).

De maneira análoga, constrói-se a casca correspondente à outra parte do modelo. A junção das duas partes forma o molde.

### **2.3 Descontinuidades metálicas encontradas em peças fundidas<sup>(2,4,9,26)</sup>**

As principais descontinuidades provenientes dos processos de fundição são as seguintes: inclusões de escória; inclusões de areia; bolhas gasosas; vazios de contração; porosidades; rachaduras; trincas de contração; peça incompleta; gotas frias; segregação; chapelins não fundidos; interrupção de vazamento; resfriadores.

### **2.3.1 Inclusões de escória**

As inclusões de escória são formadas durante a fase de vazamento, decorrente do enchimento da cavidade do molde. Além disso, o uso de sucata muito oxidada, pode provocar o aparecimento de escória em excesso, que é arrastada para o interior da peça.

### **2.3.2 Inclusões de areia**

Quando o molde não é preparado convenientemente, isto é, com a granulometria adequada, para a peça desejada e além disso, quando o molde não está devidamente compactado, a corrente do metal líquido pode desprender porções do molde, incorporando-os à massa fundida. Da mesma forma, se a alimentação do molde for mal conduzida, por erro do operador ou por projeto incorreto do molde, dos alimentadores ou dos canais de descida, a areia pode ser incorporada à massa fundida.

### **2.3.3 Bolhas gasosas**

As bolhas gasosas podem aparecer em decorrência da ventilação imprópria dos machos, pelo uso inadequado da areia de fundição ou pela sua compactação exagerada.

### **2.3.4 Vazios de contração**

O aparecimento de vazios de contração, indica alimentação insuficiente ou solidificação não progressiva, na direção dos alimentadores. Os vazios de contração superficial, quando acompanhados de grãos muito grandes, indicam temperaturas de vazamento elevadas.

Outra causa desse tipo de descontinuidade, é o socamento muito duro do molde, diminuindo a permeabilidade do molde e possibilitando a retenção de gases.

### **2.3.5 Porosidades**

Porosidades são descontinuidades constituídas por pequenos orifícios, de forma arredondada ou angular, que geralmente se distribuem por toda a parte interna da peça. De modo geral, essas descontinuidades aparecerão em maior número quanto mais elevada for a temperatura de vazamento e menor a velocidade de solidificação.

Estas descontinuidades caracterizam-se pela presença de gás dissolvido no metal, durante o processo de solidificação, em decorrência do resfriamento lento e da utilização de areia de permeabilidade baixa e teor de umidade alto.

### 2.3.6 Rachaduras

Os lingotes ou peças fundidas apresentam frequentemente rachaduras, que podem ser superficiais ou internas. A origem dessas discontinuidades está nas tensões excessivas que se desenvolvem durante o resfriamento ou reaquecimento rápidos, durante o trabalho de laminação ou forjamento.

Outro fator influente são as tensões, que aparecem quando a parte interna das peças atinge a temperatura de 723°C e a externa encontra-se à temperatura mais baixa. Nesta temperatura ocorre uma transformação exotérmica, resultando em determinado reaquecimento, com a consequente dilatação do metal. Isto pode provocar tensões elevadas nas camadas exteriores, a ponto de rachá-las. Da mesma forma, tensões elevadas podem ocorrer durante a contração do lingote, provocadas pela rugosidade interna da lingoteira e por impurezas aderidas às suas superfícies internas. Nas arestas dos lingotes, podem ocorrer rachaduras mais graves, pela pouca aderência dos grandes grãos dendríticos, no encontro das arestas e na bissetriz do ângulo da lingoteira.

### 2.3.7 Trincas de contração

Embora os metais apresentem de modo geral, grande utilidade a temperaturas elevadas, há uma faixa, próxima à temperatura de solidificação, em que se tornam quebradiços ou frágeis.



As trincas de contração que se desenvolvem nesta faixa de temperatura, têm como origem a presença de quantidade de líquido pequena nos contornos dos grãos, na fase final de solidificação. Se uma ligeira tensão é aplicada, ocorre a ruptura, que não é preenchida porque não há metal líquido suficiente para tal, uma vez que a solidificação já está praticamente concluída. Essa fonte de tensão, responsável pelas trincas, tanto pode ser da interação do molde com o fundido, como da contração diferencial do fundido.

### **2.3.8 Peça incompleta**

A falta de enchimento do molde pode ser proveniente da temperatura insuficiente do metal fundido ou ainda de sua pequena fluidez.

### **2.3.9 Gotas frias**

Ao verter o metal líquido no molde, pequenas gotas respingam nas suas paredes, resfriando-se com rapidez e oxidando-se superficialmente. Algumas permanecem aderidas às paredes, outras soltam-se e caem novamente na massa metálica, que as retêm.

As gotas que permanecem fixas às paredes do molde, não se aderem completamente ao fundido, pela presença da película de óxido,

constituindo-se em descontinuidade superficial, que recebe a denominação de gota fria.

### **2.3.10 Segregação**

O aço é uma liga de Fe-C que contém como impurezas normais, outros tipos de metais e metalóides, como o enxofre e o fósforo. No estado fundido, estes metalóides encontram-se perfeitamente dissolvidos, sendo bem menos solúveis no metal, quando ele se encontra no estado sólido. Assim, à medida que a solidificação se processa, as impurezas vão sendo expulsas para a fase líquida e como a solidificação começa da parte externa para a interna, pois no centro o resfriamento é mais lento e as impurezas fazem baixar o ponto de solidificação, elas vão se acumular na região central do lingote ou do molde. Ao acúmulo de impurezas nessa região, dá-se o nome de segregação.

### **2.3.11 Chapelins não fundidos**

Os chapelins são peças metálicas utilizadas na moldagem, sendo fusíveis à passagem da corrente líquida do metal. Se esta fusão não ocorrer, há a formação de interfaces e com elas, as descontinuidades.

### **2.3.12 Interrupção de vazamento**

A ausência de união metalúrgica, ocasionada pelo acréscimo de metal líquido sobre uma camada de metal já solidificada, no molde, recebe a denominação de interrupção de vazamento.

### **2.3.13 Resfriadores**

Os resfriadores são peças de material refratário ou de metal, usadas interna e externamente aos moldes, para auxiliar a solidificação de secções das peças moldadas, tornando-as mais eficazes, evitando a formação de pontos quentes e favorecendo a solidificação direcional, para impedir a formação de cavidades de contração.

Quando a superfície dos resfriadores apresentam umidade, poderá haver o aparecimento de bolhas gasosas.

Nos moldes com areia seca, os aglutinantes orgânicos provocam aparecimento de gases, originando um depósito sobre os resfriadores durante a secagem do molde, que invariavelmente provoca a fusão incompleta e às vezes, o surgimento de bolhas gasosas.

## **2.4 Considerações sobre alguns processos de forjamento**

O forjamento<sup>(2,3,9,26)</sup> é uma das mais versáteis operações de metaloplastia, sendo empregada frequentemente nas operações primárias e de acabamento.

Genericamente, o processo de forjamento é dividido em dois tipos:

- com matriz fechada;
- com matriz aberta.

### **2.4.1 Forjamento com matriz fechada**

Na forja, com matriz fechada, o material é deformado entre duas meias matrizes, que conduzem à forma final desejada. O excesso de material escoava pelo interplano das matrizes.

### **2.4.2 Forjamento com matriz aberta**

Na forja, com matriz aberta, a peça a ser trabalhada contata a matriz somente em algumas partes da superfície. No caso ideal, sem atrito, o material deforma-se uniformemente e por completo, mantendo a forma

cilíndrica. Em casos reais, pela presença do atrito na interface ferramenta-peça, a forma final torna-se semelhante a de um barril.

### **2.4.3 Equipamentos usados em forjamento**

O equipamento fundamental para forja, pode ser dividido em dois grupos, que dependem do tipo de energia da fonte: martelos e prensas.

#### **2.4.3.1 Martelos**

Nos martelos, obtêm-se a energia de deformação, pela desaceleração de um êmbolo percussor ou aríete. Do ponto de vista tecnológico, somente importa a velocidade do impacto do êmbolo, não interessando o meio de obtenção da velocidade inicial. Essa desaceleração depende da relação entre a energia armazenada e a energia requerida para a operação de forja. Quando a energia do êmbolo percussor é muito grande, o excesso pode ser absorvido por uma bigorna.

#### **2.4.3.2 Prensas**

A energia cinética armazenada nas partes móveis das prensas é pequena, para a deformação desejada da peça, havendo necessidade do uso de

um sistema de fornecimento de energia durante o curso do êmbolo. As prensas podem ser hidráulicas ou mecânicas, sendo as primeiras operadas por meio de bomba direta e as segundas, por um volante acoplado ao mecanismo que movimentava o êmbolo percussor.

## **2.5 Descontinuidades encontradas em peças forjadas<sup>(2,3,9,26)</sup>**

As principais descontinuidades encontradas em peças forjadas são: dobras; inclusões; estratificações; rachaduras; trincas térmicas e trincas de solubilidade.

### **2.5.1 Dobras**

Numerosas descontinuidades podem se originar em operações que precedem o forjamento. As dobras nas barras laminadas podem permanecer ocultas até a peça ser prensada, ou podem aparecer durante a operação de forjamento, pela ausência de escoamento do material. Uma dobra típica do forjamento, com matriz fechada, forma-se quando o metal escoava e passa por uma parte da cavidade da matriz já preenchida. Essa ocorrência deve-se a um projeto deficiente da matriz (raios muito pequenos), a um resfriamento excessivo ou ainda a um atrito muito grande.

### **2.5.2 Inclusões**

São provenientes do lingote ou do processo de fundição. A forja ou a mudança de perfil, efetuada no estágio subsequente, provoca modificação da forma dos corpos não metálicos inclusos, considerados plásticos à temperatura de trabalho do metal. Em algumas peças forjadas espessas, as inclusões são proporcionais às dimensões das peças e por isso, são mais facilmente detectadas. Por outro lado, existem numerosas peças forjadas, de pequenas dimensões, em cujo interior se encontram inclusões fracionadas em pequenas porções, de difícil detecção.

### **2.5.3 Estratificações**

As crostas soltas ou os resíduos lubrificantes acumulados nas partes profundas da matriz, podem dar origem a bolsões de aparas ou vazios, que se constituem em descontinuidades metálicas.

### **2.5.4 Rachaduras**

As rachaduras podem aparecer, quando o processo de forjamento se desenvolve em baixas temperaturas, por insuficiência de tempo, para que a transmissão de calor se processe convenientemente ou por ocorrência de uma contração violenta da massa metálica. A rachadura produzida durante o

processo de forjamento também pode ser interna, produzindo mudança brusca de seção da peça.

### **2.5.5 Trincas térmicas**

Uma mudança brusca no comportamento dos processos de aquecimento ou de resfriamento do metal, durante o forjamento, pode provocar o aparecimento de contrações irregulares no interior da peça, que conduzem a rupturas inevitáveis.

### **2.5.6 Trincas de solubilidade**

As trincas em materiais de aço liga, provêm da diferença de solubilidade do hidrogênio, no metal líquido e no metal sólido. Durante o processo de solidificação, o hidrogênio é expulso da solução e se difunde rapidamente, sob a forma de átomos, resultando em inclusão microscópica. Posteriormente, ele se recombina e volta à forma molecular, criando grandes pressões, que podem provocar o aparecimento de trincas minúsculas.

O número de discontinuidades que podem aparecer durante o processo de forjamento é muito grande e suas causas somente podem ser determinadas com precisão, quando se faz uma análise crítica do processo completo, desde o recebimento da matéria-prima até a operação de acabamento da peça.



## **2.6 Considerações sobre alguns processos de soldagem**

Os principais processos de soldagem<sup>(2,5,9,26,28)</sup> atualmente em uso, são:

- soldagem por fusão;
- brazagem;
- soldagem no estado sólido.

### **2.6.1 Soldagem por fusão**

Este processo é sem dúvida o mais usado na junção de metais, podendo ser aplicado a quase todos os materiais. Por definição, o processo por fusão abrange todos os processos de solda, em que as partes a serem soldadas, são fundidas para formar a junta final. As técnicas de soldagem por fusão incluem os processos onde o calor é gerado por arco elétrico, por fluxo de elétrons ou pela luz (laser).

#### **2.6.1.1 Soldagem a arco submerso**

A soldagem a arco submerso é um processo onde a coalescência é produzida pelo aquecimento, entre um eletrodo metálico não revestido e a peça. No processo não se usa pressão, obtendo-se o metal de adição de um

eletrodo ou de uma vareta de solda suplementar. A zona de fusão é coberta e protegida por um material granulado, fusível, conhecido como fundente ou fluxo.

As soldas realizadas por esse processo possuem boa ductilidade, alta resistência ao impacto, densidade uniforme, baixo teor de  $N_2$  e alta resistência à corrosão.

### **2.6.1.2 Soldagem a arco com gás ativo e metal de adição - Gas Metal Arc(GMA) ou MAG**

O processo GMA é semelhante ao processo por arco submerso, à exceção de:

1º- a proteção da **poça** do metal fundido é realizada por uma atmosfera gasosa, proporcionada pelo fluxo de um gás injetado ou de um gás oriundo do próprio eletrodo;

2º- o eletrodo é alimentado continuamente.

A finalidade da proteção gasosa da poça fundida é evitar a presença de  $O_2$  e  $N_2$  da atmosfera, que provocam uma solda frágil e porosa. A alimentação do eletrodo deve ser contínua e mantida em pequenos limites de velocidade, para evitar que o arco se torne instável, produzindo soldas de qualidade inferior.

Os metais mais comumente soldados por esse processo são: alumínio, aço-liga comum, aço inoxidável, magnésio, cobre e suas ligas e níquel e suas ligas.

### **2.6.1.3 Soldagem a arco com gás inerte e sem metal de adição - Gas Tungsten Arc(GTA) ou TIG**

Neste processo, o eletrodo comum é substituído por um de tungstênio não consumível. Esse eletrodo é protegido por um fluxo gasoso, constituído por um gás inerte ou uma mistura de gases inertes, para se evitar a contaminação do material a soldar. É um processo extremamente versátil, usado em materiais submetidos ao processo genérico de fusão. Pode ser processado manual ou automaticamente, em materiais finos ou espessos, por meio da fusão do material base ou pelo uso de um eletrodo.

### **2.6.1.4 Soldagem a plasma**

Este processo é semelhante ao GTA, exceto pelo fato do arco ser confinado ou restrito. Entre os métodos de restrição do arco, o mais simples é aquele em que a saída do arco, no maçarico, se faz por um bico de pequeno diâmetro, para concentrar a energia do arco e torná-lo mais direcional.

### 2.6.1.5 Soldagem com feixe eletrônico

Este processo pode ser considerado um suplemento do GTA e não um substituto. A grande vantagem deste processo em relação aos demais, é que a contaminação é bem pequena.

A soldagem com feixe eletrônico é feita a alto vácuo, usando como fonte de calor, um feixe de elétrons acelerados e focalizados. O processo é extremamente útil na vedação de elementos ou recipientes, quando se deseja a ausência de gases. O tipo de solda obtida é similar ao GTA, dependendo da densidade de potência utilizada.

### 2.6.1.6 Soldagem a laser

O estudo das aplicações do laser em soldagem é bem recente. Embora a energia total utilizável de um laser ainda seja limitada, ela pode ser concentrada para dar elevada densidade de potência, suficiente para fundir metais de ponto de fusão elevado. Contudo, as unidades de soldagem a laser ainda são limitadas ao tipo pulsado, utilizadas em junções por pontos, em pequenos componentes de peças diminutas. Há porém, perspectivas de maior uso, em futuro próximo, principalmente no caso de soldas de **celas quentes**, em reatores nucleares.

## **2.6.2 Brazagem**

Brazagem é o nome usado para a maioria dos processos de soldagem, em que a junta é completada pelo molhamento e enchimento com um metal de adição, que se funde à temperatura inferior a do metal base. É um excelente método de junção, tanto para estruturas simples, como para estruturas complexas.

## **2.6.3 Soldagem no estado sólido**

Os processos deste tipo de soldagem, são utilizados para produzir formas metálicas, constituídas por metais ou ligas. Esta soldagem ocorre com ausência de fusão do material, recebendo também a denominação de soldagem a frio. Basicamente existem dois processos:

1º- difusão controlada;

2º- deformação controlada

### **2.6.3.1 Difusão controlada**

Neste processo, é desejável que apenas uma parte mínima da peça sofra deformação. Neste tipo de solda, a união é inicialmente formada pela

difusão, através da interface original, até completar a junção. As variáveis básicas do processo são: pressão, temperatura e tempo.

### **2.6.3.2 Deformação controlada**

Neste processo, estão envolvidas grandes deformações das partes a serem soldadas. Essas deformações têm a finalidade de romper os filmes superficiais existentes nos metais, permitindo um contato mais íntimo das superfícies, realizando a soldagem em tempo e temperatura menores que a do processo anterior.

## **2.7 Descontinuidades encontradas em peças soldadas<sup>(2,5,9,26,28)</sup>**

A seguir listamos as principais descontinuidades metálicas encontradas nas juntas metálicas, e em cada uma delas, descrevemos a aparência das mesmas nos filmes radiográficos, haja vista que é na soldagem, que os ensaios por radiografia/gamagrafia são os mais empregados e onde inspirar-se-á para a simulação do defeito.

As principais descontinuidades das juntas soldadas são as seguintes: bolhas gasosas; porosidades; falta de penetração; falta de fusão; inclusões de escória; fissuras e mordeduras.

### 2.7.1 Bolhas gasosas

As bolhas gasosas, também denominadas inclusões de gases, aparecem no processo de soldagem por várias razões, como por exemplo, a qualidade do metal base, o tipo de eletrodo usado, a má regulação da corrente do arco, a falta de limpeza das juntas, o emprego de técnica inadequada de soldagem, a umidade relativa do ar muito elevada etc. Todas estas variáveis podem provocar uma excessiva formação de gases, que não conseguem escapar da peça e ficam retidos após a solidificação. Normalmente, as inclusões apresentam formas circulares, recebendo o nome específico de bolhas gasosas, quando seus diâmetros são superiores a 3,5 mm.

### 2.7.2 Porosidades

Quando as inclusões gasosas possuem diâmetros inferiores a 3,5 mm, recebem o nome de poros. Um conjunto de poros constitui uma porosidade. As inclusões gasosas possuem forma arredondada e suas imagens nos filmes radiográficos aparecem como pontos escuros, arredondados, com bordas nítidas. Todavia existem outras formas geométricas desse tipo de descontinuidade: alongadas ou vermiculares. As imagens radiográficas dependem da orientação da descontinuidade em relação ao feixe da radiação incidente, podendo se constituir em pontos escuros redondos, circundados por **penumbra**. Se o eixo da descontinuidade cilíndrica for perpendicular ao feixe incidente, a imagem aparecerá sob a forma de um retângulo alongado mas isso raramente ocorre. Essa porosidade alongada, usualmente quase perpendicular à

superfície da solda, constitui uma descontinuidade característica de processos automáticos de soldagem, resultante do uso de fluxo úmido ou de regulação inadequada da corrente do arco.

Outra forma típica de apresentação dessa descontinuidade, é a de cachos, provocada pelo uso de eletrodos úmidos.

### **2.7.3 Falta de penetração**

Este tipo de descontinuidade ocorre principalmente em juntas de topo, na raiz da solda, quando se trata de um entalhe simples ou no centro da solda, quando a junta é preparada em duplo V. As causas desta descontinuidade são: corrente pequena empregada no processo; pré-aquecimento inadequado; utilização de eletrodos em ângulos incorretos; utilização de eletrodos com diâmetros inadequados e desalinhamento das superfícies a serem soldadas.

A aparência radiográfica típica da falta de penetração é uma linha contínua ou intermitente, escura, no centro do cordão da solda. Às vezes, a raiz da solda pode reter alguma escória ou inclusões gasosas e nesses casos, a linha escura principal, pode apresentar ampliações, provocadas pela escória ou linha pontilhada, decorrente das inclusões gasosas.



#### **2.7.4 Falta de fusão**

Este tipo de descontinuidade é consequência do aquecimento insuficiente do entalhe ou da presença de crosta na superfície de fusão da solda. Assim, o metal depositado pode permanecer separado do metal base por uma camada muito fina de óxido, formando uma descontinuidade bi-dimensional, de espessura infinitesimal, que se estende ao longo da parede angular do entalhe. Sob tais condições, a radiação incidente pode projetar essa descontinuidade no filme, somente quando a direção do feixe de raios coincidir com a do plano da descontinuidade. Recomenda-se uma segunda exposição, mantendo-se o feixe de radiação incidente paralelo ao ângulo do entalhe.

A imagem radiográfica da falta de fusão é uma linha escura, estreita, reta, paralela a imagem do cordão de solda.

#### **2.7.5 Inclusões de escória**

As inclusões de escória são descontinuidades provocadas por materiais sólidos, metálicos e não metálicos, aprisionados no interior da massa de metal depositado. Como a escória está sempre presente na solda elétrica a arco, porque tem a finalidade de proteger a peça contra a ação do oxigênio e da umidade do ar e também manter a temperatura a um nível adequado, torna-se necessário que depois de cada passe, seja realizada uma boa limpeza do cordão depositado.

As escórias são constituídas de óxidos, que possuem números atômicos inferiores ao do elemento ferro. São menos opacas à radiação incidente e suas imagens radiográficas apresentam-se mais escuras que a imagem do cordão de solda, à exceção das inclusões de tungstênio, elemento que possui número atômico bem superior ao do elemento ferro. A escória não tem forma determinada e sua imagem radiográfica é constituída por pontos escuros, com bordas irregulares. Além disso, pode-se apresentar, também, sob a forma de linha, contínua ou intermitente, constituindo uma linha de escória. Essa linha de escória é frequentemente acompanhada por uma pronunciada falta de fusão do metal base. A distância de uma linha de escória, do centro do cordão de solda, pode indicar a provável profundidade em que se encontra a descontinuidade, desde que o ângulo do entalhe seja conhecido.

### 2.7.6 Fissuras

Se um processo de soldagem for realizado incorretamente ou executado com materiais inadequados, as tensões residuais provocadas por contrações durante o resfriamento do cordão de solda, podem provocar fissuras. Este tipo de descontinuidade pode apresentar-se em sentido paralelo ou perpendicular ao cordão de solda. As fissuras podem ocorrer, também, ao longo da zona afetada pelo calor, no metal base.

Pequenas fissuras aparecem frequentemente no primeiro passo da solda, principalmente no reforço interno de tubulações soldadas. Sua imagem radiográfica é uma linha reta, fina e centrada na zona de menor **densidade óptica**, correspondente ao reforço interno.

### **2.7.7 Mordeduras**

As mordeduras são reduções bruscas de espessura do metal base, nos pontos em que ocorre a fusão do último passe do cordão da solda. Pode ocorrer a fusão da parte superior dos chanfros, formando um sulco.

A imagem radiográfica deste tipo de descontinuidade consiste em linhas irregulares, de pouca nitidez, que acompanham a imagem do cordão de solda, no sentido de seu comprimento maior.

## **2.8 Filmes radiográficos**

### **2.8.1 Descrição de um filme radiográfico<sup>(9,13,19,26)</sup>**

Os filmes utilizados em ensaios não destrutivos, industrialmente, são constituídos por várias camadas, conforme a Figura 4. Na parte central, tem-se uma base ou suporte de triacetato de celulose ou poliéster, transparente e flexível, ligeiramente azulada (d), recoberta com uma emulsão sensível (b), que é composta por uma suspensão de cristais microscópicos de haletos de prata. Entre a emulsão e o suporte, há um substrato que assegura a adesão entre ambos (c) e finalmente, na superfície, há uma capa gelatinosa e endurecida (a), para proteção das camadas de emulsão. A emulsão é composta por gelatina, brometo de prata e também de pequena porcentagem de iodeto de prata, quando se deseja um filme de maior velocidade. As dimensões dos grãos dos haletos são especificadas em função da velocidade do filme, sensibilidade,

temperatura, etc. Geralmente essas emulsões apresentam dimensões de microns, cerca de 0,5 micros para os menores e de 1,5 micros para os maiores. Resta lembrar que as emulsões com grãos maiores são mais sensíveis e portanto apresentam um grau de escurecimento (**densidade óptica**) superior às emulsões de grãos menores, quando submetidas à mesma intensidade de radiação (fluência).

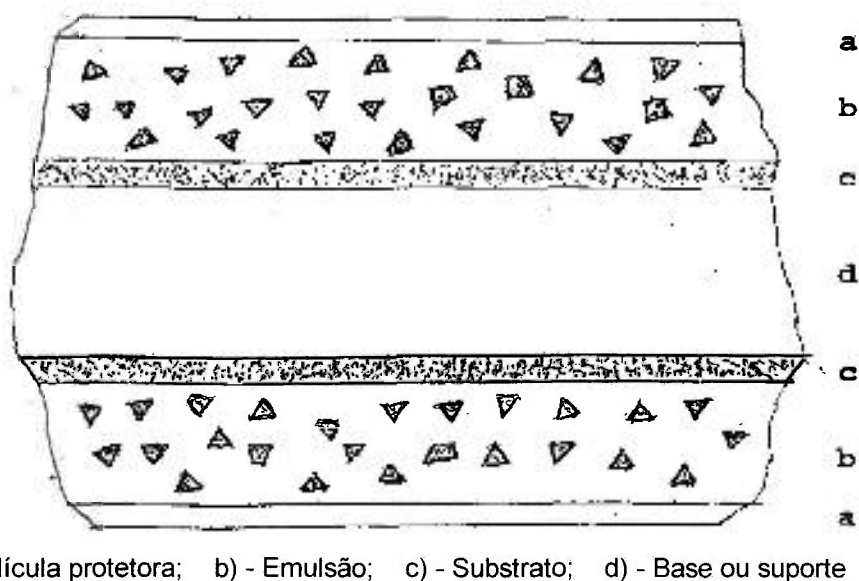


Figura 4 - Corte transversal de um filme radiográfico

### 2.8.2 Tipos de filmes comerciais<sup>(8,9,13,19,26,30)</sup>

Um fator importante que influencia a escolha de um filme, é o custo total da operação. Um filme lento, de granulação fina, custa aproximadamente o mesmo que os outros, mas um tempo de exposição maior, tornará o custo

final mais elevado. O efeito do tempo, pode ser duplo: 1-o pessoal envolvido no ensaio, é utilizado por mais tempo; 2-a área circundante ao ensaio, terá que ser isolada por um período maior.

Outro fator influente na escolha de um filme, é o tipo de energia a ser empregada no ensaio: elevada ou pequena. Os raios-X de tensão elevada e algumas das fontes de radiação gama, têm maior poder de penetração na matéria e em consequência, tem-se uma redução no contraste. As informações utilizáveis de um filme, são as variações de **densidades ópticas**. Se essas variações são reduzidas pelo tipo da radiação empregada, as informações contidas no filme também não serão visualizadas.

Um outro parâmetro a considerar é o tipo do material a ser radiografado. Os metais menos densos, como o alumínio e magnésio por exemplo requerem baixa tensão e fontes de radiação gama de baixo poder de penetração, como o  $^{170}\text{Tm}$ , por exemplo. Ao contrário, metais mais densos, como o aço, requerem radiação X de tensão elevada e fontes gama de poder de penetração elevada, como por exemplo, o  $^{192}\text{Ir}$ .

A norma ASTM E 94<sup>(7)</sup> classifica os filmes para aplicação industrial em quatro categorias:

#### Classe I

Granulação extra fina e **contraste** elevado. Esse tipo de filme deve ser usado quando se deseja obter uma boa qualidade de imagem, em ensaios com metais pouco densos ou com radiação de energia pequena, podendo ser usado em exposição direta ou com **telas intensificadoras** de imagem.

## Classe II

Granulação fina e **contraste** elevado. Deve ser usado em ensaios de metais pouco densos com radiação de energia pequena ou secções espessas de metais densos, com radiação de energia elevada. Sua granulação não é tão fina como a dos filmes da classe I, mas sua maior velocidade torna-os de grande utilidade prática. Podem ser usados em exposição direta ou com **telas intensificadoras** de exposição.

## Classe III

Alta velocidade e granulação não muito fina. Podem ser usados com ou sem **telas intensificadoras** de exposição e com radiação de energia elevada.

## Classe IV

Alta velocidade e **contraste** elevado quando utilizado com telas intensificadoras fluorescentes. O **contraste** é pequeno quando utilizado com **telas intensificadoras** de chumbo ou em exposições diretas. É recomendado para ensaios de peças de aço, latão etc., com radiação de energia média, para amplo intervalo de espessuras, com pequeno intervalo de densidade radiográfica.

## 2.9 Considerações sobre a sensibilidade radiográfica

A sensibilidade radiográfica de detecção<sup>(9,11,19,25,26)</sup>, é representada pela relação:

$$S\% = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

$\Delta x$  é uma espessura adicional do corpo de prova, colocada sobre a face da peça voltada para o feixe de radiação;

$x$  é a espessura do corpo de prova.

Considera-se a espessura de um corpo de prova constante. Se houver qualquer descontinuidade no interior da massa metálica, sua espessura efetiva será reduzida. Assim, as intensidades do feixe de radiação que atravessam o corpo de prova, serão diferentes, na secção contínua e na descontinuidade. As descontinuidades só serão registradas no filme radiográfico, se as suas dimensões forem suficientes para absorver a radiação, em quantidade bem diferente da que ocorre na massa contínua. A diferença entre a atenuação dos raios gama que atravessam uma secção contínua de um corpo de prova sólido e uma secção descontínua, diminui com o decréscimo do tamanho da descontinuidade, produzindo redução na nitidez da imagem obtida no filme radiográfico.

Existe uma diferença mínima entre as **densidades ópticas** de duas secções adjacentes, perceptível pelo olho humano, quando se submete o filme radiografado a uma fonte luminosa. Essa diferença, determinada experimentalmente, encontra-se na faixa de 0,02 a 0,03 mm. Assim sendo, observa-se que as discontinuidades muito pequenas, não podem ser detectadas pela técnica da gamagrafia. A sensibilidade é o fator determinante na escolha de uma técnica de inspeção e por isso, não se aconselha o emprego da gamagrafia nos casos em que outros métodos não destrutivos<sup>(2,8,9,30)</sup>, possam produzir melhores resultados.

A detecção de discontinuidades internas na massa dos metais, por processos radiográficos, depende do **contraste** e da **definição** da imagem final, obtida no filme radiográfico. Esses dois parâmetros, por sua vez, dependem de outros, tais como:

- energia dos raios gama;
- número atômico do material sob ensaio;
- densidade do material;
- espessura do material;
- dimensões da fonte radioativa;
- distância fonte-filme;
- distância do corpo de prova/peça-filme;
- distância descontinuidade-filme;
- espalhamento da radiação;



- forma, tamanho e distribuição da descontinuidade;
- posição da descontinuidade em relação à espessura do material;
- **densidade óptica** obtida no filme radiográfico;
- tipo de filme empregado;
- presença ou ausência de **telas intensificadoras** de exposição;
- processamento fotográfico.

Torna-se muito difícil determinar analiticamente a sensibilidade radiográfica, porque o número de parâmetros que afetam, direta ou indiretamente esta variável, é muito grande.

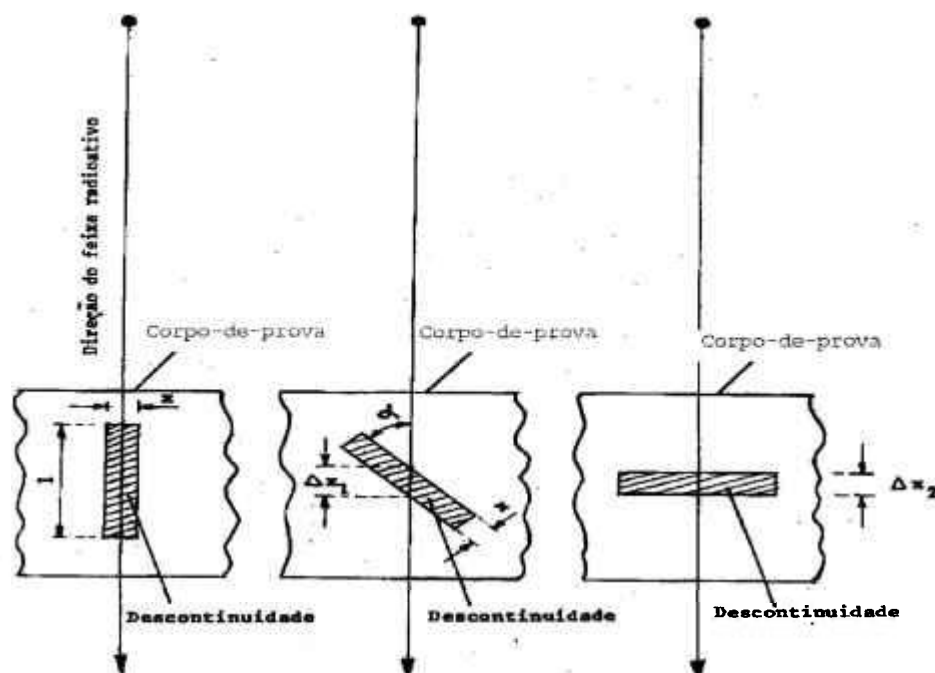
A solução mais simples para o problema, é uma avaliação experimental, levando-se em conta, cada caso particular. Assim sendo, analisa-se a seguir, aqueles que apresentam maior influência na sensibilidade radiográfica.

## **2.10 Estudo da sensibilidade radiográfica em função da forma das descontinuidades e de sua disposição em relação à direção do feixe incidente**

As descontinuidades cujos contornos apresentam bordas retas em relação à direção do feixe de radiação incidente<sup>(9,19,26,27)</sup>, proporcionam imagens radiográficas mais definidas do que as descontinuidades trapezoidais,

esféricas, elípticas e cilíndricas. A nitidez da imagem de uma descontinuidade, com bordas retas e paralelas à direção do feixe de radiação incidente, depende da amplitude da área com **penumbra**. Se a descontinuidade possuir formato esférico, a **densidade óptica** diminuirá gradual e uniformemente, de um valor máximo, que depende do diâmetro desta descontinuidade, até o valor que representa a densidade óptica da secção contínua do material. Assim, obtêm-se uma imagem pouco nítida da descontinuidade. Este procedimento aplica-se também às descontinuidades que apresentam outras formas, já mencionadas anteriormente.

O aparecimento da imagem da descontinuidade em filme radiográfico, depende da posição dela em relação ao feixe da radiação incidente. Obtêm-se a melhor imagem, quando a radiação incidente atravessa a descontinuidade no sentido do seu eixo maior. Quando o feixe incidente atravessa a descontinuidade, em determinado ângulo, cada raio gama passa por secções diferentes, conforme se representa esquematicamente na Figura 5. Apesar deste tipo de descontinuidade apresentar-se no sentido de seu maior comprimento, a sensibilidade radiográfica deverá ser determinada pelos valores de  $\Delta x$ , como se indica na própria Figura 5.

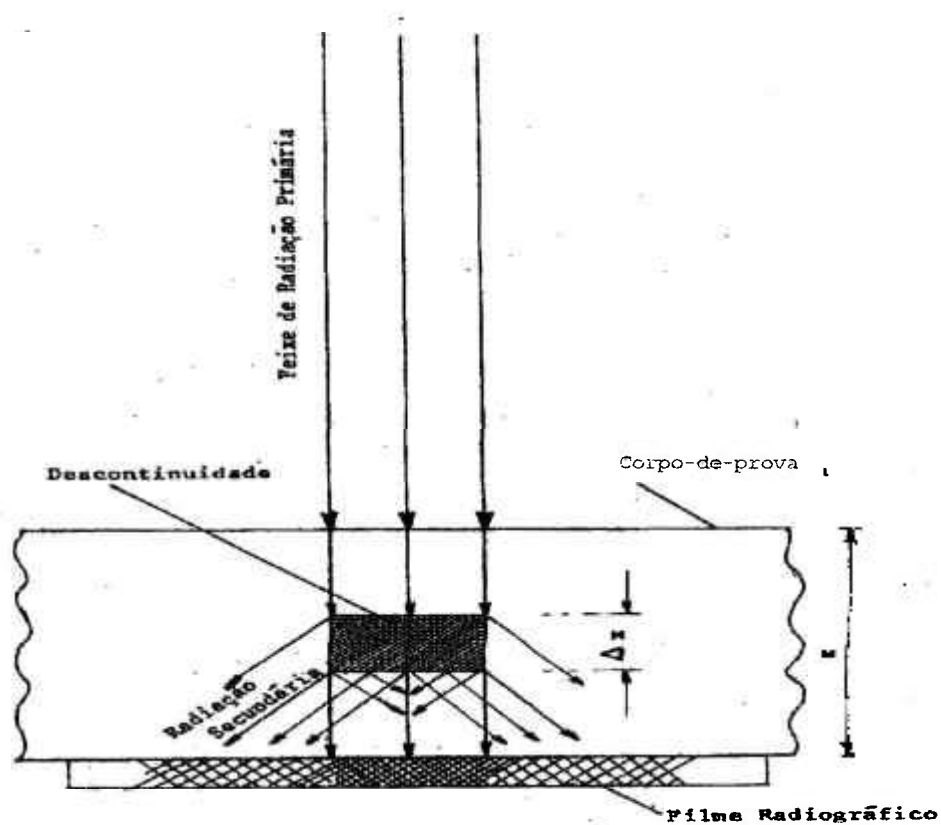


$x$  - espessura da descontinuidade  
 $\Delta x$  - projeção da espessura da descontinuidade perpendicular ao feixe de radiação incidente  
 $l$  - espessura máxima de  $\Delta x$

Figura 5 – Dependência da posição da descontinuidade em relação ao feixe incidente de radiação.

## 2.11 Efeito da radiação espalhada sobre a sensibilidade radiográfica

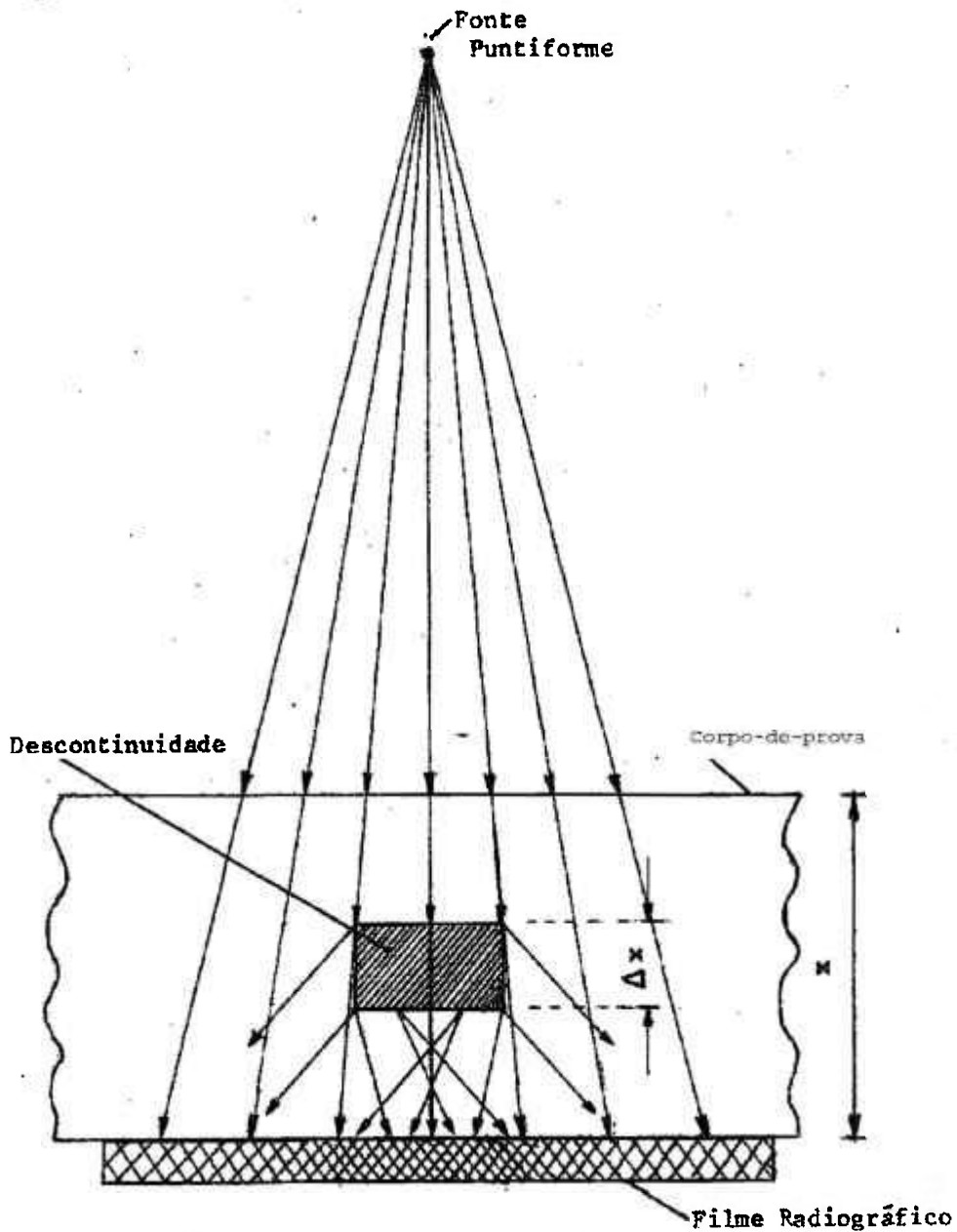
Efetuada-se uma inspeção não destrutiva, com feixe de radiação monoenergética, de pequena abertura, a fração espalhada da radiação é removida do feixe primário, conforme se observa na Figura 6. Contudo, devemos ressaltar que um ensaio por gamagrafia, é normalmente efetuado com feixe não paralelo, de abertura mais ampla e com radiação polienergética, como no caso do  $^{192}\text{Ir}$ . Nestas circunstâncias, a radiação espalhada toma parte mais ativa no ensaio, fato que pode ser verificado na representação esquemática mostrada na Figura 7.



$x$  – espessura do corpo de prova

$\Delta x$  – projeção da espessura da descontinuidade perpendicular ao feixe de radiação incidente

Figura 6 – Efeito da radiação espalhada de um feixe incidente paralelo sobre a **definição**



$x$  – espessura do corpo-de-prova

$\Delta x$  – projeção da espessura da descontinuidade perpendicular ao feixe da radiação incidente

Figura 7 – Efeito da radiação espalhada de um feixe incidente divergente sobre a **definição**

A quantidade de radiação espalhada, que passa através de um material, aumenta quando a espessura do material inspecionado aumenta, provocando falta de nitidez da imagem produzida no filme radiográfico.

O efeito nocivo da radiação espalhada, no **contraste** da imagem, é ampliado com o aumento da distância descontinuidade-filme. Por exemplo, considera-se o ensaio radiográfico de um corpo-de-prova de aço, possuindo 40 mm de espessura e apresentando uma descontinuidade metálica interna, situada a 20 mm do filme. Mantendo-se as mesmas condições geométricas de exposição mas trocando-se o corpo de prova, por um outro, também de aço porém, com 60 mm de espessura, contendo a mesma descontinuidade metálica, só que agora a 30 mm do filme, observar-se-á que a imagem radiográfica deste último será mais pobre, quando comparada com a primeira, em decorrência da ação da radiação espalhada.

## 2.12 Variação da sensibilidade radiográfica em função da energia da radiação, da densidade e da espessura do material

Supondo que a sensibilidade radiográfica<sup>(9,19,23,25,26)</sup> varie apenas em função da energia da radiação, da densidade e da espessura do material sob ensaio, manter-se-ão os demais fatores constantes. Considerando, que o material tenha espessura  $x$  e **coeficiente de atenuação linear**  $\mu_1$  e uma descontinuidade interna com espessura  $\Delta x$ , com **coeficiente de atenuação linear**  $\mu_2$ , a intensidade do feixe de radiação, que atravessa o material de espessura  $x$ , nas secções contínuas, pode ser representada pela equação:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot x} \quad (2)$$

onde,  $I_1$  é a intensidade da radiação emergente não colidida;

$I_0$  é a intensidade da radiação incidente;

$\mu_1$  é o **coeficiente de atenuação linear** do material;

$x$  é a espessura do material sob ensaio.

Levando-se em conta esta mesma lei de atenuação, a intensidade da radiação que passa através da secção descontínua, pode ser representada por:

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-[\mu_1(x-\Delta x) + \mu_2 \Delta x]} \quad (3)$$

onde,

$I_2$  é a intensidade da radiação emergente não colidida, depois de atravessar a descontinuidade  $\Delta x$ ;

$\mu_2$  é o **coeficiente de atenuação linear** da descontinuidade.

A descontinuidade do material somente será visível no filme revelado, se houver uma sensível diferença entre as intensidades das radiações que passam pelas secções com e sem descontinuidade.

Relacionando-se  $I_2$  com  $I_1$  tem-se:

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x} \quad (4)$$

Sob determinadas condições, isto é, se o material é radiografado em uma só exposição e considerando-se que  $D_2 \gg D_0$  e  $D_1 \gg D_0$

Pode-se afirmar que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{(D_2 - D_0)}{(D_1 - D_0)} \quad (5)$$

onde,

$D_2$  é a **densidade óptica** medida da descontinuidade no filme radiográfico;

$D_1$  é a **densidade óptica** medida, das demais secções do material sem descontinuidade no filme radiográfico;

$D_0$  é **densidade óptica** de fundo.

Substituindo a eq. (5) na eq.(4) e desenvolvendo, obtem-se:

$$\frac{D_2 - D_0}{D_1 - D_0} = e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x} \Rightarrow D_2 - D_0 = (D_1 - D_0) \cdot e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x}$$

Subtraindo  $D_1$  em ambos os membros e transpondo  $D_0$ , tem-se:

$$D_2 - D_1 = D_0 - D_1 + (D_1 - D_0) \cdot e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x}, \text{ ou}$$

$$\Delta D = D_2 - D_1 = D_1 - D_0 \cdot (e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x} - 1), \text{ de onde:}$$

$$\frac{\Delta D}{D_1 - D_0} = e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x} - 1 \Rightarrow \frac{\Delta D}{D_1 - D_0} + 1 = e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x}, \text{ ou ainda}$$

$$\ln\left(\frac{\Delta D}{D_1 - D_0} + 1\right) = (\mu_1 - \mu_2) \cdot \Delta x, \text{ de onde:}$$



$$\Delta x = \ln \left( \frac{\Delta D}{D_1 - D_0} + 1 \right) / (\mu_1 - \mu_2) \quad (6)$$

A boa visualização da imagem da descontinuidade, é caracterizada pelo contraste mínimo,  $\Delta D = D_2 - D_1$ . Considerando-se a densidade do filme constante ( $D_1 - D_0$ ), podemos dizer que:

$$(\Delta D / D_1 - D_0)_{\min} = K = \text{constante}$$

portanto:

$$(\Delta x)_{\min} = \frac{\ln(K + 1)}{\mu_1 - \mu_2} \quad (7)$$

A diferença entre os **coeficientes de atenuação linear** do material e da descontinuidade ( $\mu_1 - \mu_2$ ) aumenta quando cresce a diferença das massas específicas do material e da descontinuidade. Assim, o tamanho mínimo da imagem da descontinuidade  $(\Delta x)_{\min}$  diminui, isto é, a sensibilidade de inspeção aumenta, de acordo com o acréscimo da massa específica do material inspecionado e com o decréscimo da massa específica da descontinuidade. Em se tratando de descontinuidades cheias de ar, tais como os poros, o valor de  $\mu_2 = 0$  e  $x$  passa a ter o valor seguinte:

$$(\Delta x)_{\min} = \ln(K + 1) / \mu_1 \quad (8)$$

Com o aumento da energia da radiação gama, há maior capacidade de penetração da radiação no material e diminuição do **coeficiente de atenuação linear**, para determinado material, supondo que não se alcance a região de produção de pares. Como resultado, temos um aumento de  $(\Delta x)_{\min}$ , considerado o menor tamanho da descontinuidade visível no filme, isto é, uma

diminuição da sensibilidade. Portanto, a sensibilidade aumenta com o crescimento da densidade do material inspecionado e com o decréscimo da densidade da descontinuidade e da energia da radiação.

Como a diferença mínima de **densidade óptica** mensurável, em filme radiográfico é 0,02, isto é  $K = 0,02$ , sendo assim:

$$(\Delta x)_{\min} = \ln ( 1 + 0,02 ) / \mu_1$$

então

$$(\Delta x)_{\min} = 0,0198 / \mu_1 \quad (9)$$

Esta expressão pode ser utilizada para se determinar aproximadamente a dimensão da descontinuidade, quando o ensaio for realizado com um feixe de radiação monoenergético, com grande colimação.

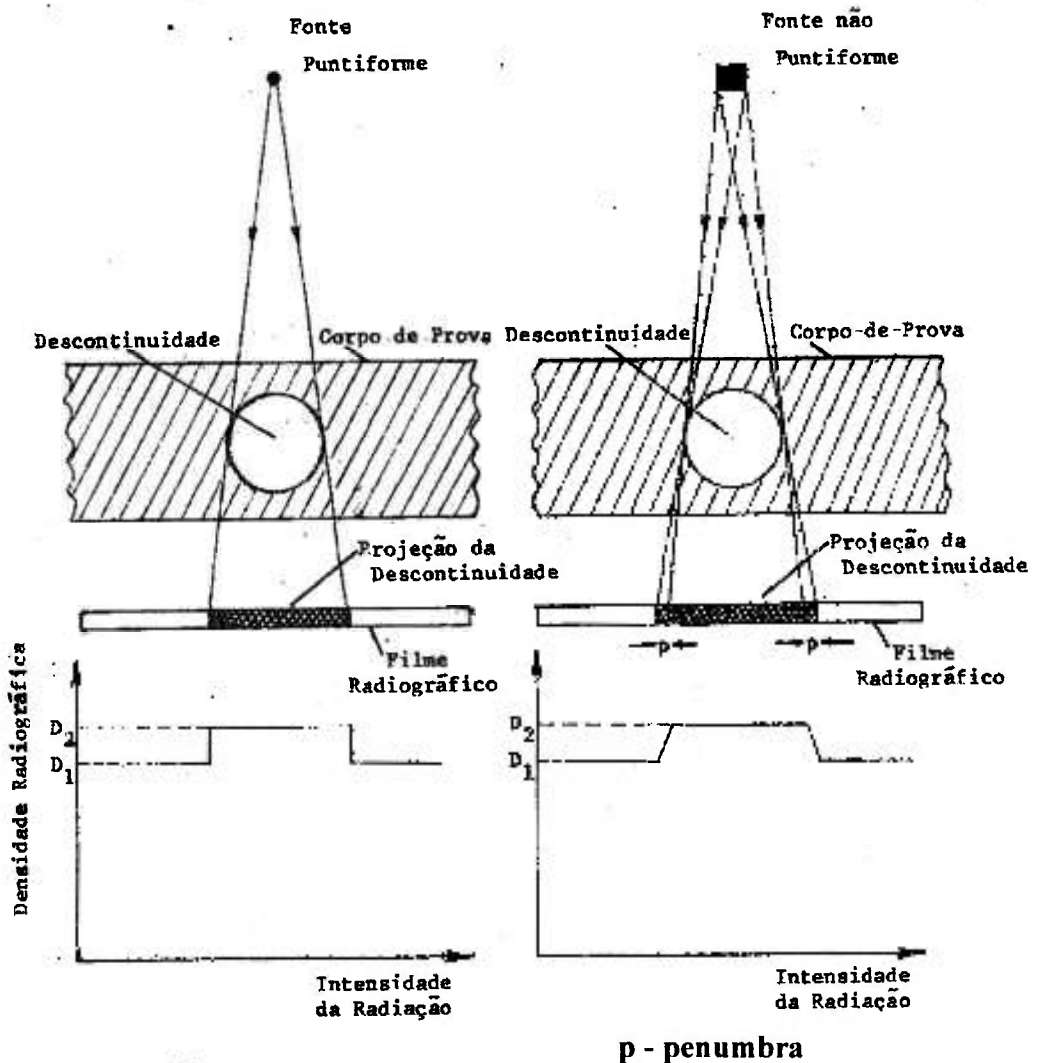
### 2.13 Influência da geometria da fonte e da distância fonte-filme<sup>(9,19,20,23,26)</sup> sobre a sensibilidade radiográfica

Em gamagrafia, a projeção da fonte radioativa sobre um plano perpendicular à direção de inspeção, recebe a denominação de foco ou ponto focal. A distância fonte-filme é conhecida por distância focal.

O tamanho do foco e a distância fonte-filme afetam de modo determinante, a **definição** da imagem da descontinuidade que será impressa no filme radiográfico.

As representações esquemáticas mostradas nas Figuras 8 e 9 permitem observar que a fonte puntiforme define muito bem os contornos de

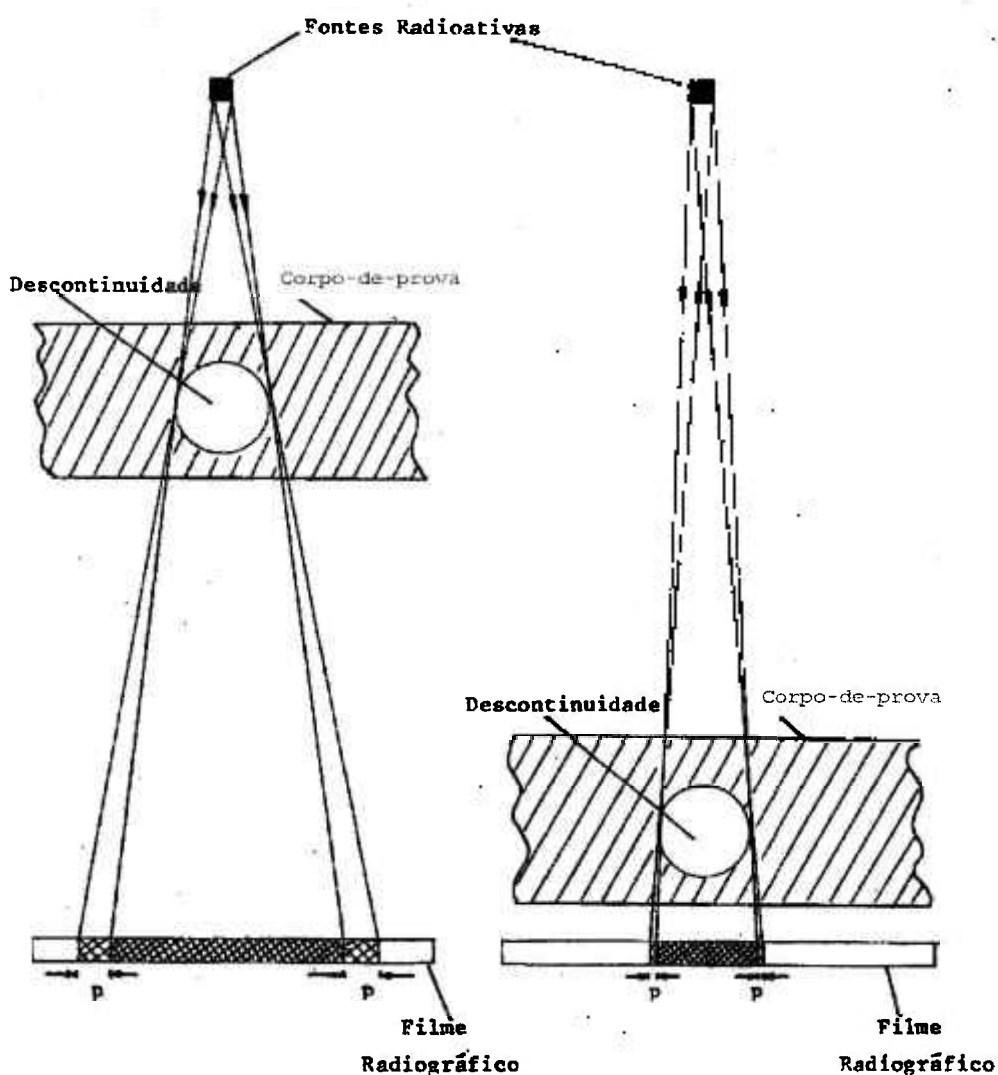
uma descontinuidade. Ao contrário, a fonte não puntiforme projeta sobre o filme radiográfico, em cada uma das suas bordas, uma imagem diferente, afetando sensivelmente a **definição** da descontinuidade, pela presença de uma região de **penumbra**.



Figuras 8 e 9 – Efeito do tamanho da fonte radioativa sobre a **definição** da imagem de uma descontinuidade

A **definição** da imagem, também é sensivelmente melhorada quando o material ensaiado encontra-se mais próximo do filme, porque diminui consideravelmente a **penumbra**, conforme se deduz das representações

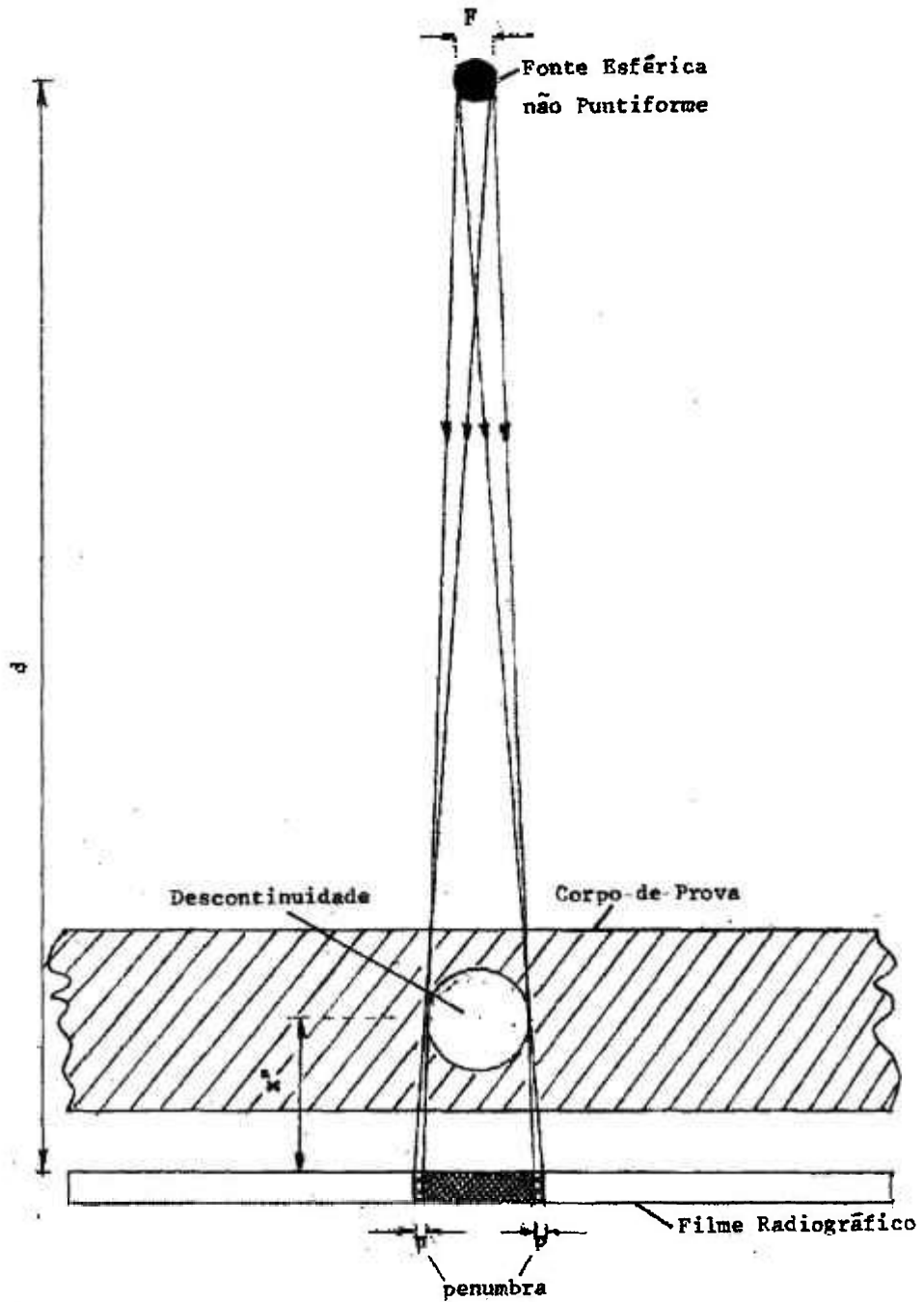
esquemáticas mostradas nas Figuras 10 e 11. A amplitude da **penumbra** ( $p$ ) depende do diâmetro do foco ( $F$ ), da distância fonte-filme ( $d$ ), da distância descontinuidade-filme ( $x$ ), do tipo de filme (tamanho de grão, distribuição dos grãos na emulsão, etc) e da radiação espalhada.



$p$  - penumbra

Figuras 10 e 11 – Efeito da distância objeto-filme sobre a **definição** da imagem de uma descontinuidade

A **penumbra** provocada por fatores geométricos, pode ser calculada por meio de uma equação simples, cuja dedução é baseada na Figura 12.



$d$  – distância fonte-filme  
 $x''$  – distância descontinuidade-filme

Figura 12 – Representação esquemática da formação de **penumbra**, para a formulação matemática

Por semelhança de triângulos, obtém-se:

$$\frac{F}{p} = \frac{d - x''}{x''}$$

portanto:

$$p = \frac{F \cdot x''}{d - x''} \quad (10)$$

O valor mínimo de  $p$  está compreendido entre 0,1 e 0,7 mm e não pode ser reduzido, mesmo com o aumento da distância fonte-filme, porque o tipo de filme, o espectro da radiação e a capacidade instrumental influem no processo.

Entre os fatores que influem na **penumbra**, apenas o de natureza geométrica é passível de tratamento matemático simples, por isso qualquer equação referenciada ao assunto, não tem qualquer valor prático.

#### 2.14 Relação entre a densidade óptica de um filme exposto à radiação e a sensibilidade radiográfica<sup>(9,19,23,26)</sup>

Uma diferença de **densidade óptica** inferior a 0,02, não é perceptível instrumentalmente. Como não existe relação linear entre a **densidade óptica** do filme e o tempo de exposição, as diferenças das **densidades ópticas** ( $D_1 - D_2$ ) alteram-se com o tempo de exposição. Portanto, a visibilidade da imagem da descontinuidade no filme radiográfico, depende da **densidade óptica** obtida.

## **2.15 Efeito das telas de chumbo, intensificadoras de exposição, sobre a sensibilidade radiográfica<sup>(9,13,19,23,26)</sup>**

As **telas intensificadoras** de chumbo, além do efeito intensificador, no fluxo da radiação que atinge o filme radiográfico, diminuindo o tempo de exposição, contribuem para a melhoria da qualidade da imagem final, atenuando a influência nociva da radiação espalhada.

A radiação espalhada possui menor energia, quando comparada com o feixe primário da radiação e por isso, é mais intensamente absorvida pelas **telas intensificadoras** de chumbo ou de outro material de número atômico elevado. Essa absorção evita que feixes divergentes de radiação, cheguem até o filme radiográfico, aumentando a penumbra ou em outras palavras, borrando o contorno da imagem formada pelos raios primários.

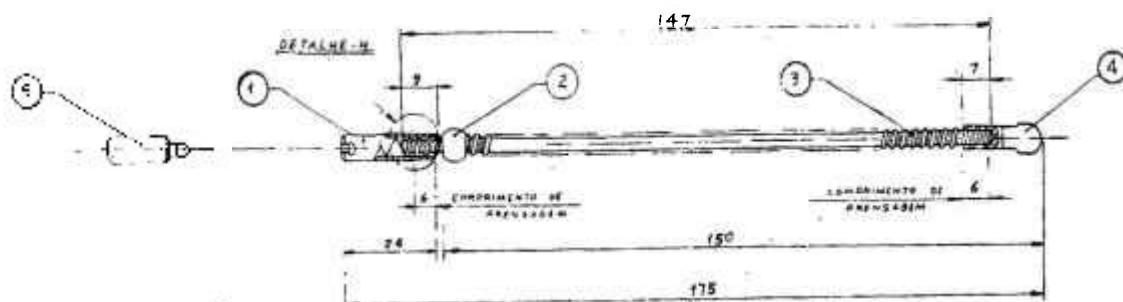
O estudo da influência dessas **telas intensificadoras** está descrito no Capítulo 5.

### 3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

#### 3.1 Sistema de irradiação e seu controle da qualidade

##### 3.1.1 Porta-fonte<sup>(12,13,15,16)</sup>

O porta-fonte utilizado é do tipo TECH/OPS (Technical Operations), modelo 660, fabricado pela empresa INSTEL Comércio e Serviços de Manutenção Industrial Ltda., a partir dos aços AISI 420, 304 e 304 L e mais o cabo teleflex, todos os itens com certificados de diâmetros, composição química e durezas. O porta-fonte foi fabricado e ensaiado em conformidade com as Normas ISO-DTR 2919<sup>(17)</sup> e ABNT NBR 8670<sup>(1)</sup>. A Figura 13 mostra um porta-fonte do tipo TECH/OPS 660 com os vários itens do conjunto.



1- engate fêmea; 2 - trava; 3 - corpo; 4 - cápsula; 5 - engate macho  
Dimensões em mm

Figura 13 - Porta-fonte TECH/OPS 660

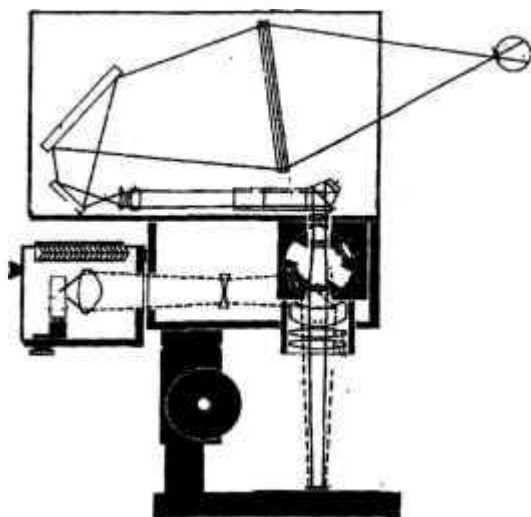
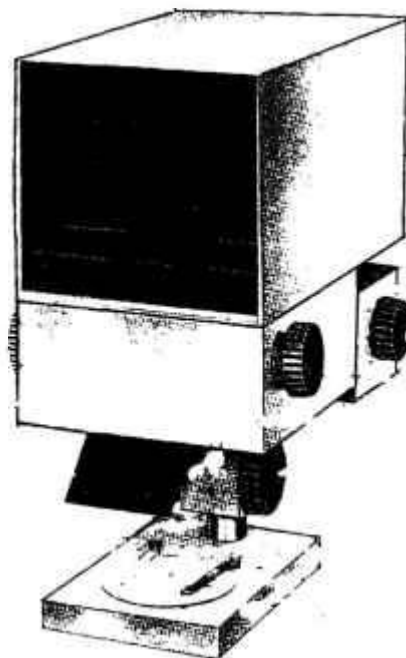


### **3.1.2 Ensaio dimensional do porta-fonte**

Para a inspeção dimensional do porta-fonte, antes e depois dos ensaios de tração, usou-se um paquímetro Mitutoyo de 200 mm. Para complementação dos ensaios dimensionais, foi utilizado um gabarito do tipo TECH/OPS, para verificação dos engates macho e fêmea e abertura do engate.

### **3.1.3 Inspeção óptica do porta-fonte**

A inspeção óptica do porta-fonte, antes e depois dos ensaios de tração, foi realizada com um microprojeter estereoscópio, modelo Plastival 50, da empresa Carl Zeiss Jena, com capacidade para aumento de até 50 vezes. Essa inspeção se faz necessária, porque é preciso qualificar o fornecedor, verificando se há erros na montagem e danos no porta-fonte, como trincas etc. Após o retorno dos ensaios de tração, a inspeção também é necessária, a fim de se verificar se houve danos no porta-fonte, evitando-se a montagem de fonte em porta-fonte não qualificado, evitando-se, também, a perda de discos e acidentes radiológicos. A Figura 14 mostra o microprojeter utilizado na inspeção óptica.

**Esquema em corte****Vista frontal****Figura 14 - Microprojektor estereoscópico**

### **3.1.4 Identificação do porta-fonte**

Para a identificação do porta-fonte e por conseguinte da fonte, com os respectivos números de série, utilizou-se um pantógrafo da empresa RegMed Indústria Técnica de Precisão Ltda., tipo PGL-BJ-2/8 número 562/66. A Figura 15 mostra o pantógrafo com todos os seus acessórios. O porta-fonte foi identificado com o número de série C 788, da produção normal do Laboratório de Produção de Fontes, do Centro de Tecnologia das Radiações IPEN-CNEN/SP e a fonte com o número sequencial da produção normal, IrS 3438.

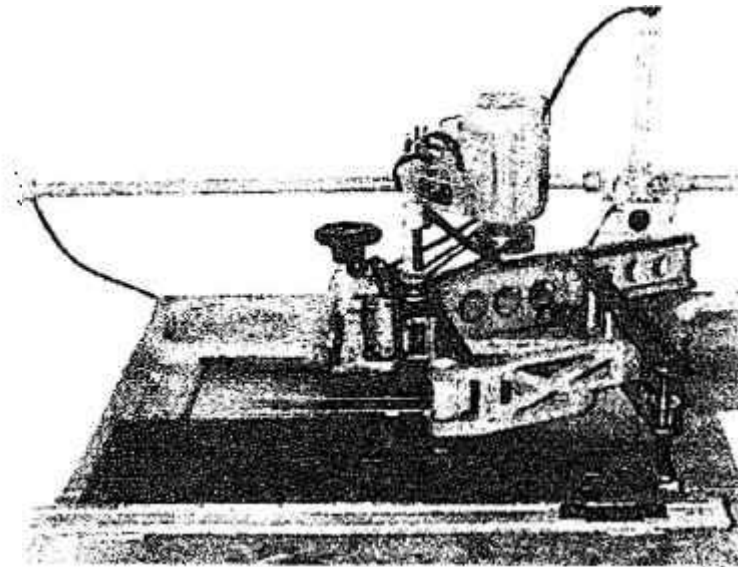


Figura 15 - Pantógrafo

### 3.1.5 Ensaio de tração do porta-fonte

Os ensaios de tração do porta-fonte, realizados pelo Departamento de Metalurgia Nuclear, do IPEN-CNEN/SP, foram efetuados com uma máquina universal marca Instron, modelo 1125, com uma célula de carga de 500 kgf. O porta-fonte sofre dois ensaios de tração, sendo um, entre o engate fêmea e a trava e outro, entre o engate fêmea e o porta-cápsula (Figura 13), ambos com 50 kgf, sendo a velocidade da ponte de 5 mm/min e tempo de aplicação da carga de 10 s.

### 3.1.6 Fonte de radiação gama<sup>(12,13,15)</sup>

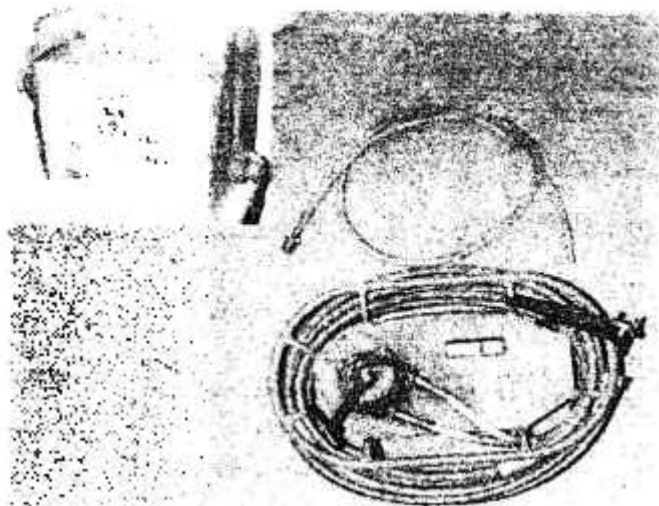
A fonte de radiação gama utilizada foi o  $^{192}\text{Ir}$ , radioisótopo que possui 22 energias, sendo as mais importantes: 0,296 MeV, (29,6%), 0,308 MeV (30,7%), 0,316 MeV (82,7%) e 0,468 MeV(47,0%). O  $^{192}\text{Ir}$ , tem sido o radioisótopo mais usado em ensaios não destrutivos, devido ao seu amplo espectro energético, seu elevado poder de penetração e meia vida de 74 dias. A fonte foi montada no laboratório de produção de fontes, do Centro de Tecnologia das Radiações, do IPEN-CNEN/SP, sendo constituída de 8 discos de  $^{192}\text{Ir}$  empilhados, importados do Canadá(MDS Nordion Inc.), com 2,7 mm de diâmetro e 0,25 mm de espessura, conseguindo-se em 02.10.2000, a atividade de 1,332 TBq (36 Ci), com um tamanho focal de 2,41 mm. A fonte foi submetida aos ensaios previstos na norma ISO-DTR 4826<sup>(18)</sup>. Essa norma diz respeito ao teste de esfregação, que verifica o grau de contaminação superficial da fonte e ao teste de imersão, que verifica a qualidade da solda, que une fonte e porta-fonte, garantindo a sua estanqueidade.

### 3.1.7 Soldagem da cápsula no porta-fonte

A soldagem TIG da cápsula no porta-fonte, foi efetuada com uma máquina de solda fabricada no Departamento de Eletrônica do IPEN-CNEN/SP. Utilizou-se gás argônio do tipo SB, corrente de trabalho de  $7 \pm 1$  A, tensão de trabalho de  $10 \pm 1$  V e velocidade de rotação do mandril de 12 rpm.

### 3.1.8 Irradiador gama

O irradiador utilizado para armazenagem, transporte e realização dos ensaios, foi do tipo TECH/OPS, modelo 660, n<sup>o</sup> de série 3788, com cabo de comando de série igual ao do irradiador e tubo guia não numerado. A Figura 16 mostra o irradiador gama, o cabo de comando acionador do sistema e o tubo guia, que serve para posicionar o porta-fonte/fonte na posição de irradiação.



Irradiador gama (1) com o cabo de comando (2) e tubo guia (3)

Figura 16 - Irradiador gama e acessórios.

## 3.2 Sistema de captação de imagens

### 3.2.1 Seleção dos filmes radiográficos

No presente trabalho usaram-se filmes radiográficos<sup>(8,9,13,19,26,30)</sup> da marca Kodak de 3,5"x 17"(8,89 cm x 59,5 cm), tipo AA, classe IV, de

velocidade elevada e **contraste** pequeno, se usados com **telas intensificadoras** de exposição de chumbo. Foram usados também filmes Kodak, tipo M , de 8"x 10"( 20,32 x 25,40cm ) de velocidade pequena e **contraste** elevado.

### **3.2.2 Telas intensificadoras de exposição**

As **telas intensificadoras** de exposição<sup>(2,9,11,12,19,26)</sup>, de chumbo e com 2% - 3% de antimônio, foram fabricadas e laminadas no Departamento de Metalurgia Nuclear, do IPEN-CNEN/SP, nas espessuras de 0,05 mm, 0,07 mm, 0,09 mm, 0,10 mm, 0,11 mm, 0,20 mm e 0,25 mm, sendo usadas como telas anteriores de exposição e uma tela da Kodak, de 0,15 mm de espessura, como tela posterior de exposição. Essas telas fazem um sanduíche do filme, sendo que as telas chamadas anteriores, recobrem superiormente o filme e recebem a radiação primária da fonte de radiação. Para se evitar deformações nas telas laminadas, que são extremamente finas e sensíveis a riscos e outros danos, elas foram recortadas nas dimensões dos filmes utilizados e coladas sobre uma base de plástico, a fim de terem uma melhor sustentação.

### **3.2.3 Indicadores da qualidade de imagem(IQI)**

Os **indicadores de qualidade de imagem**<sup>(2,9,11,12,19,26)</sup> usados foram do tipo ASTM(American Society for Testing Materials), norma

americana (ASTM E142-68)<sup>(6)</sup>. Foram fabricados na oficina do IPEN (IEO), em várias espessuras e constituídos de três furos, proporcionais às espessuras dos IQIs. Essas peças metálicas são usadas para indicar a sensibilidade radiográfica do ensaio. A Figura 17, mostra um IQI típico da norma ASTM.

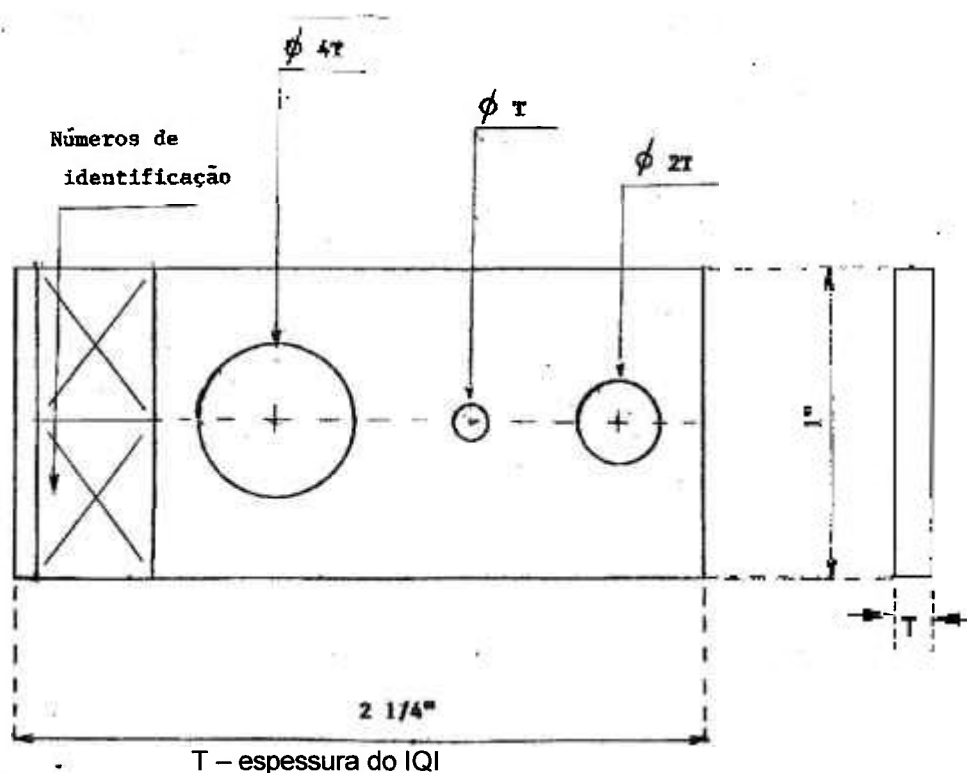


Figura 17 - Indicador da qualidade de imagem tipo ASTM

### 3.2.4 Processamento fotográfico

No processamento dos filmes radiográficos<sup>(8,9,11,13,23,26)</sup>, foram usadas as soluções: reveladora, paradora e fixadora, da marca Kodak, nas proporções indicadas na embalagem. Os tempos utilizados no processamento fotográfico foram: revelação-5 min, lavagem intermediária (solução paradora)-1 min, fixação-10 min e lavagem final-20 min. A secagem dos filmes foi

realizada na temperatura ambiente. As cubas utilizadas no processamento fotográfico, foram fabricadas em aço inoxidável pela oficina do IPEN (IEO).

### 3.2.5 Densitômetro

Para a medida das **densidades ópticas** dos filmes radiográficos, tanto no levantamento das curvas de exposição radiográfica, quanto nos ensaios dos corpos-de-prova e no ensaio final (ensaio estereoradiográfico), foi utilizado um densitômetro Macbeth TD 931, modelo 904. Para se evitar desvios, a cada medida da **densidade óptica**, o sistema é calibrado, zerando-se o equipamento com uma fita densitométrica. A Figura 18 mostra o densitômetro na sua parte frontal.

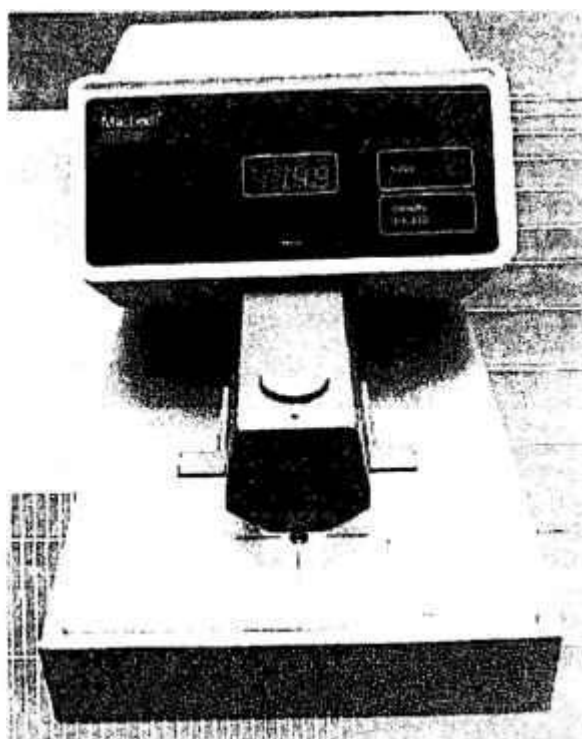


Figura 18 – Densitômetro Macbeth TD 931



### 3.2.6 Negatoscópio

Para o exame qualitativo dos filmes radiográficos, foi construído um negatoscópio com 750 W de potência, fornecendo a quantidade de luz necessária (lux), para a verificação densitométrica das radiografias de todos os corpos-de-prova: a - nas várias etapas de sua construção; b - do corpo-de-prova escalonado; c - para levantamento das curvas de exposição; d - ensaio final estereoradiográfico. Com o negatoscópio construído com as características mencionadas, foi possível a análise de filmes com **densidades ópticas** até 3,50..

## 3.3 Materiais

### 3.3.1 Corpos-de-prova

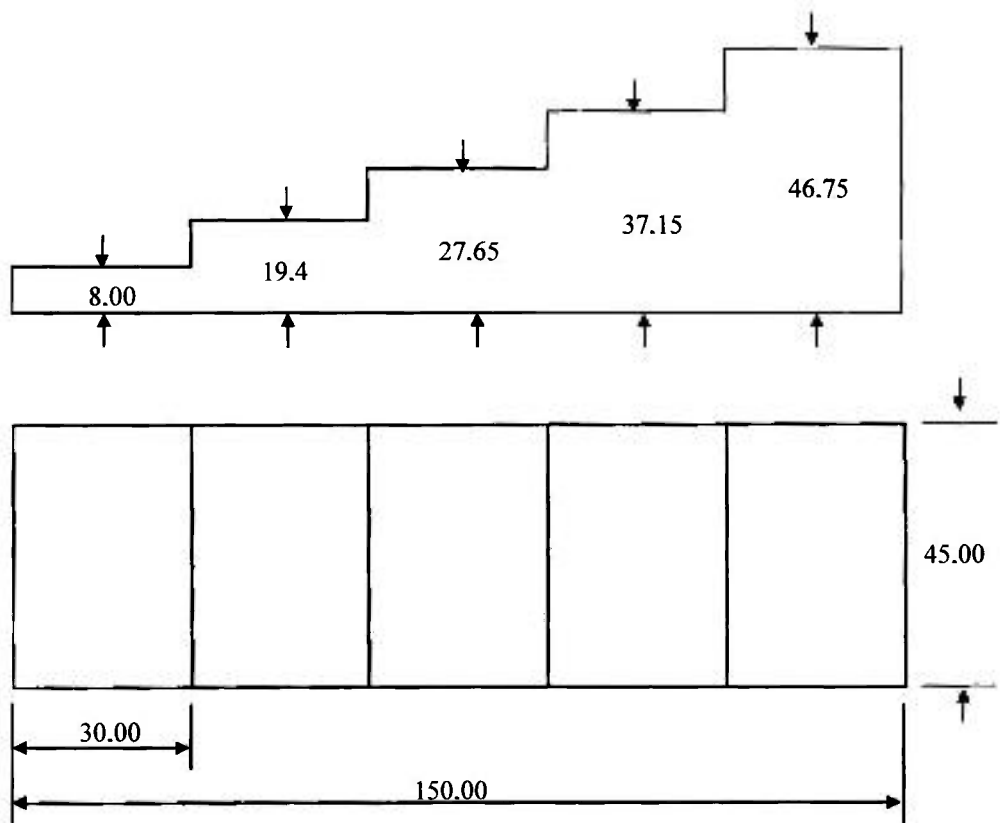
O material escolhido foi o aço comum, SAE 1020, por se comportar como padrão, no levantamento das curvas de exposição radiográfica e também por ser facilmente encontrado no mercado. Na realidade, o padrão deveria ser o ferro, como referência histórica, porém, para efeitos práticos, o aço 1020 é um substituto perfeito. Levando-se em conta que a densidade específica dos materiais, é um dos mais importantes parâmetros envolvidos nos ensaios radiográficos, a diferença entre as densidades de ambos é de somente 0,01 g/cm<sup>3</sup> ou 0,127 %, valor considerado desprezível na prática.

O aço foi empregado em três tipos de corpos-de-prova: o escalonado, usado para o levantamento das curvas de exposição; o utilizado para ensaios com as **telas intensificadoras** de exposição (sem o **defeito simulado**<sup>(21)</sup>) e aqueles elaborados com os **defeitos simulados**<sup>(21)</sup>, para os ensaios radiográficos preliminares e o ensaio final estereorradiográfico.

### 3.3.2 Espessuras dos corpos-de-prova

O corpo-de-prova escalonado<sup>(2,8,12,25,26)</sup> foi projetado de maneira a abranger praticamente todo o intervalo de utilização do <sup>192</sup>Ir. A Figura 19 mostra o formato e as dimensões do corpo-de-prova escalonado. Os corpos-de-prova, com **defeitos simulados**<sup>(21)</sup>, em número de 24, foram construídos nas seguintes dimensões: 80 mm x 100 mm de base e espessuras de: 12,70 mm; 20,70 mm; 30,20 mm; 38,10 mm; 42,50 mm e 50,90 mm. Cada um desses corpos-de-prova foi elaborado a partir de duas placas, de dimensões e espessuras iguais, justapostas. Puncionou-se cada uma das placas, internamente e nos centros geométricos, para posicionamento das esferas de aço, na operação de prensagem. Da mesma forma, as placas foram puncionadas em dois pontos, diametralmente opostos ao ponto central, para a execução de furos, para a colocação de guias, feitas de material semelhante aos dos corpos-de-prova, de modo a garantir as placas nas posições projetadas. Nos pontos centrais de cada par de placas foram colocadas as esferas de aço, com os diâmetros de 3 mm, 4 mm, 5 mm e 6 mm e executadas as prensagens. Cabe lembrar que se optou por **defeitos** esféricos, representando poros, por serem mais fáceis de simulação e também para não se idealizar a experiência, uma vez que esses **defeitos** são mais difíceis de detectar do que aqueles com

bordas retas As prensagens foram executadas com cargas de 15 ton., para a caracterização dos **defeitos**. Posteriormente, as esferas foram retiradas, constatando-se visual e metricamente, com a ajuda de um micrômetro, em cada uma das placas, a reprodução das semi-esferas. A seguir, foram prensadas as guias, para manter o fechamento correto dos corpos-de-prova. A Figura 20 ilustra a construção descrita. A espessura do corpo-de-prova para o ensaio final, ensaio estereoradiográfico, vai ser definida posteriormente, devido ao resultado obtido com a sensibilidade radiográfica, de uma curva obtida experimentalmente.



Dimensões em mm

Figura 19 – Corpo-de-prova de forma escalonada

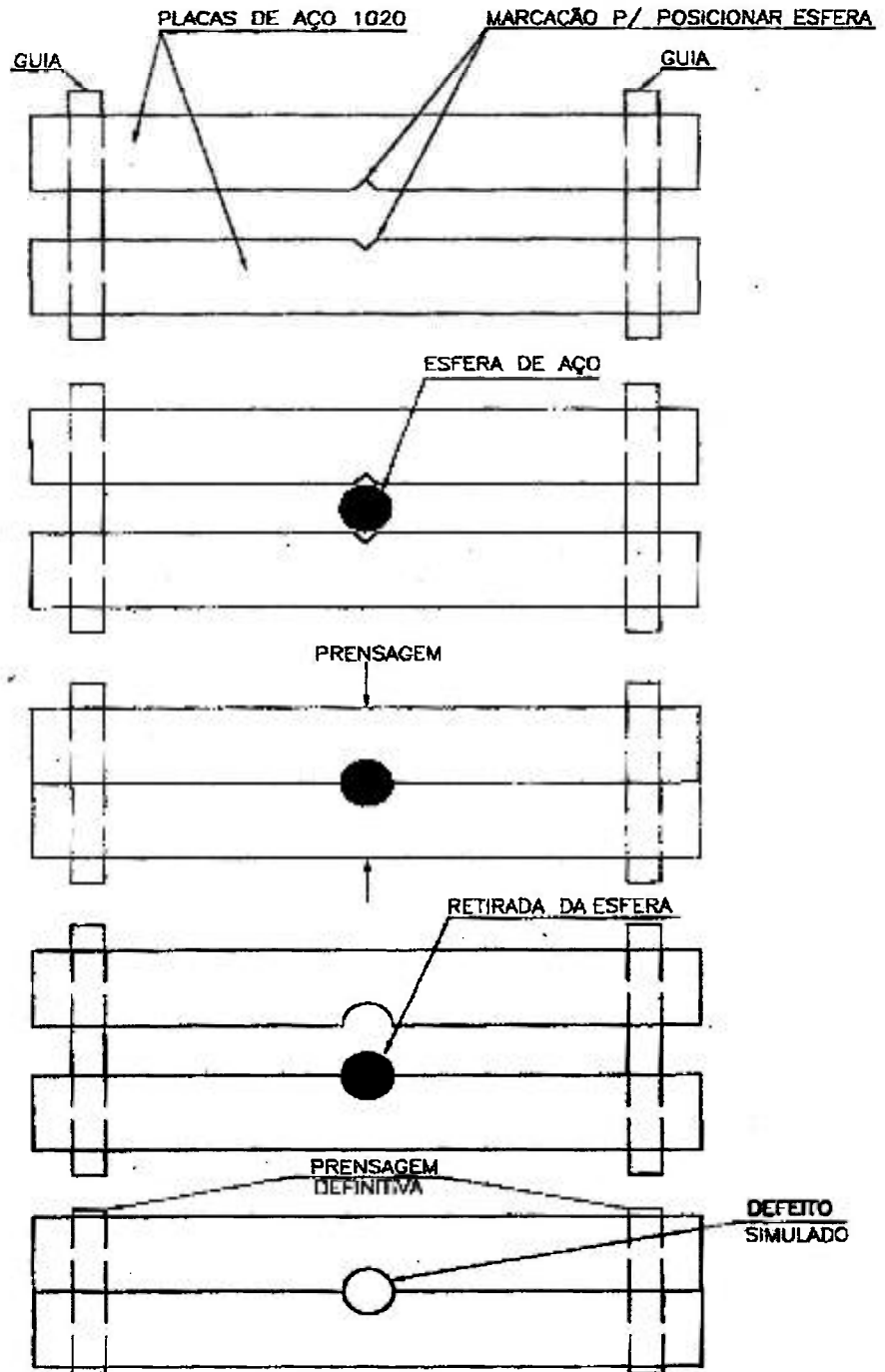


Figura 20 - Representação esquemática da simulação de um defeito em corpo-de-prova

## 4 PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 Ensaio radiográfico dos corpos-de-prova

Após a construção dos corpos-de-prova, realizaram-se diversos ensaios radiográficos, para atestarmos a qualidade dos corpos-de-prova, quanto ao ajuste das duas semi-esferas e verificação da sensibilidade radiográfica de alguns parâmetros. Para tanto construiu-se uma curva de exposição radiográfica, com o radioisótopo  $^{192}\text{Ir}$ , tomando-se por base, a faixa de espessuras, que permitisse a realização dos ensaios com a sensibilidade radiográfica entre 1% e 2%.

Para o levantamento da curva Fator de exposição versus Espessura do material<sup>(2,9,19,23,26)</sup> foi necessário construir-se antes, uma curva de **Densidade óptica** versus Tempo de exposição<sup>(2,9,19,23,26)</sup>, com o corpo-de-prova escalonado já mencionado anteriormente, com exposição central e feixe colimado, conforme representação esquemática apresentada na Figura 21.

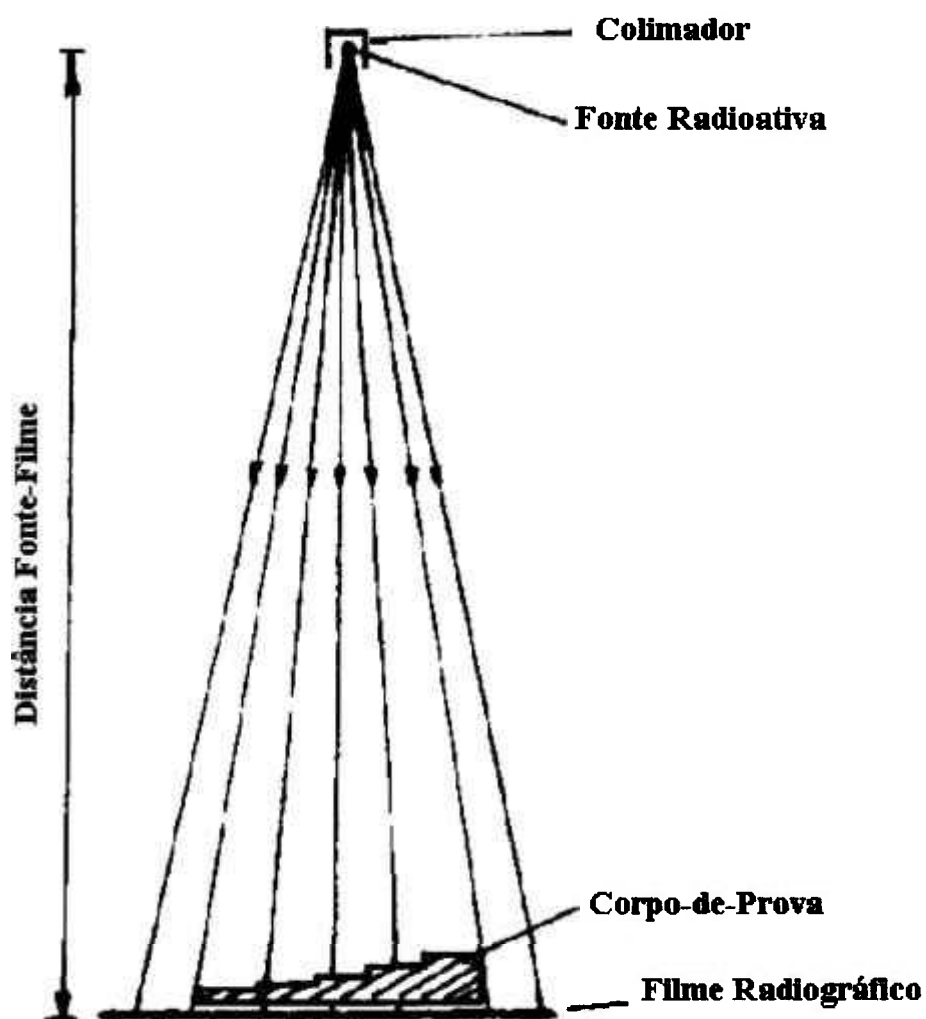


Figura 21 - Representação esquemática de exposição central com corpo-de-prova escalonado.

As curvas **Densidade óptica** versus Tempo de exposição, encontra-se representada na Figura 22.

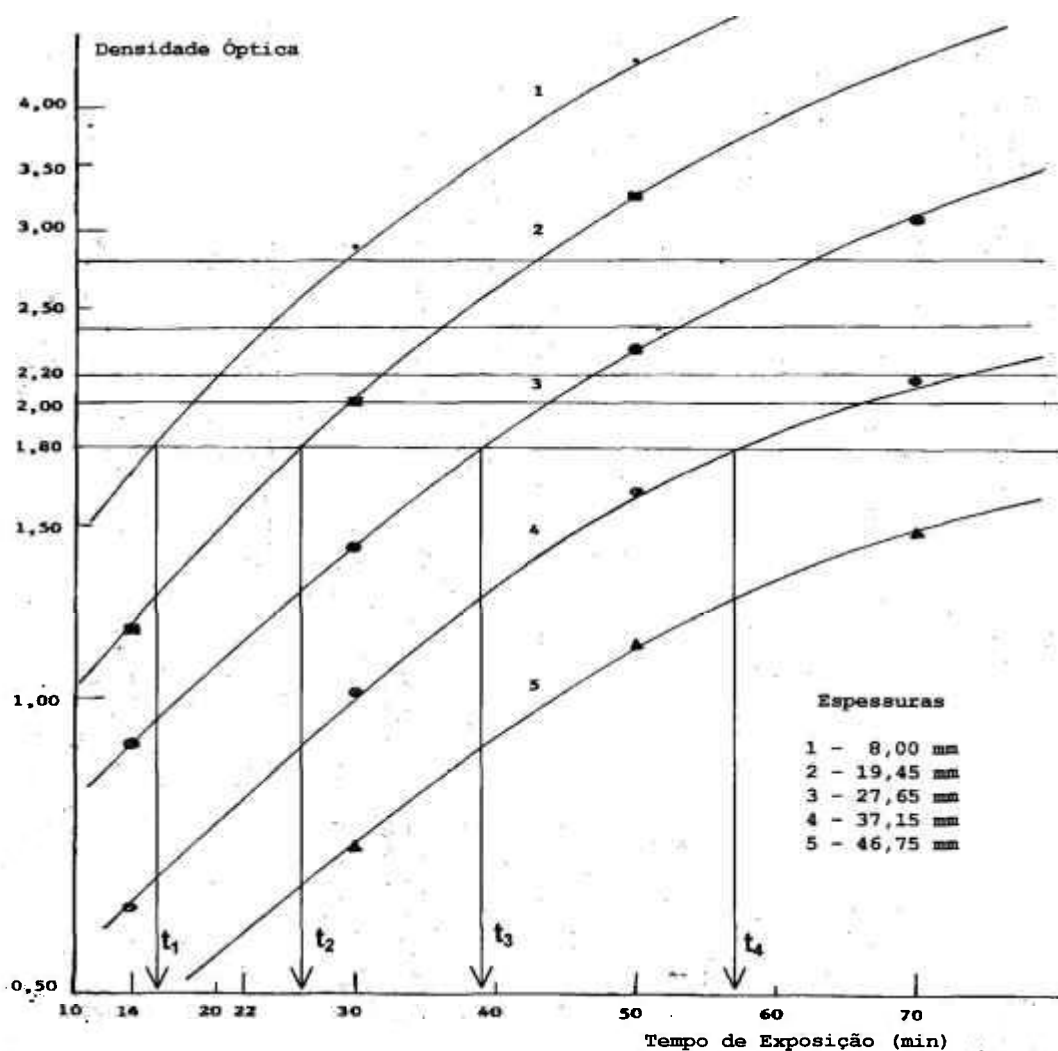


Figura 22- **Densidade óptica** em relação ao tempo de exposição para várias espessuras

Na Figura 22, as retas paralelas ao eixo do tempo de exposição representam as densidades ópticas usadas na confecção da Figura 23.

Utilizando-se as curvas da Figura 22, construiu-se uma outra, Fator de exposição versus Espessura do material ensaiado (Figura 23), tomando-se como parâmetro, as **densidades ópticas**: 1,80; 2,00; 2,20; 2,40 e 2,80. Para

exemplificar a construção da curva, usar-se-á a densidade óptica (DO) igual a 1,80. Nos pontos onde a  $DO = 1,80$  encontra as curvas das espessuras 1,2,3,4 e 5, traçam-se paralelas ao eixo das **densidades ópticas**, até encontrarem o eixo dos tempos de exposições. Assim, obter-se-ão vários tempos de exposições:  $t_1$  para a espessura 1,  $t_2$  para a espessura 2, etc. Com os tempos obtidos, calculam-se os fatores de exposição correspondentes, de acordo com a equação 11, pois a atividade da fonte de radiação é conhecida e a distância fonte-filme é estipulada de acordo com a conveniência. Assim, para a  $DO = 1,80$ , obteremos:  $(FE)_1 = A \cdot t_1 / d^2$ ;  $(FE)_2 = A \cdot t_2 / d^2$ , etc. A operação é repetida para todas as **densidades ópticas** escolhidas. Com os valores obtidos dos fatores de exposição, para cada **densidade óptica** e para cada espessura dos corpos-de-prova, constroi-se a curva da Figura 23.

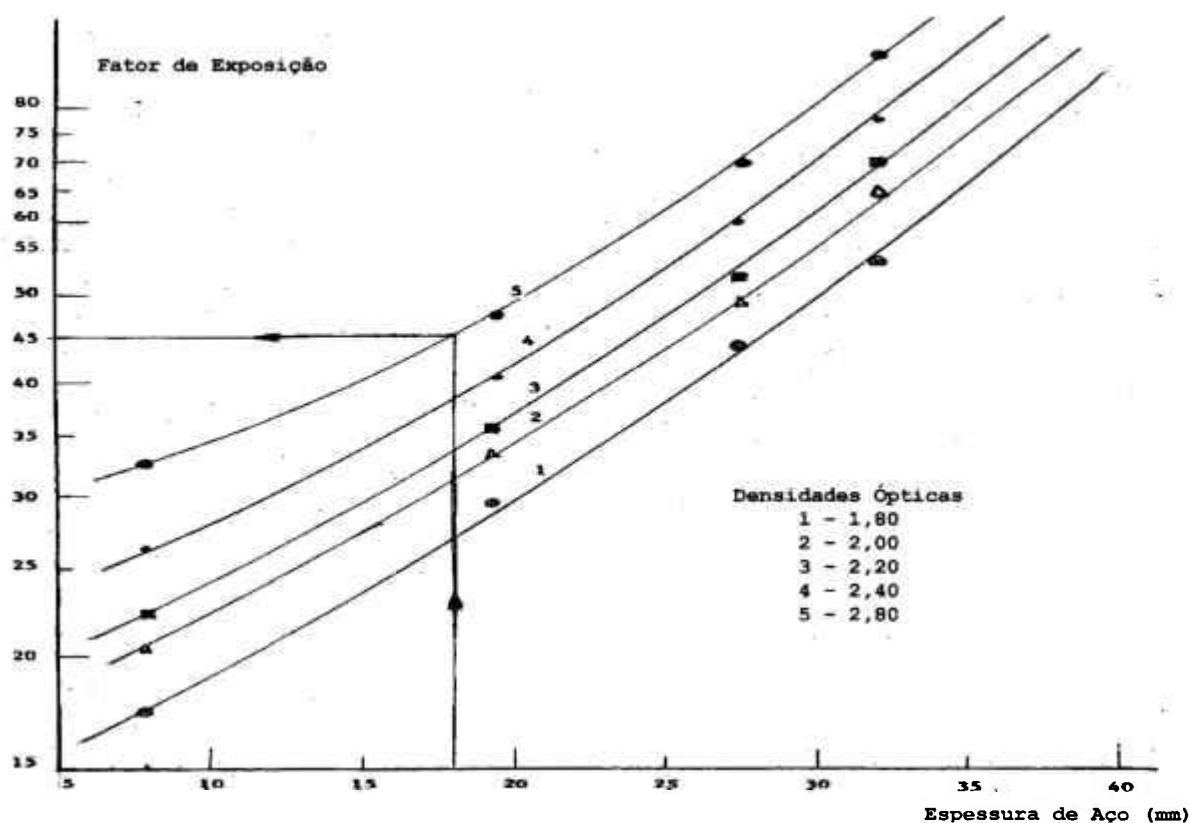


Figura 23 - Fator de exposição em relação à espessura de aço para várias **densidades ópticas**



A importância do Fator de exposição, é que a partir das curvas obtidas, pode-se calcular o tempo de exposição, para qualquer material, respeitados os **coeficientes de atenuação** ou densidades específicas, e para qualquer espessura, respeitado evidentemente a espessura equivalente em aço e o radioisótopo empregado. O fator de exposição pode ser definido matematicamente do seguinte modo:

$$FE = \frac{A \cdot t}{d^2} \quad (11)$$

onde:

**FE** é o fator de exposição

**A** é atividade da fonte de radiação, em Ci

**t** é o tempo de exposição, em min

**d** é a distância fonte-filme, em cm

Com base na Figura 23, e a partir da espessura do material, pode-se calcular o tempo de exposição, que é o parâmetro procurado.

## 4.2 Telas intensificadoras de exposição

Para se estudar a influência das telas, na sensibilidade radiográfica e por conseguinte, selecionar as **telas intensificadoras** nas espessuras mais adequadas, prepararam-se diferentes combinações de pares de telas de chumbo.

Os dados experimentais obtidos, com as **densidades ópticas** variando de 1,50 a 3,25, permitiu traçar a curva, como a da Figura 24, que relaciona a **densidade óptica** com a espessura do material ensaiado e o **contraste** radiográfico, com a espessuras das **telas intensificadoras** usadas.

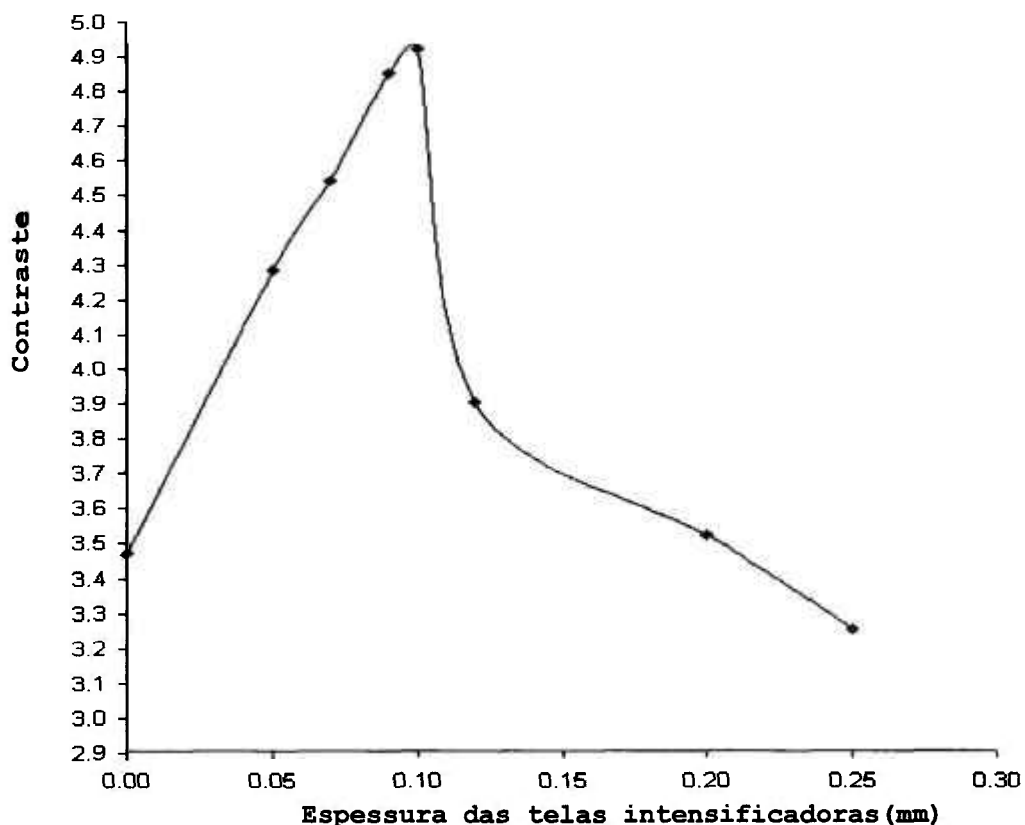


Figura 24 - Contraste radiográfico em função das espessuras das **telas Intensificadoras** de exposição

### 4.3 Espessura do corpo de prova para o ensaio final (estereoradiográfico)

A espessura do corpo-de-prova está intimamente ligada à sensibilidade radiográfica do ensaio. Ela foi determinada experimentalmente (ver a eq. 1 página 43), levando-se em consideração, a influência da radiação espalhada e o caráter polienergético do  $^{192}\text{Ir}$ . Baseando-se no comportamento da curva representada na Figura 25, verificou-se que a espessura do corpo-de-prova deveria estar compreendido entre 7,5 mm e 22,55 mm.

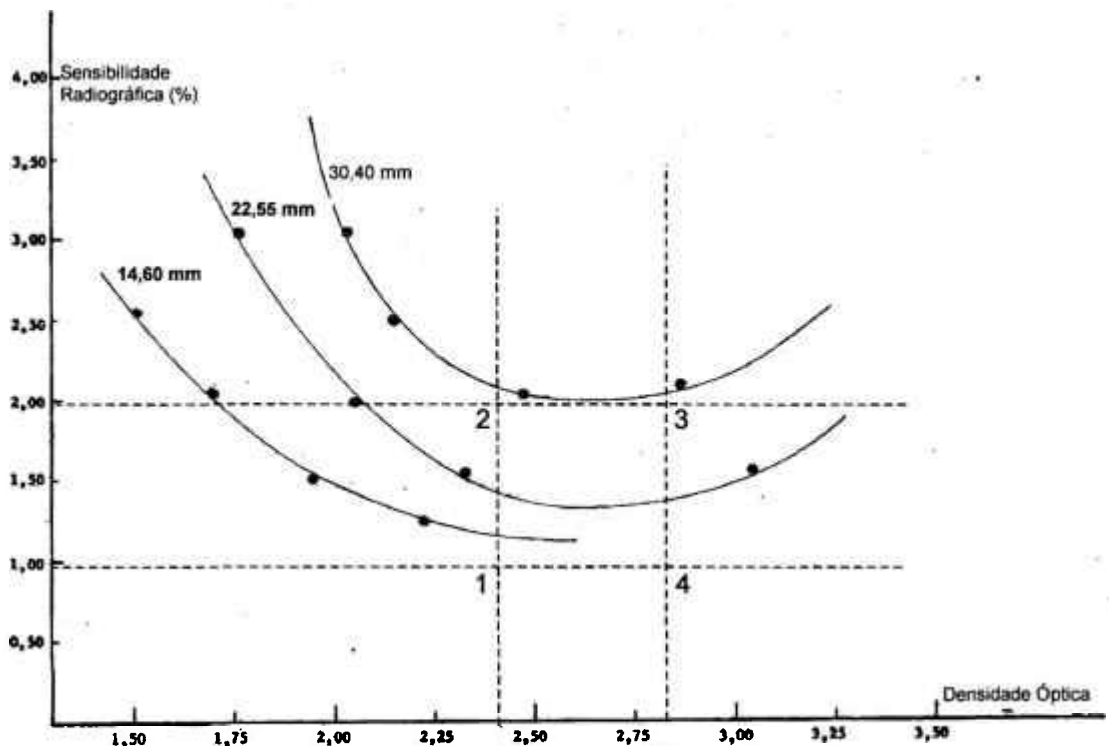


Figura 25- Sensibilidade radiográfica em função da **densidade óptica** para várias espessuras

Na figura 25, a região delimitada pelos algarismos 1, 2, 3 e 4, definem as espessuras ideais do corpo-de-prova.

#### 4.4 Ensaio estereoradiográfico<sup>(9,10,25,26)</sup>

Para o ensaio radiográfico final, ou seja, o ensaio estereoradiográfico, consideraram-se os seguintes parâmetros, já definidos anteriormente:

- fonte de radiação gama:  $^{192}\text{Ir}$ ;
- atividade da fonte: 36 Ci ( 1,332 TBq) em 02.10.2000;
- filmes radiográficos utilizados: Kodak, tipos AA e M;
- distância fonte-filme: 45 cm ;
- processamento fotográfico:
  - tempo de revelação: 5 min;
  - lavagem intermediária: 1 min;
  - tempo de fixação: 10 min;
  - lavagem final: 5 min(em água corrente);
  - secagem: temperatura ambiente, ar natural.

Além disso, são necessárias as espessuras anterior e posterior das **telas intensificadoras**, que serão determinadas na seção 5.1.2.

O método estereoradiográfico visto anteriormente, consiste basicamente na realização de duas exposições radiográficas sobre um mesmo filme. A fonte de radiação é única e é colocada em duas posições diferentes, separadas pela distância interpupilar normal. O deslocamento da imagem do **defeito** pode ser determinada em um negatoscópio com escala graduada ou simplesmente com o auxílio de um instrumento de medidas preciso. No

trabalho, foi utilizado um paquímetro Mitutoyo de 200 mm. O cálculo da profundidade do **defeito**, baseia-se em relações simples da geometria Euclidiana, isto é, em semelhança de triângulos.

A representação esquemática mostrada na Figura 26 permite considerar:

- $a$  = deslocamento da fonte radioisotópica da posição  $F_1$  para a posição  $F_2$ ;
- $d$  = distância fonte-filme;
- $b$  = deslocamento da imagem do **defeito**, da posição  $F'_1$  para a posição  $F'_2$ ;
- $x$  = distância do centro do **defeito** à superfície inferior do corpo-de-prova, que é a incógnita do problema.

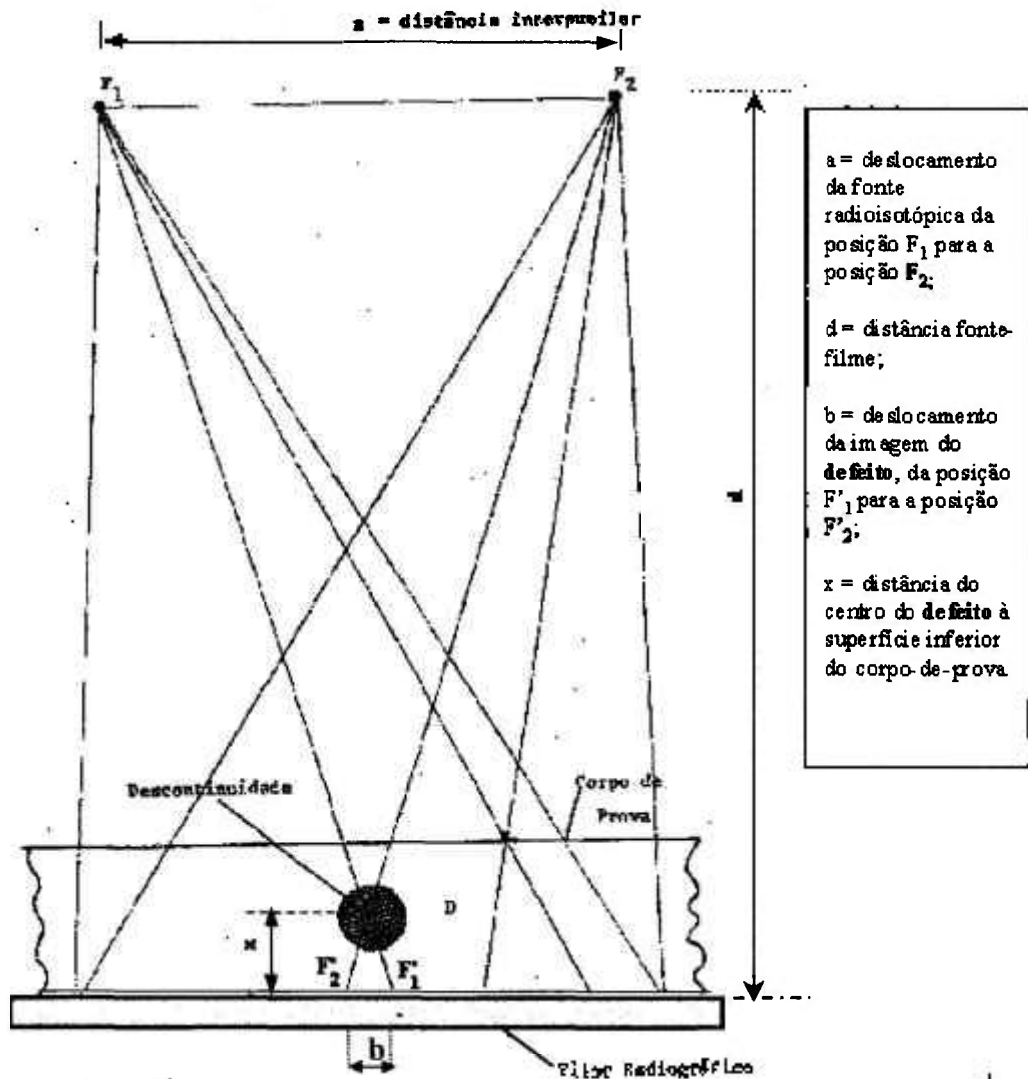


Figura 26 - Representação esquemática do ensaio estereoradiográfico

Para se determinar, com precisão, a profundidade na qual se encontra o **defeito**, algumas precauções devem ser tomadas:

- manter o deslocamento da fonte de radiação da posição  $F_1$  para a posição  $F_2$ , paralelo à posição do filme radiográfico;
- fazer as correções necessárias da distância  $x$  procurada, levando-se em conta que o corpo-de-prova não está em contato íntimo com o filme radiográfico.

A Figura 26, permite escrever a relação seguinte:

$$\Delta F_1 F_2 D \sim \Delta F'_1 F'_2 D$$

de onde, por semelhança de triângulos, pode-se escrever:

$$a/b = (d - x)/x$$

Tirando-se o valor de  $x$ :

$$x = \frac{b \cdot d}{a + b} \quad (12)$$

onde  $x$  representa o valor procurado, sem correções e que podemos chamar de  $x$  obtido ( $x_{\text{obtido}}$ )

O valor definitivo de  $x$ , é calculado como segue:

$$x_{\text{corrigido}} = x_{\text{obtido}} - (y + z + k) \quad (13)$$

onde  $y$  = espessura do conjunto (**tela intensificadora de exposição** anterior + suporte da tela + cola);

$z$  = espessura do chassis, situado entre a superfície inferior do corpo-de-prova e o conjunto descrito acima;

$k$  = espessura do papel protetor do filme, usado contra a entrada de luz.

## 5 RESULTADOS

O capítulo de resultados é apresentado em duas seções, sendo que na primeira, são mostrados e discutidos os resultados dos ensaios, que permitiram selecionar os parâmetros para a realização do teste de estereoradiografia<sup>(9,10,25,26)</sup>. Dentre os parâmetros estudados estão: a espessura do corpo de prova para o ensaio estereoradiográfico, as espessuras das **telas intensificadoras** de exposição e a radiação espalhada.

### 5.1. Resultados preliminares

#### 5.1.1 Espessura do corpo-de-prova

De acordo com o estabelecido no Capítulo 4, item 4.3, para uma sensibilidade radiográfica de ensaio, entre 1 % e 2 %, escolheu-se a espessura de 18,60 mm, levando-se em consideração que a melhor que a melhor imagem do **defeito** simulado, é obtida quando a **densidade óptica** varia entre 2,40 e 2,80, que corresponde ao intervalo de espessuras definido entre 14,60 mm e 22,55 mm.



### 5.1.2 Telas intensificadoras de exposição

A curva representada na Figura 24, permite observar que a espessura da **tela intensificadora** de exposição anterior ideal, que proporciona maior **densidade óptica**, mantendo-se constante a espessura do corpo-de-prova, é a de 0,10 mm de espessura, pois nos fornece o melhor contraste radiográfico.

A espessura da **tela intensificadora** de exposição posterior, foi mantida em 0,15 mm de espessura, suficiente para absorver a radiação retroespalhada e proporcionar uma qualidade de imagem melhor.

As telas assim definidas, foram incorporadas aos parâmetros já definidos no Capítulo 4, item 4.4, para a execução do ensaio de estereoradiografia<sup>(9,10,25,26)</sup>.

### 5.1.3 Radiação espalhada

Quanto a radiação espalhada, pode-se dizer que é impossível removê-la de um processo radiográfico, porém a sua redução é viável e desejável, desde que se observe o seguinte:

- Realização de ensaios com distância fonte-filme nunca inferior a distância ótima, que é normalmente duas vezes a maior dimensão da peça;

- Uso de pequeno ângulo de abertura do feixe primário de radiação;
- Realização dos ensaios em locais distantes de superfícies que possam espalhar a radiação;
- Uso de **telas intensificadoras** de exposição, de material de número atômico elevado, nas espessuras adequadas.

## 5.2 - Resultado do ensaio estereoradiográfico<sup>(9,10,25,26)</sup>

Substituindo na equação (12), os valores respectivos, previamente propostos e os medidos têm-se:

$$a = 70,0 \pm 0,5 \text{ mm}$$

$$d = 250,0 \pm 0,5 \text{ mm}$$

$b_1 = 3,350 \pm 0,005 \text{ mm}$  ( para o filme AA, mais rápido porém de menor sensibilidade)

$b_2 = 2,850 \pm 0,005 \text{ mm}$  ( para o filme M, de maior sensibilidade)

$$x_1 = [( 3,350 \pm 0,005 ) \cdot ( 250,0 \pm 0,5 )] / [(70,0 \pm 0,5) + (3,350 \pm 0,005)]$$

$$\therefore x_1 = 11,42 \pm 0,08 \text{ mm, para o filme AA}$$

$$x_2 = (2,850 \pm 0,005) \cdot (250,0 \pm 0,5) / (70,0 \pm 0,5) + (2,850 \pm 0,005)$$

$$x_2 = 9,78 \pm 0,07 \text{ mm, para o filme M}$$

Levando-se em conta as correções a serem efetuadas, temos:

$$y = 0,3468 \pm 0,0005 \text{ mm}$$

$$z = 1,650 \pm 0,005 \text{ mm}$$

$$k = 0,2395 \pm 0,0005 \text{ mm}$$

Substituindo estes valores de y, z e k na equação (13), temos:

Para o filme AA

$$x_{1\text{corrigido}} = (11,42 \pm 0,08) - [(0,3468 \pm 0,0005) + (1,650 \pm 0,005) + (0,2395 \pm 0,0005)]$$

$$\text{portanto } x_{1\text{corrigido}} = 9,18 \pm 0,08 \text{ mm para o filme AA}$$

A comparação percentual deste valor, obtido experimentalmente, com o do corpo-de-prova, especificado no Capítulo 5, item 5.1.1, que é de 9,30 mm, metade do corpo-de-prova, onde está localizado o **defeito**, encontra-se no capítulo seguinte.

Para o filme M

$y = 0$ , pois o filme M foi exposto diretamente, isto é, sem **tela intensificadora** de exposição

$z = 0$ , em virtude do filme M ter sido exposto sem chasis, pois sua embalagem original já fornece a proteção necessária contra a entrada de luz.

$$k = 0,3950 \pm 0,0007 \text{ mm}$$

Substituindo na eq. (13)

$$\text{então } x_2 \text{ corrigido} = (9,78 \pm 0,07) - (0,395 \pm 0,0007)$$

$$x_2 \text{ corrigido} = 9,38 \pm 0,07 \text{ mm}$$

A comparação percentual deste valor, obtido experimentalmente, com o do corpo-de-prova, especificado no Capítulo 5, item 5.1.1., que é de 9,30 mm, metade do corpo-de-prova, onde está localizado o **defeito**, encontra-se no capítulo seguinte.

## 6 CONCLUSÕES

Os ensaios laboratoriais realizados com a técnica estereoradiográfica, mostraram que se pode chegar às seguintes conclusões:

1-. Como primeira conclusão, é que a finalidade a que o trabalho se propôs, foi completamente conseguida e portanto, a técnica da estereoradiografia, tem um valor inestimável para a avaliação de defeitos tridimensionais em materiais metálicos.

2.- Os erros percentuais encontrados no ensaio estereoradiográfico de 0,86 %, no caso do filme M e 1,3%, no caso do filme AA, em relação ao valor real, é praticamente insignificante, mostrando a aplicabilidade da técnica e tornando-a uma ferramenta útil, na avaliação da posição do defeito dentro da massa metálica.

3- A metodologia é simples e eficaz, permitindo a localização precisa do **defeito** no interior do corpo-de-prova. A determinação da posição exata do **defeito** é importante, tanto para uma peça fundida ou para uma soldada, podendo-se definir se o **defeito** pode ou não ser eliminado com o auxílio de ferramental apropriado, independentemente se estivermos no campo ou na fábrica.

4- O custo envolvido na determinação da posição do **defeito**, não altera o custo final do ensaio radiográfico comum, uma vez que não envolve equipamentos especiais e/ou adicionais.

5– A espessura ideal da **tela intensificadora** anterior, para corpos-de-prova utilizando como fonte de radiação, o  $^{192}\text{Ir}$ , em todo o intervalo de espessuras, é de 0,10 mm. A espessura mínima da **tela intensificadora** posterior, para se evitar o efeito da radiação espalhada, é 0,15 mm.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

### 1-Comparação do método descrito, com o método da paralaxe.

O método da paralaxe é similar ao estereoscópico, inclusive quanto ao tratamento matemático, diferindo daquele: 1 - por não necessitar de exposições sobre dois filmes, pois não se utiliza de um visor estereoscópico e 2 - porque a distância que se desloca a fonte de radiação, entre duas posições, também paralelas ao filme, não é a distância interpupilar.

### 2-Comparação do método descrito, com o método das **densidades ópticas**.

O método das **densidades ópticas** consiste em elaborar fitas densitométricas, com valores entre 1,50 a 3,00, por exemplo, para sensibilidades radiográficas entre 1,00 e 2,00, que são as mais utilizadas industrialmente. Essas fitas constituem padrões e são elaboradas a partir de radiografias com corpos-de-prova de várias espessuras com **defeitos** simulados<sup>(21)</sup>, poros, por exemplo, para comparação com as **densidades ópticas** de **defeitos** similares, verificadas nas radiografias executadas no campo ou na fábrica.

### 3-Desenvolver trabalho de gamagrafia e estereoradiografia com outras fontes de radiação, como $^{75}\text{Se}$ , $^{169}\text{Yb}$ , $^{170}\text{Tm}$ , $^{60}\text{Co}$ , incluindo estudo da sensibilidade radiográfica.

Um trabalho bem mais amplo consiste em desenvolver as metodologias mencionadas acima, com outras fontes de radiação gama, principalmente o  $^{75}\text{Se}$  e  $^{169}\text{Yb}$ , fontes cujo uso atualmente está aumentando progressivamente.

## 8 ANEXO

### Glossário dos termos usados no trabalho

**Celas quentes** - São cubículos, de dimensões variadas, construídas a partir de armações de aço, com materiais de número atômico elevado, geralmente chumbo e nos quais se manipula, através de visores de vidro plumbífero e mediante pinças, garras especiais e telecomandos, materiais radioativos, de atividade média e elevada.

**Chassis** - É um dispositivo elaborado com material rígido ou flexível(papelão, plástico, etc.), que tem por finalidade proteger os filmes radiográficos, contra a entrada de luz e danos mecânicos.

**Coefficiente de atenuação linear ( $\mu_L$ )** - É a probabilidade que a radiação X ou  $\gamma$  apresenta de ser absorvida ou espalhada pelos átomos do material, sob a ação da radiação e por unidade de percurso. É expressa em  $\text{cm}^{-1}$ .

**Contraste** - Define-se contraste de um filme radiográfico, como a diferença de densidade óptica, provocada por uma variação de exposição entre dois pontos de um filme.

**Defeito** - É uma descontinuidade cujo tamanho, forma, orientação, localização ou propriedades tornam a peça que o contém, inútil para o serviço para a qual foi projetada. Também pode ser considerado, como uma descontinuidade que excede o critério de aceitação-rejeição, especificado por normas técnicas.

**Definição** - É a capacidade de um filme exposto à radiação ionizante, separar de um modo bastante visível, duas secções adjacentes, com distintas densidades ópticas (por haver recebido fluências diferentes de radiação).



**Densidade Óptica** - Chama-se densidade óptica ou densidade radiográfica, em determinado ponto de um filme, ao logaritmo decimal da relação entre a intensidade da luz visível incidente  $I_0$  e a transmitida  $I$ , nesse mesmo ponto.

$$DO = \log I_0 / I$$

**Espessura equivalente ao aço** - As curvas de exposição são sempre relacionadas a um material padrão, geralmente aço ou ferro. Quando se ensaia materiais com densidades específicas, superiores ou inferiores, é preciso calcular as espessuras equivalentes, para o uso correto das curvas de exposição. Matematicamente

$$e_{Fe(eq)} = e_x \cdot \delta_x / \delta_{Fe}$$

onde

$e_{Fe(eq)}$  é a espessura equivalente ao ferro/aço;

$e_x$  é a espessura do material sob ensaio;

$\delta_x$  é a densidade específica do material sob ensaio e

$\delta_{Fe}$  é a densidade específica do ferro/aço

Obs:esta equação aproximada só é válida na região do efeito Compton.

**Indicadores de qualidade de imagem (IQI)** - São peças metálicas de espessura pequena e bem definida com relação ao material ensaiado, de composição idêntica ou similar a ele. Estas peças são colocadas sobre o material e usadas para avaliar o grau de sensibilidade do ensaio radiográfico.

**$^{192}\text{Ir}$  (Iródio-192)** - Um isótopo radioativo, obtido em reator nuclear, a partir do  $^{191}\text{Ir}$ , que é natural e com abundância isotópica de 37,3%. Os outros 62,7% de abundância isotópica natural pertencem ao  $^{193}\text{Ir}$ . A reação nuclear que produz o  $^{192}\text{Ir}$  é  $^{191}\text{Ir} (n,\gamma) ^{192}\text{Ir}$ . Possui amplo espectro energético, apresentando uma meia vida de 74 dias, sendo por isso e por ter grande poder de penetração na matéria, o radioisótopo mais utilizado em ensaio não destrutivo (gamagrafia).

**Penumbra** - É uma zona de densidade óptica intermediária, que se apresenta no filme radiográfico e que prejudica a definição da imagem do objeto sob ensaio. É causada pelo tamanho inadequado da fonte de radiação (grandes dimensões), combinada com a distância excessiva do objeto em relação ao filme radiográfico.

**Poça** - É a parte líquida que se forma, por adição de material (eletrodo consumível) ou por fusão das bordas, chanfradas ou não (eletrodo não consumível), no ato da soldagem de uma peça.

**Solução fixadora** - A solução fixadora é um composto químico, que visa eliminar da emulsão, os cristais de haleto de prata que não foram reduzidos à prata metálica ou de outro modo, não sofreram a interação com a radiação ionizante.

**Solução paradora** - É uma solução simples, composta de água destilada com 3% de ácido acético, que tem a finalidade de interromper o processo de revelação e evitar a contaminação da solução fixadora.

**Solução reveladora** - A solução reveladora é um composto químico que atua sobre os cristais de haleto de prata, reduzindo a prata iônica e levando-a para o estado metálico, que produz uma imagem latente no filme radiográfico.

**Telas intensificadoras** de exposição - Nada mais são do que placas finíssimas, geralmente de material de número atômico elevado, normalmente chumbo, com uma pequena porcentagem de antimônio, laminadas e recortadas nas dimensões dos filmes radiográficos. São usadas aos pares, formando um sanduíche com o filme, de forma que a anterior, de menor espessura e voltada para a fonte radioisotópica, permita a passagem da radiação primária e produza um fluxo adicional de elétrons, reduzindo o tempo de exposição e a posterior, de maior espessura, bloqueie a radiação espalhada, que prejudica a definição da imagem radiográfica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Equipamento de radiografia gama*. ABNT 1984 ( NBR 8670).
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR METALS *Nondestructive evaluation and quality control*. ASM HANDBOOK. v. 17 , p. 295-358, 1989.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Forgings*. ASM HANDBOOK. v. 17, p 491-511, 1989.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Castings*. ASM HANDBOOK. v. 17, p. 512-535, 1989.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Weldments, brazed, assemblies and soldered joint*. ASM HANDBOOK. v. 17, p. 582- 609, 1989.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Controlling quality of radiographic testing*. ASTM E142-68 , 1968.
- 7 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Industrial radiographic films*. ASTM E 94, 1984.
- 8 BOYER, H. Nondestructive inspection and quality control. *Metals Handbook*, v. II, p. 446, 1976.
- 9 BRYANT, L.E.; MC ENTIRE, P. Radiographic and radiation testing. *Nondestructive testing handbook*, v. 3, 1985.

- 10 CARLSON, K.W; LAWRENCE, F.V. The examination of discontinuities in welds by stereoradiography. **International advance in nondestructive testing**. v. 5, p. 291-316, 1977.
- 11 FUCHS, A.W. *Principles of radiographic exposure and processing*. Springfield. 2. ed., 1980.
- 12 HALMSHAW, R. *Industrial radiography: theory and practice*. Applied Science. London., 1987.
- 13 HANDBOOK OF RADIOGRAPHIC. *Apparatus and Techniques*. The International Institute of Welding. London, 2. ed.. 1973.
- 14 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation protection and safety in industrial radiography*. Safety Series. n. 13, IAEA. Vienna, 1999.
- 15 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for safety of radiation sources*. Safety Series n. 115, IAEA, Vienna.
- 16 INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. *Apparatus for gamma radiography -Specifications*. ISO 3999, 1997.
- 17 INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. *Sealed radioactive source-Classification*. ISO 2919, 1980.
- 18 INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. *Sealed radioactive sources-Leak test methods*. ISO DTR 4826, 1975.

- 19 KODAK, E. *Radiographic in Modern Industry*. Eastman Kodak. Rochester, New York, N. Y., 1969.
- 20 LANDAUER, R.S.; CLARKE, E.T. Field determination of output and effective size of iridium-192 radiographic sources. *Mat. Eval.* v.37 n..11, p. 35-37, 1979.
- 21 LANDOLT, J.F. A technique for placing known defects in weldments. *Mat. Eval.* v. 21, p. 214-216,. 1973.
- 22 LANDOLT, J.F.; STUMP, W.D.; SUMMERS, J.L. A visual comparative method for radiographic determination of defect thickness. *Mat. Eval.* v. 36 ,no. 11, p. 33-39, 1978.
- 23 MCMASTER, R.C. *Nondestructive testing handbook*. Ronald, New York, N.Y., 1959.
- 24 RAMSDEN, D. X and gamma ray imaging techniques. International workshop, 1983, Southampton, England. *Nucl. Instr. Meth.Phys..* Section A, v. 222, n. 1, 1984.
- 25 RUMYANTSEV, S. *The use of radioactive isotopes in flaw detection. Industrial radiology*. Moscow, Foreign Languages, 1971.
- 26 SANCHEZ, W. *Ensaio não destrutivo pela técnica dos raios-X e raios gama*. Informação IEA n. 29, ago. 1974.
- 27 SULLIVAN, E.D. Radiographic sensitivity and detail visibility. *Mat. Eval.* v. 36, n.2, p.29-30, 1978.

- 29** WANK, S.A. Radiographic video technique for sizing defects in pipe welds. *Mat. Eval.* v. 39, n. 7, p. 748-751, 1981.
- 30** WYSNEWSKI, R.E. Quantitative evaluation of radiographic imaging variables. *Mat. Eval.* v. 41, n.7, p. 826-830, 1983.