



COPPE/UFRJ

ESTUDO DA TÉCNICA DE RETROESPALHAMENTO DE RAIOS X E GAMA NA
INSPEÇÃO DE DUTOS COMPÓSITOS

Cristyane Silva Santos de Oliveira

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

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2009

ESTUDO DA TÉCNICA DE RETROESPALHAMENTO DE RAIOS X E GAMA NA
INSPEÇÃO DE DUTOS COMPÓSITOS

Cristyane Silva Santos de Oliveira

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

Aprovada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Marcelino José dos Anjos, D.Sc.

Prof. Delson Braz, D.Sc.

Prof. Henrique de Souza Rocha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2009

Oliveira, Cristyane Silva Santos de

Estudo da Técnica de Retroespalhamento de Raios X e Gama na Inspeção de Dutos Compósitos / Cristyane Silva Santos de Oliveira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 72 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 66-70.

1. Retroespalhamento Compton. 2. Radiação X e Gama. 3. Ensaio Não-Destrutivo. I. Lopes, Ricardo Tadeu II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Este trabalho é dedicado aos meus pais
À minha irmã Cristyne e ao meu namorado Denysson*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meu caminho e dar força para percorrê-lo;

À minha família, pelo apoio, carinho, compreensão e incentivo constante;

Ao Programa de Engenharia Nuclear (PEN), pela confiança e oportunidade concedida;

Ao professor e orientador Ricardo Tadeu Lopes, pela orientação, sugestões, disponibilidade e paciência durante todo o desenvolvimento da Dissertação;

Ao professor Marcelino, pela dedicação e disponibilidade de compartilhar seus conhecimentos, ajudando no desenvolvimento desta pesquisa;

Ao eng. Achilles Astuto e ao técnico José Marques pelo apoio recebido da oficina mecânica;

Ao meu colega Davi, pela ajuda dada no decorrer do trabalho;

À toda equipe do LIN, sem a qual a realização deste trabalho seria inviável;

Aos amigos e amigas do LIN pela amizade, conversas, força e incentivos indispensáveis à realização deste trabalho;

Aos colegas Dalton e Pedro, pela disponibilidade ajudando no desenvolvimento do trabalho;

Ao meu namorado Denysson, o meu sincero agradecimento pela ajuda em cada passo da Dissertação, pelo apoio e incentivo que me fizeram chegar até aqui;

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

À todos os professores que participaram da minha formação acadêmica;

À todas as pessoas que contribuíram de forma direta e indireta na realização deste trabalho.

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

ESTUDO DA TÉCNICA DE RETROESPALHAMENTO DE RAIOS X E GAMA NA INSPEÇÃO DE DUTOS COMPÓSITOS

Cristyane Silva Santos de Oliveira

Fevereiro/2009

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear.

O uso de técnicas de inspeção de materiais para detecção de falhas tem sido de grande importância na área industrial. A técnica de retroespalhamento de raios X ou γ tem aplicações potenciais em quase toda situação na qual ensaios não-destrutivos são requeridos, principalmente quando somente um lado da estrutura está disponível para exame. A proposta deste trabalho foi realizar um estudo de viabilidade de um sistema de inspeção para dutos compósitos por retroespalhamento Compton da radiação, tendo como objetivo a detecção de defeitos nas junções das superfícies destes dutos, que são coladas com resina epóxi. Foram usadas duas fontes, uma de raios X com tensão de 75 kVp e corrente máxima de 250 μ A, e de Amerício-241 com atividade de $7,4 \times 10^8$ Bq. Para isso foram obtidos espectros de energias de pontos diferentes nas peças, posicionando o detector a determinado ângulo da fonte e medindo o retroespalhamento de um volume pequeno ou *voxel*. O detector utilizado foi de CdTe, modelo XR-100T, fabricado pela Amptek (USA). Os espectros foram adquiridos através de um analisador multicanal, modelo Pocket MCA8000A, também fabricado pela Amptek. A intensidade da radiação retroespalhada no *voxel* é proporcional a densidade eletrônica no material. Então, através da varredura com as fontes de raios X e γ foi possível fazer um estudo da intensidade dos fótons retroespalhados nos dutos. Foram feitas medidas para analisar defeitos, como falta de adesão e falta de adesivo, tendo como referência a análise de peças sem defeitos. Os experimentos mostraram a viabilidade da técnica para a inspeção de juntas coladas de dutos compósitos com resina epóxi.

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

STUDY OF THE TECHNIQUE OF BACKSCATERING OF X AND GAMMA RAYS
ON THE INSPECTION OF COMPOSITE PIPE

Cristyane Silva Santos de Oliveira

February/2009

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

The inspection of materials for detection of internal failure is of great importance on the industrial area. The γ -ray and X-ray backscatter technique has potential applications in almost all cases in which the non-destructive essay are required, especially when only one side of the structure is available for examination. The objective of this work was to perform a feasibility study of an inspection system for composite pipes with Compton backscattering of radiation, with the aim to detect defects in the joints of the areas of these pipes, which are glued with epoxy resin. Were used two sources, an X-ray with tension of 75 kV and maximum current of 250 μ A, and one of Americium-241 with $7,4 \times 10^8$ Bq activity. For this purpose, spectra energy from different points of the pieces were obtained, positioning the detector to certain angle of the source and measuring the backscatter of a small volume or voxel. The detector used was of CdTe – model XR-100T, manufactured by Amptek (USA). The spectra were obtained from a analyzer multi-channel – model Pocket MCA8000A, manufactured by Amptek as well. The intensity of the backscattered radiation from a voxel is proportional to electron density on the material. So, through scanning with the sources of γ -ray and X-ray, was possible to study study the intensity of photons backscattered in the pipes. Measures were made to analysis defects, as lack of adhesion or lack of adhesive, using as reference non-defect pieces. The experiments showed the feasibility of the technique for inspection of bonded joints of composite pipes with epoxy resin.

Sumário

CAPÍTULO I	1
I.1 INTRODUÇÃO	1
I.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
CAPÍTULO II.....	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
II.1 Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria	9
II.1.1 Efeito Fotoelétrico.....	10
II.1.2 Efeito Compton	11
II.1.2.1 Equação Geral do Espalhamento Compton.....	14
II.2 Espectro de Energias.....	16
II.3 Espectro Eletromagnético	17
II.3.1 Espectro de Raios X.....	18
II.3.2 Espectros de Raios Gama.....	19
II.4 Geometria de Espalhamento	22
II.5 Detector CdTe.....	23
II.6 Eficiência do Detector.....	24
II.7 Sinal de Detecção.....	25
CAPÍTULO III	27
MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
III.1 Fonte de Radiação X.....	27
III.2 Fonte de Radiação Gama.....	27
III.3 Descrição do Sistema de Detecção.....	28
III.4 Descrição das Peças Analisadas	28
III.5 Metodologia.....	30
III.5.1 Montagem do Arranjo Experimental	30
III.5.2 Dimensionamento do sistema	31
III.5.2.1 Sistema de Colimação.....	32
III.5.2.2 Ângulo de Espalhamento e Distância Fonte - Peça - Detector	36
III.5.3 Procedimento Experimental.....	37
III.5.3.1 Calibração do sistema	37
III.5.3.2 Procedimento de Inspeção com Fonte de Raios X.....	39
III.5.3.3 Procedimentos de Inspeção com Fonte Gama de ²⁴¹ Am	40
III.5.3.3.1 Estudo do Espalhamento na Peça.....	40
III.5.3.3.2 Análise da Densidade Eletrônica.....	41
III.5.3.3.3 Teste de Sensibilidade do Sistema.....	42
III.5.3.3.4 Ensaio de Detectabilidade de Defeito.....	43
CAPÍTULO IV	45
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
IV.1 Calibração em energia.....	45

IV.2 Análise do Espalhamento de Raios X na Profundidade	46
IV.3 Análise do Espalhamento de Raios Gama.....	49
IV.4 Análise da Densidade Eletrônica.....	54
IV.5 Sensibilidade do Sistema em Detectar Defeitos.....	57
IV.6 Ensaio de Detectabilidade de Defeitos.....	62
CAPÍTULO V	63
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICE A	71

Lista de Figuras

Figura II.1- Fotopicos para diferentes ângulos de espalhamento dos fótons (JENKINS <i>et al.</i> , 1981).....	8
Figura II.2 – Diagrama esquemático do efeito Fotoelétrico.....	11
Figura II.3 – Diagrama esquemático do efeito Compton.....	12
Figura II.4 – Espalhamento de um fóton em um ângulo, por unidade de ângulo sólido ($d\Omega$) (KNOLL,1989).....	13
Figura II.5- Distribuição espacial dos raios gama espalhados (Adaptada de GOUVEIA, 2000).....	14
Figura II.6 - Esquema típico de um sistema de varredura utilizando a técnica de espalhamento Compton (Adaptada de SILVA, 1997).....	15
Figura II.7 - Espectro eletromagnético (MACEDO <i>et al.</i> , 2000).....	17
Figura II.8 – Esquema de ampola de raios X (ROCHA, 2001).....	18
Figura II.9 - Espectro de radiação contínua (OLIVEIRA, 2007).....	19
Figura II.10 - Espectro teórico relativo a uma fonte gama monoenergética (MONTANHEIRO, <i>et al.</i> , 1977).....	21
Figura II.11 - Espectro experimental do ^{137}Cs ao qual corresponde ao espectro teórico da figura II.10 (MONTANHEIRO, <i>et al.</i> , 1977).....	21
Figura II.12 - Geometria de Espalhamento Compton. (MCFARLANE <i>et al.</i> , 2003).....	22
Figura II.13- Esquema de um sistema de retroespalhamento a 90°	26
Figura III.1- Peça cortada de um duto compósito sem defeito em sua junção - visão frontal (superfície) e visão lateral (profundidade).....	29
Figura III.2- Dimensões e cortes dos dutos de 16 ".....	29
Figura III.3 – Peças montadas para ensaios simulando a originais; a) Ensaio para análise da densidade eletrônica e b) Ensaio para o teste de detectabilidade de defeito.....	30
Figura III.4 - Sistema de medidas utilizando a fonte gama de ^{241}Am	31

Figura III.5 – Exemplo de disposição dos colimadores em um sistema fonte – detector (Adaptada de Anjos, 1991).....	33
Figura III.6 - Colimadores utilizados no sistema fonte-detector, com suas respectivas dimensões.	35
Figura III.7 – Esquemas das inspeções e seus respectivos voxel.	36
Figura III.8 – Esquema do sistema de alinhamento dos colimadores para fonte gama.....	38
Figura III.9: Geometria de retroespalhamento de raios X, vista de cima.....	40
Figura III.10 – Arranjo experimental para análise da densidade eletrônica (visão lateral e superior).....	42
Figura III.11 – Arranjo experimental para o teste da sensibilidade do sistema (visão lateral e superior).....	43
Figura III.12 - Arranjo experimental para o ensaio de detectabilidade de defeitos (visão lateral e superior).....	44
Figura IV.1 – Espectro de calibração do analisador multicanal – ^{241}Am	45
Figura IV.2 - Influência dos filtros nos espectros de feixes incidentes.....	47
Figura IV.3 – Espectros da intensidade do feixe espalhado com relação a espessura em cada ponto da peça com falta de adesivo.	47
Figura IV.4 - Espectros da intensidade do feixe espalhado com relação a espessura em cada ponto da peça sem defeito.	48
Figura IV.5 – Espectros de retroespalhamento da peça sem defeito em diferentes pontos na região da resina.....	49
Figura IV.6 – Espectros de retroespalhamento da peça com falta de adesivo em diferentes pontos na região da resina.	49
Figura IV.7- Comparação entre os espectros de espalhamento de raios gama em relação a profundidade na peça.....	50
Figura IV.8 – Curvas de calibração para as paredes 1 e 2 da peça.....	52

Figura IV.10 - Comparação entre os espectros de espalhamento de raios gama da superfície da peça e da resina num tempo de contagem de 5000 s.	54
Figura IV.11 – Contagens total com relação à profundidade de inspeção na peça.	55
Figura IV.12 – Gráfico da densidade eletrônica média em relação a espessura da peça.	56
Figura IV.13 – Comparação entre as contagens da altura 1 das peças com falta de adesivo e sem defeito.....	57
Figura IV.14 – Comparação entre as contagens da altura 1 das peças com falta de adesão e sem defeito.....	58
Figura IV.15 – Comparação entre as contagens da altura 2 das peças com falta de adesivo e sem defeito.....	59
Figura IV.16 – Comparação entre as contagens da altura 2 das peças com falta de adesão e sem defeito.....	59
Figura IV.17 – Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesivo e sem defeito.....	60
Figura IV.18 - Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesão e sem defeito.....	60
Figura IV.19 - Comparação entre as contagens da altura 4 das peças com falta de adesivo e sem defeito.....	61
Figura IV.20 - Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesão e sem defeito.....	61
Figura IV.21 – Variação das contagens obtidas com a peça montada com relação à profundidade na peça.....	62
Figura IV.22 – Variação das contagens com relação a largura do vazio.....	63

Lista de Tabelas

Tabela IV.1 - Energias características da fonte gama de ^{241}Am com seus respectivos canais.	46
Tabela IV.2 – Contagens totais do fotopico principal de espalhamento nas partes da peça.	50
Tabela IV.3 – Medidas de intensidades de fótons incidentes e transmitidos em cada material da peça separadamente e suas espessuras.	51
Tabela IV.4 – Coeficientes de absorção linear dos feixes incidentes e espalhados nas partes da peça.	53
Tabela IV.5 – Total de contagens de toda região do fotopico principal de espalhamento na superfície da resina e da peça.	54
Tabela IV.6 – Coeficientes de Absorção Linear do ar para os feixes de raios γ incidentes e espalhados.	56

CAPÍTULO I

I.1 INTRODUÇÃO

Os compósitos de polímeros termofixos reforçado com fibras, tipo fibra de vidro, também conhecidos no Brasil como plásticos reforçados com fibra de vidro e materiais compósitos, ou somente como *fiberglass*, consistem em materiais de moldagem estrutural, formados por uma fase contínua polimérica (resina) e uma fase descontínua (fibra de reforço), que se agregam físico-quimicamente após um processo de *crosslinking* polimérico (cura) (JAIGOBIND *et al.*, 2007).

Dutos compósitos de fibra de vidro reforçado com resina epóxi podem ser utilizados numa vasta gama de aplicações, que vão desde a indústria química, serviços industriais gerais e campo petrolífero, até plataforma off-shore e demais aplicações marítimas. Os sistemas especiais de tubagens foram concebidos para proteção a incêndios e explosões para as plataformas em alto mar. Eles são resistentes a corrosão interna provocada por produtos químicos, petróleo bruto, injeção de água e bactérias. Do mesmo modo, eles são resistentes a corrosão exterior o que torna uma excelente solução para os problemas apresentados pelos altamente agressivos ambientes marinhos (AMERON INT., 2008). Porém algumas falhas podem ocorrer após a instalação desses dutos na indústria, como por exemplo: falta de adesão em alguns pontos, impossibilitando a perfeita junção das superfícies dos dutos.

Os ensaios não-destrutivos (END) de objetos para detecção de falhas internas e contaminantes são de importância vital para muitas indústrias. Estes ensaios investigam os materiais sem destruí-los ou introduzir quaisquer alterações nas suas características e podem ser aplicados na inspeção de matéria-prima, no controle de processos de fabricação e inspeção final. Os ensaios não-destrutivos constituem uma das ferramentas indispensáveis para o controle da qualidade dos produtos produzidos pela indústria moderna (ANDREUCCI, 2003).

As radiações X e γ são radiações eletromagnéticas ionizantes de maior interesse para aplicação na indústria, pois devido ao seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, essas radiações podem penetrar em um material, percorrendo grandes espessuras antes de sofrer uma interação. Este poder de penetração depende da

probabilidade ou secção de choque de interação para cada tipo de evento que pode absorver ou espalhar a radiação incidente. A penetrabilidade dos raios X ou γ é muito maior que das partículas carregadas, e a probabilidade de interação depende muito do valor de sua energia (CARNEIRO, 2006).

Sistemas com fonte de raios X foram utilizados durante algum tempo como um método barato e conveniente de inspeção em muitas aplicações, que vão desde aeronaves até placas de circuito e cerâmicas (MCFARLANE *et al.*, 2003). Este método é uma tecnologia bem estabelecida com numerosas aplicações na indústria. Tem havido interesse em pesquisas usando tecnologias alternativas de raios X, especialmente espalhamento de raios X, como uma tentativa de obter melhores resultados na inspeção de diversos materiais.

Nos últimos anos, a indústria do petróleo vem reconhecendo o grande valor das técnicas que utilizam radioisótopos na solução de seus problemas tanto no processo de extração como na investigação de suas instalações. O uso de radiação gama penetrante emitida por materiais radioativos encontrados na natureza, como Rádium e o Radônio, em substituição aos raios X obtidos através de máquinas, consagrou-se como técnica de inspeção por volta de 1930, contudo, foi apenas por volta de 1948, com a obtenção de radioisótopos artificiais através dos reatores nucleares, que as técnicas de inspeção baseadas na utilização de radiação gama tornaram-se largamente difundidas (GOUVEIA, 2000).

As técnicas de detecção encontradas atualmente são inúmeras, apresentando cada uma delas vantagens e desvantagens. Uma vantagem apresentada pela técnica de espalhamento de radiação X ou gama, em comparação com as técnicas de transmissão mais tradicionais como a radiografia e a tomografia, é a possibilidade de se obter informações de corpos que possuem grandes dimensões, como por exemplo, tanques, tubulações de grande diâmetro, estruturas *off-shore* etc. Tais corpos, impossibilitam a transmissão da radiação devido a grande atenuação sofrida pelo feixe de radiação ao longo do corpo (SILVA, 1997).

O efeito de espalhamento primário é conhecido como "Espalhamento Compton". Este é o espalhamento de um fóton por um único elétron. Houve muito interesse no uso de espalhamento Compton como uma ferramenta de inspeção na indústria, porque é possível posicionar um detector a qualquer ângulo com relação ao feixe, e contar o espalhamento de um elemento de volume pequeno, ou *voxel*, no material ou alvo. A intensidade de radiação

espalhada de um *voxel* é proporcional à densidade do material, então através da varredura do voxel espalhado, um mapa de densidade pode ser produzido (MCFARLANE *et al.*, 2003).

Há outras vantagens potenciais desta técnica sobre as imagens de transmissão convencional: o contraste é maior porque o detector só vê fótons que interagiram de fato com o alvo; possibilidade de projetar o sistema de modo a trabalhar com ângulos de espalhamento grandes (retroespalhamento); obter informação diretamente proporcional à densidade eletrônica no interior do *voxel*, sendo este formado pela interseção dos feixes de radiação incidentes e espalhados; utilizar uma geometria que permita acessar somente um dos lados do material sob inspeção, o que torna esta técnica de grande importância na inspeção de estruturas onde o acesso a um dos lados é limitado (ANJOS, 1991).

A geometria de retroespalhamento na qual a fonte e o detector estão no mesmo lado da peça, foi utilizada dentro de muitas aplicações industriais, tais como, inspecionar superfícies como fuselagens de aeronave (LAWSON, 1993 e 1995), onde imagens de transmissão não são possíveis. O objetivo desse trabalho foi estudar a técnica de retroespalhamento Compton de raios X e Gama em peças cortadas de dutos compósitos de fibra de vidro, além de detectar defeitos nas suas junções coladas com resina epóxi.

Este trabalho está organizado em capítulos, de forma a se manter a seqüência cronológica do seu desenvolvimento, assim prosseguindo da seguinte maneira:

- no capítulo II, introduzem-se alguns fundamentos teóricos essenciais para um bom entendimento da técnica;

- no capítulo III estão descritos o arranjo experimental e a metodologia empregada na elaboração deste trabalho;

- no capítulo IV é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos no estudo da técnica;

- no capítulo V são feitos comentários conclusivos em relação à técnica proposta e aos resultados obtidos, sendo feitas também recomendações e sugestões a trabalhos futuros.

O apêndice A apresenta o desenvolvimento da equação do espalhamento Compton.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre as técnicas de inspeção que se desenvolveram nos últimos anos, as técnicas de ensaios não destrutivos (END) apresentam um papel de destaque, pois permitem inspeções no interior de estruturas sem a necessidade de invadi-las. As técnicas de inspeção que se constituem a partir da análise de radiação espalhada pelo objeto de estudo vêm se desenvolvendo rapidamente na área industrial, acompanhando a evolução dos equipamentos de detecção, que possibilitam a obtenção de sistemas com maior precisão e eficiência.

Um dos primeiros sistemas que utilizou a técnica de espalhamento Compton, para inspeção não destrutiva, foi proposto por STOKES *et al.* (1982). Neste sistema, conhecido como AIDECS (“Automated Inspection Device for Explosive Charge in Shells”), são utilizadas fontes de ^{60}Co com atividade de até $13,7 \times 10^{12}$ Bq (370 Ci) com a finalidade de inspecionar artefatos de artilharia.

Várias possibilidades de aplicações da técnica de espalhamento Compton, em tomografia, foram estudadas por HARDING *et al.* (1983 e 1989) que desenvolveram, em conjunto com a PHILIPS Forschungslaboratorium (Alemanha), um sistema tomográfico denominado de “Compton Scanner” (ComScan) que incorpora uma fonte e detector em um único dispositivo de mão e foi usado na detecção de defeitos superficiais em componentes metálicos.

BRIDGE *et al.* (1985 e 1987) desenvolveram um estudo teórico da viabilidade do uso da técnica de espalhamento Compton em inspeções de estruturas “off-shore” montando em seguida um sistema que utilizava uma fonte de ^{133}Ba , com atividade de $5,18 \times 10^7$ Bq (1,4 mCi) e um detector de cintilação do tipo NaI(Tl) com a finalidade de inspecionar pequenos componentes em monitoração contínua. Com seu sistema, *Bridge* conseguiu detectar defeitos de 6 mm de diâmetro em materiais de vários tipos e formas.

ANJOS (1991) desenvolveu, em sua tese de mestrado, uma técnica para detectar defeitos (vazios) em regiões próximas a superfície do corpo de prova, baseada no retroespalhamento Compton. Para isso, ele utilizou um detector tipo NaI(Tl) posicionado de forma a detectar a radiação espalhada em um ângulo de 110° . Os resultados obtidos mostraram que a técnica tem um bom poder de análise de defeitos em regiões próximas à superfície do corpo de prova.

CAMPBELL e JACOBS (1992) utilizaram a técnica de retroespalhamento Compton na detecção de minas terrestres militares construídas com materiais plásticos. As medidas foram feitas com a utilização de uma fonte de raios X e vários detectores. Foi necessária, neste caso, a utilização de colimadores nos detectores, pois para se obter uma melhor discriminação entre as contagens provenientes de espalhamentos sofridos pela radiação no solo e nas minas, foi preciso eliminar os múltiplos espalhamentos.

ONG *et al.* (1994) inspecionaram corrosão em oleodutos de aço, que transportam petróleo bruto, usando uma técnica chamada “transespalhamento”. Esta técnica utiliza uma geometria de retroespalhamento para obter uma medida de transmissão mediante o uso do óleo, no interior do oleoduto, como meio uniforme de espalhamento. Ong e seus colaboradores avaliaram a espessura do aço pelo estudo do perfil da densidade da intensidade do retroespalhamento versus a localização da profundidade do *voxel*. Para isso, eles utilizaram três técnicas, a “seqüencial”, a “duplo ângulo” e a de “referência”. As equações matemáticas e resultados experimentais, relacionados com a esta técnica, mostraram que a espessura pode ser medida com uma precisão superior a 10% para uma espessura nominal de aço de 8 mm e com um tempo de medição de vários minutos.

YACOUT *et al.* (1997) estudaram uma técnica de fóton retroespalhado para detecção de corrosão escondida sob uma camada superficial obstrutiva, como em coberturas de aeronaves e outras estruturas críticas com corrosão oculta e inacessível. Com a pesquisa, eles demonstraram que o fóton retroespalhado é sensível às mudanças de composição e densidade, resultantes de corrosão em metais; que as pequenas regiões (com dimensões inferiores a 1 mm²) são detectáveis através de camadas de 1 à 2 mm; que a forma do perfil de varredura pode inferir informações sobre o tipo de corrosão; e que a sensibilidade de algumas variáveis de sistema, para condições semelhantes a corrosão, oferecem excelente oportunidade para a concepção de instrumentos de otimização de detecção e caracterização da corrosão escondida.

Como um passo adiante na tecnologia, NIEMANN *et al.* (2002), através da YXON Raio X Internacional GmbH, desenvolveu um protótipo de um sistema de escaner móvel de 450kV, baseado nos princípios de tecnologia de raios X retroespalhados (XBT) para detecção de minas terrestres. Com os resultados obtidos com este sistema, eles mostraram que o escaner possui capacidades e vantagens como profundidade da informação suficiente

para detectar todas as minas colocadas regularmente, capacidade de detectá-las mesmo sem metal e detecção dessas minas enterradas em uma variedade de condições de solo, incluindo vários tipos de vegetação. Eles concluíram que com a tecnologia XBT, o feixe de um tubo de raios X de 450kV tem uma profundidade de penetração suficiente para detectar minas anti-pessoal e minas anti-tanques enterradas no solo sob condições práticas normais.

Raios X retroespalhados foram utilizados por MCFARLANE *et al.* (2003) para detectar fragmentos de ossos da clavícula de frango, durante o processamento industrial da carne. As amostras foram varridas com uma fonte de raios X de 140 KVp e os fótons retroespalhados foram contados por um detector colimado, posicionado a 135° do feixe. Três medidas foram extraídas das contagens dos fótons e plotadas versus a posição da amostra: as contagens na janela de energia de 10-40 keV, as contagens na janela de energia de 40-95 keV e a média espectral de energia sobre o pico de 10-95 keV. As contagens detectadas na janela de energia de 40-95 keV mostraram picos no retroespalhamento quando a varredura passou através de um fragmento ósseo. Eles concluíram que a utilização de duas faixas de energias gera informações complementares sobre a amostra, e que pode ser útil em espalhamento para amostras de espessura variável.

O retroespalhamento de raios gama é uma técnica que pode ser utilizado com sucesso para medir corrosão em dutos sob isolamento. Isto é possível porque este método é muito sensível a pequenas mudanças na espessura da parede do duto. ABDUL-MAJID e TAYYEB (2005) simularam um caso real de corrosão de tubos de aço carbono de diferentes diâmetros e espessuras da parede, e mediram o retroespalhamento de raios gama através de um detector cintilador 2x2 NaI(Tl), localizado ao lado da fonte. Com esta técnica, o isolador dos dutos não mostrou ser um fator de interferência, já que sua atenuação é constante, e as mudanças nas contagens ocorreram na espessura da parede quando estas apresentaram corrosão. Eles concluíram que as contagens nos dutos aumentaram com a espessura da parede e se aproximaram da saturação a grandes espessuras.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma etapa crucial para o desenvolvimento de um conceito moderno para fótons como uma partícula de radiação eletromagnética, foi dada por Arthur Holly Compton na interpretação dos experimentos, que ele iniciou em 1920, para medir com precisão os comprimentos de onda de raios X espalhados por elétrons em materiais de baixo número atômico. Compton espalhou raios X em blocos de grafite e mediu o comprimento de onda destes antes e depois que eles foram espalhados. Ele descobriu que os raios X espalhados tinham um comprimento de onda mais longo do que o comprimento de onda da radiação incidente. Os fenômenos de espalhamento de raios X já tinham sido estudados intensamente. Era sabido que o poder de penetração dos raios X diminui com o aumento do comprimento de onda e que raios X são menos penetrantes após serem espalhados, o que indica que o processo de espalhamento aumenta o comprimento de onda (MIT, 2004).

Compton em 1923 mostrou que quando um feixe de raios X incidia sobre átomos de carbono esses fótons sofriam espalhamento de modo a possuírem duas componentes após a interação com o alvo de carbono. Uma das componentes possuía o mesmo comprimento de onda do fóton incidente e a outra um comprimento de onda um pouco maior. Os comprimentos de onda das duas linhas foram medidos através de um espectrômetro de raios X de Bragg. Compton descobriu que a diferença entre os comprimentos de onda $\Delta\lambda$ das radiações espalhadas variava com o ângulo de espalhamento e crescia rapidamente para grandes ângulos de espalhamento (Figura II.1).

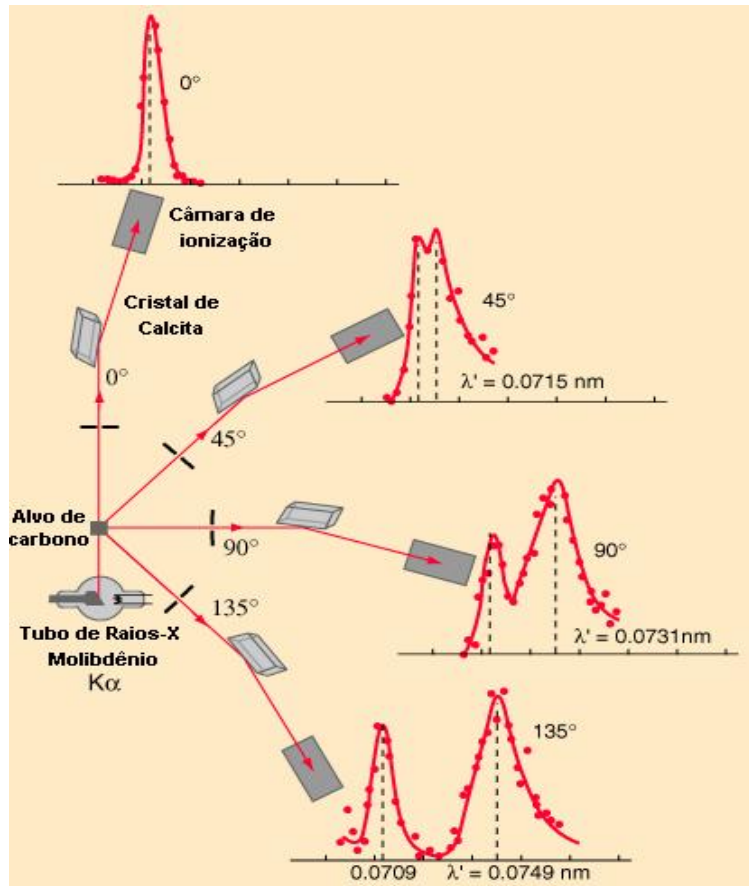


Figura II.1- Fotopicos para diferentes ângulos de espalhamento dos fótons (JENKINS *et al.*, 1981).

A fim de explicar essa componente espalhada, Compton supôs uma colisão elástica entre o fóton e o elétron dito livre, ou seja, tanto a energia quanto o momento deveriam ser conservados. Como esses fótons são radiações eletromagnéticas e possuem energia $h\nu$, junto com essa energia eles carregam também um momento $h\nu/c$. Como o fóton espalhado irá se deslocar em uma direção diferente do fóton primário então também possuirá um momento diferente. A condição para que o momento seja conservado é que o elétron que espalha o fóton deve absorver um momento igual à diferença vetorial entre o momento do fóton incidente e o fóton espalhado. A energia do elétron espalhado é tirada do fóton primário, deixando um fóton espalhado com menor energia do que o primário (JENKINS *et al.*, 1981).

II.1 Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

O conceito de radiação eletromagnética é definido como sendo a energia que se difunde de uma fonte, se propagando através do espaço sob forma de ondas. A princípio, estas radiações são classificadas em grandes faixas de energias, sendo estas quantizadas por Einstein em pequenos pacotes concentrados que mais tarde vieram a ser chamados de “fótons”. Na área nuclear, trabalha-se basicamente com a faixa de energia em que estão classificados os raios X e os raios γ , onde as radiações eletromagnéticas são classificadas mais de acordo com suas origens que propriamente sua energia (VALENTE, 1994).

Em geral, quando um feixe de fótons atravessa a matéria tem-se um menor número de fótons emergentes que de fótons incidentes. Essa absorção é causada pela interação dos fótons com o campo eletromagnético, gerado pelas cargas elétricas internas ao material, sejam elétrons ou prótons. Após a interação, os fótons emergentes poderão ter ou não energia e fase diferentes dos fótons incidentes, podendo ocorrer ou não a emissão de partículas durante a reação, como no efeito fotoelétrico, no espalhamento Compton e na fluorescência.

A maneira como a radiação eletromagnética irá interagir com o meio dependerá da energia desta radiação assim como, das características do meio. Quando um feixe de raios γ penetra numa amostra, o efeito importante que acontece é a atenuação. A atenuação é a redução na intensidade de um feixe por absorção ou deflexão de fótons, à medida que ele atravessa a matéria. Ela depende do número de fótons por centímetro quadrado por segundos e da energia dos fótons que formam o feixe (MCFALARNE *et al.*, 2003). Se um feixe monoenergético de intensidade (I_0), ao atravessar um objeto homogêneo de espessura (x), sofrer uma atenuação, a intensidade (I) do feixe emergente é representada pela lei de BEER-LAMBERT (equação II.1) (KNOLL, 1989):

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x) \quad (\text{II.1})$$

onde μ é o coeficiente de atenuação total do material em cm^{-1} .

Quatro fatores determinam o grau de atenuação de um feixe de radiação quando ele passa através da matéria: a energia da radiação, a densidade do meio, o número atômico dos elementos químicos que constituem o meio e a quantidade de elétrons por grama do meio.

Quanto maior for a energia da radiação, menor será a atenuação. O aumento da densidade, do número atômico ou da quantidade de elétrons por grama do meio aumenta a absorção. Neste trabalho, devido a faixa de energia utilizada, a atenuação dos fótons é causada principalmente, por absorção fotoelétrica e espalhamento Compton. Uma introdução completa para interações de raios X pode ser encontrada na referência ATTIX (1986).

A absorção fotoelétrica é a absorção completa de um fóton por um átomo. É dominante a baixas energias ($E < 50$ keV). O μ_a de coeficiente de absorção fotoelétrica é proporcional a densidade, diminui rapidamente com a energia, e aumenta fortemente com o número atômico. O espalhamento Compton é o espalhamento de um fóton por um único elétron. Para energias médias ($60 \leq E \leq 200$ keV), o espalhamento Compton torna-se mais importante e o número de fótons retroespalhados (espalhamento com ângulos maiores que 90°) alcança o valor máximo. Para energias acima de 200 keV, o espalhamento incoerente ainda é predominante, mas o retroespalhamento decresce devido a natureza da interação. O coeficiente Compton μ_s é proporcional à densidade eletrônica, mas varia muito pouco com o número atômico (MCFARLANE *et al.*, 2003; GOUVEIA, 2000).

O coeficiente de atenuação total μ , para a faixa de energia utilizada neste trabalho, é dado pela soma dos coeficientes de absorção e Compton (equação II.2):

$$\mu = \mu_a + \mu_s \quad (\text{II.2})$$

II.1.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é uma interação entre um fóton e um elétron orbital de um átomo da matéria. Como resultado desta interação, o fóton transfere sua energia para um dos elétrons que será ejetado como um elétron livre, chamado fotoelétron, caso a energia do fóton incidente seja maior que a energia de ligação do elétron no átomo (figura II.2).

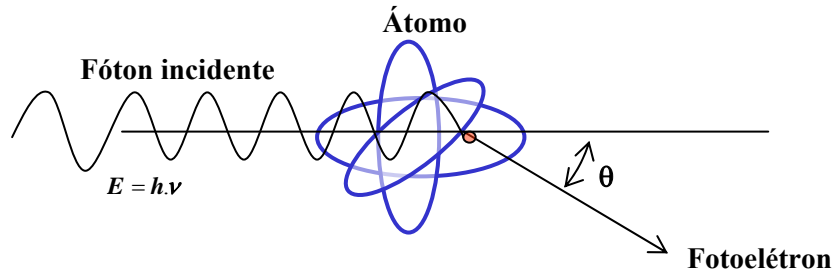


Figura II.2 – Diagrama esquemático do efeito Fotoelétrico.

Quando um feixe de fótons de baixa energia atinge o material, há uma probabilidade de que os fótons do feixe interajam com os elétrons mais externos do átomo. A probabilidade de interação é dada pela seção de choque fotoelétrica (σ_{fe}), que apresenta um valor considerável para energias abaixo de 100 keV e varia de material para material. O efeito fotoelétrico é predominante para a radiação gama de baixa energia e com maior probabilidade para elementos de elevado número atômico. Já para um feixe de fótons de alta energia (raios X), a probabilidade de interação é maior com elétrons mais internos do átomo.

No processo de interação fotoelétrico um fóton incidente de energia E é absorvido, cedendo energia para um elétron que é então ejetado do átomo com uma energia cinética. A partir da variação da energia e do momento do fóton, é possível calcular essa energia cinética, que é representada pela letra K na equação II.3 (KNOLL, 1989):

$$K = E - w_0 \quad \text{(II.3)}$$

onde: w_0 é a energia mínima para um elétron atravessar a superfície do material e escapar das forças atrativas que o ligam ao átomo, sendo que esta energia varia de material para material.

II.1.2 Efeito Compton

O efeito Compton é um caso especial de espalhamento de fótons pela coroa de elétrons, no qual o fóton incidente é absorvido, arrancando um elétron do átomo e gerando, conseqüentemente, a emissão de outro fóton (figura II.3). A energia do fóton espalhado (E')

dependerá somente do ângulo de espalhamento e não do material do alvo, que influenciará apenas na intensidade do feixe espalhado.

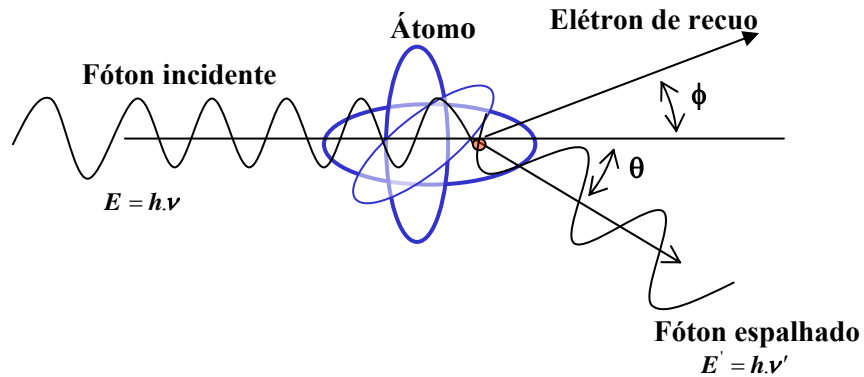


Figura II.3 – Diagrama esquemático do efeito Compton.

Para as interações dos fótons por efeito Compton, as energias dos elétrons espalhados podem variar segundo dois casos extremos:

- i) um ângulo de espalhamento rasante do fóton ($\theta = 0^\circ$). Para este caso, a energia do elétron espalhado é praticamente nula e o fóton gama espalhado apresenta quase a mesma energia que possuía antes da incidência.
- ii) uma colisão frontal do fóton ($\theta = 180^\circ$). Neste caso, o fóton é espalhado para trás na mesma direção de incidência e o elétron na mesma direção só que em sentido contrário. Este é o caso em que o máximo de energia pode ser transferido a um elétron no espalhamento Compton.

Aplicando os conceitos de conservação de momento e energia, é possível calcular a energia do fóton “espalhado” em um determinado ângulo através equação II.4:

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (\text{II.4})$$

onde: $\alpha = \frac{E}{m_0 c^2}$;

m_0 = massa de repouso do elétron;

c = velocidade da luz no vácuo;

E = energia do fóton incidente;
 E' = energia do fóton espalhado;
 θ = ângulo de espalhamento.

Pela equivalência entre massa e energia, pode-se calcular que $m_0c^2 = 0,511 \text{ MeV}$.

A figura II.4 representa o modelo fenomenológico da interação de um fóton com um elétron estacionário.

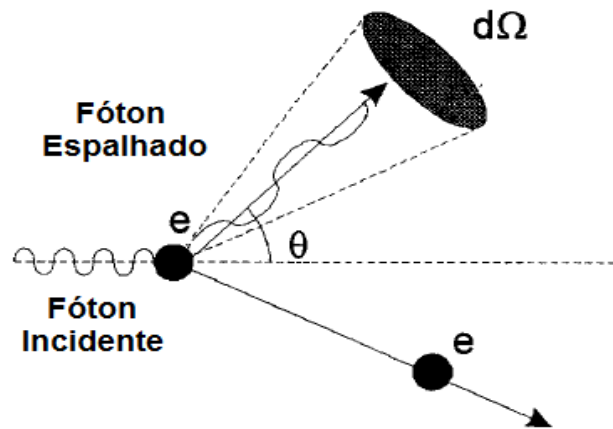


Figura II.4 – Espalhamento de um fóton em um ângulo, por unidade de ângulo sólido ($d\Omega$) (KNOLL, 1989).

A seção de choque de espalhamento Compton é bem descrita pela equação de Klein Nishina (KNOLL, 1989), que é de suma importância no desenvolvimento das técnicas que se utilizam do efeito Compton em seus princípios de funcionamento (equação II.5):

$$\frac{d\sigma_e}{d\Omega}(E, \theta) = \left(\frac{R_0^2}{2}\right) \cdot \left[\frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \cdot \left(1 + \cos^2 \theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}\right) \right] \quad (\text{II.5})$$

onde:

$\frac{d\sigma_e}{d\Omega}$ = seção de choque diferencial de espalhamento Compton para um elétron livre

e estacionário;

$$R_0 = 2,818 \times 10^{-13} \text{ cm};$$

$$\alpha = E_i / m_0c^2.$$

A probabilidade total de espalhamento Compton, por unidade de ângulo sólido, será a soma das probabilidades de espalhamento devidas a cada elétron isoladamente. A figura II.5 apresenta as curvas de seção de choque diferencial de Klein e Nishina para fótons incidentes de várias energias.

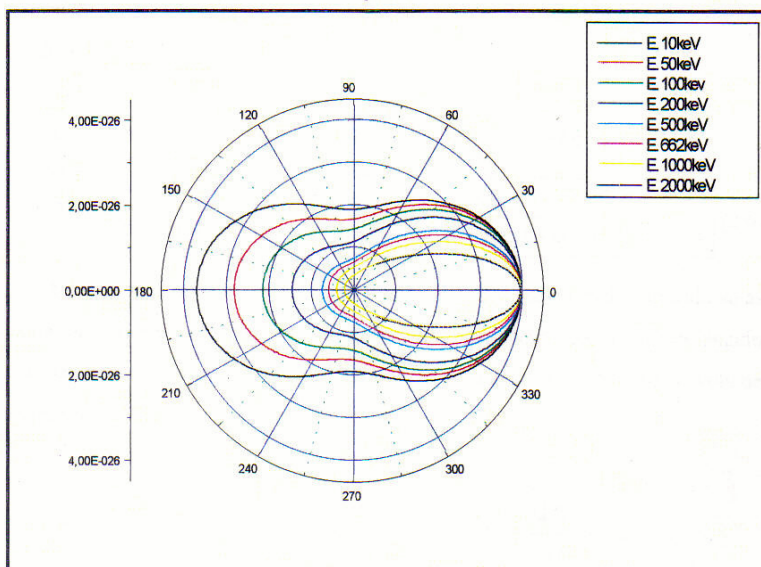


Figura II.5- Distribuição espacial dos raios gama espalhados (Adaptada de GOUVEIA, 2000).

Na realidade, os elétrons de um determinado material não são livres nem estacionários. O movimento de elétrons introduz no material um deslocamento na energia do fóton espalhado, gerando assim, uma faixa de energia ao invés de uma única energia de espalhamento.

II.1.2.1 Equação Geral do Espalhamento Compton

Quando se incide um feixe colimado de radiação gama ou X sobre um determinado material, pode-se calcular a sua densidade eletrônica na região de incidência do feixe. Para isso, é necessário medir a quantidade de fótons, que ao sofrerem o espalhamento Compton, são emitidos em um determinado ângulo θ (VALENTE, 1994).

A figura II.6 representa esquematicamente um sistema típico de inspeção baseado na técnica de espalhamento Compton. Neste arranjo, uma fonte de raios X ou gama produz

um feixe colimado que incide sobre uma pequena região do material a ser inspecionado e, em um determinado ângulo, é posicionado um detector colimado com o objetivo de medir a fração de radiação que é espalhada nesta direção.

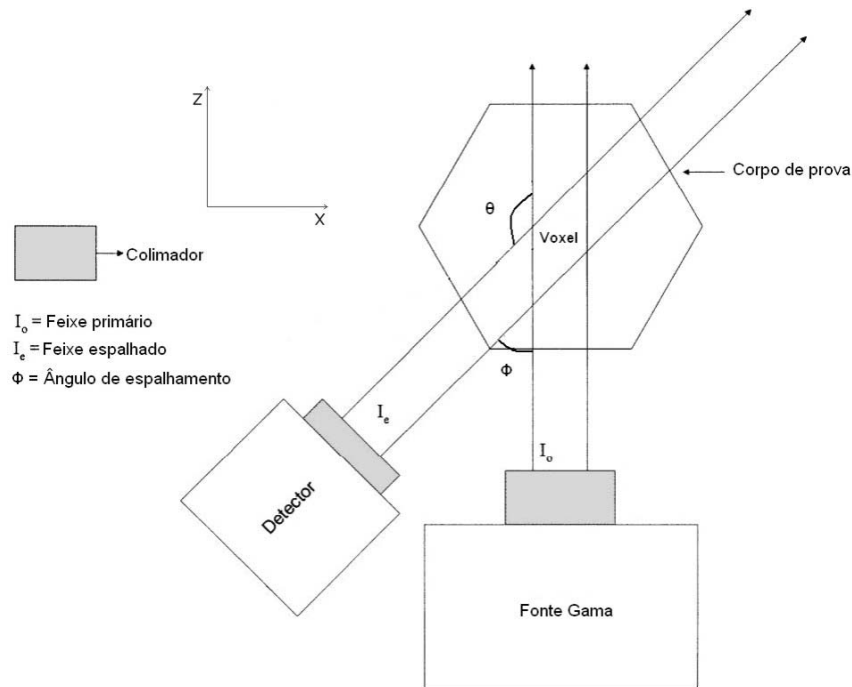


Figura II.6 - Esquema típico de um sistema de varredura utilizando a técnica de espalhamento Compton (Adaptada de SILVA, 1997).

A região formada pela interseção dos ângulos sólidos gerados pelo colimador da fonte e do detector é citada na literatura como volume de inspeção ou *voxel*. A intensidade dos fótons que sofrem espalhamento nesta pequena região e que são coletados pelo detector é diretamente proporcional à densidade eletrônica média no interior do *voxel*. Esta intensidade pode ser calculada pela equação geral do espalhamento Compton descrita por BATISTA *et al.* (1977, 1978 e 1981), porém, pode-se usar uma forma simplificada desta equação cujo desenvolvimento é apresentada no anexo A. Assim, a intensidade do feixe espalhado pode ser expressa pela equação II.6:

$$I_e = K \cdot D_e \cdot \exp[-\mu_i \cdot p_i + \mu_e \cdot p_e] \quad \text{(II.6)}$$

onde:

K é uma constante de proporcionalidade;

D_e é a densidade eletrônica média no interior do *voxel*;

p_i e p_e são os caminhos percorridos pelos feixes incidentes e espalhados no material, respectivamente;

μ_i e μ_e são os coeficientes de absorção linear para os feixes incidentes e espalhados no material, respectivamente.

Através dos deslocamentos do sistema nas direções X e Z (figura II.6), pode-se realizar o mapeamento bidimensional do material sob inspeção. Um mapeamento completo numa região de interesse num plano XZ produz um plano de inspeção que é formado pelas sucessivas posições do *voxel* no interior do material. Portanto, através de movimentos de translação nesses eixos, pode-se caracterizar a presença de um defeito, a partir de um mapeamento bidimensional das variações das densidades eletrônicas presentes neste material. Pode-se obter um mapeamento tridimensional do corpo de prova, deslocando-se o *voxel* na direção do eixo Y, após o mapeamento bidimensional no plano XZ.

Quando o *voxel* é deslocado para uma posição onde há um defeito, ele o intercepta provocando uma variação na intensidade do feixe de radiação espalhada, devido à variação da densidade eletrônica no interior do *voxel*. Se o defeito for um vazio (densidade eletrônica aproximadamente zero), tem-se uma queda abrupta na intensidade do feixe espalhado, caso contrário, se o defeito possui uma densidade eletrônica maior que o do material sob inspeção, verifica-se um aumento na intensidade do feixe espalhado (ANJOS, 1991).

II.2 Espectro de Energias

O espectro de energia, para o espalhamento Compton, representa a probabilidade de um fóton ser espalhado com uma energia específica, por unidade de energia. Ele pode ser medido a um ângulo de espalhamento específico em vez de fazer isso em todos os ângulos de retroespalhamento (DARLINGTON, 1975). Para ângulos de espalhamento próximos de 180° a seção de choque diferencial é maior que para ângulos próximos de 90° , de forma que o espectro de ângulos próximos a 180° esta mais nitidamente acentuado e mais próximo a energia do feixe que um espectro de ângulo próximo ao de 90° . A absorção para ângulos

próximos de 180° é considerável por causa do aumento do comprimento do caminho percorrido no material antes de alcançar a superfície, de forma que o retroespalhamento a esses ângulos não domina o espalhamento total apesar da alta seção de choque diferencial.

Atenuação também afeta o espectro de energias que chegam ao detector. Atenuação causa o efeito conhecido como “endurecimento” de feixe no qual a maior atenuação dos fótons de baixa energia causa o aumento da medida de energia do espectro. Os fótons perdem energia quando eles são espalhados por efeito Compton (MCFARLANE *et al.*, 2003). Dois fatores determinarão a quantidade de energia que permanece no fóton emergente após o espalhamento: a energia inicial do fóton incidente e o ângulo com que o fóton emergente se desviará da trajetória do fóton incidente (ângulo de desvio). Quanto maior for o ângulo de desvio, maior será a energia transferida ao elétron e, conseqüentemente, menos energético será o fóton emergente.

II.3 Espectro Eletromagnético

Quando um espectro eletromagnético é estudado observa-se que ele é constituído por vários níveis de energia sendo que cada um deles é caracterizado por um determinado comprimento de onda (λ) ou freqüência (ν). No espectro da figura II.7 encontram-se desde ondas de rádio até os raios cósmicos; a luz visível também é uma onda eletromagnética.

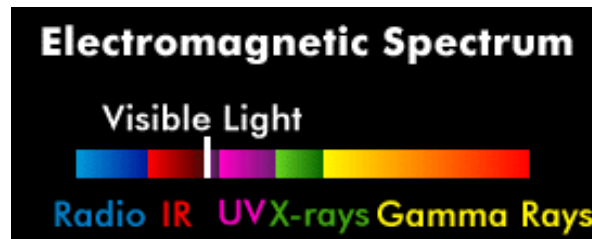


Figura II.7 - Espectro eletromagnético (MACEDO *et al.*, 2000).

Dentro deste espectro existem radiações bastante energéticas, como por exemplo, raios X ou gama, cujas energias podem ser obtidas através da relação de Planck para a energia quantizada, definida como:

$$E = h \cdot \nu \quad (\text{II.7})$$

onde:

$h =$ constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s)

ν (Hz) = frequência.

II.3.1 Espectro de raios X

Os raios X podem ser produzidos em ampolas como a representada esquematicamente na figura II.8, onde elétrons de um emissor (cátodo), que são formados a partir de uma corrente de elétrons I_e , e são acelerados por uma tensão positiva (tensão de aceleração U_e) formando um feixe colimado em direção a uma placa metálica (ânodo), chocando-se contra um alvo de material compacto (ROCHA, 2001). Quando esses elétrons são desacelerados repentinamente por meio de interação com os átomos do alvo, há uma transformação da energia cinética, que foi ganha durante a aceleração, em radiação eletromagnética (raios X).

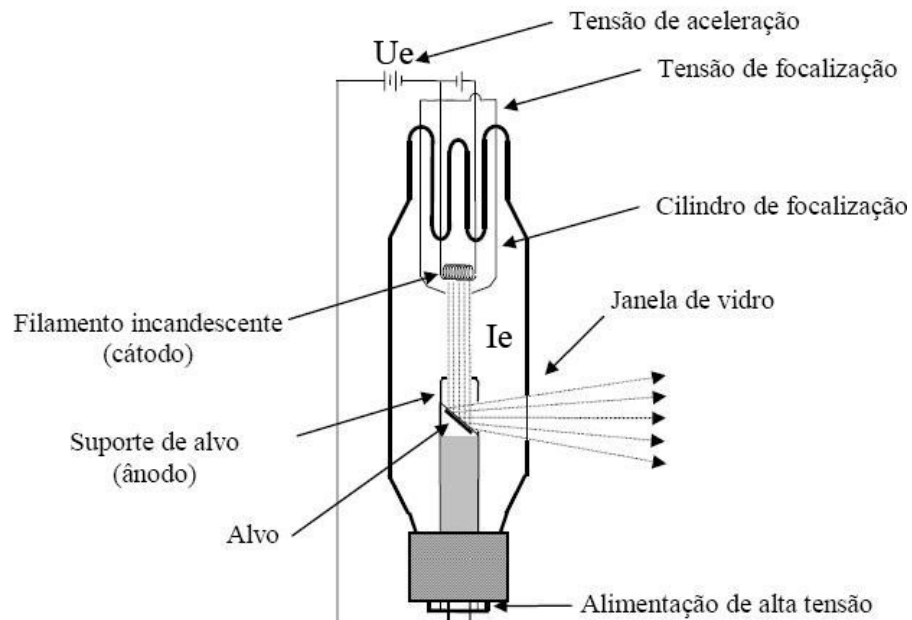


Figura II.8 – Esquema de ampola de raios X (ROCHA, 2001).

Neste processo, os elétrons são defletidos pela carga elétrica positiva localizada no núcleo dos átomos do alvo, devido à interação coulombiana. Sabe-se que uma partícula livre carregada emite radiação eletromagnética quando tem sua trajetória alterada. Este

fenômeno é conhecido como “bremsstrahlung” ou radiação de freiamento. Aplicando o princípio de conservação de energia, teremos:

$$h \cdot \nu = k - k' \quad (\text{II.8})$$

onde:

k é a energia cinética do elétron antes da interação;

k' é a energia cinética do elétron após a interação;

$h\nu$ é a energia do fóton emitido.

Logo, é possível observar que quanto maior a deflexão sofrida pelo elétron, maior será a energia do fóton de raios X emitido. Assim, os comprimentos de onda dos fótons emitidos podem variar de um máximo ($k \approx k'$) e um mínimo ($k' = 0$), originando um espectro de radiação contínua, como pode ser visto na figura II.9 (OLIVEIRA, 2007).

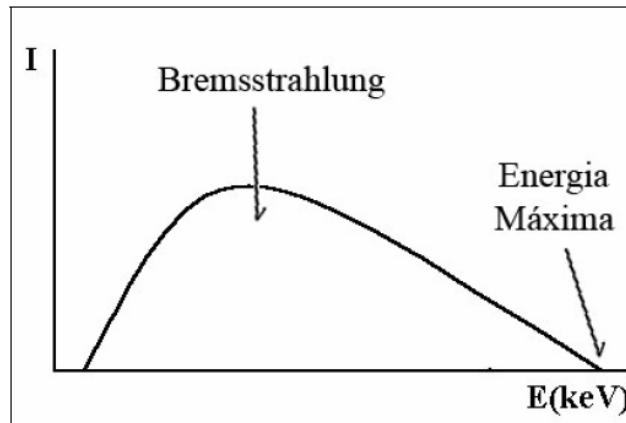


Figura II.9 - Espectro de radiação contínua (OLIVEIRA, 2007).

II.3.2 Espectros de raios Gama

Quando se estuda os raios gama (γ) é possível obter uma série de informações, tais como, os níveis de energias nucleares que estão associados aos decaimentos alfa e beta (α e β). A emissão de radiação gama pelo núcleo sempre ocorre após este sofrer um decaimento alfa ou um decaimento beta (que pode ser negativo ou positivo). Ou seja, quando os decaimentos alfa ou beta não são puros, o núcleo, após essa emissão das partículas radioativas, fica em um estado excitado semelhante aos elétrons das camadas eletrônicas

quando ocorre a emissão de Raios X destas camadas. Nesse caso, é preciso que o núcleo, para chegar ao seu estado fundamental, emita esse excesso de energia, e isso é feito na forma de radiação gama (MACEDO *et al.*, 2000).

Os picos do espectro gama podem ser caracterizados da seguinte forma:

1) Pelo fotopico:

O fotopico equivale a região em que toda a energia do raio gama que alcançou o detector foi absorvida (máximo de energia transferida para o elétron).

2) Pelo decaimento β^+ :

Para radioisótopos que decaem por emissão de partículas β^+ , pode-se ter pico de aniquilação (511 keV).

3) Pela região Compton:

A região Compton equivale as seguintes partes:

- Pico de retroespalhamento: alguns fótons provenientes do decaimento da fonte podem interagir com o material ou com a sua vizinhança (blindagem, por exemplo) e sofrer um efeito Compton de até $\theta=180^\circ$, sendo retroespalhados e depois alcançam o detector com uma energia E_γ .
- Corte-compton: região que equivale ao máximo de energia cinética que pode ser transferida ao elétron por efeito Compton.

O espectro teórico de uma radiação gama monoenergética E_γ é mostrado na figura II.10, onde:

- (1) - representa os raios gama absorvidos totalmente pelo cristal. Essa linha (ou pico) é conhecida comumente por fotopico;
- (2) - representa a região Compton;
- (3) - representa o corte Compton;
- (4) - representa o retroespalhamento

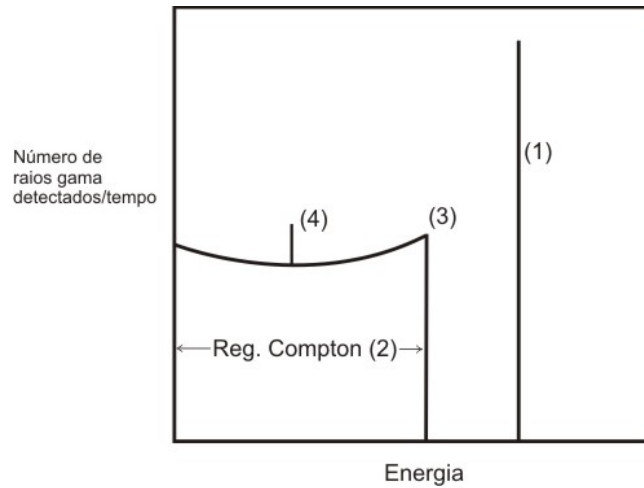


Figura II.10 - Espectro teórico relativo a uma fonte gama monoenergética (MONTANHEIRO, *et al.*, 1977).

A figura II.11 dada abaixo é o espectro experimental obtido com um espectrômetro gama monocanal.

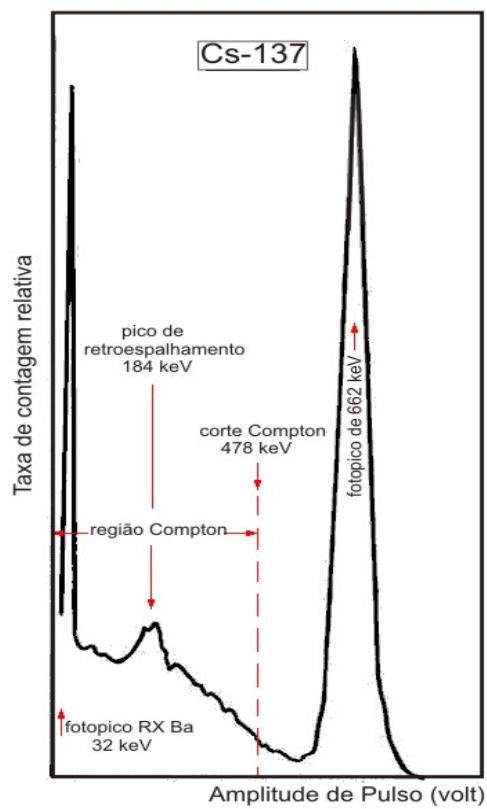


Figura II.11 - Espectro experimental do ^{137}Cs ao qual corresponde ao espectro teórico da figura II.10 (MONTANHEIRO, *et al.*, 1977).

II.4 Geometria de Espalhamento

Uma geometria simples para a detecção de fótons espalhados por Efeito Compton é mostrada na figura II.12, na qual um feixe incidente e um detector é focalizado em um ponto de espalhamento B em uma amostra. O feixe incidente é atenuado de A para B de acordo com equação II.2, é espalhado no ponto B com uma probabilidade proporcional para μ_s , e é atenuado novamente no caminho de saída de B para C, antes de alcançar o detector em D. Conseqüentemente o número de fótons que alcançam o detector é proporcional à densidade no ponto B, e à atenuação total ao longo dos caminhos AB e BC. Se os efeitos de atenuação forem pequenos, é possível detectar intensidade dos fótons a cada ponto na amostra por rastreamento mapeando o ponto B desta (MCFARLANE *et al.*, 2003).

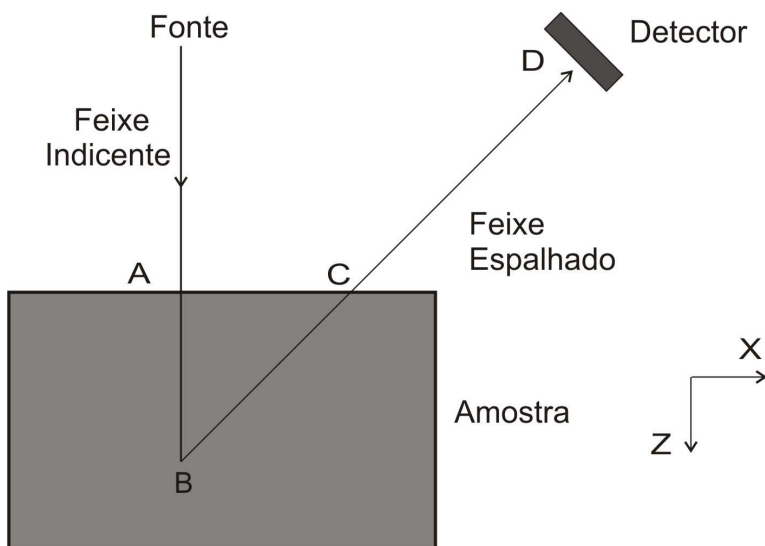


Figura II.12 - Geometria de Espalhamento Compton. (MCFARLANE *et al.*, 2003).

O feixe retroespalhado irá sofrer divergência assim como atenuações no seu caminho ao detector. Portanto, a intensidade será submetida a dupla atenuação. Se a geometria se fixa, a radiação retroespalhada irá mostrar um amplo espectro energético. É esperado que a taxa de contagem no detector aumente com a espessura do objeto irradiado, mas é importante ressaltar que deverá existir uma espessura para a qual o número de contagens não irá mais aumentar devido à absorção do próprio material alvo (ABDUL-MAJID *et al.*, 2005).

II.5 Detector CdTe

Detectores CdTe são muitas vezes utilizados para medir o espectro emitido a partir de uma fonte gama ou tubo de raios X. O detector CdTe, com 1 mm de espessura, tem excelente sensibilidade até 100 keV, com uma eficiência de fotopico maior que 90% a 65 keV (AMPTEK INC., 2009a). Raios X e gamas interagem com os átomos de CdTe para criar, em média, um par de elétron para cada 4,43 eV de energia perdida no CdTe. Dependendo da energia da radiação incidente, esta perda de energia é dominada de efeito fotoelétrico ou espalhamento Compton. Em uma interação fotoelétrica, toda a energia incidente da interação do fóton é depositada no detector, enquanto no espalhamento Compton, só uma parcela da energia incidente geralmente será depositada no detector. Interações fotoelétricas contribuem para a energia total, que normalmente é de interesse primordial. A probabilidade ou eficiência do detector de absorver a radiação recebida e criar pares de elétron aumenta com a espessura de CdTe.

O novo modelo XR-100T-CdTe da Amptek é um detector de raios X e gama de alta performance. Ele possui um pré-amplificador, um sistema de refrigeração (cooler) e um cristal de Telureto de Cádmio (CdTe) com dimensão $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$, montado em um cooler termoelétrico. O XR-100T-CdTe é capaz de detectar energias de alguns keV a várias centenas de keV (AMPTEK INC., 2003). Seu padrão consiste de um detector CdTe com 1 mm de espessura localizado atrás de uma janela de Berílio (Be) com 250 μm de espessura. A probabilidade de interação do fóton em qualquer lugar na espessura é o produto da probabilidade de transmissão através da janela de Be e da probabilidade de interação no material (AMPTEK INC., 2009b). Para facilitar a utilização do detector CdTe, o módulo eletrônico modelo PX2T foi desenvolvido para fornecer a voltagem DC necessária para operar o XR-100T-CdTe, e processar o sinal através do amplificador e do circuito de aumento de discriminação de tempo (do inglês Rise Time Discrimination – RTD). O sinal de saída a partir do módulo eletrônico PX2T pode ser conectado diretamente a um analisador multicanal.

Pares de elétron criados pela radiação, que interagem com o CdTe próximo ao fundo do detector, resultam em flutuações de tempo de coleta de carga. Estas flutuações são observadas como aumento das variações de tempo do sinal de voltagem na saída do pré-amplificador sensível a cargas. Como um resultado, os espectros adquiridos sofrem de

aumento na contagem de “background” (radiação de fundo) e degradação da resolução em energia. Para reduzir este efeito um circuito de aumento de discriminação de tempo (RTD) foi desenvolvido para o amplificador PX2T. Quando o RTD está ativo, os pulsos moldados são internamente retidos e somente os pulsos correspondentes a eventos de coleção de carga total são permitidos de ser enviados para o analisador multicanal (MCA) para análise (AMPTEK INC., 2003).

II.6 Eficiência do Detector

A eficiência de detecção é definida como a probabilidade que uma partícula ou fóton emitido por uma fonte ser detectado. Esta eficiência é controlada pelo tipo e espessura das camadas presentes no detector, pelo tipo de janela (se existir), pela camada de contato de ouro e pela camada de silício.

O material da janela do detector é o fator mais importante para a sua eficiência, principalmente na detecção das radiações pouco energéticas, que é o caso dos elementos leves. As janelas de Berílio têm sido usadas desde o início da fabricação dos detectores e suas espessuras ficam, normalmente, entre 7 e 12 μm , sendo que as mais finas chegam a alcançar 5 μm . Desta maneira somente raios X ou γ de elementos com número atômico acima de $Z=11$ é que conseguem ser detectados. As janelas de polímero super-finas permitem detectar elementos acima do B ($Z=5$) (AMPTEK INC., 2003).

A eficiência absoluta de um detector de radiação é definida como a razão entre a taxa de contagens do fotopico (ou taxa de contagem total), registrada pelo detector e a taxa de fótons com uma dada energia emitida pela fonte de radiação. Se ao invés de considerar o número de fótons emitidos pela fonte, for considerado apenas o número de fótons que alcança o detector, têm-se a chamada eficiência intrínseca. Dessa forma, fica claro que as duas definições de eficiência se relacionam pelo ângulo sólido com que o detector avista a fonte. Normalmente a eficiência intrínseca é a grandeza tabulada, uma vez que não inclui a dependência geométrica, difícil de ser determinada. A eficiência intrínseca depende da forma e do tamanho da fonte, da energia do fóton incidente e do tipo de cristal semicondutor do detector (KNOLL, 1989; PRICE, 1989).

II.7 Sinal de Detecção

A análise da radiação espalhada pelo material é a base dos sistemas de detecção de falhas que utilizam o técnicas de espalhamento Compton. Os sistemas convencionais utilizam-se de colimadores tanto na fonte quanto nos detectores. Esse arranjo possibilita a obtenção de um volume de varredura chamado de *voxel*, que é definido como a interseção entre o feixe primário proveniente da fonte e o campo de visão do detector colimado (SILVA, 1997).

O espalhamento único de fótons, isto é, aquele que espalha somente uma vez, somente pode alcançar o detector se eles se espalham dentro do *voxel*, embora haja um fluxo adicional causado por múltiplo espalhamento que pode alcançar o detector de uma maior região do corpo de prova (MCFARLANE *et al.*, 2003). A varredura do *voxel* permite, entre outras coisas, o controle desta varredura passo a passo, além de permitir um maior controle sobre o número de fótons multiespalhados que chegam ao detector, através do dimensionamento dos colimadores.

O *voxel* desempenha um papel relevante na técnica de inspeção por espalhamento Compton, a partir de sua caracterização, isto é, a partir de seu dimensionamento e de sua localização no espaço é possível dimensionar o corpo de prova diretamente. O volume de varredura permite saber exatamente de que parte do material analisado vem os fótons que chegam ao detector. Dessa forma, o sistema de colimação pode ser dimensionado de modo a possibilitar a obtenção de um volume de varredura que permite ao sistema de detecção perceber defeitos de pequenas dimensões.

A desvantagem de utilizar a técnica tradicional é o fato de se ter um número reduzido de fótons que chegam ao detector, aumentando assim, o tempo de aquisição dos dados, para que seja possível se obter uma estatística de contagem adequada. Pode-se otimizar o sistema de inspeção convencional retirando o colimador de foco do detector, aumentando, dessa forma, o fluxo de fótons que incide no detector e possibilitando, por conseguinte, um sinal mais intenso. Esse procedimento acarreta na perda de controle sobre a varredura do sistema e o empobrecimento da resolução, uma vez que o detector passa a receber fótons provenientes de todas as partes do corpo de prova “iluminadas” pelos feixes incidentes. Esse fato pode ser melhor entendido a partir da figura II.13, que representa o esquema gráfico da distribuição angular dos fótons retroespalhados a 90°. De acordo com

esse arranjo, não será possível distinguir entre um defeito de volume V e dez defeitos de volumes $V/10$, se todos estiverem localizados dentro de V , por isso a perda da resolução do sistema (SILVA 1997).

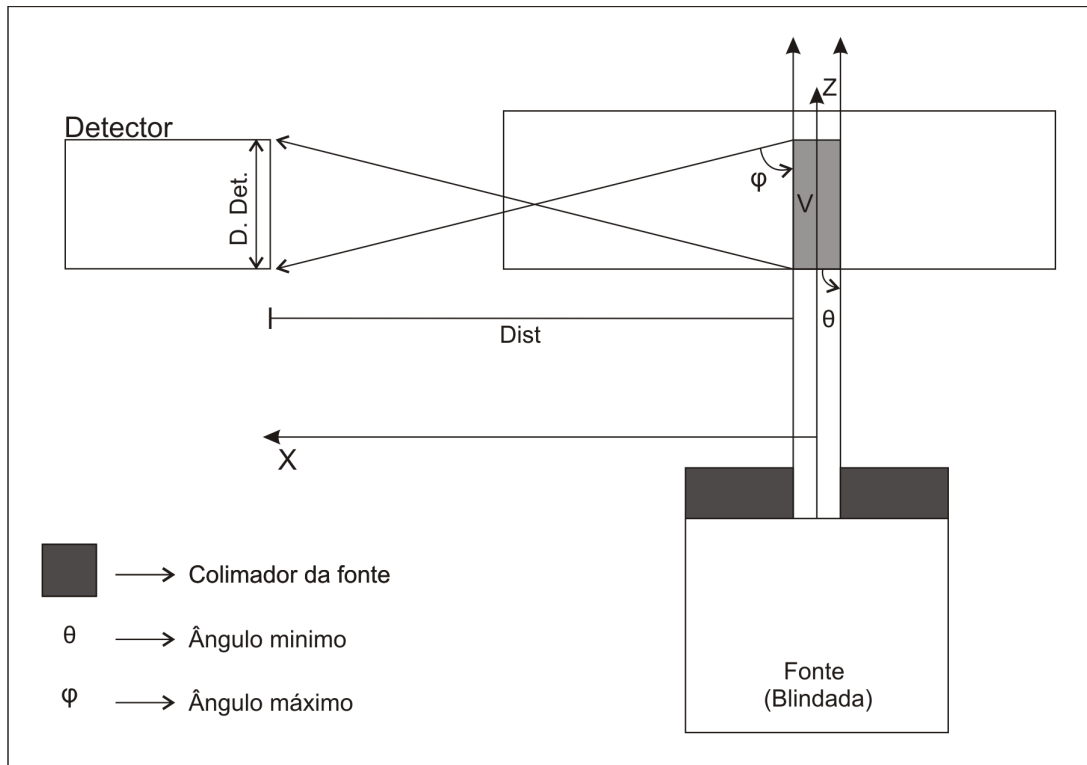


Figura II.13- Esquema de um sistema de retroespalhamento a 90° .

Embora o espalhamento possa ser o mais forte de todos os processos de atenuação de energias de interesse típicas, os sinais de um único canal de detecção são fracos. Isto se deve principalmente à abertura limitada do canal de detecção e dos processos de absorção no corpo de prova. As maiores perdas ocorrem no modo de retorno do volume espalhado para o detector porque, para o efeito Compton, os fótons espalhados têm mais baixa energia que os fótons de entrada (NIEMANN *et al.*, 2002). O sinal espalhado por um objeto é diretamente proporcional ao produto de vários fatores como: um fator que depende do produto da densidade (ρ) e a espessura (x) do material no volume irradiado, a intensidade do feixe emitido pela fonte de radiação, a atenuação da radiação antes do espalhamento e a eficiência dos detectores de retroespalhamento (GRODZINS, 2007).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados a metodologia e os equipamentos utilizados para a elaboração deste estudo. Para isto, são tomados como base os fundamentos teóricos apresentados no capítulo II.

III.1 Fonte de Radiação X

O equipamento de raios X utilizado é fabricado pela Oxford Instruments, com tensão de 75 kV e corrente máxima de 250 μ A. Este equipamento possui anodo de tungstênio e janela de berílio de 1,6 mm de espessura. Para o feixe incidente, foram utilizados filtros de cobre e alumínio, com espessuras de 150 μ m e 0,5 mm, respectivamente, posicionados na saída do colimador da fonte. A colimação primária foi através de uma abertura circular no colimador do equipamento de raios X, com diâmetro de 5,20 mm.

III.2 Fonte de Radiação Gama

As características principais a serem levadas em conta na escolha da fonte são a atividade específica, isto é, atividade por unidade de massa, o tempo de meia vida e a energia da radiação emitida. A energia do fóton emitido deve localizar-se na faixa em que a seção de choque de espalhamento Compton seja predominante, de modo que o processo de espalhamento incoerente se destaque dos demais processos de interação. A faixa de domínio do espalhamento incoerente localiza-se em torno do limite inferior de 60 keV e do limite superior de 2 MeV.

Uma fonte com alta atividade é a mais indicada para os tipos de medidas que o sistema deste trabalho propõe, de modo que possa incrementar a estatística de contagem. A fonte utilizada neste trabalho foi a de maior atividade disponível no laboratório, sendo está uma fonte gama de Amerício-241, com diâmetro ativo de 5 mm, atividade de $7,4 \times 10^8$ Bq (20 mCi) e energia de 59,54 keV. Esta possui um tempo de meia vida de 432,6 anos,

decaindo através de emissão alfa seguida da emissão de raios gama. A fonte está colocada em uma blindagem cilíndrica de chumbo de 7,2 mm de espessura.

III.3 Descrição do Sistema de Detecção

O detector de radiação utilizado nas medidas deve apresentar alta eficiência de contagem para a faixa de energia do trabalho e uma resolução satisfatória. O detector utilizado foi de CdTe modelo XR-100T, fabricado pela Amptek, que possui um diâmetro de 13,8 mm e uma janela de Berílio de 4,9 mm de diâmetro. Os espectros foram adquiridos através de um analisador multicanal modelo Pocket MCA8000A e de um módulo eletrônico modelo PX2T, também fabricados pela Amptek.

Para as contagens dos fótons de raios X foram utilizados no detector dois filtros de Alumínio, cada um com espessura de 0,5 mm, e um colimador circular com 2,50 mm de diâmetro. Já para as contagens dos fótons de raios gama, foi utilizado no detector um colimador também circular com 1,50 mm de diâmetro. Para as medidas feitas com as duas fontes, o ganho utilizado no amplificador do PX2T foi de 9, sendo que o RTD estava ativo para os espectros adquiridos com o feixe de raios gama.

Ao incidirem no detector, cada fóton de raios γ retroespalhado registrado produz um pulso eletrônico que foi contado e designado a um canal de espectro pelo analisador multicanal. O MCA foi calibrado em energia através dos picos conhecido da fonte γ de ^{241}Am . Os picos principais do espectro foram usados para determinar a constante de proporcionalidade entre os números de canais MCA e a energia do fóton.

III.4 Descrição das Peças Analisadas

O material analisado são peças cortadas de dutos compósitos de fibra de vidro/epóxi (figura III.1), em que foram simulados dois possíveis defeitos para análise através do retroespalhamento Compton, que são os seguintes:

- Falta de adesão, que foi simulada através de uma fita adesiva colocada na superfície da junta antes de aplicado o adesivo, gerando uma área onde o adesivo não irá aderir a superfície a ser colada.
- Falta de adesivo, que foi simulada colocando uma quantidade menor de adesivo (30% menos que o procedimento indica) e não será homogeneizado por toda a

superfície gerando assim áreas onde o adesivo não irá preencher o espaço destinado a ele para efetivar a colagem da junta.



Figura III.1- Peça cortada de um duto compósito sem defeito em sua junção - visão frontal (superfície) e visão lateral (profundidade).

As peças utilizadas para análise dos defeitos foram cortadas de dutos de 16" e suas dimensões são mostradas na figura III.2. Sua espessura na região onde elas são coladas é de 26 mm, sendo 13 mm a parede 1 (superfície), 1 mm a cola e 12 mm (parede 2), aproximadamente.

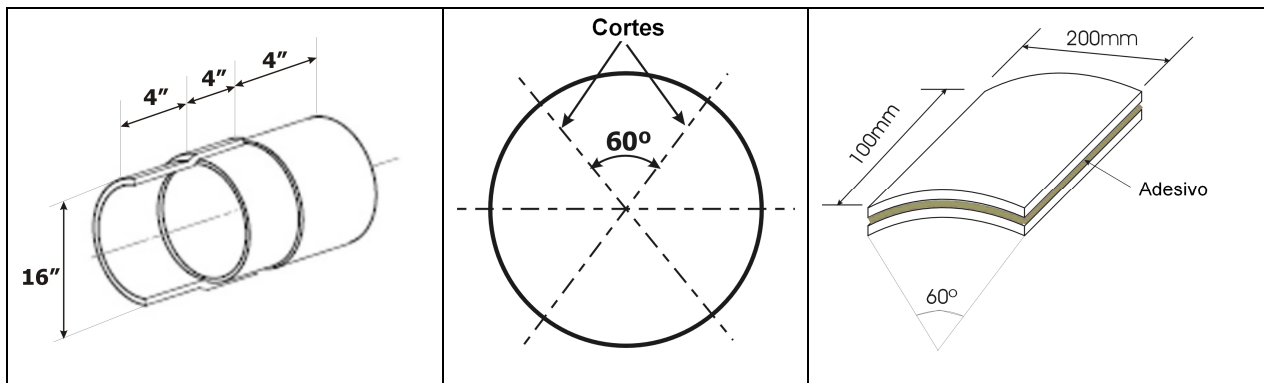


Figura III.2- Dimensões e cortes dos dutos de 16 ".

Para análise da densidade eletrônica foi montada uma peça com dois pedaços pequenos cortados da peça original, um da superfície e outro da profundidade, e um pedaço da resina epóxi de 12 mm, feita em laboratório. Após a montagem, pode-se perceber que dois defeitos puderam ser simulados, sendo eles falta de adesivo com 2 mm de espessura e falta de adesão com 1 mm de espessura. A espessura total da peça foi de aproximadamente 37 mm. (Figura III.3a). Para o ensaio da visualização de defeito foi utilizada essa mesma peça montada, porém com dois pedaços de resina de espessura 1,2 mm e 1,3 mm, onde o espaço entre eles foi variado simulando os diferentes tamanhos dos defeitos (vazios). A espessura total desta peça foi de 27,5 mm (Figura III.3b).

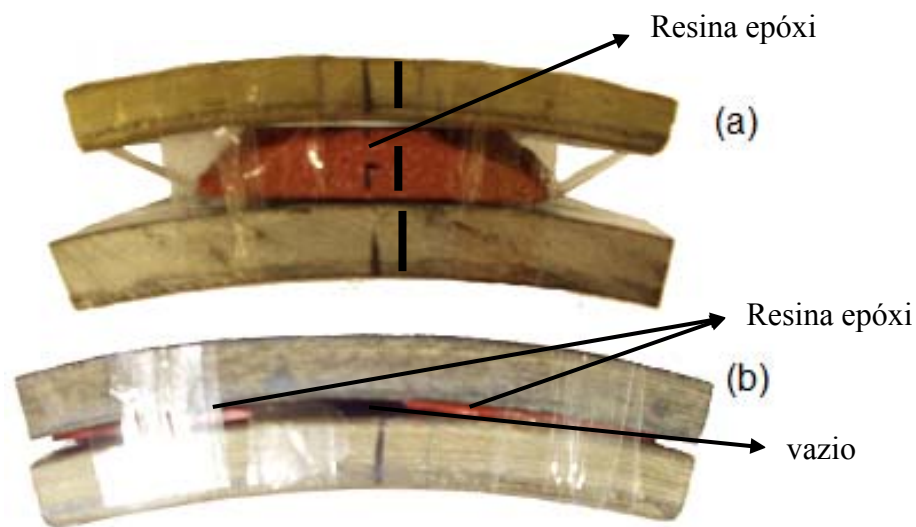


Figura III.3 – Peças montadas para ensaios simulando as originais; a) Ensaio para análise da densidade eletrônica e b) Ensaio para o teste de detectabilidade de defeito.

III.5 Metodologia

III.5.1 Montagem do Arranjo Experimental

O arranjo experimental utilizado na aquisição dos dados foi montado segundo o sistema da figura III.4, mudando somente a fonte γ para raios X quando este foi utilizado. A fonte e o detector são posicionados em um mesmo lado da peça e este é ligado ao módulo PX2T e ao analisador multicanal. A peça para análise é apoiada sobre uma mesa dotada de um sistema de rotação (mesmo raio do duto de 16") e de dois sistemas de translação (X e Z), acionados manualmente, onde X é perpendicular ao feixe incidente e Z é paralelo ao

feixe incidente. Para mudar a altura da peça, fez-se a variação da posição Y manualmente. O feixe de laser ajudou na marcação de cada posição na peça.

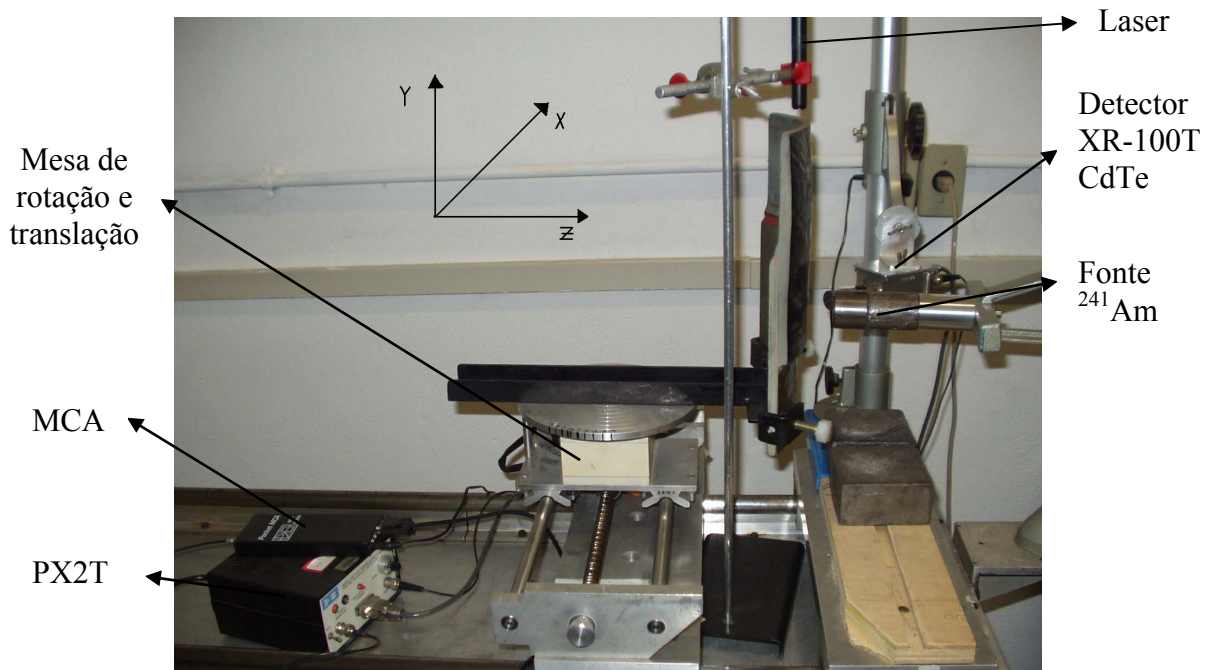


Figura III.4 - Sistema de medidas utilizando a fonte gama de ^{241}Am .

A técnica proposta neste trabalho apresenta uma dependência muito grande das características geométricas do sistema. O arranjo utilizado e o tipo de equipamento são fatores que influenciam, de maneira considerável, a qualidade do sinal obtido. É importante salientar que o arranjo deve apresentar uma geometria que permita a utilização do sistema acessando apenas um dos lados do corpo de prova.

III.5.2 Dimensionamento do sistema

O dimensionamento inicial para o sistema utilizando a fonte gama foi em função de se obter uma melhor compreensão do comportamento deste, bem como definir as medidas dos colimadores a fim de se reduzir o tempo de aquisição dos dados. O dimensionamento foi feito a partir da análise do espectro diferencial da radiação espalhada pelo corpo de prova, obtido com o auxílio de um analisador multicanal. A base do método proposto para o dimensionamento da peça é a afirmação de que o valor total do fotopico principal do

espectro diferencial da radiação espalhada na peça corresponde aos fótons que são espalhados no voxel.

Para o sistema que utilizou o aparelho de raios X, esse dimensionamento não chegou a ser feito, devido a sua quebra que ocasionou a substituição deste pela fonte gama de ^{241}Am . Esta, por ser de baixa energia (59,54 keV) e ser bastante atenuada no material inspecionado, exigiu uma análise do dimensionamento do sistema para se ter uma boa estatística de contagem. Já para o aparelho de raios X, o feixe não sofreu grandes atenuações no material, o que deu uma estatística boa de contagem, bastando-se somente fazer uma análise dos melhores parâmetros (tensão e corrente) a serem utilizados.

III.5.2.1 Sistema de Colimação

Os colimadores são responsáveis pela resolução do sistema, pois determinam a forma e o tamanho do volume de inspeção. Além disso, são utilizados para manterem o ângulo médio de espalhamento entre os feixes incidente e espalhado e reduzirem a radiação de fundo, devido aos múltiplos espalhamentos da radiação. O colimador da fonte tem o objetivo de orientar numa determinada direção a radiação proveniente da fonte e de determinar a largura, a altura e a divergência do feixe incidente no corpo de teste. Estes fatores são em função das dimensões da vazadura. Já os colimadores do detector têm o objetivo de determinar o ângulo médio de espalhamento entre o feixe incidente e o feixe espalhado no voxel e que alcançam o detector.

Existem quatro colimadores no sistema de medidas desse trabalho, sendo dois para o sistema fonte de raios X – detector, e dois para o sistema fonte gama - detector. Um está localizado na saída da blindagem da fonte e o outro na entrada da blindagem do detector, sendo todos eles feitos de chumbo, com forma e vazadura cilíndrica em todo o seu comprimento.

Os colimadores variam de acordo com o tipo e o interesse da inspeção que se deseja realizar. Por exemplo, para inspecionar corpos de prova que possuam defeitos com densidade eletrônica média maior que a do próprio corpo de prova, pode-se construir colimadores que forneçam um volume de varredura próximo ao volume do defeito. Assim, aumenta-se a taxa de contagem decorrente do defeito. Porém, para inspecionar defeitos que possuam densidade eletrônica média próxima a do corpo de prova, o volume de varredura

tem que ser o menor possível para que se possa manter uma diferenciação entre a taxa de contagem decorrente do defeito da taxa de contagem referente ao corpo.

A figura III. 5 abaixo mostra um exemplo de disposição do colimadores, sendo estes com vazadura paralela e não paralela.

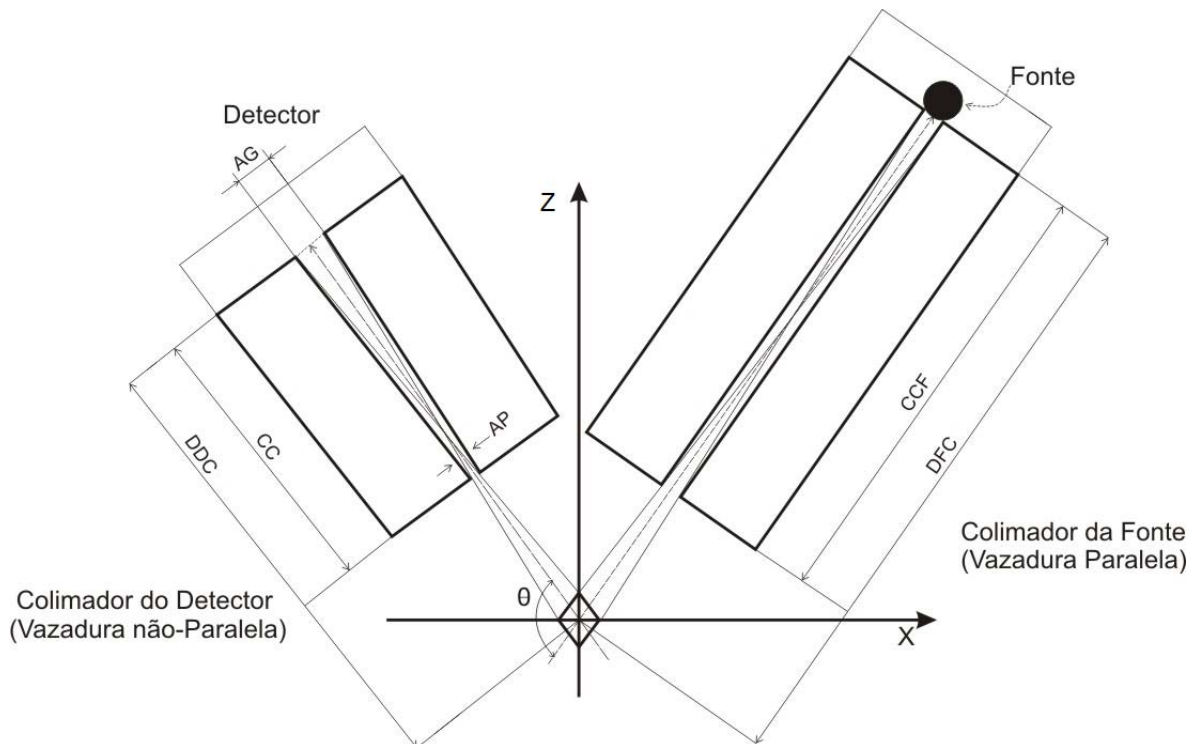


Figura III.5 – Exemplo de disposição dos colimadores em um sistema fonte – detector
(Adaptada de ANJOS, 1991).

Usando a proporcionalidade entre triângulos semelhantes, pode-se obter uma relação para a divergência (DIV) produzida por um colimador de vazadura não paralela. Assim, tem-se:

$$DIV = \frac{DDC}{CC} (AP + AG) - AG \quad \text{(III.1)}$$

No caso de colimadores com vazaduras paralelas, tem-se: $AG = AP$. Usando-se esta relação de igualdade na equação III.1, obtém a seguinte equação (ANJOS, 1991):

$$DIV = \frac{AP}{CC} (2 DDC - CC) \quad (III.2)$$

Para o sistema que utilizou a fonte gama foi feito o cálculo da divergência dos feixes no voxel com a equação III.2 para diferentes colimações, ângulos de espalhamento e distância fonte - peça - detector. Com isso, pretendeu-se encontrar o menor volume possível para o voxel, sem diminuir tanto o número de contagens e sem aumentar muito o tempo de aquisição, já que a densidade eletrônica de cada material que compõe a peça é maior que a do defeito e não se tem um conhecimento exato das dimensões e posições desses defeitos.

Os colimadores utilizados no sistema fonte-detector são apresentados na figura III.6, com suas respectivas dimensões. O colimador utilizado na fonte gama possui vazadura paralela e sua abertura foi definida de forma a otimizar a utilização da fonte como descrito no trabalho de MATOS (1989), porém o colimador utilizado para os raios X, foi próprio do aparelho, sendo ele com vazadura na forma de prisma regular. O colimador do detector, utilizado no sistema com a fonte de raios X, também possui vazadura na forma de um prisma regular. Isto torna o ângulo sólido subentendido entre o centro do voxel e o detector maior do que um colimador com vazadura paralela e implica uma maior intensidade de raios gama espalhados. Já o colimador utilizado no sistema com a fonte gama possui vazadura paralela.

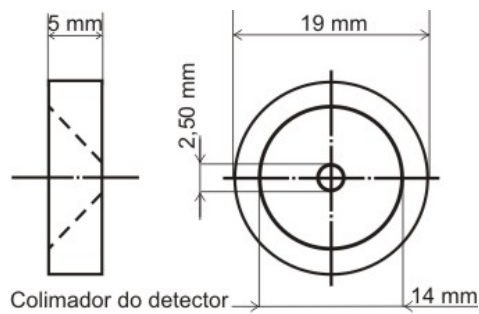
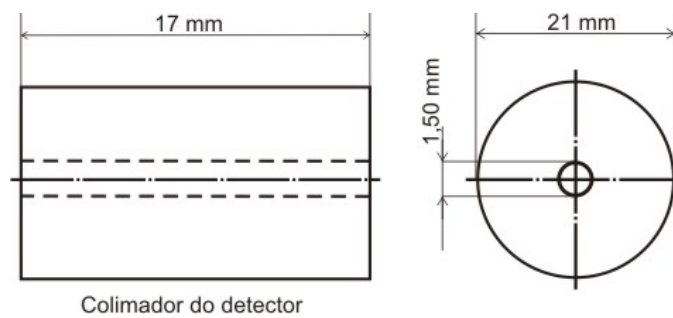
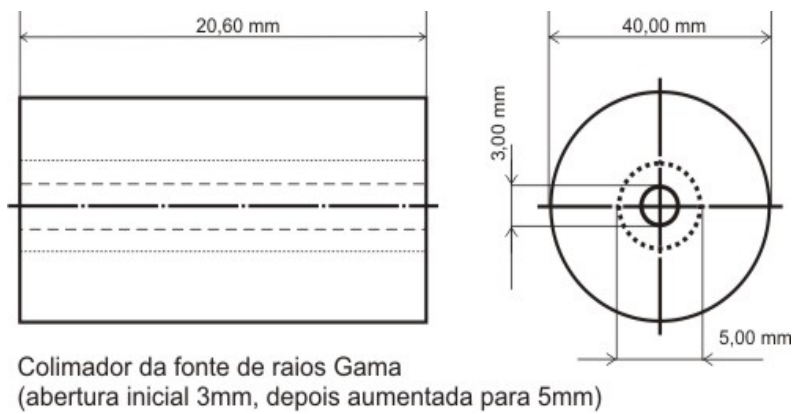
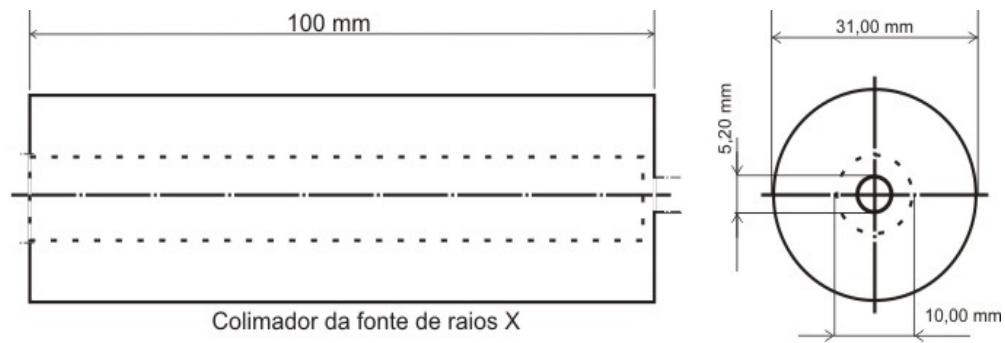


Figura III.6 - Colimadores utilizados no sistema fonte-detector, com suas respectivas dimensões.

III.5.2.2 Ângulo de Espalhamento e Distância Fonte - Peça - Detector

A escolha do ângulo de espalhamento deve ser feita levando em conta dois fatores principais: a disposição final do sistema e a qualidade do espectro obtido. O sistema foi montado com o objetivo de verificar a intensidade dos fótons espalhados no voxel em relação, tanto ao ângulo de espalhamento quanto a distância entre a fonte, o corpo de prova e o detector. Para isso, foram analisados quais seriam os melhores valores para estas grandezas, que para o nosso caso deve gerar um voxel com menor área possível, sem reduzir tanto a intensidade do feixe.

A intensidade do feixe detectado depende do ângulo de espalhamento, sendo que, para ângulos grandes o feixe espalhado sofre menor atenuação, pois atravessa uma menor região do corpo de prova explicando assim o aumento da intensidade do feixe detectado. A figura III.7 mostra os esquemas de inspeções utilizados no trabalho, no qual pode-se notar que a forma do voxel foi diferente de acordo com o ângulo de espalhamento.

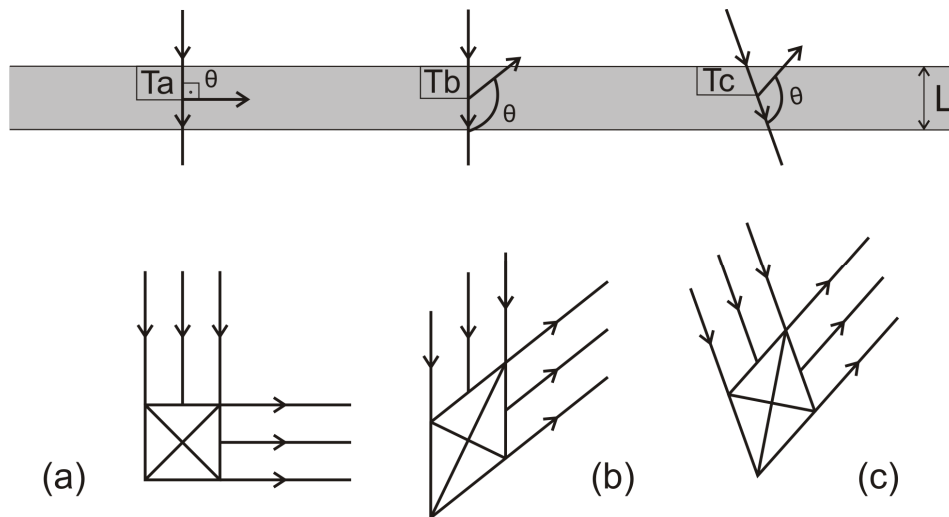


Figura III.7 – Esquemas das inspeções e seus respectivos voxel.

Em trabalhos anteriores, como os realizados por ANJOS *et al.* (1989) e LOPES *et al.* (1989), verificou-se que para inspeções na superfície de um material, o melhor ângulo de espalhamento é 90° . Entretanto, em regiões logo abaixo da superfície este ângulo deixa de ser mais favorável e passa a competir com outros ângulos. Isso acontece devido aos

termos de atenuação para os feixes incidente e espalhado. Estes termos devem ser levados em consideração para inspeções logo abaixo da superfície.

A figura III.7 representa os esquemas de inspeções utilizados no trabalho e mostra os termos de atenuações (T_a , T_b e T_c) em cada um deles. Para o sistema que utilizou o aparelho de raios X não houve problemas consideráveis com atenuações do feixe ao se fazer a análise na profundidade da peça. Sendo assim, foi utilizado um ângulo de espalhamento de 90° (esquema a da figura III.7). Para este sistema, a distância fonte-peça e peça-detector foram de 45 mm e o passo entre as medidas foi de acordo com as dimensões dos colimadores da fonte e do detector.

Já para o sistema que utilizou a fonte gama, o ângulo a 90° não foi viável devido à grande atenuação do feixe espalhado na peça. Por isso, buscando uma geometria de feixe que minimizasse esse problema, mudou-se a direção do feixe espalhado sem mudar a direção do feixe incidente (esquema B da figura III.7), formando assim um ângulo de espalhamento de 153° em uma análise e 144° em outra, que serão apresentados no decorrer do trabalho. Isto permitiu a redução do termo de atenuação para o feixe espalhado.

Porém, após fazer algumas análises, decidiu-se buscar uma geometria que permitisse aumentar ainda mais as contagens, reduzindo o tempo de aquisição das medidas e dando um voxel menor para a detecção dos defeitos. Assim, a geometria foi alterada para formar um ângulo de 125° (esquema c da figura III.7) e apesar de possuir o termo de atenuação maior no feixe incidente, permitiu a análise da detecção de defeitos, já que o voxel foi menor, sem diminuir as contagens em relação aos outros ângulos.

A vazadura dos colimadores e as distâncias fonte – peça – detector, para o sistema com a fonte gama, também foram diferentes nas medidas realizadas com cada ângulo e estas serão apresentadas nos procedimentos de cada análise.

III.5.3 Procedimento Experimental

III.5.3.1 Calibração do sistema

A calibração do sistema de inspeção consiste basicamente em preparar todo arranjo experimental juntamente com o sistema eletrônico de contagens, de modo que os erros sistemáticos sejam minimizados. Após a montagem do sistema, o alinhamento do colimador das fontes de raios X e gama com o colimador do detector foi feito empregando

duas varetas pontiagudas, uma com diâmetro igual à vazadura do colimador da fonte e a outra com diâmetro igual a vazadura do colimador do detector. Elas foram inseridas nas vazaduras dos seus respectivos colimadores e o ponto de coincidência entre elas foi marcado, com a ajuda de um feixe de laser, como sendo o centro do volume de inspeção. A figura III.8 mostra um esquema do alinhamento, que demonstrou ser razoavelmente preciso e rápido de ser executado, podendo ainda ser verificado a qualquer instante a qualquer momento sem a necessidade de remoção da fonte.

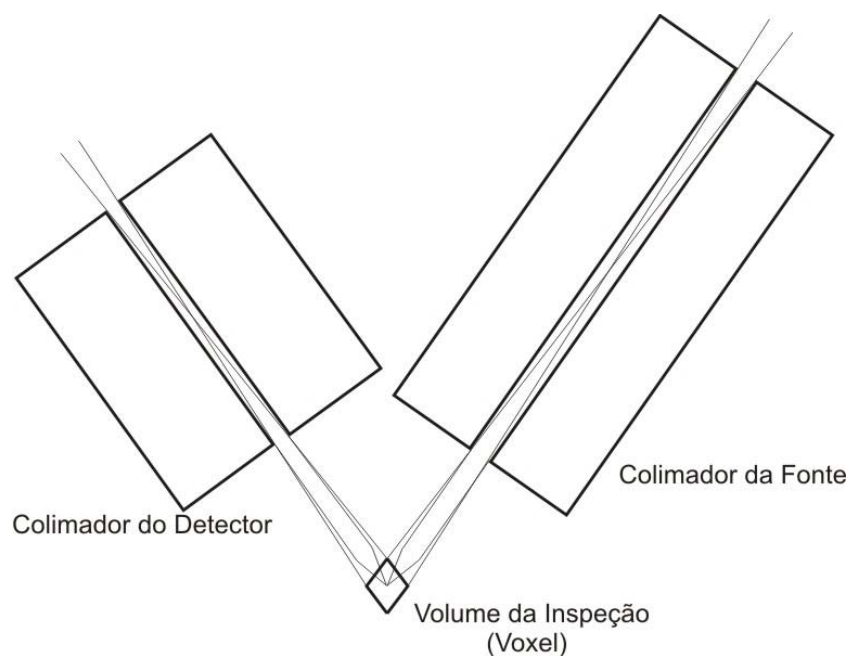


Figura III.8 – Esquema do sistema de alinhamento dos colimadores para fonte gama.

Após o alinhamento dos colimadores, passou-se a fase da calibração em energia do analisador multicanal, a fim de se obter uma janela para análise da radiação espalhada dentro da faixa de energia de interesse. Esta calibração foi feita através dos picos conhecidos de uma fonte gama de ^{241}Am . Os picos principais do espectro foram usados para determinar a constante de proporcionalidade entre os números de canais MCA e a energia do fóton. Na aquisição do espectro diferencial da radiação espalhada na peça, a partir da calibração obtida com a fonte de Amerício, foi estabelecido no espectro um ROI ou janela de energia (ΔE), que delimitará a região de interesse do fotopico principal para inspeção. A análise do espectro neste trabalho consistirá basicamente em determinar como

a região do fotopico principal se comportará de acordo com a profundidade de inspeção na peça.

III.5.3.2 Procedimento de Inspeção com Fonte de Raios X

Para análise, primeiramente foram obtidos os espectros do feixe incidente com e sem a utilização dos filtros de Cobre e Alumínio no colimador da fonte de Raios X, para se ter conhecimento da influência desses filtros nas medidas de contagens. Para isso o detector foi alinhando em frente ao aparelho de Raios X a uma distância foco-detector de 440 mm formando um ângulo de 180° com este. Na obtenção dos espectros incidente, o feixe foi bem colimado na fonte e no detector através de colimadores cilíndricos. Os parâmetros utilizados foram: tensão de 75 kV, corrente de $10 \mu\text{A}$ e tempo de contagem de 200 segundos.

Para os testes seguintes, procurou-se saber quais os melhores parâmetros a serem utilizados no aparelho de raios X para uma posterior otimização destes nos testes seguintes. Os parâmetros testados foram tensão de 75 kV para correntes de $200 \mu\text{A}$ e $250 \mu\text{A}$ e tensão de 80 kV para corrente de $150 \mu\text{A}$. Os parâmetros foram otimizados para tensão de 75 kV e corrente de $250 \mu\text{A}$, pois deram maior intensidade na contagem de fótons espalhados a 90° .

Com a escolha da tensão e corrente mais adequada, os testes foram divididos em dois experimentos, sendo o tempo de aquisição das contagens de 1200 segundos e o ângulo de espalhamento de 90° . No experimento 1 analisou-se a intensidade do feixe espalhado em relação a profundidade na peça com falta de adesivo e sem defeito. Após o posicionamento da peça em relação ao ponto de interseção dos feixes, as medidas foram efetuadas em uma região na direção do eixo X. Nesta região, a peça foi varrida em três pontos na direção do eixo Z, que foram a superfície, a região da resina e o fundo. Assim, fez-se a análise da intensidade do feixe em função da profundidade do ponto de espalhamento.

No experimento 2 fez-se a análise do espalhamento somente na junção das peças (região da resina), sendo este medido em vários pontos na direção X. Este experimento foi realizado com o objetivo de comparar a intensidade dos feixes espalhados nas regiões das peças com e sem falhas para uma análise da detecção destas. A figura III.9, mostra a geometria do feixe retroespalhado utilizada nos dois experimentos. O colimador utilizado no detector foi o de vazadura de 2,50 mm.

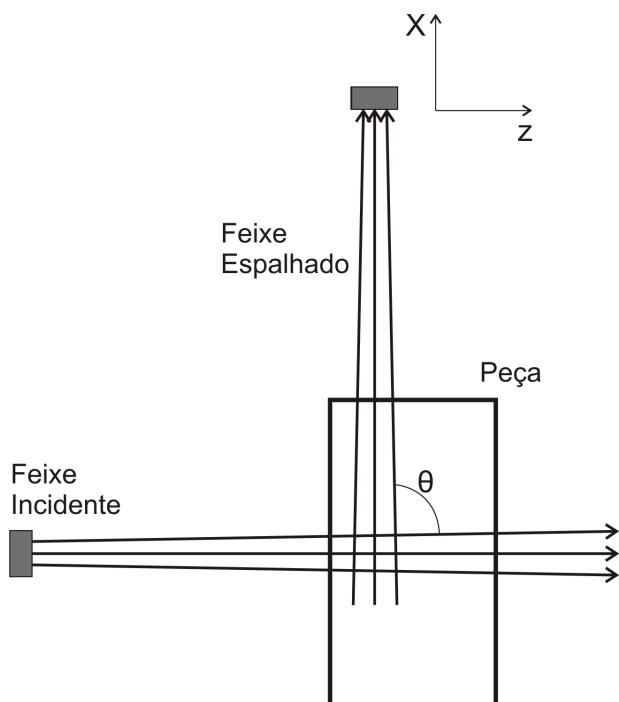


Figura III.9: Geometria de retroespalhamento de raios X, vista de cima.

III.5.3.3 Procedimentos de Inspeção com Fonte Gama de ^{241}Am

III.5.3.3.1 Estudo do Espalhamento na Peça

Com a substituição do aparelho de raios X pela fonte gama de ^{241}Am devido a sua quebra, novas análises foram feitas para o estudo do retroespalhamento de fótons na peças cortadas do dutos compósitos. Para as análises, primeiramente foram feitas as contagens dos fótons espalhados na superfície, na resina e no fundo da peça, com esta posicionada perpendicularmente ao feixe incidente. As distâncias fonte – peça – detector foram de 44 mm e 57 mm, respectivamente. O ângulo de espalhamento (θ) utilizado foi de aproximadamente 153° , calculado através da equação II.3, sendo a energia média dos feixes espalhados de 49 keV. A colimação da fonte foi de 3 mm de diâmetro e do detector de 1,50 mm de diâmetro, sendo a divergência de feixe incidente e espalhado no voxel de 15,8 mm e 11,6 mm, respectivamente. O tempo de contagem em cada medida foi de 5000 segundos, devido ao baixo número de espalhamentos de fótons no pico de retroespalhamento. Para uma melhor análise dos espectros foram tomadas as contagens totais na região do fotopico principal em que foi selecionado um ROI.

Buscando um melhor entendimento do espalhamento do feixe de raios gama na peça, foram calculados os coeficientes de absorção da parede 1 que forma a superfície, da resina e da parede 2 que forma o fundo. Para isso, medidas de intensidade de fótons incidentes e transmitidos foram obtidas e com estas calculou-se os coeficientes de atenuação através da equação II.1. Em seguida, um gráfico dos coeficientes de atenuação pela energia em keV, de cada parte da peça, foi traçado e a partir da equação da curva, os coeficientes de absorção linear dos feixes incidentes e espalhados foram calculados. As espessuras da parede 1 e 2 foram as mesmas das peças originais, mas da resina foi um pouco maior, de 4 mm.

Após o cálculo do coeficiente de absorção, dois espectros foram obtidos, sendo um da peça que compõe a superfície do duto e outro da resina de 12 mm de espessura, para uma comparação da intensidade de fótons espalhados em cada uma. Os espectros foram da superfície de cada material separadamente, sendo o tempo de aquisição das contagens de 5000 segundos.

III.5.3.3.2 Análise da Densidade Eletrônica

Como a intensidade do feixe de raios gama, que sofrem espalhamento em um pequeno volume (voxel) e, conseqüentemente alcançam o detector, é proporcional a densidade média de elétrons no interior deste volume, medidas de intensidade do feixe retroespalhado em alguns pontos da peça foram obtidas para o cálculo da densidade eletrônica. Para isso, foi utilizado o corpo de prova que simula as peças cortadas dos dutos, sendo a resina de 12 mm de espessura para permitir uma melhor análise dos dados. Na varredura, dois defeitos foram analisados como uma simulação de falta de adesivo e de falta de adesão.

A fonte gama foi posicionada perpendicularmente a peça, sendo o trajeto do feixe incidente representado pelo tracejado em preto na imagem da figura III.3a. A distância entre a fonte e a peça foi de 40 mm e a distância entre a peça e o detector foi de 60 mm. A divergência do feixe incidente e do espalhado no voxel foi de 14,4 mm e 12,0 mm, respectivamente. As dimensões dos colimadores foram mantidas iguais as deste nas análises anteriores. O ângulo de espalhamento (θ) utilizado foi de aproximadamente 144°,

calculado através da equação II.3, sendo a energia média dos feixes espalhados de 49,19 keV. A figura III.10 mostra o arranjo experimental utilizado para esta análise.

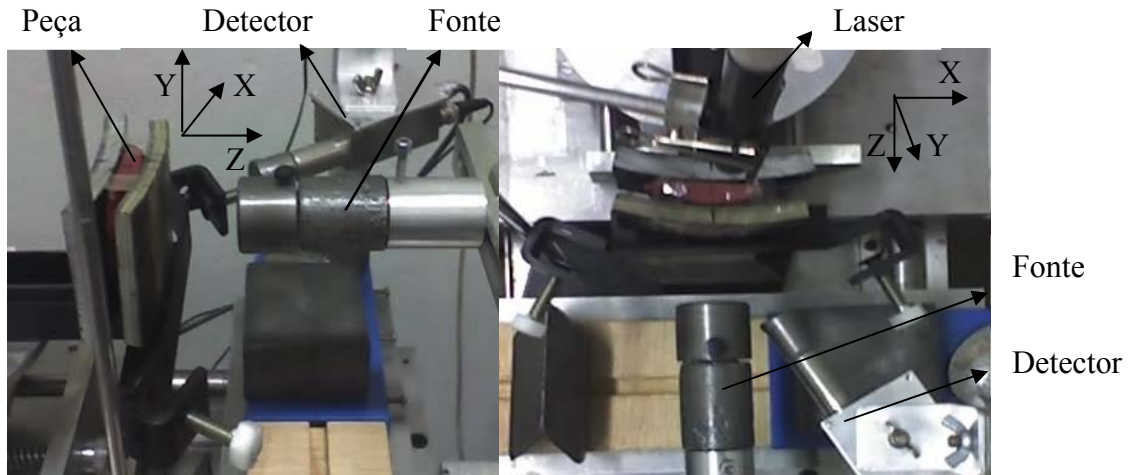


Figura III.10 – Arranjo experimental para análise da densidade eletrônica (visão lateral e superior).

Inicialmente as contagens foram medidas num ponto externo a peça e depois foram feitas variações de profundidade com passos de 3 e 4 mm na mesma direção Z, a partir do ponto de maior contagem na superfície da peça. A marcação dos passos foi em papel milimetrado adicionado na mesa junto a peça e a marcação da interseção dos feixes nesta foi com a ajuda de um feixe de laser. O tempo de contagem utilizado foi de 5000 segundos para se obter uma boa estatística de contagem. Através da equação II.6, pode-se obter a densidade eletrônica, corrigida pelos coeficientes de absorção, em cada região da peça em que o feixe espalhado atingiu o detector, a partir da intensidade deste.

III.5.3.3.3 Teste de Sensibilidade do Sistema

Para testar a sensibilidade do sistema em detectar os defeitos, foram utilizadas três peças cortadas dos dutos de fibra de vidro/epóxi, uma delas sem defeito e as outras duas com falta de adesivo e falta de adesão cada uma. Para se determinar um defeito, estabeleceram-se como contagem padrão, aquelas obtidas nas regiões da peça que não apresenta nenhum tipo de falha. As medidas foram feitas em diversos pontos da região da cola (resina), que é onde possivelmente encontram-se defeitos. As contagens foram obtidas

dentro de um limite de energia do fotopico principal, sendo considerado defeito, uma diminuição na contagem em relação à contagem padrão, superior as variações estatísticas.

Devido ao baixo espalhamento e ao alto tempo de contagem nas análises anteriores, o dimensionamento do sistema, nesse teste, foi alterado para se obter melhores resultados. A abertura do colimador do detector foi a mesma das análises anteriores, porém a abertura do colimador da fonte foi aumentada para 5 mm, já que, para esta análise, a geometria do feixe incidente foi alterada, aumentando com isso a absorção deste pelo material. As distâncias fonte – peça – detector foram de 35 mm e 43 mm, respectivamente. A divergência dos feixes incidentes e espalhados no voxel foi de 22,5 mm e 9,0 mm, respectivamente. O ângulo de espalhamento foi de aproximadamente 125° , sendo a energia média dos fótons espalhados de 50,35 keV. Em cada medida, foi usado um tempo de aquisição de 2400 segundos.

As posições nominais das peças são determinadas, nas direções X e Z, alinhando a peça com o feixe de laser. A peça foi varrida em vários pontos da cola deslocando o centro do voxel na direção X e a altura de inspeção foi mudada variando este na direção Y.

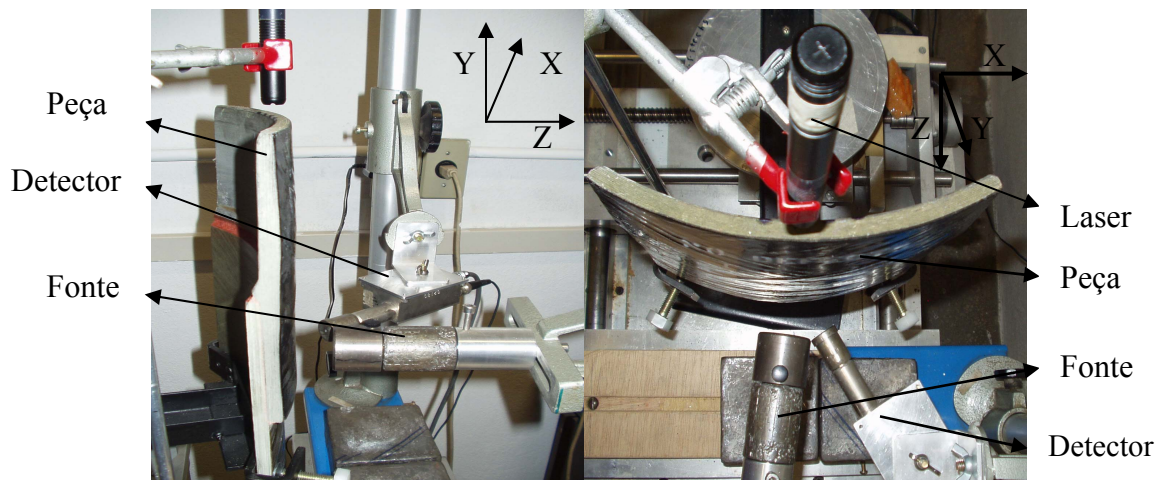


Figura III.11 – Arranjo experimental para o teste da sensibilidade do sistema (visão lateral e superior).

III.5.3.3.4 Ensaio de Detectabilidade de Defeito

Para ser perceptível ao sistema de detecção, o tamanho do defeito deve ser suficiente para provocar uma variação na densidade eletrônica do volume inspecionado

(voxel). Entretanto, é importante se fazer uma análise do menor volume de defeito, para produzir uma variação mínima na densidade eletrônica no interior do voxel, fora da flutuação estatística das medidas.

Nesse teste da detectabilidade do defeito, primeiramente pretendeu-se observar a variação da intensidade das contagens em função da posição Y na peça, identificando três regiões: região da primeira parede ou superfície, região do vazio ou da cola e região da segunda parede ou profundidade. Para isso foi utilizada a peça que é uma simulação da peça original e é formada por pedaços cortados desta e dois pedaços de resina de 1,2 mm e 1,3 mm cada. A varredura em cada região foi feita em três pontos na direção X da peça, sendo eles extremidades e centro da peça. Em cada extremidade foi colocado um pedaço de resina e no centro da peça ficou um vazio de 12 mm de largura.

O segundo passo neste teste foi analisar a variação de intensidade das contagens a partir da diminuição dos vazios no centro da peça. Essa diminuição foi feita aproximando os pedaços de resina em direção ao centro da peça, variando assim o tamanho do vazio. O dimensionamento do sistema e o tempo de aquisição das medidas foram os mesmos do teste de sensibilidade e seu arranjo está mostrado na figura III.12.



Figura III.12 - Arranjo experimental para o ensaio de detectabilidade de defeitos (visão lateral e superior).

No próximo capítulo apresentam-se os resultados obtidos e suas análises nos diversos procedimentos apresentados.

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados, bem como as análises dos estudos da técnica de Retroespalhamento Compton na inspeção de dutos compósitos. Apresenta-se uma seqüência de experimentos que foram importantes para o estudo da técnica.

IV.1 Calibração em energia

Como foi dito nos capítulos anteriores, o método proposto baseia-se no estudo do espectro diferencial da radiação espalhada na peça, obtido com o auxílio do analisador multicanal. Como um primeiro passo na obtenção dos dados foi feita a calibração em energia do analisador multicanal na faixa de energia em que se espera trabalhar. Os limites escolhidos foram 13,95 keV e 59,94 keV, que são os picos de energias características de uma fonte gama de ^{241}Am , e estão marcados em azul na figura IV.1. Esses picos foram escolhidos de modo a garantir a linearidade na relação entre canal e energia neste intervalo de energia. Na figura IV.1 observa-se o espectro de calibração das contagens por energia, obtida com a fonte de Amerício.

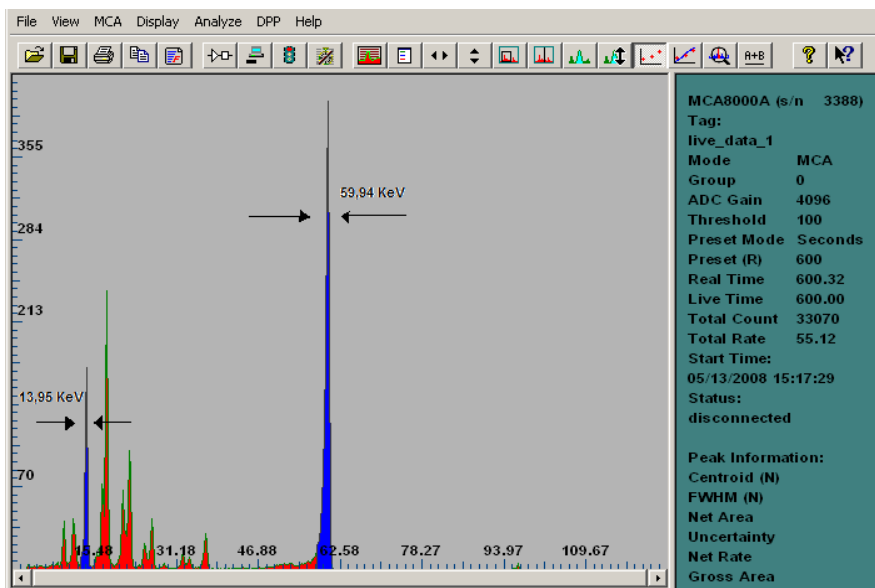


Figura IV.1 – Espectro de calibração do analisador multicanal – ^{241}Am .

Estabelecido os limites de energia, três pontos distintos foram escolhidos em um dos espectros já calibrado em energia no MCA. A tabela IV.1 mostra as energias escolhidas juntamente com seus respectivos canais fornecidos pelo programa do analisador multicanal. Uma reta de calibração foi traçada a partir desses pontos, relacionando canal e energia.

Tabela IV.1 - Energias características da fonte gama de ^{241}Am com seus respectivos canais.

Energia (keV)	Canal
30,81	1012
45,74	1499
60,61	1984

Com o auxílio da reta de calibração obtém-se a equação para o cálculo das energias dos fótons espalhados:

$$\text{Energia} = [\text{Canal} \times 0,03066 - 0,21492] \quad (\text{IV.1})$$

IV.2 Análise do Espalhamento de Raios X na Profundidade

O método proposto para esta análise consiste no monitoramento da variação de intensidade na região central do fotopico do espectro diferencial da radiação espalhada na peça, com relação à espessura. Antes da realização deste monitoramento, fez-se a análise do espectro de feixe incidente, com e sem a utilização dos filtros de Cobre e Alumínio no colimador da fonte de raios X, para se avaliar a influência destes sobre os espectros. O tempo de aquisição ao obter os espectros foi de 200 segundos, sendo o tempo morto destes com e sem filtros de 7,17% e 13,34%, respectivamente. A figura IV.2 corresponde a comparação entre esses dois espectros e mostra a influência dos filtros. Como esperado os filtros diminuem as contagens, porém caracteriza melhor o espectro.

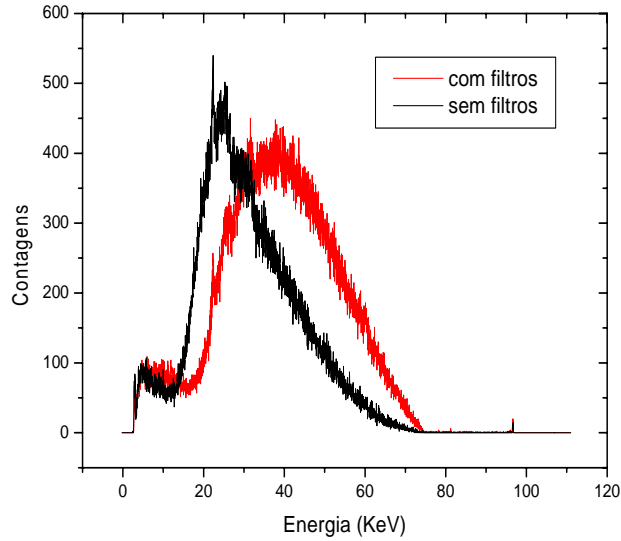


Figura IV.2 - Influência dos filtros nos espectros de feixes incidentes.

Após a análise dos filtros, foram realizadas as contagens dos experimentos 1 e 2 para um tempo de aquisição de 1200 segundos. As figura IV.3 e IV.4 mostra a variação de intensidade dos fótons espalhados a 90° em relação a espessura no ponto 1 (superfície), ponto 2 (resina) e ponto 3 (fundo) das peças com e sem defeito, respectivamente. Como esperado, o número de contagens aumentou com a espessura do material até certo ponto em que, devido à absorção do próprio material alvo, a contagem não aumentou mais.

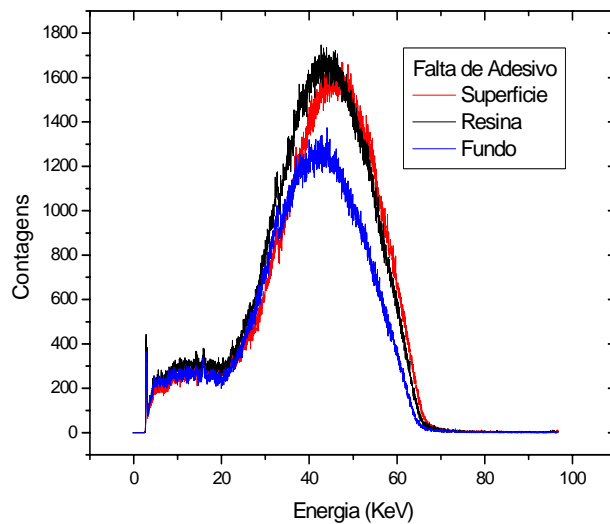


Figura IV.3 – Espectros da intensidade do feixe espalhado com relação a espessura em cada ponto da peça com falta de adesivo.

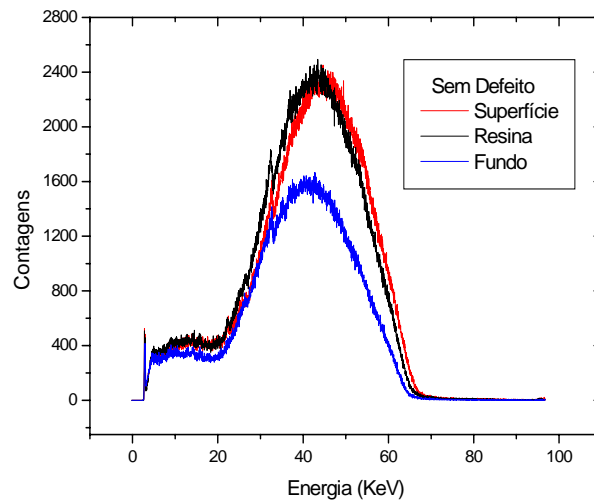


Figura IV.4 - Espectros da intensidade do feixe espalhado com relação a espessura em cada ponto da peça sem defeito.

Nestas figuras, pode-se notar a ocorrência de um deslocamento do espectro para regiões de menores energias, à medida que se aumenta a espessura ao variar a profundidade na peça. Este deslocamento pode ser melhor entendido a partir da análise da figura II.13, considerando-se que a geometria deste trabalho pode ser representada pelo esquema desta figura. Para uma distância fixa do corpo de prova ao sistema de detecção ($Dist$), o ângulo de espalhamento máximo (φ), que irá determinar o limite inferior da janela de energia, dependerá da espessura inspecionada do mesmo. Desta maneira, à medida que se aumenta a espessura aumentando a profundidade de inspeção na peça, o limite inferior da janela é deslocado para uma região de menor energia. É importante mencionar também que um aumento da espessura não afetará o ângulo mínimo de espalhamento, que corresponde ao limite superior da janela de energia, pois esse ângulo depende apenas da distância na qual é posicionado o corpo de prova.

No estudo da intensidade do feixe espalhado nas peças com falta de adesivo e sem defeito, pode-se perceber a partir da comparação das figuras IV.5 e IV.6 que há uma diferença na intensidade das contagens da região onde se encontra a resina (cola) de cada peça. Como esperado, na peça sem defeito (figura IV.5) houve maior número de fótons espalhados em alguns pontos da resina, se comparado com este nos pontos da peça com falta de adesivo (figura IV.6).

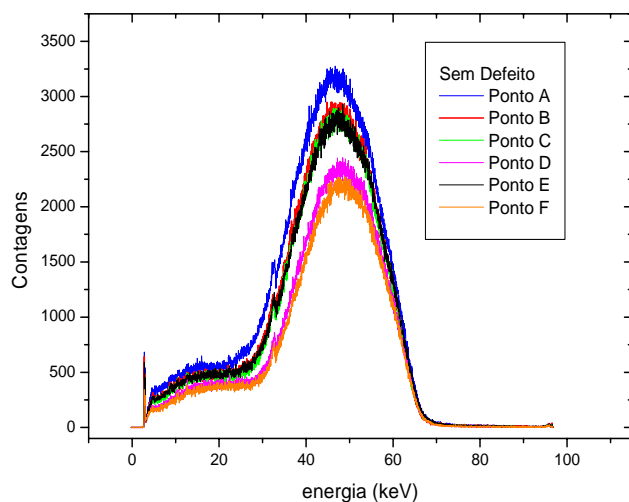


Figura IV.5 – Espectros de retroespalhamento da peça sem defeito em diferentes pontos na região da resina.

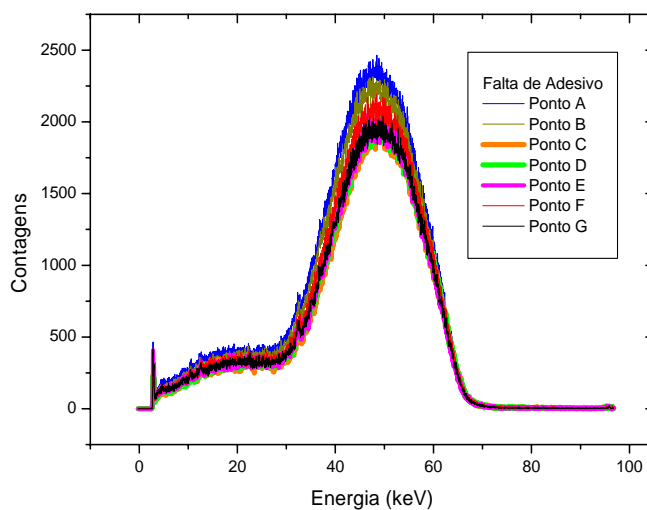


Figura IV.6 – Espectros de retroespalhamento da peça com falta de adesivo em diferentes pontos na região da resina.

IV.3 Análise do Espalhamento de Raios Gama

Com o intuito de se fazer o estudo do espalhamento com a fonte gama de Amerício, primeiramente mediu-se as contagens em três partes da peça (superfície, resina e fundo), com o ponto de maior intensidade do voxel em cada uma delas. A peça foi posicionada perpendicular ao feixe incidente, assim como nas medidas feitas com o aparelho de raios X.

Porém, como o número de contagens não foi suficiente para uma análise adequada, o ângulo de espalhamento usado foi aumentado para 153° em vez de 90°. A figura IV.7 mostra a comparação dos espectros obtidos com esse ângulo através do retroespalhamento dos raios gama em uma peça sem defeito. O tempo de aquisição de cada medida foi de 5000 segundos devido à baixa contagem. Para o estudo dos espectros da figura IV.7 com uma boa estatística de contagem, o número de contagens total na região do fotopico principal de cada espectro foi medido, sendo este apresentado na tabela IV.2:

Tabela IV.2 – Contagens total do fotopico principal de espalhamento nas partes da peça.

Superfície	Resina	Fundo
4781 ± 2	6569 ± 1	2317 ± 2

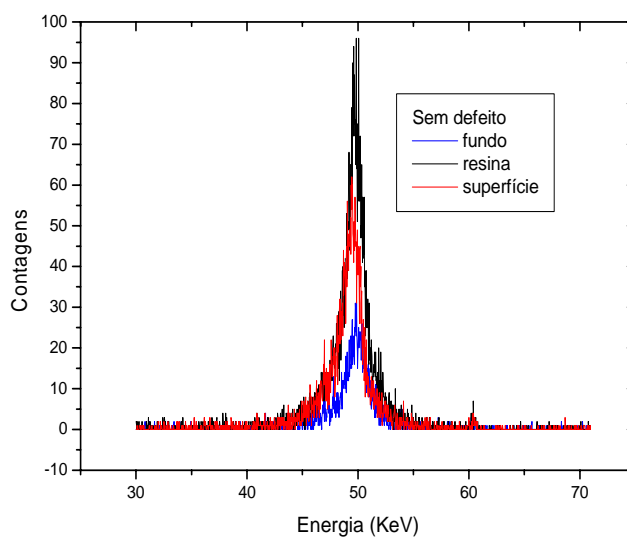


Figura IV.7- Comparação entre os espectros de espalhamento de raios gama em relação a profundidade na peça.

Como esperado, no espalhamento com os raios gama também houve aumento no número de contagens com relação à espessura (profundidade de inspeção) na peça, mas que em certa profundidade o número de contagens não aumentou mais devido a absorção do próprio material.

Na obtenção do coeficiente de absorção, medidas de intensidade das contagens de fótons incidentes e transmitidos através de cada material da peça, separadamente, foram obtidos e seus valores estão apresentados na tabela IV.3 juntamente com a espessura destes materiais. Com esses valores, foi feito o cálculo dos coeficientes de atenuação das partes da peça através da equação II.1.

Tabela IV.3 – Medidas de intensidades de fótons incidentes e transmitidos em cada material da peça separadamente e suas espessuras.

59,54 keV				
Parede 1 (Superfície)				Espessura (mm)
I	49257	49209	49269	12,85
I0	97816	97634	98266	
I0/I	1,99	1,98	1,99	
Parede 2 (Fundo)				Espessura (mm)
I	53122	52901	53125	11,67
I0	97816	97634	98266	
I0/I	1,84	1,85	1,85	
Resina				Espessura (mm)
I	67911	67929	68135	4,00
I0	76760	76945	76765	
I0/I	1,13	1,13	1,13	

Após o cálculo dos coeficientes de atenuação, foram traçados gráficos destes em relação à energia em keV para cada parte da peça analisada (figura IV.8 e IV.9). Com o auxílio da equação da curva de cada gráfico, pode-se calcular os coeficientes de absorção linear dos feixes em cada material e estes são apresentado na tabela IV.4.

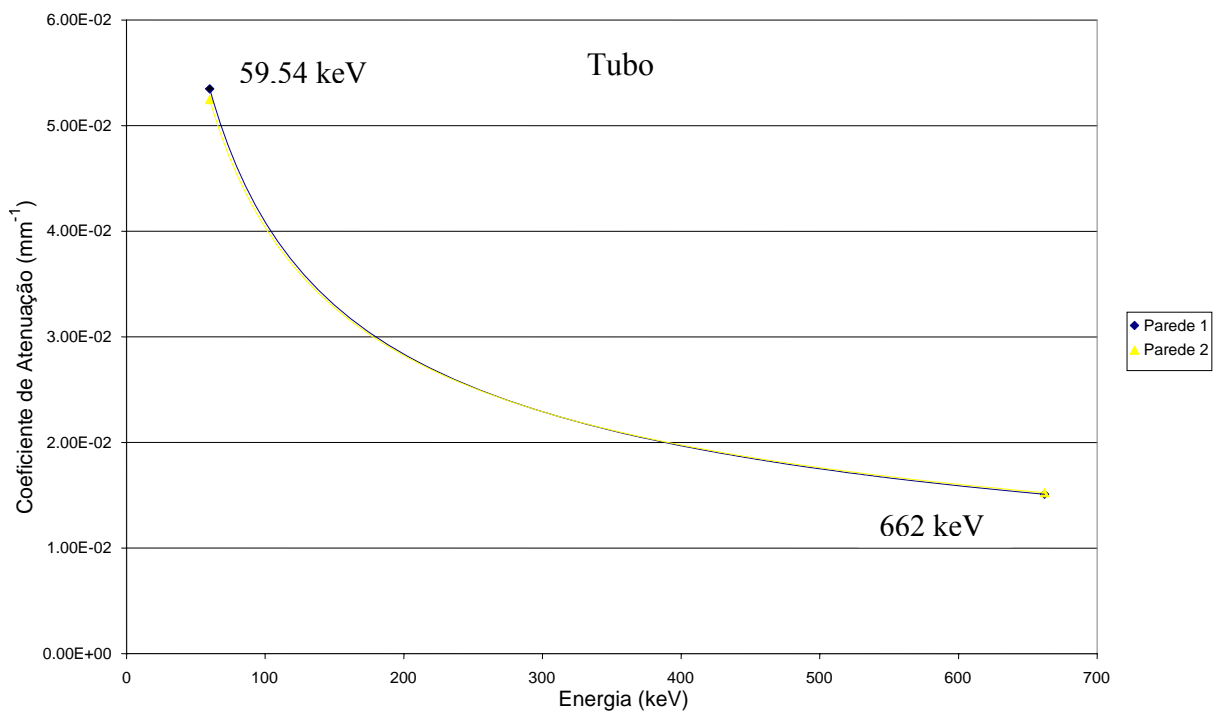


Figura IV.8 – Curvas de calibração para as paredes 1 e 2 da peça.

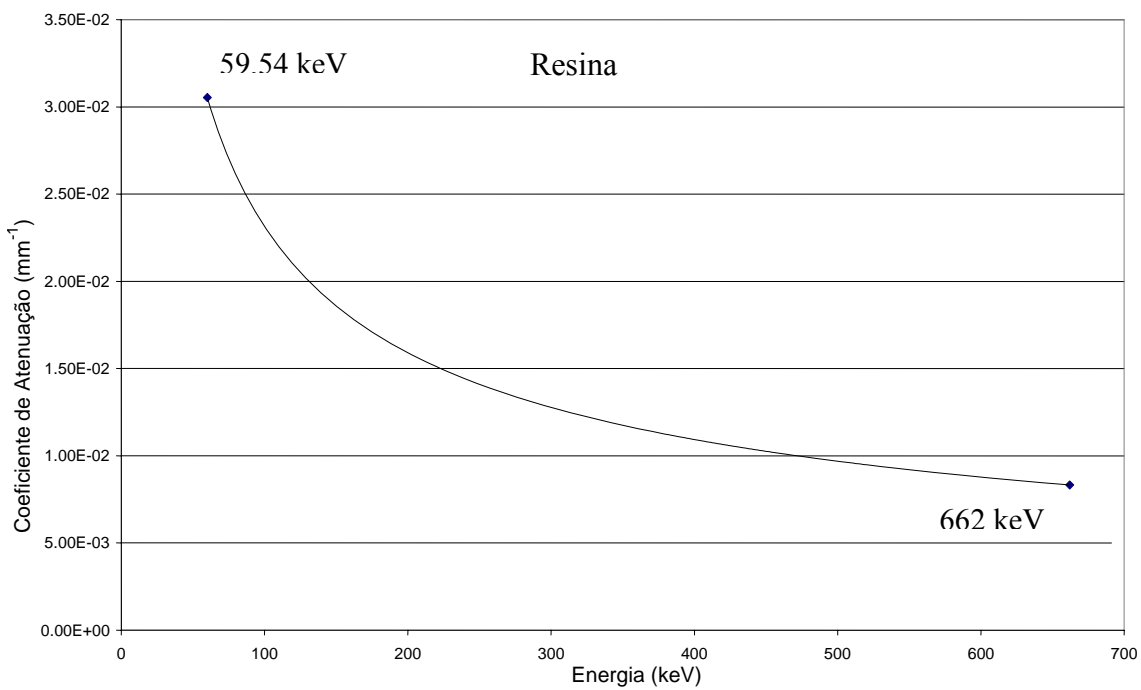


Figura IV.9 – Curva de calibração para a resina.

- Equação do gráfico para a parede 1:

$$y = 0,462. x^{-0,5266} \quad \text{(IV.2)}$$

- Equação do gráfico para a parede 2:

$$y = 0,4321. x^{-0,5149} \quad \text{(IV.3)}$$

- Equação do gráfico para a resina:

$$y = 0,2805. x^{-0,5417} \quad \text{(IV.4)}$$

onde : x é a energia dos feixes incidentes ou espalhados,

y é o coeficiente de absorção linear dos feixes incidentes ou espalhados em cada material.

Tabela IV.4 – Coeficientes de absorção linear dos feixes incidentes e espalhados nas partes da peça.

	$\mu_i \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$\mu_e \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
μ_{p1}	$0,54 \pm 0,08$	$0,59 \pm 0,08$
μ_{p2}	$0,53 \pm 0,08$	$0,58 \pm 0,08$
μ_r	$0,30 \pm 0,08$	$0,34 \pm 0,08$

Nota-se através dos valores da tabela IV.4 que os coeficientes de absorção das paredes 1 e 2 das peças são iguais, o que já era esperado por serem feitas do mesmo material. A resina apresentou um coeficiente de absorção menor, o que contribui na inspeção das peças, pois dá um contraste diferente para os dois materiais no espalhamento dos fótons.

Para se fazer uma comparação entre o número de fótons espalhados na parede 1 e na resina, espectros de cada parte foram obtidos e estes são apresentados na figura IV.10. Os espectros foram da superfície de cada material separadamente, mantendo o mesmo dimensionamento para o sistema e com o tempo de aquisição das contagens de 5000

segundos. As contagens totais do fotopico de cada espectro estão apresentadas na tabela IV.5.

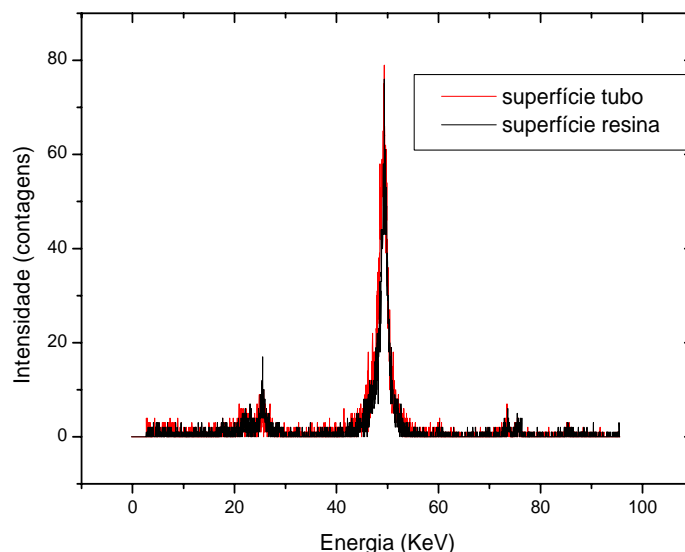


Figura IV.10 - Comparação entre os espectros de espalhamento de raios gama da superfície da peça e da resina num tempo de contagem de 5000 s.

Tabela IV.5 – Total de contagens de toda região do fotopico principal de espalhamento na superfície da resina e da peça.

Material	Superfície da peça	Superfície da resina
Total de contagens do fotopico	4966	3196

Analisando o gráfico acima, nota-se que o espectro da resina mostrou uma resolução em energia menor que o da peça, dando um menor número de contagens em toda região do fotopico principal de espalhamento. Conclui-se que apesar da resina ter um coeficiente de absorção menor que o material que forma a superfície do tubo, ela espalha menos fótons.

IV.4 Análise da Densidade Eletrônica

Após as análises dos dados apresentados acima, decidiu-se fazer um estudo da densidade eletrônica nas três partes da peça, e assim entender melhor o efeito de

espalhamento. A peça foi varrida na direção Z, começando em pontos fora da peça, e depois foram feitos com passos de 2 e 3 mm a depender da posição onde o voxel, marcado com o feixe de laser, se encontrava na peça. Na varredura, dois defeitos puderam ser analisados, a falta de adesivo e a falta de adesão, e estes foram chamados de vazio 1 com 2 mm e vazio 2 com 1 mm, respectivamente. O total de contagens de toda região do fotopico principal de espalhamento obtidas em cada medida são apresentadas na figura IV.11 com relação à profundidade de inspeção na peça. Como esperado, as contagens diminuíram com relação a profundidade na peça e no ponto onde se encontra o vazio 1 a queda nas contagens, comparando com o ponto anterior, foi maior que no vazio 2, também comparando com o ponto anterior a ele.

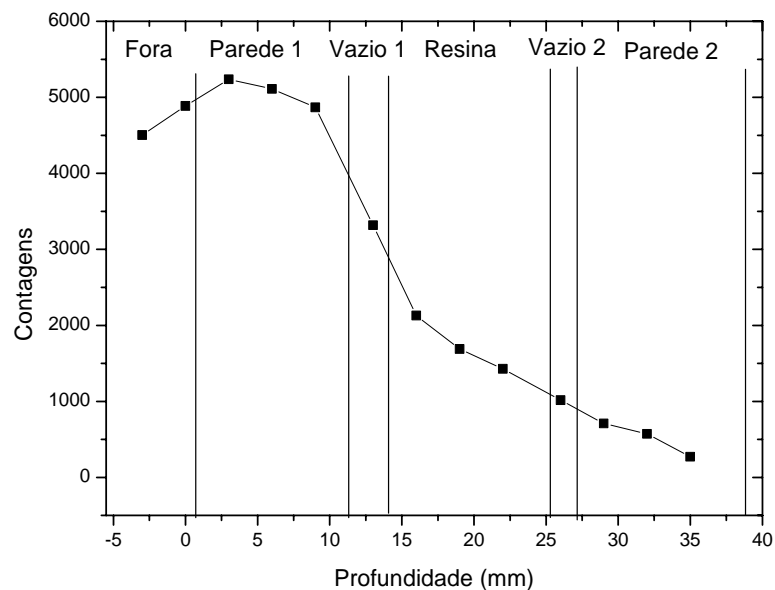


Figura IV.11 – Contagens total com relação à profundidade de inspeção na peça.

Com os valores das contagens, obtidos na varredura da peça, foi calculada a densidade eletrônica de cada ponto na profundidade da peça, através da equação II.6. Neste cálculo os coeficientes de absorção do ar para os raios γ foram usados em certos pontos devido à presença dos vazios. Estes são apresentados na tabela IV.6. A figura IV.12 apresenta o gráfico da densidade eletrônica média em relação à espessura em cada ponto da peça montada.

Tabela IV.6 – Coeficientes de Absorção Linear do ar para os feixes de raios γ incidentes e espalhados.

$\mu_{i \text{ ar}} (\text{cm}^{-1})$	$\mu_{e \text{ ar}} (\text{cm}^{-1})$
0,188	0,209

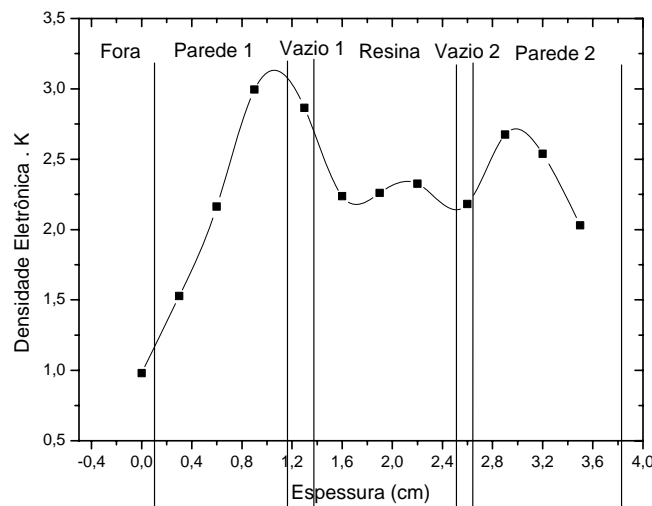


Figura IV.12 – Gráfico da densidade eletrônica média em relação a espessura da peça.

Pode-se perceber na figura IV.12 acima que nas regiões onde foram simuladas as falhas houve uma redução da densidade eletrônica, como já era esperado. Nota-se também que região da resina apresentou densidade eletrônica mais baixa, confirmando que este material, apesar de ter o coeficiente de absorção linear menor que os das paredes 1 e 2, consegue espalhar menos fótons. Na parede 2 houve uma redução da densidade eletrônica,

provavelmente devido a saída de uma parte do *voxel* deste material a medida que se variou a profundidade e devido a atenuação sofrida pelos feixes.

IV. 5 Sensibilidade do Sistema em Detectar Defeitos

Para a detecção dos defeitos nas junções das peças foi fixada uma janela de energia, também chamando de ROI no programa do MCA, e o número de contagens totais da região selecionada foi anotada para as análises. Essa região é onde se encontra o fotopico principal de espalhamento dos raios γ .

As medidas das contagens foram obtidas em vários pontos na direção X, mantendo fixa a profundidade na direção Z. Chamou-se de ponto “0” o centro da peça, de ponto 1 a 4 os localizados em direção a uma extremidade e de ponto -1 a -4 os localizados em direção a outra extremidade. Após cada varredura, a altura de inspeção na peça foi mudada variando a posição Y em quatro partes: altura 1, altura 2, altura 3 e altura 4.

As peças analisadas foram sem defeito, com falta de adesivo e com falta de adesão, estabelecendo como parâmetro para comparação as contagens obtidas da peça sem defeito. As figuras IV.13 e IV.14 mostram a comparação entre as contagens da peça sem defeito e da peça com falta de adesivo e falta de adesão, respectivamente, na altura 1 que fica localizada em uma extremidade da junção.

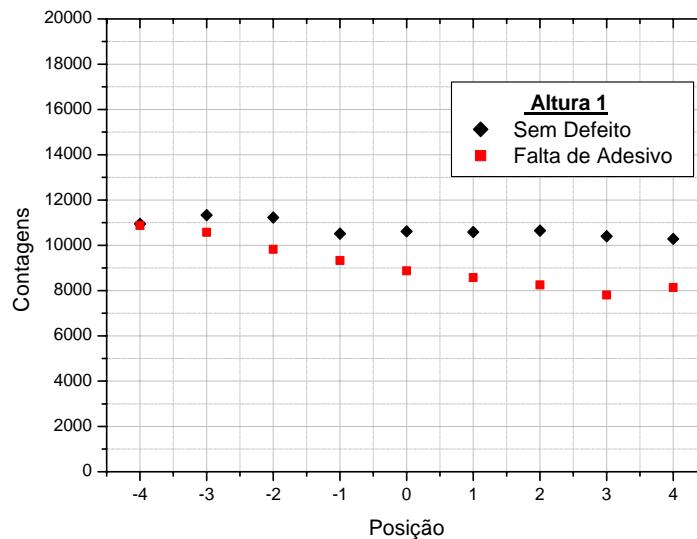


Figura IV.13 – Comparação entre as contagens da altura 1 das peças com falta de adesivo e sem defeito.

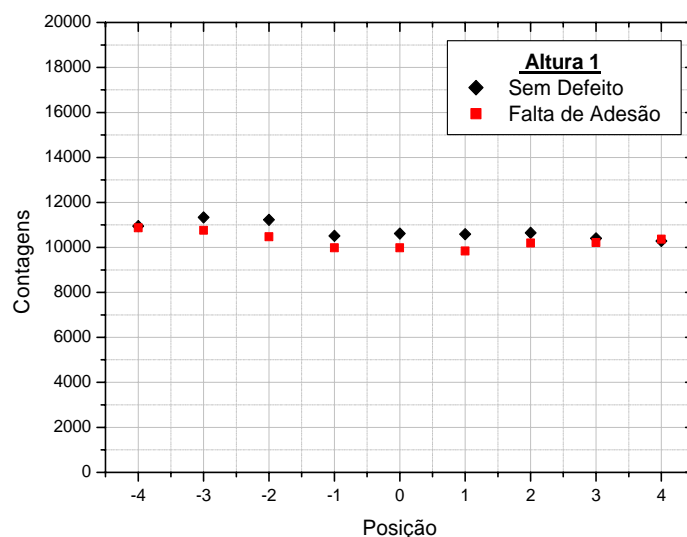


Figura IV.14 – Comparação entre as contagens da altura 1 das peças com falta de adesão e sem defeito.

Analisando os gráficos acima, nota-se que as contagens nas peças com defeitos mostraram uma diminuição no total de contagens dos fótons retroespalhados se comparado com as da peça sem defeito. Através do gráfico da figura IV.13 pode-se perceber claramente a presença de defeito na extremidade em direção a posição 4. Já na figura IV.14 a diferença nas contagens não foi tão significativa porém, como as contagens da peça com falta de adesão foram menores, pode-se dizer que há um uma quantidade menor de resina ou até um falta de adesão entre os pontos -1 e 1. Porém, como esperado, a peça com falta de adesivo mostrou uma queda maior no número de contagens em relação à peça com falta de adesão.

Na figura IV.15, as contagens dos fótons espalhados na altura 2 da peça sem defeito, mostraram-se um pouco menor que as da com falta de adesivo, porém mesmo com a redução, o número de contagens em todos os pontos foi superior ao dos pontos considerados defeitos na altura 1. Através desta figura, pode-se dizer que não há a falta de adesivo nessa altura. Já na figura IV.16, a diferença entre as contagens das peças na altura 2 foram bem evidentes, o que pode caracterizar a presença de defeito entre os pontos -1 e 4.

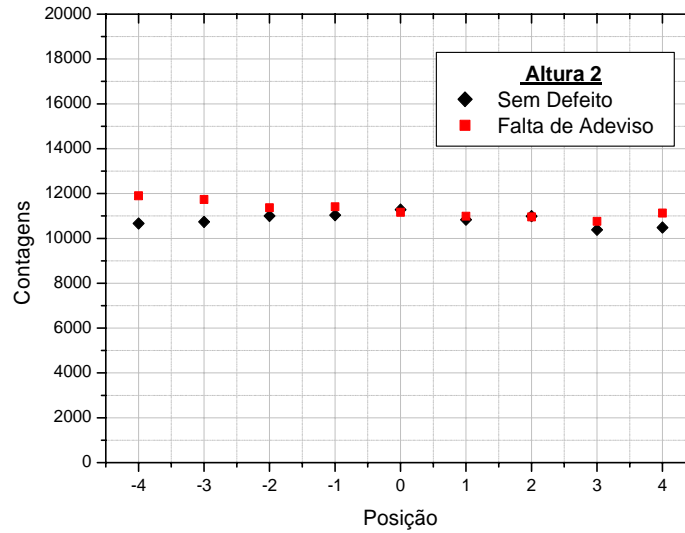


Figura IV.15 – Comparação entre as contagens da altura 2 das peças com falta de adesivo e sem defeito.

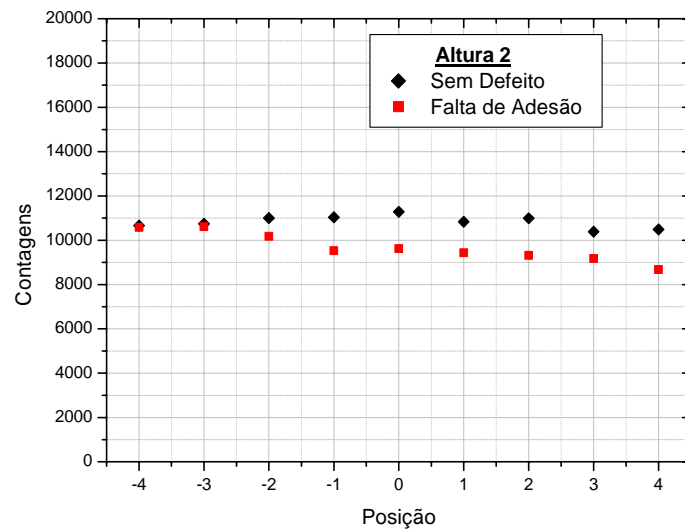


Figura IV.16 – Comparação entre as contagens da altura 2 das peças com falta de adesão e sem defeito.

Observando a figura IV.17, vê-se que as contagens da peça com falta de adesivo tiveram um comportamento parecido com as desta na altura 1 da figura IV.13, mostrando também uma maior falta da resina em direção a posição 4. Pode-se concluir, através da figura IV.18, que não há defeito na altura 4 da peça com falta de adesão fazendo-se a mesma análise da que foi feita na figura IV.15.

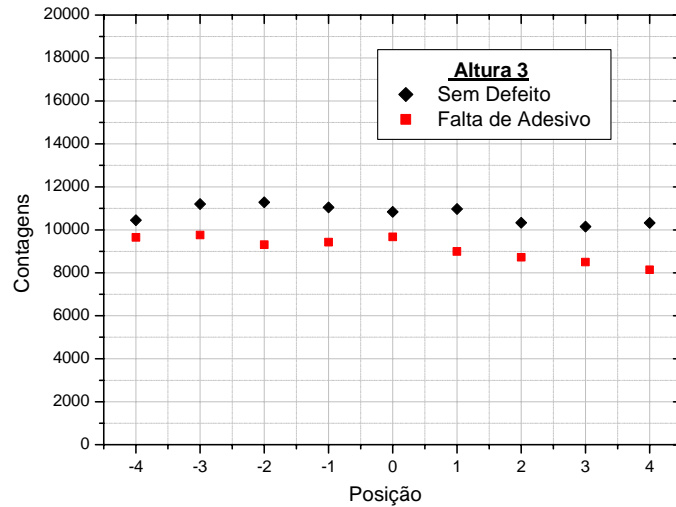


Figura IV.17 – Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesivo e sem defeito.

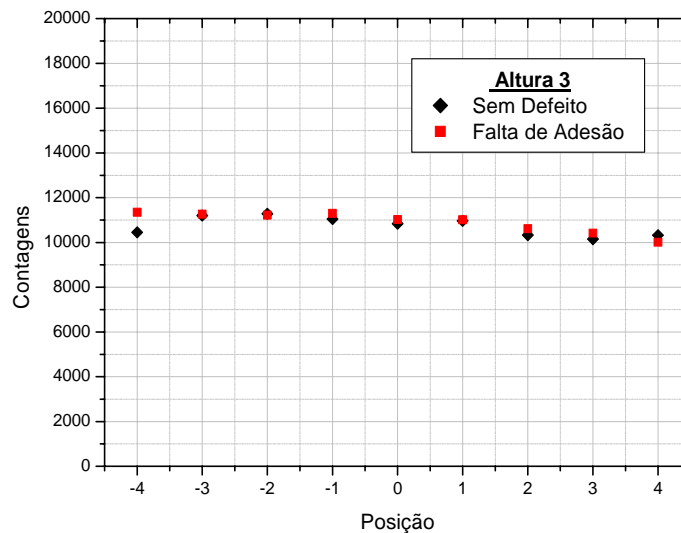


Figura IV.18 - Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesão e sem defeito.

Na figura IV.19, também se pode dizer que não há defeitos, pois não há uma diferença significativa entre as contagens das peças na altura 4, mas na figura IV.20 nota-se essa diferença em quase todas as posições ao se fazer a comparação com a peça sem defeito.

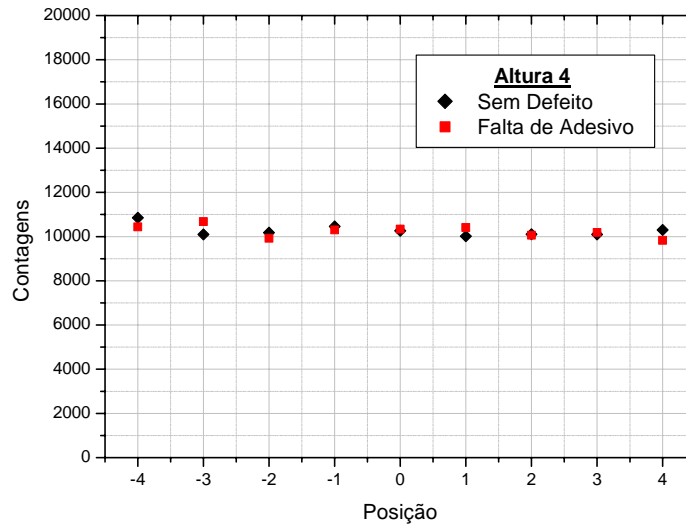


Figura IV.19 - Comparação entre as contagens da altura 4 das peças com falta de adesivo e sem defeito.

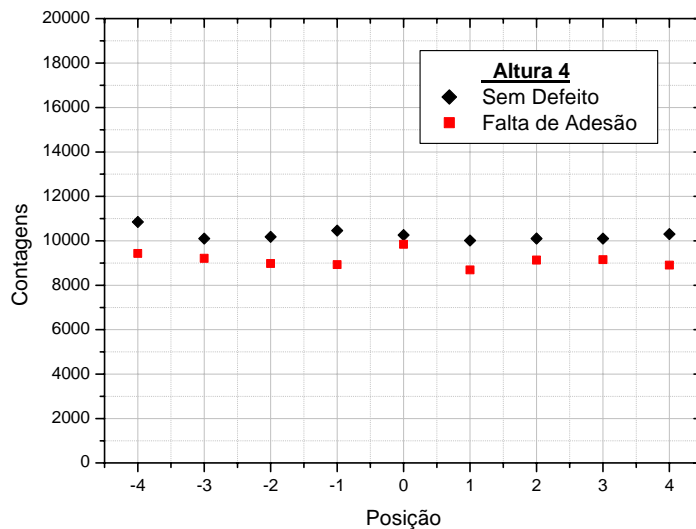


Figura IV.20 - Comparação entre as contagens da altura 3 das peças com falta de adesão e sem defeito.

Analisando todas as figuras, pode-se concluir que na peça sem defeito analisada há pontos com uma quantidade menor de resina, porém essa quantidade não chega a ser tão reduzida a ponto de caracterizar a presença de defeitos nas medidas. Conclui-se também que não há como diferenciar a peça com falta de adesivo e com falta de adesão através dos resultados obtidos com essas peças, pois em determinadas alturas suas respostas foram bem parecidas.

IV.6 Ensaio de Detectabilidade de Defeitos

Com o intuito de determinar aproximadamente qual seria o mínimo defeito detectável presente no corpo de prova, foi montada uma peça simulando a original com dois pedaços de resina de espessuras semelhantes à desta e situados nas extremidades laterais. Na extremidade 1 se encontra o pedaço de resina com 1,2 mm de espessura e na extremidade 2 se encontra o pedaço de resina com 1,3 mm de espessura. Para simular os defeitos foi introduzido um vazio de 12 mm de largura no centro da peça, entre as duas paredes (superfície e fundo) e entre as colas. Nas medidas, primeiramente foram obtidos os espectros em três pontos (parede 1, resina e parede 2) das duas extremidades laterais e do centro, para assim, observar a variação das contagens com relação à profundidade em cada um. É importante mencionar que as resinas foram posicionadas para simular a não presença do defeito, porém, como os pedaços não estavam aderidos às paredes, esta simulação não foi perfeita. A figura IV.21 apresenta o total de contagens do fotopico principal de espalhamento com relação à profundidade na peça.

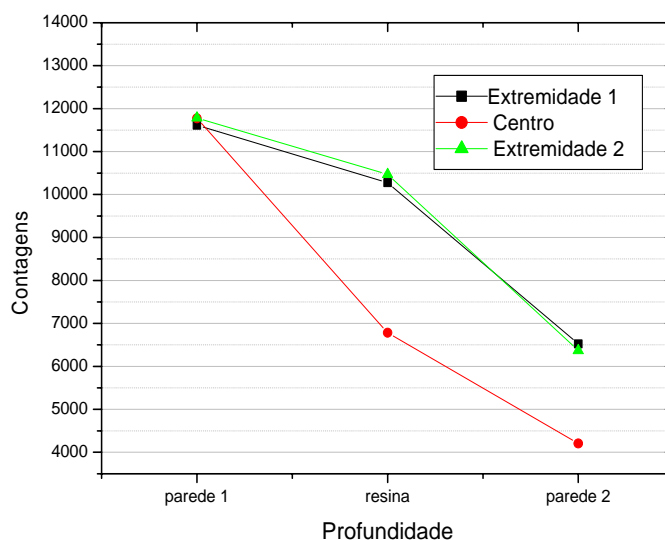


Figura IV.21 – Variação das contagens obtidas com a peça montada com relação à profundidade na peça.

Analisando a figura IV.21, pode-se perceber que houve uma variação nas contagens com relação a espessura de inspeção na peça. Na extremidade 2, as contagens apresentaram-se levemente maior que na extremidade 1 para as primeiras partes,

provavelmente devido a maior espessura da resina, já que os feixes incidentes e espalhados englobam as três partes da peça. Já na parede 2, o número de contagens na extremidade 2 foi um pouco menor, provavelmente pelos feixes sofrerem maior atenuação ao longo dos materiais. Através do gráfico nota-se também que, no centro da peça, houve uma queda acentuada nas contagens por causa do vazio entre as paredes.

Após esta análise, o vazio no centro da peça foi diminuído de 12 mm para 9 mm, 6 mm, 3 mm, 2 mm, 1mm e 0 mm (nenhum vazio), aproximando as resinas em direção a este. Nestas medidas, a região mais intensa do voxel foi posicionada somente entre as paredes no local onde estava o vazio. A figura IV.22 abaixo mostra a variação nas contagens a medida em que o vazio foi diminuído.

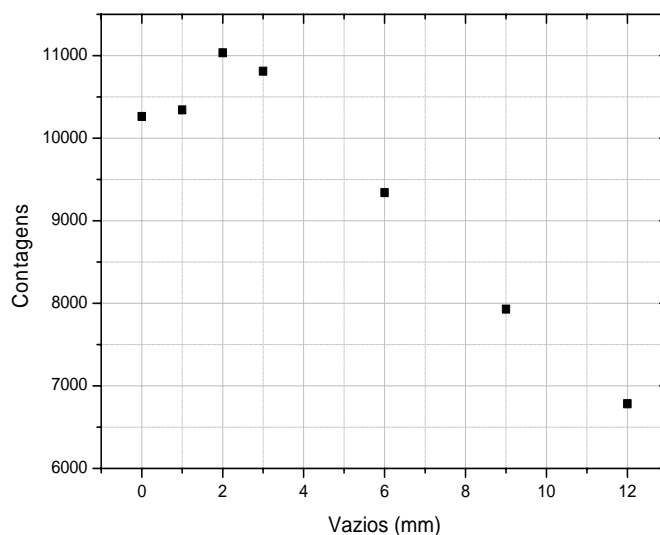


Figura IV.22 – Variação das contagens com relação a largura do vazio.

Através da figura IV.22 acima, vê-se que as contagens aumentaram com a diminuição do vazio até certo ponto em que a absorção causada pela resina foi maior que a diminuição na densidade eletrônica no interior do *voxel*, causada pela presença de ar no interior da peça. A partir desta análise, pode-se dizer que o menor vazio detectado para produzir uma variação mínima na densidade de elétrons no interior do *voxel*, fora da flutuação estatística das medidas, foi de 6 mm para o dimensionamento utilizado neste sistema.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a técnica de inspeção por espalhamento Compton pode ser aplicada aos dutos compósitos de fibra de vidro/epóxi, já que houve espalhamento de radiação nestes, e que é possível fazer a detecção dos defeitos. Tanto para o espalhamento usando a fonte de raios X, como para o espalhamento usando a fonte gama, as contagens aumentaram com a espessura até a região da resina, sendo que após esta, as contagens sofreram uma redução devido a absorção pelo próprio material. A colimação utilizada em cada fonte produziu um tamanho do voxel adequado para haver a redução das contagens nas regiões onde, provavelmente, se encontram defeitos na peça.

A partir da análise dos resultados experimentais, pode-se tecer algumas considerações a respeito da técnica nas condições usadas.

Uso da fonte de raios X:

O espalhamento a 90° com a fonte de raios X mostrou boa intensidade nas contagens para um tempo de 1200 segundos. Os espectros foram melhor caracterizados com a utilização de filtros e houve deslocamento destes para região de menor energia, à medida que se aumentou a profundidade de inspeção. Isto ajuda a saber se a profundidade de inspeção em que o *voxel* foi posicionado está na região de interesse, que no caso deste trabalho foi a região da resina.

Uso da fonte gama:

No espalhamento com a fonte gama de ^{241}Am , os espectros não tiveram boa intensidade nas contagens devido a baixa atividade da fonte. Isto fez necessário um estudo do dimensionamento do sistema. Este problema foi minimizado com a utilização de ângulos maiores que 90° e com um tempo de aquisição dos dados de 2400 segundos. Nas análises com esta fonte, os estudos tiveram que ser feitos com o total de contagens do fotopico do espectro e não mais a intensidade da região central do fotopico. A obtenção da densidade eletrônica em cada parte da peça permitiu observar que ocorre a redução no

número de contagens onde há vazios, devido à redução na densidade de elétrons. No teste da detecção dos defeitos, o mínimo tamanho do vazio, que causou uma variação na densidade eletrônica no voxel com o dimensionamento utilizado, foi de 6 mm.

Como sugestões para a continuidade deste trabalho, podemos citar:

Um estudo mais detalhado do espalhamento para detecção do defeito nos dutos de fibra de vidro/epóxi, utilizando uma fonte gama de alta energia ou um aparelho de raios X, já que com a fonte gama de baixa energia houve algumas limitações.

Diminuição do tempo de aquisição das medidas, pois este é um fator importante na utilização de uma determinada técnica para trabalho em campo.

Utilização de colimadores com vazadura na forma de um prisma regular com base quadrada, que implica em uma maior intensidade do feixe de radiação se comparado com os colimadores com vazadura paralela.

Para o teste da sensibilidade do sistema para detecção de defeitos é sugerido que se diminua o máximo possível o *voxel* para obter uma resposta mais precisa na inspeção das peças, e assim fazer uma distinção entre o número de contagens referente a peça sem defeito e o número de contagens referente a presença destes. Vale lembrar que não se tem conhecimento sobre as posições, formatos e tamanhos destes defeitos.

Outra sugestão é fazer da análise detecção de defeitos com ensaios semelhantes às peças originais. Estes seriam colados com a mesma resina epóxi no laboratório e seriam feitos furos de diversos formatos e tamanho antes da colagem, simulando defeitos.

Faz-se necessário a utilização de um arranjo experimental mais fixo, pois uma alteração na geometria do sistema influencia e muito na resposta do espectro obtido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL-MAJID, S.; TAYYEB, Z., 2005, “Use of Gamma Ray Back Scattering Method for Inspection of Corrosion under Insulation”. *Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition (3rd MENDT)*, Bahrain, Manama, 27-30 November.

Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference), pp.1276-1278.

ANDREUCCI, R., 2003, *Radiologia Industrial*; Ed. Jul. 2003, ABENDE publicações.

AMPTEK INCORPORATION. Operating Manual XR-100T-CZT, 2003.

AMPTEK INCORPORATION. *CdTe Measurement of X-Ray Tube Spectra: Escape Events*. Application Note (ANCDTE-1 Rev. A1), 2008. Disponível em: <<http://www.amptek.com/epeaks.html>> Acesso em: 29 de jan. 2009a.

AMPTEK INCORPORATION. *Efficiency of Amptek XR-100-CdTe and -CZT Detectors*. Application Note (ANCZT1 Rev.2), 2002. Disponível em: <<http://www.amptek.com/anczt1.html>> Acesso em: 29 de jan. 2009b.

AMEROM INTERNACIONAL. *Fiberglass-Composite Pipe Group*. Disponível em: <<http://www.Ameron-fpg.com>> Acesso em 09 de jan. 2008.

ANJOS, M. J., LOPES, R. T., BORGES, J. C., 1989, “Compton Scattering of Gamma-Rays as Surface Inspection Techniques”, *Nuclear Instruments and Methods Physics Research*, v. A280, pp.535-538.

ANJOS, M. J., 1991, *Estudo de uma Técnica de Inspeção de Superfície Usando-se Espalhamento Compton de Raios Gama*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- ATTIX, F. H., 1986, "Gamma and X-Ray Interactions in Matter". In: Wiley, J. e Sons (eds), *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, 1 ed., chapter 7, New York, USA, Wiley-VCH.
- BATISTA, J. J., SANTON, L. W., BRONSKILL, M. J., 1977, "Compton Scatter Imaging of Transverse Section: Corrections for Multiple Scatter and Attenuations", *Phys. Med. Biol.*, v. 22, pp. 229-244.
- BATISTA, J. J., BRONSKILL, M. J.; 1978, "Compton – Scatter Tissue Densitometry: Calculation of Single and Multiple Scatter Photon Fluences", *Phys. Med. Biol.*, v. 23, pp. 1-23.
- BATISTA, J. J., BRONSKILL, M. J., 1981, "Compton Scatter Imaging of Transverse Section: An Overall Appraisal and Evaluation for Radiotherapy Planning", *Phys. Med. Biol.*, v. 26, pp. 81-99.
- BRIDGE, B., 1985, "A Theoretical Feasibility Study of the Use of Compton Backscatter Gamma Ray Tomography (CBGT) for Underwater Off-shore NDT", *British Journal of NDT*, v. 27, pp. 357-363.
- BRIDGE, B., HARIRCHIAN, F., IMRIE, D. C. *et al.*, 1987, "Experiments in Compton Scatter Imaging of Materials with Wideranging Densities Using a Low Activity Gamma Source", *NDT International*, v. 20, n. 6, pp. 339-346.
- CAMPBELL, J. G., JACOBS, A. M., 1992, "Detection of Buried Land Mines by Compton Backscatter Imaging", *Nuclear Science and Engineering*, n. 110, pp. 417-424.
- CARNEIRO, C. J., 2006, *Desenvolvimento de um Sistema Baseado em Transmissão da Radiação Gama para Aplicação em Dutos Flexíveis e Colunas Industriais*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- DARLINGTON, EH., 1975, "Backscattering of 10-100 Kev Electrons from Thick Targets". *Journal of Physics. D: Applied Physics*, v. 8 (Jan.), pp.85-93.
- GRODZINS L. *X-ray Backscatter*. American Science and Engineering Inc. Disponível em: <http://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1608/MR1608.appl.pdf> Acesso em: 15 de out. 2007.
- GOUVEIRA, M. A. G. 2000, *Sistema de Caracterização de Materiais em Dutos por Espalhamento da Radiação*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HARDING, G., STRECKER, H. & TISCHLER, R., 1983, "X-Ray Imaging with Compton Scatter Radiation", *Philips Tech. Rev.*, v. 41, nº 2, pp. 46-59.
- HARDING, G., KOSANETZKY, J., 1989, "Scattered X-ray Beam Nondestructive Testing", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. A280, pp.517-528.
- JAIGOBIND, A. G. A., AMARAL, L., JAISINGH, S., 2007, *Dossiê Técnico: Fabricação de Peças em Fibra de Vidro (Compósitos)*. Instituto de Tecnologia do Paraná -TECPAR.
- JENKINS, R., GOULD, R.W., GEDCKE, D., 1981, *Quantitative X-ray spectrometry*, New York, Marcel Dekker, 586p.
- KNOLL, G. F., 1989, *Radiation Detection and Measurement*, 2 ed. New York, .John Wiley and Sons, Inc.
- LAWSON, L., 1993, "Flux Maximization Techniques for Compton Scatter Depth Profilometry", *Journal of X-ray Science and Technology*, v. 4, pp. 18-36.
- LAWSON, L., 1995, "Compton X-ray Backscatter Depth Profilometry for Aircraft Corrosion Inspection", *Materials Evaluation*, v. 53 (Ago), pp. 936-941.

- LOPES, R. T., ANJOS, M. J., 1989, “Determination of Surface Defects using Compton Scattering of Gamma-Ray of 662KeV”, *Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference)*, pp.1276-1278.
- MACEDO, J. R., PIRES, L. F., CORRECHEL, V., 2000, *Seminário: Atenuação da Radiação Gama*, CENA/USP, São Paulo, SP.
- MIT. *Compton Scattering*. Massachusetts Institute of Technology: Department of Physics, 2004. Disponível em <01.compton.tex,v 1.50 2004/08/27 18:01:51 sewell Exp > Acesso em 11 de Dez. 2007.
- MATOS, J. A., 1986, *Otimização de um Sistema Tomográfico Utilizando Espalhamento Compton*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MCFARLANE, N. J. B., SPELLER, R. D., BULL, C. R., et al., 2003, “Detection of Bone Fragments in Chicken Meat using X-ray Backscatter”, *Biosystems Engineering*, v.85 (Fev), pp.185-199.
- MONTANHEIRO, M. N. S., NASCIMENTO FILHO, V. F., PINTO, F. A., 1977, *Boletim Didático: Introdução à espectrometria Gama*, CENA/USP, n. 21, 37p.
- NIEMANN, W., OLESINSKI, S., THIELE, T., et al., 2002, “Detection of Buried Landmines with X-Ray Backscatter Technology”, *NDTnet*, v.7, n.10 (Oct).
- OLIVEIRA, D. F., 2007, *Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ONG, P. S., ANDERSON, W. L., COOK, B. D.; et al., 1994, “A Novel X-Ray Technique for Inspection of Steel Pipes”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, v.13 (Apr), pp. 165-173.

- PRICE, W.J., 1989, *Nuclear Radiation Detection*. 2 ed. New York, McGraw-Hill Book Company.
- ROCHA, H. S., 2001, *Desenvolvimento de um Sistema Microtomografia por transmissão de Raios X*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, I. L. M., 1997, *Desenvolvimento de um Sistema de Inspeção de Desgastes em Tubulações Através da Técnica de Espalhamento Compton*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- STOKES, J. A.; ALVAR, K. R.; COREY, R. Y.; et al.; 1982, “Some New Applications of Collimated Photon Scattering for Nondestructive Examination”, *Nuclear Instruments and Methods*, v. 193, pp 261-267.
- VALENTE, C. M., 1994, *Estudo da Técnica de Espalhamento Compton na inspeção de Escoamento de Petróleo em Tubulações “ Off-Shore”*. Tese de M.Sc., COPPE/URFJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- VIEIRA, A. C. M., 1986, *Desenvolvimento de uma Mesa Tomográfica por Espalhamento Compton e de um Algoritmo para o Processamento dos Dados*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- YACOUT, A. M.; HAAREN, M. H. V.; DUNN, W. L., 1997, “A Limited-scan Backscatter Technique for Detection of Hidden Corrosion”, *Appl. Radiat. Isot.*, v. 48, pp. 1312-1320.

APÊNDICE A

Equação do Espalhamento Compton

A equação que fornece a intensidade do feixe de radiação espalhado na direção de um ângulo θ , dentro do limite do ângulo sólido Ω , estabelecido pelo campo de visão de detecção, será analisada com maior detalhe neste apêndice. A intensidade de um feixe infinitesimal de raios gama, que após ter sido espalhado no elemento de volume dv , alcança o detector, é dada pela seguinte relação (ANJOS, 1991):

$$I = D_e \cdot \int_{\Delta V} \Phi \cdot \int_{\theta} \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot dv \quad (\text{A.1})$$

Considerando-se as atenuações nos feixes de raios gama incidente e espalhado, tem-se:

$$I = D_e \cdot \int_{\Delta V} \Phi \cdot \text{EXP} \left(- \int_{t_i} \mu(E_i, t_i) dt \right) \cdot \text{EXP} \left(- \int_{t_e} \mu(E_e, t_e) dt \right) \cdot \text{EXP} \int_{\theta} \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot dv$$

Esta equação é chamada equação geral do espalhamento Compton e uma descrição detalhada na resolução desta equação é encontrada no trabalho de VIEIRA, 1986. Esta equação pode ser apresentada de uma forma mais abreviada.

$$I = \text{TA}_i \cdot \text{TA}_e \cdot \text{TE} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

TA_i – representa o termo de atenuação no feixe incidente;

TA_e – representa o termo de atenuação no feixe espalhado e

TE – representa o termo de espalhamento no Voxel.

Se os coeficientes de atenuação na equação A.2 foram constantes, então a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$I = TE \cdot \text{EXP}(-\mu_i \cdot t_i) \cdot \text{EXP}(-\mu_e \cdot t_e) \quad (\text{A.3})$$

Onde:

$$TE = D_e \cdot \int_{\Delta V} \Phi \cdot \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot d\Omega \cdot dv \quad (\text{A.4})$$

A seção de choque diferencial do espalhamento Compton é aproximadamente constante em todo Voxel. Assim tem-se:

$$TE = D_e \cdot \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot \int_{\Delta V} \Phi \cdot \Omega \cdot dv \quad (\text{A.5})$$

Para um sistema fonte-detector fixado numa determinada geometria (ângulo de espalhamento, colimação, etc) a equação A.6 pode ser representada da seguinte forma:

$$TE = K \cdot D_e \quad (\text{A.6})$$

Substituindo esta relação na equação A.4 e desconsiderando-se as contribuições do multiespalhamento, obtém-se uma equação simplificada para o espalhamento Compton:

$$I = K \cdot D_e \cdot \text{EXP}(-\mu_i \cdot t_i) \cdot \text{EXP}(-\mu_e \cdot t_e) \quad (\text{A.7})$$

Onde:

K – é uma constante de proporcionalidade que engloba a eficiência do sistema de detecção, a seção de choque diferencial do espalhamento Compton, o ângulo sólido subtendido entre o detector e o centro do Voxel e a intensidade do feixe de raios gama incidente.