UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OBTENÇÃO DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL DIGITAL DE ALTA RESOLUÇÃO UTILIZANDO RADIAÇÃO SINCROTRON E *IMAGING PLATE*

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Autor: Sandro Kazuki Cardoso Taguchi
Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara

RECIFE, MAIO DE 2004

"OBTENÇÃO DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL DIGITAL DE ALTA RESOLUÇÃO UTILIZANDO RADIAÇÃO SINCROTRON E IMAGING PLATE".

SANDRO KAZUKI CARDOSO TAGUCHI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO (UFPE)

Prof. Dr. RICARDO TADEU LOPES (UFRJ)

T128o **Taguchi, Sandro Kazuki Cardoso**

Obtenção de radiografia industrial digital de alta resolução utilizando radiação sincroton e *imaging plate.* - Recife: O Autor, 2004.

viii, 73 f., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Materiais e Fabricação.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica industrial - ensaios não-destrutivos 2. Radiação sincroton. 3. *imaging plate* I. Título.

621 CDD (22. ed.) BCTG/2005-04

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Tania e René, pela minha existência e formação.

A meus tios Nelma e Carlinhos, por também serem meus pais.

Ao amigo César Mafra, por seu incentivo e incondicional apoio em nossos nove anos de amizade.

Ao engenheiro Nelson, meu avô, fonte de inspiração ética e profissional.

A minha avó Gracinha e minhas amadas tias Zezé e Naia.

A minha Leila, pela colaboração incansável em todos os meus objetivos, sempre ao meu lado em quaisquer caminhos que eu vá.

Ao incansável Professor e amigo Armando Shinohara, pois sem seu apoio jamais teria conseguido chegar até este ponto.

Ao Professor Urtiga pelo apoio e encorajamento dados.

A todos que fazem a UFPE.

Finalmente, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para a realização deste trabalho, mesmo que nominalmente não tenham sido citados.

RESUMO

Inspeção radiológica para avaliação da integridade estrutural de equipamentos possui uma tradição de mais de 100 anos, e é predominantemente baseada na combinação de uma fonte radioativa e um filme. No decorrer dos anos, filmes especiais têm sido desenvolvidos para realização de ensaios não-destrutivos industriais, os quais permitem inspecionar com alto contraste e resolução espacial. Atualmente, filmes para raios-X industrial são capazes de apontar falhas inferiores a 12 ?m, e podem ser expostos à radiação por um tempo relativamente longo, por exemplo, até atingir a densidade óptica 5 e ainda permanecer na faixa linear. Com o avanço da tecnologia de microeletrônica e do conhecimento sobre o mecanismo de luminescência em cristais, detetores inovativos, denominados de detetores digitais, têm sido desenvolvidos para radiografia industrial, tais tecnologias conhecidas como *Imaging Plate* e *Flat Panel*, os quais surgiram na década de 80 e no final de 90, respectivamente. O progresso da tecnologia de detetores digitais tem sido acelerado em função do desenvolvimento da tecnologia de computadores, que têm se tornado mais velozes e mais baratos. A combinação das tecnologias de detetores digitais e computadores permite estabelecer métodos inteligentes de inspeção na indústria. Ademais, esta nova radiologia industrial digital também possibilita novas aplicações, que são inacessíveis com a radiografia tradicional.

No capítulo 3, componentes de chumbo de uma bateria automotiva, rejeitada devido a falha elétrica no processo de controle de qualidade da empresa, foram radiografados com um sistema de gamagrafia industrial utilizando uma fonte de Irídio-192 com 1,5Ci de atividade e um detetor digital *Imaging Plate*. A distância entre a fonte e o filme foi determinada e mantida em torno de 60 cm para obter excelente nitidez e resolução devido ao tamanho da fonte, minimizando assim o fenômeno de penumbra em função dos parâmetros geométricos. Devido à alta sensibilidade do filme *Imaging Plate*, o tempo de exposição foi de 300s. Como resultado de análise das imagens de radiografia digital, mesmo sem realizar um processamento das imagens, as imagens radiográficas indicam que a causa da falha elétrica deve ser pela alta densidade de bolhas de ar incorporadas no processo de fabricação da bateria, aumentando assim a resistência elétrica da bateria. Ademais, para avaliar qualitativamente as imagens obtidas com uma fonte de alta energia e um detetor de alta sensibilidade *Imaging Plate* através do sistema de gamagrafia, outros dois componentes distintos da bateria automotiva foram radiografados: isoladores de vidro para linhas de transmissão e uma tubulação de aço com revestimento térmico. Os resultados destes componentes são apresentados e discutidos, com enfoque na técnica de radiografia computadorizada (*Imaging Plate*).

No capítulo 4, é abordada a confecção de uma óptica de raios-X para produção de feixes paralelos utilizando um monocromador assimétrico fabricado a partir de um cristal de quartzo sintético de alta qualidade, facilidades do LNLS/CNPq- Laboratório Nacional de Luz Síncrotron e testes radiográficos digitais com *Imaging Plate*. O monocromador foi fabricado e testado no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Basicamente, o feixe de raios-X na estação experimental XRD-1 do LNLS/CNPq é focalizado com secções da ordem de 1 mm^2. A importante função do monocromador assimétrico foi de alargar e produzir um feixe de raios-X altamente paralelo e monocromático, o que elimina o efeito de penumbra, possibilitando obter

imagens radiográficas de alta resolução. Em função da energia crítica do anel do LNLS estar em torno de 8 keV, os testes de radiografia no presente trabalho limitaram-se a objetos de baixa absorção. Como resultado, um besouro foi selecionado por possuir uma estrutura interna altamente complexa e radiografado. Detalhes do besouro foram revelados com feixe monocromático, paralelo e utilizando o *Imaging Plate*.

No capítulo 5, são apresentados os resultados iniciais de aplicação de métodos de processamento das imagens digitais sobre as imagens radiográficas industriais digitais obtidas. Foram utilizados *softwares* comerciais, tais como: *VixWin 2000* da empresa *Gendex*, o *Corel Photopaint 10* e o *Adobe Photoshop 7.* Como resultado, através da utilização de um *software* de processamento de imagens, pode-se destacar ou realçar aspectos importantes que dificultam a interpretação em imagens originais. Além disto, também é possível extrair informações sob o aspecto dimensional da amostra radiografada, tais como espessura das paredes de uma tubulação e tamanho de defeitos nos dispositivos ensaiados.

Neste trabalho, discutimos a aplicação de gamagrafia industrial digital aliada com o detetor *Imaging Plate* para avaliar o interior dos isoladores de vidro íntegro e quebrado de linhas de transmissão de alta tensão, componentes de bateria e tubulações com defeitos internos. Ademais, imagens digitais obtidas com um feixe paralelo de raios-X de radiação síncrotron possibilitam obter imagens radiográficas de excelente qualidade e em fração de minutos. O detetor *Imaging Plate* (IP), embora ainda não apresente a resolução comparável a um filme de raios-X industrial de alta resolução, mas apresentam muitas vantagens, tais como: sua maior linearidade de resposta devido a maior faixa dinâmica, maior sensibilidade permitindo a utilização de fontes de menor atividade, o fato de serem reutilizáveis e o envio das imagens digitalizadas por meio de *network*. Os resultados apresentados no presente trabalho de mestrado mostram que imagens radiográficas industriais de excelente qualidade de componentes industriais podem ser obtidas com o *Imaging Plate*, mesmo utilizando uma fonte de radiação convencional e de baixíssima atividade.

ABSTRACT

Radiographic inspection for evaluation of equipment structural integrity has a hundred-year tradition, and is predominantly based in combination of a radioactive source and a film. Along years, it has developed special films for realization of industrial nondestructive tests, allowing make inspections with high contrast and spatial resolution. Nowadays, X-rays films are capable to point failures under 12 ?m, and can be exposed to radiation for a relatively long time, for instance, until reach the optical density 5 and stay yet in the linear range. With the advance of microelectronics technology and knowledge of crystal luminescence, innovative detectors, called digital detectors, were developed for industrial radiography, and this technologies were nominated Imaging Plate and Flat Panel, arising at decade of 80's and 90's, respectively. The digital detector technology progress accelerates due to development of computer technology that becomes more fast and non-expensive. The combination of digital detectors and computer technologies allows establish intelligent inspection methods at industry. Moreover, this new digital industrial radiology also allows new applications, inaccessible with the conventional radiography.

In the chapter 3, radiographs of lead components of an automotive battery, rejected due to electric failure at the quality control process, were taken with an industrial gamagraphy system, using an Ir-192 source with activity of 1,5Ci and a digital detector Imaging Plate. The source-detector distance was determinate and conserved at approximately 60 cm, allowing obtaining maximum sharp and resolution due to source size, minimizing geometric unsharpness phenomenon. Due to high sensitivity of Imaging Plate, the exposition time was approximately 300 s. As result of digital radiography analysis, even without use of imaging processing, the radiographs indicates that the electrical failure was caused by high density of air-bubbles incorporated at fabrication process of batteries, increasing the battery electrical resistance. Moreover, for qualitative evaluation of images obtained with gamagraphy using a high energy source and a high sensitivity detector Imaging Plate, radiographs of other two different automotive battery components were taken: glass electrical insulators for transmission lines and insulated steel pipes. The results of these components are presented and examined, enhancing the technique of computed radiography (Imaging Plate).

At the fourth chapter, it studies confection of X-rays optics for production of parallel beams using an asymmetrical monochromator maked with high quality synthetic quartz crystal, facilities of LNLS/CNPq – National Laboratory of Synchrotron Light and digital radiographic tests with Imaging Plate. The utilized monochromator was developed and tested in the Mechanical Engineering Department of the Federal University of Pernambuco (UFPE). Basically, the X-rays beams at XRD1 experimental station of the LNLS/CNPq were focalized with 1 mm^2 sections. The important function of asymmetrical monochromator is dilate and make the X-rays beam highly parallel and monochromatized, that eliminated the geometric unsharpness and permit to make high resolution radiographs. In function of critical energy of ring is approximately 8 KeV, the radiography tests in this present paper were limited at small absorption objects. As result, a beetle was selected because it

has high complex structure and its radiograph was taken. Beetle details were reveled with parallel monochromatized beams and Imaging Plate.

In the chapter 5, initial results of application of digital imaging processing methods at the industrial digital radiographs are presented. Commercial softwares were utilized: *Vix Win 2000* (Gendex), *Corel Photopaint 10* and *Adobe Photoshop 7*. As result, by means of utilization of imaging processing software, interesting aspects was emphasized, whose interpretation is difficult on the initial image. Moreover, it is also possible to extract informations about the dimensional characteristics of the radiographic sample, such thickness of pipe walls and defect size at tested devices.

In this paper, we discussed the industrial digital gamagraphy application with the Imaging Plate detector to evaluation of the interior of integer and broken glass electrical insulators of high tension transmission lines, battery components and pipes with internal defects. Moreover, digital images obtained with a parallel X-rays beam utilizing synchrotron light allow obtaining high quality images in a fraction of minutes. The Imaging Plate (IP) detector, although it doesn't have the resolution of an industrial high resolution film, but it have many advantages, including: higher linearity of response due its high dynamic range, high sensitivity allowing the use of lower activity radiation sources, reuse and sending of the digitized images to the network. The presented results in this paper show that excellent quality industrial radiographs of industrial components can be obtained with Imaging Plate, even using a conventional and very small activity source.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1

1.1 Histórico sobre Radiografia 1

1.2 Bases da Técnica Radiográfica 2
1.2.1 Fontes de Radiação 3
1.2.1.1 Aceleradores 3
1.2.1.2 Decaimento radioativo 4
1.2.1.3 Aniquilação de pares 4
1.2.2 Detetores 4

1.3 Natureza da Radiação 5

1.4 Radiografia Digital 7
1.4.1 Detetores digitais 10

1.5 Radiografia Digital com *Imaging Plate* 12

1.6 Influência da Direção dos Feixes de Radiação na Nitidez da Radiografia ... 14
1.6.1 Princípios da Óptica Geométrica 14
1.6.2 Aplicação à Radiografia 15

1.7 Técnicas Radiográficas Atuais 15

1.8 Feixes Paralelos 17

1.9 Tomografia Computadorizada 18

1.10 Processamento de Imagens 19

1.11 Interpretação de Radiografias 19

1.12 OBJETIVOS 20

CAPÍTULO 2. IMAGENS RADIOGRÁFICAS DIGITAIS DE GAMAGRAFIA INDUSTRIAL UTILIZANDO O DETETOR *IMAGING PLATE* 21

2.1 Introdução 21

2.2 Tecnologia do Detetor *Imaging Plate* 22

2.3 Materiais e Métodos 26
2.3.1 Métodos 26
2.3.2 Materiais 28

2.4 Resultados e Discussão 31
2.4.1 Determinação da distância ótima para obtenção de uma imagem radiográfica de alta nitidez 31

2.5 Conclusões 36

CAPÍTULO 3. RADIOGRAFIA DIGITAL DE ALTA RESOLUÇÃO COM FEIXES PARALELOS DE RADIAÇÃO SÍNCROTRON 38

3.1 Introdução 38
3.1.1 Radiografia Computadorizada de Alta Resolução 38
3.1.2 Feixes Paralelos de Radiação Síncrotron, obtidos a partir de Monocromador de Quartzo Assimétrico 38

3.2 Materiais e Métodos 39
3.2.1 Construção de Monocromador Assimétrico de Quartzo 39

3.2.2 Base Ajustável para Fixação do Monocromador Assimétrico 41

3.3 Resultados 47

CAPÍTULO 4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL 49

4.1 Introdução 49

4.2 Fundamentos de Imagem Digital 49

4.3 Representação da Imagem Digital 51

4.4 Etapas do Processamento de Imagens 53

4.5 Tópicos de Processamento de Imagens 54
4.5.1 Reamostragem 54
4.5.2 Histograma 54
4.5.3 Operações Lineares: a Transformada de Fourier 55
4.5.4 Filtragem Linear 55
4.5.5 Filtragem Não-linear 55

4.6 Formatos de arquivos de imagens gráficas 55
4.6.1 BMP 55
4.6.2 GIF: *Graphics Interchange Format* 56
4.6.3 JPEG: *Joint Photographic Experts Group* 56
4.6.4 TIFF: *Tagged Image File Format* 56
4.6.5 CPT 57

4.7 *Softwares* de Tratamento de Imagens Digitais 57

4.8 Materiais e Métodos 58
4.8.1 *VixWin 2000* 58
4.8.2 *Adobe Photoshop 7.0* 59
4.8.3 *Corel Photopaint 10* 59

4.9 Resultados e Discussão 59
4.9.1 *VixWin 2000* 59
4.9.2 *Corel Photopaint 10* 63
4.9.3 *Adobe Photoshop 7.0* 64

4.10 Conclusões 66

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 67

5.1 Conclusões 67

5.2 Trabalhos Futuros 67

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 68

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Na indústria, ensaios de materiais são uma prática comum, objetivando avaliar as condições de operação de equipamentos e materiais, sua confiabilidade, vida útil, estado de conservação e, algumas vezes também, determinar o motivo da falha ou quebra de componentes.

Os ensaios de materiais podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Ensaio Destrutivo: no qual o componente ou material analisado é destruído no processo de análise. Um exemplo clássico é o ensaio de tração mecânica, onde o corpo de prova do material estudado é tracionado até o ponto de sua ruptura.

- Ensaio Não Destrutivo (END): como sugere sua denominação, neste tipo de ensaio, o objeto analisado não é inutilizado no teste. Nesta situação há a vantagem de se avaliar um componente em uso, sendo perfeitamente possível tornar a utilizá-lo. De fato, muitas vezes não é necessário ao menos a parada da máquina ou processo, proporcionando vantagens óbvias de custo e produção.

Vários são os tipos de END, como ultra-som, partículas magnéticas e a radiografia industrial (Soisson, s.d.).

No presente trabalho, trataremos da radiografia destinada a ensaios industriais, abordando mais especificamente a técnica de radiografia computadorizada de alta resolução com placa de imagem (*Imaging Plate*).

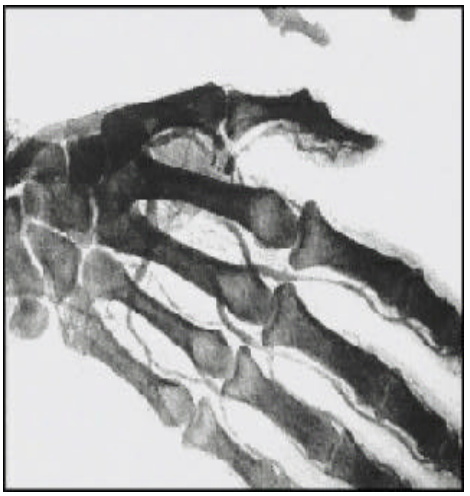
1.1 Histórico sobre Radiografia

A utilização da radiografia (técnica de análise por meio dos raios-X) começou com a descoberta dos raios-X há mais de um século (1895), por Wilhelm Konrad Röentgen (NDT Resource Center, s.d.), cuja importância lhe rendeu o prêmio Nobel de Física de 1901 (Cornuejols & Manzoni-Etxepare, ed., 2001). Ele pesquisava a fluorescência causada por raios catódicos em uma folha de papel recoberta com um material chamado platino-cianeto de bário. Acidentalmente, ele esqueceu de retirar uma caixa de papelão que protegia a ampola de raios catódicos e observou que, mesmo assim, a fluorescência ocorria na película de sal de bário. A fluorescência persistia mesmo colocando-se um livro ou uma placa de alumínio como obstáculos. Röentgen concluiu que a ampola emitia algum outro tipo de raio, além dos raios catódicos, que ultrapassava materiais atingindo a película de sal de bário. Como, no momento de sua descoberta, Röentgen desconhecia sua natureza, ele resolveu chamá-los de “X” (Turcato, s.d.) (Figura 1.1).

Henri Becquerel, Pierre e Marie Curie detectaram que metais pesados como o urânio e o rádio emitiam um tipo de radiação muito semelhante aos raios X, surgindo assim a denominação radioatividade. Outros experimentos posteriores levaram à descoberta do raio ? (gama), cuja utilização para análise de materiais chama-se gamagrafia (Turcato, s.d.).

Mais fontes de radiação foram descobertas e utilizadas, como os elementos radioisótopos artificiais a exemplo do Irídio-192 e Césio-137 e, mais recentemente, a radiação proveniente da luz síncrotron. Esta última foi descoberta por cientistas americanos em 1947 e é obtida a partir de aceleradores de partículas que, ao variar a energia cinética de partículas subatômicas (elétrons), as faz emitir fótons (luz).

Os raios X apresentaram perspectivas jamais vistas pela humanidade em áreas como medicina, cristalografia e espectrografia. De sua descoberta aos dias de hoje, a radiografia evoluiu bastante.



Figuras 1.1 – À esquerda, pintura demonstrando Röentgen e sua esposa em uma das primeiras utilizações da técnica radiográfica; à direita, radiografia da mão da esposa de Röentgen (Cornuejols & Manzoni-Etxepare, ed., 2001).

Sinteticamente, podemos descrever radiografia como o processo no qual a radiação emitida por uma fonte transpassa o material ensaiado, chegando até um revelador ou detetor.

A quantidade de radiação que passa depende da densidade de matéria em cada ponto, sendo tanto maior quanto menor for a densidade e vice-versa. Desta forma, é possível não apenas ser revelada a geometria do corpo como as variações de densidades no mesmo (espessura, furos, etc.).

Duas áreas utilizam bastante o processo de radiografia, a médica e a industrial.

- Radiografia Médica: onde podemos destacar a radiografia como importante ferramenta de diagnóstico em especialidades como ortopedia, cardiologia e pneumologia.

- Radiografia Industrial (END) – Ensaio que, como dito antes, permite a análise de componentes com relação a suas propriedades e aspectos morfológicos e dimensionais, sem a sua inutilização durante o ensaio.

1.2 Bases da Técnica Radiográfica

A técnica da radiografia consiste em colocar-se o material a ser ensaiado entre uma fonte emissora de radiação e um detetor. Parte da radiação é absorvida pelo material e parte irá atravessá-lo, sensibilizando o detetor.

1.2.1 Fontes de Radiação

As radiações podem ser emitidas por elementos químicos com núcleos atômicos instáveis ou por equipamentos. Elementos químicos radioativos podem ser encontrados na natureza (como o Urânio natural ou o Tório das areias monazíticas) ou produzidos pelo homem através de reações específicas em aceleradores de partículas ou reatores nucleares.

Aceleradores de partículas e tubos de raios-X são fontes de radiação sem a utilização de elementos químicos radioativos. Quando desligados, aceleradores e tubos de raios-X não emitem radiação.

A seguir, serão discutidas algumas fontes de radiação eletromagnética.

1.2.1.1 Aceleradores

São equipamentos que não possuem material radioativo em seu sistema, porém utilizam partículas como os elétrons, produzidos a partir do aquecimento de um filamento e acelerados em direção a um alvo, a fim de produzirem radiação eletromagnética (em geral, raios-X).

Ao colidirem no alvo, os elétrons sofrem o chamado efeito *bremsstrahlung* (radiação de freiamento, em alemão), que é a emissão de raios-X com um amplo espectro de energia devido à desaceleração brusca dos elétrons no alvo (Figura 1.2).

No alvo, também ocorrem os efeitos de excitação e deexcitação eletrônica, em que a energia dos elétrons incidentes é transferida aos elétrons dos átomos do alvo, fazendo com que mudem de nível eletrônico (excitação). Ao regressarem ao seu estado fundamental (deexcitação), emitem o excesso de energia sob a forma de raios-X. A energia dos raios-X emitidos desta maneira depende da diferença entre as energias dos níveis dos átomos do alvo, e por isso é denominada de radiação característica (Schaberle & Silva, 2000).

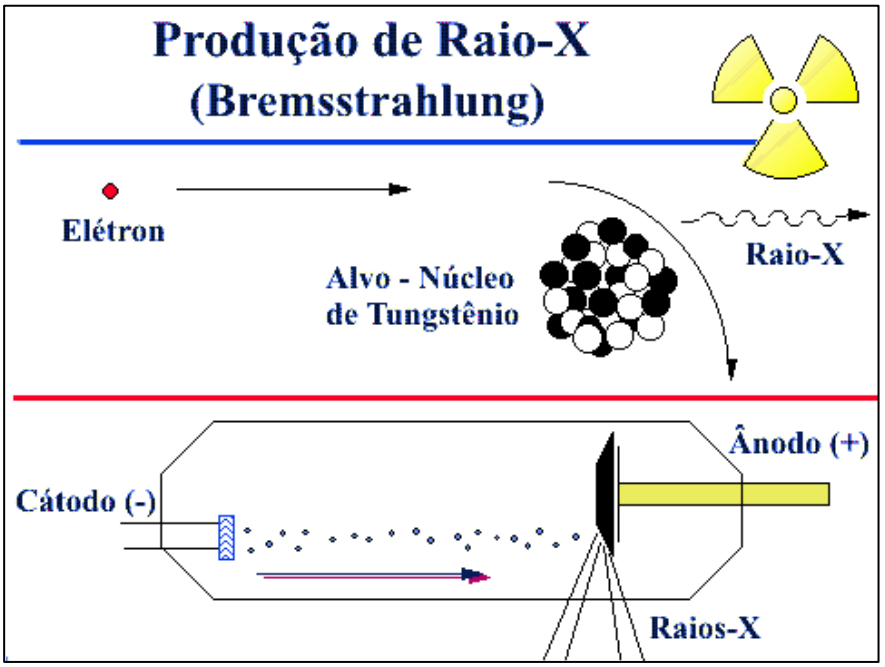


Figura 1.2 – Esquema demonstrando o efeito *Bremsstrahlung* (The Health Physics Society, 2004).

1.2.1.2 Decaimento radioativo

Decaimentos radioativos e reações nucleares podem produzir radiação eletromagnética, a qual é emitida para retirar o excesso de energia dos núcleos, geralmente após algum outro tipo de decaimento. Por ser de origem nuclear (diferentemente dos raios-X, que são de origem atômica) é denominada radiação gama. O Cobalto-60 (^{60}Co), o Césio-137 (^{137}Cs) e o Sódio-22 (^{22}Na) são exemplos de elementos que emitem raios gama (além de outros tipos de radiação).

Raios-X também podem ser produzidos em decaimentos radioativos em que acontece a "captura" de um elétron pelo núcleo, deixando uma lacuna na camada eletrônica. O rearranjo dos elétrons orbitais para preencher esta lacuna provoca a emissão de raios-X característicos.

1.2.1.3 Aniquilação de pares

Ocorre quando uma partícula encontra a sua antipartícula e, na interação, desaparecem, produzindo radiação eletromagnética. Na aniquilação do par elétron-pósitron, um elétron encontra-se com um pósitron produzido, por exemplo, em um decaimento nuclear e ambos desaparecem originando um par de fótons (radiação gama) com uma energia mínima de 0,511 MeV cada (a massa de repouso do elétron) (Schaberle & Silva, 2000).

1.2.2 Detetores

Têm a função de captar a radiação que atravessa o corpo analisado, em suas diferentes intensidades, formando assim uma imagem de seu interior, fornecendo a visualização de aspectos importantes, como:

- Sua geometria e aspectos dimensionais;
- Presença de escórias (que possuem baixa densidade);
- Porosidades do material;
- Penetração de soldas;
- Outros.

Os filmes radiográficos são escolhidos em função do ensaio a ser realizado, de acordo com algumas características: densidade radiográfica, contraste da imagem, velocidade do filme e granulometria.

Os detetores ou filmes mais simples são recobertos dos dois lados por uma emulsão de sais de prata (AgBr). Depois que são expostos à radiação, os grãos dos sais de prata reagem quimicamente com o revelador, transformando-se em prata metálica enegrecida (Turcato, s.d.).

A partir da década de 1980, houve o desenvolvimento e comercialização de novos detetores digitais, como o *Imaging Plate* (IP) (Takahashi, 2002) e o detetor de tela plana TFT (*Thin Film Transistor*) que possui transistores de silício amorfo, cuja característica é a de suportar altas doses de radiação a fim de observar imagens radiográficas *on line* (Ewert, dez. 2002).

No campo dos detetores, avanços como estes trouxeram maior sensibilidade, resolução espacial, maior faixa dinâmica, maior linearidade de resposta, possibilidade de reutilização, entre outras vantagens.

1.3 Natureza da Radiação

Em um sentido abrangente, radiação é aquilo que irradia (sai em raios) de algum lugar. Em física, o termo refere-se usualmente a partículas e ondas que se propagam (transferindo energia) no espaço (preenchido ou não por matéria).

A radiação pode ser de natureza particulada (de partículas) ou ondulatória (de ondas). A primeira é caracterizada por sua carga, massa e velocidade. Prótons, nêutrons e elétrons ejetados de átomos ou núcleos atômicos são exemplos de radiação particulada. A radiação ondulatória, ou eletromagnética, é constituída por campos elétricos e magnéticos variando no espaço e no tempo. Caracteriza-se pela amplitude e pela freqüência (ou, alternativamente, pelo comprimento de onda) da oscilação.

A velocidade de propagação da radiação eletromagnética em um dado meio é sempre constante, atingindo seu valor máximo no vácuo (cerca de 300.000 km/s). Apesar de não possuir carga ou massa, carrega energia e momento. A radiação eletromagnética é absorvida e emitida pela matéria em quanta de energia. As ondas de rádio, a luz visível e os raios-X são exemplos de radiação eletromagnética.

As radiações (partículas ou ondas) podem ser ionizantes ou não-ionizantes. A ionização ocorre quando a energia da radiação incidente sobre um material é suficiente para arrancar elétrons dos seus átomos. No caso da radiação não-ionizante, pode ocorrer a excitação do átomo, onde elétrons são levados a camadas mais externas do átomo, sem serem ejetados.

Para a excitação de um átomo, a energia fornecida pela radiação deve ser igual à diferença de energia entre os níveis de origem e de destino do elétron. Este fato ocorre porque os elétrons se encontram em níveis de energia bem definidos nas camadas eletrônicas dos átomos (Schaberle & Silva, 2000).

a) Raios X – Tanto os raios X como os raios gama são formas de radiação eletromagnética de natureza ondulatória, assim como a luz visível. Eles possuem pequeno comprimento de onda e, portanto, alta freqüência (Turcato, s.d.). Sendo assim, possuem alta capacidade de transpassar uma ampla gama de materiais, em quantidade tanto maior quanto menor for a densidade do mesmo. A figura 1.3 mostra uma forma didática de demonstrar a faixa do espectro de cada onda, lembrando, porém, que fisicamente este limite entre um tipo de onda e outro não existe.

b) Raios ? (gama) – É possível encontrar átomos do mesmo elemento químico com diferentes quantidades de nêutrons no seu núcleo. Esses elementos são chamados isótopos. Muitos dos isótopos dos elementos encontrados na natureza são radioativos, isto é, emitem espontaneamente do núcleo partículas e radiações eletromagnéticas. As partículas e radiações eletromagnéticas emitidas por estes isótopos são de três tipos: alfa, beta e gama. Os raios gama são radiações eletromagnéticas com alto poder de penetração. Na gamagrafia, são utilizados isótopos artificiais, os quais são obtidos nos reatores nucleares bombardeando-se nêutrons nos núcleos dos átomos (Fig. 1.4). Exemplos de isótopos são o Ir-192 e o Cs-137. A região dos raios gama estende-se desde os $5x10^{19}$Hz até aproximadamente 10^{22} Hz (comprimento de onda desde os $6x10^{-12}$ m até aproximadamente $3x10^{-14}$ m).

c) Nêutrons – Partículas subatômicas que, dado às suas dimensões e neutralidade no que diz respeito à carga elétrica, também possuem a capacidade de atravessar vários materiais, em graus que também dependem da densidade dos

mesmos. Nêutrons são em geral obtidos a partir da fissão espontânea ou em reações nucleares específicas, pois os decaimentos radioativos por emissão de nêutrons têm uma meia vida (tempo necessário para que metade dos átomos de uma amostra decaia) tão curta que em geral não são aproveitáveis no laboratório. Na fissão espontânea, um núcleo pesado se parte em dois mais leves emitindo alguns nêutrons, como acontece com o califórnio-252. Em fontes de rádio-berílio acontecem reações nucleares em que uma partícula alfa emitida pelo núcleo do rádio é absorvida por um núcleo de berílio e o novo núcleo assim formado decai emitindo um nêutron (Schaberle & Silva, 2000).

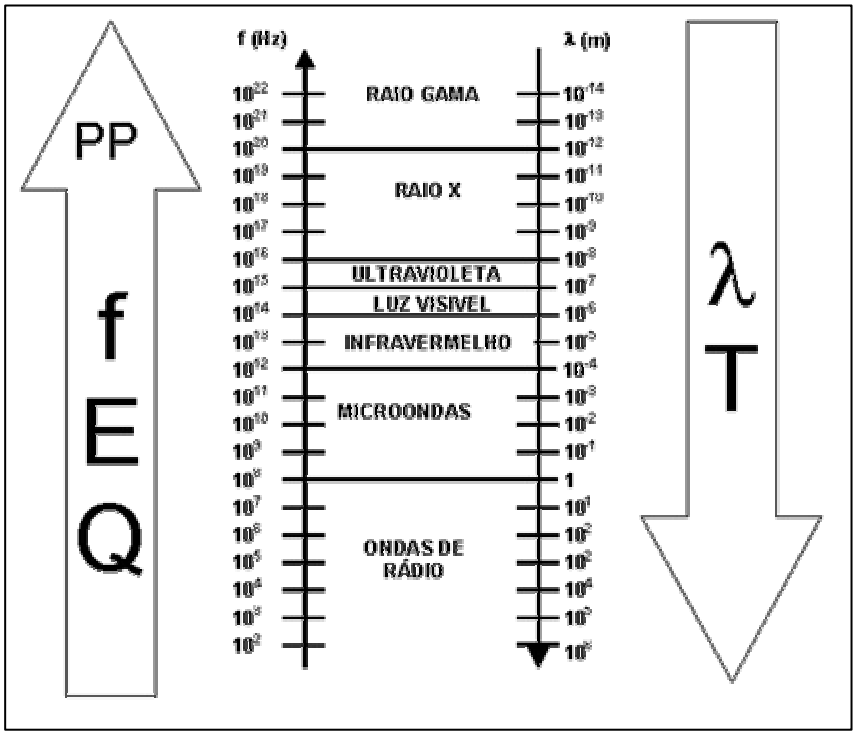


Figura 1.3 – Esquema do espectro de radiações eletromagnéticas (Prass, s.d.).

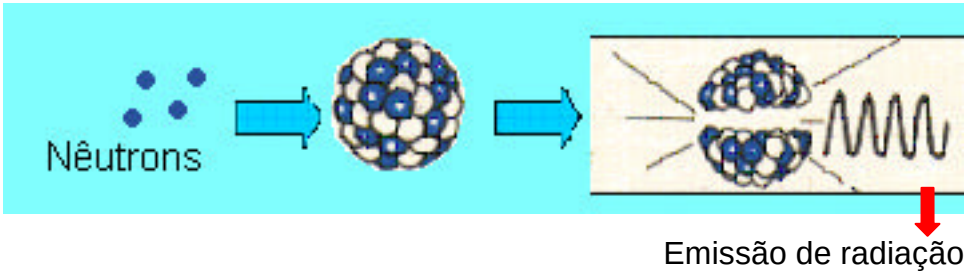


Figura 14 – Esquema de geração de radiação gama por decaimento do núcleo atômico.

d) Luz Síncrotron - É a intensa radiação eletromagnética produzida por elétrons de alta energia em um acelerador de partículas (Cloetens et al, 2001). A luz síncrotron abrange uma ampla faixa do espectro eletromagnético: raios-X, luz ultravioleta e infravermelha, radiação gama, além da luz visível (Cornuejols & Manzoni-Etxepare, ed., 2001). Radiação síncrotron refere-se à radiação eletromagnética emitida por elétrons ultra-relativísticos (energias de vários giga-elétron-volt (GeV)), circulando em anéis de armazenagem, onde eles são

acelerados por um campo magnético (Figura 1.5). Isto pode ser uniforme sobre uma parte da trajetória nos ímãs curvos, ou espacialmente oscilante nos "dispositivos de inserção". O espectro da luz assim produzida se estende do infravermelho à faixa dos raios-X, sendo o último o de maior valor para a maioria dos usuários. Todos os usuários concordam em duas virtudes essenciais da radiação síncrotron: sua alta intensidade na faixa dos raios-X e seu espectro contínuo. As novas fontes, terceira geração, têm outro, à primeira vista, traço menos espetacular: a pequena divergência de onda. Esta característica é devida (1) à área de secção transversal da onda de elétron ser muito pequena, agindo como fonte de radiação e (2) à grande distância fonte-amostra. Todas estas qualidades levam a novas possibilidades no campo da radiografia (Cloetens et al, 2001).

É importante salientar que, enquanto as duas primeiras fontes (a) e (b) são ondas eletromagnéticas, a fonte (c) são partículas. Apesar destes quatro tipos de fontes possuírem naturezas distintas, produzem efeitos semelhantes.

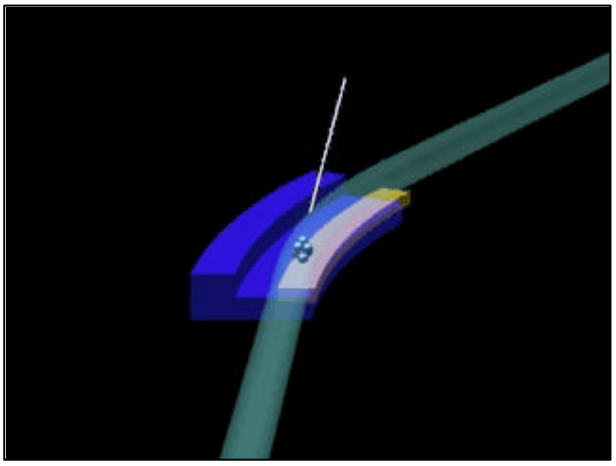


Figura 1.5 – Esquema de radiação síncrotron formada em anel com magnetos curvos (Cornuejols & Manzoni-Etxepare, 2001).

1.4 Radiografia Digital

A imagem é uma distribuição de propriedades físicas. Enquanto uma imagem em branco e preto tem um valor de intensidade a cada ponto, uma imagem colorida tem três valores associados, um para o vermelho, outro para o verde, e outro para o azul.

As imagens radiológicas são imagens analógicas, assim como as imagens em sinais de vídeo, em que a voltagem varia suavemente quando o brilho da imagem é varrido no rastreio das linhas horizontais. Estas imagens analógicas não podem ser diretamente tratadas por computador, pois os computadores trabalham com números. Se convertida para uma forma digital, a imagem pode ser modificada de várias maneiras, e, se necessário, armazenada em um computador antes de ser apresentada em um monitor ou impressa. Desta maneira, na área médica, estruturas vasculares podem ser destacadas por subtração, fraturas podem ser destacadas por realce de bordas, e tecidos moles podem ser observados escolhendo-se os valores máximos e mínimos a serem graficados (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 – Correspondência entre as modalidades de imagens diagnósticas e a característica física medida.

Modalidade	Característica Física Medida
Radiografia, Fluoroscopia, Tomografia Computadorizada	Número Atômico e Densidade de Massa
Medicina Nuclear (PET e SPECT)	Absorção do radionuclídeo
Ultra-som	Refletividade da Interface
Ressonância Magnética	Densidade de Spin e Relaxação do Spin

Resumidamente, a radiografia pode ser visualizada da maneira convencional (filme radiográfico), ou digitalizada direta ou indiretamente. A radiografia digital direta é realizada por detectores que transferem automaticamente a imagem obtida para um computador (TFT, por exemplo). A radiografia digital indireta (radiografia computadorizada) é feita por meio da digitalização posterior de um filme onde fica gravada a imagem radiográfica (tal como o *Imaging Plate*). Portanto, a radiografia convencional pode se tornar uma radiografia digital indireta desde que seja escaneada e digitalizada.

Digitalizador é um equipamento em que o sinal de vídeo de uma câmera de TV ou de intensidade de um *laser* transmitido ou refletido é aplicado a um conversor analógico-digital (ADC). A tensão elétrica (ddp) de cada ponto, correspondente a seu brilho, é expressa pelo binário (inteiro) mais próximo. Se uma imagem for armazenada em uma matriz de 512 x 512 *pixels*, com cada *pixel* correspondendo a 0,5 milímetro, a resolução da imagem será de 1 milímetro (= 2 *pixels*). Se o conversor analógico-digital só tiver 8 bits, ele só poderá atribuir valores entre 0 (= 00000000) e 256 (= 11111111). Se o conversor tiver 10 bits, ele poderá armazenar valores entre 0 e 1024. Se tiver 16 bits, poderá armazenar valores entre 0 e 65536. Como um *byte* corresponde por definição a 8 bits, uma imagem com 16 bits, com 512 x 512 *pixels* ocupará 2 x 512 x 512 = 524 288 *bytes* ou 512 *kilobytes* (KB), já que um 1 KB = 1024 *bytes*. Desta forma, um disquete com 1,44 *megabyte* (MB) só poderá armazenar duas destas imagens. Assim, se aumentarmos a resolução por um fator de 2, isto é, se passarmos para uma matriz de 1024 x 1024, aumentamos o tamanho da imagem por um fator de 4. É importante salientar que a rede de comunicações normal, por cabo coaxial, com uma placa Ethernet, pode transportar no máximo 10 milhões de bits por segundo (Mbps), isto é, leva no mínimo 0,4 segundo para transportar uma imagem de 512 KB, enquanto um modem rápido, de 33,6 bps, o limite que uma linha telefônica comum pode transportar, leva 122 segundos para transportar somente uma imagem. Para reproduzir a definição de uma radiografia por filme, é necessária no mínimo uma matriz de 2048 x 2048, com 2 *bytes* por ponto.

A fim de diminuir as limitações dos digitalizadores ou sensores em geral, podemos aplicar operações que cancelem as não linearidades destes, preservando a linearidade da imagem.

Os dados “crus” devem ser processados utilizando diversas formas de exposições para calibração: exposições de viés (*bias*), que são exposições com tempos de exposição nulos, e campos-absolutos (*flat-fields)*, que são exposições com todos os *pixels* expostos à mesma intensidade e que precisam ser obtidos

expondo o sensor a uma tela uniforme iluminada por uma fonte ou a um vaso com água, no caso de Tomografia Computadorizada.

O objetivo da maioria dos dados de calibração é remover os efeitos aditivos, como o nível do pedestal eletrônico (medido na região de super-escaneamento (*overscan*) em cada imagem (*frame*)), o nível de pré-cintilação (*pre-flash*) (medido nas imagens de viés), e, se necessário, a corrente escura (que seria medida em imagens de longa exposição não expostas à luz, as imagens escuras (*darks*)). Os dados de campos-absolutos irão remover os ganhos multiplicativos (diferenças de ganho *pixel* a *pixel*) e variações de iluminação através do chip.

As imagens precisam ser subtraídas do viés, medido na região do super-escaneamento, recortadas para eliminar esta região e os defeitos das bordas do CCD (*Charge Coupled Device*) (Gruner et al, 2002), subtraídas das imagens de viés e então divididas por uma imagem do campo-absoluto médio obtido com o filtro correspondente à imagem. Na figura 16, há uma explicação mais detalhada da necessidade de cada um desses passos e como são feitos.

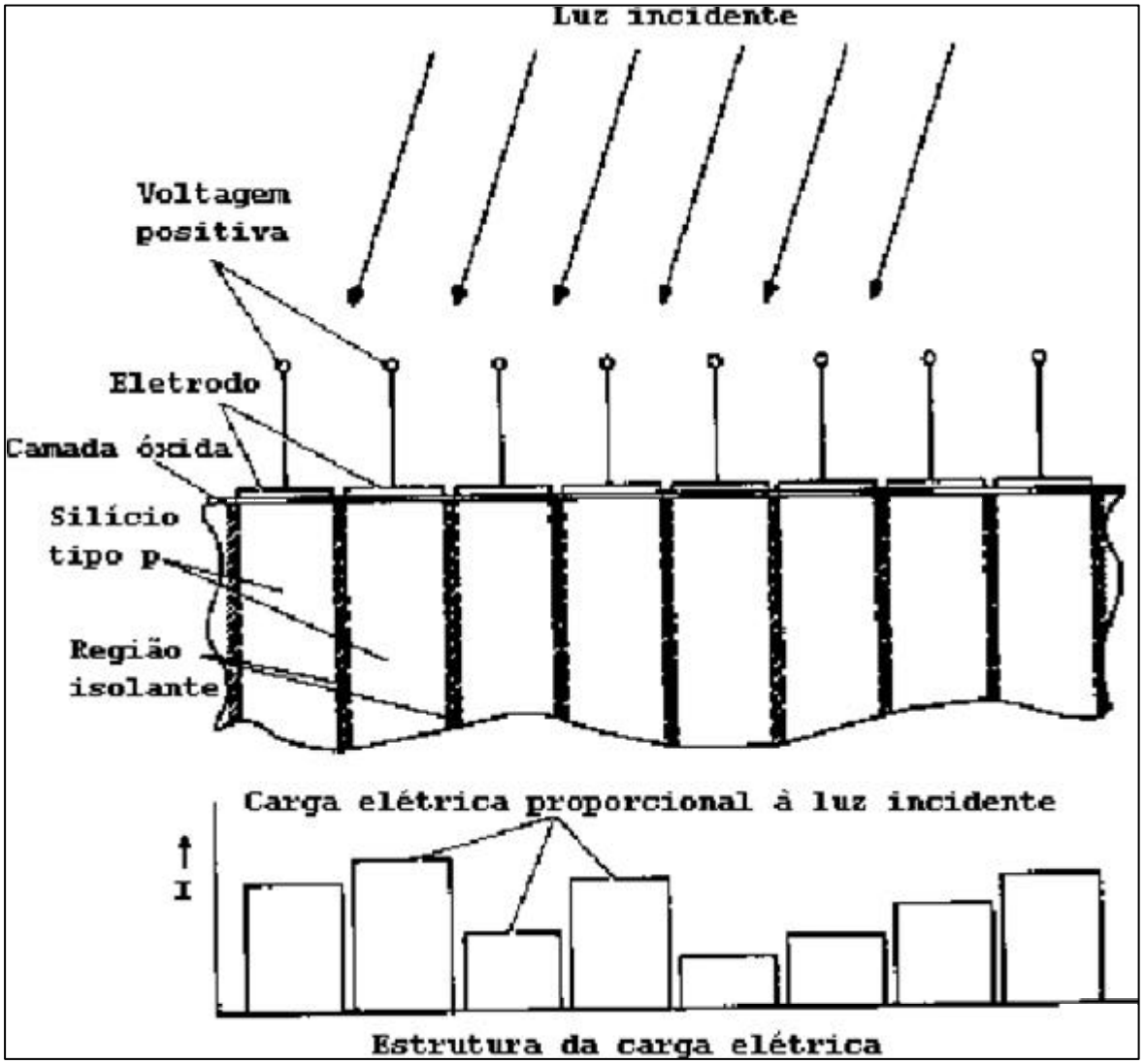


Figura 16 – Passos necessários para uma maior linearidade na digitalização de imagens.

Para fazer a subtração, todas as colunas da região do super-escaneamento são pró-mediadas em uma só coluna, e a essa coluna é ajustada uma função suave (Spline, Legendre ou Chebyshev) do número da linha. A função ajustada é então

subtraída de todas as colunas da imagem. Neste ponto, toda a região do super-escaneamento é recortada da imagem juntamente com as primeiras e últimas colunas de dados, onde os efeitos de borda são importantes, de forma a manter somente a parte da imagem que contém dados úteis. Esse procedimento de subtração do super-escaneamento e recorte das imagens é aplicado a todas as estruturas: viés, campos-absolutos, imagens escuras e objeto.

Se a imagem foi pré-exposta à luz antes de ser exposta, o que às vezes é necessário para "aquecer" os *pixels* de forma a eles passarem a ter uma resposta linear ou aumentar a transmissão dos elétrons acumulados em cada *pixel*, haverá ainda uma quantidade não nula de contagens superpostas à imagem. Para remover esse sinal, além de possíveis variações ao longo das linhas ainda não corrigidas com o procedimento anterior, usam-se as imagens de viés. Essas imagens são combinadas para minimizar os efeitos de ruído, raios cósmicos, e rejeitar *pixels* ruins (*pixels* com transmissão não-linear); a imagem final obtida é subtraída de todos os outros tipos de imagens: campos-absolutos, imagens escuras e objeto.

Em alguns CCDs, existe também uma quantidade não desprezível de corrente de escuro adicionada em longas exposições. Para removê-la, tomam-se imagens com exposições longas com o diafragma fechado, chamadas imagens escuras. As imagens escuras são submetidas a todos os passos de pré-processamento descritos até aqui.

O próximo e último passo é fazer a correção do campo-absoluto, que irá remover as variações de ganho *pixel* a *pixel*. Isso é feito combinando as imagens de campo-absoluto da mesma forma que foram combinadas as imagens de viés, porém agrupadas por filtro, e a imagem final em cada filtro é normalizada. Finalmente a imagem de objeto em cada filtro é dividida pelo campo-absoluto correspondente.

O procedimento para esta etapa pode ser sumarizado através da equação 1.1:

$$N_s(i) = [N_e(i) - \textit{super-escaneamento} - \textit{Zero}(i)] \,/\, \textit{Campo-absoluto} \qquad (1.1)$$

onde $N_s(i)$ se refere ao número de contagens em cada *pixel* na imagem final (i varia de 1 ao número total de *pixels*), $N_e(i)$ se refere ao número de contagens em cada *pixel* na imagem inicial, *super-escaneamento* é o viés da coluna de leitura, *Zero*(i) é o viés de cada *pixel*, e *Campo-absoluto* é a média final de todos os campos-absolutos já normalizada.

Para analisar uma imagem, é preciso que esta esteja em forma digital. Se a imagem inicial for fotográfica, é preciso passá-la por um digitalizador (*scanner*). O processamento da imagem inclui transformações, realce ou aprimoramento, restauração, compressão, registro e reconstrução (Oliveira Filho, s.d.).

1.4.1 Detetores digitais

Outro fator limitante nos processos tradicionais de radiografia é a visualização final fixa, isto é, gravada no filme que não permite o processamento da imagem a fim de realçar características específicas, de interesse do observador. Desta forma, o observador fica limitado a obter as informações sobre determinado corpo analisado, tal qual foram gravadas no filme.

Visando a permitir um processamento da imagem obtida por meio de ensaio radiográfico, pode-se recorrer à utilização de imagens digitalizadas, processadas em computador.

Atualmente, além dos métodos em que a imagem fica armazenada no detetor para ser visualizada posteriormente (*off line*), existem também tecnologias que

permitem a visualização em tempo real (*flat panel* / CCD – *Charge Coupled Device*) (Figura 1.7) (Ewert, fev. 2002).

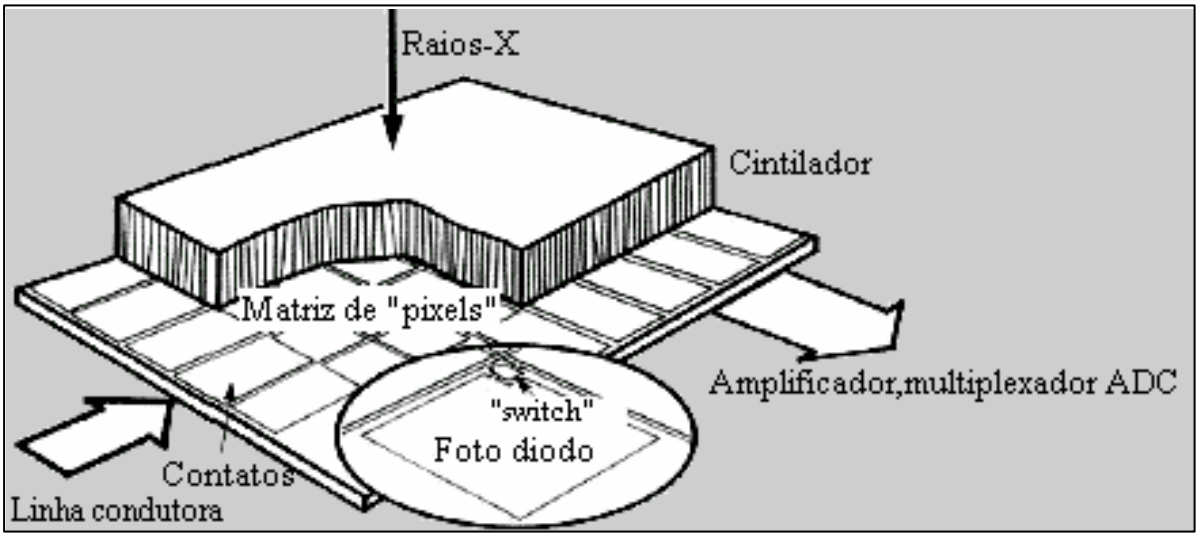


Figura 1.7 – Esquema de um detetor *flat panel* (Ewert, fev. 2002).

Dois tipos de detetores *flat panel* estão no momento no mercado: o primeiro é baseado em uma matriz de fotodiodos conectados a transistores de filme fino (*Thin Film Transistors* – TFT). Estes componentes são feitos de silício amorfo e são resistentes à radiação de alta energia (Figura 1.8). Os fotodiodos são carregados pela luz que é gerada por um cintilador convertendo os raios-X ou os raios gama. Este cintilador pode ser um sistema policristalino que provê alguma pouca-nitidez adicional pela difração da luz ou um sistema cristalino direcionado que atua como uma placa direcionadora (filamentos na direção da luz) com menor pouca-nitidez devido à reduzida difração da luz. A próxima geração de *flat panels* é baseada em um fotocondutor como selênio amorfo ou CdTe em uma placa de multimicro-eletrodos, que é lida por TFTs novamente. Esta geração disponibiliza a mais alta nitidez e tem o potencial para sistemas de alta resolução que poderiam competir com o filme para Ensaios Não-Destrutivos (END). Fotodiodos conversores diretos também provêm alta nitidez (Figura 1.9).

Flat panels são adequados para aplicações em laboratório ou no campo. No entanto, aplicações em campo estão limitadas pelas difíceis condições ambientais em algumas áreas (Ewert, dez. 2002).

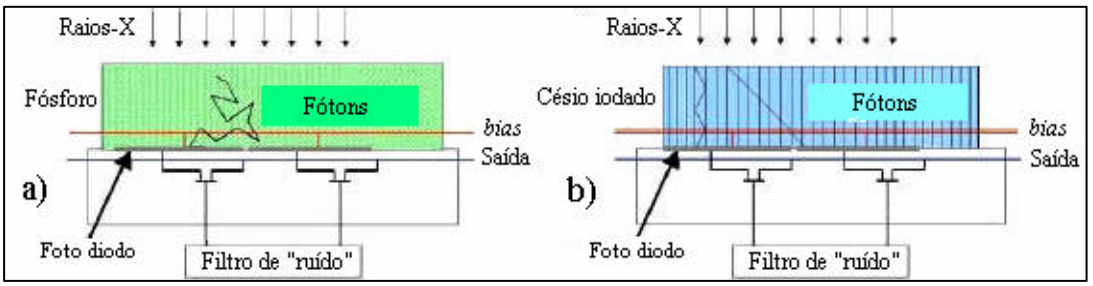


Figura 1.8 – Princípio dos *flat panels* de silício amorfo com telas fluorescentes; a) pouca-nitidez adicional é gerada na camada de cristais de fósforo devido à difração da luz; b) Cristais de CsI na superfície dos fotodiodos aumentam a resolução espacial, porque os cristais conduzem a luz para os condutores de luz dos fotodiodos.

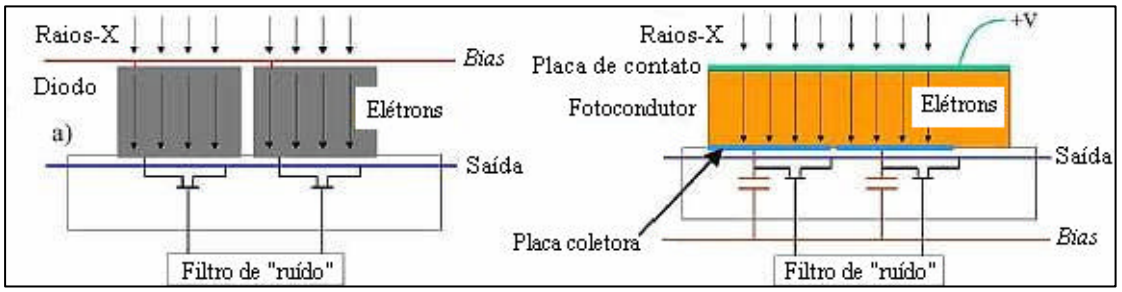


Figura 1.9 – Princípio dos *flat panels* conversores diretos com TFT de silício amorfo; a) fotodiodos convertem diretamente os fótons de raios-X a elétrons; b) um semicondutor está localizado nos micro-eletrodos em um campo elétrico forte, a radiação gera cargas que podem ser armazenadas em microcapacitores.

O TFT realiza a conversão direta:

Radiação ? Sinal elétrico ? Decodificação ? Visualização

Enquanto que, tradicionalmente, temos:

Radiação ? Cintilador ? Luz visível ? Detetor

Neste caso, o cintilador realiza a conversão da radiação em luz visível a ser enviada ao detetor.

1.5 Radiografia Digital com *Imaging Plate*

Os filmes negativos são a forma mais conhecida e antiga de detetores. Como já explanamos, são recobertos dos dois lados por uma emulsão de sais de prata e, quando expostos à radiação, os grãos dos sais de prata reagem quimicamente com o revelador, transformando-se em prata metálica enegrecida.

Em termos de detetores de radiação ionizante, existem dois tipos: os medidores de pulsos e os detetores integrais. Os medidores de pulsos, como, por exemplo, o contador de cintilação e o contador proporcional, medem fótons um a um, têm alta sensibilidade e possuem o *dead-time* da ordem de 1 microssegundo (μs). O *dead-time* corresponde a um certo tempo em que o detetor deixa de medir os fótons da radiação que chegam. Ele tem relação com as características de construção dos detetores. Os detetores integrais, tais como os filmes de raios-X e a câmara de ionização, indicam o total de fótons coletados durante a exposição às radiações ionizantes através da medida de outras propriedades físicas, como escurecimento e corrente elétrica. Ao contrário dos detetores de pulsos, estes detetores não possuem o problema de *dead-time*, porém geram relativamente mais ruídos, diminuindo a relação S/N – sinal / ruído do detetor.

Patenteado pela Fujifilm do Japão, o *Imaging Plate* (IP), ou placa de imagem, representa um avanço considerável em relação aos detetores.

Ele foi desenvolvido na década de 1980 para aplicação médica, e possui características tanto dos medidores de pulsos quanto dos detetores integrais (Shinohara, 2002). Ele será o detetor considerado no presente trabalho.

O IP é um detetor flexível de elétrons ou radiações eletromagnéticas, onde uma camada ativa de finos cristais armazena radiação de alta energia. Estes cristais de

armazenamento são formados por Bário, Flúor e Bromo, dispostos em uma camada de resina azul (Fujifilm, 1997).

A figura 1.10 ilustra cristais em cinza com maior quantidade de energia armazenada.

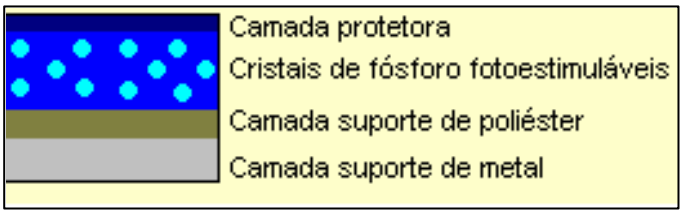


Figura 1.10 – Esquema de secção do IP (Ditabis, s.d.).

Na verdade, a radiação dos elétrons excita os cristais em seu centro de luminescência a um estado semi-estável. Este estado é mantido por várias horas, decaindo em alguns dias.

Para a observação das imagens armazenadas nos cristais excitados, é realizada a leitura por meio de *scanner* de raio *laser* vermelho, que, ao passar pelos mesmos, faz com que liberem luz azul. Este processo é totalmente reversível, permitindo a reutilização do IP. Para isto, a última imagem pode ser apagada através da exposição da placa à luz visível.

A sensibilidade do IP é muito grande, cerca de dez vezes maior que o filme negativo convencional, trazendo vantagens como:

- Necessidade de fontes com menor nível de radiação (maior segurança para o operador e isolamento de áreas menores, causando menores transtornos à produção industrial);
- Menor tempo de exposição à radiação;
- Maior linearidade de resposta, em relação à quantidade de radiação (Ditabis, s.d.) (Figura 1.11).

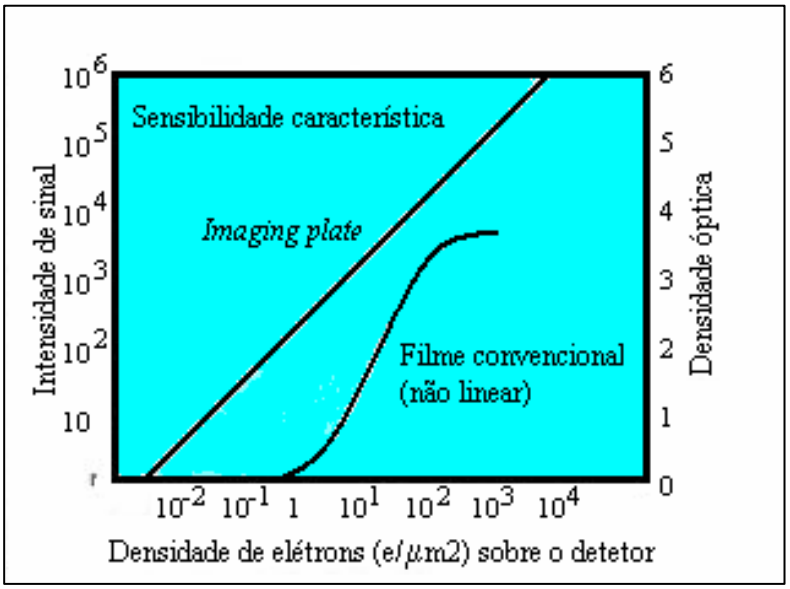


Fig 1.11 – Gráfico “dose de radiação x intensidade do sinal de resposta” de um filme *Imaging Plate* (Ditabis, s.d.).

1.6 Influência da Direção dos Feixes de Radiação na Nitidez da Radiografia

1.6.1 Princípios da Óptica Geométrica

Visto que os raios-X e os raios gama obedecem às leis universais da luz, sua formação de sombra pode ser explicada de uma maneira simples em termos de iluminação.

Deve ser lembrado que a analogia entre a luz e estas radiações não é perfeita visto que todos os objetos são, em um maior ou menor grau, transparentes aos raios-X e aos raios gama e que a difração apresenta problemas maiores na técnica radiográfica que na óptica.

Entretanto, as mesmas leis geométricas de formação de sombra influenciam ambas: a luz e a radiação penetrante.

A radiografia convencional por absorção é na verdade uma "sombra" da peça, provocada por seu posicionamento na trajetória das radiações, sendo o contraste na imagem obtido por meio de sua diferente permeabilidade à radiação. Esta permeabilidade será tanto menor quanto maior for a densidade do corpo no ponto considerado.

A influência de dois parâmetros – a distância e a posição relativa entre os elementos do ensaio, isto é, fonte, objeto e filme – acarreta uma série de efeitos à imagem, podendo reduzir o grau de fidelidade da imagem obtida em relação às reais características do corpo ensaiado.

O efeito da distância e da posição entre os elementos durante a realização de radiografias é mais bem explicado a seguir:

1. Ampliação da Imagem (Magnificação) – o grau de aumento de tamanho irá variar de acordo com as distâncias relativas do objeto à placa e à fonte de luz.

2. Nitidez da Imagem – o grau de nitidez de uma sombra depende do tamanho da fonte de luz e da posição do objeto entre a luz e a placa, se mais próximo ou mais distante de um ou de outro. Quando a fonte de luz não é um ponto, mas sim uma pequena área, as sombras geradas não são perfeitamente nítidas (figura 1.12 a), porque cada ponto na fonte de luz gera sua própria sombra do objeto, e cada uma destas sombras sobrepostas é levemente deslocada das outras, produzindo uma imagem mal definida, de interpretação duvidosa. Desta forma pode-se reduzir o efeito da penumbra através da utilização de uma fonte de luz de dimensão mínima (figura 1.12 b) em relação ao objeto a ser radiografado. Estas fontes são denominadas pontuais.

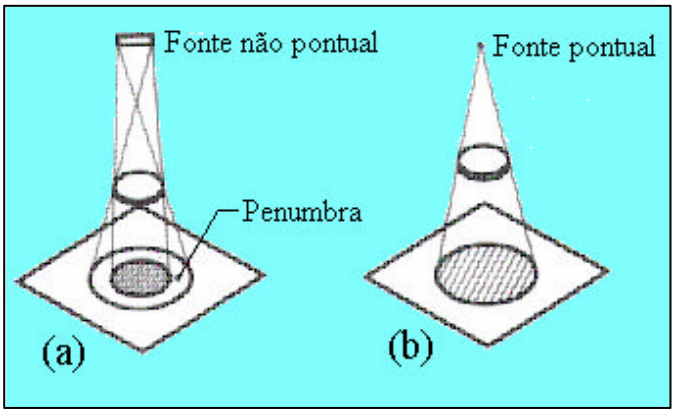


Figura 1.12 – Princípios geométricos da formação de sombras (penumbra).

As condições seguintes devem ser cumpridas a fim de produzir a imagem mais nítida, mais exata do objeto:

- A fonte de luz deve ser paralela ou pontual, isto é, o mais próxima possível de um ponto;
- A fonte de luz deve estar tão distante do objeto quanto seja prático;
- O detetor deve estar tão perto do objeto quanto possível;
- Os raios de luz devem ser dirigidos perpendicularmente à superfície do detetor;
- O plano do objeto e o plano da superfície gravável devem ser paralelos.

1.6.2 Aplicação à Radiografia

A aplicação dos princípios geométricos da formação de sombras à técnica radiográfica leva a regras gerais, objetivando a obtenção de imagens o mais aproximadas possíveis em relação ao objeto radiografado.

Ainda que estas regras estejam fixadas em termos da radiografia com raios-X, elas também são aplicadas à radiografia de raios gama (gamagrafia).

O foco deve ser tão pequeno quanto as outras considerações permitam, para haver uma relação definida entre o tamanho do ponto focal do tubo de raios-X e a definição na chapa radiográfica.

Um tubo de foco largo, embora capaz de trabalhar com obstáculos grandes, não permite o delineamento de tantos detalhes quanto um tubo de foco pequeno. Distâncias fonte-filme longas ajudarão a mostrar detalhes quando um tubo de foco largo é empregado, mas é mais vantajoso usar o foco menor permissível para as exposições solicitadas.

A distância entre o ânodo e o material examinado deve ser tão grande quanto seja prático. Comparativamente longas distâncias da fonte devem ser usadas na radiografia de materiais espessos para minimizar o fato de que as estruturas mais distantes do filme são registradas com menos nitidez que aquelas mais próximas a ele.

Em distâncias grandes, a definição radiográfica é melhorada e a imagem está mais próxima do tamanho real do objeto.

O filme deve estar tão próximo quanto possível do objeto a ser radiografado. Na prática, o filme, em seu cassete ou suporte de exposição, é colocado em contato com o objeto.

O raio central deve ser tão próximo da direção perpendicular ao filme quanto possível para preservar as relações regionais.

Tão distante da forma da amostra seja permitido, o plano de máxima vantagem deve ser paralelo ao plano do filme.

1.7 Técnicas Radiográficas Atuais

Hoje em dia, diversas técnicas inovadoras no processo radiográfico encontram-se disponíveis ou em desenvolvimento, oferecendo resultados de qualidade excepcional.

Dentre elas, destacamos:

a) Feixes Paralelos: Apesar da eliminação da penumbra, a fonte pontual, dependendo de fatores como distância objeto-filme (detetor), poderá produzir o

aumento de tamanho da imagem produzida em relação ao real tamanho do objeto (magnificação).

Se ao invés de feixes divergentes forem utilizados feixes de direção paralela ou o mais próximo disto possível, teremos não apenas a eliminação da penumbra como também do efeito da magnificação.

Neste caso, é importante salientar que a preocupação de posicionar a amostra ensaiada o mais próximo possível do filme torna-se menor, facilitando o processo radiográfico.

Destacamos duas formas diferentes através das quais podem-se obter feixes paralelos:

a1) Colimadores: Atuam no sentido de, a partir de uma fonte de feixes não paralelos, através de artifícios ópticos adequados, como visto na figura 1.13, impor uma mudança de direção aos feixes de forma a torná-los praticamente paralelos.

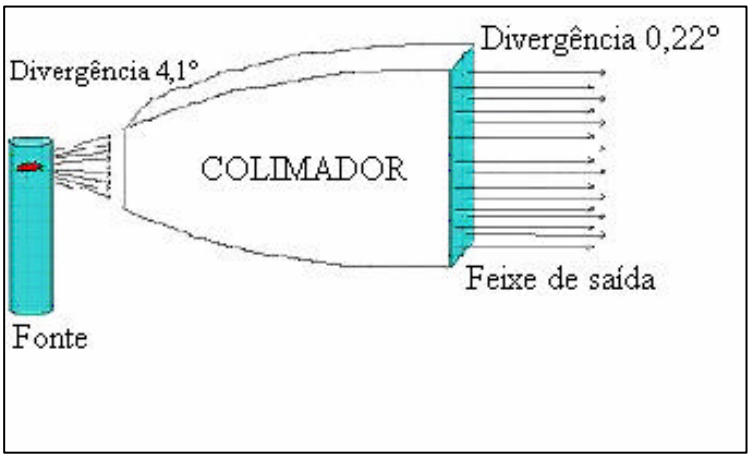


Figura 1.13 – Colimador para formação de feixes de raios-X paralelos.

a2) Cristais Monocromadores Assimétricos: Valendo-se da difração da radiação entre planos cristalinos (ângulo de Bragg), torna-se possível a obtenção de feixes monocromáticos e altamente paralelos.

No capítulo 3, discutiremos a construção, utilização e resultados obtidos a partir de um monocromador assimétrico de cristal de quartzo sintético.

b) Contraste de Fase: Em virtude das novas técnicas de fabricação e novos materiais utilizados atualmente, é importante o desenvolvimento de técnicas radiográficas com elaborado controle de qualidade.
Tradicionalmente, a técnica radiográfica se baseia nas diferenças de absorção de radiação da amostra ensaiada, face às diferenças em sua densidade. Todavia, materiais muito delgados representam um grau de dificuldade considerável para serem radiografados, já que pouca matéria será transpassada pela radiação, diminuindo a diferenciação de contornos da amostra. Materiais compósitos, formados por dois materiais diferentes apresentam em sua interface, uma leve difração da radiação, podendo comprometer a qualidade do ensaio radiográfico.
A radiografia por contraste de fase se baseia no Princípio de Fresnel de difração óptica e não na absorção de radiação, de forma que a imagem é produzida pela interferência do objeto radiografado nas ondas emitidas pela fonte causando defasagens nas mesmas.

Estas defasagens, ou contraste de fases, irão resultar nos contornos e características do corpo ensaiado. Na figura 1.14 é mostrada uma radiografia por contraste de fase de um semicondutor elétrico do tipo circuito integrado, montado sobre uma placa de circuito impresso. É importante salientar a pequena espessura da peça radiografada, bem como sua constituição formada por materiais diferentes (compósito).

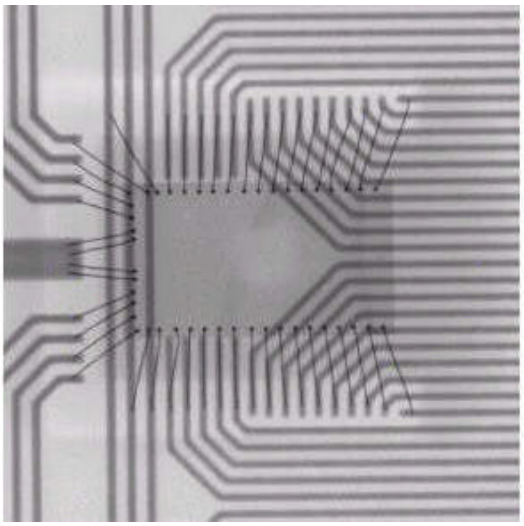


Figura 1.14 – Componente eletrônico radiografado por contraste de fase.

c) Microfoco: Até alguns poucos anos atrás, não existiam fontes de raios-X com ponto focal menor do que 50mm. Atualmente, porém, várias máquinas de raios-X do tipo microfoco, com ponto focal menor do que 1 mm estão disponíveis no mercado. Desta forma, com uma fonte de dimensões tão reduzidas, as imagens obtidas possuem alta qualidade, sendo que a penumbra é praticamente eliminada.

1.8 Feixes Paralelos

A Óptica Policapilar utiliza milhões de pequenos tubos capilares, os quais fornecem raios-X com grande reflexão. O sistema pode ser ajustado de forma a ter as fibras conduzindo a irradiação desde um ponto de focagem até outro (figura 1.15 a) ou, a partir de um ponto de focagem, gerando feixes paralelos (1.15 b).

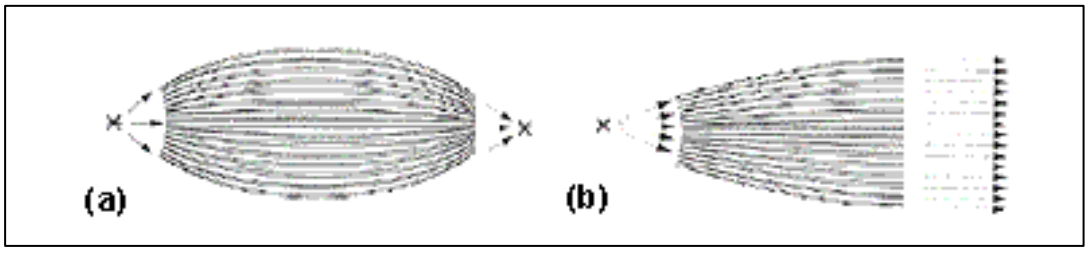


Figura 1.15 – Sistema de óptica policapilar com fibras conduzindo a irradiação desde um ponto de focagem até outro (a) ou, a partir de um ponto de focagem, gerando feixes paralelos (b).

As vantagens do Feixe Paralelo Policapilar são descritas abaixo:

- Grande incremento de intensidades (contagens);
- Grande precisão de medições de picos independente da posição da amostra, do seu preparo ou de sua transparência;
- Forma simétrica do pico Gaussiano facilita a identificação dos picos.

1.9 Tomografia Computadorizada

A Tomografia Computadorizada (TC) é um método no qual, com os dados de projeção calculados do objeto examinado, pode-se obter informações para uma imagem de uma secção transversa do objeto. A TC requer inevitavelmente um computador. A princípio, a Tomografia Computadorizada é o método disponível mais efetivo para análise tridimensional de qualquer objeto enquanto existam diferenças na densidade e/ou número atômico dos componentes a inspecionar (Figuras 1.16, 1.17 e 1.18).

Figura 1.16 – Foto de objetos a serem tomografados (NDT Resource Center, s.d.)

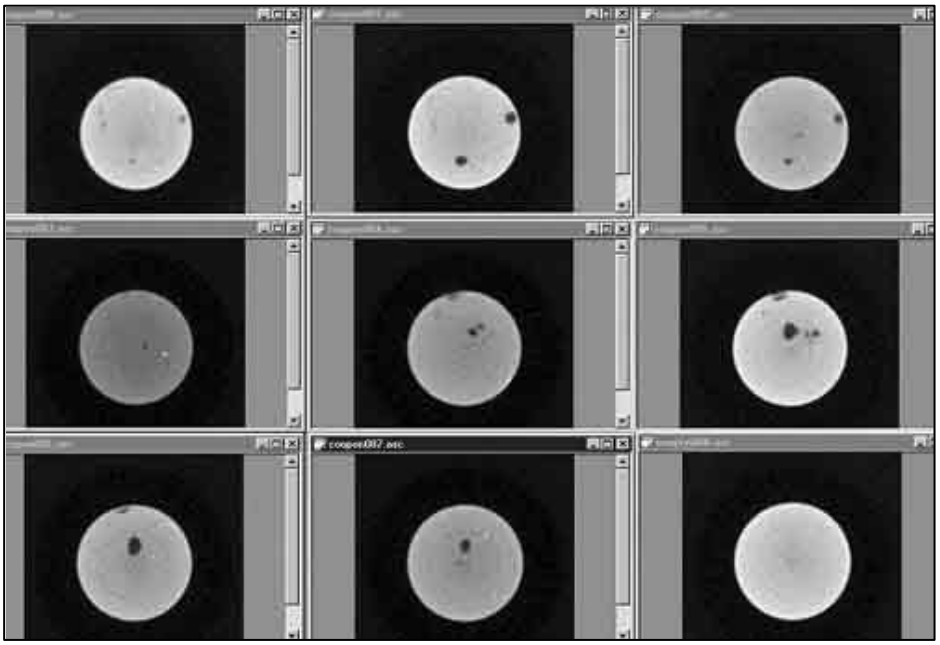


Figura 1.17 – Secções do objeto obtidas através do método de Tomografia Computadorizada (NDT Resource Center, s.d.).

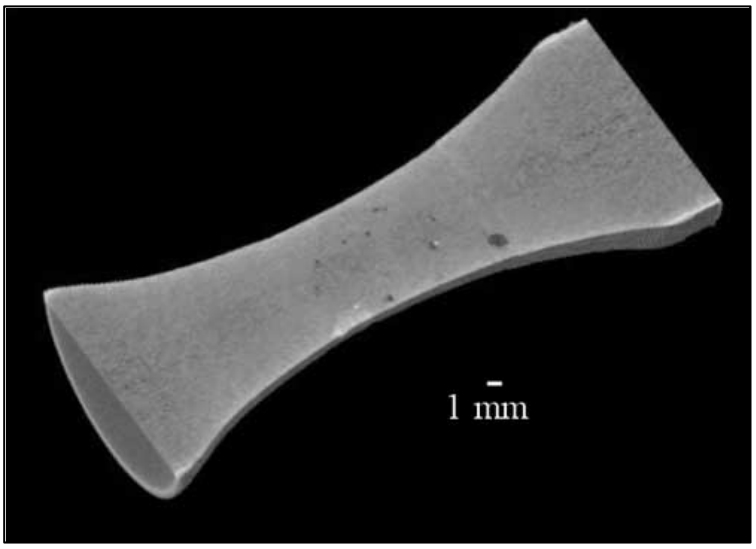


Figura 1.18 – Reprodução computadorizada de um corte transversal do objeto examinado, evidenciando descontinuidade em sua estrutura (NDT Resource Center, s.d.).

Equipamentos tomográficos (tomógrafos de raios-X, ressonância magnética) geram imagens monocromáticas de cortes (ou fatias) normalmente paralelos e uniformemente espaçados em uma dada região 3D. Considerando as dimensões *p* x *p* de um *pixel* nestas imagens e o espaçamento *d* entre os cortes, a extensão do *pixel* em 3D forma um pequeno paralelepípedo de dimensões *p* x *p* x *d* que é chamado *voxel* (*volume element*). Os *voxels* representam pontos de amostragem de algum fenômeno físico e são usados para reconstruir no computador a forma ou função de estruturas tridimensionais.

1.10 Processamento de Imagens

O recurso da informática oferece atualmente a possibilidade de tratar as imagens obtidas por meio da radiografia através de programas de edição de imagens, tais como: *VixWin 2000*, *Adobe Photoshop 7.0*, *Corel Photopaint 10* e outros, melhorando a sua qualidade e permitindo destacar os aspectos de interesse na imagem obtida.

1.11 Interpretação de Radiografias

Para produzir radiografias de alta qualidade, o técnico em radiografia deve também ser experiente na interpretação radiográfica. A interpretação de radiografias é feita em 3 passos básicos que são (1) detecção, (2) interpretação e (3) avaliação. Todas estas etapas fazem uso da acuidade visual do examinador. Acuidade visual é a capacidade de determinar um padrão em uma região da imagem. A habilidade de um indivíduo em detectar descontinuidades em radiografias é também afetada pelas condições de iluminação no local de observação e o nível de experiência para reconhecer várias características na imagem.

As características da imagem a serem avaliadas dependem do tipo de objeto examinado: o corpo humano, peças metálicas, etc.

Descontinuidades são interrupções na estrutura típica de um material. Estas interrupções podem ocorrer no metal de base, no material de solda ou em zonas afetadas pelo calor. Descontinuidades, que não preenchem os requerimentos dos códigos ou especificações utilizados para executar e controlar uma inspeção, são referidas como “defeitos”.

A interpretação de radiografias é de vital importância para se obter os resultados esperados em um ensaio radiográfico, a fim de inspecionar componentes industriais.

1.12 Objetivos

Para a prática obtenção de dados precisos de ensaios industriais e sua posterior utilização, precisa-se digitalizar as imagens obtidas. Pelo processo tradicional, as radiografias convencionais precisariam passar por scanners especiais para assim serem digitalizadas. Outro desafio na interpretação de uma radiografia é a distorção (magnificação, etc.) que esta sofre decorrente dos princípios da óptica geométrica aplicados aos componentes ensaiados. Cálculos de compensação podem ser utilizados, porém a utilização de uma fonte de raios paralelos seria uma alternativa que tornaria mais rápida a interpretação das imagens. Após a obtenção e digitalização das radiografias, é necessário o processamento dessas imagens por programas de computador que forneçam informações úteis ao examinador.

Pretendemos, com este trabalho, abordar um sistema de obtenção de imagens radiográficas de custo relativamente baixo, cuja digitalização é simplificada e com tempo de execução menor. Também será demonstrada a montagem de uma óptica para obtenção de feixes de radiação altamente paralelos, utilizando um monocromador assimétrico de cristal de quartzo. Posteriormente, utilizamos três programas de processamento de imagens digitais, destacando vantagens e capacidades de cada um.

Abordamos assim três aspectos da obtenção de imagens radiográficas que tornam mais facilitada a tarefa do examinador e mais precisos e claros os dados obtidos.

CAPÍTULO 2. IMAGENS RADIOGRÁFICAS DIGITAIS DE GAMAGRAFIA INDUSTRIAL UTILIZANDO O DETETOR *IMAGING PLATE*

2.1 Introdução

A técnica de gamagrafia é amplamente empregada nas siderúrgicas, na indústria do petróleo, nas indústrias aeronaúticas e companhias aéreas. As aplicações da gamagrafia são vitais no caso de inspeção de conjuntos/sistemas complexos, soldas e materiais de fundição, análise de desgaste de peças em decorrência do atrito, redução de espessura das paredes em função da corrosão e erosão, que normalmente não é possível de ser realizado com raios-X.

Na gamagrafia, utilizam-se fontes radioativas emissoras de radiação gama conjuntamente com detetores com a propriedade de coletar imagens radiográficas de peças e tubulações a serem ensaiadas, com o objetivo de identificar a presença de falhas em soldas, estado de corrosão, bolhas, contrações internas, erosão, etc. As imagens são coletadas em um filme radiográfico, que tem características semelhantes aos utilizados em radiologia médica. As fontes usuais na gamagrafia são: isótopos de Cobalto-60, Irídio-192 e Césio-137, com atividades até 3,7 TBq (100 Ci). Os principais parâmetros que interferem na resolução e limite de detecção na técnica de gamagrafia convencional são: o processamento do filme e a sua visualização no negatoscópio, o tempo de exposição e a geometria de irradiação.

Segundo os dados da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN existem atualmente cerca de 900 empresas no País que utilizam fontes radioativas em seus procedimentos industriais.

Com respeito aos equipamentos de radiografia industrial, nos últimos 40 anos, o avanço tecnológico tem possibilitado o desenvolvimento e produção de novos radionuclídeos e o surgimento de equipamentos mais sofisticados para obtenção e diagnóstico de imagens radiográficas. Em termos de detetores de imagens radiográficas, a partir da década de 1990, novos detetores digitais foram desenvolvidos e comercializados, tais como: (i) IP – *Imaging Plate* e (ii) detetor de tela plana TFT com transistores de silício amorfo que suportam altas doses de radiação para observar imagens radiográficas *on-line* (Davis et al, 2000; Lavayssière et al, 1999). Recentemente, estes equipamentos vêm sendo utilizados na radiografia industrial devido a uma série de vantagens em relação aos filmes convencionais, tais como: excepcional sensibilidade, resolução espacial, maior faixa dinâmica e ao fato das imagens serem digitais e poderem ser processadas no computador através de vários *softwares* de tratamento de imagens. A aplicação da técnica digital na área de gamagrafia industrial é recente, como mostra vários trabalhos, por exemplo, apresentados no 15th WCNDT – *World Conference on Nondestructive Testing*, realizado em Roma em 2000 (Ewert, 2002; Redouane et al, 2000; Onel et al, 2000; Zscherpel et al, 2000; Blettner et al, 2000; Veith et al, 2000; Jagannathan et al, 2000). No Brasil, a técnica de radiografia industrial digital ainda é pouco conhecida e utilizada em função da falta de descrição de procedimentos experimentais bem como do estabelecimento de requisitos para o controle de qualidade.

Para apresentar a potencialidade da técnica de gamagrafia industrial quando aliada à tecnologia digital através do detetor *Imagem Plate,* a técnica foi aplicada para avaliação de tubulações industriais visando à detecção de variações na espessura da parede causadas por erosão e/ou corrosão. Do ponto de vista de processo industrial, na inspeção de um sistema de tubulações, um dos principais fatores que onera o trabalho é o alto custo para a remoção dos isolantes térmicos. No sistema de transmissão de energia elétrica de alta tensão, 69 kV a 500 kV, para

isolar a fase da terra, cadeias de isoladores são utilizadas, que são compostas de unidades menores de isoladores que possuem rigidez dielétrica superior a 80 kV por unidade. No Brasil, essencialmente, são utilizados isoladores de vidro temperado. Uma vez danificado, o vidro fratura-se integralmente perdendo significamente a rigidez dielétrica, chegando um valor máximo de 13 kV por unidade. Neste contexto, para avaliar a sensibilidade do sistema de gamagrafia à fratura de vidro do isolador, isoladores íntegros e quebrados foram analisados. Para testar a potencialidade do sistema de gamagrafia digital para o setor automobilístico, neste trabalho, radiografamos componentes de uma bateria que foi rejeitada no controle de qualidade do fabricante.

Neste capítulo, avaliamos as imagens de gamagrafia realizada utilizando-se o radionuclídeo Ir-192 como fonte radioativa e o *Imaging Plate* como detetor e aplicada em três componentes de constituição distinta. Foram eles:

1. Tubulação industrial em aço com revestimento térmico;
2. Isoladores elétricos de linhas de transmissão;
3. Componentes de chumbo soldados de bateria automotiva, chamados terminais do elemento.

2.2 Tecnologia do Detetor *Imaging Plate*

Com base em pesquisas sobre cristais de fósforo estimuláveis por fótons e radiação térmica e fenômenos relacionados, a *Fuji Photo Film Co.* lançou, na década de 1980, o *Imaging Plate* – um detetor para utilização em radiografia computadorizada baseado em cristais de fósforo fotoestimuláveis.

Na prática, na tecnologia *Imaging Plate*, a radiação que chega ao detetor é armazenada na forma de luminescência.

Os cristais de fósforo emitem luz de forma eficiente quando excitados por radiação como ondas de elétrons, raios-X e raios ultravioleta. Têm uma ampla utilização na nossa vida diária e são utilizados em lâmpadas fluorescentes, tubos de raios catódicos, televisores, etc.

Entretanto, alguns cristais de fósforo armazenam parte da energia de excitação primária gerada pela radiação e, quando submetidos a uma excitação secundária subseqüente, emitem luz através da liberação da luminescência retida.

No caso dos cristais de fósforo fotoestimuláveis utilizados nos detetores *Imaging Plate*, a excitação secundária é gerada por uma radiação de luz com comprimento de onda maior que o da luz emitida (Figura 2.1) (Takahashi, 2002).

A fim de tornar mais clara a compreensão do processo descrito acima em sua utilização prática nos filmes *Imaging Plate*, pode-se realizar uma analogia em relação a um sistema hidráulico, onde a bomba de recalque ocupa o lugar da radiação e o reservatório superior equivale aos cristais fotoestimuláveis (ambos armazenam a energia).

Para utilização da energia armazenada, uma certa quantidade de energia é cedida, ou seja, a bomba superior em relação aos raios *laser*. A partir deste ponto, a energia armazenada é liberada. A figura 2.2 ilustra este comparativo.

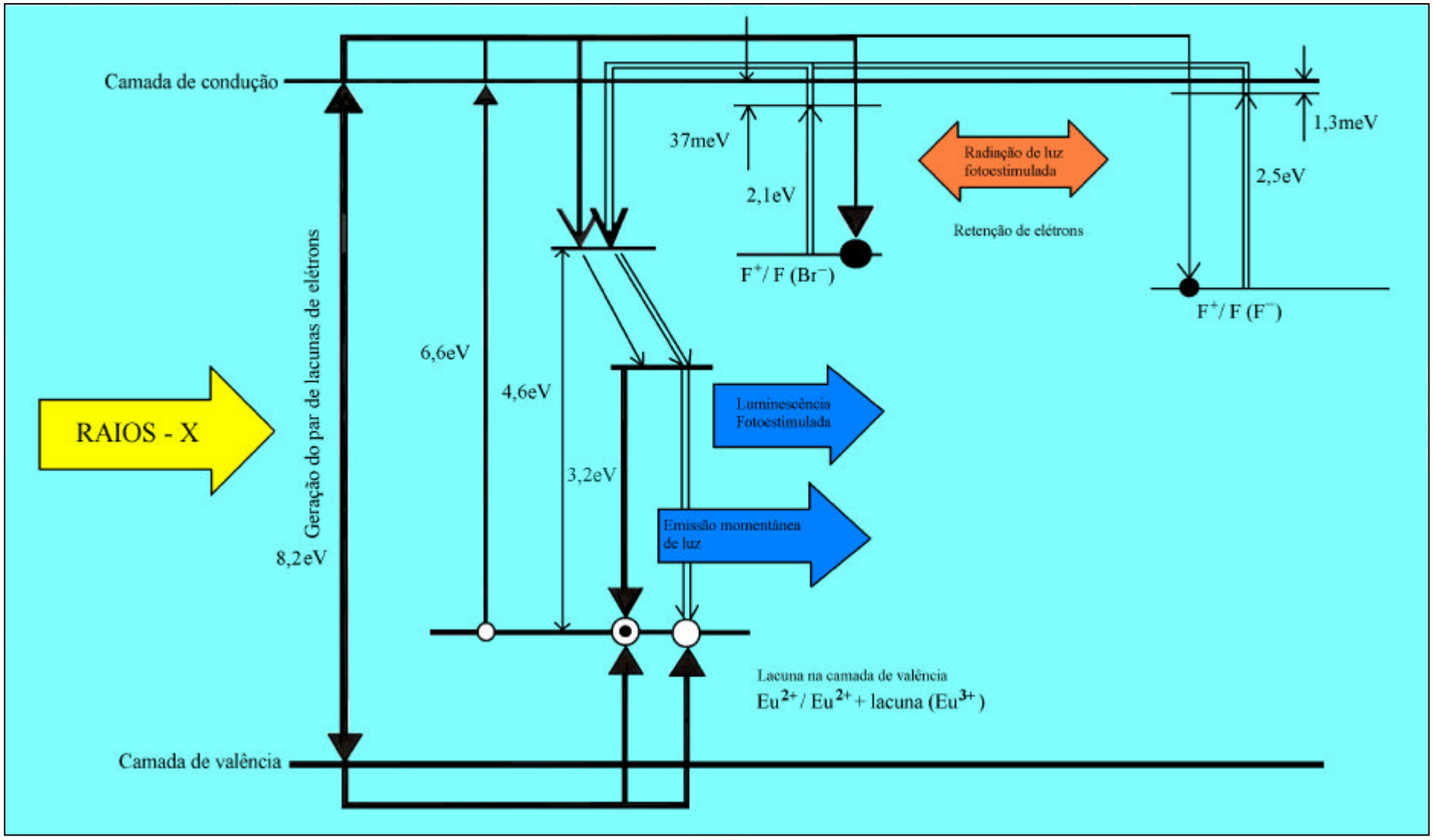


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento do *Imaging Plate* com os cristais fotoestimuláveis (FUJIFILM, 1997).

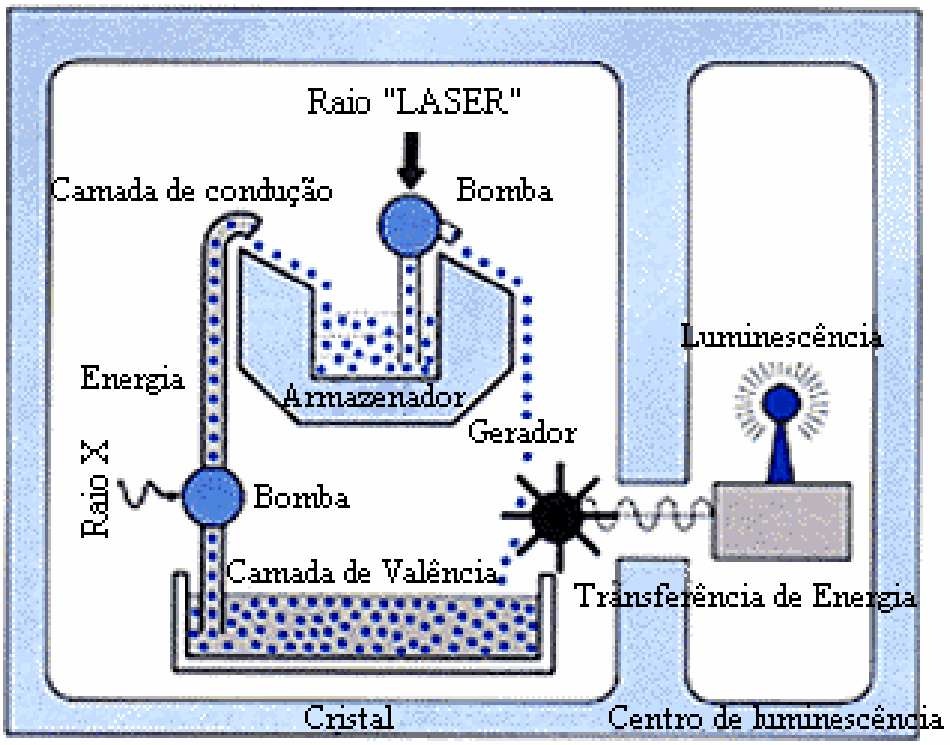


Figura 2.2 – Analogia ao sistema hidráulico para explicar o mecanismo de funcionamento do *Imaging Plate* (FUJI Photo Film, Co, 2004).

Antes de iniciar a procura por um cristal de fósforo fotoestimulável apropriado, os pesquisadores dos Laboratórios da Fuji definiram alguns pré-requisitos:

1. A estimulação deveria ser realizada por um *laser* de Hélio (He) e Neônio (Ne), o único *laser* disponível para uso prático naquela época.
2. O tempo de vida da luminescência deve ser menor que 1 µseg, porque um escaneamento de um ponto sobre o *Imaging Plate* deve ser realizado em período de tempo prático.
3. Os coeficientes de absorção de raios-X não devem ser mais baixos que os de telas intensificadoras de raios-X convencionais.

Os cristais de fósforo de BaFX:Eu foram os que se enquadraram melhor nas características acima mencionadas. “BaFX:Eu” significa que o cristal de fósforo consiste de um cristal de Bário e Flúor, X representa um átomo halogênico (Cl, Br ou I) e o cristal usa o elemento raro Európio como um montante de impureza que trabalha como um ativador para a emissão de luz.

Durante o processo de leitura de imagens gravadas no *Imaging Plate*, esta luminescência armazenada nos cristais de fósforo durante a realização da radiografia é liberada por meio da incidência de raios *laser* emitidos a partir de *scanner* específico, sendo posteriormente captada por um tubo fotomultiplicador (PMT – *Photomultiplier Tube*) para ser enviada ao computador. Este processo de leitura é mostrado na figura 2.3.

Mesmo tendo como objetivo inicial o uso na área médica, o *Imaging Plate* tem sido utilizado também no campo científico, contribuindo com a evolução de novas tecnologias, como o desenvolvimento de novos medicamentos, a análise estrutural de materiais biológicos, análise genética, e detectores de radiação para microscópios eletrônicos de transmissão e outros instrumentos.

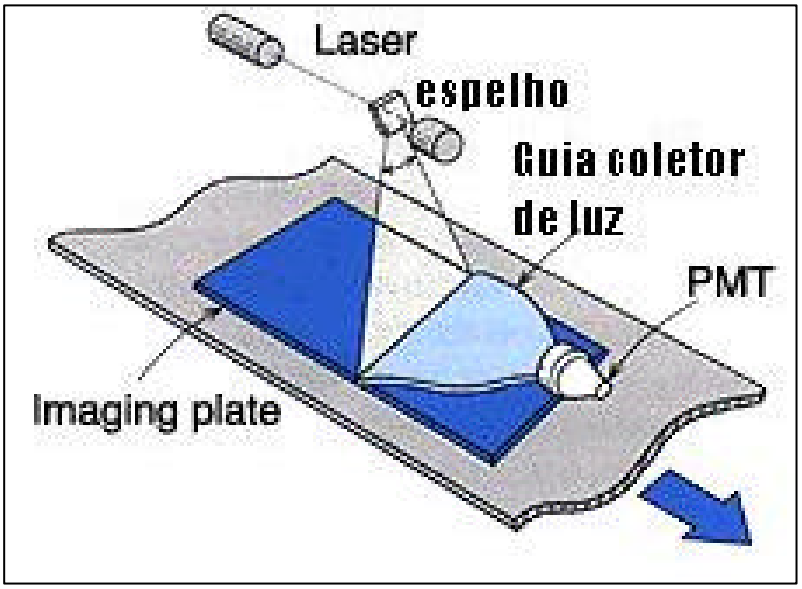


Figura 2.3 – Processo de leitura do *Imaging Plate* (FUJI Photo Film, Co, 2004).

O suporte do *Imaging Plate* deve proteger a camada de cristais de fósforo contra forças externas e choques, mantendo um alto grau de planicidade, e ter adequada flexibilidade e resistência mecânica. O principal material utilizado como suporte é o PET (*Polyethylene Terephthalate*). Além disto, PET com uma camada de absorção de luz pode ser usado para prevenir a luz externa de entrar através da superfície traseira.

A camada de cristais de fósforo é composta pela mistura de cristais de fósforo fotoestimuláveis com um polímero orgânico. O polímero provê tanto um alto grau de dispersão dos cristais quanto à formação de um filme uniforme. Suas propriedades físicas não devem ser afetadas pela temperatura, umidade, raios-X ou a luz do *laser*. Deve também ter resistência mecânica e flexibilidade adequada. O material de polímero sintético utilizado pode ser o poliéster, o acrílico, o poliuretano ou outro.

A camada protetora frontal serve para proteger a camada de cristais de fósforo de danos que causam defeitos na imagem ocorridos durante o manuseio pelos técnicos ou durante o transporte dentro da máquina. Esta camada não deve ser facilmente arranhada, nem estirada ou contraída por mudanças de temperatura e umidade, deve manter suas propriedades físicas independentemente das mudanças na luz, raios-X e equivalentes, e deve opor-se à flexão durante o transporte do filme IP dentro da máquina. Com respeito às características da imagem, é desejável que a camada protetora frontal tenha um alto grau de transmitância da luz e tenha pouca espessura. O filme PET e a resina de Flúor são usados porque satisfazem os requerimentos citados acima.

Além dos componentes já mencionados, o IP também tem um código de barras, uma camada protetora traseira e uma camada eletrocondutora. O código de barras armazena o número de identificação do IP. A camada protetora traseira é composta de um polímero leve que previne a superfície do IP de ser danificada pela fricção entre IPs. A camada eletrocondutora evita problemas com o transporte do IP dentro da máquina e com falhas na qualidade da imagem provocadas pela eletricidade estática.

A coleta da imagem pelo IP se dá através de vários passos expostos a seguir (Figura 2.4):

1. Exposição aos Raios-X – É feita da mesma maneira que com o método convencional de filme e tela intensificadora fluorescente. Os raios-X, atravessando o objeto, caem em um filme IP contido em um compartimento para proteção da luz. Os cristais de fósforo fotoestimuláveis contidos na camada de cristais de fósforo armazenam energia proporcional à intensidade dos raios-X como uma imagem bidimensional.

2. Leitura da Luminescência Fotoestimulada – A luz do *laser* com uma intensidade específica é utilizada para conduzir um escaneamento bidimensional sobre a superfície do IP. Desta maneira, a energia armazenada pode ser transformada em dados através da luminescência fotoestimulada. A luminescência gerada em vários pontos é obtida por um guia coletor de luz e então convertida em um sinal elétrico analógico por um fotomultiplicador. O sinal elétrico resultante é convertido em um equivalente digital por um conversor analógico-digital de alta velocidade.

3. Apagamento da Energia Residual – O IP conserva energia mesmo após a completa leitura da imagem. A energia residual é apagada pela exposição da superfície do IP à luz, que permite que o IP seja repetidamente utilizado.

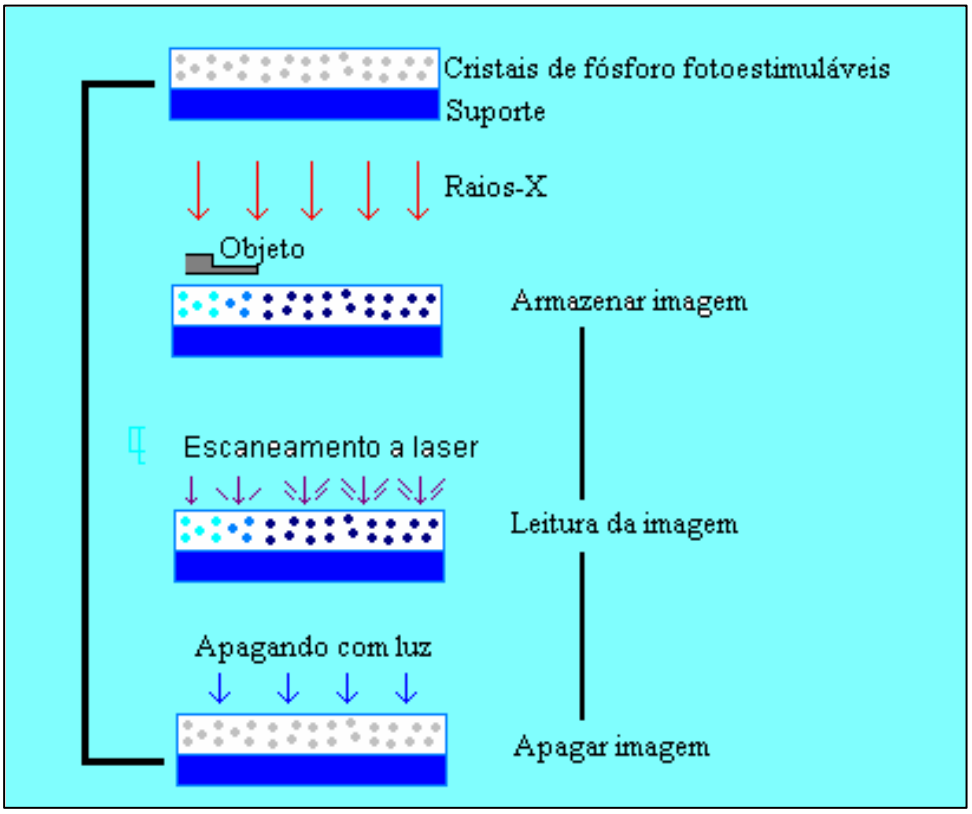


Figura 2.4 – Ciclo da formação de imagem pelo *Imaging Plate*.

2.3 Materiais e Métodos

2.3.1 Métodos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Instrumentação Nuclear e Dosimetria do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

Em comum, ressaltamos que, nos três casos, o sistema de gamagrafia digital é composto de uma fonte emissora de irídio com atividade de 1,5 Ci e o detetor digital *Imaging Plate.*

A fonte emissora, com Ir-192, foi produzida pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/SP, cujas características estão descritas na tabela abaixo (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 – Características da fonte de Ir-192 produzida pelo IPEN/SP.

Fonte (Ir-192)	
Atividade	1,5 Ci
Energia	0,46 a 0,61 MeV (equivalente a 250 kV de potência para raios-X)
Meia-vida	75 dias
Indicação	Análise de aços com espessura de 10 a 40 mm
Diâmetro	3 mm

A figura 2.5 mostra a configuração utilizada para realizar a gamagrafia de corpos de provas utilizando o Ir-192 como fonte emissora e o detetor *Imaging Plate*.

Como detetor, também em todos os demais ensaios realizados, foi utilizada uma placa de imagem *Imaging Plate*, fabricada pela empresa Kodak com dimensão de 15 cm x 30 cm.

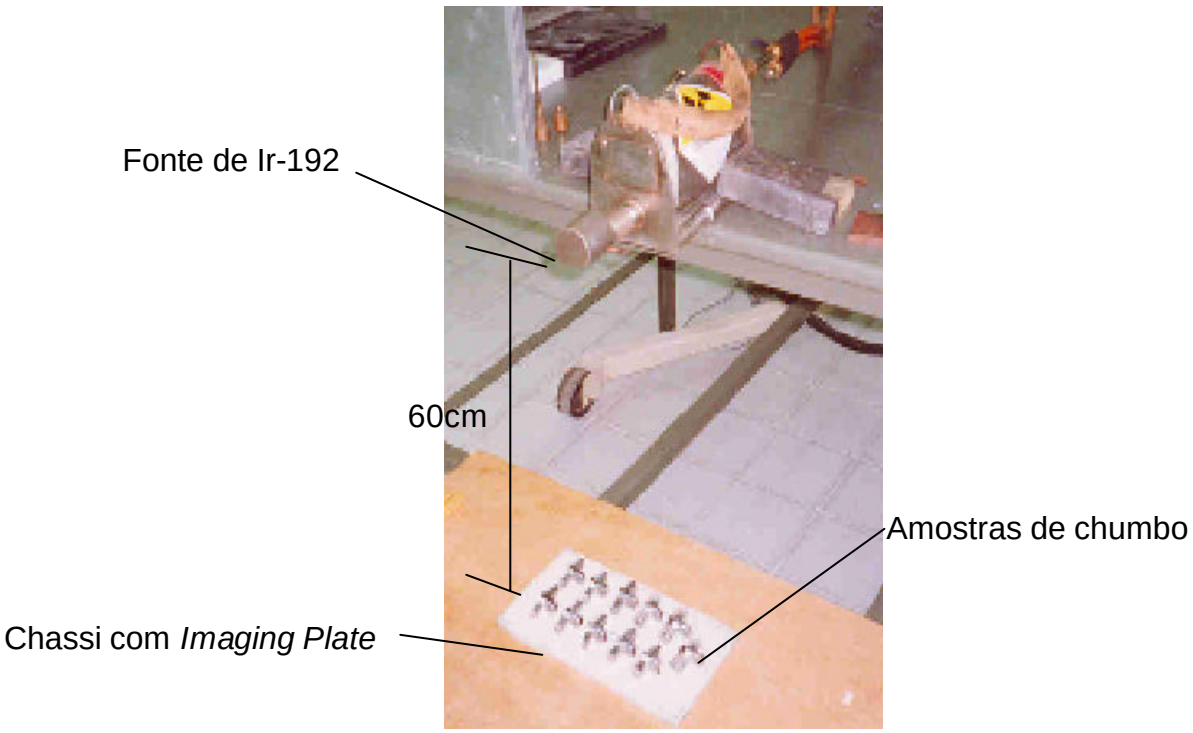


Figura 2.5 – Arranjo para o ensaio do componente de bateria automotiva, realizado no Departamento de Energia Nuclear da UFPE.

Para a leitura do *Imaging Plate* (IP), o equipamento utilizado foi o *scanner Denoptix* da *Gendex*, empregando 16 bits. Neste equipamento, o IP, após submeter-se à radiografia, é montado em uma peça cilíndrica denominada carrossel. O carrossel é então encaixado dentro do *scanner* a *laser*, sendo que, durante o processo de leitura descrita no item 2.2, ele é rotacionado.

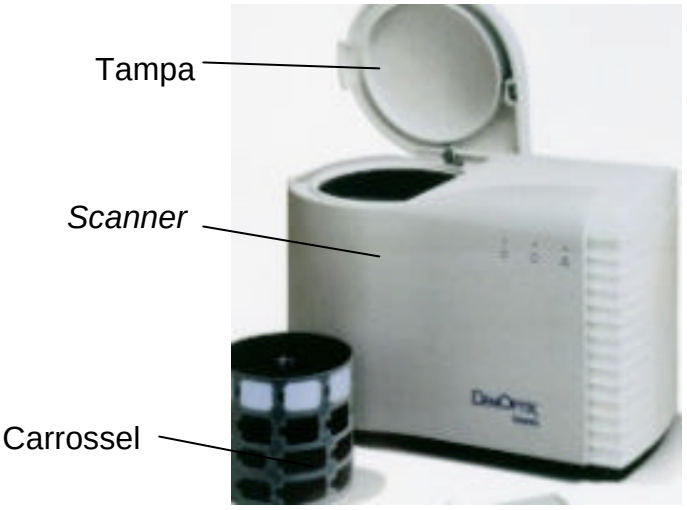


Figura 2.6 – *Scanner Denoptix* (*Gendex*) de 16 bits.

2.3.2 Materiais

1. Tubulação de aço submetida à corrosão

Em tubulações de transporte de fluidos, muitas vezes corrosivos e submetidos a temperaturas e pressões elevadas, como é o caso dos tubos utilizados pela indústria petroquímica, a verificação de sua integridade estrutural, penetração de solda nas junções e controle dimensional de paredes face à ação da corrosão, é extremamente importante.

As tubulações de aço utilizadas nos ensaios realizados possuíam diâmetro nominal de 25 mm e foram radiografadas a fim de se identificar possíveis falhas estruturais, como corrosão, erosão, bolhas, falhas de solda, entre outras.

2. Isoladores elétricos de linhas de transmissão de alta tensão

São largamente utilizados nas linhas de transmissão elétrica da CHESF, Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Os isoladores de vidro têm a função de isolar eletricamente as linhas de transmissão de alta tensão, bem como sustentar mecanicamente os cabos aéreos de transporte de energia fixados nas estruturas metálicas, nas tensões de 69 kV até 500 kV. Os isoladores de vidro possuem uma vida útil de mais de 40 anos, mas são os elementos mais vulneráveis de uma linha, pois estão submetidos a cargas de natureza eletromecânica, à ação de intempéries e depredação. São projetados de forma a terem os caminhos na superfície do vidro os mais longos possíveis a fim de diminuir a possibilidade de ocorrência de descarga elétrica entre suas partes metálicas (figura 2.7).

Assim, com o propósito de verificar as potencialidades da aplicação da técnica de gamagrafia utilizando *Imaging Plate*, o ensaio radiográfico foi realizado no isolador elétrico em dois estados distintos (figura 2.8).

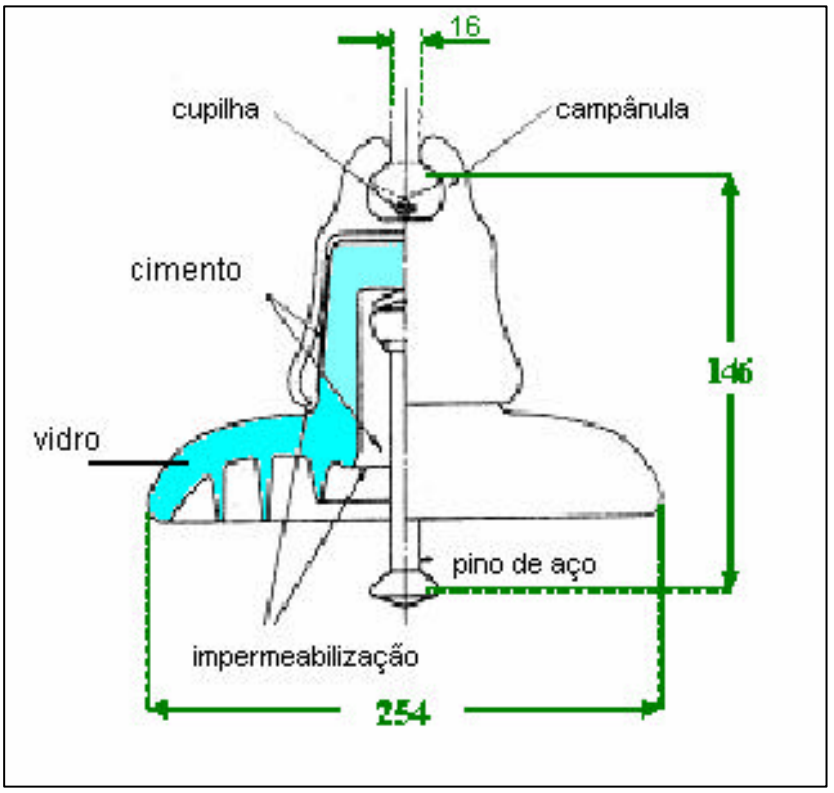


Figura 2.7 – Esquema de um isolador elétrico de vidro da linha de transmissão.

Figura 2.8 – Vista lateral do isolador inteiro (à esquerda) e de um isolador quebrado (à direita).

3. Componente de Bateria Automotiva

Outro dispositivo adotado para o efeito de aplicação do sistema de radiografia digital é para o caso do ensaio do elemento constituinte de uma bateria de uso automotivo da marca Moura (figuras 2.9, 2.10 e 2.11), fabricada em Belo Jardim/PE, denominado terminal do elemento, a fim de buscar razões que expliquem o refugo de algumas baterias que, após a sua fabricação e durante o *final test*, não apresentam um valor de tensão elétrica compatível com o esperado (nominal) para um valor adotado no controle de qualidade do fabricante.

Figura 2.9 – Vista geral de uma bateria automotiva típica utilizada nos ensaios.

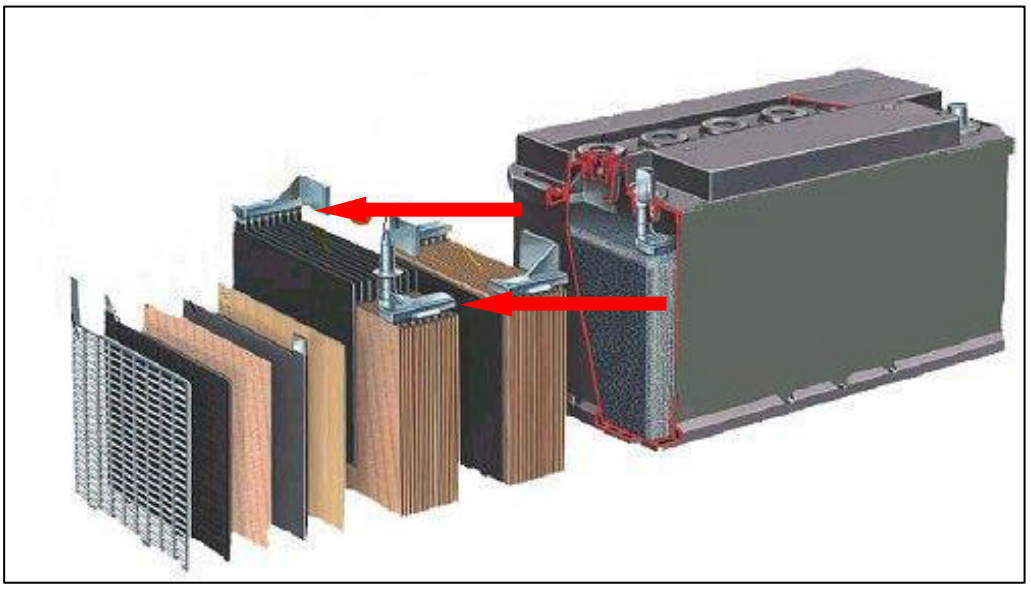


Figura 2.10 – Visualização do terminal do elemento de outra vista em detalhe (Varta, s.d.).

O terminal do elemento é constituído de uma liga de chumbo, sendo formado por duas partes originalmente separadas e encaixadas a quente em temperatura suficiente para deixar o material em estado amolecido. Assim, por meio de pressão mecânica, uma peça é montada dentro da outra para formar o componente (figura 2.11 e 2.12).

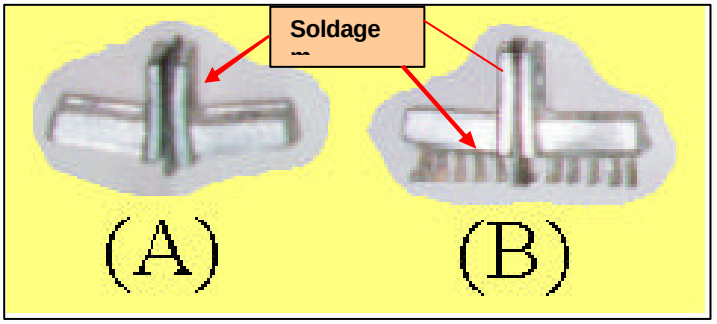


Figura 2.11 – Terminal do elemento antes (A) e depois (B) da junção das duas partes nas grades.

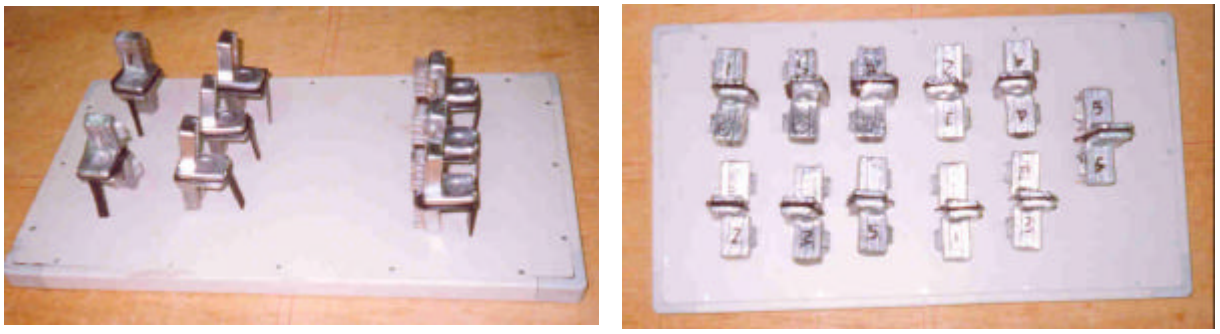


Figura 2.12 – Terminais do elemento de chumbo com e sem falhas sobre o chassi com o detetor *Imaging Plate* em duas posições prontas para serem radiografadas.

Neste processo de junção, o contato entre as duas peças deve garantir uma boa condutibilidade elétrica, garantindo o funcionamento correto da bateria. Desta forma, a indução de falhas como “bolhas” de ar, que são isolantes, poderão comprometer o seu funcionamento.

2.4 Resultados e Discussão

2.4.1 Determinação da distância ótima para obtenção de uma imagem radiográfica de alta nitidez

Um fenômeno sempre presente em um processo de radiografia industrial e que dificulta a obtenção de uma imagem de qualidade em termos de nitidez e resolução é a penumbra em função da dimensão da fonte empregada. Para a obtenção de uma imagem de alta nitidez, mesmo empregando uma fonte de uma certa dimensão, é fundamental que se compreenda de maneira satisfatória os fundamentos da radiografia, sendo assim se faz necessária uma breve revisão de alguns conceitos da óptica geométrica.

Visto que a baixa nitidez pode afetar fortemente o aspecto da imagem radiográfica, freqüentemente é necessário determinar sua magnitude.

A espessura do limite nebuloso das sombras é conhecida como *geometric unsharpness* (baixa nitidez geométrica), representada por U_g, e pode ser estimada pelo seguinte equacionamento.

Da lei dos triângulos similares, pode ser visto (figura 2.13) na Eq. (2.1) que:

$$\frac{U_g}{F} = \frac{t}{D_o} \qquad \text{ou} \qquad U_g = \frac{F \times t}{D_o} \tag{2.1}$$

onde:
U_g = espessura da zona de baixa nitidez
F = tamanho da fonte de radiação
t = distância objeto-filme
D_o = distância fonte-objeto

Posto que a máxima baixa nitidez envolvida em um procedimento de radiografia é usualmente a grandeza significante, a distância objeto-filme (t) é normalmente dada como a distância do lado da amostra mais próximo à fonte até o filme.

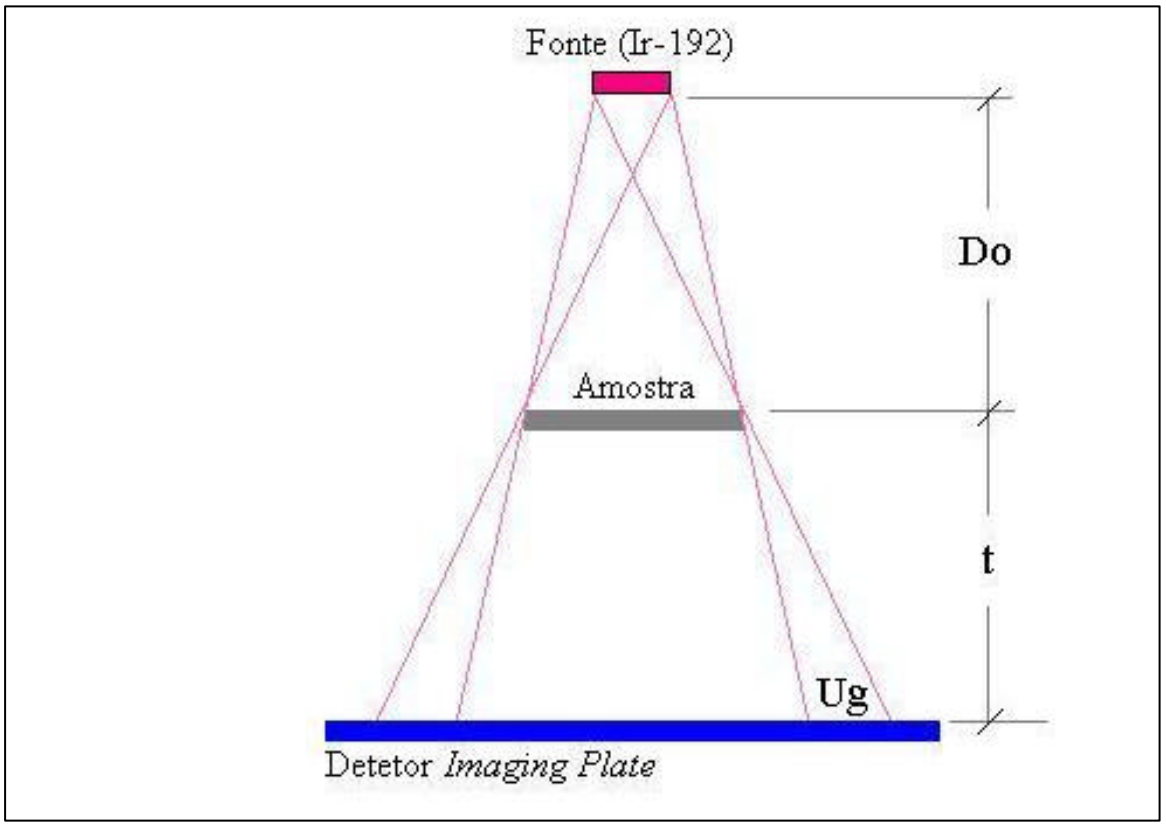


Figura 2.13 – Construção geométrica para determinar a zona de baixa nitidez geométrica (U_g).

O uso da radiografia digital com *Imaging Plate* evidencia a maior facilidade de execução do ensaio e a diminuição no custo da inspeção destas tubulações, pois não é necessário a desmontagem da tubulação ou, como no caso do exemplo utilizado, retirar as mantas de revestimento térmico, diminuindo bastante o tempo necessário à realização do ensaio.

Além disto, os técnicos podem realizar a inspeção com o processo industrial em funcionamento e, em função da maior sensibilidade do *Imaging Plate*, pode-se utilizar fontes radioativas de menor intensidade, necessitando de áreas menores a serem isoladas (menor área de balizamento) em função dos riscos de exposição à radiação.

1. Tubulação Industrial

Nos ensaios com tubulações, pudemos observar falhas na estrutura que poderiam comprometer sua função.

Com a técnica de gamagrafia industrial utilizando como detetor o IP, a manutenção pode ser feita preventivamente diminuindo paradas ou perdas na produção. Além disto, o custo para realização destes testes é menor, pois é desnecessária a retirada das mantas isolantes, e pode ser utilizada uma fonte emissora de energia mais baixa, diante da alta sensibilidade do filme IP.

Na figura 2.14, podemos visualizar a gamagrafia com IP realizada em tubulação de 25 mm, onde se pode visualizar a boa resolução das imagens obtidas.

Através do processamento e tratamento de imagens, assunto que será discutido no capítulo 5 deste trabalho, estes defeitos podem ser realçados e quantificados. O tempo de exposição no ensaio foi 300 segundos.

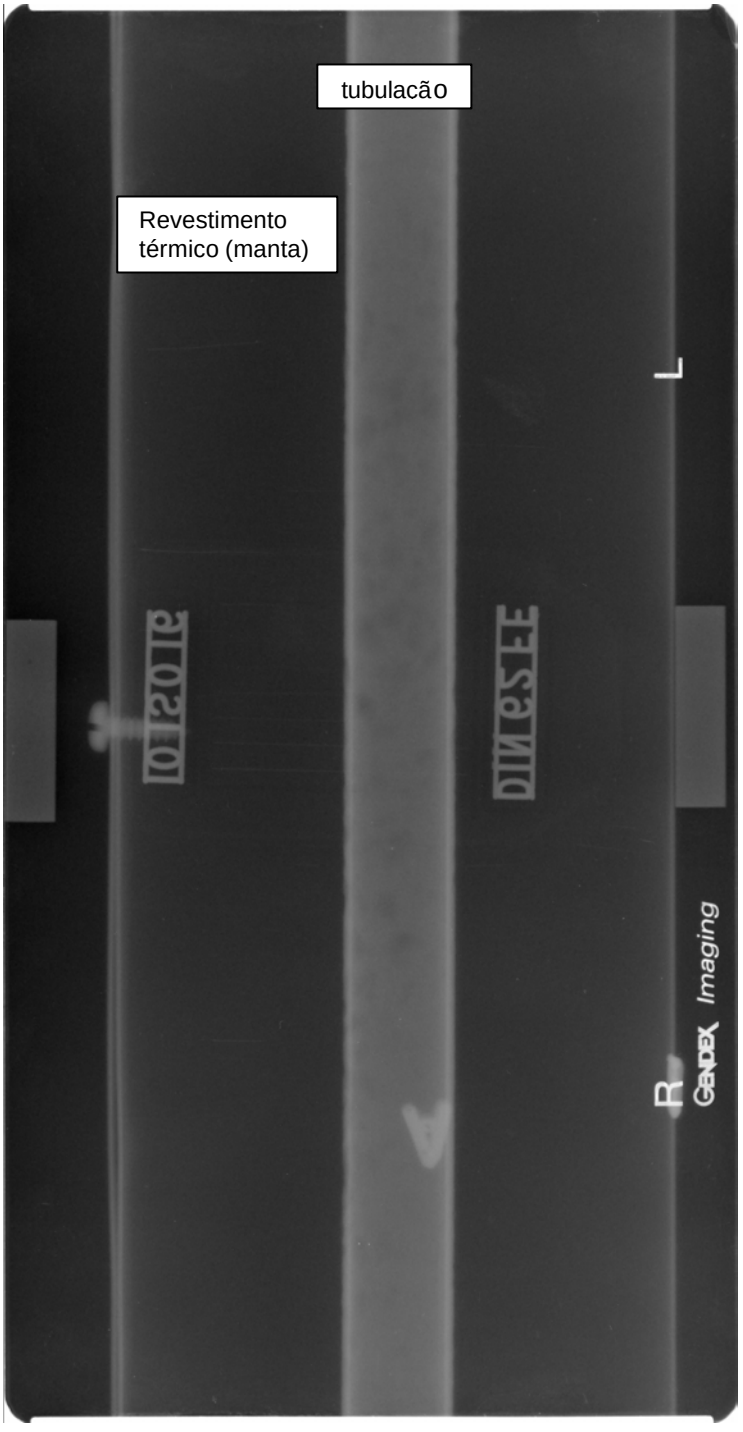


Figura 2.14 – Gamagrafia com detetor *Imaging Plate* de tubulação de 25 mm de diâmetro, revestida com manta térmica.

2. Isoladores elétricos

A partir dos ensaios realizados, apresentamos a seguir os resultados alcançados. Da mesma forma que no caso das tubulações, foram obtidas imagens com elevada nitidez e resolução.

Na figura 2.15, é apresentada a gamagrafia no isolador elétrico íntegro, ou seja, em perfeitas condições de uso. Observa-se que, por questão de posicionamento durante o ensaio, apenas a região da campânula é radiografada.

Na figura 2.16, observa-se a radiografia de um isolador elétrico quebrado, evidenciando a textura verificada no interior deste.

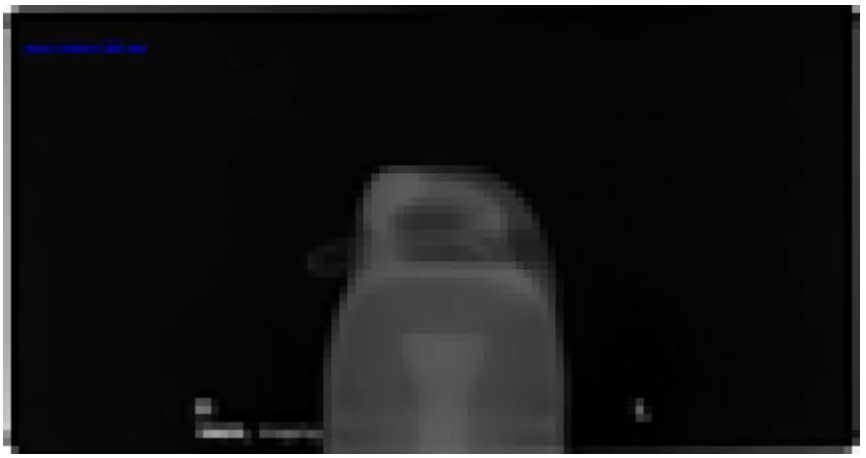


Figura 2.15 – Radiografia de isolador elétrico em bom estado.

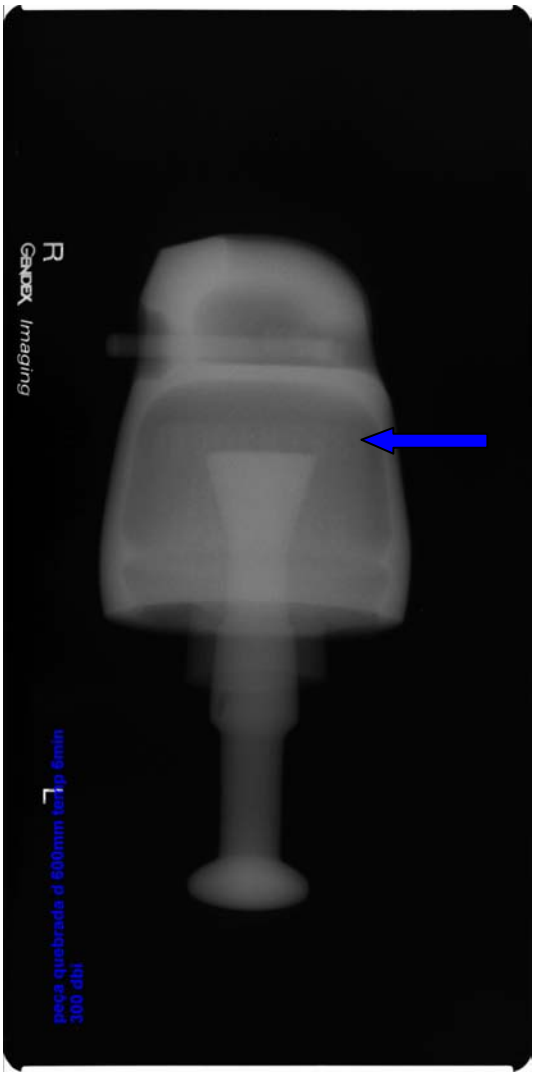


Figura 2.16 – Gamagrafia de um isolador elétrico danificado. As trincas do vidro temperado remanescente são evidenciadas por uma textura sutil no interior do isolador (seta).

3. Componentes Metálicos (Liga de Chumbo) de Bateria Automotiva

Como já mencionado, este componente ensaiado é inicialmente composto de duas partes de liga de chumbo que são unidas por encaixe, quando pré-aquecidas a um estado próximo ao pastoso. Fatores como a velocidade e a temperatura da operação de montagem podem induzir bolhas de ar, que são isolantes elétricos. As radiografias obtidas permitem a observação deste fenômeno com elevado grau de nitidez, como marcado com círculos na figura 2.17 a, e percebe-se que a indução das bolhas ocorre no processo de junção, uma vez que as imagens obtidas antes da montagem (2.17 b) mostram que originalmente as peças não têm descontinuidades.

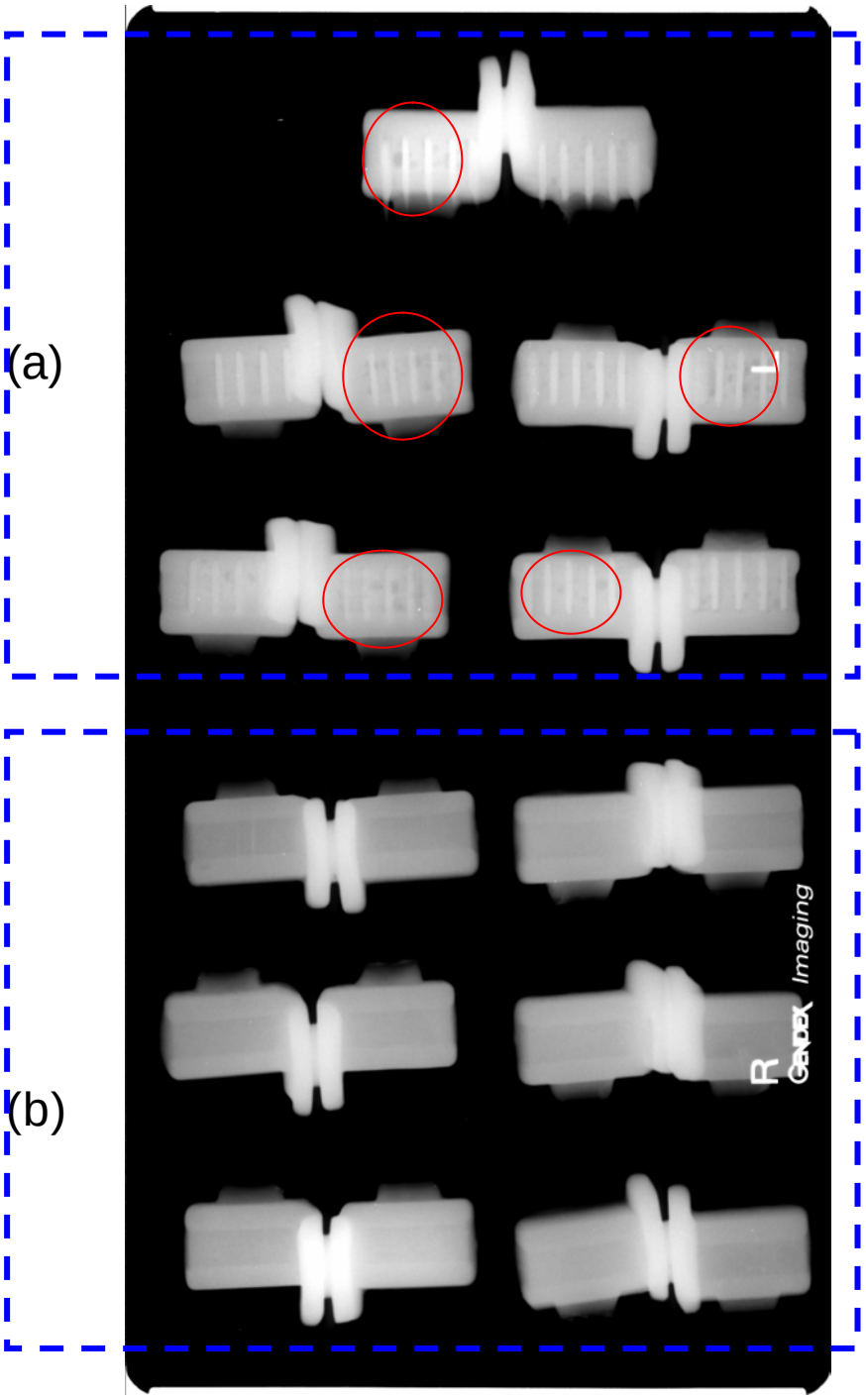


Figura 2.17 – Gamagrafia com detetor *Imaging Plate* do terminal do elemento, antes (B) e depois da junção da segunda peça (A).

Por outro lado, no ensaio realizado em outra vista, conforme pode ser visto na figura 2.18, não foram observadas falhas no processo de junção das partes.

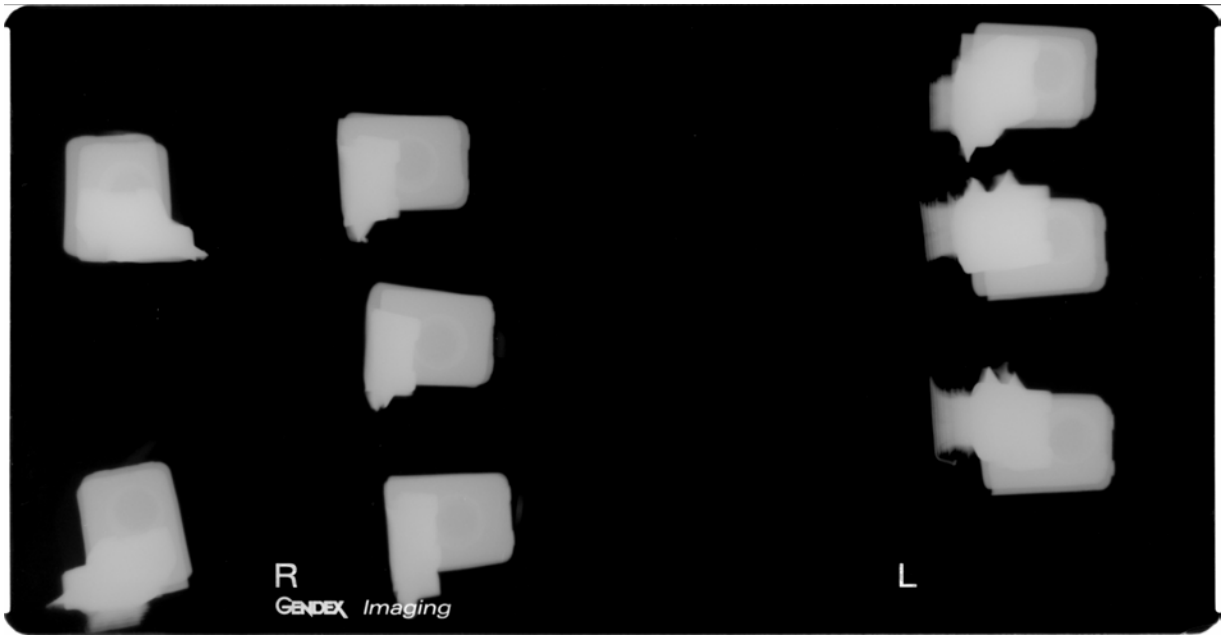


Figura 2.18 – Gamagrafia do terminal do elemento em outra vista.

2.5 Conclusões

A obtenção de radiografias digitais de alta definição exige ajustes de diversos parâmetros importantes durante o processo, a fim de obter um resultado satisfatório fornecendo uma imagem final que permita uma análise precisa do material ensaiado.

Pode-se destacar os principais parâmetros a serem controlados no ensaio de gamagrafia:

a) Tipo de radiação a ser utilizada (fonte emissora);
b) A distância entre a fonte emissora e corpo ensaiado;
c) A distância entre o corpo de prova e a placa de filme IP;
d) O tipo de corpo de prova (características dimensionais e material constituinte).

Neste tipo de ensaio, são exigidos controle e domínio dos parâmetros mencionados acima, sistematicamente, utilizando-se também de equações estabelecidas com o propósito de acelerar o refinamento dos mesmos.

Mesmo sem tratar as imagens, uma série de informações foi obtida a partir de radiografias com raios-? em conjunto com o detetor *Imaging Plate.* Em termos de tubulações revestidas, com a utilização da tecnologia radiográfica, os técnicos podem examinar os sistemas de tubulações sem retirar as mantas térmicas e, ainda, mantendo o processo industrial em operação. Com respeito aos isoladores de vidro, o sistema de gamagrafia mostrou uma potencialidade de discernir presença de vidro quebrado no interior do isolador sem dificuldade. Quanto aos componentes de chumbo, dependendo a direção de radiografia, as bolhas introduzidas no processo podem ser facilmente visualizadas, mostrando que podem ser responsáveis pela causa de não passar pelo controle de qualidade.

Em geral, utilizando a técnica da gamagrafia industrial associada ao filme *Imaging Plate*, imagens radiográficas digitais de excelente nitidez foram obtidas, com tempo de exposição de 300 segundos, mesmo empregando uma fonte radioativa de Ir-192 com atividade de 1,5 Ci, que corresponde a cerca de 10% da intensidade necessária para obter radiografias na gamagrafia com filmes convencionais, enquanto que com um filme de raios-X de alta resolução necessitaria de uma fonte de atividade em torno de 100 a 150 Ci.

A tecnologia do *Imaging Plate* tem uma série de vantagens em relação ao filme convencional, hoje amplamente utilizado.

Devido a sua grande sensibilidade, a fonte radioativa pode ter atividade em torno de 10 vezes menor que as fontes utilizadas em gamagrafias convencionais, diminuindo o custo da operação e aumentando a segurança dos técnicos que trabalham com este ensaio. Além disto, o ensaio pode ser realizado sem interrupção da produção, pois não requer uma grande área de balizamento quando devidamente empregado com colimador.

O *Imaging Plate* também possui certas características que o tornam uma tecnologia útil nos processos industriais atuais: alta resolução, maior linearidade da resposta, maior faixa dinâmica, possibilidade de reutilização (cerca de 1000 vezes), entre outras.

Diante dos resultados expostos, observa-se a potencialidade desta técnica inovadora e a necessidade da continuidade de trabalhos abordando o tema, a fim de se normatizar critérios e padrões de qualidade para este ensaio, capaz de produzir imagens radiográficas melhores e tratáveis digitalmente.

CAPÍTULO 3. RADIOGRAFIA DIGITAL DE ALTA RESOLUÇÃO COM FEIXES PARALELOS DE RADIAÇÃO SÍNCROTRON

3.1 Introdução

Diante dos aspectos limitantes da radiografia convencional, o presente capítulo aborda dois aspectos relevantes no esforço de melhorar a qualidade das imagens de radiografia industrial. São eles:

-Montar um sistema óptico visando à obtenção de feixes paralelos, monocromatizados e alargados.

-Obter radiografias computadorizadas de alta resolução com *Imaging Plate*.

-A utilização de feixes paralelos de radiação síncrotron, obtidos por meio de monocromador de quartzo assimétrico, permitindo assim uma análise mais rica em termos de detalhamento e informações úteis na interpretação do ensaio radiográfico.

Descoberta por cientistas americanos em 1947, a luz síncrotron é obtida através da aceleração de partículas pósitron, ou seja, elétrons carregados positivamente a velocidades próximas a da luz, produzindo luz em todo o espectro, incluindo raios-X.

No ensaio demonstrado neste capítulo, foram realizadas radiografias de besouros popularmente chamados “rola-bosta” e formigas utilizando feixes paralelos de luz síncrotron e radiografia digital de alta resolução, a fim de constatar a qualidade da imagem obtida com estas técnicas.

Também abordaremos a fabricação de um monocromador ressaltando o fator de assimetria, que possibilita radiografar objetos maiores e a construção de uma base para este, com o objetivo de um ajuste mais preciso e rápido (diminuição da exposição do examinador à radiação).

3.1.1 Radiografia Computadorizada de Alta Resolução

É importante ressaltar que radiografia computadorizada é aquela em que a imagem obtida no detetor pode ser processada em computador, após sua captura, por meio de scanner específico para cada tipo de detecção, sendo desta forma digitalizada.

Face à sensibilidade dos detectores aliada à capacidade dos equipamentos de *scanner*, a imagem digitalizada enviada ao computador, permitindo um bom nível de detalhamento da imagem obtida.

Além disto, uma vez digitalizada, a imagem poderá ser processada adequadamente, por meio de software de tratamento de imagens, assunto de nosso próximo capítulo.

3.1.2 Feixes Paralelos de Radiação Síncrotron, obtidos a partir de Monocromador de Quartzo Assimétrico

Monocromadores assimétricos possuem três características importantes:

- Monocromatização: ao decompor radiação policromática em monocromática.
- Colimação: que é a propriedade de tornar paralelos os feixes emergentes do monocromador, se atendidas as condições estipuladas na lei de *Bragg.*
- Alargamento do feixe.

Como vimos no início do capítulo, feixes de radiação paralelos permitem a obtenção de imagens de alta qualidade, pois não produzem penumbra e nem apresentam magnificação da imagem.

Assim, discutiremos a construção de um monocromador a partir do cristal de quartzo assimétrico e sua base ajustável.

Como veremos, a fonte de radiação utilizada foi síncrotron, do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas/SP (figura 3.1).

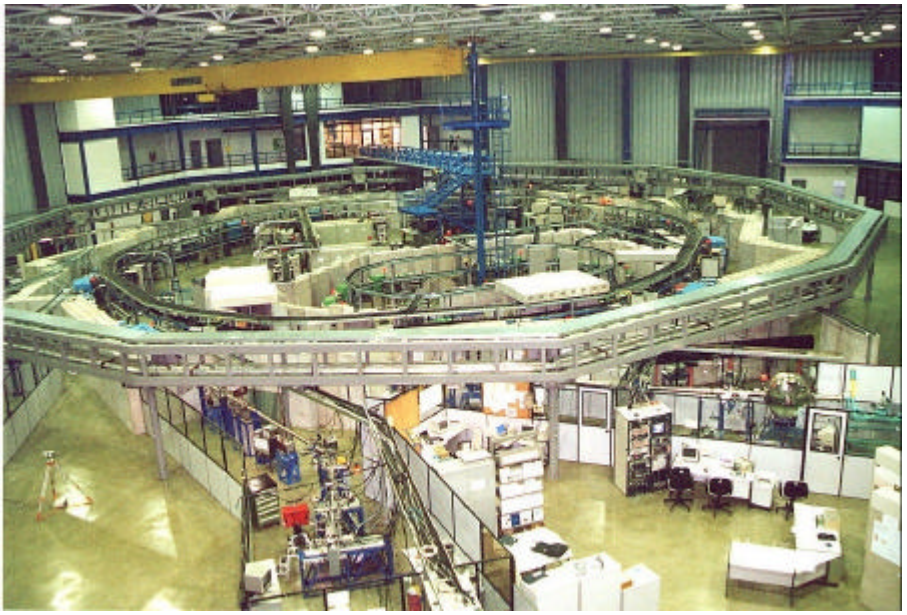


Figura 3.1 – Foto do anel de luz síncrotron do LNLS, Campinas/SP.

Ressaltamos que, no caso da fonte utilizada, os feixes já são monocromáticos e possuem um bom grau de paralelismo (1/1000 rad).

Neste ensaio, porém, outra propriedade importante foi obtida a partir do monocromador, que é o fator de assimetria.

Na prática, o fator de assimetria indica o coeficiente multiplicador da largura do feixe emergente em relação ao feixe incidente, aumentado o campo varrido durante o ensaio radiográfico.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Construção de Monocromador Assimétrico de Quartzo

O monocromador utilizado foi construído pelo Grupo de Materiais não Metálicos e Inorgânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, a partir de cristal de quartzo sintético.

No monocromador construído, o cristal de quartzo assimétrico utilizado possui boa qualidade, com cerca de 30 discordâncias por cm^2 e distância interplanar de 3,34331 ?.

Para serem cortados, os cristais foram fixados em uma base de mármore que foi acoplada à serra diamantada, tendo a serra sido posicionada de forma paralela ao plano de corte (10-11), por ser o mais favorável a refletividade dos raios-X.

Para o monocromador de fator de assimetria 20, mostrado na figura 4.2 e 4.3, o corte é de 16 mm.

A seção obtida pelo corte do cristal foi ajustada a fim de se obter um monocromador com 25mm de largura.

O polimento do cristal foi realizado utilizando pó abrasivo de SiC na seqüência granulométrica de #120, #320, #800, #2000,.de forma a se ter uma superfície com alto grau de polimento. Por fim, foi realizado um ataque químico superficial objetivando a remoção de tensões.

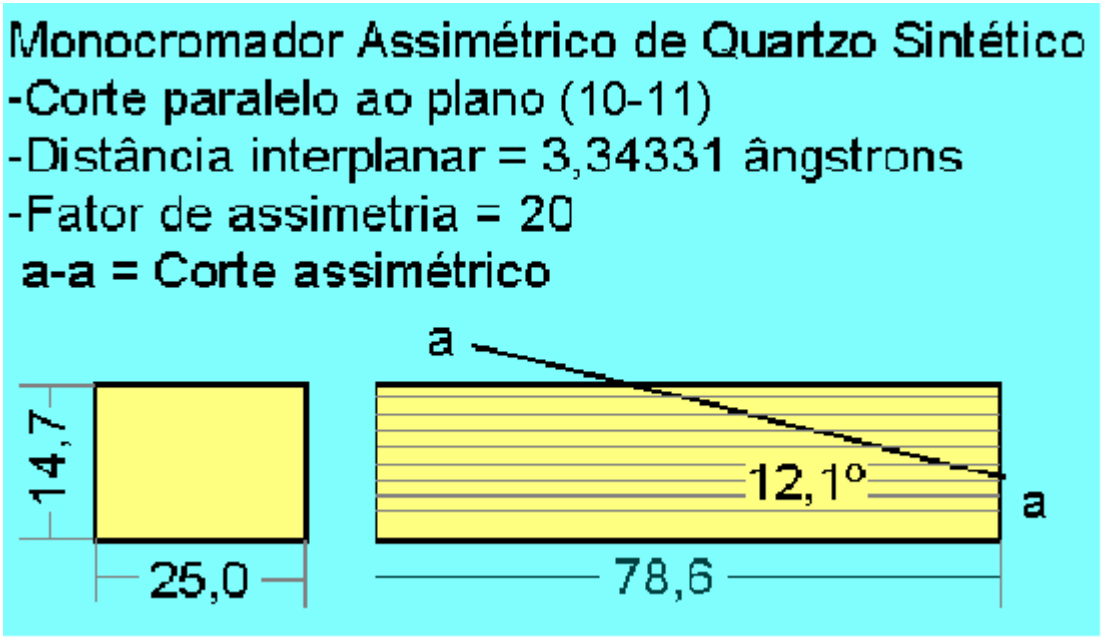


Figura 3.2 – Esquema de Corte do Monocromador Assimétrico com Fator de Assimetria 20.

Figura 3.3 – Foto do monocromador assimétrica de quartzo sintético.

O esquema mostrado na figura 3.4 mostra a óptica montada, onde o feixe de radiação incide no cristal monocromador assimétrico, emergindo monocromatizado, colimado e alargado para a amostra a ser analisada.

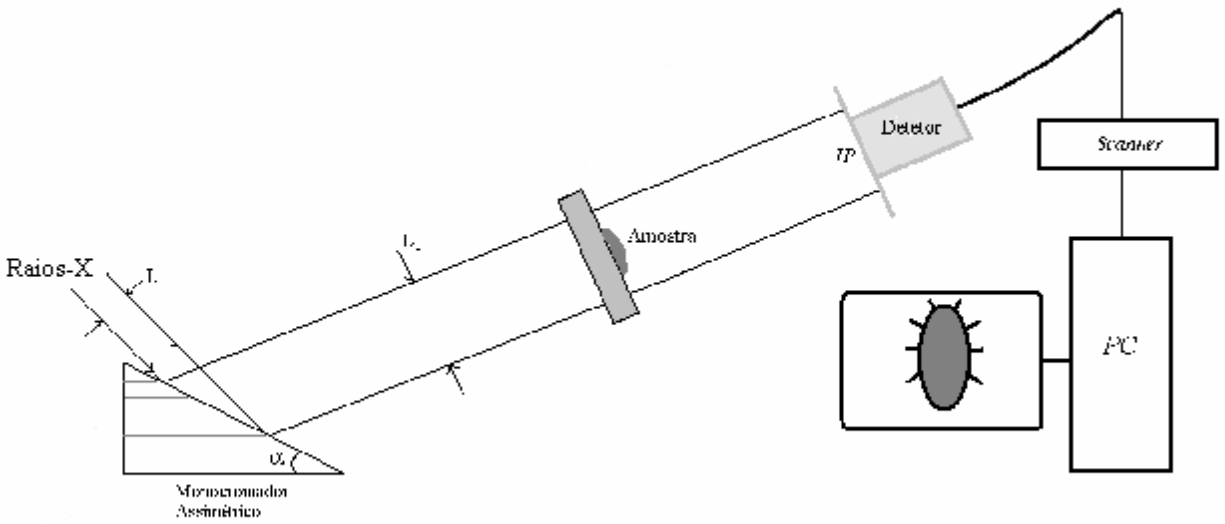


Figura 3.4 – Monocromatização e alargamento do feixe de radiação, por meio de monocromador assimétrico

3.2.2 Base Ajustável para Fixação do Monocromador Assimétrico

Uma parte laboriosa na construção óptica é o alinhamento do monocromador assimétrico que consiste em ajustar o posicionamento do mesmo em relação ao feixe de raios-X de modo que o ângulo formado entre a superfície do monocromador e o feixe incidente de raios-X corresponda ao ângulo de Bragg.

O processo de alinhamento precisa ser realizado com o tubo de raios-X, ou outra fonte qualquer de radiação. Deste modo o operador fica exposto à radiação ionizante, que pode matar tecido humano, provocar queimaduras e doenças (Cullity, 1978).

Logo, o processo de alinhamento do monocromador ao feixe de raios-X é um procedimento perigoso e que deve ser realizado com segurança, de forma que o operador não se exponha à radiação.

Assim, foi construído um sistema mecânico para servir de base para o monocromador assimétrico que possibilite realizar o alinhamento deste de modo mais rápido e prático.

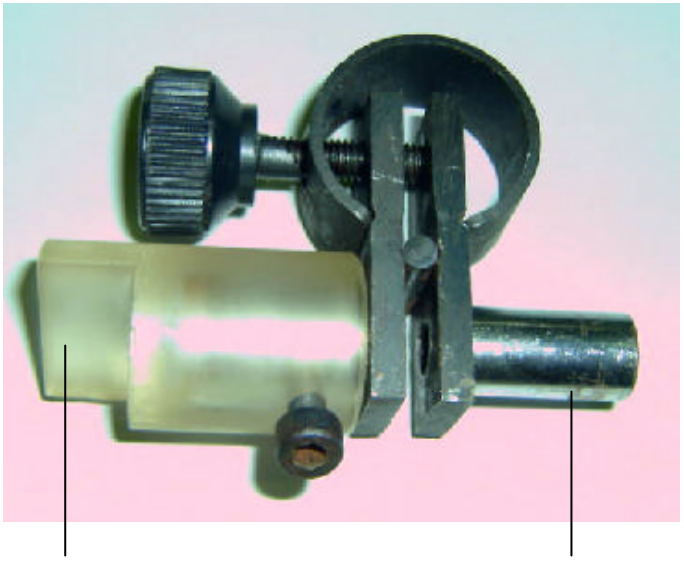
O sistema montado permite o ajuste da rotação e os deslocamentos vertical e horizontal do monocromador.

Para isto foram utilizadas bases magnéticas onde por meio de um mecanismo de parafusos é acoplada uma placa de metal, que torna possível executar um deslocamento vertical girando parafusos.

Um mancal de rolamento fixo a base metálica é utilizado para fixar o eixo no qual será conectado o suporte do monocromador.

O deslocamento horizontal do suporte é realizado por um sistema de coordenadas com um grau de liberdade, fixo no eixo principal.

A rotação do monocromador é efetuada por uma cabeça micrométrica, que por meio de braço conectado ao eixo principal, permite realizar um deslocamento angular no eixo, girando o mesmo juntamente com o suporte do monocromador (figura 3.5 e 3.6).



Suporte para fixação do monocromador Eixo para fixação à base ajustável

Figura 3.5 – Suporte para fixação do monocromador.

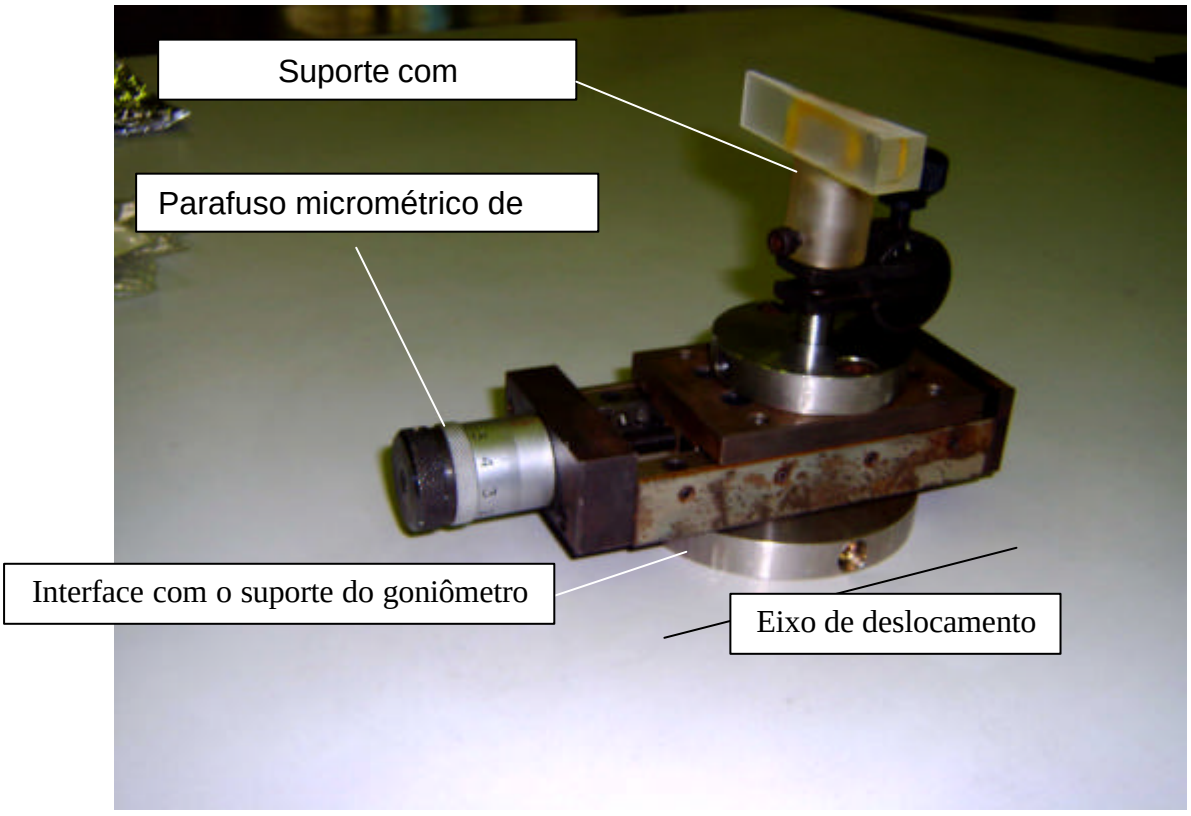


Figura 3.6 – Base ajustável para posicionamento do monocromador em relação ao suporte do goniômetro.

A base ajustável foi posicionada no interior do goniômetro ?-2? de saída do feixe de luz síncrotron, na extremidade do seu eixo suporte, conforme mostrado na figura 3.7.

Figura 3.7 – Detalhe do eixo suporte, no goniômetro ?-2? do síncrotron.

O arranjo final do conjunto monocromador/base, montado no goniômetro ?-2? da linha XRD1 é mostrado na figura 3.8.

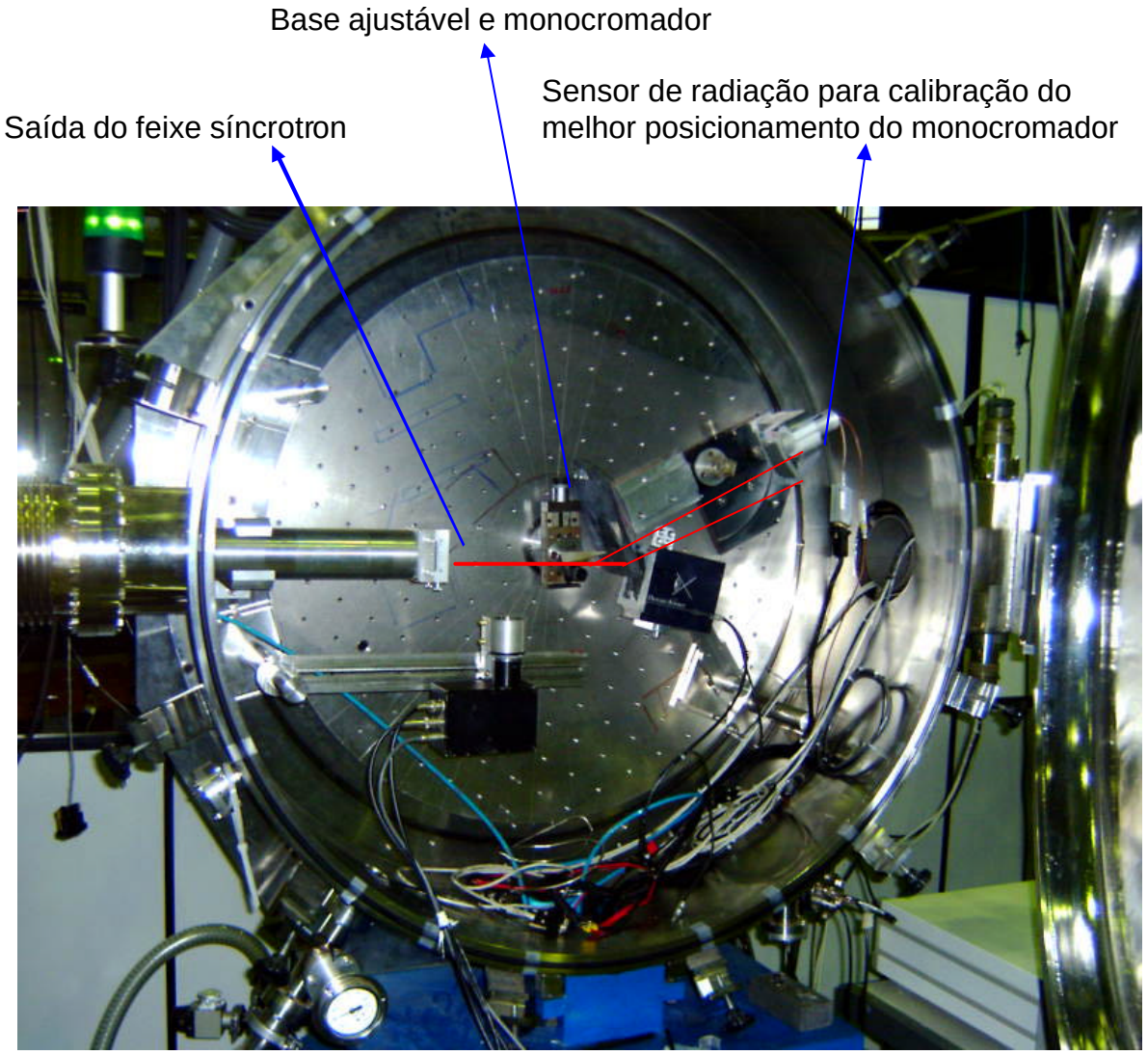


Figura 3.8 – Vista geral do arranjo para ensaio de radiografia no goniômetro da linha XRD1 do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas/SP.

Como indicado na figura 3.8, no goniômetro do síncrotron está posicionado um sensor para detectar a quantidade de radiação que chega até o mesmo. Sua

utilidade consiste em a partir de seu sinal, que é transferido a um terminal de computador, cuja representação gráfica é mostrada na figura 3.9, permitir o melhor posicionamento do detetor em relação à incidência do feixe que chega do monocromador.

Salientamos que a parte interna, o goniômetro ?-2? possui liberdade angular possibilitando a alteração da posição do sensor/detetor, fixos a ela.

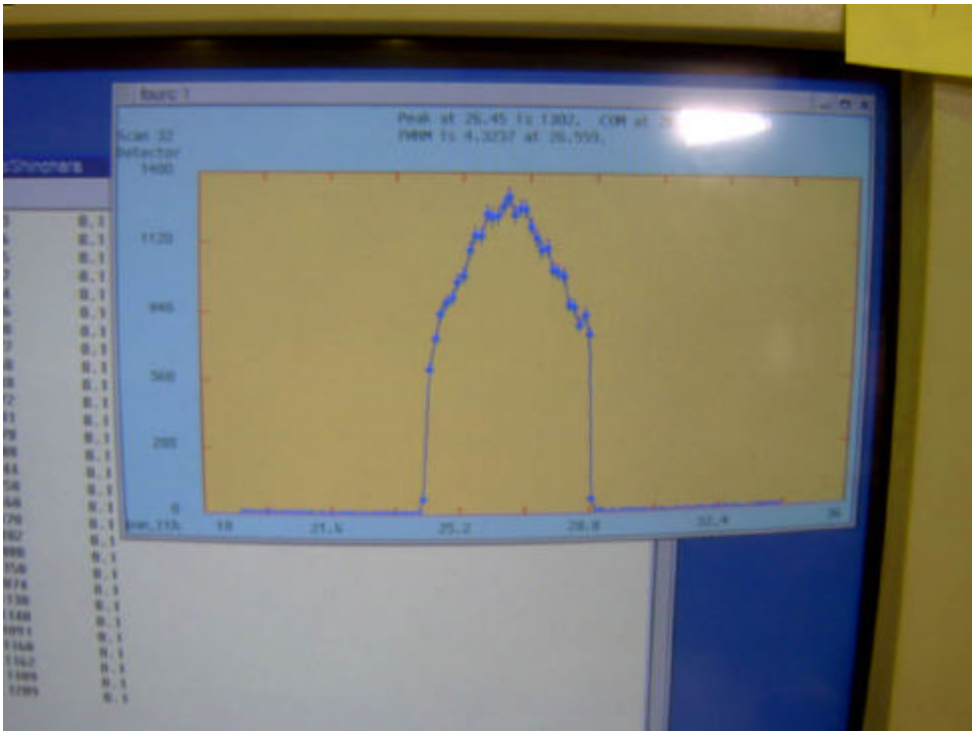


Figura 3.9 – Sinal de radiação captado pelo sensor montado no goniômetro do síncrotron.

Os ensaios radiográficos foram realizados no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) em Campinas/SP. Para este experimento, foi utilizada a estação experimental XRD1 do LNLS, a energia de 8 keV e o comprimento de onda de 1,54 ?.

Um teste foi realizado com a finalidade de avaliar a orientação cristalina do monocromador, utilizando o difratômetro de raios-X ? -2?.

Visto que o controle do deslocamento horizontal do monocromador não é de vital importância ao sistema, foi utilizado o controle manual de modo a posicionar o monocromador a fim de que este intercepte o feixe de raios-X pela metade. Isto pode ser realizado com a utilização de filmes fluorescentes.

Nos ensaios radiográficos realizados no LNLS, foi utilizado o detetor *Imaging Plate.* Posteriormente à exposição, o *Imaging Plate* é escaneado por um feixe de raios *LASER*. Desta maneira a energia armazenada é liberada na forma de luminescência fotoestimulada, sendo consecutivamente digitalizada para ser armazenada e/ou processada em computador.

A luminescência gerada em vários pontos é obtida por um guia coletor de luz e então convertida em um sinal elétrico-analógico por um fotomultiplicador.

O sinal elétrico resultante é convertido em um equivalente digital por um conversor analógico-digital de alta velocidade. Visando evitar o espalhamento lateral da radiação, foi montada uma chapa de chumbo com abertura retangular, apresentada na figura 3.10, objetivando impedir a passando dos feixes oblíquos.

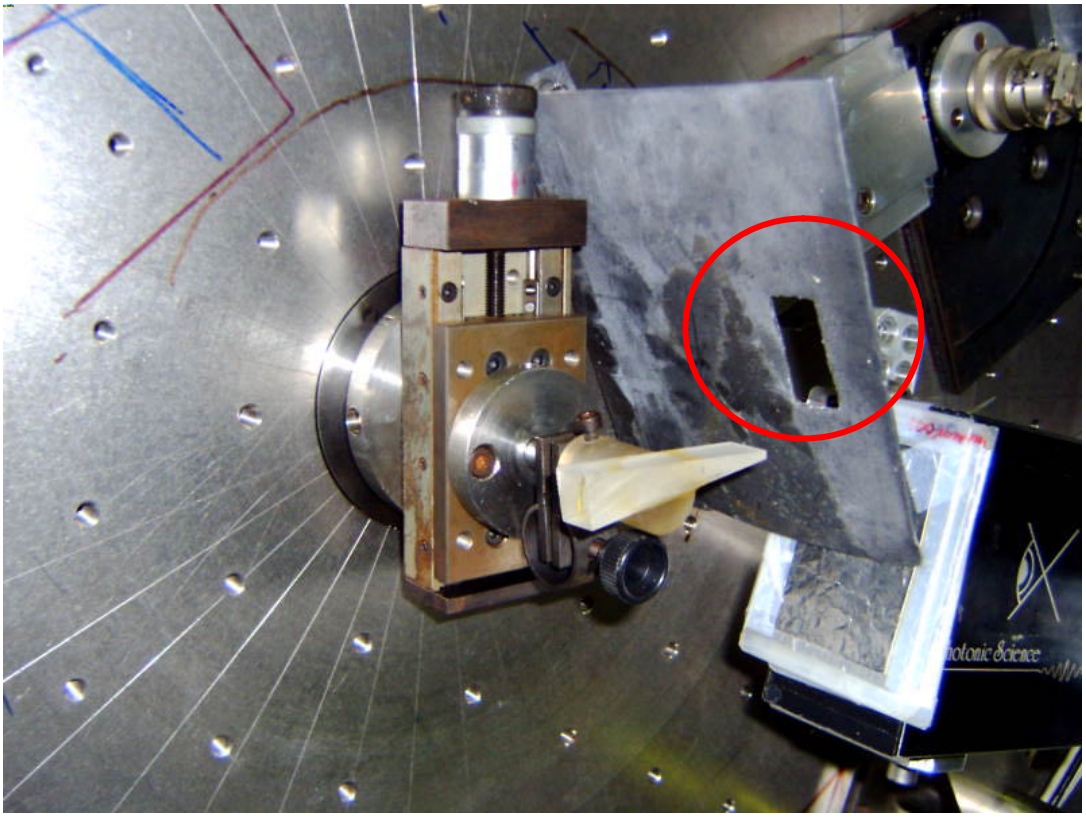


Figura 3.10 – Chapa em chumbo com abertura para limitar a passagem de espalhamento e feixe direto.

Em função do nível relativamente baixo de energia do síncrotron utilizado, optamos em ensaiar um inseto, ao invés de corpo metálico, que exigiria uma fonte mais potente, porém sem prejuízo da avaliação das potencialidades da técnica. O inseto usado, o *Dichotomius schiffleri,* popularmente chamado de rola-bosta, é mostrado na figura 3.11.

Figura 3.11 – Besouro *Dichotomius schiffleri* usado nos ensaios para teste do feixe altamente paralelo.

Em função do limitante da largura do cristal, cujos efeitos de bordas (espalhamento do feixe),como explicamos, foram eliminados com o artifício da chapa

de chumbo com abertura determinada combinado com as dimensões do besouro, que era maior, a radiografia foi executada em três partes e depois montadas, para se ter a sua imagem completa. Na figura 3.12, vemos o besouro posicionado para o ensaio, além do detetor *Imaging Plate.*

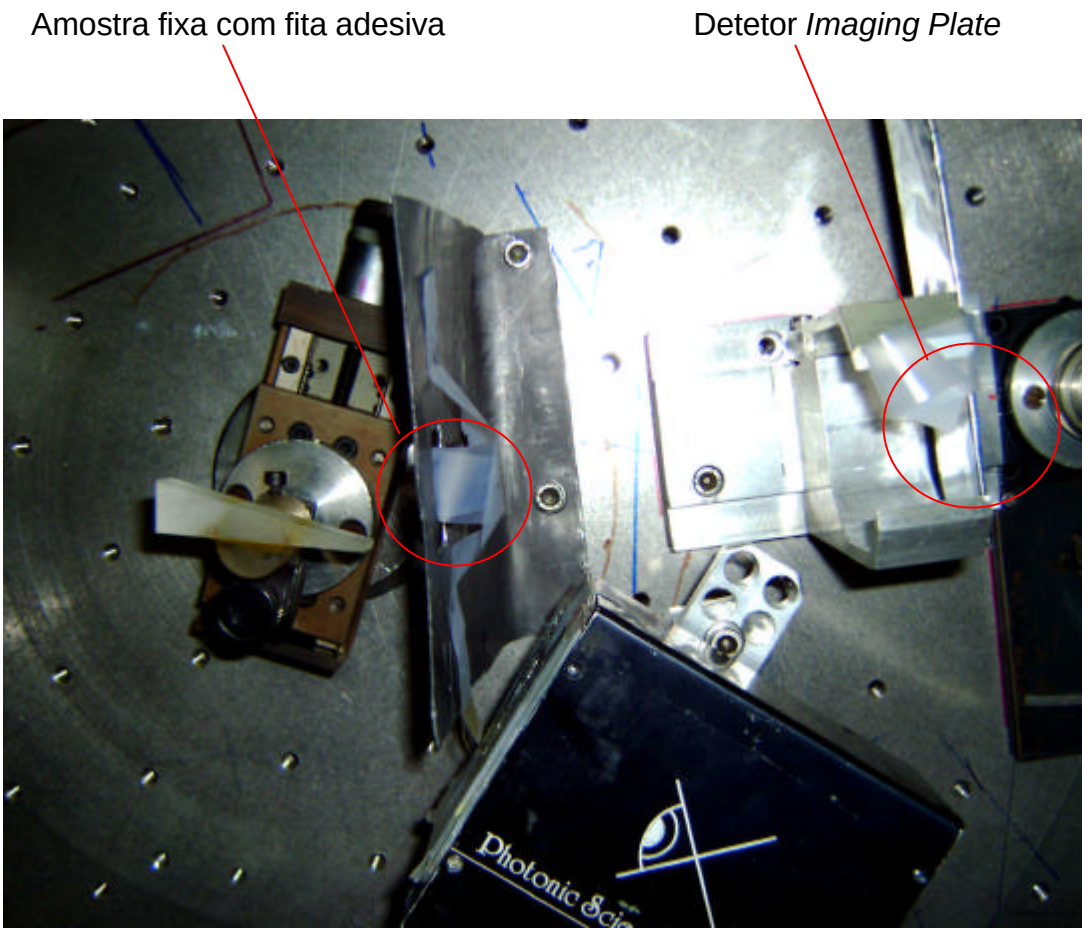


Figura 3.12 – Detalhes da amostra (besouro) e detetor *Imaging Plate*.

Antes de realizar o ensaio no LNLS, tanto o monocromador como o sistema mecânico de alinhamento foram testados no DEMEC/CTG/UFPE, utilizando um equipamento de raios-X como fonte de radiação, a fim de se certificar de seu correto funcionamento.

O equipamento de raios-X destes testes foi doado pela UNICAMP de Campinas/SP.

A fonte de raios-X é horizontal com inclinação de 6º e está associado um goniômetro vertical de alta precisão mecânica (0,01º de precisão).

Este equipamento corresponde ao difratômetro de raios-X ?-2? Geigerffex da Rigaku International Corporation, modelo 2013, instalado no LDEX (Laboratório de Espalhamento e Difração de Raios-X) no DEMEC / UFPE.

O detetor foi um filme radiográfico de alta resolução (Fuji IX50), que apresenta elevado grau de sensibilidade e resolução.

3.3 Resultados

Através do uso do monocromador assimétrico de quartzo sintético, com fator de assimetria 20 que foi utilizado nos ensaios, obtivemos os aspectos esperados, ou seja, feixes altamente paralelos e alargados, em relação ao feixe incidente no monocromador, vindo do síncrotron. As radiografias obtidas evidenciaram elevado grau de qualidade da imagem. Esta qualidade pode ser devida à diminuição na magnificação, distorção e aumento da nitidez da imagem provocadas pela utilização dos feixes paralelos de radiação síncrotron; e também ao desempenho do filme *Imaging Plate*, cuja sensibilidade é muito grande, cerca de dez vezes maior que o filme negativo convencional e possui maior linearidade de resposta, em relação à quantidade de radiação. Nas figuras 3.13 e 3.14, apresentamos as radiografias obtidas com imagem positiva e negativa, respectivamente.

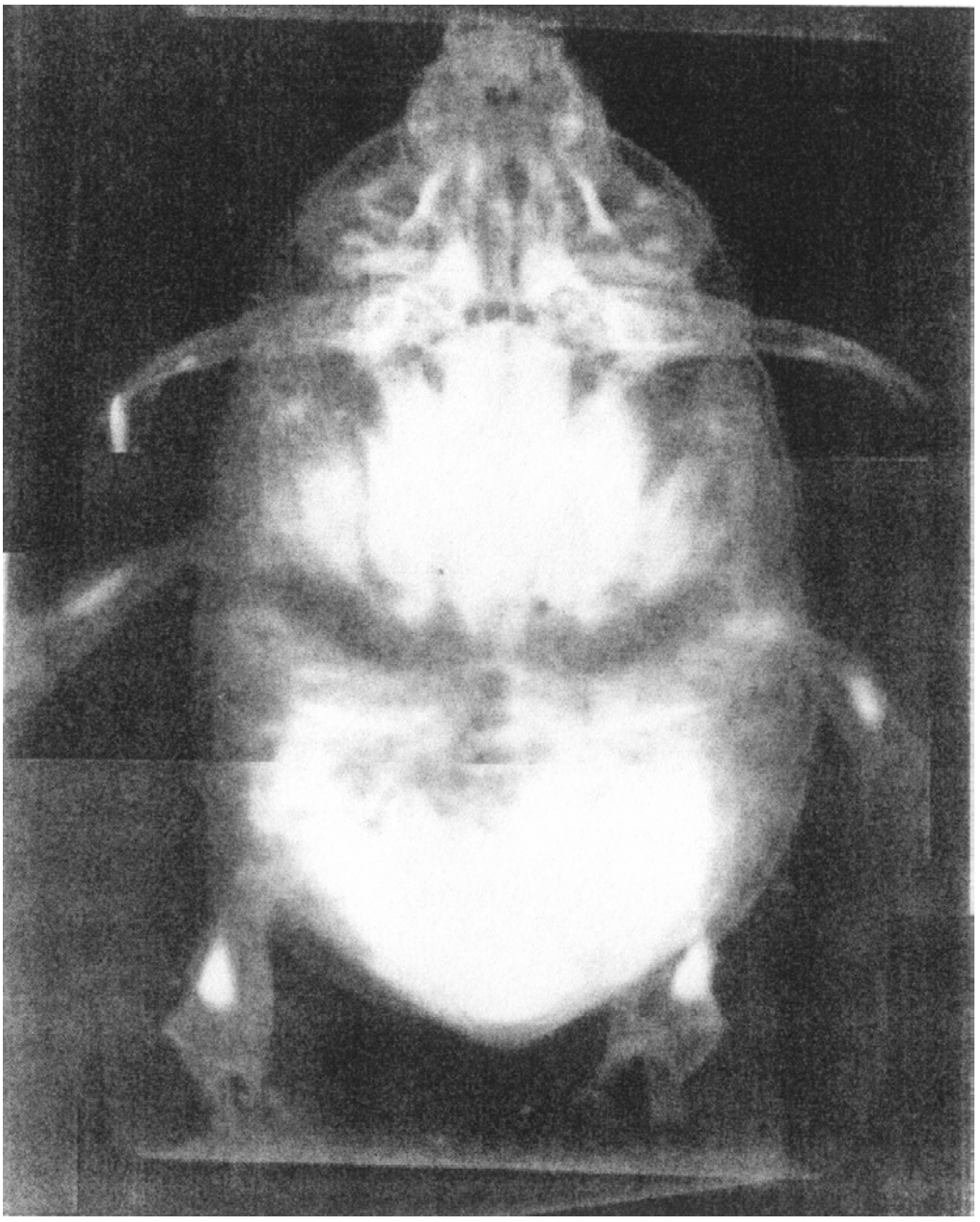


Figura 3.13 – Radiografia “positiva” do besouro. Tempo de exposição: 20 segundos.

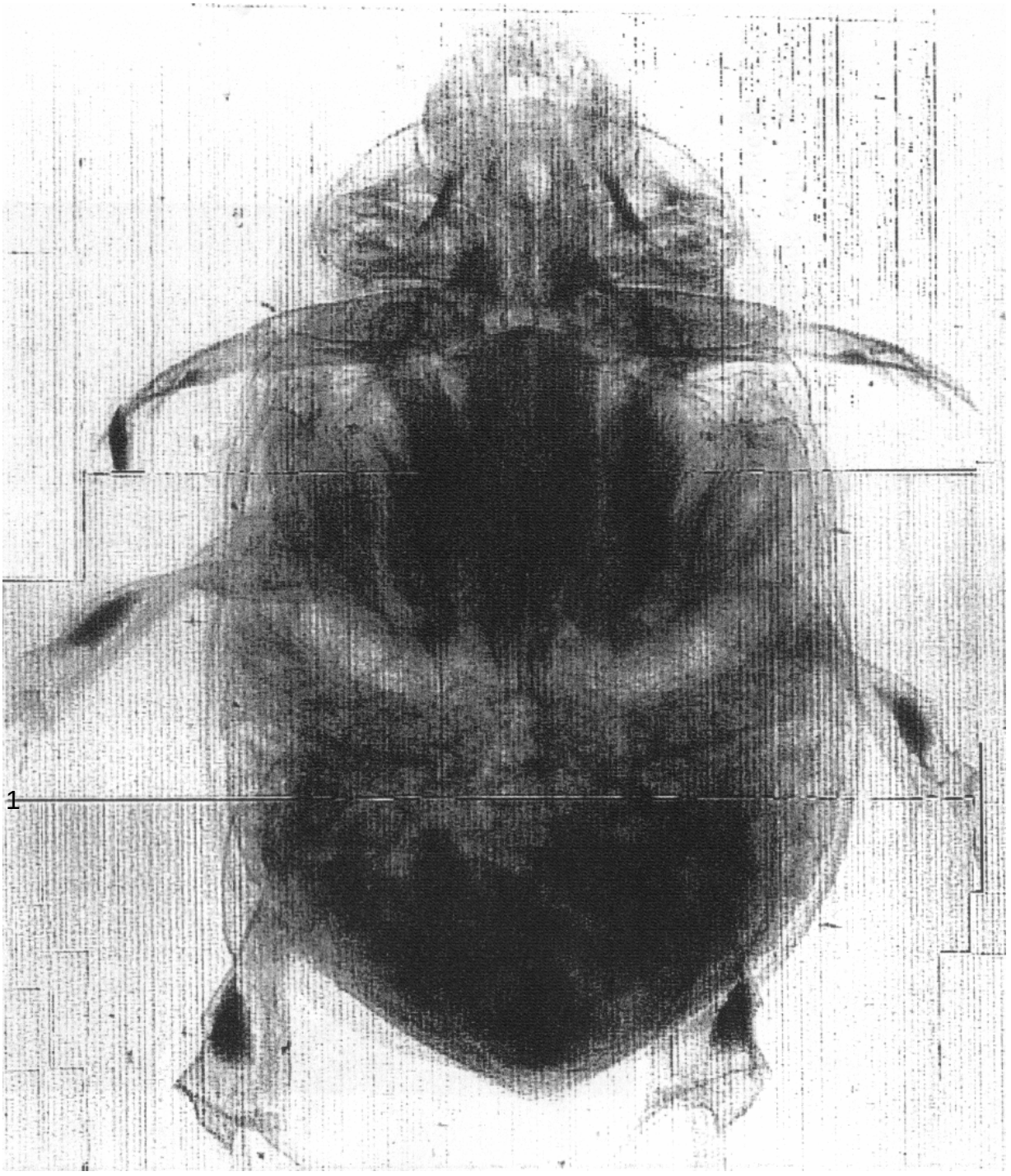


Figura 3.14 – Radiografia “negativa” do besouro. Tempo de exposição: 20 segundos.