

MODELAGEM DE SISTEMA E PROCEDIMENTO PARA RADIOGRAFIA
COMPUTADORIZADA *OFFSHORE*

Edmilson Monteiro de Souza

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIENCIAS EM ENGENHARIA
NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Prof. Delson Braz, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Walsan Wagner Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

SOUZA, EDMILSON MONTEIRO DE

Modelagem de Sistema e Procedimento
para Radiografia Computadorizada *Offshore*
[Rio de Janeiro] 2008.

XVIII, 120 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia Nuclear, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1 . Radiografia Computadorizada.

2. *Image Plate*

3. MCNPX

4. Modelagem

I. COPPE/UFRJ

II. Título (Série).

DEDICATÓRIA

Ao Senhor Grande DEUS, a Ele toda honra, glória, louvor e adoração.

Ao Senhor JESUS, por ter morrido na cruz para me dar vida, e vida em abundância.

Aos meus pais, José e Vera, com carinho e admiração.

A minha esposa Samanda, com muito amor.

E a TODOS aqueles que direta e indiretamente contribuíram para que esta tese pudesse ser concluída.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS**, por estar sempre ao meu lado, renovando as minhas forças e guerreando as minhas guerras.

A minha esposa Samanda Cristine, pela paciência, sabedoria, apoio incondicional e colaboração profissional, sem a qual este trabalho não seria o mesmo.

Aos meus pais (José de Souza Filho e Vera Lúcia Monteiro de Souza), pela sabedoria com que me educaram e por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, sejam bons ou ruins.

Aos meus irmãos, sobrinhos, cunhados e sogros pelo apoio constante durante todo o curso de doutorado.

Ao orientador Dr. Ricardo Tadeu Lopes, por ter confiado a mim a responsabilidade de desenvolver este trabalho, e pelas ajudas constantes.

Ao Dr. Ademir Xavier da Silva, pelas constantes colaborações e auxílio com o código de Monte Carlo MCNP.

A todos os funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, pela paciência e boa vontade dedicadas a minha pessoa durante todo o curso de doutorado.

Ao Dr. Walsan Wagner Pereira, pelas revisões e sugestões que contribuíram para o engrandecimento desta Tese.

A todos os professores do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE, pela contribuição para o meu crescimento profissional.

A todos os alunos do curso de Doutorado e Mestrado em Engenharia Nuclear, pela amizade e troca de conhecimento durante todo o curso.

A Universidade Federal Fluminense (UFF) e ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), por nunca terem fechado as portas para mim, mesmo após a conclusão do curso de Bacharel em Física e de mestrado em Radioproteção e Dosimetria.

A todos os membros da Primeira Igreja Batista Renovada em Pacheco, pelas constantes orações a meu favor.

A todos os componentes da banca examinadora deste trabalho, por terem aceitado o convite para avaliar esta Tese.

E a todos aqueles que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Clame a mim, e te responderei; anunciar-te-ei coisas grandes e ocultas que não sabes.” (Jr. 33:3)

“Não andeis ansiosos de coisa alguma; em tudo, porém, sejam conhecidas diante de Deus as vossas petições, pela oração e pela súplica, com ações de graças.”

“E a paz de Deus, que excede todo entendimento, guardará o vosso coração e a vossa mente em Cristo Jesus”.

“Finalmente, irmãos, tudo o que é verdadeiro, tudo o que é respeitável, tudo o que é justo, tudo o que é puro, tudo o que é amável, tudo o que é de boa fama, se alguma virtude há e se algum louvor existe, seja isso o que ocupe o vosso pensamento”. (Fp. 4: 6-8)

“Errais, não conhecendo as Escrituras nem o poder de Deus”. (Mt. 22:29)

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

MODELAGEM DE SISTEMA E PROCEDIMENTO PARA RADIOGRAFIA
COMPUTADORIZADA *OFFSHORE*

Edmilson Monteiro de Souza

Março/2008

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta uma metodologia para modelagem de ensaios radiográficos com a radiografia computadorizada, utilizando a Função Radiografia do código de Monte Carlo MCNPX (*the Radiographic tally*), visando aplicações industriais em análises de problemas de corrosão e trincas em ambientes *offshore*. A resposta em energia de um detector *Image Plate* BaFBr foi modelada e introduzida em conjunto com a Função Radiografia em um arquivo de entrada do código MCNPX. Em adição, um programa de pós-processamento de dados foi desenvolvido e utilizado para converter o arquivo de saída da Função Radiografia em imagens com 16 bits. Uma metodologia capaz de inserir o ruído nas imagens simuladas a partir de dados experimentais também é proposta e aplicada. Imagens simuladas de um duto contendo defeitos reproduzindo trincas e corrosões foram comparadas com imagens obtidas experimentalmente. As análises qualitativas e comparativas entre as imagens apresentaram boa concordância, mostrando que a metodologia é capaz de reproduzir situações experimentais de campo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PROCEDMENT AND SYSTEM MODELING FOR *OFFSHORE* COMPUTED
RADIOGRAPHY

Edmilson Monteiro de Souza

March/2008

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes.

Department: Nuclear Engineering.

This work presents a methodology for computed radiography simulation for industrial applications in gamma radiography and *offshore* radiography, using the MCNPX radiography tally. In order to perform the simulation, the energy dependent response of a BaFBr Image Plate detector was modeled and introduced in MCNPX radiography tally input. Moreover, a post processing program was developed and used to convert MCNPX radiography tally output in 16 bits digital images. A methodology for noise inclusion in simulated images was presented. Simulated and experimental images of a steel pipe containing corrosion alveoli and stress corrosion cracking were compared and the results showed good agreement between both images.

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Dutos <i>Offshore</i>	1
1.2 – Corrosão: um dos maiores problemas em ambientes <i>offshore</i>	2
1.3 - Inspeções não destrutivas em estruturas <i>offshore</i>	4
1.3.1 - Estado da arte 1	4
1.4 - A modelagem computacional como uma ferramenta de auxílio aos métodos experimentais	7
1.4.1 – Estado da arte 2	8
1.4.2 – O código MCNP	13
1.5 - Simulação de imagens radiográficas com o código MCNPX	15
1.5.1 - A Função Radiografia – <i>The Radiography Tally</i>	15
1.5.2 – Imagem Aérea	16
1.5.3 - Vantagens da função radiografia do código MCNPX	16
1.6 – Objetivo do Trabalho	20

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Introdução a Radiografia Industrial	22
2.1.1 - Princípios e fundamentos da radiografia industrial	23
2.2 - Fontes de radiação para radiografia industrial	27
2.2.1 - Radiografia com raios X	27
2.2.2 - Radiografia com raios gama	32
2.3 - A Radiografia Computadorizada	36
2.3.1 – Imagens Digitais	37
2.3.1.1 - Qualidade da imagem digital	38
2.3.1.2 – Ruído em Imagens digitais	40
2.3.2 – Detectores <i>Image Plate</i>	42
2.4 – Métodos radiográficos para detecção de corrosão e depósitos em tubos.....	45

2.4.1 – Técnica de parede simples – vista simples (PSVS)	45
2.4.2 – Técnica de Parede Dupla	46
2.4.2.1 – Técnica de Parede Dupla e Vista Simples - PDVS...	46
2.4.2.2 – Técnica de Parede Dupla e Vista Dupla – PDVD.....	47
2.4.3 – O Método Tangencial	49
2.4.4 – Ambos os métodos combinados	50
2.5 – O Método de Monte Carlo	51
2.5.1 – Simulações com MCNPX	52
2.5.2 – Simulação de ensaios radiográficos com MCNPX	54
2.5.2.1 – Detectores pontuais (comando F5)	56
2.6 - Métodos de Interpolação de Imagens	58
2.6.1 - Interpolação do vizinho mais próximo	58
2.6.2 - Interpolação Bilinear	59
2.6.3 - Método de interpolação Bicúbico	59

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PARA GERAÇÃO, PÓS-PROCESSAMENTO E RECONSTRUÇÃO DE DADOS

3.1 - Metodologia para pós-processamento e reconstrução de dados	62
3.1.1 – Produção do arquivo de input e pós-processamento de dados obtidos com a função radiografia	63
3.2 – Análise das componentes direta e espalhada de imagens obtidas com a função radiografia do código MCNPX	66
3.2.1 – Análise da componente do feixe de radiação incidente que não colide com a amostra – componente direta da radiação	67
3.2.1.1 – Cálculo de penumbra geométrica	68
3.2.1.2 – Análise de Contraste	69
3.2.2 – Análise da componente espalhada do feixe de radiação na formação da imagem	70
3.2.2.1 – Análise da distribuição espacial da radiação espalhada para diferentes espessuras	72
3.2.2.2 – Análise do comportamento da radiação espalhada em função da distância objeto-detector	72

3.3 – Análises dos diferentes métodos de interpolação utilizados para reamostragem de imagens	73
3.4 – Análises dos Resultados	75
3.4.1 – Análise da componente direta da radiação na imagem simulada	75
3.4.1.1 – Penumbra geométrica	75
3.4.1.2 – Contraste	76
3.4.2 – Análise da componente espalhada da radiação na imagem simulada	77
3.4.2.1 – Distribuição espacial da radiação espalhada para diferentes espessuras de material	77
3.4.2.2 – Distribuição espacial da radiação espalhada em função da distância objeto-detector	79
3.4.3 – Análise dos diferentes métodos de interpolação	80
3.4.3.1 Análise da componente formada pelo fluxo de radiação espalhada	80
3.4.3.2 Análise da componente formada pelo ruído	82

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DE DETECTORES DIGITAIS

4.1 – Modelagem da resposta em energia do material sensível do detector ..	84
4.2 – Modelagem do ruído do sistema de processamento do detector <i>Image Plate</i>	86
4.3.1 - Obtenção da razão ruído-sinal a partir de dados experimentais	90
4.3 – Modelagem da função de resposta de detectores digitais – o <i>PROGRAMA IMAGEM</i>	93
4.4 – Modelagem de ensaios não destrutivos com o código MCNPX	94
4.5 – Resultados	100
4.5.1 – Radiografia do duto sem a presença de água	100
4.5.2 – Radiografia do duto submerso em água	104

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	107
--------------------------------------	-----

CAPÍTULO 6 – PERSPECTIVAS	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
APÊNDICE 1 – PUBLICAÇÕES ORIGINADAS NESTA TESE	119
APÊNDICE 2 – PUBLICAÇÕES QUE UTILIZARAM A METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE IMAGENS DESENVOLVIDA NESTA TESE	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de corrosão em dutos	3
Figura 2 – Arranjo típico de um ensaio radiográfico	22
Figura 3 – Probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares	23
Figura 4 – O processo radiográfico	26
Figura 5 – Visão externa e interna de um equipamento gerador de raios X de até 300 keV	28
Figura 6: Forma da curva de tensão alternada após a retificação. Este tipo de retificação é conhecido como retificação de meia onda. a) Sinal de entrada (baixa tensão). b) Processo de retificação	29
Figura 7 – Dispositivo porta-fonte	32
Figura 8 – Irradiador gama e seus principais componentes	35
Figura 9 – Aparelho para gamagrafia industrial, com capacidade máxima de 100 Ci de ¹⁹² Ir	36
Figura 10 – Evolução dos sistemas de aquisição de imagem nos últimos 40 anos ...	37
Figura 11 – Matrizes de pixels	37
Figura 12 – Imagem com resolução de 6 p.p.m ou d.p.m.	38

Figura 13 – Exemplos de graus de resolução espacial diferentes para uma mesma imagem. Observa-se que sempre haverá perda de qualidade e da resolução de uma imagem digitalizada, quando ampliamos outra imagem já digitalizada, a menos que se aumente a quantidade de pixels na mesma proporção da ampliação	39
Figura 14 – Comparação da linearidade dos detectores IP e filme de raios X quando expostos à radiação beta de ³² P por um período de 18 h	43
Figura 15 – Seqüência de processamento do <i>Image Plate</i> para recuperar a imagem digital na gamagrafia, apagar as informações e a sua reutilização.....	44
Figura 16 – Técnica de exposição parede simples – vista simples	46
Figura 17 - Técnica de exposição parede dupla e vista simples (a) e parede dupla e vista dupla (b)	47
Figura 18 - Arranjo radiográfico na técnica PDVD	47
Figura 19 – Detecção de corrosão pelo aumento na densidade do detector no método PDVS	48
Figura 20 – Princípio da radiografia tangencial	49
Figura 21 – Ilustração da região coberta pela radiografia tangencial e a localização de um defeito isolado cujas dimensões serão superestimadas	50
Figura 22 – Radiografia de um duto de pequeno diâmetro, combinando o método tangencial e o método de parede dupla em um único ensaio radiográfico	51
Figura 23 – Representação da história de um nêutron incidente em uma placa de material fissil	52
Figura 24 – Diagrama da função TIR para uma fonte externa ao objeto.....	55

Figura 25 – Diagrama do comando TIC para uma fonte no interior do objeto	56
Figura 26 - Diagrama do comando PI para uma fonte no interior do objeto	56
Figura 27 – Comparação entre os diferentes métodos de interpolação apresentados	60
Figura 28 – Interface do <i>PROGRAMA MATRIZ</i>	64
Figura 29 - Geometria utilizada para a determinação da penumbra geométrica	68
Figura 30 – Cortes laterais do degrau simulado. Em (a) observa-se os cilindros de 0,1016 cm de altura e em (b) os de 0,0508 cm	70
Figura 31 – Arranjo modelado para obtenção das PSF e suas respectivas PScF e LScF	71
Figura 32 - Arranjo modelado para a análise do processo de soma de imagens	74
Figura 33 – Imagens e perfis do disco de alumínio: a) distância objeto-detector 25 cm, e b) distância objeto-detector 50 cm	75
Figura 34 – Imagem do corpo de prova escalonado para energias de 30, 60 e 90 keV. Em (a), a imagem do corpo de prova e a metodologia utilizada para a obtenção do contraste. Em (b) e (c) a distribuição do contraste para os cilindros de 0,0508 cm e 0,1016cm de altura. O tempo de simulação foi de 15 minutos	76
Figura 35 – Análise das LScF obtidas em diferentes posições no plano imagem para espessuras de material de (a) 0,1 cm, (b) 0,3 cm e (c) 0,5 cm e (d) comparação das respectivas LScF	78

Figura 36 – Distribuição espacial da LScF em função da distância objeto-detector. Em (a) observa-se o comportamento da magnitude da radiação espalhada no detector com o aumento da distância objeto-detector. Em (b) os valores são magnificados para uma melhor visualização dos resultados	79
Figura 37 – Largura a meia altura das LScF em função da distância objeto-detector	80
Figura 38 – Perfis de espalhamento de imagens redimensionadas com diversos métodos de interpolação. (a) Perfil obtido com 250 microns, (b) Frequência acumulada do perfil ilustrado em (a), (c) Perfil obtido com 500 microns, (d) Frequência acumulada do perfil ilustrado em (c), (e) Perfil obtido com 700 microns, (f) Frequência acumulada do perfil ilustrado em (e)	81
Figura 39 – Distribuição do ruído em imagens redimensionadas com diversos métodos de interpolação: (a) distribuição do ruído obtido com imagens de 250 microns, (b) distribuição do ruído obtido com imagens de 500 microns, e (c) distribuição do ruído obtido com imagens de 700 microns	82
Figura 40 - Geometria de irradiação modelada para obtenção da resposta em energia do material sensível BaFBr do detector	85
Figura 41 - Função resposta do material sensível BaFBr. Os valores obtidos foram normalizados pela fluência de fótons emitidos pela fonte	86
Figura 42 – Arranjo experimental utilizado para obtenção das imagens com a placa de alumínio	91
Figura 43 – Razão ruído- sinal em função da dose no detector digital <i>Image Plate</i> Dados obtidos experimentalmente utilizando uma fonte de Irídio-192, uma placa homogênea de alumínio com alto grau de pureza e um sistema de processamento de imagem digital GE CR TOWER.....	92

Figura 44 - Interface do <i>PROGRAMA IMAGEM</i>	93
Figura 45 – Corpo de prova e esquema indicando as dimensões dos defeitos	95
Figura 46 – Representação esquemática do duto com acondicionamento submarino	96
Figura 47 – Irradiador utilizado nas exposições submarinas. Em (a) observa-se a foto do irradiador. Em (b), pode-se ver um corte longitudinal do mesmo, onde estão indicadas as duas posições possíveis da fonte: exposta ou recolhida	97
Figura 48 – Irradiador com colimador de chumbo	97
Figura 49 – Imagens e perfis da região da trinca do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente. (b) Perfil da imagem experimental, (c) Imagem simulada sem a adição de ruído; (d) Perfil da imagem sem ruído; (e) Imagem simulada com ruído e (f) Perfil da imagem simulada com ruído	100
Figura 50 – Imagens da região dos orifícios de 1 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) perfil dos orifícios da imagem obtida experimentalmente, (c) imagem simulada sem a contribuição do ruído, (d) perfil dos orifícios da imagem simulada sem a contribuição do ruído, (e) imagem simulada com a contribuição do ruído, (f) perfil dos orifícios da imagem simulada com a contribuição do ruído	102
Figura 51 – Imagens da região dos orifícios de 2 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) perfil dos orifícios da imagem obtida experimentalmente, (c) imagem simulada sem a contribuição do ruído, (d) perfil dos orifícios da imagem simulada sem a contribuição do ruído, (e) imagem simulada com a contribuição do ruído, (f) perfil dos orifícios da imagem simulada com a contribuição do ruído	103

Figura 52 – Imagens e perfis da região da trinca do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada 104

Figura 53 – Imagens e perfis da região dos orifícios de 1 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada 105

Figura 54 – Imagens e perfis da região dos orifícios de 2 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada 105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos raios X quanto à dureza	30
Tabela 2 – Guia para interpretação do erro relativo R	54
Tabela 3 – Análise estatística da semelhança entre o ruído nas imagens espalhadas obtidas sem e com métodos de interpolação	83
Tabela 4 – Descrição dos equipamentos e fonte de radiação utilizados na obtenção da razão ruído-sinal	90
Tabela 5 - Parâmetros considerados no cálculo da incerteza da dose no detector	91

Capítulo 1

Introdução

Os dutos são o mais importante meio de transporte de líquidos e substâncias gasosas. Desde os tempos dos Romanos, o principal meio de transporte de líquidos era os dutos, isto é, tubulações que serviam para conduzir a água até os palácios dos imperadores [1]. Como um resultado do desenvolvimento econômico, uma grande quantidade de tubulações tem sido utilizada ao redor do mundo. Uma proporção considerável destas tubulações é utilizada para o transporte de água, vapor, e produtos químicos em temperaturas moderadas ou altas. Nas últimas duas décadas, entretanto, ocorreu um grande desenvolvimento na indústria de exploração de petróleo no mar, e os dutos foram amplamente empregados nas construções *offshore* sob a forma de oleodutos, gasodutos e no escoamento de água, exercendo uma grande influência logística e econômica na indústria do petróleo.

1.1 - DUTOS *OFFSHORE*

Os dutos *offshore* são assim denominados pelo fato de que a maior parte da tubulação está submersa no fundo do mar. Estes dutos são geralmente utilizados para o transporte da produção de petróleo de plataformas para refinarias ou tanques de armazenagem situados em terra. Também são utilizados para atravessar baías ou canais de acesso a portos. As tubulações são geralmente de aço, fabricadas em grandes diâmetros e revestidas externamente por materiais densos como asbestos, tecido de nylon ou concreto. Os dutos *offshore* têm que suportar altas pressões externas e internas, resistir a ataques de organismos marinhos e a choques mecânicos devido às correntezas e às ondas [2].

Um dos mais importantes parâmetros a ser monitorado em um duto *offshore* é a *espessura da parede*, uma vez que é esta que determina a profundidade de instalação do duto [2]. A profundidade, pressão externa (que aumenta com a profundidade) e interna e

os requisitos de instalação deste duto devem resultar em tensões compatíveis com o projeto de construção adotado, de forma que o projeto possa ser viável. Caso contrário qualquer erro no cálculo da espessura da parede do duto pode resultar na diminuição da resistência deste as pressões internas e externas, tornando-o inadequado para a profundidade de instalação preestabelecida no projeto, e podendo resultar em vazamentos e explosões provocados por trincas ou rompimento de soldas, causando poluição, paradas na produção e imensas perdas econômicas. Conseqüentemente, a espessura de parede de um duto submarino determina claramente um limite de profundidade para a sua aplicação em termos de máxima pressão que ele pode resistir.

1.2 – CORROSÃO: UM DOS MAIORES PROBLEMAS EM AMBIENTES OFFSHORE

Devido ao rigoroso controle de qualidade empregado na construção dos dutos *offshore*, a degradação de tubulações por processos de corrosão, erosão e fricção torna-se o principal mecanismo de falha em sistemas de tubulações *offshore*. De uma forma geral esta degradação ocorre pela corrosão externa na superfície do duto ou embaixo do revestimento, corrosão interna causada por depósitos acumulados no interior da tubulação, erosão interna proveniente do produto escoado ou pela erosão externa provocada pela fricção com organismos marinhos [3,4].

A corrosão é o principal mecanismo de degradação de tubulações, e é definida como a degradação de um material ou de suas propriedades por causa de sua reação com o ambiente [4,5]. Em metais, esta reação é um processo eletroquímico de oxidação que produz ferrugem ou outros óxidos de metal. Como a corrosão é um processo eletroquímico, esta requer um eletrólito ou um meio condutor de corrente elétrica entre diferentes partes. Em áreas marinhas submersas, a água do mar é o eletrólito; em áreas atmosféricas marinhas (regiões emersas do mar), a água salgada borrifada nas partes emersas da tubulação fornece o eletrólito. A presença de oxigênio acelera extraordinariamente a corrosão, fazendo com que o processo seja mais acelerado em áreas respingadas de tubulações submarinas do que em áreas submersas devido à abundância de oxigênio na atmosfera. Como a maioria das reações químicas espontâneas, a corrosão aumenta com o aumento da temperatura [4,5].

As principais formas de corrosão podem ser classificadas em quatro grupos, que são [5]:

- 1 – Corrosão uniforme originando a diminuição da espessura de uma área extensa da tubulação;
- 2 – Diminuição local da espessura do metal originando pequenos buracos e corrosão originada por depósitos na tubulação;
- 3 – Microporosidades na superfície do metal sem redução significativa da espessura do metal;
- 4 – Corrosão provocada pela oxidação de áreas trincadas em tubulações.

Com a exceção de alguns metais nobres, todos os metais e ligas estão sujeitos a deteriorização causada por corrosão. Mas enquanto a corrosão em si não pode ser totalmente impedida, esta pode ser controlada de forma que problemas não alcancem a severidade como mostra a **Figura 1**:

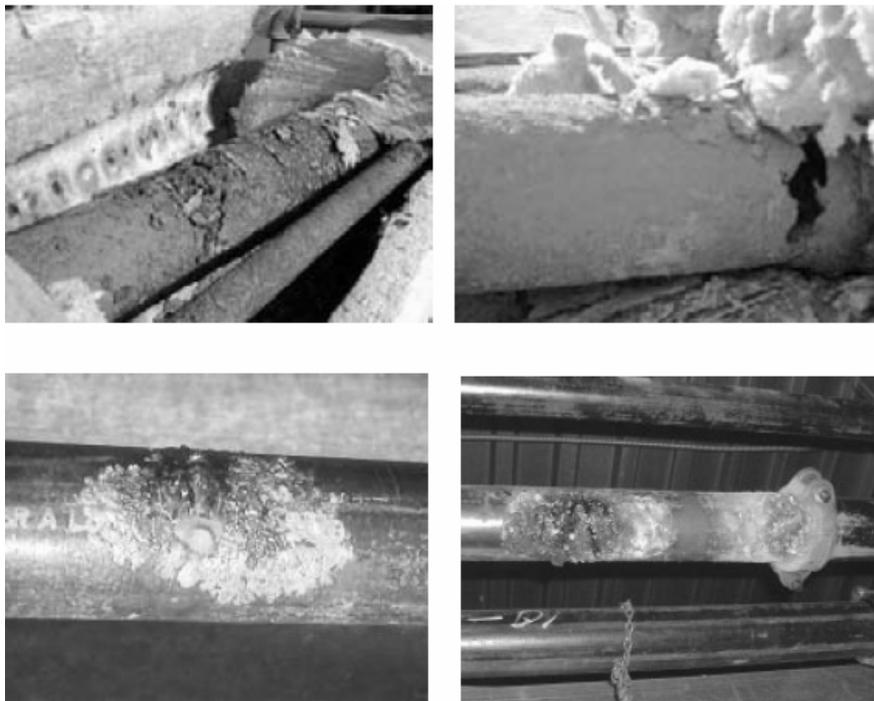


Figura 1 – Exemplos de corrosão em dutos

1.3 - INSPEÇÕES NÃO TIVAS EM ESTRUTURAS *OFFSHORE*

A condição de tubulações *offshore* pode ser monitorada pelo uso apropriado de métodos de inspeção não destrutivos mesmo enquanto a instalação estiver em operação, tornando possível o planejamento de substituição de componentes, reparos e paradas nas operações. As inspeções não destrutivas têm vantagens adicionais. Por exemplo, uma vez que um sistema está no lugar e funcionando bem, é considerada imprudente a remoção de partes da instalação como realizado através de inspeções por métodos destrutivos. Avaliações não destrutivas podem frequentemente ser produzidas em tempos convenientes e não necessariamente necessitar de paradas das operações, sendo de extremo interesse econômico.

1.3.1 – Estado da arte 1

Muitas técnicas de ensaios não destrutivos (END) são utilizadas na indústria convencional, mas somente uns poucos métodos tem sido adaptados para uso *offshore*. Excluindo testes hidrostáticos (destrutivos e nem sempre eficazes), e a inspeção realizada durante a fabricação do duto, a principal técnica de ensaio não destrutivo realizada em tubulações *offshore* é a *inspeção visual*. Esta permite checar possíveis danos na parte externa da tubulação, porém não pode ser utilizada para checar a integridade de partes internas da mesma. Este tipo de inspeção é conduzido por veículos remotamente operados, também conhecidos como ROV, sigla de *Remotely Operated Vehicle*, ou por mergulhadores. Como para qualquer exame visual, esta técnica requer ampla experiência por parte do mergulhador a fim de transmitir com precisão o estado da tubulação, bem como da utilização de equipamentos fotográficos e de filmagem de alta resolução e com acondicionamento submarino [6]. Métodos magnéticos como *correntes parasitas*, *partículas magnéticas*, *potencial eletroquímico* e *pig instrumentado* também tem sido aplicados em inspeções de tubulações *offshore* [7]. Entretanto, estes métodos fornecem informações somente sobre a superfície do duto e sobre defeitos em profundidades próximos a superfície, e necessitam da remoção do revestimento externo do duto, o que é uma operação onerosa e que necessitaria de uma parada das operações. O método de *pig instrumentado* tem sido utilizado externamente sem remoção do revestimento do duto, mas não tem sido popular na prática neste tipo de aplicação [8].

Métodos de ultra-som e radiográficos têm sido aplicados para uma ampla faixa de materiais e oferecem capacidade para detectar defeitos tanto externos como internos em tubulações. Inspeção por ultra-som é um método comumente utilizado para medição de espessuras de paredes em tubulações submarinas e navios [3,4]. Em sua aplicação normal, somente uma pequena porção da superfície é inspecionada, podendo não conter os maiores defeitos. A técnica também é não sensitiva a defeitos como microporosidades na superfície do metal. Métodos de ultra-som tem ainda duas grandes limitações. Primeiro este método necessita a remoção do revestimento externo da tubulação para o ensaio. Esta remoção requer um tempo que é maior do que o tempo do ensaio, e pode necessitar a parada das operações. Segundo, mesmo para uma tubulação não revestida, a influência da condição da superfície é muito forte. Se a superfície corroída é a superfície de contato investigada, medidas da superfície da parede pode variar de 40 a 50% [5]. Mesmo se a corrosão estiver longe da superfície de contato, a acurácia da medida pode não ser satisfatória se a superfície oposta for desigual. Porosidades locais com perfis cônicos interferem na medida, e superfícies de tubulações obscurecidas por organismos marinhos precisam ser limpas.

A inspeção radiográfica permanece como a principal técnica de END utilizada em ocasiões críticas, sendo o método externo de inspeção mais completo até o presente momento. Entre os métodos de END, o método radiográfico tem a vantagem de não necessitar, a priori, a remoção do revestimento externo da tubulação, além do benefício adicional de poder ser realizado em ambientes a altas temperaturas [5,9]. Acredita-se que o método radiográfico tem vantagens no acesso a problemas de degradação de tubulações pelos seguintes motivos:

- Revestimento e pintura não necessitam, a priori, serem removidos para avaliação por radiografia;
- O método radiográfico permite a medida de um dos mais importantes parâmetros em tubulações, ou seja, a espessura de parede restante após ataque por corrosão, mesmo com a instalação em funcionamento;
- A área atacada mostrada na radiografia pode dar algumas indicações da natureza do ataque bem como o grau do ataque;
- A avaliação pode ser feita em partes complexas, como o interior da tubulação que não é acessível e, portanto não pode ser visualmente examinado sem destruir a parte;

- Depósitos e outros materiais associados com problemas de corrosão são freqüentemente mostrados pela radiografia.
- Os exames radiográficos não requerem uma suavização e limpeza da parte externa da superfície inspecionada;
- A radiografia é um registro permanente. Sendo assim as avaliações da imagem radiográfica podem ser feitas em laboratório, e exames periódicos podem estabelecer a taxa de ataque corrosivo.

Em resumo, a maioria dos métodos de END que não sejam o radiográfico sofre um prejuízo se o revestimento tem que ser deixado intacto. Eles também não podem dar um perfil de corrosão em termos de área e profundidade.

Entretanto, seu uso em inspeções *offshore* tem sido restrito devido a problemas como:

- O tempo de exposição pode ser muito longo (20 minutos é comum);
- Necessidade de acesso a ambos os lados do tubo;
- Necessidade de treinamento extensivo por causa dos requerimentos de segurança e manipulação da radiação e/ou material radioativo além dos problemas relacionados ao peso dos equipamentos, e
- Por causa da absorção e espalhamento da radiação na água, o diâmetro máximo de um tubo cheio de líquido que tem sido inspecionado com este método é de cerca de nove polegadas [3,7].

Estudos recentes têm mostrado que a aplicação da radiografia computadorizada com detectores *Image Plate* em radiografia industrial apresentam uma redução no tempo de exposição de aproximadamente 25:1 com relação à utilização de filmes padrão [5,7,10,11,12,13]. Resultados da aplicação deste detector na presença de água têm servido de estímulo para o desenvolvimento de estudos que viabilizem esta aplicação em larga escala [14,15]. Entretanto, embora haja diferentes normas e regulamentos para realização de inspeções radiográficas fora do ambiente *offshore* [16,17,18,19,20], e mais recentemente a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) tenha financiado um TECDOC intitulado “*Development of Protocols for Corrosion and Deposits Evaluation in Pipes by Radiography*” – IAEA-TECDOC-1445, onde diferentes laboratórios ao redor do mundo analisaram o impacto da aplicação de diferentes técnicas e

radioisótopos na qualidade da imagem radiográfica em exames para a avaliação de depósitos e detecção de corrosão em tubulações de diferentes diâmetros [5], não se observa na literatura estudos que estabeleçam procedimentos que visem melhorar a qualidade de ensaios radiográficos em ambientes *offshore*, principalmente com relação a aplicação de diferentes técnicas radiográficas e utilização de diferentes radioisótopos. Esta ausência de estudos pode ser explicada principalmente pelo fato de qualquer investigação *offshore* ser onerosa e difícil de ser executada devido a aspectos como necessidade de utilização de navios especiais de mergulho, contratação de mergulhadores especializados além de autorização para realização de estudos em plantas petrolíferas, que na maioria das vezes não são concedidas.

1.4 – A MODELAGEM COMPUTACIONAL COMO UMA FERRAMENTA DE AUXÍLIO AOS MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A modelagem computacional pode ser utilizada com sucesso em diferentes aplicações na área de indústria, sendo uma alternativa em situações onde avaliações experimentais são consideradas inviáveis ou impossíveis.

Simulações do processo radiográfico são úteis por um grande número de razões, dentre as quais vale a pena ressaltar:

- 1 – Uma simulação acurada permite uma comparação entre resultados modelados e experimentais;
- 2 – Simulações podem auxiliar o usuário a entender o efeito de parâmetros radiográficos como posição e tamanho da fonte, energia, orientação e posição do defeito, espessura dos componentes, tipo de detectores, etc na qualidade da imagem final;
- 3 – Simulações podem auxiliar o usuário a corrigir efeitos não ideais observados em imagens radiográficas, servindo como uma ajuda valiosa para o planejamento de experimentos de modo que o sistema como um todo seja otimizado, representando um ganho significativo em termos de tempo, dinheiro e flexibilidade.

A última década tem testemunhado a proliferação de vários códigos de simulação radiográfica. A maioria destes códigos enfatiza uma boa representação geométrica do objeto em teste. A formação da imagem simulada é outro ponto enfatizado por estes códigos. A maior parte deles utiliza diferentes meios para gerar o feixe primário de

radiação, reproduzir a interação da radiação com o objeto de interesse e reconstruir a imagem simulada. A formação da imagem final é baseada em diferentes aproximações que vão da utilização de correlações semiempíricas a simulações de detectores ideais, incluindo tratamentos especiais para a radiação espalhada. Outra característica popular entre os códigos de simulação de imagens radiográficas existentes é a utilização de interfaces amigáveis para o usuário, permitindo que qualquer usuário consiga produzir simulações radiográficas.

1.4.1 – Estado da arte 2

Um dos mais antigos códigos de simulação radiográfica existente na literatura é o XRSIM (*X-Ray SIMulator*) [21], oriundo de um projeto financiado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) nos EUA. Com a finalidade de simular ensaios radiográficos com raios X, XRSIM permite que o usuário configure muitos parâmetros como posição e orientação do objeto, seleção de parâmetros relacionados ao tubo de raios X e filme. XRSIM possui um banco de dados interno que reproduz o espectro de energia de raios X de diferentes equipamentos, com a geração do feixe de radiação e interação da radiação com a matéria baseada em métodos determinísticos. Múltiplos arquivos em formato CAD (*Computed Aided Design*) podem ser utilizados para modelagem do objeto radiografado, com diferentes bibliotecas de coeficientes de atenuação. Imagens podem ser formadas por diferentes filmes radiográficos e intensificadores de imagens, com introdução de defeitos irregulares no objeto em teste. As imagens são visualizadas em uma interface gráfica constante no código [22]. Embora as primeiras versões não quantificassem o efeito do espalhamento nas imagens, as versões atuais aplicam fatores de build-up para introdução de efeitos de espalhamento.

O laboratório BAM (*Bundesanstalt Für Materialforschung und Prüfung*), na Alemanha, também tem um grupo envolvido com o desenvolvimento de um código de simulação radiográfica [23,24,25]. Este código também vem com uma interface que permite a entrada de vários parâmetros e também modela a geração do feixe de radiação e sua interação com a matéria através de métodos determinísticos. Embora os primeiros esforços foram baseados na representação em voxels dos objetos, as versões mais recentes podem processar arquivos em formato CAD. O código pode fornecer imagens simuladas de objetos de formas irregulares, com inclusão de defeitos irregulares. O

ruído na imagem é modelado através de uma distribuição de ruído de forma Gaussiana. O espalhamento não é modelado neste código [25].

O grupo CNDRI (*Contrôle Non Destructif par Rayonnements Ionisants*), França, também tem trabalhado no desenvolvimento de ferramentas de simulação radiográfica [26,27]. Da mesma forma que o NIST e BAM, CNDRI também utiliza métodos determinísticos para modelar a fluência de fótons incidente no detector. Espalhamento não é modelado por este código. O detector é linear, pode ser orientado de forma arbitrária, e absorve todos os fótons que vão em sua direção. O espectro da fonte é fornecido por um banco de dados oriundo de medidas experimentais, e as interações são modeladas como uma função da energia. Este código pode processar arquivos simples no formato CAD para representação de geometrias. Em adição, este código possui comandos para orientar o objeto de teste para obtenção de dados para reconstrução tomográfica.

RADICAD foi desenvolvido por um consórcio entre *British Aerospace* e *LETI-CEA-Technologies* na França [28]. A proposta deste trabalho foi formar imagens simuladas que pudessem ser utilizadas para subtração de imagens, com a finalidade de melhorar a visualização de defeitos em imagens reais. Como os códigos mencionados anteriormente, este simulador também se baseia em métodos determinísticos, e o fenômeno do espalhamento não é modelado pelo mesmo. Esforços têm sido feitos para desenvolvimento de uma rotina de cálculo de espalhamento incoerente. O processo de formação da imagem é baseado em um sistema de tempo real usando telas cintiladoras. Este código também é capaz de processar arquivos no formato CAD para representação de geometrias. Outra versão de RADICAD é SINDBAD [29]. SINDBAD utiliza correlações semiempíricas para modelar o espectro de energia primário de fótons. Não há indicação de qualquer cálculo de fluxo de fótons espalhados. Como em RADICAD, a formação da imagem é baseada em telas cintiladoras e na dose nas telas. O programa usa coeficientes de absorção em energia para cálculo de dose. O objeto em teste pode ser posicionado e orientado com seis graus de liberdade na simulação. Recentes melhoramentos incorporaram a modelagem de fontes panorâmicas e detectores curvos. ENEA (*Ente per Le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente*) [30] também tem desenvolvido um código para simulações de imagens radiográficas, também com a finalidade de subtração de imagens para realce de visualização de defeitos. As fontes de radiação são consideradas pontuais, e o transporte da radiação é modelado por métodos determinísticos, sem considerar o espalhamento.

Outro simulador é HADES, que foi desenvolvido no *Lawrence Livermore National Laboratory* [31]. Neste código, o objeto de teste é formado através de operações booleanas usando objetos primitivos como placas, esferas, cones e cilindros. Somente o fluxo primário é calculado, e a contribuição do espalhamento tem que ser calculada externamente. HADES utiliza a biblioteca de seção de choques LENDL. Além de fótons, HADES também simula radiografia com prótons.

Com a finalidade de simular radiografias com radioisótopos (gamagrafia), o instituto EDF (*Électricité de France*) da França produziu o código de simulação radiográfica MODERATO [32]. Este simulador usa o método de Monte Carlo para determinar as interações dos fótons com o objeto. Todos os processos de interação da radiação com a matéria, com exceção de formação de pares, são modelados. Formação de pares não é considerada devido a sua baixa incidência para as faixas de energias utilizadas em ensaios radiográficos. A interação dos fótons com o detector é modelada incluindo o efeito do impacto da radiação na parte frontal e traseira do detector na formação da imagem. O maior problema de MODERATO é o elevado tempo computacional consumido durante as simulações.

Z. W. Bell também desenvolveu um código baseado em métodos de Monte Carlo para simular o processo radiográfico [33]. Diferentemente de moderato, esta versão só modela o processo de atenuação. A fonte é modelada como uma coleção de fontes pontuais.

Observa-se que a maioria dos códigos de modelagem radiográfica avaliados na literatura se limita a modelar a absorção fotoelétrica dos fótons, e atenuar o feixe primário somente através da absorção fotoelétrica. Embora muitos destes códigos apliquem fatores de correção para espalhamento, tais fatores falham ao predizer a distribuição não homogênea da radiação espalhada na imagem final. Com relação aos códigos que utilizam o método de Monte Carlo, estes têm se mostrado extremamente lentos, principalmente na modelagem do efeito do espalhamento. Também não se observa na literatura nenhuma aplicação dos códigos acima citados para fins de radiografia submarina.

Outro problema com relação aos códigos acima citados é que são caros, e específicos para simulação de ensaios radiográficos, inviabilizando sua utilização no estudo de outras aplicações das radiações ionizantes. Este aspecto é muito importante principalmente em países onde o financiamento a pesquisa é precário, tornando a utilização de códigos computacionais hábeis a estudar as diferentes aplicações das

radiações tanto na área industrial como nas áreas médicas e de meio ambiente uma alternativa para o desenvolvimento da pesquisa na área nuclear. Para estes países, a principal alternativa para o desenvolvimento de pesquisa na área de aplicação de técnicas nucleares tem sido os códigos de propósitos gerais.

Códigos de Propósitos Gerais

Código de propósito geral é o nome dado aos códigos destinados ao estudo das diferentes aplicações das radiações ionizantes, que vão desde a área médica a aplicações na indústria, meio-ambiente e tecnologia de reatores nucleares. Devido a natureza estocástica da emissão da radiação, e por conseguir reproduzir praticamente todos os processos de interação da radiação com a matéria, o método de Monte Carlo tem servido como base para construção de diferentes códigos. Entre todos os códigos que utilizam o método de Monte Carlo, pode se destacar três códigos de propósitos gerais avaliados no domínio público, amplamente validados e utilizados ao redor do mundo: EGS4, PENELOPE, GEANT e MCNP.

EGS4

Originalmente desenvolvido pelo *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) em 1985, o código EGS4 – *Electron Gamma Shower Version 4* é um código de propósito geral para o transporte acoplado de fótons e elétrons em uma geometria arbitrária, com energias que vão de poucos keV a energias acima de teV [34]. O EGS4 é um código de macros e sub-rotinas, onde o usuário escreve um arquivo de aplicação em FORTRAN ou MORTRAN (*macro-enhanced FORTRAN*), que será lido pelos macros e sub-rotinas de EGS4. O código é bem conhecido pelo transporte detalhado de elétrons e fótons, e pela flexibilidade na definição do termo fonte em termos de distribuição de energia, tempo, posição e direção. Embora seja considerado o estado da arte no transporte de fótons e elétrons, o código EGS4 requer do usuário um conhecimento avançado de simulação em FORTRAN ou MORTRAN, e não possui uma função específica para simulação de imagens radiográficas. Aplicações deste código para fins de simulação de imagens radiográficas têm exigido um elevado tempo computacional para a obtenção de resultados com flutuações estatísticas adequadas, e não se observam na literatura

trabalhos que enfatizem a aplicação deste código para fins de radiografia em ambientes *offshore*.

PENELOPE

O código PENELOPE, um acrônimo para “*PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons*”, foi desenvolvido por F. Salvat, J. M. Fernandez-Varea e J. Sempau na *Facultat de Física (ECM), Universitat de Barcelona*, Espanha, e é distribuído pela *Nuclear Energy Agency Databank*, um órgão pertencente à *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)*, sediada em Paris, França [35]. Originalmente desenvolvido para a modelagem do transporte de elétrons na matéria (o transporte de fótons foi inserido em versões posteriores), este código simula o transporte acoplado de elétrons e fótons em materiais arbitrários, que podem ser elementos com número atômico $Z \leq 92$ ou compostos químicos, e sua aplicabilidade ampla permite simulações na faixa de energias de 1 keV a 1 GeV. A geometria pode ser definida diretamente no programa principal ou com auxílio de um pacote geométrico chamado PEUGEOM [35]. As geometrias consistem de corpos homogêneos limitados por superfícies quádricas, isto é, planos, esferas, cilindros, etc. Sua utilização tem sido grande em simulações envolvendo altas energias, sobretudo aquelas envolvendo procedimentos de radioterapia, mas pouco se encontra na literatura referente à sua utilização em situações envolvendo baixas energias, na faixa comumente empregada em diagnósticos médicos. Semelhante ao código EGS4, o código PENELOPE não possui uma função específica para a modelagem de ensaios radiográficos, e não se observam na literatura trabalhos que enfatizem a aplicação deste código para fins de radiografia em ambientes *offshore*.

GEANT

O código GEANT foi originalmente desenvolvido para experimentos na área de física de altas energias, mas tem encontrado aplicações fora deste domínio nas áreas médica, ciências biológicas, proteção radiológica e astronáutica [36]. A aplicação principal de GEANT é o transporte de partículas através de um arranjo experimental para a simulação da resposta de detectores, permitindo a representação gráfica do arranjo e da trajetória da partícula. GEANT é escrito na linguagem C⁺⁺, e o usuário pode definir virtualmente qualquer característica do modelo simulado. Algumas destas

características incluem geometria, composição dos materiais, e um grande banco de dados de partículas e de numerosos processos que podem ocorrer com cada partícula. Semelhantemente ao EGS4, o código GEANT requer grande conhecimento da linguagem C++ por parte do usuário, e não possui uma função específica para simulação de imagens.

MCNP

O código MCNP – Monte Carlo N-Particle [37] foi originalmente desenvolvido no *Los Alamos National Laboratory* (LANL) durante o Projeto Manhattan, nos anos 40, e pode ser utilizado para o transporte individual de nêutrons, fótons e elétrons ou no transporte acoplado de nêutrons, fótons e elétrons, incluindo a capacidade de calcular constantes de multiplicação para sistemas críticos. Nêutrons são simulados com energias entre 10^{-11} a 100 MeV, fótons com energia entre 1 keV a 100 GeV e energias de elétrons entre 1 keV a 1 GeV. O código trata uma configuração tri-dimensional arbitrária de materiais em células limitadas por superfícies de primeiro e segundo grau e toróides elípticos de quarto grau, além de possuir a capacidade de segmentar a geometria de irradiação em estruturas de voxels. Embora muito versátil e de interface amigável para o usuário, as primeiras versões do MCNP não são tão eficientes quanto o EGS4 no transporte de partículas em problemas com geometrias formadas por um grande número de células como, por exemplo, fantasmas em voxels, e no transporte de fótons de alta energia, e aplicações primitivas deste código em modelagem de ensaios radiográficos se mostraram extremamente lentas, demorando 19 dias para fornecer resultados com flutuações estatísticas dentro dos padrões aceitáveis pelo código MCNP [38]. Entretanto, avanços obtidos nas versões mais novas deste código, MCNP5 e principalmente MCNPX, como comandos específicos para simulação de ensaios radiográficos têm feito do MCNP uma ferramenta em potencial para o estudo de parâmetros que possam influenciar a qualidade de ensaios radiográficos. O código MCNP será o código utilizado neste trabalho, e a análise do comando para a modelagem de imagens radiográficas e aplicação deste para fins de inspeções não destrutivas um dos objetivos deste trabalho.

As seções a seguir descrevem com mais detalhes o código MCNP e suas versões mais atuais, e o comando para a modelagem de imagens radiográficas.

1.4.2 – O código MCNP

O código MCNP, como visto anteriormente, foi originalmente desenvolvido no Los Alamos National Laboratory (LANL), durante o Projeto Manhattan nos anos 40. O uso de MCNP é muito conveniente, pois:

1 – Não é necessário alterar o código fonte. Todas as distribuições de fonte, distribuições para energia, tempo, posição e direção, assim como superfícies ou células de onde as radiações são emitidas podem ser definidas em um arquivo de entrada, não requerendo do usuário conhecimento de linguagens de programação como FORTRAN, MORTRAN, C⁺⁺, etc.

2 – MCNP possui ferramentas muito poderosas para definir geometrias.

3 – O usuário pode modificar a forma como as histórias são analisadas utilizando uma variedade de comandos assim como corrente de partículas, fluxo de partículas e deposição de energia.

4 - O usuário pode obter no arquivo de saída um sumário do problema. Isto pode auxiliar a compreensão da física do transporte de Monte Carlo e a localização de erros.

5- MCNP possui resultados normalizados e incertezas estatísticas relativas.

As três maiores versões de MCNP em uso hoje são: MCNP4C, MCNP5 e MCNPX.

O código MCNP4C é a base dos códigos MCNP5 e MCNPX. MCNP4C é um programa inicialmente utilizado para simular nêutrons, fótons e elétrons no intervalo de energia entre 10^{-11} MeV a 100 MeV para nêutrons, 1 keV a 100 GeV para fótons e 1 keV a 1 GeV para elétrons [39]. O MCNP4C pode ser utilizado para diferentes modos de transporte: nêutrons somente, fótons somente, elétrons somente, transporte combinado de nêutrons e fótons, onde os fótons são produzidos pelas interações dos nêutrons, nêutron/fóton/elétron, fóton/elétron ou elétron/fóton. Para nêutrons, todas as reações dadas em uma seção de choque particular são quantificadas. Nêutrons térmicos são descritos por ambos os modelos do gás livre e modelo $S(\alpha,\beta)$. O modelo de tratamento de nêutrons térmicos $S(\alpha,\beta)$ é uma representação completa do espalhamento de

nêutrons térmicos por moléculas e sólidos cristalinos. Para fótons, o código considera espalhamento coerente e incoerente, a possibilidade de ocorrer fluorescência após absorção fotoelétrica, absorção em produção de pares com emissão local de radiação de aniquilação e bremsstrahlung (radiação de freamento). O transporte de elétrons inclui pósitrons, raios X de captura K e bremsstrahlung, mas não inclui campos externos ou auto induzidos. Outras características importantes que faz o MCNP4C muito versátil e fácil para uso incluem poderosos comandos para geração do termo fonte, fontes para cálculo de criticalidade, fontes superficiais e fontes inseridas em células volumétricas, recursos para visualização da geometria de irradiação e arquivos de saída, uma rica coleção de técnicas de redução de variância, uma extensiva coleção de bibliotecas de seção de choque e uma estrutura flexível para cálculo das grandezas de interesse. Embora muito versátil, o MCNP4C é limitado para modelar problemas com geometrias que contenham um grande número de células [40].

O código MCNP5 é uma versão reescrita do MCNP4C [41]. Este inclui aperfeiçoamentos na física de transporte de fótons, adição de novas técnicas de redução de variância, novas opções de termos fonte e aperfeiçoamento no suporte para utilização do código em paralelo, porém considera as principais características da versão MCNP4C. Embora o MCNP5 possua um comando específico para simulação de imagens radiográficas – os comandos FIR, TIR e FIP, este código também apresenta limitações na modelagem de problemas que contenham geometrias com um grande número de células.

O código MCNPX [42] é uma combinação do código MCNP4C com o código de transporte e interação de nucleons, pions, muons, íons leves e anti-nucleons em geometrias complexas LAHET (*Los Alamos High-Energy Transport*) [43]. O MCNPX contém todas as capacidades do MCNP4C e do MCNP5, adicionando-se a capacidade de transportar 34 novos tipos de partículas (prótons, íons leves, etc), expansão da faixa de energia das partículas simuladas e características que muitas comunidades científicas, especialmente as comunidades de física médica e de aceleradores, julgaram ser importantes em códigos de modelagem computacional. No MCNPX, novos modelos físicos de simulação, técnicas de redução de variância e novas técnicas de análise de dados foram implementadas, além de atualizações das bibliotecas de seção de choque, o que o torna superior a todas as distribuições de MCNP existente, inclusive no aspecto tempo de simulação [42].

Considerando a superioridade do MCNPX, todas as modelagens deste trabalho foram desenvolvidas utilizando esta versão do código MCNP.

1.5 - SIMULAÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS COM O CÓDIGO MCNPX

1.5.1 – A função radiografia – *The Radiography Tally*

O código MCNPX utiliza um conjunto de detectores pontuais próximos um do outro o bastante para gerar uma imagem baseada na fluência de partículas que atravessa cada detector.

Há três tipos de comandos para gerar imagens com MCNPX:

TIR – Projecção de uma imagem transmitida em uma superfície planar (detector plano).

TIC – Projecção de uma imagem transmitida em uma superfície cilíndrica (detector curvo).

PI – Projecção de uma imagem por um pinhole.

Uma vez acionada a função imagem, MCNPX cria uma matriz bidimensional virtual de pixels perpendicular ao eixo central do feixe de partículas, a uma distância selecionada do objeto de teste, onde milhões de detectores pontuais podem ser criados – um detector para cada pixel. Estes pixels funcionam como células onde as partículas serão contadas ou suas energias registradas. Um pixel individual desta matriz representa um pixel da imagem simulada. A matriz de pixels não deve estar em um material espalhador, pois a contribuição do espalhamento entre pixels vizinhos não é considerada pelo MCNPX para fins de simulação de imagens [41,42].

1.5.2 - Imagem Aérea

Os dados obtidos são a distribuição aérea dos fótons que não interagiram e dos fótons espalhados que emergem do objeto de teste simulado, mapeada em duas dimensões, representando uma imagem virtual do objeto analisado. Estes dados podem ser

reconstruídos e visualizados em softwares de reconstrução de imagens em escalas de cinza ou cores, onde os tons são dados pelo número de partículas que atravessam um píxel particular da matriz ou pelos valores de energia depositados nestes píxels, formando imagens pseudodigitais. A resolução da imagem depende do tamanho do píxel e da dimensão da matriz imagem. Quanto menor o tamanho do píxel maior será a resolução da imagem.

1.5.3 - Vantagens da função radiografia do código MCNPX:

A matriz virtual de píxels funciona como um detector ideal, isto é, possui eficiência de 100%, extraindo todas informações do feixe incidente.

Simulações de imagens radiográficas com o MCNPX podem prever diferenças significantes em contraste e visualização de detalhes que sistemas particulares de radiologia diagnóstica poderia potencialmente observar se o sistema de detecção de imagens fosse hábil a funcionar como um detector ideal. Com esta habilidade, simulações podem ser realizadas para determinar métodos mais precisos para o melhoramento de imagens e para a otimização de sistemas de imageamento através de investigações *qualitativas* e *quantitativas* de fatores que afetam a imagem radiográfica.

Capacidade de reproduzir detectores curvos

Um dos principais problemas encontrados na simulação de aplicações industriais da radiografia é a reprodução de cenários onde o detector precisa envolver o objeto de teste, como um filme envolvendo um duto de aço, por exemplo. Boa parte dos programas de simulação de ensaios radiográficos existentes modela somente detectores planos, sendo incapazes de reproduzir tais situações. Com o comando TIC, o MCNPX modela detectores com configurações curvas, tornando possível estudar parâmetros que possam otimizar a técnica radiográfica neste tipo de cenário, e se apresenta como uma ferramenta em potencial para estudar a aplicação de detectores digitais em cenários onde estes poderiam envolver o objeto de teste em questão.

Possibilidade de simulação de radiografias completas ou de simulação individual da componente direta (radiação transmitida) e espalhada da imagem.

Uma imagem radiográfica é formada por ambos os fótons que não colidiram com o objeto de teste e os fótons espalhados.

Somente os fótons que não colidiram com o objeto contribuem para a parte explorável da radiografia, mostrando com precisão as estruturas das partes examinadas. Por outro lado, a radiação espalhada gerada dentro do objeto pode provocar efeitos danosos significantes, prejudicando a qualidade de imagem [44,45]. A radiação espalhada acrescenta uma componente contínua importante para o feixe que incide no detector, com uma contribuição que pode exceder o fluxo de fótons que não interagiram com o objeto de teste. Dependendo do arranjo radiográfico e da parte examinada, a componente da radiação espalhada pode ainda apresentar baixas frequências que perturbam a radiografia. Além disso, a radiação espalhada também pode reduzir o contraste relativo que dá a indicação da falha. A função radiografia do código MCNPX possui a habilidade de gerar, em separado, ambas as contribuições direta e espalhada da imagem, em adição a imagem completa, permitindo que a radiação espalhada seja calculada na simulação e digitalmente removida da imagem experimental para se obter uma imagem precisa do objeto em questão, e auxiliar em procedimentos de restauração para correção de efeitos de espalhamento.

Embora a função radiografia do MCNPX possua características importantes que tornam esta função uma ferramenta atraente para o estudo de parâmetros que possam influenciar a geração e a qualidade de imagens obtidas em ensaios radiográficos, há alguns pontos que devem ser considerados antes da aplicação da função radiografia do código MCNPX:

1 – Processamento dos dados obtidos

Embora o código MCNPX possua uma interface amigável com o usuário, diferentes passos devem ser tomados para o tratamento dos dados obtidos e formação da imagem simulada final, devido a grande quantidade de informações contidas no output do MCNPX que não contribuem para a reconstrução da imagem, requerendo elevado conhecimento de programas de tratamento de dados e reconstrução de imagens por parte do usuário.

2 – Detecção da radiação espalhada

A função radiografia é um conjunto de detectores pontuais (comando F5) localizados no centro de píxels formados pela combinação dos comandos de segmentação de planos FSn e Cn. Como pode ser observado em [39,41], detectores pontuais são muito suscetíveis a resultados não realísticos se utilizados imprópriamente. Devido a presença de um fator $1/R^2$ na equação que estima a fluência de partículas que atravessa um detector em particular, onde R é a distância entre a localização de um evento (emissão de uma partícula da fonte ou posição onde houve espalhamento) e o detector pontual, pode ocorrer uma singularidade que faz com que a variância da componente espalhada possa alcançar teoricamente infinito se a colisão acontecer próximo ao detector, e como consequência, uma falsa convergência nos resultados da componente da radiação espalhada na imagem poderá ser observada. Visando evitar a ocorrência de espalhamento próximo aos detectores pontuais, a matriz de píxels não deve estar em um material espalhador, de forma que a contribuição do espalhamento entre píxels vizinhos não seja considerada [41,42]. Porém, análises da componente espalhada de imagens de objetos localizados muito próximos a matriz de píxels utilizando a função radiografia do MCNPX não são observadas na literatura, de forma que não se pode concluir se há ou não confiabilidade na componente espalhada de imagens obtidas com o detector muito próximo (“colado”) ao objeto de teste.

3 – Tempo computacional

Durante a simulação, o percurso de um fóton através de um material é selecionado estocasticamente pelo método de Monte Carlo. Em cada interação do fóton há uma pequena chance deste espalhar em direção a um dado píxel do detector, sobreviver através do material e incidir neste mesmo píxel. Conseqüentemente, um número maior de partículas é necessário para reduzir a incerteza estatística inerente ao método de Monte Carlo na simulação do processo de espalhamento. Por exemplo, para uma imagem de 10 cm por 10 cm com píxels de 100 μm (uma matriz de 1000 x 1000 detectores) utilizando 10^7 histórias, o número de fótons que atingem um píxel será em média $10 \pm \sqrt{10}$. Este valor, por associar um grande erro ($\sqrt{10}$), pode mascarar a magnitude real da radiação espalhada que emerge do objeto em teste. Para reduzi-lo a

1%, um total de 10^{10} histórias seria necessário [38]. Este aumento do número de história, entretanto, acarreta em um maior tempo requerido para a simulação, que cresce a medida que o número de pixels da imagem aumenta. Sendo assim, o fenômeno do espalhamento pode tornar-se um problema para a simulação de imagens em um tempo razoável.

A solução usualmente utilizada é calcular separadamente as componentes direta e espalhada da imagem, onde a imagem espalhada, que não mostra estruturas de pequena escala na imagem final e contribui somente para a visualização de detalhes de baixa frequência na mesma é modelada utilizando pixels de dimensões muito maiores que o dá imagem original, com redução do número de pixels do detector e principalmente redução no tempo de simulação. Os dados obtidos são interpolados e a imagem da componente espalhada é reamostrada (redimensionada) para a dimensão da imagem formada pelos fótons que não foram espalhados, para posterior combinação de ambas as imagens para formar a imagem final [46].

Há três principais métodos de interpolação utilizados no redimensionamento de pixels para a produção de uma nova imagem a partir da imagem original: método de interpolação do vizinho mais próximo, método de interpolação bilinear e método de interpolação bicúbico [47]. Estes métodos tomam amostras da imagem original e seus correspondentes valores de intensidade como entrada e calculam os elementos da nova imagem, através de metodologias diferentes. Entretanto, a análise de imagens de espalhamento simuladas com a função radiografia do código MCNPX e redimensionadas, bem como a análise de qual o melhor método a ser utilizado com a função radiografia do MCNPX ainda é um problema a ser estudado.

4 – Comparação com imagens obtidas em detectores digitais

Embora a modelagem de detectores ideais com a função radiografia do MCNPX permita uma maior extração de informações do feixe de radiação que emerge do objeto de teste, as limitações em resolução e contraste de detectores reais tornam as imagens modeladas difíceis de serem comparadas com imagens experimentais, e conseqüentemente características de detectores reais precisam ser inseridas nos detectores simulados, de forma que estes possam ser comparados a detectores reais para fins de comparação das imagens em aplicações práticas.

1.6 – OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a modelagem de ensaios radiográficos com a radiografia computadorizada (termo fonte, detector e objeto inspecionado), utilizando a Função Radiografia do código de Monte Carlo MCNPX (*the Radiographic tally*), visando aplicações industriais em ambientes *offshore*. Para alcançá-lo, estabeleceram-se as seguintes metas:

- A primeira consiste no desenvolvimento de uma metodologia para geração, pós-processamento e reconstrução de dados obtidos em simulações de ensaios radiográficos com a função radiografia do código MCNPX.
- A segunda meta consiste da introdução de características de detectores digitais em detectores modelados com a função radiografia.
- A terceira consiste da utilização da função radiografia do código MCNPX, devidamente analisada, e da metodologia desenvolvida para geração de imagens digitais na avaliação de casos de corrosão e trincas em dutos emersos e submersos com radiografia computadorizada. Aspectos como termo fonte, geometria de exposição e detector serão abordados. Os resultados obtidos servirão de base para o desenvolvimento de estudos futuros que visem o desenvolvimento de um protocolo para inspeção em ambientes *offshore* com radiografia computadorizada.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 – INTRODUÇÃO A RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

A radiografia industrial é um dos mais antigos métodos de Ensaio Não Destrutivo (END) [48], e se baseia na absorção diferenciada da radiação ionizante pela matéria para obter uma visão interna do objeto inspecionado, sem a necessidade de destruição do mesmo. Os raios X ou gama são projetados em direção a um objeto em análise, e a intensidade da radiação transmitida através do objeto é registrada por um sistema de aquisição de imagens, como mostra a **Figura 2**:

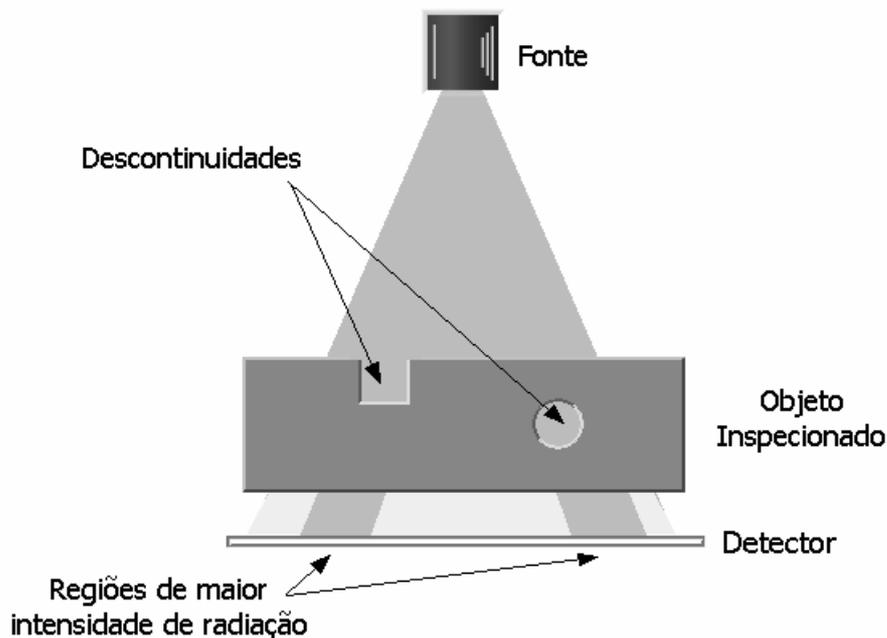


Figura 2 – Arranjo típico de um ensaio radiográfico

Ao registro das diferentes quantidades de radiação que emergem de um corpo irradiado chamamos de *Imagem radiográfica* [49,50]. Sendo assim, a radiografia industrial é uma técnica de END utilizada para detectar a variação de uma região de um determinado

material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha.

2.1.1 – Princípios e fundamentos da radiografia industrial

Um feixe de raios X ou gama, ao interagir com qualquer material, sofre variação em sua intensidade, motivada por uma série de fenômenos físicos que ocorrem simultaneamente, cada qual com sua própria probabilidade. Os principais fenômenos de interação da radiação com a matéria na radiografia industrial são o *Efeito fotoelétrico*, o *Efeito Compton* e a *Produção de pares* [51,52]. A **Figura 3** mostra a variação da probabilidade de ocorrência dos efeitos Fotoelétrico, Compton e Produção de pares com o número atômico do material absorvedor para diferentes valores de energia. As interações fotoelétricas predominam para todos os materiais em energias de fótons suficientemente baixas, mas à medida que a energia cresce, o efeito fotoelétrico diminui mais rapidamente que o efeito Compton, e acaba se tornando o efeito predominante. Continuando a aumentar a energia do fóton, ainda que o efeito Compton decresça em termos absolutos, continua aumentando em relação ao efeito fotoelétrico. Acima da energia de alguns MeV para o fóton, a produção de pares passa a ser a principal contribuição para as interações de fótons.

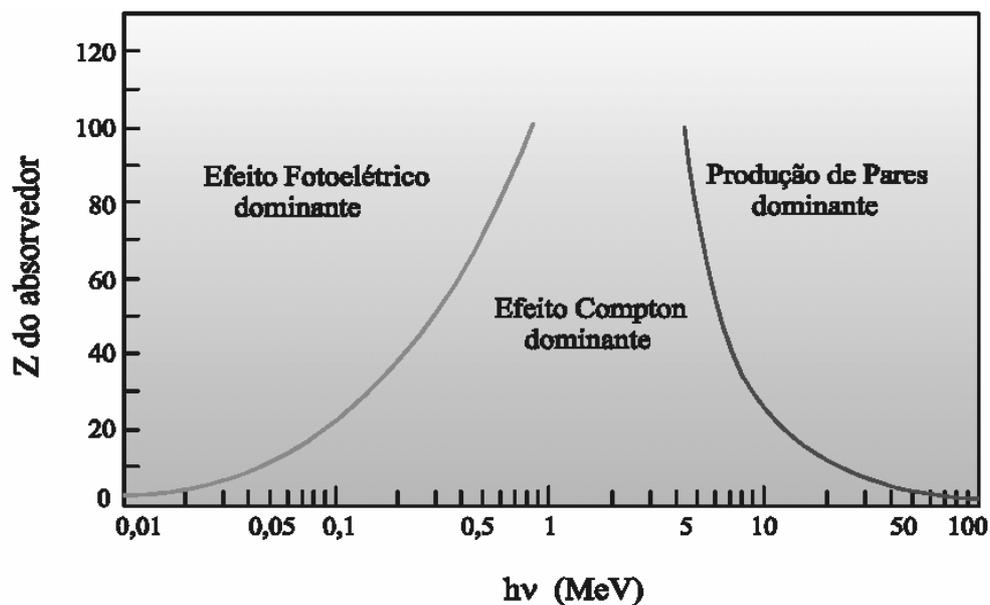


Figura 3 – Probabilidade de ocorrência dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares

Quando se considera uma fonte emissora, a intensidade da radiação que atravessa um objeto decrescerá exponencialmente com a espessura x do mesmo, de acordo com a equação:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}, \quad (1)$$

onde I_0 é a intensidade da fonte de radiação, I é a intensidade da radiação após atravessar o material de espessura x , e μ é o coeficiente total de absorção do material. μ é definido como a soma dos coeficientes representados pelos processos de absorção da radiação pela matéria: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares, μ_f , μ_c e μ_p , indicando, respectivamente, a probabilidade de ocorrência dos fenômenos mencionados. Dessa forma, diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material terão como consequência uma variação na intensidade do feixe transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação.

Seja uma parte de um dado material, no qual exista uma falha ou uma descontinuidade, como ilustra a **Figura 4**.

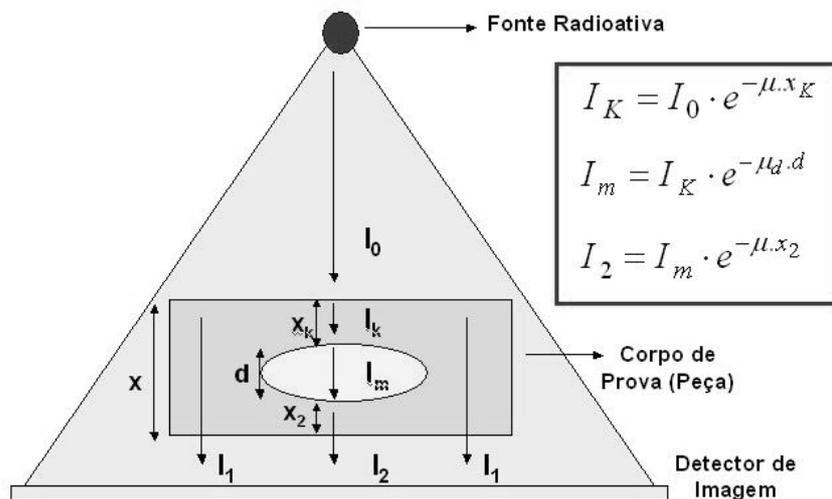


Figura 4 – O processo radiográfico

Essa falha será facilmente percebida pela comparação entre a absorção da radiação naquela região e as regiões próximas, que serão compostas do mesmo material ou de material de mesma densidade ou, ainda, de densidade muito próxima. No local onde não

houver descontinuidade (falha na estrutura), a intensidade da radiação através da mesma obedece a **Equação 1**. Como é suposta a existência de uma descontinuidade com dimensão d , a intensidade de radiação através das diferentes camadas do objeto, na região de descontinuidade (falha), será:

$$I_K = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_K}, \quad (2)$$

$$I_m = I_K \cdot e^{-\mu_d \cdot d}, \quad (3)$$

$$I_2 = I_m \cdot e^{-\mu \cdot x_2}, \quad (4)$$

onde μ_d é o coeficiente de absorção do material de que a falha é composta.

A probabilidade total será o produto das probabilidades parciais, e assim:

$$\begin{aligned} I_2 &= I_m \cdot e^{-\mu \cdot x_2}, \\ &= I_K \cdot e^{-\mu_d \cdot d} \cdot e^{-\mu \cdot x_2}, \\ &= I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_K} \cdot e^{-\mu_d \cdot d} \cdot e^{-\mu \cdot x_2}, \\ &= I_0 \cdot e^{-[\mu \cdot (x_2 + x_K) + \mu_d \cdot d]}, \end{aligned}$$

Como:

$$x_2 + x_k + d = x, \quad (5)$$

Então:

$$x_2 + x_K = x - d \quad (6)$$

Obtém-se:

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-[\mu \cdot (x-d) + \mu_d \cdot d]} \quad (7)$$

A equação acima é verdadeira para geometrias de feixes estreitos de radiação.

Entretanto, geometrias de irradiação com grandes aberturas de feixes são usualmente encontradas em aplicações práticas. Para feixes com grande abertura de campo de irradiação, temos:

$$I_2 = B \cdot I_0 \cdot e^{-[\mu \cdot (x-d) + \mu_d \cdot d]} \quad (8)$$

onde B é chamado de *Fator de Build-up*, ou fator de aumento da radiação. B representa a contribuição da radiação espalhada no processo de formação da imagem radiográfica.

A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação μ no material e μ_d na falha, aumenta com o aumento entre a diferença das densidades (massa específica = massa da unidade de volume de um corpo) do objeto com e sem descontinuidade, e dessa forma, a sensibilidade desse método é diretamente proporcional à densidade do objeto e inversamente proporcional à descontinuidade. μ varia inversamente com a energia (efeito fotoelétrico e Compton), e, portanto, haverá perda de sensibilidade para fontes de energias mais altas. Para porosidade, falta de penetração, buracos de vermes, etc., toma-se μ_d igual a zero.

Pode-se concluir então que:

- Como a absorção da radiação gama e X depende da espessura do material, um vazio ou uma descontinuidade qualquer situada no interior do objeto examinado se traduzirá por variações locais de intensidade emergente.
- Quando a espessura do objeto que está sendo inspecionado aumenta, aumenta também o tempo de exposição devido ao efeito de absorção da radiação através do material. Esse aumento no tempo de exposição também ocorrerá para materiais de elevado número atômico, já que o coeficiente de absorção de um material varia diretamente com a densidade (massa específica).

Sendo assim, a radiografia industrial é então usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região vizinha.

2.2 – FONTES DE RADIAÇÃO PARA RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Quanto ao termo fonte, os principais tipos de radiação utilizados em radiografia industrial são os *raios X* e as fontes de *radiação gama* [52].

2.2.1 - Radiografia com raios X

Os raios X são emitidos das camadas eletrônicas dos átomos. Essas emissões não ocorrem de forma desordenada, mas possui “padrão” de emissão denominado espectro de emissão.

Os aparelhos de raios X são classificados de acordo com a sua potência e com as aplicações para as quais são projetados. Os raios X para fins de inspeção na indústria são gerados aplicando-se potências (tensões) da ordem de 80 a 500 kV. Os principais componentes de um equipamento de raios X são: o **tubo de raios X** e o **gerador de alta tensão**.

Tubo de raios X industrial

Os raios X destinados ao uso industrial são gerados em um dispositivo denominado **tubo de Coolidge**. Este dispositivo consiste numa ampola de vidro com alto vácuo possuindo dois eletrodos: o catodo e o anodo.

Os eletrodos são projetados para que os elétrons produzidos no catodo (eletrodo negativo ou filamento) possam ser acelerados por uma diferença de potencial alta em direção ao anodo (eletrodo positivo ou alvo). Os elementos básicos de um tubo de raios X industrial e a fotografia de um equipamento de raios X são ilustrados na **Figura 5**.

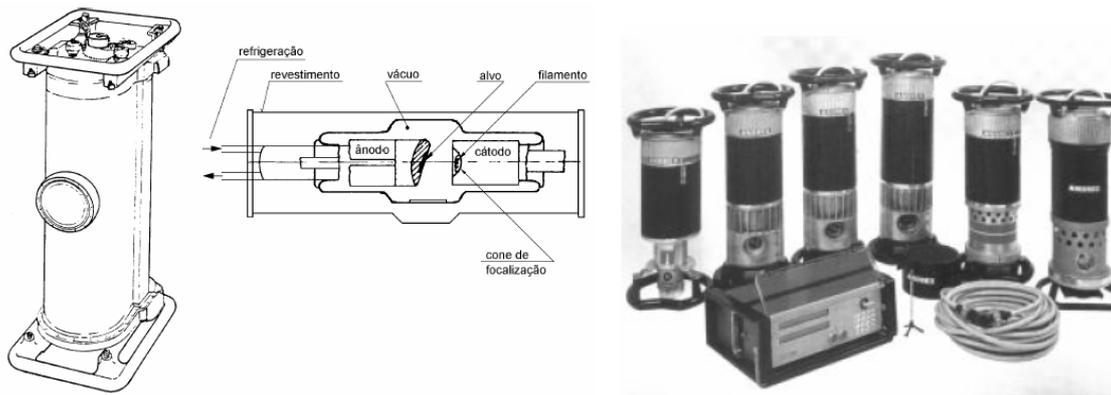


Figura 5 – Visão externa e interna de um equipamento gerador de raios X de até 300 keV.

Os elétrons são produzidos pelo aquecimento do filamento de tungstênio, fenômeno conhecido como emissão termoiônica, e acelerados através do tubo para alcançar o alvo, onde os raios X são por sua vez produzidos.

O ponto focal é a área do alvo que é bombardeada pelos elétrons do cátodo (filamento). A maior parte da energia é convertida em calor, com menos de 1% sendo convertida em raios X. Para minimizar este problema de aquecimento, utilizam-se anodos com superfícies suficientemente grandes para evitar um superaquecimento local, ou utiliza-se anodo giratório. Para uma boa definição da imagem, é necessário que o ponto focal no anodo tenha pequenas dimensões. Existe, porém, um limite para este tamanho, pois quanto menor esta faixa, maior o calor concentrado. Para solucionar este problema o anodo possui uma inclinação entre 6° e 20° , formando um ângulo com o plano perpendicular do feixe incidente. Desta forma o tamanho aparente do ponto focal é reduzido. As especificações de fábrica dos aparelhos geralmente mencionam as dimensões do ponto focal.

Gerador de Alta Tensão

A função dos geradores de alta tensão é produzir uma diferença de potencial necessária para acelerar os elétrons, que vão produzir os raios X. Estes potenciais são produzidos através de transformadores elétricos que podem trabalhar com a frequência nominal da rede elétrica ou com médias e altas frequências (dispositivos mais modernos).

Após os transformadores de alta tensão é colocado um sistema de retificação. A retificação é necessária uma vez que a tensão alternada não é útil para acelerar os elétrons, que possuem carga negativa e se deslocam em direção a tensões positivas. Logo, a retificação é responsável pela tensão do anodo ser positiva em relação ao catodo. A **Figura 6** mostra a forma da curva de tensão alternada após a retificação.

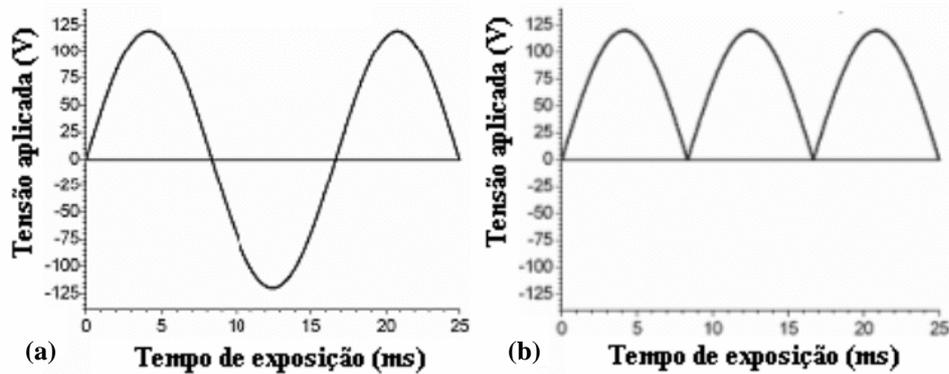


Figura 6: Forma da curva de tensão alternada após a retificação. Este tipo de retificação é conhecido como retificação de meia onda. **a)** Sinal de entrada (baixa tensão). **b)** Processo de retificação

Os sistemas de retificação mais conhecidos são os de meia onda (um pulso), de onda completa (dois pulsos), trifásico (seis pulsos) e geradores com média e alta frequência. Os retificadores são posicionados em série entre o transformador de alta tensão e o tubo de raios X. Os sistemas de retificação dos equipamentos de raios X mais modernos utilizam um complexo sistema de transformação da tensão alternada em tensão praticamente contínua. A variação obtida com estes sistemas é menor do que 1 %.

Espectros de raios X

Os raios X são produzidos como resultado da perda de energia por elétrons que reduzem a velocidade quando interagem com o material alvo (bremsstrahlung) ou por transições de elétrons dentro dos átomos (raios X característico). A distribuição em energia da radiação produzida é denominada **espectro de Raios X**. O espectro de raios X é formado de duas partes distintas e superpostas: **uma contínua e outra em linhas**

discretas. A parte contínua deve-se aos raios X de “bremsstrahlung”, e vai de energias muito baixas até uma energia máxima, aproximando ao maior valor de tensão aplicada ao tubo. As linhas discretas são em decorrência dos raios X característicos. A **Tabela 1** ilustra a escala de “dureza” dos raios X.

Tabela 1 - Classificação dos raios X quanto à dureza

<i>RADIAÇÃO</i>	<i>TENSÃO NO TUBO</i>
Muito mole	Inferior a 20 kV
Mole	20 – 60 kV
Semi-mole	60 – 150 kV
Duro	150 – 400 kV
Muito duro	400 – 3000 kV
Ultraduro	Superior a 3000 kV

A intensidade e a qualidade da radiação emergente de um tubo de raios X são função da corrente e tensão aplicada ao tubo, do tempo de exposição, do material e ângulo do alvo (anodo), da composição e espessura dos filtros do feixe. A quantidade de raios X gerados é proporcional ao número atômico (Z) do material do alvo, a aproximadamente o quadrado do valor da tensão (kV)², e à corrente aplicada ao tubo (mA). Já a distribuição em energia do espectro de raios X é determinada pelo potencial aplicado (kV), pelo material e ângulo de inclinação do anodo, e pela composição e espessura do material de filtração. Contudo o fator principal é a **tensão aplicada ao tubo**.

Filtração

A filtração total de um feixe de raios X consiste na filtração inerente mais a filtração adicional. A filtração inerente é constituída pelos componentes que envolvem o tubo de raios X, como o óleo isolante e o vidro da janela por onde sai o feixe útil de raios X. A filtração adicional por sua vez é usada para complementar a filtração inerente. A função da filtração é eliminar os raios X de baixa energia, que não contribuem para a formação da imagem radiográfica.

Fatores que afetam a exposição

Os fatores que afetam a exposição são a tensão e a corrente aplicadas ao tubo, e o tempo de exposição, e representam os controles básicos para o contraste, densidade e detalhe ou nitidez da imagem. O detalhe ou nitidez da imagem depende também de fatores geométricos, tais como tamanho do ponto focal, distância foco-detector e distância objeto-detector.

A tensão aplicada ao tubo (kV) representa a capacidade de penetração do feixe de raios X. A corrente e o tempo de exposição geralmente são combinados (produto) em uma única unidade, denominada de “corrente-tempo de exposição” (mAs), que é considerado como fator primário de controle da intensidade (integrada) do feixe de raios X. Portanto, o produto corrente-tempo (mAs) é o fator de controle primário da densidade de uma radiografia.

CrITÉRIOS de qualidade para imagens radiográficas com raios X

Os fatores de qualidade que são levados em conta para se obter uma radiografia otimizada, que é o objetivo de um exame radiológico, são: densidade, contraste, detalhe e distorção e artefatos.

A densidade radiográfica pode ser descrita como o grau de enegrecimento da radiografia processada. Quanto maior o grau de enegrecimento, maior a densidade. O fator que mais influencia a densidade radiográfica é o produto corrente-tempo (mAs), que controla a densidade através da quantidade de raios X emitida durante uma exposição. Além do produto corrente-tempo (mAs), outro fator de controle é a distância do tubo de raios X ao detector que, de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância, reduz a intensidade do feixe de raios X.

O contraste é o grau de diferenciação entre duas estruturas adjacentes, e sua função é tornar visíveis as interfaces e estruturas anatômicas. A tensão é um dos fatores que mais influenciam o contraste radiográfico, controlando a energia ou a capacidade de penetração do feixe primário. Quanto maior a tensão, menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades do corpo inspecionado, produzindo menor variação na atenuação. O aumento da tensão provoca, também, aumento da energia e quantidade de raios X que chegam ao detector, causando aumento de densidade radiográfica. O detalhe pode ser definido como a nitidez de estruturas na

radiografia. A nitidez da imagem é demonstrada pela clareza de linhas estruturais finas e pelas bordas de estruturas visíveis na imagem radiográfica. A insuficiência de detalhes ou a definição é conhecida como “borramento“ da imagem.

2.2.2 - Radiografia com raios gama

Gamagrafia é o nome dado a radiografia com raios gama. A fonte radioativa utilizada em gamagrafia consta de uma determinada quantidade de um isótopo radioativo. Essa massa de radioisótopo é encapsulada e lacrada dentro de um pequeno invólucro metálico muitas vezes denominado “porta-fonte” ou “torpedo” devido a sua forma, ou fonte selada, simplesmente. O porta-fonte se destina a impedir que o material radioativo entre em contato com qualquer superfície, ou objeto, diminuindo os riscos de uma eventual contaminação radioativa. A **Figura 7** ilustra um dispositivo porta fonte.

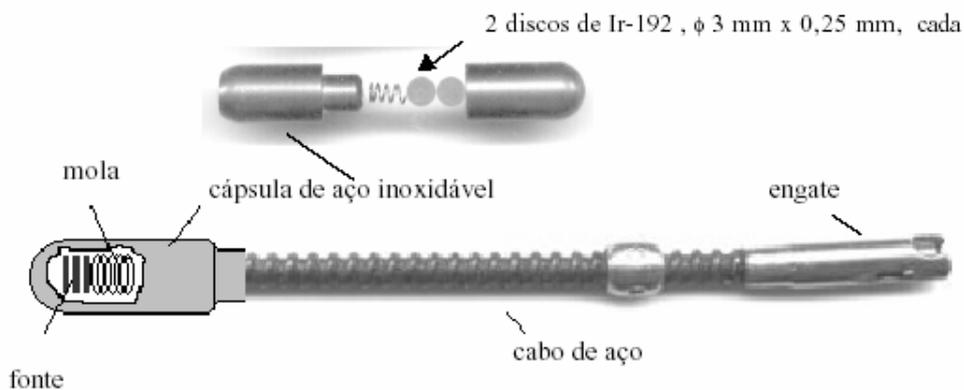


Figura 7 – Dispositivo porta-fonte

As fontes típicas utilizadas em gamagrafia, com energias abaixo de 600 keV são: **Irídio-192**, e **Selênio-75**, o **Cobalto-60** e o **Túlio-170**. Segue abaixo as principais características destas fontes:

Irídio-192 (^{192}Ir , $Z=77$)

O Irídio-192 é obtido a partir do bombardeio com nêutrons do isótopo estável Ir-191. Suas principais características são:

- Meia-Vida = 73,827 dias.
- Energia da Radiação = 137 a 650 KeV.
- Faixa de utilização mais efetiva = 10 a 40 mm de aço.
- Fator Gama (Γ) = 3,48 $\mu\text{C}/\text{kg.h}/\text{GBq}$ a 1 metro ou 0,50 R/h.Ci a 1 metro ou 0,13 mSv/h.Gbq a 1 metro.
- Esquema de decaimento: o ^{192}Ir decai por emissão β^- (95,13 (13)%) para ^{192}Pt ($Q(\beta^-) = 1459,7$ (19) keV), e por captura eletrônica (4,87 (13)%) para ^{192}Os ($Q(\text{EC}) = 1046,2$ (23) KeV).

Selênio – 75 (^{75}Se , Z=34)

O selênio é encontrado muito distribuído na crosta terrestre. Na maioria das rochas e solos é encontrado em concentrações entre 0,1 e 2,0 ppm. Raramente é encontrado em estado nativo, obtendo-se principalmente como subproduto da refinação do cobre, já que aparece nos lodos (resíduos) de eletrólises junto com o telúrio (5-25% Se, 2-10% Te). A produção comercial se realiza pela queima dos lodos com cinzas de soda ou adição de ácido sulfúrico.

- Meia-Vida = 119,79 dias.
- Energia da radiação = de 6 a 405 keV.
- Faixa de utilização mais efetiva = 4 a 30 mm de aço.
- Fator Gama (Γ) = 1,39 $\mu\text{C}/\text{kg.h}/\text{GBq}$ a 1 metro ou 0,28 R/h.Ci a 1 metro.
- Esquema de decaimento: o ^{75}Se decai 100% por captura eletrônica para o ^{75}As . O ^{75}As , de 303 keV, tem meia-vida de 16,8 ms.

O Selênio é um radioisótopo de uso recente na indústria, e proporciona uma qualidade de imagem muito boa, assemelhando-se à qualidade dos raios X.

Cobalto – 60 (^{60}Co , Z=27)

O Cobalto-60 é obtido através do bombardeamento por nêutrons do isótopo estável Co-59. Suas principais características são:

- Meia - Vida = 5,24 anos.
- Energia da Radiação = 1,17 e 1,33 MeV.
- Faixa de utilização mais efetiva 60 a 200 mm de aço.
- Fator Gama (Γ) : 0,351 mSv/h.GBq a 1m.

Esses limites dependem das especificações técnicas da peça a ser examinada e das condições da inspeção.

Túlio-170 (^{170}Tm , $Z = 69$)

O Túlio-170 é obtido com o bombardeio por nêutrons do isótopo estável Túlio-169.

Como esse material é extremamente difícil de produzir, o material é geralmente manuseado sob a forma de óxido. Suas principais características são:

- Meia-Vida = 127,8 dias.
- Energia de radiação: 84 keV e 540 keV. O espectro do Túlio possui também radiação de Bremsstrahlung.
- Faixa de utilização mais efetiva = 1 a 10 mm de aço.
- Fator Gama (Γ) = 0,017 $\mu\text{C}/\text{kg.h}/\text{GBq}$ a 1 metro ou 0,0025 R/h.Ci a 1 metro ou 0,0007 mSv/h.Gbq a 1 metro.
- Esquema de decaimento: O ^{170}Tm desintegra por ambos decaimento β^- e captura eletrônica, respectivamente, para o primeiro estado excitado de 84,25 keV (18,3%) e estado fundamental (81%) do ^{170}Yb , e para o primeiro estado excitado de 78,6 keV (0,03%) e para o estado fundamental (0,012%) do ^{170}Er .

Equipamento de gamagrafia

Os irradiadores gama são equipamentos dotados de partes mecânicas que permitem expor com segurança a fonte radioativa. A principal parte do irradiador é a blindagem interna, que permite proteção ao operador a níveis aceitáveis para o trabalho, porém com riscos de exposição radiológica se armazenado em locais não adequados ou desprotegidos. Os irradiadores gama são construídos através de rígidos controles e testes estabelecidos por normas internacionais, pois o mesmo deve suportar choques

mecânicos, incêndio e inundação para que a sua estrutura e blindagem não sofram rupturas capazes de deixar vaziar em qualquer ponto mais do que os máximos exigidos. A **Figura 8** mostra a configuração simplificada de um equipamento irradiador de raios gama.

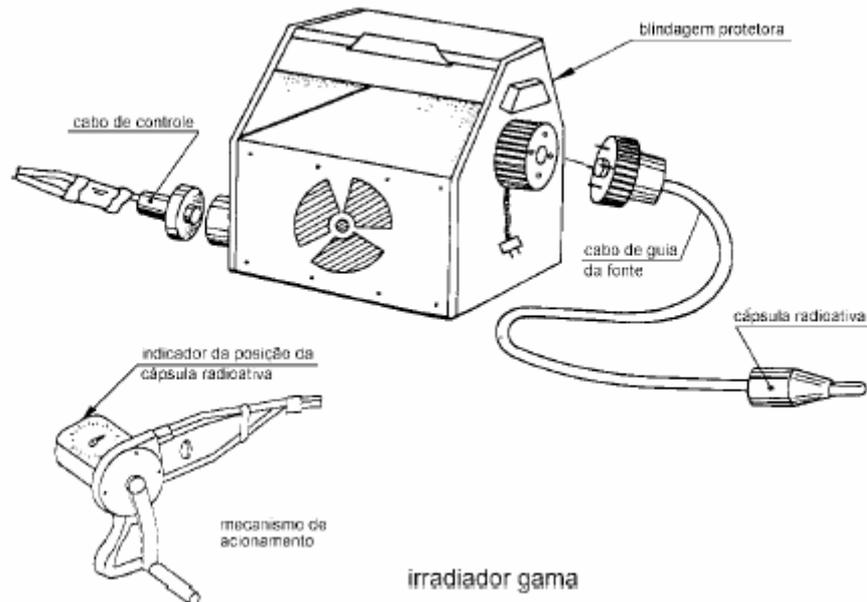


Figura 8 – Irradiador gama e seus principais componentes

As três partes básicas que compõem os irradiadores são: **blindagem**, **mangote** e **comandos**.

A **blindagem** serve para absorver a radiação emitida continuamente pela fonte, mantendo a parte externa em padrões aceitáveis, determinados em normas internacionais. É geralmente fabricada de chumbo ou urânio exaurido, com estrutura externa em aço inoxidável.

O **mangote** é um tubo por onde será conduzida a fonte radioativa da blindagem até o ponto determinado para irradiação.

Os **comandos** permitem o acionamento e o controle da fonte. O controle pode ser elétrico, pneumático ou, como é mais comum, manual. Por meio desses acionamentos, leva-se a fonte radioativa para fora da blindagem, pelo mangote, expondo-a no local a ser realizado o ensaio. Após o tempo de exposição, a fonte é recolhida novamente à blindagem.

A **Figura 9** ilustra um aparelho para gamagrafia industrial, projetado para operar com capacidade máxima de 100 Ci de ^{192}Ir . Observa-se que o trânsito interno da fonte no interior da blindagem é feito no canal em forma de “S”.

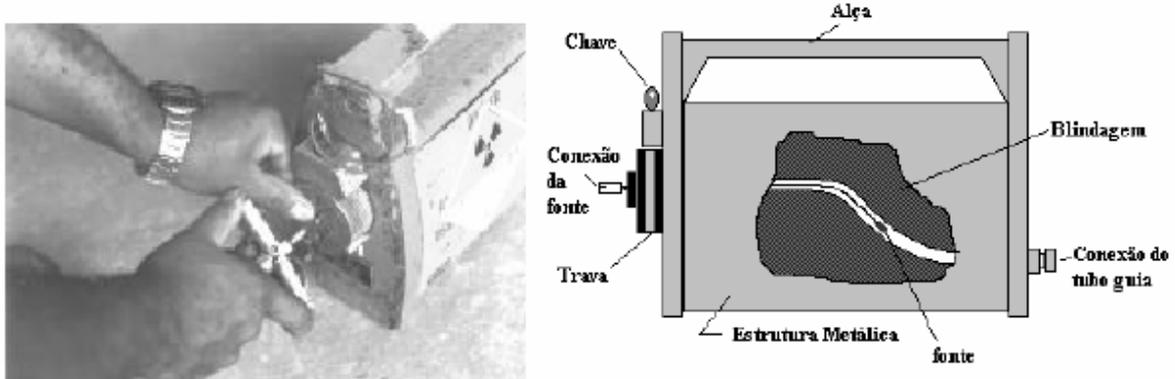


Figura 9 – Aparelho para gamagrafia industrial, com capacidade máxima de 100 Ci de ^{192}Ir

Diferente dos raios X, a energia das fontes de radiação gama não pode ser alterada. Esta depende da natureza da fonte radioativa e é fixa para uma fonte particular. A intensidade é também não controlável para uma dada fonte, uma vez que é impossível alterar a taxa de desintegração. Entretanto, o fato de que fontes de pequenas dimensões podem acessar locais inacessíveis para os equipamentos de raios X, a não utilização de energia fazem com que a gamagrafia seja uma das modalidades de END mais utilizadas em situações de campo.

2.3 - A RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Por cerca de 60 anos, os filmes (películas) de raios X foram o sistema de aquisição de imagem padrão para a radiografia industrial, devido a sua utilidade funcional e qualidade elevada da imagem obtida. O filme radiográfico tem executado a função de detector, sistema de armazenamento da imagem e de comunicação de dados. Porém, novas tecnologias têm surgido como alternativa à utilização dos filmes radiográficos. A **Figura 10** mostra a evolução dos sistemas de aquisição de imagens nos últimos 40 anos.

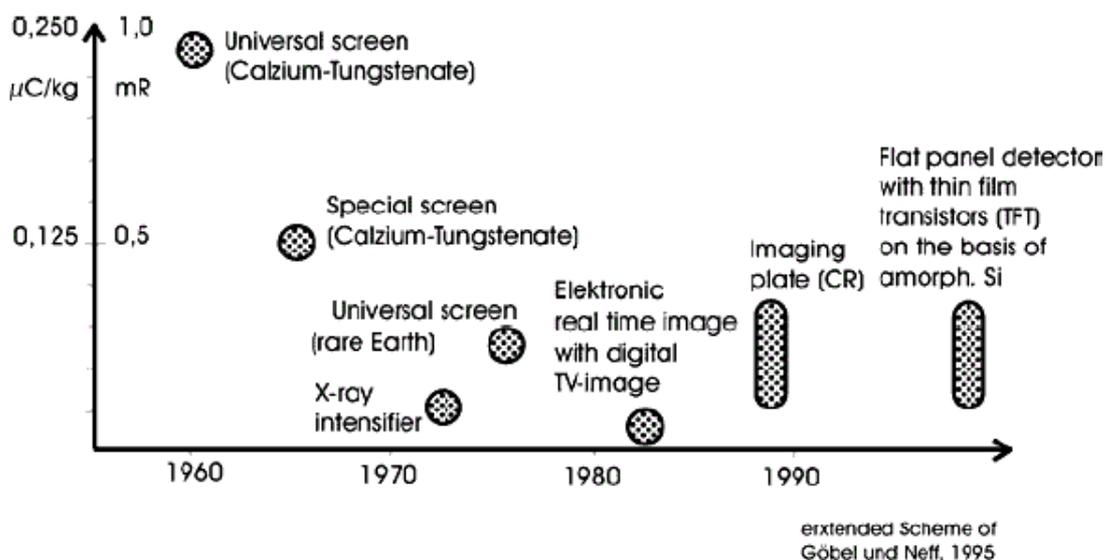


Figura 10 – Evolução dos sistemas de aquisição de imagem nos últimos 40 anos

2.3.1 – Imagens Digitais

Imagens podem ser dispostas em um formato digital, de forma a ser processadas por um computador. A imagem digital consiste de uma matriz em que cada elemento, ou pixel é representado por um valor numérico, que representa uma tonalidade de cor, como mostra a **Figura 11**, em que, cada píxel possui uma única tonalidade de cor e possui a mesma medida horizontal e vertical [52,53].

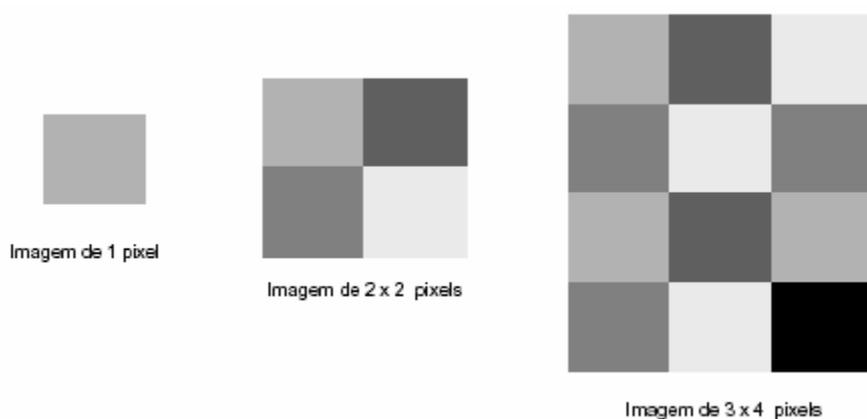


Figura 11 – Matrizes de *pixels*

O número de *pixels* contidos em uma imagem é o produto do número de linhas pelo de colunas, que é usualmente um múltiplo do número 2 devido às características binárias

do sistema digital. A dimensão e a forma da matriz (número de linhas e colunas) dependem da aplicação específica e da capacidade do sistema que cria a imagem. O formato mais comum é o quadrado, embora seja possível ter imagens digitais retangulares. Para uma matriz quadrada, o número de pixels é proporcional ao quadrado da dimensão da matriz. Quando a dimensão da matriz é aumentada por um fator de 2 (isto é, de 256 para 512), o número de pixels aumenta por um fator de 4 [53].

2.3.1.1 - Qualidade da imagem digital

Quando falamos em qualidade da imagem digital, estamos nos referindo à **resolução** da imagem. A resolução é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidos ou visualizados.

Em imagens digitais, o número de pixels lineares existentes em uma medida padrão, tal como milímetro ou polegada (p.p.m ou do inglês d.p.m), defini a resolução da imagem, e é única para toda a imagem. Por exemplo, uma resolução de 6 p.p.m. significa que existem 6 pixels em cada medida linear de 1 mm, como mostra a **Figura 12**.

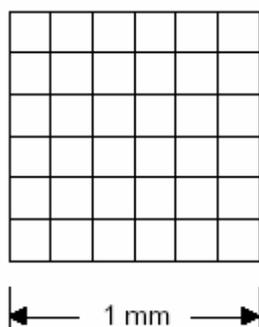


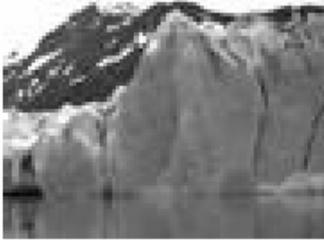
Figura 12 – Imagem com resolução de 6 p.p.m ou d.p.m.

O **tamanho** e a **quantidade de pixels** são fatores determinantes para a análise de detalhes em uma imagem digital. Desde que cada pixel tem somente um valor numérico ou escala de cinza, não é possível ver qualquer detalhe anatômico com apenas um pixel, uma vez que todas as estruturas dentro da área coberta por este pixel serão representadas por um único valor numérico ou escala de cinza. Conseqüentemente, boa resolução requer pixels pequenos que são obtidos por selecionar matrizes de grandes dimensões, como mostra a **Figura 13**.



Digitalização de uma imagem com resolução de: 14 pixels x 11 pixels

Tamanho da Imagem: 1 kbyte



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 84 pixels x 63 pixels

Tamanho da Imagem: 16 kbytes



Digitalização da mesma imagem com resolução de: 640 pixels x 480 pixels

Tamanho da Imagem: 900 kbytes

Figura 13 – Exemplos de graus de resolução espacial diferentes para uma mesma imagem. Observa-se que sempre haverá perda de qualidade e da resolução de uma imagem digitalizada, quando ampliamos outra imagem já digitalizada, a menos que se aumente a quantidade de pixels na mesma proporção da ampliação

Outro fator importante é o número de bits (dígitos binários) usados para representar cada pixel. Este fator afeta o número de escalas de cinza ou níveis de brilho (nitidez) que podem ser amostrados: quanto maior o número de bits por pixel, maior será a escala de tons de cinza, ou níveis de brilho da imagem.

O **campo de visão, FOV** (do inglês *Field Optical View*), com respeito ao corpo que está sendo radiografado é outro fator que deve ser considerado com respeito aos detalhes de uma imagem digital. O tamanho efetivo do pixel que limita a visibilidade dos detalhes é:

$$\text{Tamanho do Pixel} = \frac{FOV}{\text{matriz}}, \quad (9)$$

Para grandes valores de FOV, matrizes de grandes dimensões são requeridas para produzir o mesmo detalhe que uma matriz pequena com relação a menores valores de FOV.

Portanto para avaliar a capacidade de resolução de diferentes sistemas de imagem a quantidade e o tamanho dos pixels são fatores determinantes. Na radiografia industrial, valores como 2500 x 3000 pixels de 100 μm (cem microns) de tamanho são comuns para uma boa qualidade de imagem.

Outro parâmetro que mede a qualidade da imagem é o contraste entre dois pontos adjacentes como uma função da sua distância de separação. Este fator é chamado de “Função Transferência de Modulação - MTF”, ou às vezes Função de Transferência de Contraste, e assume valores entre 0 e 1 dependendo do sistema digital utilizado. Medindo a MTF, é possível avaliar a eficiência de um sistema na detecção de pequenas mudanças no contraste em função de sua separação.

A fim de simplificar a medida, as separações são indicadas em termos da frequência espacial, que é o inverso da distância entre detectores (pixels).

$$f_N = \left(\frac{1}{2\Delta d} \right), \quad (10)$$

onde Δd é a distância entre detectores.

Quando a frequência espacial aumenta, aumenta-se a capacidade de resolução. Como a MTF em uma dada frequência aumenta, a imagem será mais facilmente distinguida, e conseqüentemente melhor visualizada pelo olho humano. Isto significa que quanto maior for o valor da MTF mais facilmente será visualizada uma falha.

2.3.1.2 – Ruído em imagens digitais

Ruído é qualquer sinal desvantajoso que corrompe, reduz a informação contida no sinal ou interfere com o sinal desejado. É freqüentemente definido como a incerteza em um sinal devido a flutuações randômicas no mesmo [54].

Há muitas causas para esta flutuação. Por exemplo, um feixe de radiação emergindo de um tubo de raios X ou sendo emitido por uma fonte de radiação é estatístico por natureza, e o número de fótons emitidos pela fonte por unidade de tempo varia com uma

distribuição gaussiana. Outras fontes de flutuação randômica são introduzidas pelo processo de atenuação da radiação pela matéria, que também obedece a uma distribuição gaussiana. Finalmente, o sistema de detecção introduz ruído devido ao processamento eletrônico do sinal [49,55].

Há diferentes fontes de ruído para uma imagem. Dentre as principais destacam-se o ruído quântico e o ruído associado à eletrônica do sistema de detecção. Por ruído quântico entende-se como a imprecisão estatística introduzida no sinal de radiação pela flutuação randômica na produção e atenuação dos fótons. O ruído quântico ocorre naturalmente, e não pode ser evitado. Para um detector, o ruído quântico é calculado em termo dos fótons absorvidos pelo detector e utilizados para gerar a imagem. Qualquer fóton que passa através do detector sem ser absorvido ou mesmo aqueles que são absorvidos sem gerar informação para a imagem é desperdiçado, e não contribuem para reduzir o ruído na imagem. Esta modalidade de ruído é altamente dependente da dose de radiação no detector [49,55]. O ruído eletrônico consiste na incerteza adicionada ao sinal proveniente do sistema de processamento do mesmo. A magnitude do ruído eletrônico é geralmente dependente da intensidade do sinal [49,55].

O desvio padrão σ é talvez o mais simples, e um dos mais úteis caminhos para caracterizar o ruído em um sistema de imagens. Ele quantifica a variação nos valores dos pixels da imagem em torno de um valor médio [49,55]. Se x_i são valores individuais de um conjunto de dados, podemos obter o desvio padrão da amostra através da média m dos dados e da variância s^2 através das relações:

$$m = \langle x_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} x_i \quad (11)$$

$$s^2 = \langle (x_i - m)^2 \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} (x_i - m)^2 \quad (12)$$

e,

$$\sigma = \sqrt{s^2} \quad (13)$$

Se os dados em análise obedecerem a uma distribuição gaussiana ou a uma distribuição de Poisson [56], o desvio padrão, isto é, a incerteza do valor em torno de um valor médio, pode ser calculado pela simples relação:

$$\sigma = \sqrt{m}, \quad (14)$$

onde m é a média dos valores de pixel na imagem [56].

Entretanto, para a descrição de ruído ter significado físico, este geralmente deve ser relacionado a um sinal. Desde que o ruído quantifica a incerteza do sinal, isto é, a estimativa da variação dos valores de pixel de uma imagem em torno de um valor médio, o conceito de razão sinal-ruído (*do inglês Signal-to-Noise Ratio - SNR*) é usado para descrever a relação entre o valor médio do sinal e a variação em torno deste valor médio, isto é, o ruído:

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (15)$$

onde dizemos que um sistema de aquisição de imagens é eficiente em termos de razão sinal-ruído quando, para um mesmo valor de dose no detector, a razão sinal ruído nas imagens geradas permanece constante, independente da configuração de exposição [49,55].

2.3.2 – Detectores *Image Plate*

Na década de 80, visando aplicações médicas, a *Fuji Film* do Japão desenvolveu um detector inovativo bidimensional denominado *Image Plate* – IP para radiografia [57]. IP usa uma placa flexível coberta por um tipo de fósforo que arquiva a radiação incidente como uma imagem latente. A imagem latente pode ser lida fora da placa em um computador como uma figura digital utilizando um escaner especial. Recentemente, estes equipamentos vêm sendo utilizados na radiografia industrial devido a uma série de vantagens com relação aos filmes convencionais tais como: sensibilidade até três ordens de grandeza superior a um filme convencional, redução do tempo de exposição de 5 a 20 vezes, maior faixa dinâmica, latitude de exposição cerca de 1000 vezes maior do que a de filmes convencionais, linearidade superior, excelente resolução espacial da ordem

de 25 μm e as imagens são digitais e podem ser processadas no computador através de vários programas de tratamento de imagens, e serem duplicadas sem perda da qualidade. A **Figura 14** mostra a excepcional linearidade do *Image Plate* em relação ao filme convencional, quando ambos são submetidos a diferentes doses de radiação ionizante.

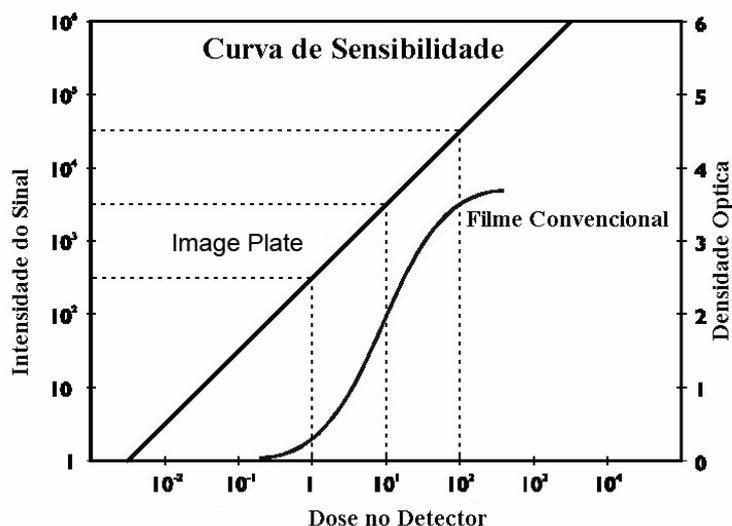


Figura 14 – Comparação da linearidade dos detectores IP e filme de raios X quando expostos à radiação beta de ^{32}P por um período de 18 h [11].

A abscissa corresponde a doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de ^{32}P (radiação beta de 1,7 MeV). O eixo da ordenada à esquerda representa a quantidade de radiação luminescente acumulada pelo *Image Plate*. O eixo da ordenada à direita mostra a densidade de escurecimento de um filme de raios X. O detector *Image Plate* mostra uma linearidade excepcional em relação ao filme de raios X. Estas características são também similares para raios beta de diferentes energias, elétrons, raios X e gama.

A tecnologia do *Image Plate* baseia-se na habilidade de certos cristais de fósforos (em média, 5 μm de diâmetro) capturarem uma imagem latente. Esta imagem é composta de cristais de BaFBr:Eu^{+2} , nos quais os elétrons são aprisionados num nível de maior energia após ser expostos a radiação ionizante. Este estado dos elétrons pode ser desfeito através de uma estimulação com feixes de laser. O retorno dos elétrons para níveis de energia originais é seguido de emissão de fótons na região de luz visível. Este processo é chamado de *Luminescência Foto Estimulada*, do inglês PSL (*Photo Stimulated Luminescence*). Quanto mais radiação chega nos cristais de fósforos, maior é a densidade de aprisionamento, portanto, mais centros PSL são gerados e como

conseqüência, mais luz visível será emitida durante a varredura com feixe de laser. A PSL emitida durante a varredura do laser é coletada por um tubo fotomultiplicador e posteriormente convertida em sinais elétricos em ordem cronológica. Subseqüentemente, estes sinais elétricos são convertidos em sinais digitais de 8 a 16 bits.

O processo de leitura das informações latentes no IP é mostrado esquematicamente na **Figura 15**. Após o processo de “zerar” as informações, o IP pode ser reutilizado e este número de ciclos está em torno de 10000 vezes. Com respeito à leitura de imagens de radiação num scanner próprio para IP, a densidade de leitura pode ser selecionada entre 5 a 40 pixels/mm para scanners de resolução superior a 50 microns.

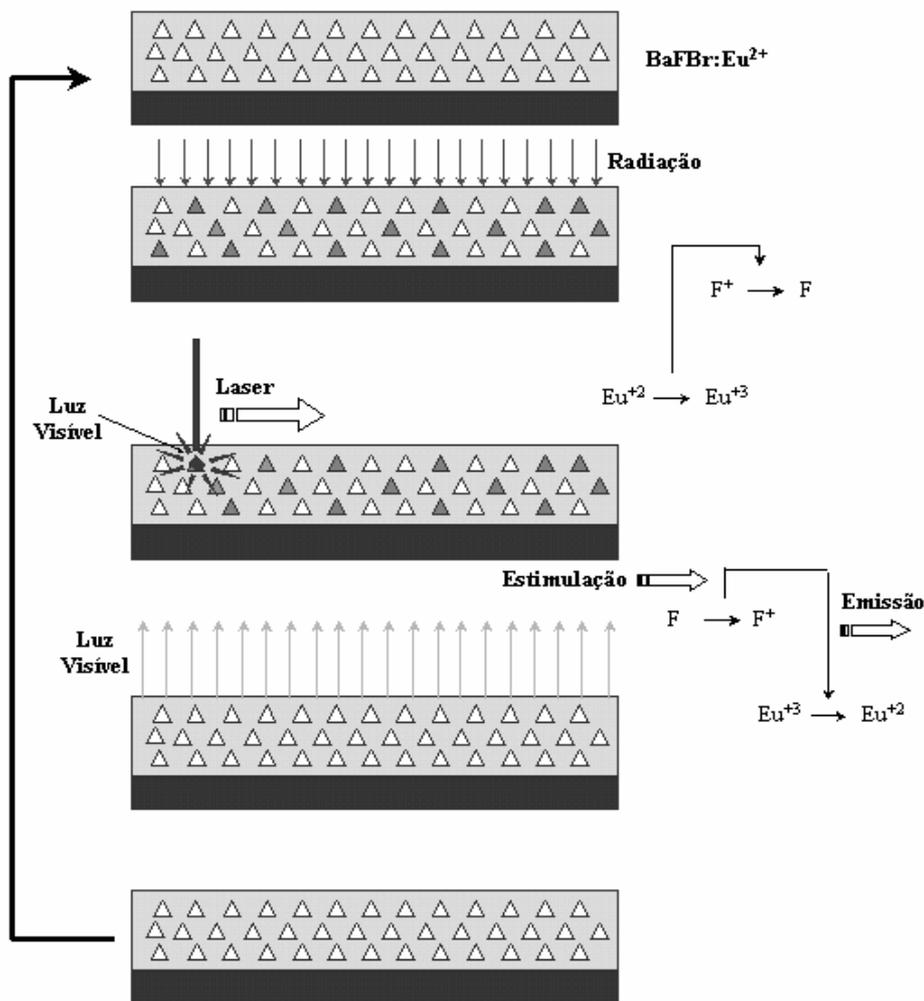


Figura 15 – Seqüência de processamento do *Image Plate* para recuperar a imagem digital na gamagrafia, apagar as informações e a sua reutilização

Um aspecto importante no uso do IP é que qualquer fonte de exposição que possa ser utilizada com filmes convencionais para raios X e gama também pode ser utilizada com esta tecnologia. Mais importante, os IP são flexíveis e podem substituir diretamente os filmes radiográficos. Eles podem ser utilizados no mesmo cassete como os utilizados para filmes convencionais e podem ser utilizados em aplicações que requeiram um detector flexível, como em ensaios radiográficos de estruturas circunferenciais como um duto de petróleo. A luz ambiente não causa uma imagem no IP como ocorre com filmes convencionais, embora luz muito brilhante pode causar o apagamento de uma imagem arquivada. Entretanto, os *Image Plate* em geral requerem menos precauções com relação a exposição a luz ambiente do que os filmes convencionais.

2.4 – MÉTODOS RADIOGRÁFICOS PARA DETECÇÃO DE CORROSÃO E DEPÓSITOS EM TUBOS

As disposições e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça, e o detector devem seguir algumas técnicas especiais tais que permitam uma imagem radiográfica de fácil interpretação e localização das discontinuidades rejeitadas. Dentre as principais técnicas, pode se destacar três principais em radiografia industrial:

2.4.1 – Técnica de parede simples – vista simples (PSVS)

Essa técnica é assim chamada, pois no arranjo entre a fonte de radiação, peça e detector, somente a seção da peça que está próxima ao detector será inspecionada e a projeção será em apenas uma espessura do material [52]. A **Figura 16** ilustra as diferentes formas de se produzir ensaios com a técnica PSVS. PSVS é a principal técnica utilizada em inspeções radiográficas, e a mais fácil de ser interpretada.

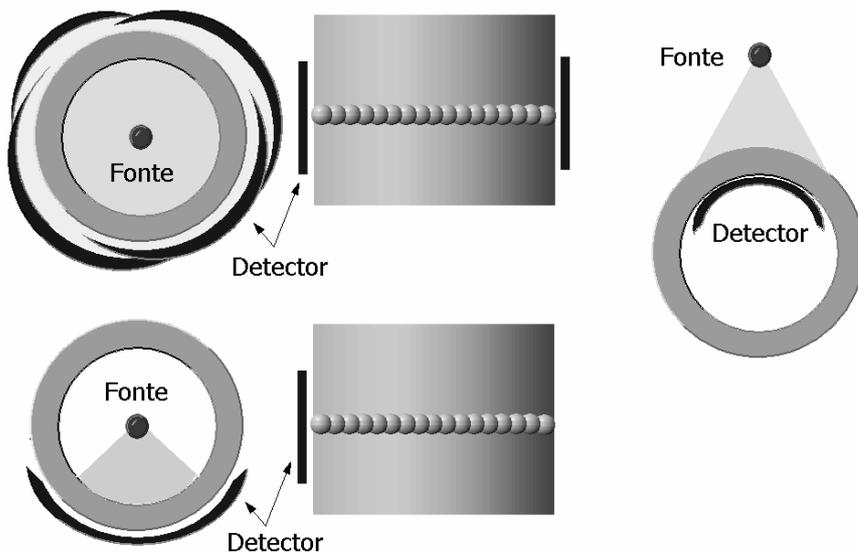


Figura 16 – Técnica de exposição parede simples – vista simples

2.4.2 – Técnica de Parede Dupla

2.4.2.1 – Técnica de Parede Dupla e Vista Simples - PDVS

Nesta técnica de parede dupla vista simples, o feixe de radiação proveniente da fonte atravessa duas espessuras da peça sendo, entretanto, projetada no filme somente a seção da peça que está mais próxima ao mesmo [52].

Freqüentemente esta técnica é utilizada em inspeções de juntas soldadas, as quais não possuem acesso interno, como por exemplo, tubulações com diâmetros maiores que 3.½ polegadas, vasos fechados, e outros.

É importante lembrar que esta técnica requer que a radiação atravesse duas espessuras da peça e, portanto, o tempo de exposição será maior que a inspeção pela técnica de parede simples. Assim, esta opção deverá ser selecionada quando outra técnica não for possível ou permitida. A **Figura 17** ilustra a técnica PDVS.

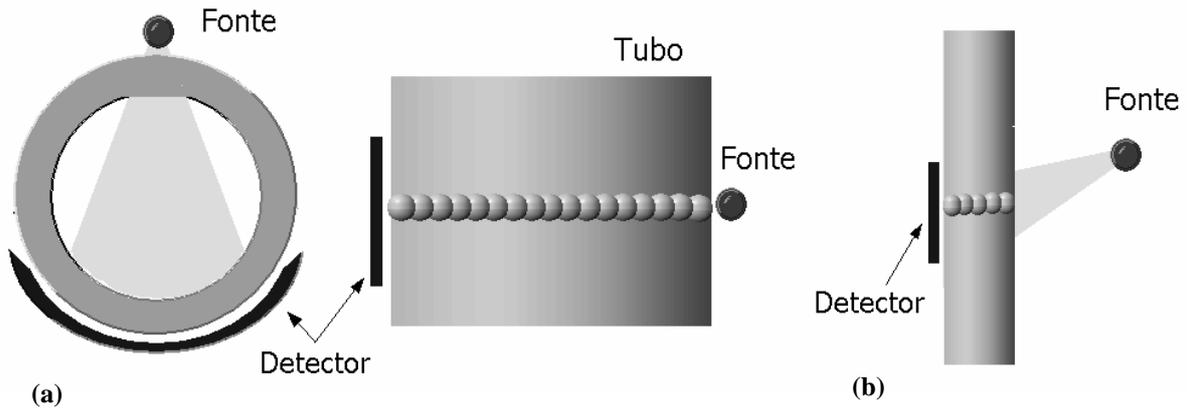


Figura 17 - Técnica de exposição parede dupla e vista simples (a) e parede dupla e vista dupla (b)

2.4.2.2 – Técnica de Parede Dupla e Vista Dupla – PDVD

Neste caso, o feixe de radiação proveniente da fonte também atravessa duas espessuras. Entretanto, projetará no filme a imagem de duas seções da peça, e serão objetos de interesse. Nesta técnica, devem ser levadas em conta as duas espessuras das paredes que serão atravessadas pela radiação no cálculo do tempo de exposição [52].

A técnica de parede dupla e vista dupla (PDVD) é freqüentemente usada para inspeção de juntas soldadas em tubulações com diâmetros menores que 3.½ polegadas (89 mm).

A **Figura 18** ilustra o arranjo radiográfico na técnica PDVD.

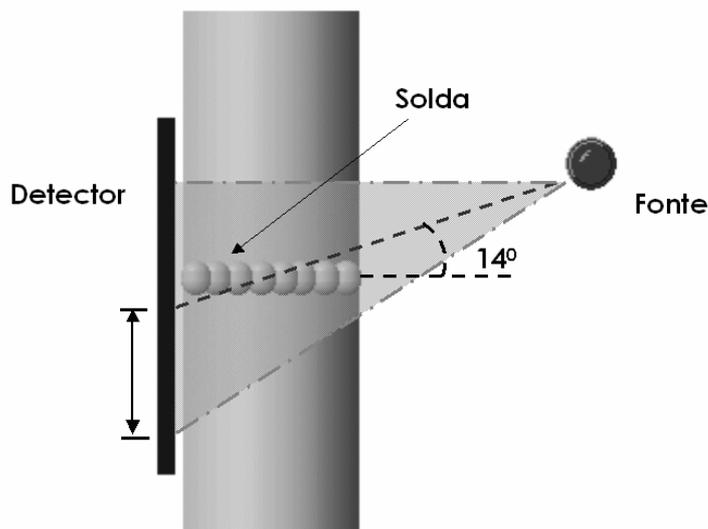


Figura 18 - Arranjo radiográfico na técnica PDVD

Tanto na técnica PDVS como PDVD, corrosão pode ser detectada pelo aumento na densidade no detector produzida pela perda de material, Como mostra a **Figura 19**. Entretanto, a espessura de parede restante não pode ser medida diretamente por estes métodos, embora algumas informações possam ser obtidas da magnitude da mudança na densidade do detector. As técnicas PDVS e PDVD são recomendadas para a detecção de defeitos isolados, e podem ser utilizados para a detecção de áreas extensas de corrosão.

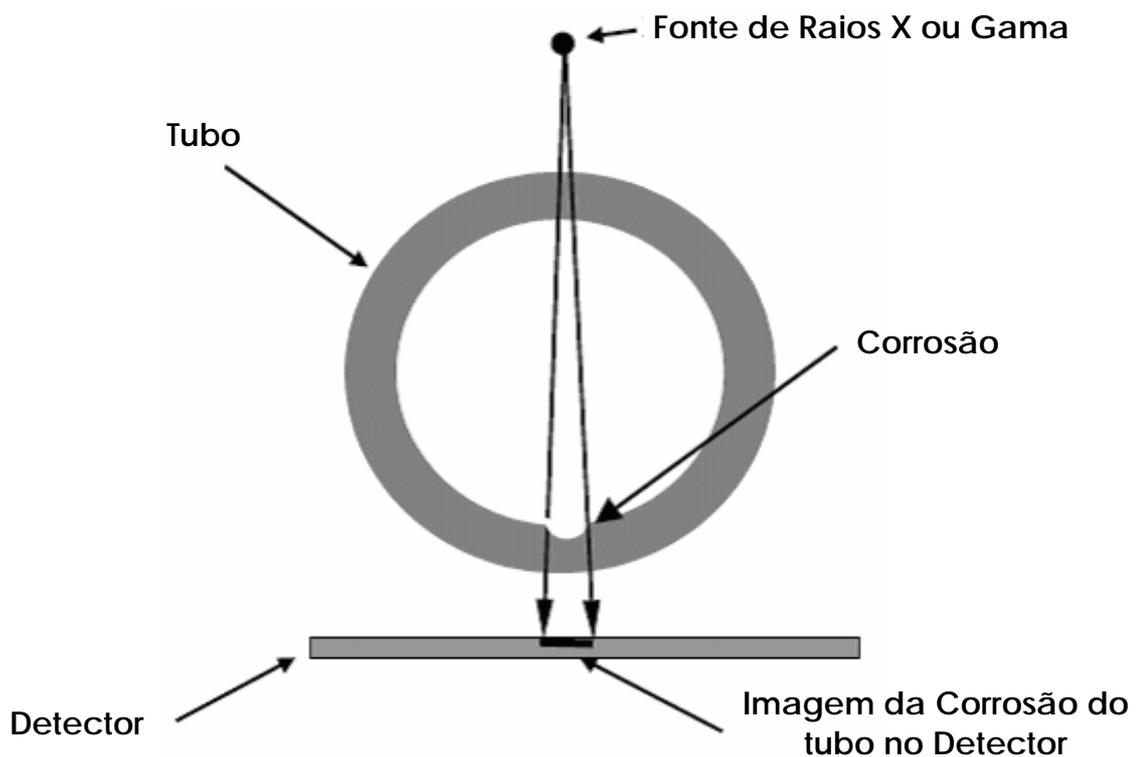


Figura 19 – Detecção de corrosão pelo aumento na densidade do detector no método PDVS

2.4.3 – O Método Tangencial

No método tangencial, a radiografia mostra uma imagem direta da parede da peça. Perda de espessura de parede provocada por corrosão pode então ser detectada e medida pela redução na imagem da espessura da parede, como ilustrado na **Figura 20** [5].

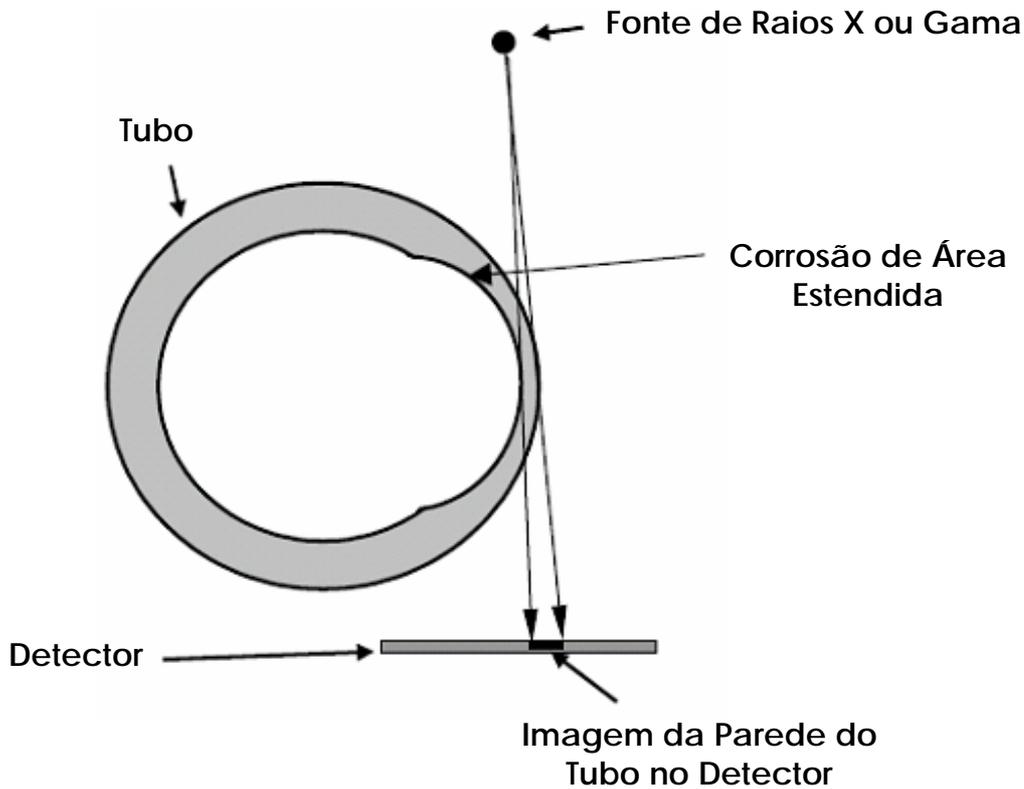


Figura 20 – Princípio da radiografia tangencial

A extensão da perda de espessura da parede devido a corrosão interna ou externa pode ser medida diretamente das imagens radiográficas, onde técnicas de calibração apropriadas são utilizadas para corrigir a magnificação da imagem radiográfica causada quando a distância entre a peça e o detector é diferente de zero.

O método tangencial inspeciona somente uma pequena extensão da circunferência do tubo para uma simples posição fonte/detector. Então, um defeito isolado aparece normalmente fora da região de inspeção, a menos que várias radiografias sejam produzidas ao redor da circunferência do tubo (por mover a fonte e o detector juntos circunferencialmente ao redor do tubo). Se um defeito isolado estiver localizado dentro da região de inspeção, sua extensão será superestimada a menos que o mesmo esteja

posicionado muito próximo a posição exata em que o feixe de radiação forma uma tangente com a parede do tubo, como ilustrado na **Figura 21**.

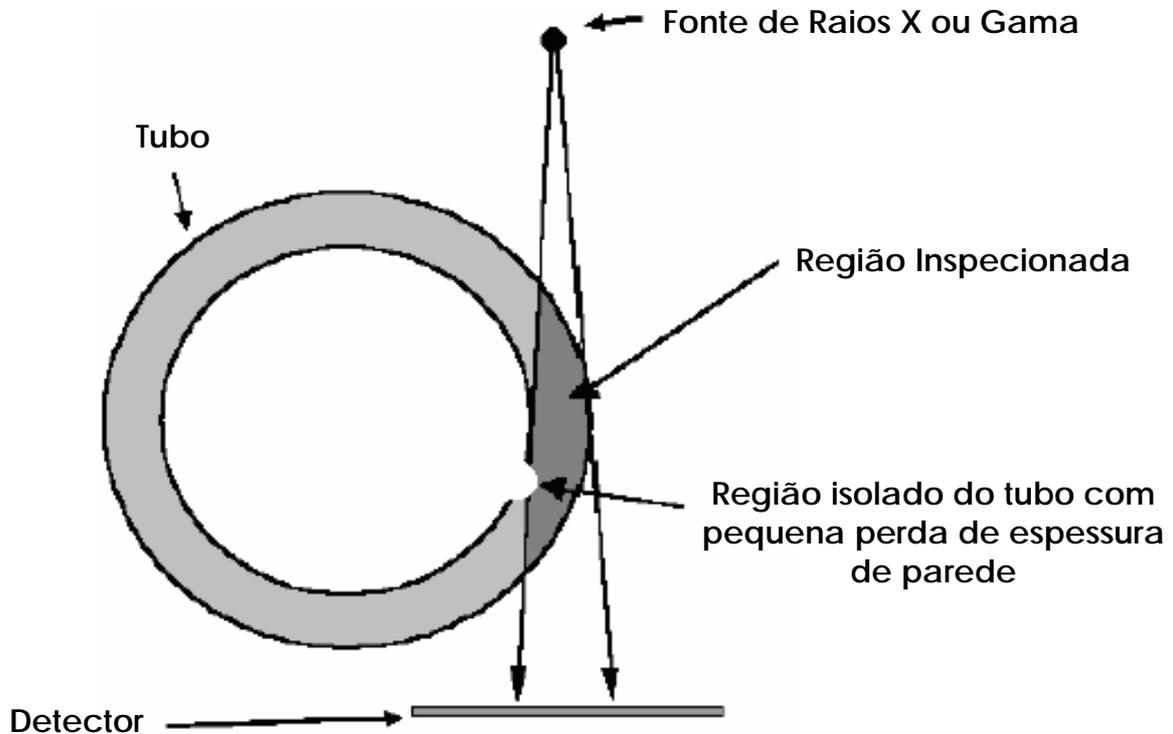


Figura 21 – Ilustração da região coberta pela radiografia tangencial e a localização de um defeito isolado cujas dimensões serão superestimadas

O método de radiografia tangencial é recomendado para a detecção e determinação de extensão de áreas atacadas por corrosão, e não deve ser generalizada para a detecção de defeitos isolados, a não ser que sua localização circunferencial já tenha sido estabelecida por outro método radiográfico de inspeção com PDVS e PDVD.

2.4.4 – Ambos os métodos combinados.

Para dutos de espessuras relativamente finas, uma radiografia simples tem suficiente faixa dinâmica e área para mostrar a presença de corrosão tanto pelo método tangencial como pelo de parede dupla [5]. Neste caso, a posição da fonte de radiação deve então ser central com relação ao centro do duto, como ilustra a **Figura 22**.

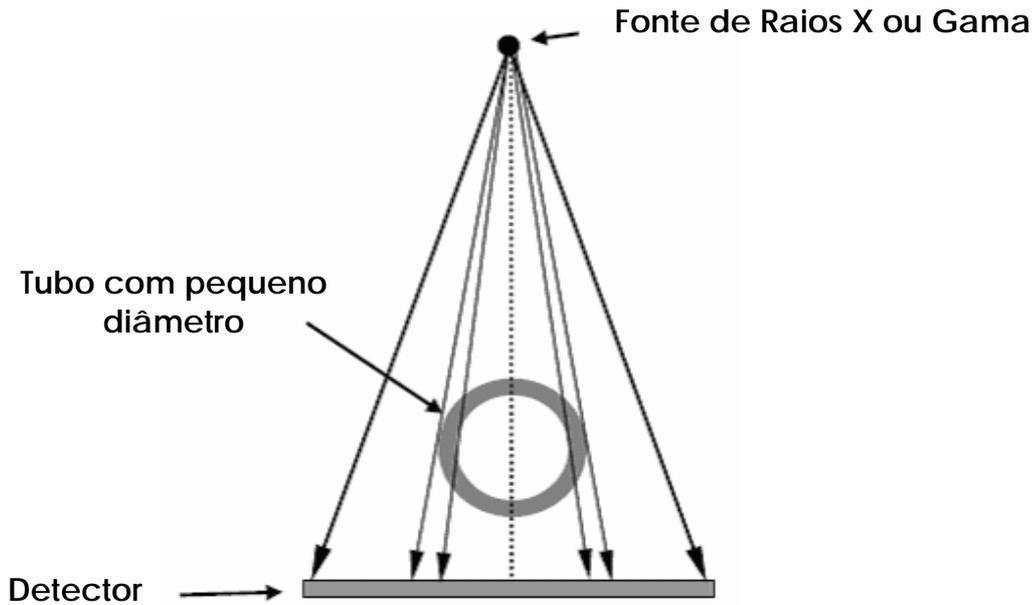


Figura 22 – Radiografia de um duto de pequeno diâmetro, combinando o método tangencial e o método de parede dupla em um único ensaio radiográfico.

Para este tipo combinado de radiografia, o método tangencial pode ser aplicado para ambos os lados do duto no mesmo ensaio, e a região central do mesmo mostrará qualquer perda de espessura de parede através do aumento na densidade no detector.

2.5 – O MÉTODO DE MONTE CARLO.

O método de Monte Carlo fornece soluções aproximadas para uma variedade de problemas físicos e matemáticos por realizar amostragens estatísticas experimentais em um computador. Em um problema de transporte de partículas, partículas individuais são simuladas e o resultado de sua história (isto é, o comportamento das partículas) é registrado e pode, por exemplo, ser utilizado para determinar o comportamento médio das partículas transportadas. Em MCNPX o resultado da vida de partículas transportadas é determinado por distribuições de probabilidades dos possíveis eventos físicos (interações, espalhamento, captura, etc.), que são randomicamente amostrados e utilizados juntos com bibliotecas de dados. Toda partícula é seguida desde sua criação até sua morte. O programa cria uma trajetória de partícula para toda partícula simples. Se uma partícula interage, novas trajetórias são criadas para a partícula antiga com uma

nova direção (e energia), e para as novas partículas criadas na interação, como mostra a **Figura 23**. Para determinar se e onde um evento ocorre, dados (como por exemplo, seção de choque e densidade) e modelos físicos são utilizados [42].

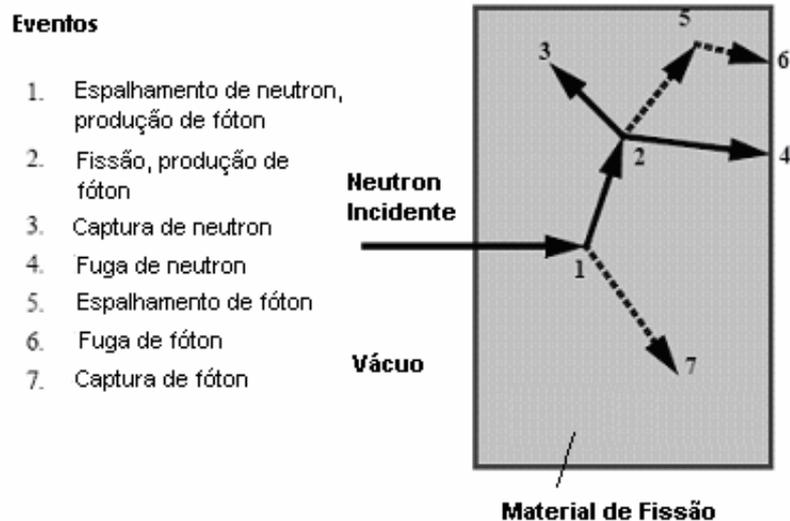


Figura 23 – Representação da história de um nêutron incidente em uma placa de material fissil.

2.5.1 – Simulações com MCNPX

Quando simulando com o MCNPX, o usuário cria um arquivo de entrada (*input*) contendo todas as informações sobre o problema que será simulado. O arquivo de entrada deve ser da seguinte forma:

Título do problema

Cell Cards (Descrição das células)

(linha em branco)

Surface Cards (Descrição das superfícies)

(linha em branco)

Data Cards (Descrição dos dados)

A geometria do setup é dividida em células. O *Cell Cards* contém as informações sobre o tipo de material que a célula é composta, a densidade na célula e a geometria da

mesma. O *Cell Cards* também pode conter informações sobre quais partículas na célula possuem importância. No *Surface Cards* todas as superfícies no problema são definidas. Estas superfícies são usadas para definir as células, através de álgebra booleana, fontes de radiação, etc. O *Data Cards* contém informações sobre a fonte (como a posição, a energia, a direção, etc.), como detectar e que tipos de partícula detectar, a composição dos materiais nas células e suas devidas proporções, número de partículas a serem simuladas e a aparência do arquivo de saída (*output*). Uma vez que o MCNPX apresenta os dados solicitados somente no arquivo de saída, o usuário precisa especificar, com comandos específicos, denominados *tally*, a informação de interesse no arquivo de entrada. O código MCNPX é hábil para simular (*tally*) o fluxo de partículas, a corrente de partículas e a energia depositada sobre superfícies ou células na geometria. Os comandos (*tally*) são normalizados para ser por partícula emitida pela fonte (exceto para alguns poucos casos como cálculos de criticalidade). Erros relativos são também apresentados. O erro relativo, denotado R , é definido ser um desvio padrão estimado da média $S_{\bar{x}}$, dividido pela média estimada \bar{x} [41]. No MCNPX, a quantidade requerida para esta estimativa do erro – o *tally* e seu segundo momento – são calculados após cada história completada pelo método de Monte Carlo, o que explica o fato de que as várias contribuições para um *tally* proveniente da mesma história são correlacionadas. Em termos simples, R pode ser descrito como uma medida da boa qualidade dos resultados calculados. Este erro relativo pode ser usado para formar intervalos de confiança sobre o principal valor estimado. Quando próximo a um número infinito de eventos, há uma chance de 68% (isto é, a 1σ de um intervalo gaussiano ao redor do valor médio) que o resultado verdadeiro esteja situado na faixa $\bar{x}(1 \pm R)$. Para um *tally* bem comportado, o erro relativo R será proporcional a $\frac{1}{N^{\frac{1}{2}}}$, onde N é o número de histórias.

Desta forma, reduzindo R a metade, o número de histórias deve aumentar o quádruplo. O erro relativo é utilizado para a avaliação dos resultados, e um guia para interpretação do erro relativo pode ser observado na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Guia para interpretação do erro relativo R [42]

Faixa de R	Qualidade do <i>Tally</i>
0,5 à 1,0	Não significativa
0,2 à 0,5	Pouco significativa
0,1 à 0,2	Questionável
<0,1	Geralmente confiável
<0,05	Geralmente confiável para detectores pontuais

2.5.2 – Simulação de ensaios radiográficos com MCNPX

MCNPX utiliza um conjunto de detectores pontuais – comando F5 - próximos o bastante uns dos outros para gerar uma imagem baseada no fluxo em cada ponto detector. Cada ponto detector representa um píxel da imagem, e a partícula que cria a imagem não necessariamente precisa ser do mesmo tipo emitido pela fonte.

Há três comandos para simulação de imagens radiográficas com MCNPX, ambos somente para nêutrons e fótons [42]:

TIR – Projecção de uma imagem transmitida em uma superfície plana (detector plano).

TIC – Projecção de uma imagem transmitida em uma superfície cilíndrica (detector curvo).

PI – Projecção de uma imagem por um pinhole.

Quando estes comandos são utilizados em conjunto com os comandos de segmentação de superfícies FSn e Cn, MCNPX cria uma grade virtual de píxels, onde milhões de detectores pontuais podem ser criados – um detector para cada píxel da grade. Ambos os comandos TIR, TIC e PI agem como um filme para uma imagem do tipo *raios X*, isto é, uma imagem transmitida para nêutrons ou fótons. Na versão MCNP5, estes comandos são designados respectivamente pelas sintaxes FIR, TIR e TIC, e também são

reconhecidos pelo código fonte do MCNPX [41]. A filosofia de formação da imagem é a mesma em ambos os códigos.

O diagrama da **Figura 24** mostra como a grade radiográfica plana TIR é definida para uma partícula fonte passando através de um objeto e espalhando no mesmo. A **Figura 25** mostra uma grade imagem cilíndrica TIC sendo definida para partículas sendo geradas dentro do objeto. Em ambos os casos, o comando FS_n é utilizado para definir os pixels ao longo do eixo vertical (eixo S das figuras) e o comando C_n define os pixels ao longo do eixo horizontal (eixo T). A matriz de pixels não deve estar em um material espalhador, pois a contribuição do espalhamento entre pixels vizinhos não é considerada por MCNPX para fins de simulação de imagens. A fluência em cada pixel é dada em partículas/cm². Acrescentado um asterisco (*) nos comandos, obtém-se o fluxo em MeV/cm².

A **Figura 26** ilustra o diagrama do comando PI para uma fonte no interior do objeto.

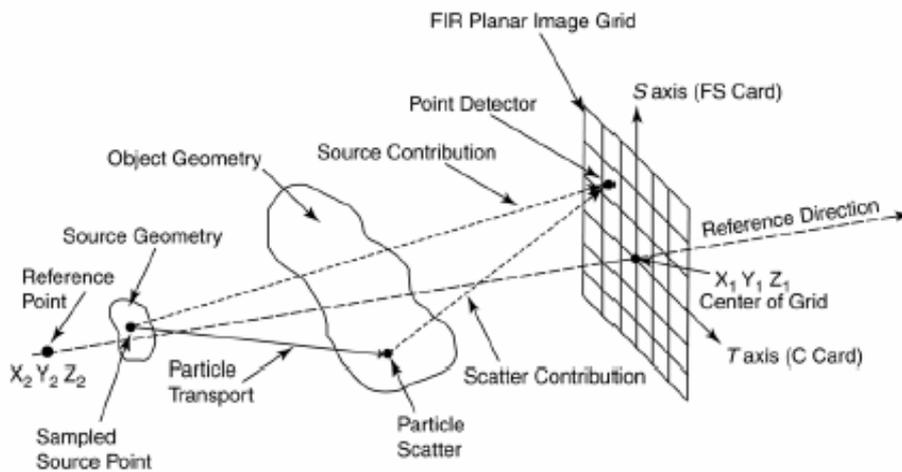


Figura 24 – Diagrama da função TIR para uma fonte externa ao objeto [42]

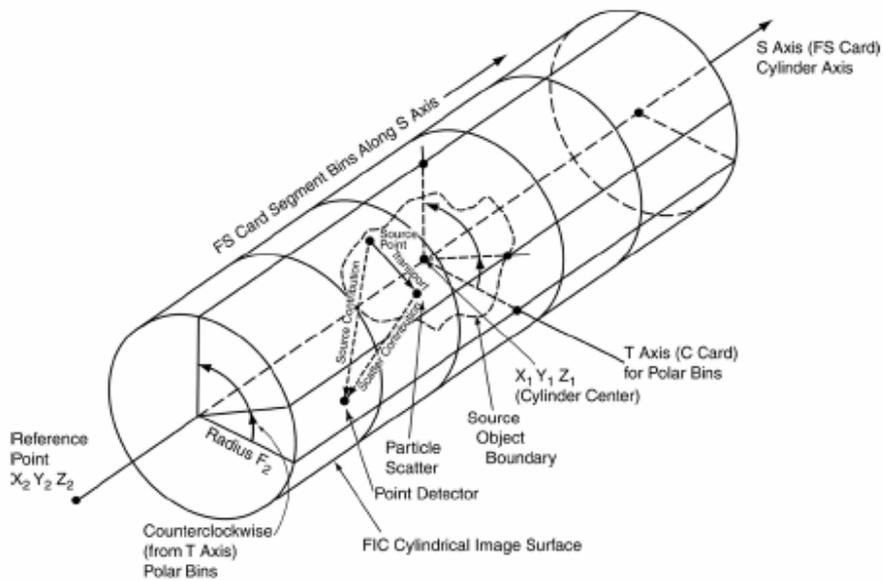


Figura 25 – Diagrama do comando TIC para uma fonte no interior do objeto [42]

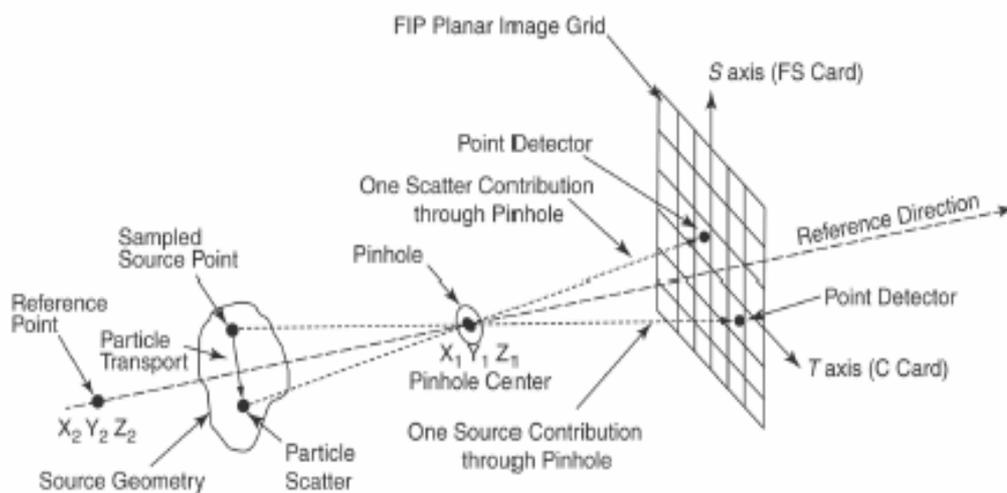


Figura 26 - Diagrama do comando PI para uma fonte no interior do objeto [42]

2.5.2.1 – Detectores pontuais (comando F5)

Um detector pontual é um estimador determinístico da fluência em um ponto no espaço. Para cada partícula da fonte e cada evento de colisão, uma estimativa determinística da contribuição da fluência é feita no ponto detector [42]. Para simplificar a descrição deste tipo de comando, consideremos que os cálculos estão sendo produzidos em um meio

uniforme. Suponhamos que uma partícula de energia E e peso W proveniente de uma fonte isotrópica é liberada a uma distância R do ponto detector. A metodologia utilizada por MCNPX dita que a contribuição $\delta\Phi$ para a fluência no ponto detector é dada por:

$$\delta\Phi = \frac{W}{4\pi R^2} e^{-\mu(E)R}, \quad (16)$$

onde $\mu(E)$ é o coeficiente de interação linear para a partícula de energia E . Note que $\frac{1}{4\pi}$ por esteroradiano é a distribuição angular de uma fonte isotrópica pontual. Agora supomos que uma colisão ocorra a uma distância R do ponto detector e que, para alcançar o ponto detector, um ângulo de espalhamento θ_s seria requerido. Aqui E é a energia da partícula após a colisão e W é seu peso. Se $\mu(E, \theta_s)$ é o coeficiente de interação linear por esteroradiano para espalhamentos em ângulos θ_s , $\frac{\mu(E, \theta_s)}{\mu(E)}$ é a probabilidade por esteroradiano para espalhamentos em ângulos θ_s . A atenuação geométrica permanece como $\frac{1}{R^2}$, e a contribuição $\delta\Phi$ na fluência no ponto detector é dado por

$$\delta\Phi = \frac{W\mu(E, \theta_s)}{\mu(E)R^2} e^{-\mu(E)R} \quad (17)$$

Se R aproxima-se de zero, o fluxo aproxima-se do infinito, causando uma singularidade que faz a variância teórica deste estimador ser infinita. A solução deste problema é dada colocando o ponto detector em uma região de vácuo, evitando colisões na proximidade do ponto detector.

2.6 – MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DE IMAGENS

O redimensionamento de imagens em níveis de cinza difere da operação de mudança de escala para pontos isolados. Nesta operação o novo valor de cinza do píxel transformado será o resultado de um cálculo sobre vários píxels da imagem original (vizinhança) – Reamostragem (*resampling*).

São três os principais métodos de interpolação utilizados para a reamostragem dos píxels para a produção de uma nova imagem a partir da imagem original [47]:

- Vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*) ou Ordem Zero;
- Bilinear;
- Bicúbico.

2.6.1 - Interpolação do vizinho mais próximo

Neste método de interpolação, o valor do nível de cinza a ser atribuído ao píxel na imagem destino, (i', j') , terá o mesmo valor do nível de cinza (contraste) do píxel mais próximo da posição na imagem original, (i, j) . Se a imagem original tem dimensões w e h a imagem destino tem w' e h' , então um ponto na imagem destino será dado pelas expressões a seguir:

$$i' = i \cdot \frac{w'}{w} \quad (18)$$

e

$$j' = j \cdot \frac{h'}{h} \quad (19)$$

Principais características:

- É um processo rápido, de fácil implementação, não alterando os valores originais de cinza (contraste);
- Podem ocorrer discontinuidades geométricas (lacunas de ordem de $\frac{1}{2}$ “píxels” na imagem corrigida). A imagem poderá ficar nos limites de áreas contínuas ou nos lineamentos com aspecto “em escadinha”.

- É o método recomendado quando a imagem resultante será usada para estudos radiométricos, classificação automática, enfim, processamentos onde a radiometria da imagem deve estar minimamente afetada ou alterada.

2.6.2 - Interpolação Bilinear

O valor do nível de cinza a ser atribuído ao píxel na imagem destino é determinado a partir do valor dos 4 píxels vizinhos na imagem original. Este método requer maior número de cálculos para determinar o valor de cada píxel de imagem corrigida, e altera o valor original dos níveis de cinza (contraste).

2.6.3 - Método de interpolação Bicúbico

Na interpolação Bicúbica, o nível de cinza a ser atribuído ao píxel na imagem destino é determinado a partir de cálculos realizados numa matriz de 16 píxels na sua vizinhança. A qualidade da imagem resultante é nitidamente superior as duas opções anteriores, pois os lineamentos e as beiras dos objetos ficam conservados, porém um pouco suavizados. Requer maior tempo de computação e provoca a degradação da qualidade radiométrica dos dados. O cálculo do novo valor digital do píxel corrigido é feito por média ponderada não linear. É recomendado para produtos que se destinam a interpretação visual, ou ampliação em produtos fotográficos.

A **Figura 27** mostra uma comparação visual dos diferentes métodos de interpolação de imagens:



Figura 27 – Comparação entre os diferentes métodos de interpolação apresentados.

Capítulo 3

Metodologia para geração, pós-processamento e reconstrução de dados

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento da metodologia utilizada para geração, pós-processamento e reconstrução de dados obtidos em simulações de ensaios radiográficos com a função radiografia do código MCNPX, e analisa a capacidade da função radiografia em reproduzir os principais fenômenos envolvidos no processo radiográfico. Para alcançar estes objetivos, foram estabelecidas as seguintes etapas:

1. O desenvolvimento de uma metodologia para pós-processamento e reconstrução de dados, de forma que estes possam ser lidos e visualizados em programas gráficos de visualização de imagens.
2. A avaliação do comportamento das diferentes contribuições da radiação que formam a imagem radiográfica em imagens simuladas com a função radiografia do MCNPX, para análise de confiabilidade.
3. O estudo da aplicação de diferentes métodos de interpolação na reamostragem da componente espalhada da radiação, para fins de otimização do tempo computacional de simulação.

No final do capítulo são apresentados os resultados para cada etapa, bem como as conclusões obtidas através das análises.

3.1 – METODOLOGIA PARA PÓS-PROCESSAMENTO E RECONSTRUÇÃO DE DADOS

Nesta tese, a versão 2.5 do código de Monte Carlo MCNPX foi utilizada. Por ser a mais atual, esta versão do MCNPX tem as vantagens das bibliotecas de seção de choque serem avaliadas para quase todos os isótopos, ser muito flexível na construção de geometrias complexas e fornecer uma variedade de possibilidades de análises, incluindo avaliações estatísticas. Nesta versão do MCNPX também foram incluídas novas técnicas de redução de variância e transporte de radiação, permitindo a correção de deficiências encontradas nas demais versões do código MCNP. Outra vantagem é a incorporação do software de visualização de geometrias Visual Editor [58], antes presente somente na versão MCNP5. Este software permite a visualização em 3-D do set-up de radiação, bem como a visualização da emissão da radiação da fonte e sua interação com o objeto em teste. Esta última característica foi de extrema importância para uma conferência visual do processo de irradiação modelado.

Outro aspecto importante considerado neste trabalho é o tempo computacional. O tempo computacional em simulações de Monte Carlo depende de muitos fatores, mas este é basicamente dado pela acurácia pretendida dos resultados. Uma vez que o Monte Carlo é um método estatístico, a acurácia dos resultados é proporcional a raiz quadrada do número de radiações emitidas pela fonte. Semelhantemente, como as histórias das radiações emitidas são independentes, a acurácia dos resultados obtidos também é proporcional a raiz quadrada do tempo computacional. Uma vez que para se obter uma elevada acurácia em detectores é necessária uma grande quantidade de radiação, de modo que a estatística de radiações em cada píxel seja razoável, uma estratégia utilizada para conseguir resultados acurados com tempos computacionais aceitáveis foi a modelagem de amostras de formas geométricas simples (discos, caixas, etc), formados por substâncias também simples (alumínio), sempre que possível. Esta estratégia foi utilizada visando simplificar o transporte da radiação dentro dos objetos de teste e conseqüente redução do tempo computacional nesta etapa da simulação, transferindo para a resolução da grade detectora o principal fator para casuais elevações dos tempos de simulação. Entretanto, geometrias complexas, bem como a utilização de substâncias compostas como o aço para a composição das amostras, também foram avaliados neste trabalho.

Como a função radiografia do MCNPX é baseada em detectores pontuais (*tally F5*), os resultados foram considerados acurados quando o erro relativo dos resultados foi menor do que 0,05, como indicado na **Tabela 2**. Todas as simulações produzidas neste trabalho foram realizadas em um computador *Intel Pentium D*, 64 bit, com 1 GB de memória DDR2, com MCNPX instalado na plataforma *Microsoft Windows XP*, pertencente ao Laboratório de Neutronografia e Radiografia em Tempo Real – LNRTR.

3.1.1 – Produção do arquivo de input e pós-processamento de dados obtidos com a função radiografia

Embora o MCNPX ofereça uma interface amigável ao usuário, e resultados de fácil interpretação das principais grandezas (*tallies*) que calcula, alguns cuidados devem ser tomados para a produção de arquivos de *input* de simulações com a função radiografia, bem como para a visualização e análise dos resultados obtidos.

Diferentemente das rotinas de cálculo de fluxo, fluência e corrente de partículas, que fornecem resultados individuais por célula ou superfície que compõe a geometria de irradiação, a necessidade de simular detectores com um grande número de *pixels* faz com que a quantidade de informações obtidas no *output* de simulações com a função radiografia seja proporcional ao número de *pixels* do detector, e conseqüentemente um grande número de dados é fornecido em uma única simulação. Além da informação principal desejada, o MCNPX gera automaticamente um relatório padrão de toda a física aplicada ao problema simulado, bem como informações referentes às análises estatísticas realizadas durante a simulação, gerando um arquivo de saída de dimensões computacionais superiores a capacidade de visualização dos principais editores de texto avaliados na literatura. A fim de solucionar este problema, foi utilizado o comando *TALNP*, que reduz o número de informações contidas no arquivo de saída, permitindo sua visualização em editores de texto como bloco de notas. Outro recurso utilizado neste trabalho foi a utilização do comando *PRDMP*. Com este comando, um segundo arquivo de saída, denominado *MCTAL*, que não contém o relatório padrão fornecido pelo código MCNPX e dispõe os resultados de uma forma mais amigável para o usuário é gerado, permitindo maior agilidade na análise dos resultados obtidos. Para fins de análise de dados, somente as informações contidas no arquivo *MCTAL* foram utilizadas.

Embora o arquivo de saída *MCTAL* seja simplificado, diferentes passos devem ser tomados para processar os dados e formar a imagem final simulada, devido ao grande

número de informações ainda existente neste arquivo que não contribuem para a reconstrução da imagem. Uma solução para este problema é a utilização de programas de pós-processamento de dados.

Programas de pós-processamento de dados tratam os dados originais obtidos na simulação, e converte em formatos compatíveis para uso com outros *softwares*. Frequentemente são escritos em linguagens de programação como C⁺⁺, FORTRAN, PASCAL ou ASSEMBLER, e requerem alto conhecimento de programação destas linguagens por parte do usuário. Programas de pós-processamento também necessitam do código fonte da linguagem de programação para funcionar, tornando inviável sua utilização em outros computadores onde o código fonte não esteja instalado.

A fim de tratar os dados de simulações radiográficas obtidos neste trabalho, um programa de pós-processamento de dados denominado **PROGRAMA MATRIZ** [59,60] foi criado.

A **Figura 28** mostra a interface do **PROGRAMA MATRIZ**.



Figura 28 – Interface do **PROGRAMA MATRIZ**.

O **PROGRAMA MATRIZ** é um programa de pós-processamento de dados desenvolvido através do código LABVIEW, que converte o arquivo *MCTAL* de simulações de imagens radiográficas com MCNPX para formatos de leitura compatíveis com vários programas gráficos externos. O LABVIEW (*Laboratory Visual Instrument Engeneering Workbench*) usa a linguagem de programação gráfica G para criar programas chamados *Virtual Instruments* ou *VI* em um diagrama de blocos próprio que elimina muitos detalhes de outras linguagens de programação que usam a base texto como forma de programação. O LABVIEW também inclui muitas ferramentas para aquisição de dados, análise e visualização de resultados e bibliotecas para geração de sinais, processamento de sinais, filtragem e tratamento estatístico. O LABVIEW é avaliado para todos os maiores sistemas operacionais existentes, e pode gerar arquivos executáveis que funcionam mesmo em computadores onde o código não esteja instalado. Segue abaixo algumas características do **PROGRAMA MATRIZ**:

- O programa é um executável, isto é, funciona sem o código fonte do *LABVIEW*;
- O usuário não necessita programar no *LABVIEW*;
- O programa tem uma interface gráfica amigável;
- É compatível com vários programas gráficos como Matlab, TecPlot e GNUPlot;
- Fornece o maior e o menor valor de *pixel* da matriz imagem, para fins de normalizações;
- Permite a obtenção de dados para formação de imagens em negativo e positivo (inversão de imagens);
- Fornece o arquivo pós-processado nos formatos doc, xls, e txt;
- É compatível com arquivos *MCTAL* de outras funções do MCNP como *Lattice* e *Mesh Tallies*.

Duas formas do comando para simulação radiográfica com o código MCNPX foram utilizadas neste trabalho: A função TIR, que reproduz um detector plano, e a função TIC, que reproduz um detector de forma curva. Considerando que a avaliação do desempenho da função radiografia em registrar as diferentes componentes de radiação que formam a imagem é uma das metas deste trabalho, todas as simulações direcionadas a este propósito foram realizadas considerando a grade detectora como um detector ideal, isto é, com eficiência de 100% e sem material sensível. Neste caso, todas as radiações incidentes no detector foram detectadas pelo mesmo. Uma vez que a grade

detectora virtual simulada não pode estar localizada em uma região que contenha algum material espalhador, e conseqüentemente não possua volume ativo, a mesma foi colocada em um invólucro com vácuo. Uma vez processados pelo **PROGRAMA MATRIZ**, os dados de simulações radiográficas produzidos neste trabalho foram convertidos para imagens através da função *imagesc* do programa MATLAB acrescida do comando *colormap(gray)*, que converte os dados pós-processados em uma imagem bidimensional em escala de níveis de cinza. Os níveis de cinza nas imagens não são valores absolutos, mas valores equalizados entre um valor máximo e um valor mínimo da imagem.

3.2 – ANÁLISE DAS COMPONENTES DIRETA E ESPALHADA DE IMAGENS OBTIDAS COM A FUNÇÃO RADIOGRAFIA DO CÓDIGO MCNPX

A qualidade de uma imagem depende fundamentalmente da habilidade do sistema de aquisição (detector) reproduzir cada ponto simples no objeto [61]. Sendo assim, uma análise das diferentes contribuições direta e espalhada da radiação para a imagem resultante sugere os benefícios de seu tratamento distintivo na análise do sistema de aquisição de imagens.

Uma imagem radiográfica pode ser considerada como o resultado da superposição de três diferentes mecanismos de interação entre o feixe de radiação e a amostra investigada: o fluxo de radiação que colide com a amostra, o fluxo de radiação que não colide com a amostra e o fluxo de radiação não modificado.

O fluxo de radiação que colide com a amostra corresponde a componente do feixe incidente de radiação que alcança o detector após ser espalhado na amostra; o fluxo de radiação que não colide com a amostra corresponde a componente da radiação que penetra a amostra sem interagir com esta e o fluxo não modificado corresponde a componente da radiação que alcança o detector sem penetrar a amostra, isto é, a área do feixe de radiação onde a amostra investigada não está presente [61]. O fluxo de radiação que não colide com a amostra, também chamado de radiação direta ou primária, é responsável pela projeção do objeto sobre o detector. Já o fluxo que colide com a amostra, isto é, a radiação espalhada, contribui para esta imagem de forma destrutiva, adicionando ruído e reduzindo o contraste na imagem.

Em uma imagem digital, a distribuição espacial da radiação é dividida em uma matriz bidimensional de células, onde cada célula individual desta matriz representa um *pixel*

que forma a imagem. Estes *píxels* são *bins* (pacotes) em que a radiação (direta + espalhada) é contada ou sua energia depositada. A distribuição da radiação ou energia em um único *pixel* da imagem é definida como Função de Distribuição da radiação em um Ponto, ou *Point Spread Function* - PSF de um detector [61,62]. Sendo assim, o processo da formação de uma imagem radiográfica pode ser descrito como a superposição de PSFs no plano imagem. Se a mesma discretização utilizada para o detector na definição de PSF for utilizada também para a fonte, isto é, quando o detector for irradiado por um feixe de radiação linear e estreito, a PSF pode ser representada como a soma da componente da radiação que penetra na amostra sem colidir com a mesma com a componente de radiação espalhada pela amostra.

A integral da PSF sobre uma linha no detector ou o perfil da superposição de PSFs recebe o nome de *Line Spread Function* – LSF ou função de distribuição da radiação em uma linha. Ao analisar a distribuição da radiação na PSF que correspondente somente a parte da radiação espalhada pela amostra definimos a *Point Scattered Function* (PScF) ou Função de Espalhamento em um Ponto. A superposição de PScFs corresponde a contribuição da radiação espalhada na imagem radiográfica, e o perfil desta superposição é chamada de *Line Scattered Function* (LScF), ou função de distribuição da radiação espalhada em uma linha [62,63,64].

A utilidade dos conceitos de PSF, LSF, PScF e LScF acima descritos consiste no fato de que análises de como estruturas complicadas são reproduzidas podem ser reduzidas a investigar a reprodução de objetos simples como pontos e linhas, facilitando a compreensão dos diferentes fenômenos existentes no processo de formação de uma imagem radiográfica, e conseqüentemente o estudo de sistemas de detecção. As seções seguintes descrevem a metodologia utilizada para análise de componentes de imagens radiográficas obtidas com detectores simulados com a função radiografia do MCNPX.

3.2.1 – Análise da componente do feixe de radiação incidente que não colide com a amostra – componente direta da radiação

Imagens foram analisadas para verificação do comportamento da grade detectora em registrar a componente direta da radiação. Para obtenção destas imagens, o comando *NOTRN* do MCNPX foi utilizado, de forma que a radiação espalhada não contribuiu para a formação da imagem final. Uma vez que a componente direta da radiação é a responsável pela reprodução, com alto detalhe, dos componentes de alta frequência da

amostra irradiada na imagem projetada, parâmetros geométricos e físicos nas imagens simuladas foram estudados, como segue. O detector foi modelado com *pixels* quadrados de 100 μm de lado.

3.2.1.1 – Cálculo de penumbra geométrica

Imagens radiográficas de um disco de alumínio com 1 cm de diâmetro e 0,1 cm de espessura foram simuladas para análise de penumbra. A distância fonte-objeto utilizada foi de 100 cm, e as distâncias objeto-detector foram de 25 cm e 50 cm respectivamente. A fonte de radiação é um disco de diâmetro igual a 0,3 cm, com energia de 60 keV. A **Figura 29** mostra a geometria utilizada na determinação da penumbra geométrica:

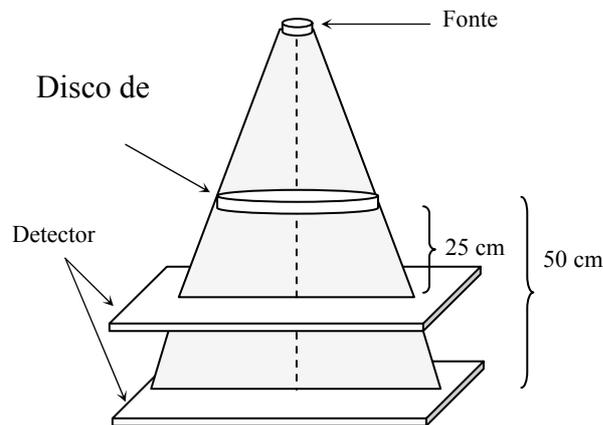


Figura 29 - Geometria utilizada para a determinação da penumbra geométrica

As penumbras nas imagens simuladas foram obtidas através da análise de perfis, e as penumbras analíticas foram calculadas através das equações [49]:

$$U_g = F(M - 1) \quad (20)$$

$$M = \frac{(a + b)}{a} \quad (21)$$

Onde:

U_g = penumbra geométrica.

M = Magnificação.

F = Tamanho focal.

a = distância fonte-detector.

b = distância objeto detector.

3.2.1.2 – Análise de Contraste

O contraste é definido como a diferença no número de radiações emergindo de regiões adjacentes do material ou objeto sendo irradiado e reflete diferenças em número atômico, densidade, densidade de elétrons, espessura bem como espectro de energia do feixe de radiação emitido pela fonte [49]. Por exemplo, se atrás do objeto de teste a fluência de radiação Φ_1 é medida em uma área enquanto a fluência de radiação Φ_2 é medida em uma área adjacente, o contraste radiográfico $C(\Phi)$ pode ser definido como:

$$C(\Phi) = \frac{\Delta\Phi}{\Phi_1} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Phi_1}, \quad (22)$$

onde a diferença $\Phi_2 - \Phi_1$ é a *diferença de sinais* entre regiões adjacentes em uma imagem. Para um objeto opaco, onde $\Phi_2 = 0$ e $C = -1$, o contraste radiográfico pode ser considerado 100%. Quando $\Phi_1 < \Phi_2$, o contraste é positivo e pode exceder 100%. Se $\Phi_1 = \Phi_2$, o objeto não pode ser diferenciado do seu *background*.

Para verificar o comportamento do contraste, análises qualitativas e quantitativas foram realizadas em imagens obtidas com a função radiografia, para diferentes espessuras e energia de fótons. O *setup* de irradiação consiste de um corpo de prova de alumínio escalonado de cinco degraus com alturas de 2,5, 2, 1,5, 1 e 0,5 cm respectivamente. Cada degrau contém dois cilindros de diâmetro igual a 0,635 cm, e alturas de 0,1016 e 0,0508 cm [65], com vácuo em seu interior, como mostra a **Figura 30 (a) e (b)**.

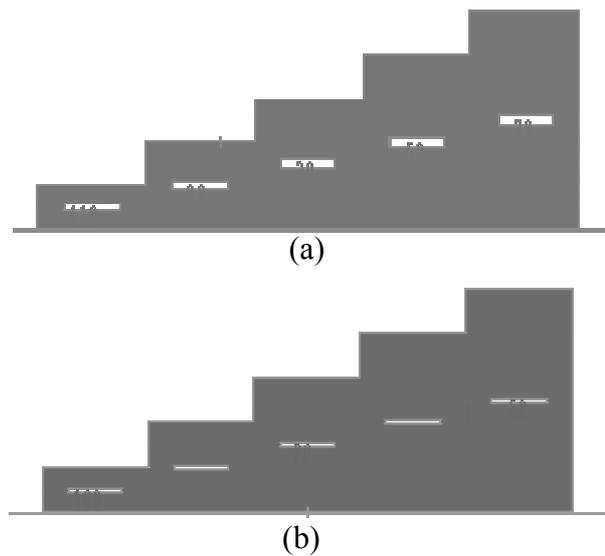


Figura 30 – Cortes laterais do degrau simulado. Em (a) observa-se os cilindros de 0,1016 cm de altura e em (b) os de 0,0508 cm

A distância fonte detector utilizada foi de 150 cm, com o detector colocado próximo ao objeto. A fonte é um disco de diâmetro igual a 0,3 cm. As imagens foram obtidas para energias de 30 keV, 60 keV e 90 keV. As irradiações foram produzidas com degraus de alumínio contendo cilindros de ar. Uma vez que o detector é virtual, o efeito do material sensível do detector não foi considerado nesta simulação. Efeitos relacionados a influência da radiação espalhada no detector também não foram analisados nesta etapa do trabalho.

3.2.2 – Análise da componente espalhada do feixe de radiação na formação da imagem

Muitos parâmetros do cenário radiográfico podem influenciar a forma e a contribuição da radiação espalhada. A energia da fonte bem como a composição e a espessura do objeto exerce uma influência importante no fenômeno, pois influencia diretamente a quantidade de radiações e o ângulo de saída do feixe que emerge do objeto de teste. O espalhamento na imagem é também altamente dependente da posição, especialmente da distância entre o objeto e o detector, de forma que quando o objeto está próximo do detector um maior número de radiações espalhadas é detectado, e a imagem associada é uma representação próxima do objeto.

A **Figura 31** ilustra a geometria padrão utilizada para determinação das PSF [61,64]:

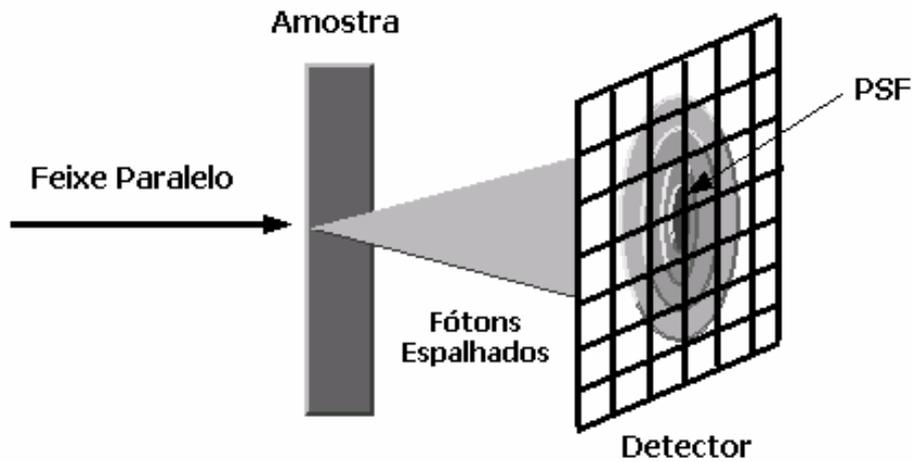


Figura 31 – Arranjo modelado para obtenção das PSF e suas respectivas PScF e LScF

A geometria consiste de um fantoma homogêneo de placas paralelas de área infinita (50x50 cm aproximadamente), sendo irradiado por um feixe estreito de radiação não divergente incidindo normalmente na superfície do fantoma. As PScF obtidas correspondem a distribuição espacial de fótons espalhados sobre a superfície da grade detectora.

Para obtenção das imagens radiográficas, a placa foi considerada de aço, sendo irradiada por uma fonte de radiação com o espectro do Irídio-192 (^{192}Ir). A escolha deste material bem como deste espectro de energia foi baseada no fato de que a maior parte dos espécimes inspecionados na indústria é constituída de aço, e que geralmente utiliza-se o radioisótopo ^{192}Ir nestas inspeções. Considerando que a probabilidade de ocorrer espalhamento para esta configuração é considerável, os resultados obtidos também servirão de base para uma validação direta da aplicação da função radiografia do código MCNPX para fins industriais, e para verificação da eficiência da grade detectora em reproduzir imagens de objetos formados por substâncias com diferentes seções de choque (substâncias compostas), irradiadas por feixes que não sejam monoenergéticos.

As seções seguintes descrevem os principais fatores analisados para verificação da capacidade da função radiografia em registrar a contribuição da componente espalhada da radiação na formação da imagem radiográfica. A grade detectora modelada é formada por uma matriz virtual de 51x51 *pixels* de 0,2 cm² de área. Estes *pixel* são

maiores do que os utilizados em situações reais, a fim de se obter resultados estatisticamente confiáveis com tempos computacionais aceitáveis.

3.2.2.1 – Análise da distribuição espacial da radiação espalhada para diferentes espessuras

Resultados experimentais da distribuição da radiação espalhada em imagens radiográficas por diversos grupos de pesquisa têm mostrado que a distribuição espacial da PScF em um sistema de aquisição de imagens é rotacionalmente simétrica [62,66,67]. Análises de perfis de imagens espalhadas, isto é, a LScF, também mostraram que a forma da PScF foi considerada a mesma tanto na direção vertical como na horizontal [67].

A fim de analisar o comportamento da distribuição espacial da radiação espalhada em função da espessura do material em imagens simuladas com a função radiografia do código MCNPX, PScF foram obtidas utilizando diferentes espessuras de aço. A distância objeto detector foi de 0,2 cm. Os perfis verticais e horizontais nas imagens foram obtidos por medir as LScF das PScF simuladas.

3.2.2.2 – Análise do comportamento da radiação espalhada em função da distância objeto-detector

Um dos aspectos importante com relação ao estudo do espalhamento é a posição do detector relativo ao objeto espalhador. Esta distância determina a magnitude da componente do espalhamento no sinal medido pelo detector [44,64]. Para verificar este efeito, análises do comportamento da magnitude da componente da radiação espalhada na grade detectora foram feitas através de LScF obtidas para diferentes distâncias objeto-detector. A espessura da placa para esta análise foi de 0,3 cm. Variações da razão da radiação espalhada pela radiação direta, para diferentes distâncias objeto-detector também foram analisadas. As LScF obtidas foram moduladas por uma função gaussiana para melhor comparação qualitativa. A função gaussiana foi escolhida devido a semelhança desta função com perfis de espalhamento para grandes ângulos de colisão [44,68]. Análises da largura a meia altura (FWHM) e as áreas em baixo dos respectivos perfis também foram feitas para análises quantitativas.

3.3 – ANÁLISES DOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO UTILIZADOS PARA REAMOSTRAGEM DE IMAGENS

Um caminho usual para reduzir o tempo computacional consumido na simulação do processo de espalhamento em modelagens de ensaios radiográficos é simular em separado a componente direta e espalhada da radiação incidente no detector. Neste caso a radiação espalhada, que consome mais tempo na simulação devido a grande quantidade de fótons necessários para se reduzir a incerteza estatística inerente ao método de Monte Carlo, é modelada utilizando pixels de dimensões muito maiores que o dá imagem direta, com redução do número de pixels do detector e principalmente redução no tempo de simulação. Esta imagem da componente espalhada é redimensionada para a dimensão da imagem direta, para posterior combinação de ambas as imagens para formar a imagem final, reduzindo assim o tempo de simulação.

A contribuição da radiação espalhado no detector pode ser decomposta em duas componentes principais, como mostra a **Equação 17** [46]:

$$Esp = Esp_{ideal} + Esp_{ruído}, \quad (23)$$

onde Esp_{ideal} é a imagem formada pelo fluência de radiação espalhada sem a contribuição do ruído e $Esp_{ruído}$ é a contribuição do ruído na imagem. Esp_{ideal} corresponde à intensidade (magnitude) da radiação espalhada, e obedece a uma distribuição Gaussiana quando o número de fótons é muito grande. Para objetos muito próximos do detector a projeção desta componente da radiação no mesmo pode dar origem a uma imagem próxima a do objeto irradiado. $Esp_{ruído}$ corresponde ao ruído oriundo do próprio processo aleatório de distribuição da radiação espalhada na superfície do detector. Para um número de fótons pequeno, o ruído aparece como uma soma contínua de leis de Poisson, tendendo a uma distribuição Gaussiana com o aumento do número de fótons [46].

Como visto nos capítulos 1 e 2, há três métodos diferentes de interpolação para dados bidimensionais: método de interpolação do vizinho mais próximo, método de interpolação bilinear e método de interpolação bicúbico. Estes métodos tomam amostras da imagem original e seus correspondentes valores de intensidade como *input* e calculam os elementos da nova imagem, através de metodologias diferentes [47].

A fim de estudar os diferentes métodos de interpolação de imagens e suas influências na qualidade de imagens redimensionadas, análises do comportamento de Esp_{ideal} e $Esp_{ruído}$ em imagens de um disco de alumínio de diâmetro igual a 1 cm e espessura igual a 0,1 cm foram realizadas e comparadas com o comportamento de Esp_{ideal} e $Esp_{ruído}$ de imagens com tamanho normal de píxels. As irradiações foram simuladas reproduzindo uma fonte pontual de 30 keV localizada a uma distância de 30 cm do disco. A distância objeto-detector utilizada foi de 0,5 cm, de forma que um número máximo de fótons contribua para a formação da imagem espalhada. As imagens foram obtidas com resoluções de 250, 500 e 700 microns respectivamente, e comparadas com imagens obtidas com resolução de 100 microns. Somente a radiação espalhada foi simulada com MCNPX. A **Figura 32** ilustra o setup de simulação.

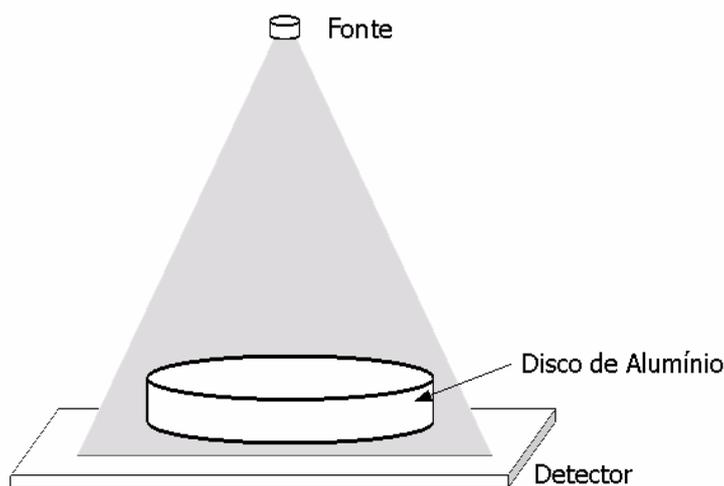


Figura 32 – Arranjo modelado para a análise do processo de soma de imagens

As componentes Esp_{ideal} e $Esp_{ruído}$ foram separadas de Esp utilizando o filtro de *Butterworth* [68], implementados no programa LABVIEW. A componente Esp_{ideal} foi obtida usando um filtro tipo passa baixa e a componente $Esp_{ruído}$ um passa alta.

A análise da componente Esp_{ideal} foi realizada através dos perfis de radiação espalhada, e a componente $Esp_{ruído}$ através do teste de hipótese de *Fisher* [56,70]. Análises estatísticas também foram realizadas com o auxílio do programa R versão 1.6.2 (disponível gratuitamente na internet no endereço: <http://www.r-project.org>).

3.4 – ANÁLISES DOS RESULTADOS

3.4.1 – Análise da componente direta da radiação na imagem simulada

3.4.1.1 – Penumbra geométrica

A **Figura 33 (a)** e **(b)** mostra a imagem simulada do disco de alumínio, e seus respectivos perfis. O tempo de simulação para obtenção de cada imagem foi de 5 minutos.

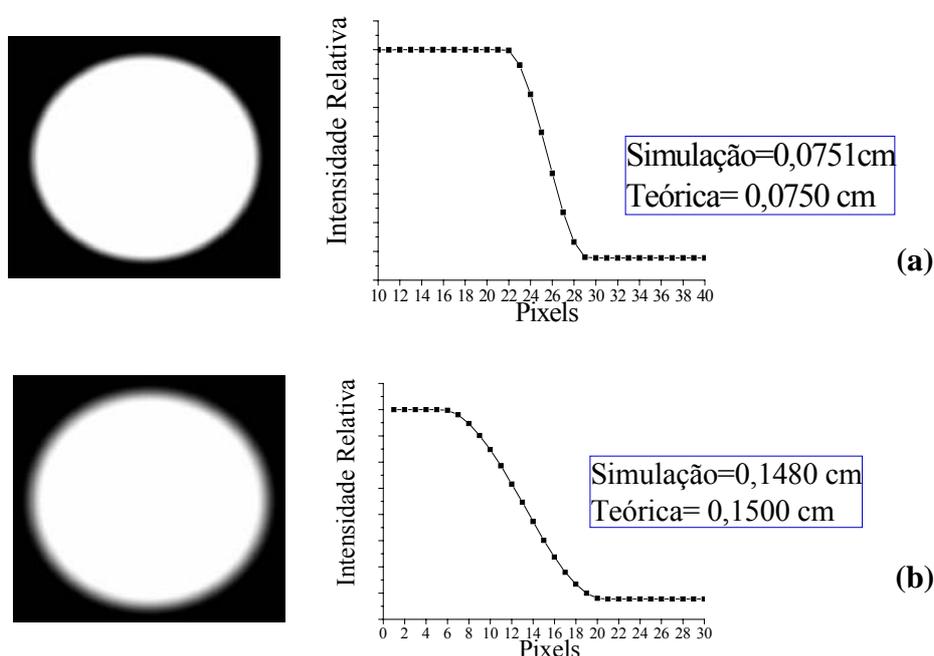


Figura 33 – Imagens e perfis do disco de alumínio: a) distância objeto-detector 25 cm, e b) distância objeto-detector 50 cm.

A análise dos perfis da **Figura 33** apresentou valores de penumbra de 0,0751 e 0,148 cm respectivamente. Os resultados simulados mostraram boa concordância com os valores analíticos, 0,075 cm e 0,15 cm, com uma diferença percentual de apenas 0,1% e 1,3%, mostrando que a grade virtual reproduz as características geométricas do processo radiográfico.

3.4.1.2 – Contraste

A **Figura 34** mostra as imagens simuladas do corpo de prova escalonado para diferentes energias. A menor visibilidade na imagem obtida com 30 keV se deve ao fato de todas as imagens terem sido plotadas juntas, em uma mesma escala de nível de cinza.

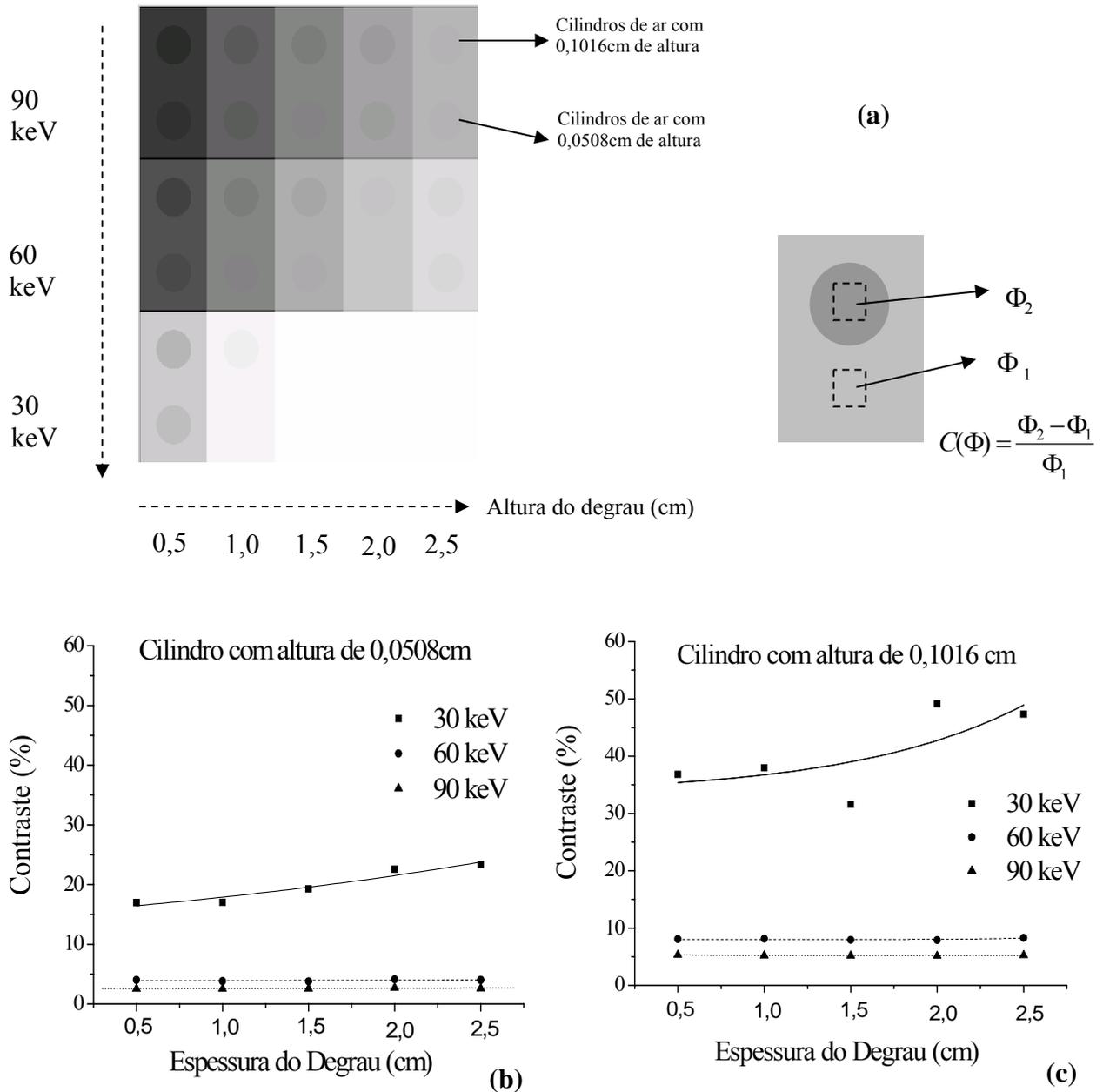


Figura 34 – Imagem do corpo de prova escalonado para energias de 30, 60 e 90 keV. Em (a), a imagem do corpo de prova e a metodologia utilizada para a obtenção do contraste. Em (b) e (c) a distribuição do contraste para os cilindros de 0,0508 cm e 0,1016 cm de altura. O tempo de simulação das imagens foi de 15 minutos

Observa-se que a visualização dos cilindros de 0,1016 cm de altura é melhor que a dos cilindros de 0,0508 cm, mostrando o efeito da atenuação da radiação para diferentes espessuras de um mesmo material. Estes comportamentos podem ser explicados quantitativamente através dos valores de contraste constantes na **Figuras 34 (b) e (c)**, onde há uma menor atenuação dos fótons por parte dos cilindros de 0,1016 cm, resultando em um contraste maior para esta configuração. Também se observa que o contraste diminui com o aumento da energia dos fótons e aumenta com a espessura do degrau. Este comportamento é esperado uma vez que o número de fótons que atravessam um material aumenta com a energia, e que a diferença relativa de sinais aumenta com a espessura.

3.4.2 – Análise da componente espalhada da radiação na imagem simulada

3.4.2.1 – Distribuição espacial da radiação espalhada para diferentes espessuras de material

A **Figura 35** mostra o comportamento das LScF para diferentes espessuras de aço. Observa-se que a grade detectora virtual reproduz o comportamento rotacionalmente simétrico da distribuição da radiação espalhada no detector, uma vez que as LScF verticais e horizontais foram aproximadamente as mesmas em todas as espessuras estudadas, como mostra as **Figuras 35 (a), (b) e (c)**. Outro comportamento reproduzido é a variação da magnitude do espalhamento com a espessura do material irradiado. Observa-se que com o aumento da espessura do material, a LScF tende a ter um alargamento na cauda e um pico mais pronunciado, que após um patamar de espessura tende a diminuir, como mostra a **Figura 35 (d)**, mostrando que efeitos como auto-absorção são reproduzidos nas simulações.

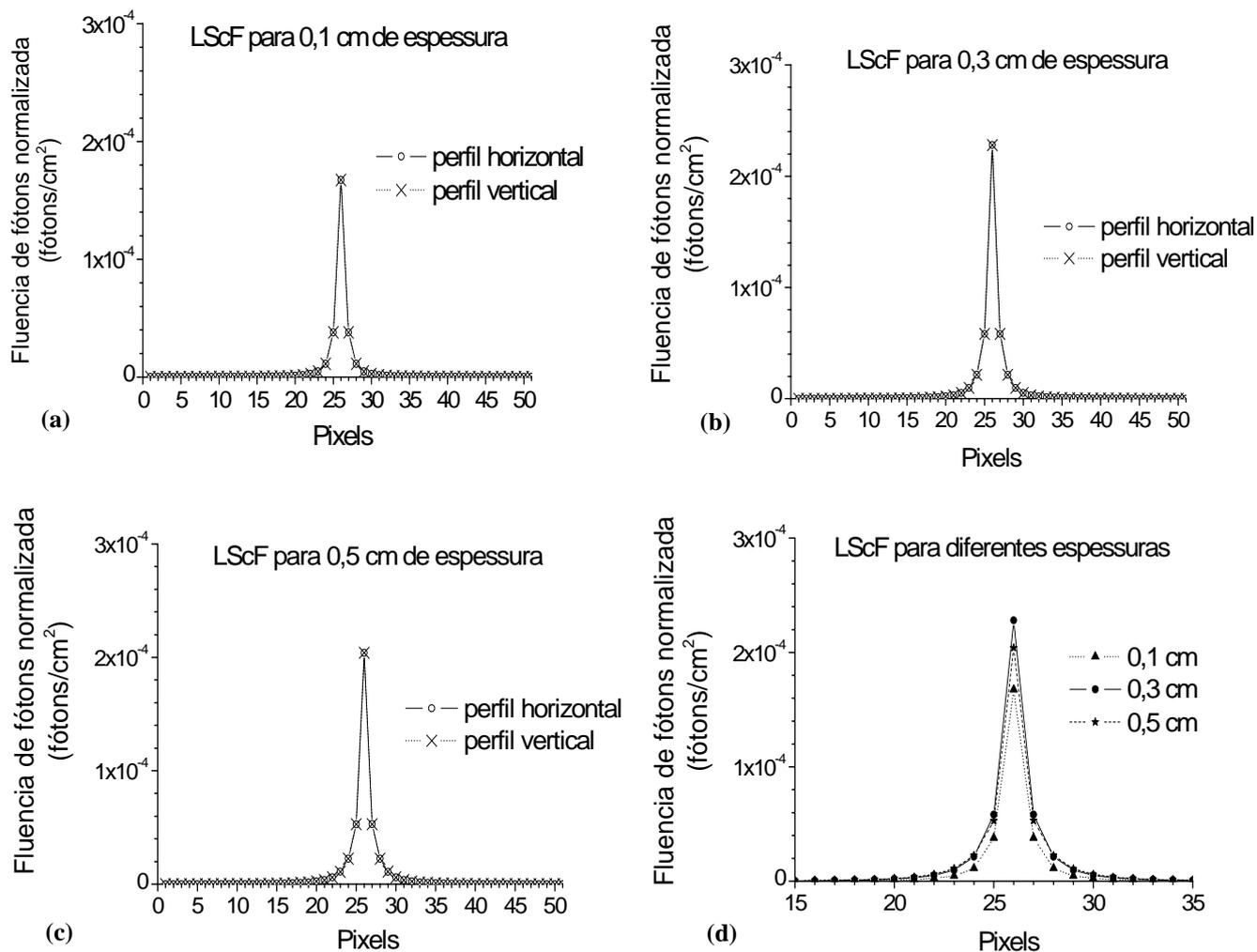


Figura 35 – Análise das LScF obtidas em diferentes posições no plano imagem para espessuras de material de (a) 0,1 cm, (b) 0,3 cm e (c) 0,5 cm e (d) comparação das respectivas LScF.

3.4.2.2 – Distribuição espacial da radiação espalhada em função da distância objeto-detector

A distribuição da radiação espalhada para diferentes distâncias objeto-detector é observada na **Figura 36**.

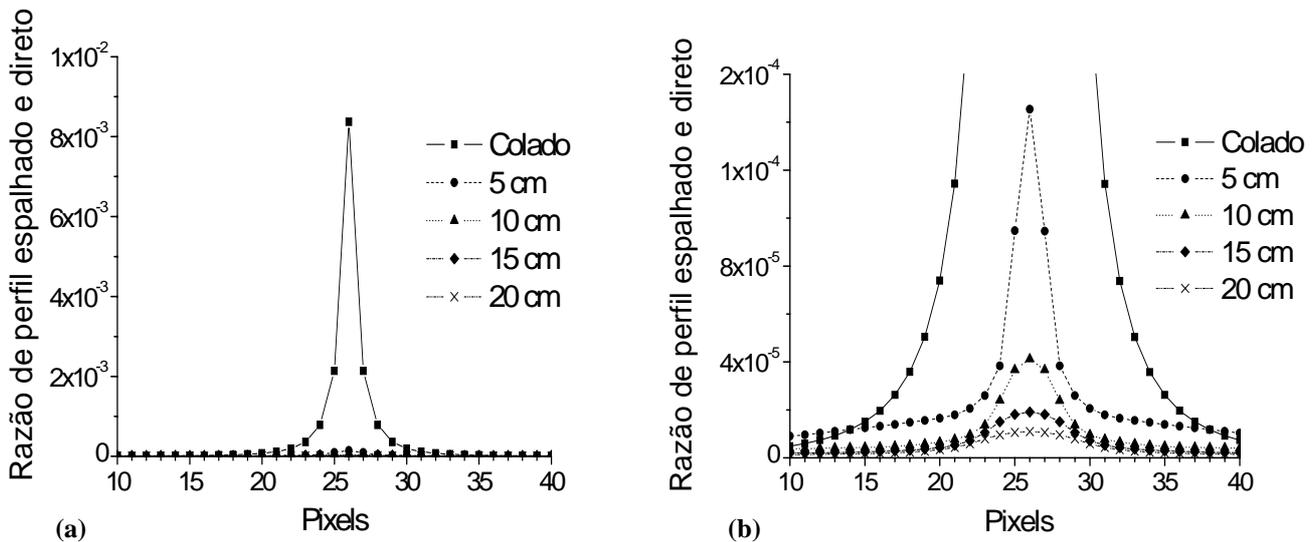


Figura 36 – Distribuição espacial da LScF em função da distância objeto-detector. Em (a) observa-se o comportamento da magnitude da radiação espalhada no detector com o aumento da distância objeto-detector. Em (b) os valores são magnificados para uma melhor visualização dos resultados.

As **Figuras 36** realçam as diferenças na contribuição e na forma do espectro de distribuição da radiação espalhada com o aumento da distância objeto-detector. Os resultados confirmam que a maior contribuição do espalhamento ocorre para a configuração com o detector junto ao objeto (0 cm), e mostram que a distribuição da radiação espalhada se dá em torno de um *pixel* central do detector quando este está junto ao objeto, devido aos pequenos ângulos de espalhamento. As figuras também mostram que a distribuição diminui rápida e homogênea com o aumento da distância objeto-detector obedecendo a uma distribuição gaussiana, devido aos grandes ângulos de espalhamento para esta configuração. A **Figura 37** compara as larguras a meia altura (FWHM) das diferentes distribuições.

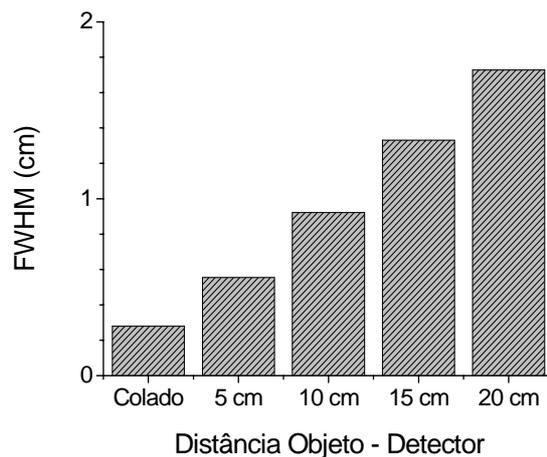


Figura 37 – Largura a meia altura das LScF em função da distância objeto-detector.

Embora a maior contribuição da radiação espalhada no detector ocorra quando este está junto ao objeto, a FWHM da LScF para o detector a 20 cm do objeto apresenta-se como a maior devido a uma distribuição mais homogênea da radiação espalhada no detector, mostrando que a função radiografia do código MCNPX consegue reproduzir todos os fenômenos relevantes relacionados ao fenômeno do espalhamento em sistemas de aquisição de imagens.

3.4.3 – Análise dos diferentes métodos de interpolação

3.4.3.1 Análise da componente formada pelo fluxo de radiação espalhada – Esp_{ideal}

Na **Figura 38** são apresentados os perfis de espalhamento de imagens redimensionadas através dos métodos de interpolações estudados, assim como suas respectivas frequências acumuladas.

Através desta figura pode-se observar que os perfis e suas respectivas frequências acumuladas possuem comportamento semelhante para todos os tamanhos de *pixel* e métodos de interpolação avaliados. Dentre os métodos de interpolação, entretanto, observou-se melhores resultados para o método de interpolação do vizinho mais próximo, o que é aceitável uma vez este método apenas reproduz informações já existentes nas imagens, enquanto os demais métodos suavizam as informações contidas na imagem e podem alterar pequenos detalhes nas mesmas, como visto no **Capítulo 2**.

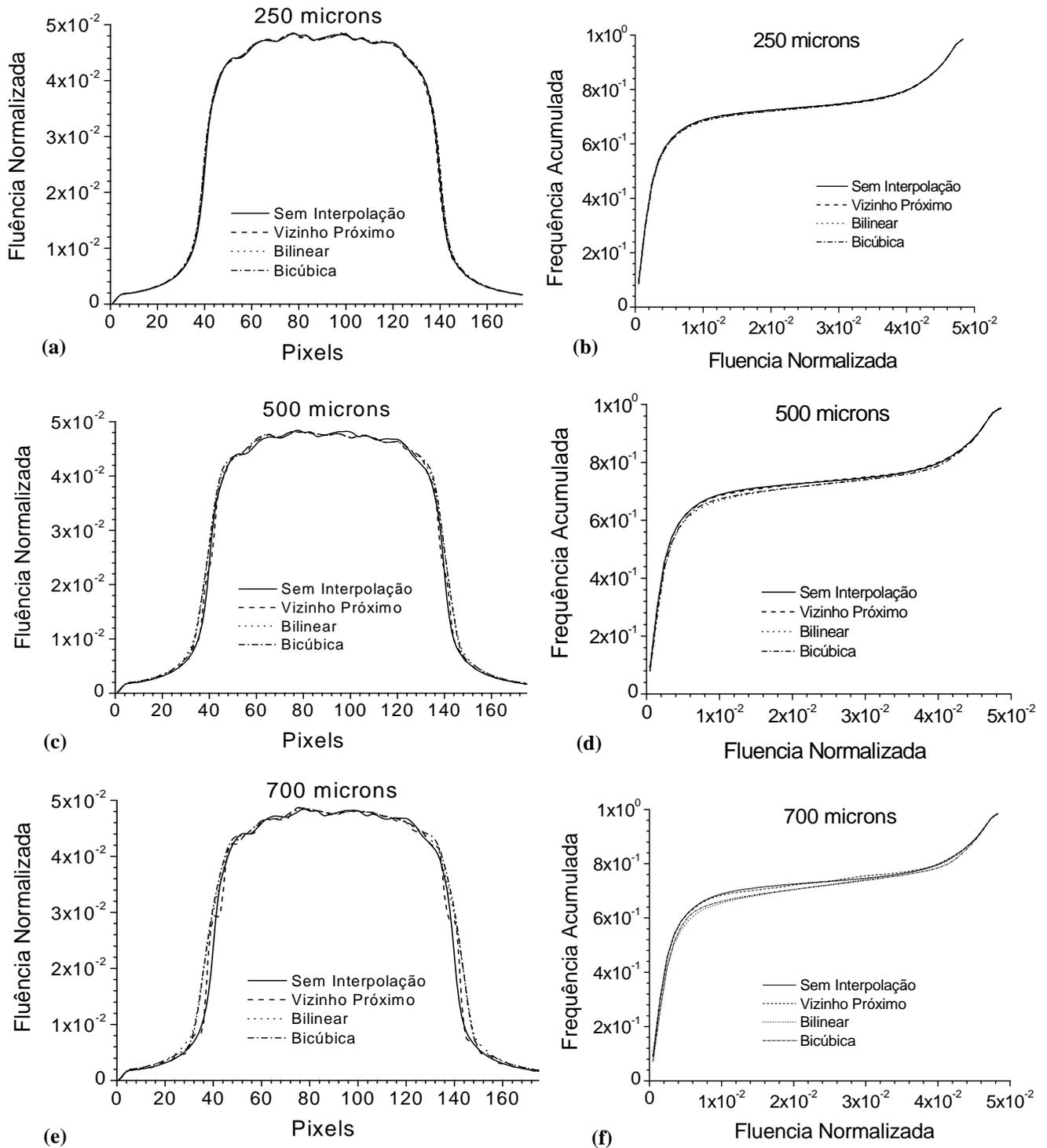


Figura 38 – Perfis de espalhamento de imagens redimensionadas com diversos métodos de interpolação. **(a)** Perfil obtido com 250 microns, **(b)** Frequência acumulada do perfil ilustrado em **(a)**, **(c)** Perfil obtido com 500 microns, **(d)** Frequência acumulada do perfil ilustrado em **(c)**, **(e)** Perfil obtido com 700 microns, **(f)** Frequência acumulada do perfil ilustrado em **(e)**.

3.4.3.2 Análise da componente formada pelo ruído – $Esp_{ruído}$

A **Figura 39** mostra a distribuição do ruído em imagens redimensionadas com diversos métodos de interpolação.

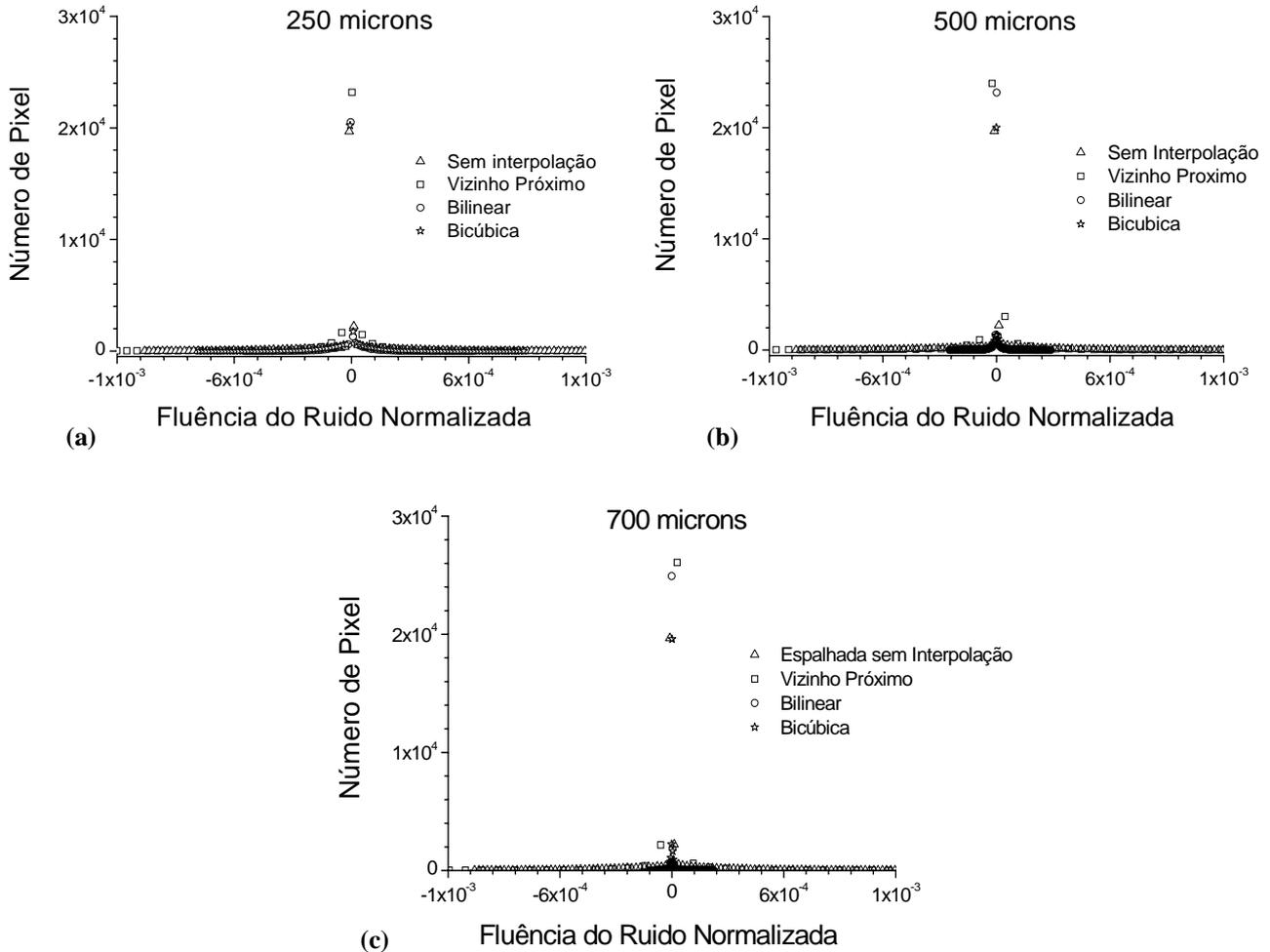


Figura 39 – Distribuição do ruído em imagens redimensionadas com diversos métodos de interpolação: **(a)** distribuição do ruído obtido com imagens de 250 microns, **(b)** distribuição do ruído obtido com imagens de 500 microns, e **(c)** distribuição do ruído obtido com imagens de 700 microns.

Através da **Figura 39** constata-se que a simulação foi capaz de reproduzir o comportamento gaussiano da distribuição de ruído da imagem, independente do método de interpolação. Entretanto, a análise estatística com o teste de *Fisher*, apresentada na **Tabela 3**, mostra que em todos os métodos de interpolação estudados, o ruído da

imagem redimensionada é significativamente diferente do ruído da imagem sem interpolação (valor p menor que 0,05). Apesar desse resultado, a análise do fator F do teste de *Fisher* indica que o método de interpolação que apresentou melhores resultados foi o vizinho mais próximo.

O melhor desempenho do método de vizinho mais próximo em relação aos demais estudados deve-se, como já dito, ao fato deste não suavizar as informações contidas na imagem.

Tabela 3 – Análise estatística da semelhança entre o ruído nas imagens espalhadas obtidas sem e com métodos de interpolação

Imagens	Método de Interpolação	Variância (Imagem Sem Interpolação)	Variância (Imagem com Interpolação)	Comparação entre as Variâncias	
				F	p (*)
250	Vizinho Próximo	2,44E-8	2,20E-8	1,109	2,2e-16
	Bilinear		3,46E-9	7,048	2,2e-16
	Bicúbica		6,32E-9	3,865	2,2e-16
500	Vizinho Próximo		2,56E-8	0,953	2,2e-05
	Bilinear		4,00E-10	61,033	2,2e-16
	Bicúbica		5,48E-10	44,570	2,2e-16
700	Vizinho Próximo		3,06E-8	0,797	2,2e-16
	Bilinear		9,84E-11	248,236	2,2e-16
	Bicúbica		8,99E-11	271,507	2,2e-16

* O nível de significância adotado neste trabalho foi de 0,05.

Capítulo 4

Modelagem de detectores digitais

As seções seguintes descrevem a metodologia empregada para a modelagem do material sensível e da função resposta de detectores digitais *Image Plate*.

4.1 – MODELAGEM DA RESPOSTA EM ENERGIA DO MATERIAL SENSÍVEL DO DETECTOR

Um dos principais problemas na utilização da função radiografia do código MCNPX é a modelagem de detectores experimentais.

Detectores *Image Plate* usualmente geram sinais como uma função da energia depositada pela radiação em seu material sensível. Esta energia depende linearmente do tempo de exposição, e, portanto, também depende linearmente da intensidade da radiação incidente no detector [71]. Entretanto, pelo fato de a grade virtual de *pixels* criada pelo MCNPX não poder estar localizada em um material espalhador, como visto no **Capítulo 2**, o comportamento de um detector *Image Plate* em função do seu material sensível não pode ser deduzido diretamente da função radiografia do código MCNPX, uma vez que a ausência de material dentro da grade impede a modelagem das reações atômicas/ nucleares da radiação com as substâncias que compõe este material sensível.

A solução utilizada neste trabalho para simular a resposta em energia de um detector *Image Plate* de material sensível BaFBr foi a utilização do comando DE/DF do código MCNPX. Este comando permite correlacionar os dados obtidos na simulação com outras grandezas de interesse, como por exemplo, fatores de conversão de fluência para dose [42], através da introdução de um multiplicador dependente da energia. O termo DF corresponde a uma função resposta de um material específico para energias DE da radiação incidente, em MeV, onde cada resultado da simulação (fluência) é multiplicado por um valor da função de conversão DF correspondente à energia DE da radiação incidente. Valores de energias fora da faixa definida no comando DE/DF são

interpolados entre qualquer um dos valores maiores ou menores de energia contidos nas respectivas seqüências. Como *default*, MCNPX utiliza uma interpolação log-log entre os valores de DE e DF, porém interpolações linear-linear, log-linear, linear-log também podem ser feitas.

A **Figura 40** ilustra o arranjo modelado para a determinação da resposta de um detector *Image Plate* em função da energia depositada em cada *pixel*.

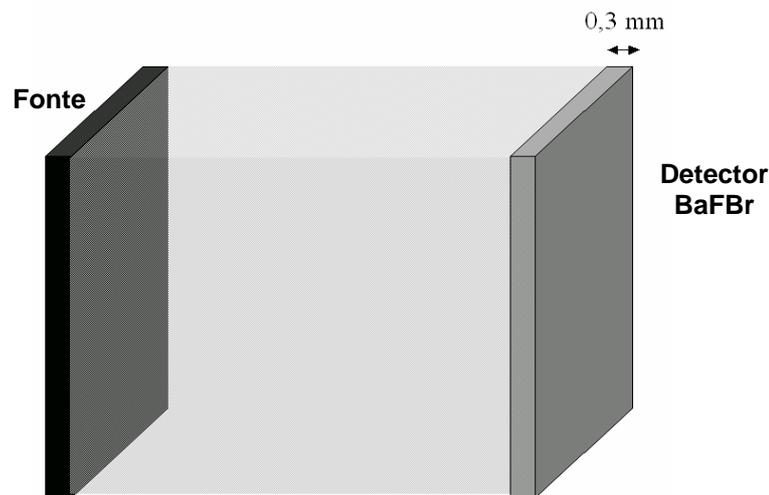


Figura 40 - Geometria de irradiação modelada para obtenção da resposta em energia do material sensível BaFBr do detector.

A função resposta DF do material sensível foi obtida através de simulações individuais de feixes monoenergéticos não divergentes provenientes de uma fonte plana, depositando energia por unidade de massa (MeV/g) em um bloco de BaFBr, com a espessura de 0,03 cm e área igual a da fonte. O intervalo de energia utilizado foi de 0 a 2 MeV. A **Figura 41** mostra a distribuição de DF em função de DE obtida na simulação.

O ponto de máximo na curva corresponde ao pico de absorção em energia do material BaFBr. O valor obtido na simulação foi de 38,4 keV, apresentando um erro relativo de 2,6% com relação ao valor fornecido pela literatura, 37,4 keV [57].

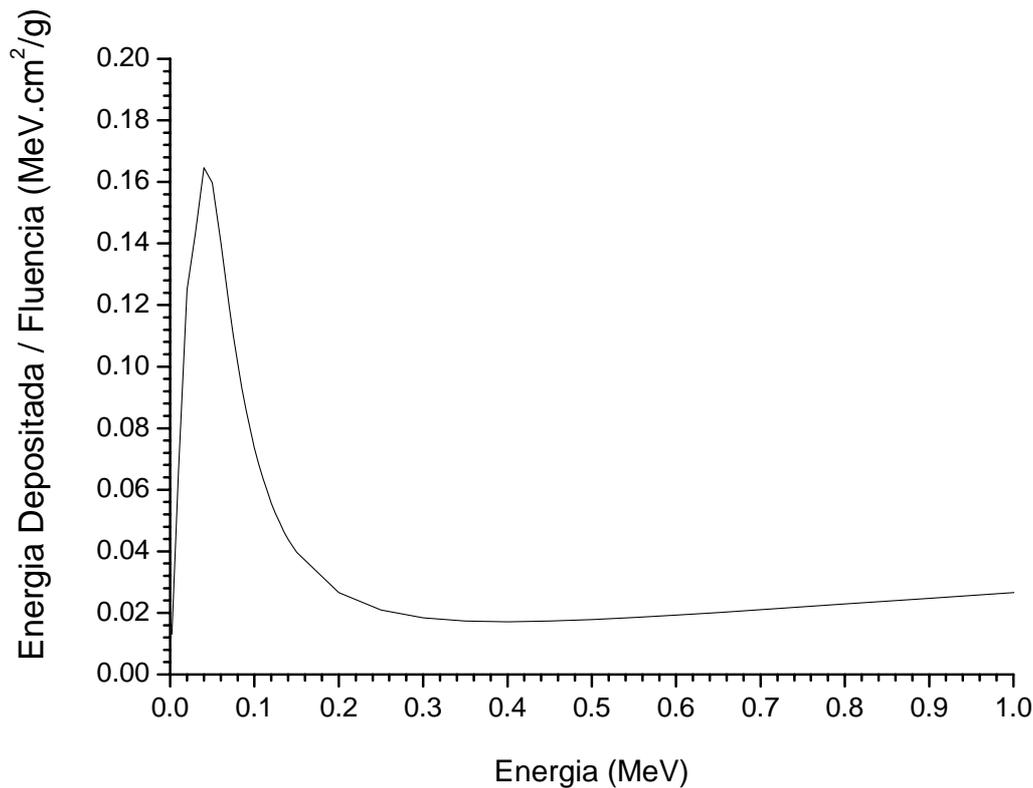


Figura 41 - Função resposta do material sensível BaFBr. Os valores obtidos foram normalizados pela fluência de fótons emitidos pela fonte.

Uma vez obtidos os valores de DE e DF, estes foram agrupados e inseridos nos arquivos de entrada para modelagem de ensaios radiográficos com o código MCNPX. Desta forma, os resultados obtidos na grade detectora, em partículas/cm², são agora correlacionados aos valores de DE e multiplicados pelos respectivos valores de DF (MeV×cm²/g), sendo assim modificados para energia depositada por unidade de massa (MeV/g) do material BaFBr. Os intervalos de energia de DE e da função resposta em energia no material sensível DF foram interpoladas logaritmicamente.

4.2 - MODELAGEM DO RUÍDO DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DO DETECTOR *IMAGE PLATE*

Baseado no conceito de razão sinal-ruído, uma metodologia para inserir o ruído oriundo do sistema de processamento do detector *Image Plate* nas imagens simuladas neste trabalho, a partir de dados experimentais, é proposta, como segue.

Como visto no **Capítulo 2**, um sistema de aquisição de imagens é considerado eficiente em termos de razão sinal-ruído quando, para um mesmo valor de dose no detector, a razão sinal-ruído nas imagens geradas permanece constante, independente da configuração de exposição [49,55]. Semelhantemente, vimos na seção 4.1 que detectores experimentais geram sinais como uma função da energia depositada pela radiação (dose) em seu material sensível. Esta energia depende linearmente do tempo de exposição, e, portanto, também depende linearmente da intensidade da radiação incidente no detector [57,71]. Sendo assim, a amplitude da contribuição do ruído pode ser calculada assumindo-se que o sinal proveniente do *Image Plate* (placa de BaFBr em si) é proporcional a dose de radiação, e conseqüentemente à fluência de fótons incidentes na placa. Este requerimento é satisfeito uma vez que o sinal gerado pelo escaner do *Image Plate* é proporcional a dose de radiação depositada na placa de imagem [57].

Com base nas informações anteriores e considerando o detector eficiente em termos de razão sinal-ruído, podemos dizer que para uma mesma dose de radiação no detector, se o escaner do *Image Plate* gera uma imagem com razão sinal-ruído $\frac{S_{\text{exp}}}{\sigma_{\text{exp}}}$ para um número N_{exp} de fótons por *pixel*, a razão sinal-ruído em qualquer outro nível N de fótons por *pixel* será dada pela relação de proporcionalidade:

$$\frac{S}{S_{\text{exp}}} = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{exp}}}, \quad (25)$$

ou, em termos da razão sinal-ruído,

$$\frac{S_{\text{exp}}}{\sigma_{\text{exp}}} = \frac{S}{\sigma} \quad (26)$$

Desta forma, considerando $\frac{S_{\text{exp}}}{\sigma_{\text{exp}}}$ a razão sinal-ruído de uma imagem experimental, e S o

sinal proveniente da imagem simulada, pode-se deduzir o ruído σ dos dados da imagem simulada através da relação:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \cdot S, \quad (27)$$

onde o termo $\frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}}$ é a *razão ruído-sinal*, isto é, o inverso da razão sinal-ruído, obtida de imagens experimentais e de valor constante para qualquer configuração de irradiação desde que a dose de radiação no detector seja considerada a mesma. S é o sinal obtido da imagem simulada, que pode ser determinado através de uma medida de tendência central como a média dos valores de *pixel* da imagem.

Desde que σ é obtido a partir de uma imagem experimental, este carrega contribuições tanto do ruído quântico como do ruído eletrônico do escaner do *Image Plate*. Considerando-se que, de acordo com a **Equação 14**, o ruído quântico é igual a raiz quadrada do sinal médio da imagem, e considerando o ruído eletrônico uma característica intrínseca do sistema de geração da imagem, podemos assumir que σ obedece a seguinte relação:

$$\sigma = \alpha \cdot \sqrt{S}, \quad (28)$$

onde \sqrt{S} é a raiz quadrada do sinal médio dos valores de *pixel* da imagem simulada (ruído quântico) e α é uma constante multiplicativa que representa a amplificação do ruído quântico devido a inclusão do ruído eletrônico.

Desta forma, podemos inferir que a contribuição do ruído eletrônico para o ruído total da imagem simulada, para um valor fixo de dose no detector, pode ser obtida igualando-se a **Equação 27** à **Equação 28**:

$$\frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \cdot S = \alpha \cdot \sqrt{S}, \quad (29)$$

Isolando α e racionalizando o denominador \sqrt{S} , temos

$$\alpha = \frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \sqrt{S}, \quad (30)$$

Entretanto, o valor de σ obtido através das **Equações 27 e 28** é uma variável global da imagem, ou seja, é o valor de ruído representativo do conjunto de *pixels* da imagem, precisando ainda ser discretizado para cada *pixel* x_i individualmente. Assim, para um *pixel* em particular, tem-se:

$$\sigma_i = \alpha \cdot \sqrt{x_i} \quad (31)$$

e substituindo-se o valor de α

$$\sigma_i = \alpha \cdot \sqrt{x_i} = \frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \cdot \sqrt{S} \cdot \sqrt{x_i}, \quad (32)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \cdot \sqrt{S \cdot x_i} \quad (33)$$

A matriz imagem simulada final com ruído é obtida utilizando-se o método de *Box-Muller* para gerar variáveis aleatórias com distribuição gaussiana [75,76]. A **Equação 35** mostra como a distribuição de *Box-Muller* é gerada.

$$z = \sqrt{-2 \log u_1} \cdot \cos(2\pi \cdot u_2) \quad (34)$$

As variáveis u_1 e u_2 são números randômicos uniformemente distribuídos em [0,1]. z é uma variável aleatória que obedece a uma distribuição gaussiana. A variável aleatória z obtida é então multiplicada pelo desvio padrão σ_i e adicionada a cada contagem de *pixel* de acordo com a relação abaixo:

$$VP = x_i + z \cdot \sigma_i, \quad (35)$$

onde VP é o valor final do *pixel* e $z \cdot \sigma_i$ um valor localizado no intervalo entre $\pm 3\sigma_i$ [55,75,76].

4.2.1 – Obtenção da razão ruído-sinal a partir de dados experimentais

Para estimar a razão ruído-sinal a partir de dados experimentais, foram obtidas imagens de uma placa de alumínio homogênea de 0,5 cm de espessura e grau de pureza de 99%, para vários valores de dose na entrada do detector. Os valores de dose foram medidos usando uma câmara de ionização posicionada na região de localização do detector. Os valores de dose considerados constituíram na média aritmética de três medições. A variação da dose no detector foi feita através da variação do tempo de exposição. A **Tabela 4** ilustra as principais informações relativas aos equipamentos e da fonte de radiação utilizados na obtenção da razão ruído-sinal e a **Figura 42** mostra o arranjo experimental utilizado para obtenção das imagens com a placa de alumínio.

Tabela 4 – Descrição dos equipamentos e da fonte de radiação utilizados na obtenção da razão ruído-sinal

Equipamentos	Características
Fonte de Radiação Gama	IR-192 Atividade: 21,26 Ci (05/09/2007).
Conjunto dosimétrico	Fabricante: Radcal Modelo do eletrômetro: 9015 Modelo da câmara de ionização: 10x5-6 Resolução em energia da câmara de ionização: 30 keV – 1,33 MeV. *Coeficiente de calibração do conjunto dosimétrico: 0,996 µGy/escala. Data de calibração: 08/2007.
Detector <i>Image Plate</i>	Tipo: BaFBr Escaner: GE CR TOWER

*Calibração feita pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI/IRD/CNEN).

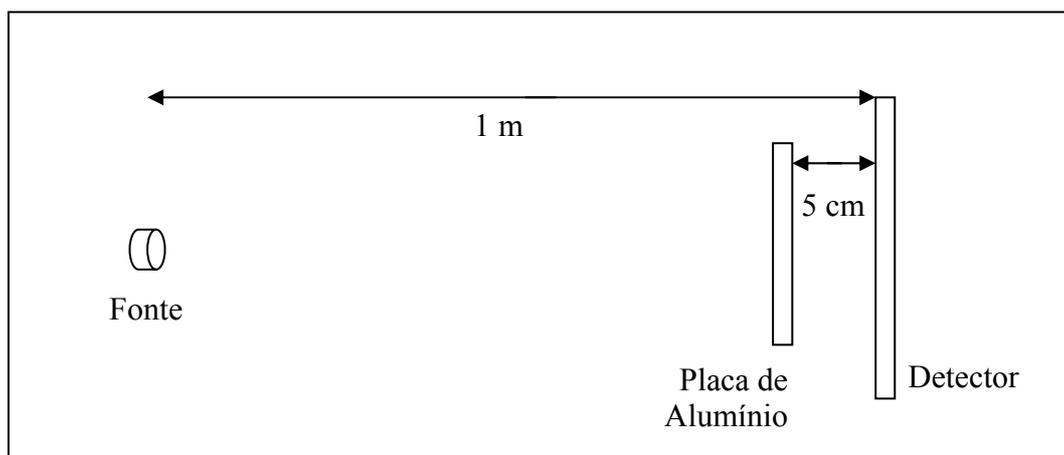


Figura 42 – Arranjo experimental utilizado para obtenção das imagens com a placa de alumínio

As incertezas dos valores de dose foram calculadas considerando os parâmetros mostrados na **Tabela 5**.

Tabela 5: Parâmetros considerados no cálculo da incerteza da dose no detector

Tipo de Incerteza	Incerteza
A	Desvio padrão da média de 3 medidas experimentais
B	Incerteza do conjunto dosimétrico – 3%(95%)

A partir das imagens experimentais foram calculadas as razões ruído-sinal em função da dose no detector imagem. A razão ruído-sinal foi obtida calculando o desvio padrão σ_{exp} dos valores de *pixels* em uma determinada região dividida pela média aritmética S_{exp} dos valores dos mesmos. Esta aproximação foi possível pelo fato de a placa de alumínio utilizada fornecer uma imagem com áreas onde o sinal é uniforme, de forma que foi possível assumir o sinal constante (exceto por flutuações estatísticas) em toda localização na região de interesse [40,46].

A **Figura 43** mostra a relação entre a dose no detector e a razão ruído-sinal obtida das imagens experimentais. Observa-se que há um comportamento decrescente da razão ruído-sinal em função da dose no detector imagem. Este comportamento é esperado

uma vez que o aumento da estatística de fótons no detector contribui para a redução do ruído e aumento do sinal da imagem.

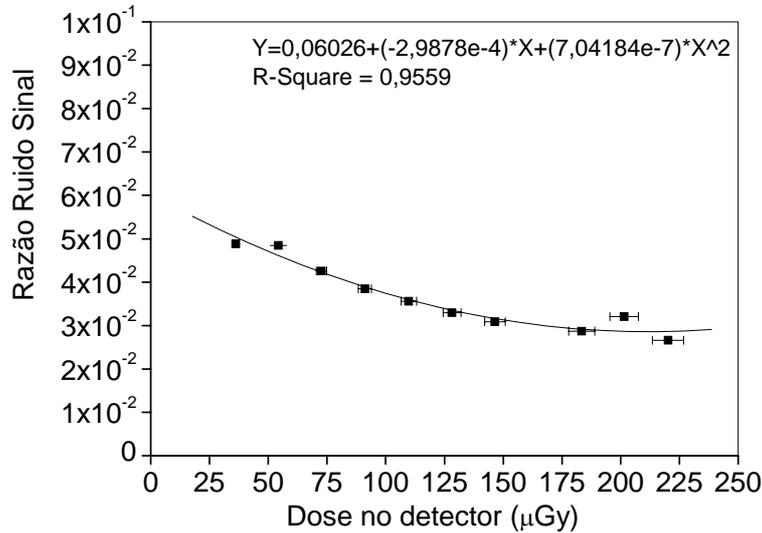


Figura 43 – Razão ruído-sinal em função da dose no detector *Image Plate*. Dados obtidos experimentalmente utilizando uma fonte de Irídio-192, uma placa homogênea de alumínio com alto grau de pureza e um sistema de processamento de imagem digital GE CR TOWER.

Através dos valores de razão ruído-sinal obtidos experimentalmente para diferentes valores de dose, obteve-se o seguinte polinômio, com ajuste de 0,9559.

$$\frac{\sigma_m}{S_m} = 0,06026 - (2,9878 \cdot e^{-4}) \cdot dose + (7,04184 \cdot e^{-7}) \cdot dose^2 \quad (36)$$

Uma vez fixado um valor de dose no detector, o ruído σ inerente do escaner de leitura do detector *Image Plate* pode ser obtido inserindo-se o valor da razão ruído-sinal obtido através do polinômio para o respectivo valor de dose fixado no detector e os dados obtidos na simulação na **Equação 33**.

4.3 – MODELAGEM DA FUNÇÃO DE RESPOSTA DE DETECTORES DIGITAIS – O PROGRAMA IMAGEM

Uma vez modelada a resposta do material sensível, o próximo passo é associar os resultados obtidos com a função radiografia a uma função de resposta de um detector digital. Para esta finalidade, foi criado o **PROGRAMA IMAGEM** [72,73,74].

O **PROGRAMA IMAGEM** é uma evolução do **PROGRAMA MATRIZ**, destinado a modelar a função de resposta de um detector digital. Além de possuir todas as funções constantes no **PROGRAMA MATRIZ**, o **PROGRAMA IMAGEM** tem implementado em seu algoritmo a metodologia para a geração do ruído do sistema de leitura do detector *Image plate* e o polinômio obtido através de imagens experimentais para a geração da razão ruído-sinal (**Equação 37**), permitindo que este, além de pós-processar os dados obtidos nas simulações, calcule e inclua a componente do ruído do sistema de processamento nos dados simulados.

A **Figura 44** ilustra a interface do **PROGRAMA IMAGEM**.

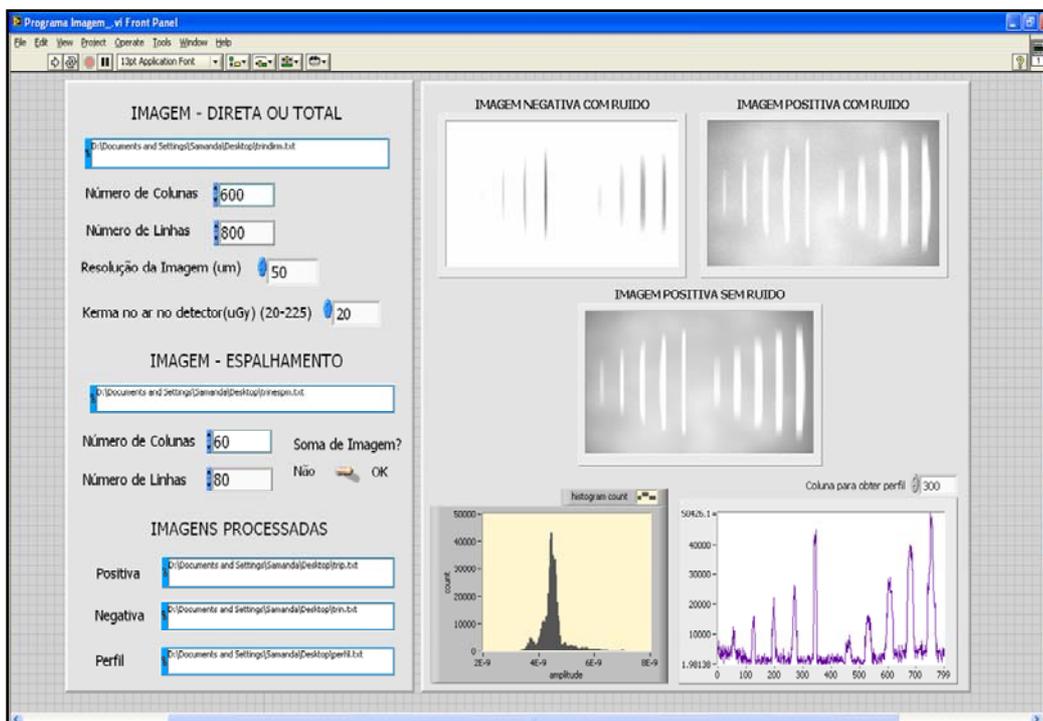


Figura 44 - Interface do **PROGRAMA IMAGEM**

Considerando que detectores digitais modernos possuem curvas de resposta logarítmica aproximadamente linear e em escala de 16 *bits* o **PROGRAMA IMAGEM**, após inserir a componente do ruído do sistema de processamento nos dados fornecidos através da modelagem computacional com o código MCNPX, calcula o log dos dados e correlaciona estes a uma escala de valores entre 0 e 65535 (16 *bits*) através da função linear representada pela **Equação 37**.

$$f = \left[\frac{g - g_{menor}}{g_{maior} - g_{menor}} \times 65535 \right] \quad (37)$$

onde g é o log dos dados fornecidos através da modelagem computacional, g_{maior} e g_{menor} são o maior e menor valores de g , e f são os dados convertidos na escala de cinza entre 0 e 65535.

Após a conversão, o **PROGRAMA IMAGEM** salva os dados de forma que estes possam ser convertidos em imagens de escalas de cinza em programas específicos de visualização de imagem.

Outras características importantes do **PROGRAMA IMAGEM** são a capacidade de redimensionar matrizes através do método do vizinho mais próximo, somar matrizes com dimensões iguais e diferentes e mostrar em sua interface a distribuição de intensidade da radiação incidente em cada *píxel* da imagem acrescida da contribuição da componente do ruído do escaner do *Image Plate*, bem como o histograma das imagens e seus respectivos perfis de intensidade.

4.4 – MODELAGEM DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS COM O CÓDIGO MCNPX

Para avaliar a aplicação da função radiografia do código MCNPX em ensaios não destrutivos, simulações foram realizadas e comparadas com resultados experimentais.

A **Figura 45** mostra o corpo de prova modelado para a simulação dos ensaios radiográficos.

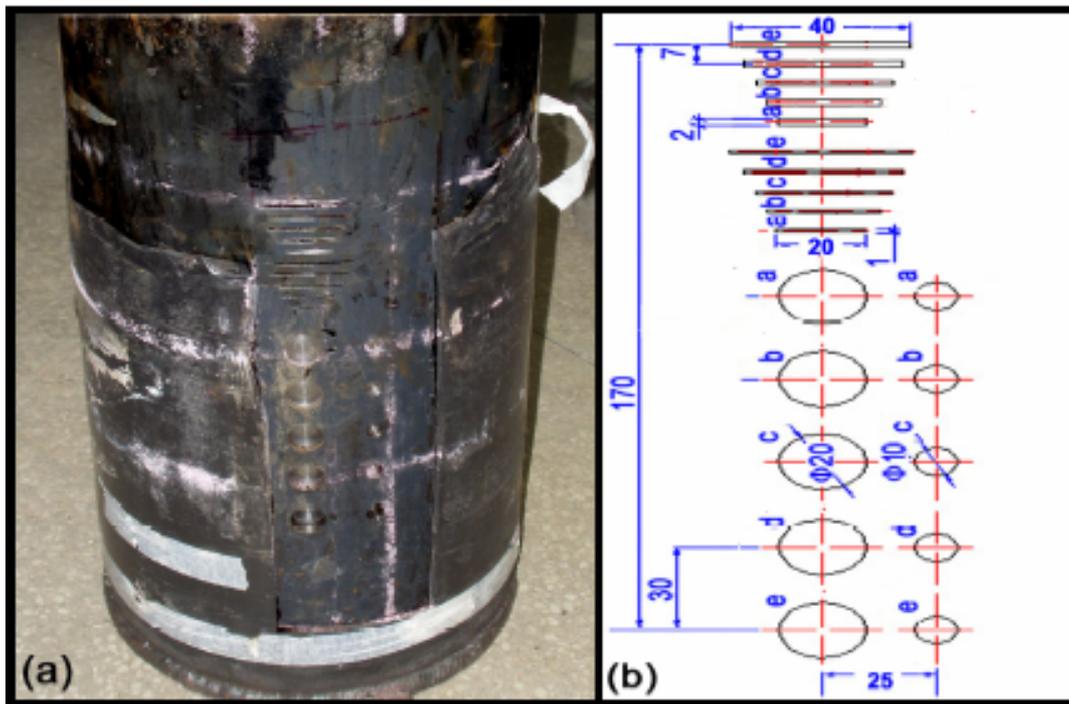


Figura 45 – Corpo de prova e esquema indicando as dimensões dos defeitos.

O corpo de prova (**Figura 45 (a)**) consiste de um duto de aço de diâmetro igual a 10 polegadas (~ 25 cm), 2 cm de espessura e 50 cm de altura. Defeitos simulando trincas e perdas de espessura foram inseridos no duto, como ilustrado na **Figura 45 (b)**. As letras indicam a profundidade dos defeitos com relação à espessura do duto: a = 10%, b = 20%, c=30%, d=40% e e=50%. Os orifícios na figura possuem respectivamente 1 e 2 cm de diâmetro, e os cortes transversais alturas de 0,2 e 0,1 cm.

Visando exposições *offshore*, o duto foi “abraçado” por um protótipo de acondicionamento submarino para a fonte (irradiador) e para o detector *Image Plate*, formado por uma braçadeira cilíndrica de alumínio com espessura de 0,7 cm, altura de 30 cm e diâmetro da ordem do duto inspecionado (10 polegadas = 25,4 cm). O protótipo possui quatro orifícios retangulares diametralmente opostos, onde por um lado a fonte (irradiador) é acondicionada, e no lado diametralmente oposto o detector. A **Figura 46** mostra uma representação do duto com acondicionamento submarino.

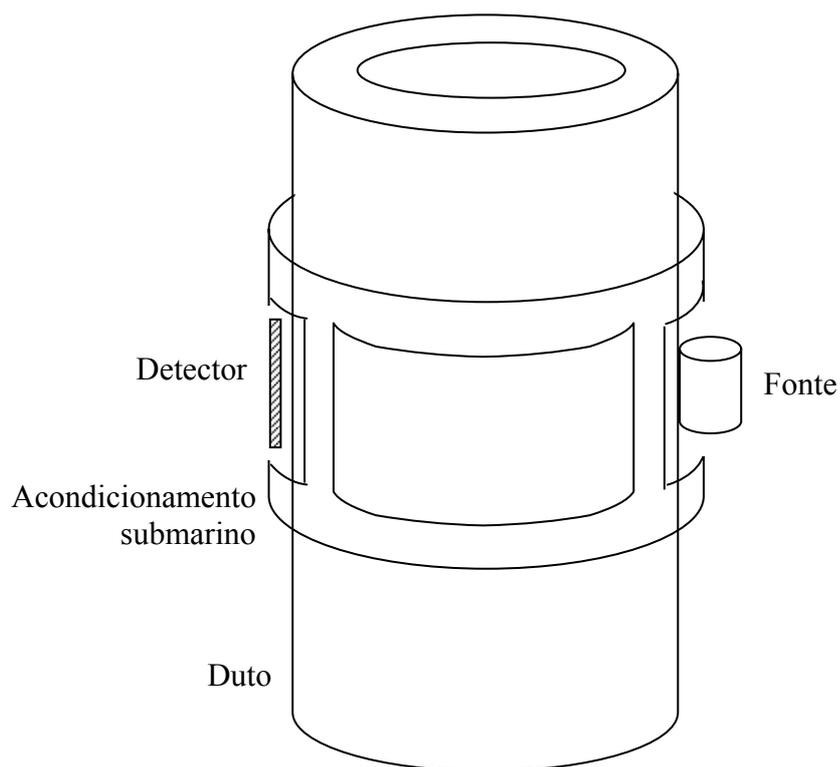


Figura 46 – Representação esquemática do duto com acondicionamento submarino.

Para as exposições, um irradiador modelo MID produzido pela MDS Nordion SA foi utilizado. O irradiador consiste de um recipiente cilíndrico de aço inox contendo em seu interior uma blindagem de urânio exaurido, onde a fonte fica acondicionada quando não está sendo utilizada. O acionamento é realizado por um comando eletrônico que, quando ligado, posiciona a fonte para fora da blindagem para que possa ser realizada a radiografia. Ao término do tempo de exposição, cessa o pulso elétrico e a fonte é recolhida automaticamente para dentro da blindagem. A **Figura 47 (a)** e **(b)** ilustra o irradiador e um corte longitudinal do mesmo respectivamente.

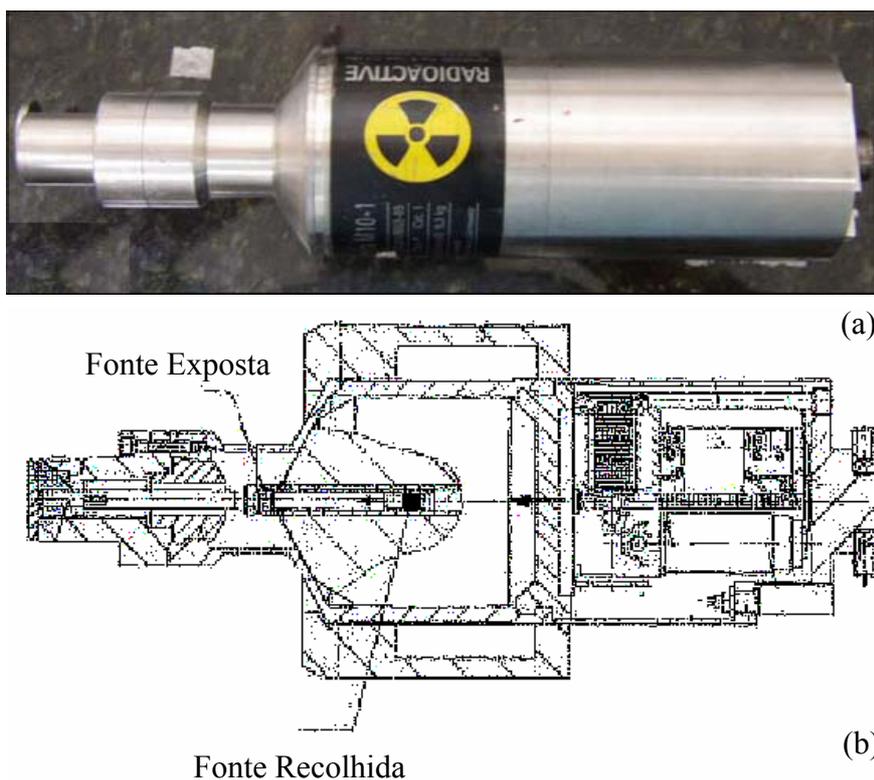


Figura 47 – Irradiador utilizado nas exposições *offshore*. Em (a) observa-se a foto do irradiador. Em (b), pode-se ver um corte longitudinal do mesmo, onde estão indicadas as duas posições possíveis da fonte: exposta ou recolhida.

Como o irradiador não possui colimadores e, quando a fonte está na posição exposta, emite radiação numa geometria 4π , foi confeccionado um colimador de chumbo para direcionar o feixe e reduzir a radiação espalhada. Na **Figura 48** pode-se ver o irradiador acoplado ao colimador.



Figura 48 – Irradiador com colimador de chumbo

Embora o colimador restrinja o campo de visão da fonte a um cone de radiações, a distribuição da radiação não é uniforme ao longo do campo de exposição da mesma. Isto se deve a uma variação de espessura existente na capa que protege a fonte quando esta está exposta, que atenua parte da radiação emitida pela fonte.

Duas configurações experimentais de exposição foram reproduzidas nas simulações. A primeira consiste do duto preenchido por ar, e foi realizada com o propósito de validar a metodologia para geração das imagens digitais. Somente os orifícios que reproduzem uma menor perda de espessura da parede do duto, e conseqüentemente maior grau de dificuldade de visualização, foram radiografados. As exposições foram realizadas utilizando uma fonte de Iridio-192 (^{192}Ir) de diâmetro igual a 0,3 cm e atividade de 53,65 GBq (1,45Ci), e duraram 15 minutos.

Na segunda, o conjunto foi submerso em um tanque com água, reproduzindo um ambiente de inspeção *offshore*. As exposições foram realizadas utilizando uma fonte de Iridio-192 (^{192}Ir) de diâmetro igual a 0,3 cm, e atividade de 714,10 GBq (19,30 Ci). Cada exposição durou 20 minutos. Todos os defeitos foram radiografados.

Em ambas as configurações, as exposições experimentais foram realizadas através da técnica de parede dupla e vista simples – PDVS, com o detector colocado junto à parede oposta do duto onde se encontra a fonte de radiação. Isto se deve ao fato de esta ser a técnica mais indicada para exposições radiográficas de dutos de aço com diâmetro e espessura de parede como as do duto em estudo [52]. Devido a existência do colimador e do acondicionamento submarino, a fonte exposta ficou a uma distância de 13 cm da parede do duto durante os ensaios. Devido a um erro no projeto de construção do acondicionamento submarino, a “braçadeira” não consegue “abraçar” completamente o duto inspecionado, e conseqüentemente a configuração fonte-defeito-detector não ficou perfeitamente alinhada em ambas as configurações de exposição. Análises visuais e perfilométricas das imagens obtidas foram realizadas.

As simulações foram realizadas reproduzindo uma fonte de irídio com diâmetro igual a 0,3 cm, colimada sob a forma de um cone de radiações através da técnica de redução de variância *source biasing* do MCNPX. Esta técnica permite a modelagem de uma fonte de radiação como se esta estivesse colimada, sem comprometer o resultado final da simulação [41,42]. O feixe de radiação foi direcionado através do centro da seção do duto em análise, com o detector colocado diametralmente oposto à fonte de radiação e a uma distância de 0,3 cm do duto simulado, reproduzindo a técnica radiográfica PDVS.

Para reproduzir um detector curvo junto ao corpo de prova, o comando TIC da função radiografia do código MCNPX foi utilizado. As componentes direta e espalhada da radiação foram simuladas separadamente, somadas e pós-processadas pelo **PROGRAMA IMAGEM** para serem convertidas em uma resposta digital. A resolução dos *pixels* da grade imagem foi de 100 x 100 μm^2 . A componente espalhada da radiação foi simulada com *pixels* de área igual a 0,1 x 0,1 cm^2 , e reamostrada para 100 x 100 μm^2 pelo **PROGRAMA IMAGEM**.

Para a inclusão do ruído nas imagens simuladas, o sinal S proveniente das mesmas não foi obtido através da média aritmética dos valores de *pixel*, uma vez que as imagens simuladas apresentaram valores bem variados de intensidade, e a média aritmética, por ser uma medida de tendência central muito sensível a cada tipo de observação, poderia ser influenciada por valores isolados [49,55]. Para este fim, o sinal da imagem simulada foi obtido através da média ponderada pela frequência de ocorrência de cada valor de *pixel*:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} f_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{i=N} f_i}, \quad (38)$$

onde x_i são os valores individuais de cada *pixel* e f_i a frequência de ocorrência de cada valor. Para a determinação da razão ruído-sinal através da **Equação 36**, foi considerada a dose no detector igual a 200 μGy , visando obter o menor ruído possível nas imagens simuladas, o que também foi um dos objetivos durante as exposições experimentais.

Análises visuais e perfilométricas das imagens simuladas foram realizadas, e comparadas com os resultados experimentais.

Como mencionado anteriormente, devido a um erro no projeto de construção do acondicionamento submarino, a “braçadeira” não consegue “abraçar” completamente o duto inspecionado, e conseqüentemente a configuração fonte-defeito-detector não ficou perfeitamente alinhada nas exposições experimentais. Entretanto, durante a modelagem, a fonte e o detector foram modelados perfeitamente alinhados com o defeito analisado, obedecendo ao projeto original do acondicionamento submarino. Semelhantemente, para verificar os possíveis efeitos da distribuição não homogênea da radiação na imagem final, as simulações foram realizadas ignorando a variação de espessura da capa protetora da fonte no irradiador submarino.

4.5 – RESULTADOS

4.5.1 – Radiografia do duto sem a presença de água

A **Figura 49** mostra as imagens experimentais e simuladas da região da trinca do tubo de aço. As imagens diretas foram simuladas em um período de duas horas, enquanto a contribuição do espalhamento consumiu vinte e quatro horas para alcançar a flutuação estatística requerida pelo código MCNPX.

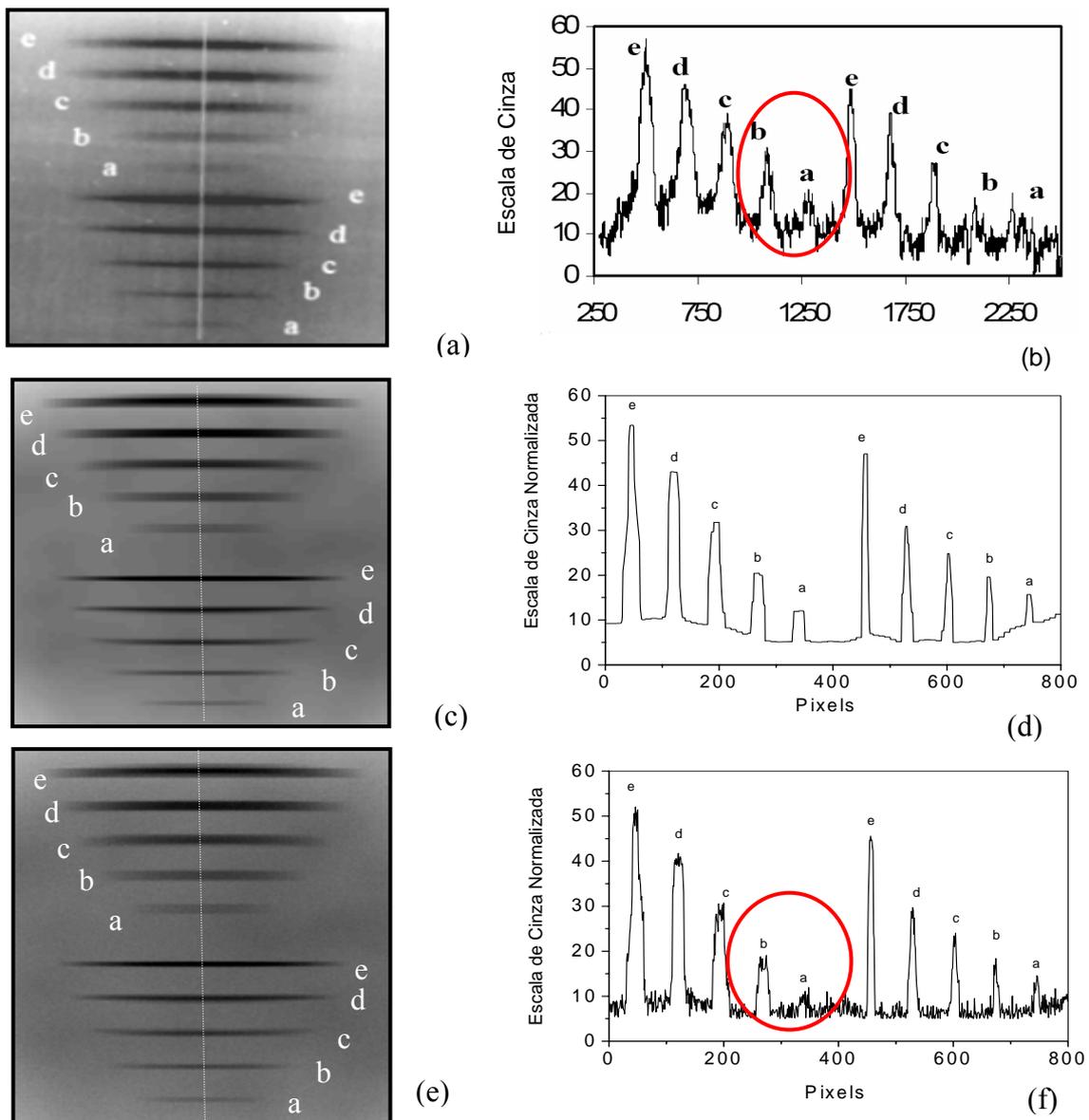


Figura 49 – Imagens e perfis da região da trinca do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente. (b) Perfil da imagem experimental, (c) Imagem simulada sem a adição de ruído; (d) Perfil da imagem sem ruído; (e) Imagem simulada com ruído e (f) Perfil da imagem simulada com ruído.

As imagens simuladas das trincas apresentaram boa concordância com os dados experimentais, uma vez que o comportamento dos perfis para diferentes espessuras das trincas foram semelhantes. Os círculos na **Figura 49 (b)** e **(f)** ilustram a semelhança dos picos *a* e *b* entre as imagens experimentais e simuladas, principalmente para as trincas de 0,1 cm, onde o comportamento visual da altura dos picos aparenta ser o mesmo em ambas as figuras. Como pode se ver através dos perfis, a inclusão do ruído na imagem simulada provocou uma diminuição do contraste na mesma, porém reduzindo a informação ao nível de visualização da imagem experimental, mostrando que a metodologia desenvolvida para modelagem do ruído consegue reproduzir esta importante componente de imagens radiográficas.

Comparações entre as imagens simuladas e experimentais da região dos orifícios de 1 e 2 cm de diâmetro podem ser observadas nas **Figura 50** e **51** respectivamente. Verifica-se que o comportamento ascendente e descendente das cristas proveniente de efeitos geométricos devido à geometria de exposição é mantido nos orifícios. Em ambas as imagens observa-se que as proporções dos valores no eixo das ordenadas é bastante semelhante, e que há boa concordância nos valores dos diâmetros dos defeitos visualizados através dos perfis das imagens.

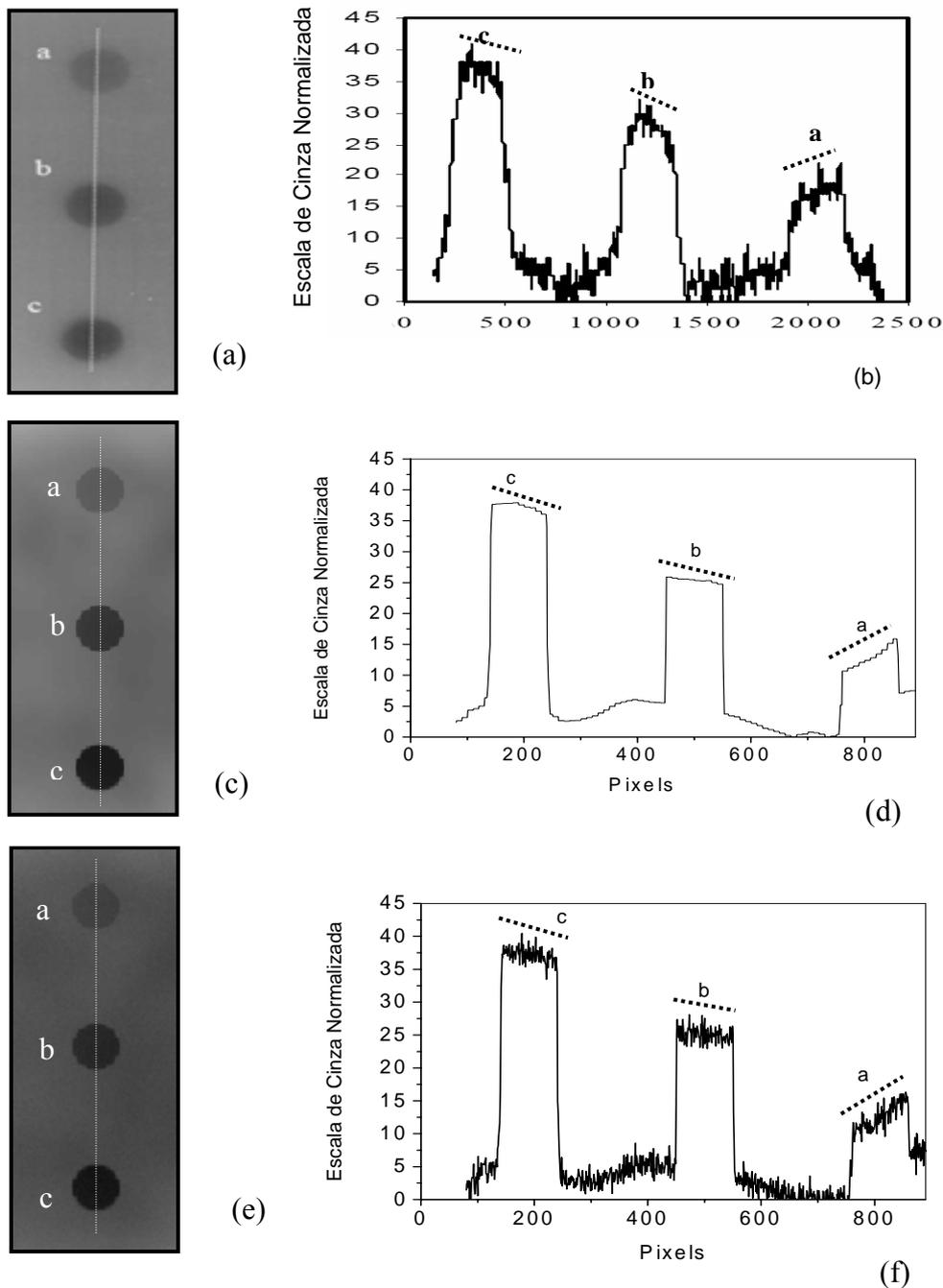


Figura 50 – Imagens da região dos orifícios de 1 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) perfil dos orifícios da imagem obtida experimentalmente, (c) imagem simulada sem a contribuição do ruído, (d) perfil dos orifícios da imagem simulada sem a contribuição do ruído, (e) imagem simulada com a contribuição do ruído, (f) perfil dos orifícios da imagem simulada com a contribuição do ruído

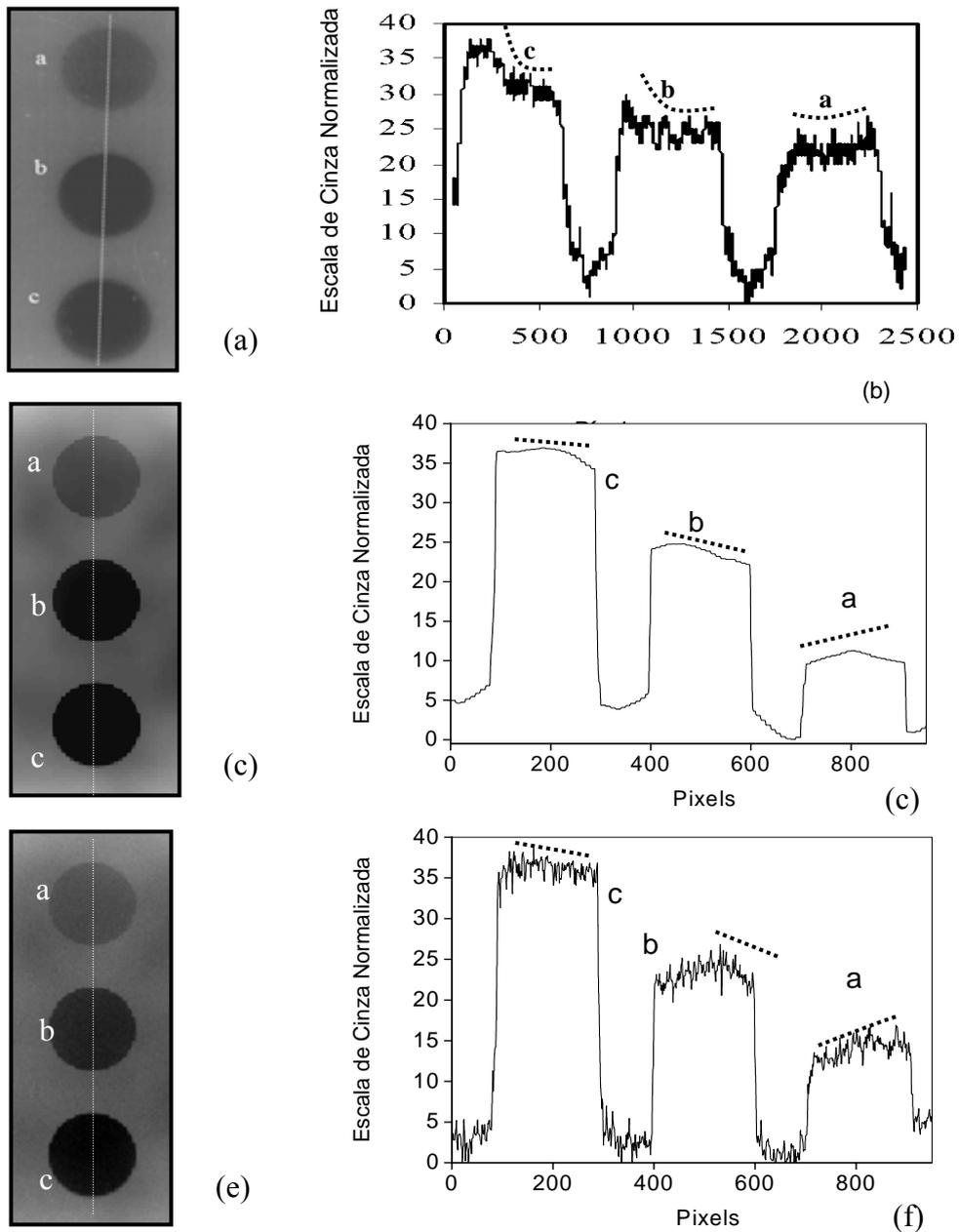


Figura 51 – Imagens da região dos orifícios de 2 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) perfil dos orifícios da imagem obtida experimentalmente, (c) imagem simulada sem a contribuição do ruído, (d) perfil dos orifícios da imagem simulada sem a contribuição do ruído, (e) imagem simulada com a contribuição do ruído, (f) perfil dos orifícios da imagem simulada com a contribuição do ruído

4.5.2 – Radiografia do duto submerso em água

As **Figuras 52 a 54** comparam as imagens experimentais com as simuladas, para as exposições em presença de água. As imagens diretas foram simuladas em um período de quatro horas, enquanto a contribuição do espalhamento consumiu nove dias para alcançar a flutuação estatística requerida pelo código MCNPX. Este aumento do tempo de simulação ocorreu devido a presença da água, que ao aumentar a contribuição do espalhamento Compton, requereu do código MCNPX um aumento considerável do número de partículas simuladas.

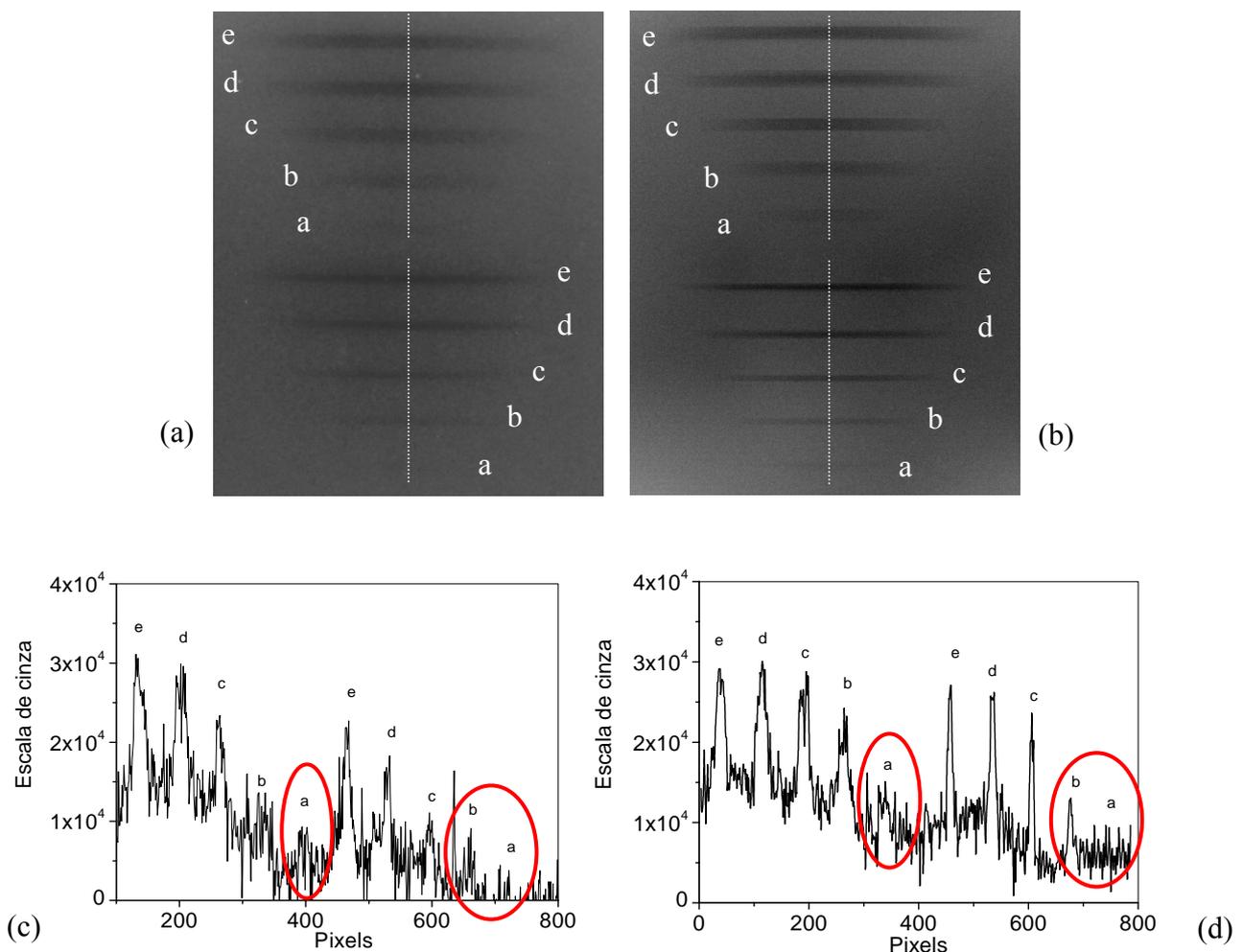


Figura 52 – Imagens e perfis da região da trinca do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada.

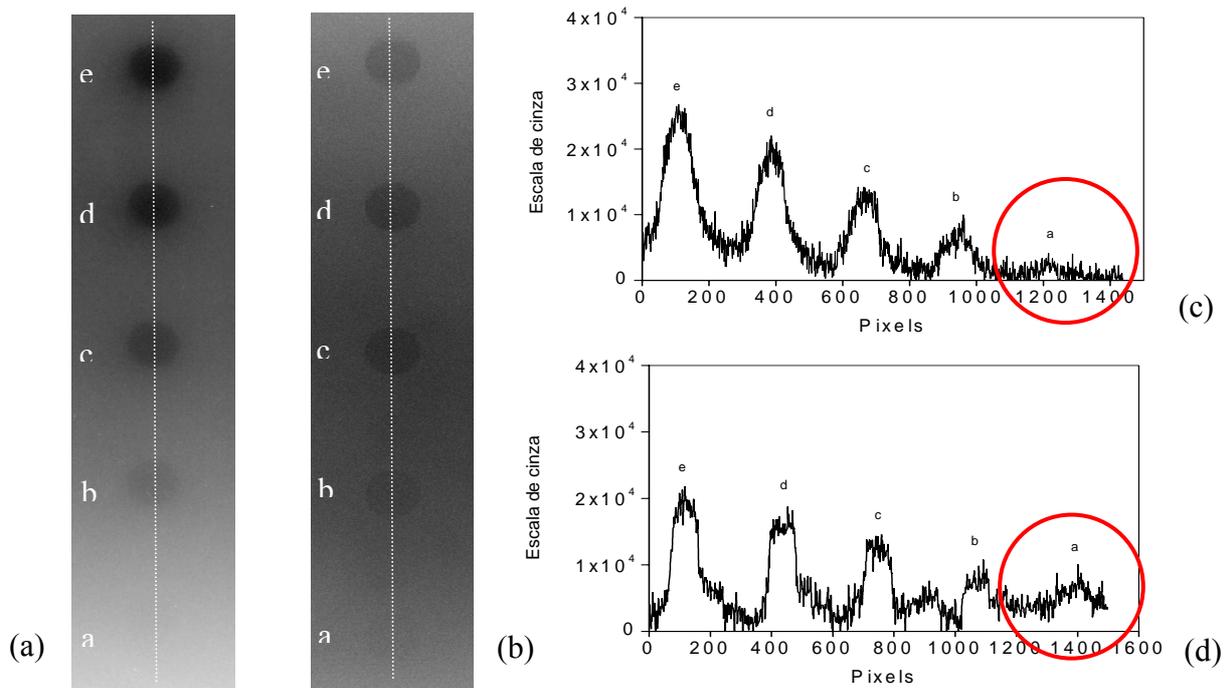


Figura 53 – Imagens e perfis da região dos orifícios de 1 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada.

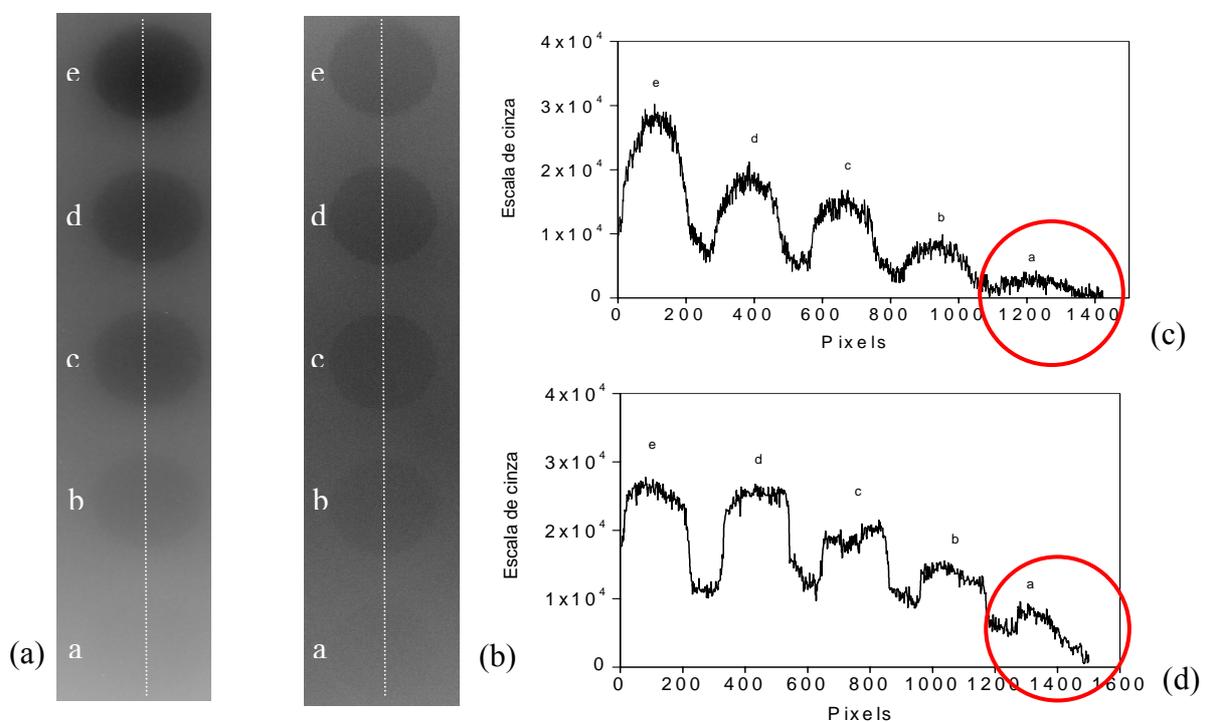


Figura 54 – Imagens e perfis da região dos orifícios de 2 cm de diâmetro do tubo de aço. Em (a) imagem obtida experimentalmente, (b) Imagem simulada, (c) Perfil da imagem experimental, (d) Perfil da imagem simulada.

As análises visuais e perfilométricas mostram que as simulações conseguem reproduzir, com boa concordância, os efeitos de redução de contraste nas imagens devido à presença de água, bem como a dificuldade de identificação dos orifícios e trincas de menores profundidades e espessura, o que pode ser constatado através dos perfis.

Observa-se também que há uma distribuição mais homogênea da radiação nas imagens simuladas do que nas experimentais, permitindo que os orifícios e as trincas de menor espessura e profundidade sejam melhor visualizados nas imagens simuladas. Este efeito pode ser evidenciado principalmente através das **Figuras 53 e 54**, onde os orifícios na imagem experimental que reproduzem a perda de espessura de 10% da parede do duto (pico “a” nos perfis), principalmente para o orifício de 1 cm de diâmetro, apresentam difícil identificação.

Este comportamento pode ter sido provocado pela existência da variação de espessura na capa que protege a fonte quando esta está exposta, que ao atenuar parte da radiação emitida pela fonte, pode estar fazendo com que regiões do corpo inspecionado recebam mais radiação do que outras durante as exposições. Embora este efeito não tenha sido observado nas imagens com o duto preenchido por ar, o mesmo pode estar se tornando expressivo quando em conjunto com a atenuação da radiação provocada pela presença da água. Entretanto, mais análises experimentais necessitam ser realizadas para sustentar esta hipótese.

Capítulo 5

Conclusões

O objetivo deste trabalho é a modelagem de ensaios radiográficos com a radiografia computadorizada (termo fonte, detector e objeto inspecionado) com detectores *Image Plate*, utilizando a Função Radiografia do código de Monte Carlo MCNPX (*the Radiographic tally*), visando aplicações industriais em ambientes *offshore*. Sendo assim, análises do comportamento desta função na reprodução do processo radiográfico em um sistema de aquisição de imagens, bem como o desenvolvimento de recursos paralelos visando tornar a modelagem de ensaios radiográficos com esta função mais rápida e compatível com resultados experimentais foram realizados.

As análises dos resultados obtidos mostraram que a função radiografia do MCNPX consegue reproduzir todas as etapas do processo da formação da imagem radiográfica em um sistema de aquisição de imagens. Características geométricas como penumbra e magnificação, bem como características físicas como o contraste foram obedecidas nas simulações. As análises perfilométricas das imagens de espalhamento, para diferentes situações também mostraram que todos os fenômenos importantes envolvidos no processo de espalhamento como distribuição espacial, aumento e diminuição da magnitude do espalhamento com a distância foram respeitados, principalmente para configurações com o detector próximo ao objeto radiografado, mostrando que o problema relacionado a detecção da radiação espalhada em regiões muito próximas ao detector pontual (píxel na grade imagem) foi solucionado nesta versão do MCNP.

Quanto a aplicação desta função em conjunto com *softwares* de pós-processamento de dados, e a metodologia empregada para modelagem de imagens digitais com detectores *Image Plate*, os resultados obtidos mostraram boa concordância com os resultados experimentais, ilustrando a capacidade do código MCNPX em reproduzir cenários típicos de ensaios não destrutivos, e mostrando que a metodologia desenvolvida para a modelagem de imagens digitais consegue tornar as imagens simuladas compatíveis com as experimentais, fazendo desta uma ferramenta em potencial para o estudo de fatores

que possam influenciar o resultado final dos ensaios radiográficos, principalmente em ambientes submersos, onde qualquer investigação é onerosa e difícil de ser executada devido às condições de trabalho a que os profissionais são submetidos.

Capítulo 6

Perspectivas

Uma vez desenvolvida e validada a metodologia para a geração das imagens digitais, a principal perspectiva seria o estudo da otimização do processo radiográfico em radiografia *offshore* e em radiografia industrial convencional, visando a determinação de procedimentos padrões para esta modalidade de inspeção. Parâmetros como a presença de revestimento externo ao duto, tipos de revestimento, diâmetro do duto, termo fonte e irradiador, etc., devem ser abordados.

Como visto na seção 4.4.2, as imagens simuladas com o duto preenchido com água levaram nove dias para alcançar a flutuação estatística requerida pelo código MCNPX, e conseqüentemente, estudos que viabilizem uma diminuição do tempo de simulação, bem como a utilização de processamento paralelo, também são necessários.

Estudos utilizando esta metodologia na simulação de imagens digitais em radiologia médica têm sido realizados por *Correa et. al.* [77,78], apresentando valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. Entretanto, ainda há outros campos de atuação como radiologia neutrongrafia e odontológica, que também podem ser explorados através da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] FERRARI, C. *Curso de Planejamento Municipal Integrado: Urbanismo*. 7 ed. São Paulo, Pioneira, 1991.
- [2] CADOSO, D. L. *Metodologia para Análise e Projeto de Dutos Submarinos Submetidos a Altas Pressões e Temperaturas via Aplicação do Método dos Elementos Finitos*. Tese de D.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [3] BERGER, H.; BRACKETT, L. R.; MITTLEMAN, J. “Underwater Inspections of Naval Structures”. *IEEE Transactions on Nuclear Science.*, v. 30, pp 555-559, 1983.
- [4] USA DEPARTMENTS OF THE ARMY, THE NAVY AND THE AIR FORCE. *Maintenance of Waterfront Facilities, Manual*. Department of Defense, USA, June, 1978.
- [5] IAEA. *Development of Protocols for Corrosion and Deposits Evaluation in Pipes by Radiography - IAEA-TECDOC-1445*. International Atomic Energy Agency, Wien, 2005.
- [6] SILVA, C. L.; PETRAGLIA, A.; PETRAGLIA, M. R. *Sistema de Visão para Inspeção Submarina de Tubulações e Equipamentos de Petróleo em Águas Profundas*. IBP32598, Instituto Brasileiro do Petróleo – IBP, 1998.
- [7] VEITH, E.; BUCHERIE, J.; LECHIEN, J. L. et al. “Inspection of offshore flexible risers with electromagnetic and radiographic techniques”, *Insight*, v. 43, n. 6, pp. 404-408, June, 2001.
- [8] OLIVEIRA, C. H. F.; CAMERINI, C. S. “Pig Instrumentado da Petrobrás: Resultados e Perspectivas”. In: *Anais da 6ª COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos*, pp 2-11. Salvador, Agosto. 2002.

- [9] HEALTH & SAFETY EXECUTIVE.. *Recommended practice for the rapid inspection of small bore connectors using radiography*. RESEARCH REPORT 294, HSE BOOKS, 2005.
- [10] PATEL, R. J. “Digital Applications of Radiography”. In: *Proceedings of the 3rd MENDT*, pp 1-6, Bahrain, Manama, Nov. 2005.
- [11] SHINOHARA, A. H.; ACIOLI, E. KHOURY, H. J. “Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia”. In: *Anais da 6^a COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos*, Salvador, Agosto, 2002.
- [12] DAVIS, W. A.; BERRY, C. P.; CLAYTON, T. N. et al. *An Analysis of Industrial Nondestructive Testing Employing Digital Radiography as an Alternative to Film Radiography*. LA-UR-00-2560, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [13] ZSCHEREL, U.; ONEL, Y.; EWERT, U. “New Concepts for Corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiography (DIR)”. In: *Proceedings of 15th WCNDT*, pp. 1-10. Roma, 200.
- [14] MARINHO, C. A.; CAMERINI, C. S.; MAIA, C. et al. “Gamagrafia como Técnica de Inspeção em Dutos Submarinos”. In: *8^a COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamento*, pp. 1-15, Salvador, 2005.
- [15] MARINHO, C. A.; CAMERINI, C. S.; MAIA, C. et al. “Gamma Ray System Operated by Robots for Underwater Pipeline Inspection”. *ECNDT 2006 – Tu.2.5.2*, 2006.
- [16] ASTM E 94-04. *Standard Guide for Radiographic Examination*. ASTM INTERNATIONAL, Conshohochen, Pennsylvania, janury, 2004.
- [17] ASTM E 186-98R04. *Standard Reference Radiographs for Heavy-walled {2 to 4 ½-in (51 to 114-mm)} steel castings*. ASTM INTERNATIONAL, Conshohochen, Pennsylvania, janury, 2004.

- [18] ASTM E 280-98R04. *Standard Reference Radiographs for Heavy-walled {4 1/2 to 12-in (114 to 305-mm)} steel castings*. ASTM INTERNATIONAL, Conshohochon, Pennsylvania, janury, 2004.
- [19] ASTM E 446-98R04. *Standard Reference Radiographs for steel castings up to 2 in (51 mm) in Thickness*.ASTM INTERNATIONAL, Conshohochon, Pennsylvania, january, 2004.
- [20] ASTM E 2033-99. *Standard Praticce for Computed Radiology (Photostimulable Luminescence Method)*.ASTM INTERNATIONAL, Conshohochon, Pennsylvania, january, 2004.
- [21] GRAY, J. “Three Dimensional Modeling of Projection Radiography” , In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 7 ed, Plenum, New York, 1988.
- [22] XU. J; WALLINGFOR, R. M.; JENSEN, T. et al. “Recent Developments in the X-ray radiography simulation code, XRSIM ” , In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 13 ed, Plenum, New York, 1994.
- [23] TILLACK, G. -R.; BELLON, C.; NOCHEMANN, C. “Computer Simulation of Radiographic Process – A Study of Complex Component and Defect Geometry”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 14 ed, Plenum, New York, 1995.
- [24] BELLON, C.; TILLACK, G. -R.; NOCHEMANN, C. et al. “Computer Simulation of X-ray NDE Process Couple with CAD Interface”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 16 ed, Plenum, New York, 1997.
- [25] TILLACK, G. -R.; NOCHEMANN, C. BELLON, C. “X-Ray Modeling for Industrial Applications”, *NDT&E International*, v.33, issue 7, 2000.
- [26] FREUD, N.; DUVAUCHELLE, P.; BABOT, D. “Simulation of X-ray Imaging Techniques”. In: *Proceeding of the 15th World Conference on Nondestructive Testing*, Rome, 2000.

- [27] DUVAUCHELLE, P., FREUD, N.; KAFTANDJIAN, V. et al. “A Computer Code to Simulate X-Ray Imaging Techniques”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 170, pp. 245-258, 2000.
- [28] KOENIG A.; GLIERE, A.; RIZO P. et al. “Objetct Pose Estimation Using a Set of Local Radiographs of a Part and Its CAD Model”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 16 ed, Plenum, New York, 1997.
- [29] GLIERE, A. “SINDBAD: From CAD Model to Synthetic Radiographs”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 17 ed, Plenum, New York, 1998.
- [30] DDDELLA ROCCA, A. B.; FERRIANI, S.; LA PORTA, L. “Computer Simulation of the Radiographic Image Forming Process: Implementation and Applications”, *NDT&E International*, v.28, issue 3, 1995.
- [31] AUFDERHEIDE, M. A.; SLONE, D. M.; SCHACH VON WITTENAU. “HADES, A Radiographic Simulation Code”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 20 ed, AIP Conference Proceedings, 2001.
- [32] BONIN, A.; LAVAYSSIERE, B.; CHALMOND, B. “MODERATO: A Monte-Carlo Radiographic Simulation”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 19 ed, AIP Conference Proceedings, 2000.
- [33] BELL, Z. W. “Monte Carlo Simulation of Shadow Formation by Planar Objects Illuminated by An Extended Source”. In: *Proceedings of the Review of Progress in QNDE*, 10 ed, Plenum, New York, 1991.
- [34] NELSON, W. R.; HIRAYAMA, H.; ROGERS, D. W. O. *The EGS4 Code System*. Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-265-UC-32, 1985.
- [35] SALVAT, F.; FERNÁNDEZ-VAREA, J. M.; SEMPAU, J. *PENELOPE – A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. OECD/NEA Data Bank, Issy-lesl-Moulineaux, France, 2003.

- [36] BRUN, R.; BRUYANT, F.; MAIRE, M. et al. *GEANT3*. cern dd/ee/84-1, 1987.
- [37] BRIESMEISTER, J. F. *MCNP – A General Monte Carlo code for neutron and photon transport, Version 3A*. Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M, 1997.
- [38] PEPLOW, E. D.; VERGHESE, K. “Digital mammography image simulation using Monte Carlo”. *Medical Physics*, v. 27, issue 3, pp. 568-579, March. 2000.
- [39] BRIESMEISTER, J. F. *MCNP – A General Monte Carlo code for neutron and photon transport, Version 4C*. Los Alamos National Laboratory report LA-13709-M, March. 2000.
- [40] XU, X. G.; CHAO, T. C.; BOZKURT, A.; “VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the visible project for multi-particle Monte Carlo calculation”. *Health Physics*, v. 78, issue 5, pp. 476-486. 2000.
- [41] X-5 MONTE CARLO TEAM. *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. Los Alamos National Laboratory report LA-CP-03-0245, April. 2003.
- [42] PELOWITZ, D. B. ed. *MCNPXTM User’s Manual, Version 2.5.0*. Los Alamos National Laboratory report LA-CP-05-0369, April. 2005.
- [43] PRAEL, R. E.; LICHTENSTEIN, H. *User Guide to LCS: The LAHET Code System*. Los Alamos National Laboratory report LA-UR-89-3014, Sept. 1989.
- [44] INANC, F. “Analysis of X-Ray and Gamma Ray Scattering through computational experiments”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 18, n. 2, pp. 73-82. 1999.
- [45] TILLACK, G-R.; ARTEMIEV, V. M.; GRAY, J. N. “The effect of scattered radiation in X-ray techniques – Experiments and theoretical considerations”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, v. 18, pp. 631-638.1999.

- [46] TABARY, J.; GUILHERMAUD, R.; MATHY, F. et al. “Combination of High Resolution Analytically Computed Uncollided Flux Images With Low Resolution Monte Carlo Computed Scattered Flux Images”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 51, n. 1, pp. 212-217, Feb. 2004.
- [47] RUSS. J. C., *Image Processing Handbook*. 4 ed. CRC Press LLC, 2002.
- [48] W. O. ARRUDA. “Willhelm Conrad Röntgen: 100 anos de descoberta dos raios X”. *Arq. Neuropsiquiatr*, v. 54, issue 3, pp. 525-531. 1996.
- [49] SPRAWLS, P., *Physical Principles of Medical Imaging*. 2 ed. Medical Physics Publishing Madison, Wisconsin, 1995.
- [50] SEIBERT, J. A.; BOONE, M. J.; “X-Ray Imaging Physics for Nuclear Medicine Technologists. Part 2: X-Ray Interactions and Image Formation”, *Journal of Nuclear Medicine Technology*, v. 33, n. 1, pp. 3-18, March. 2005.
- [51] TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R.; R.DIPRINZIO, A. *Fundamentos de Radioproteção e Dosimetria*, 3^a ed., Rio de Janeiro, CNEN Publicações, 1991.
- [52] ANDREUCCI, R. *Radiologia Industrial*. Ed. Jul. 2003, ABENDE publicações, 2003.
- [53] SEEMANN, T., *Digital Imagem Processing using Local Segmentation*. Ph.D. Tesis, School of Computer Science and Software Engineering, Monash University, Australia, 2002.
- [54] KIM K. H. *Low Frequency Noise in Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Film Transistors*. M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2006.
- [55] WOLBARST, A. P., *Physics of Radiology*. 2 ed. Medical Physics Publishing Madison, Wisconsin, 2005.

- [56] MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, G. C., *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*, 2 ed, Rio de Janeiro, LTC, 2003.
- [57] ROWLANDS, J. A. “The Physics of Computed Radiography”, *Phys Med Biol*, v. 47, pp. R123-R166, 2002.
- [58] CARTER, L. L.; SCHWARTZ, R. A. *MCNP Visual Editor Computer Code Manual*, Los Alamos National Laboratory. 2003.
- [59] SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; LOPES, R. T.; SILVA, A. X. “Development of a Data Post Processing Program of Image Simulation with MCNP5”. *In: Proceedings of the XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustentable Development*. Rio de Janeiro, Sept. 2006.
- [60] SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Primary And Scattered Component Analyses of Simulated Images with MCNPX”. *In: Proceedings of the International Atlantic Nuclear Conference – INAC*. Santos-SP, Oct. 2007.
- [61] KARDJILOV, N.; LEHMANN, E.; VONTOBEL, P. “Representation of the image formation in applied neutron radiography in terms of a PSF superposition”, *Appl. Phys. A*, v. 74, pp. S228-S230. 2002.
- [62] AHN, S. K.; JEON, H. “A scatter Correction Using Thickness Iteration in Dual-Energy Radiography”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 53, n. 1, pp. 133-138, Feb. 2006.
- [63] KARDJILOV, N.; DE BEER, F.; HASSANEIN, R. et al. “Scattering corrections in neutron radiography using point scattered function”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v. 542, pp. 336-341. 2005.
- [64] HASSANEIN, R.; LEHMANN, E.; VONTOBEL, P. “Methods of scattering corrections for quantitative neutron radiography”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, v. 542, pp. 353-360. 2005.

- [65] ICRU, *Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnostic and Protection*, ICRU Report 48, International Commission on Radiation Units and Measurement, Bethesda, MD, 1992.
- [66] CHAN, H-P; DOI, K. “The Validity of Monte Carlo simulation in studies of scattered radiation in diagnostic radiology”, *Phys Med. Biol*, v. 28, n. 2, pp. 109-129. 1983.
- [67] HONDA, M.; EMA, T. KIKUCHI, K. et al. “A technique of scatter-glare correction using a digital filtration”, *Medical physics*, v. 20, n.1 pp 59-69, 1993.
- [68] BEEKMAN, F. J.; SLIJPEN, E. T. P.; DE JONG, H. W. A. M. et al. “Estimation of the depth-dependent component of the point spread function of SPECT”, *Medical Physics*, v. 26, n. 11, pp. 2311-2322. 1999.
- [69] OPPENHEIM, A. V., WILLSKY, A. S.; YOUNG, I. T., *Signals and Systems*, 1 ed, New Jersey, Prentice-Hall, 1983.
- [70] GAUVREAU, K; PAGANO, M., *Princípios de Bio Estatística*. 2 ed. Pioneira Thonson Learning, São Paulo, 2004.
- [71] HASSANEIN R. K. *Correction Methods for the Quantitative Evaluation of Thermal Neutron Tomography*. Ph.D. Tesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Swiss, 2006.
- [72] SOUZA, E. M., CORREA, S. C.; A., SILVA, A. X., OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T. “Digital Radiography Simulation for Industrial Applications with MCNPX”. In: *Proceedings of the International Atlantic Nuclear Conference – INAC*. Santos-SP, 2007.
- [73] SOUZA, E. M.; CORREA, S. C.; A., SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “PROGRAMA IMAGEM: Um programa de pós-processamento de dados para simulação de imagens radiográficas com o código MCNPX”. In: *Proceedings of the X EMC*. Friburgo-RJ, 2007.

[74] SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T. “Methodology for Digital Radiography Simulation Using the Monte Carlo Code MCNPX for Industrial Applications”, *Applied Radiation and Isotopes* (2007), doi:10.1016/j.apradiso.2007.11.004.

[75] BOX, G.E.P.; MULLER, M.E. “A note on the generation of random normal deviates”. In: *Annals Math. Stat*, V. 29, pp. 610-611. 1958

[76] MORETIN, P.A.; BUSSAD, W. *Estatística básica. Atual*, São Paulo. 1986.

[77] CORREA, S. C.; A.; SOUZA, E. M.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Image Quality Optimization in Digital Chest Radiography using MCNPX”. In: *Proceedings of the IX EMC*. Belo Horizonte-MG, 2006.

[78] CORREA, S. C. A.; SOUZA, E. M.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Dose–image quality study in digital chest radiography using Monte Carlo simulation”, *Applied Radiation and Isotopes* (2008), doi:10.1016/j.apradiso.2008.01.009.

Apêndice 1

Publicações originadas nesta tese

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T. “Methodology for Digital Radiography Simulation Using the Monte Carlo Code MCNPX for Industrial Applications”, *Applied Radiation and Isotopes* (2007), doi:10.1016/j-apradiso.2007.11.004.

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Primary And Scattered Component Analyses of Simulated Images with MCNPX”. Trabalho Submetido ao periódico *Progress in Nuclear Energy*, em fase de avaliação.

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; LOPES, R. T.; SILVA, A. X. “Development of a Data Post Processing Program of Image Simulation with MCNP5”. In: *Proceedings of the XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development*. Rio de Janeiro, Sept. 2006.

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Primary And Scattered Component Analyses of Simulated Images with MCNPX”. In: *Proceedings of the International Atlantic Nuclear Conference – INAC*. Santos-SP, Oct. 2007.

SOUZA, E. M., CORREA, S. C.; A., SILVA, A. X., OLIVEIRA, D. F.; LOPES, R. T. “Digital Radiography Simulation for Industrial Applications with MCNPX”. In: *Proceedings of the International Atlantic Nuclear Conference – INAC*. Santos-SP, 2007.

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C.; A., SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “PROGRAMA IMAGEM: Um programa de pós-processamento de dados para simulação de imagens radiográficas com o código MCNPX”. In: *Proceedings of the X EMC*. Friburgo-RJ, 2007.

SOUZA, E. M.; CORREA, S. C. A.; SILVA, A. X.; OLIVEIRA, D. F.; CASSIANO, D. H.; LOPES, R. T. “Modelagem e Calibração de um Sistema de Radiografia Computadorizada Utilizando o Código de Monte Carlo MCNPX”. *In: Proceedings of the XXVI CONAEND&IEV*. São Paulo-SP, 2008.

Apêndice 2

Publicações que utilizaram a metodologia para geração de imagens digitais desenvolvida nesta tese

CORREA, S. C. A.; SOUZA, E. M.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Dose–image quality study in digital chest radiography using Monte Carlo simulation”, *Applied Radiation and Isotopes* (2008), doi:10.1016/j.apradiso.2008.01.009.

CORREA, S. C.; A.; SOUZA, E. M.; SILVA, A. X.; LOPES, R. T. “Image Quality Optimization in Digital Chest Radiography using MCNPX”. *In: Proceedings of the IX EMC*. Belo Horizonte-MG, 2006.