



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

EMERSON MARIO BOLDO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
PORTÁTIL PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO UTILIZANDO A TÉCNICA DE
RETROESPALHAMENTO COMPTON**

EMERSON MARIO BOLDO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
PORTÁTIL PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO UTILIZANDO A TÉCNICA DE
RETROESPALHAMENTO COMPTON**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Appoloni

Londrina
2012

EMERSON MARIO BOLDO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PORTÁTIL
PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO UTILIZANDO A
TÉCNICA DE RETROESPALHAMENTO COMPTON**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Roberto Appoloni
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Fábio Luiz Melquiades
Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof. José Martins de Oliveira Junior
Universidade de Sorocaba

Prof. Marcos de Castro Falleiros
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Otávio Portezan Filho
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 30 de março de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Roberto Appoloni, pela oportunidade, valorosa orientação, amizade e exemplo constante de grande profissionalismo e ética.

Aos companheiros do Grupo de Física Nuclear Aplicada, pela calorosa acolhida, amizade e sabedoria compartilhada.

Ao Prof. Ederaldo Furlaneto Júnior, do departamento de Construção Civil da UEL, pela cooperação e confecção das amostras de concreto.

Ao Prof. Andrea Paesano Júnior, do departamento de Física da UEM, pelo empréstimo da fonte de ^{57}Co .

Ao CNPq, pelo suporte financeiro para execução deste trabalho provido através do edital MCT/CNPq 14/2008.

Aos funcionários das secretarias de Graduação e Pós-Graduação em Física da UEL, pela presteza, apoio e paciência.

Em especial à minha esposa, Andréia Büttner Ciani, pelo amor, compreensão e companherismo em todos os momentos.

E a todos os não citados que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desse trabalho, meu muito obrigado.

BOLDO, Emerson Mario. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema portátil para inspeção de estruturas de concreto utilizando a técnica de retroespalhamento Compton**. 2012. 147 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Física) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

RESUMO

Estruturas de concreto armado estão sujeitas a uma variedade de fatores ambientais de degradação que podem limitar sua vida útil. Há uma grande demanda por métodos de avaliação não destrutiva que possam medir, *in situ*, as propriedades do concreto com objetivo de assegurar sua qualidade e avaliar as condições das estruturas já existentes. O espalhamento Compton de raios gama é uma técnica não destrutiva usada para a detecção de defeitos e inclusões em materiais e que pode ser empregada no concreto armado. A metodologia permite a inspeção acessando um só lado de uma grande estrutura e pode ser implementada com um aparato experimental compacto, portátil e de relativo baixo custo. O conceito é baseado na detecção da radiação retroespalhada produzida por um feixe colimado que incide sobre a amostra. O espectro de energia dos fótons retroespalhados pode ser usado para se determinar perturbações de densidade locais. Neste trabalho avaliamos, teórica e experimentalmente, um sistema de inspeção de materiais que utiliza a técnica de retroespalhamento Compton. A avaliação teórica foi feita através de simulação de Monte Carlo, na qual foram estudados parâmetros geométricos e de equipamento, objetivando a otimização da contagem líquida, contraste e resolução espacial. Na parte experimental do trabalho amostras de acrílico, gesso e concreto contendo defeitos e inclusões foram irradiadas com raios gama provenientes de uma fonte de ^{241}Am (100 mCi) com feixe colimado de $\varnothing 2$ mm. Os fótons inelásticamente espalhados foram coletados no ângulo de 135° por um detector semicondutor de CdTe de alta resolução com uma colimação de $\varnothing 7$ mm \times 30 mm. Varreduras foram realizadas através do movimento lateral das amostras na direção perpendicular em relação ao feixe incidente em passos de 1 mm e 2 mm. O dispositivo avaliado foi bem-sucedido em identificar inclusões superficiais em acrílico, gesso e concreto, sendo que podemos afirmar que o mesmo princípio pode ser empregado para uma gama maior de materiais. A resolução na localização de defeitos foi de 3~5 mm para o acrílico e 6,5~8,5 mm para o gesso e concreto e esta resolução é fortemente dependente da colimação utilizada. Os testes nas amostras de gesso e concreto com inclusões de aço sugerem que, para uma fonte de baixa atividade e energia, a atenuação do feixe tem um maior efeito sobre a intensidade espalhada do que o aumento da densidade do material. Foi verificado que agregados que comumente são adicionados ao concreto, tais como a brita, podem esconder inclusões sob investigação em estruturas reais, se utilizados fontes de baixa energia. A análise de densidade de contraste pode ser utilizada para a determinação da profundidade da armadura. Além disso, os resultados experimentais concordaram com os dados teóricos obtidos através da simulação de Monte Carlo.

Palavras-chave: Espalhamento Compton. Teste não destrutivo. Contraste de densidade. Defeitos. Concreto.

BOLDO, Emerson Mario. **Development and evaluation of a portable system for the inspection of concrete structures by using Compton backscattering**. 2012. 147 p. Doctoral Thesis (Physics Pós-Graduate Program) – State University of Londrina, Londrina, 2012.

ABSTRACT

Reinforced concrete is susceptible to a range of environmental degradation factors that can limit its service life. There has always been a need for nondestructive test methods to measure, in situ, the properties of concrete for quality assurance and to evaluate the condition of existing structures. Compton scattering of gamma radiation is a nondestructive technique used for the detection of defects and inclusions in materials and it can be employed on reinforced concrete. The methodology allows for one-side inspection of large structures and can be implemented with a relatively inexpensive, compact and portable apparatus. The concept is based on detection of backscattered radiation produced from a collimated beam aimed at the sample. The energy spectrum of backscattered photons can be used to determine local density perturbations. In this work we evaluate, theoretically and experimentally, a system of inspection of materials that uses the Compton backscattering technique. The theoretical evaluation was performed through Monte Carlo simulation, in which geometric and equipment parameters were studied in order to optimize the net counts, contrast and spatial resolution. In the experimental part of this work, acrylic, plaster and concrete samples with defects and inclusions were irradiated with gamma rays from a $\text{Ø}2$ mm collimated ^{241}Am (100 mCi) source. The inelastically scattered photons were collected at an angle of 135° by a high-resolution CdTe semiconductor detector with a $\text{Ø}7$ mm \times 30 mm collimation. Scanning was achieved by lateral movement of the sample blocks in the direction perpendicular to the incident beam in steps of 1 mm and 2 mm. The evaluated device was successful in identifying surface inclusions in acrylic, plaster and concrete, and we can state that the same principle can be used for a wider range of materials. The resolution for void positioning was of 3~5 mm for the acrylic and 6.5~8.5 mm for plaster and concrete and this resolution is strongly dependent on the collimation. The tests on plaster and concrete samples with steel rod inclusions suggest that, for a low-energy and low-activity gamma source, beam attenuation has greater effects on the scattered intensity than does increased material density. It was found that aggregates that are commonly added to concrete, such as crushed rocks, can hide inclusions under investigation in real structures, if low energy sources are used. Density contrast analysis can be used to determination of the size and depth of steel rods. Furthermore, the experimental results agree with theoretical data obtained through Monte Carlo simulation.

Key words: Compton scattering. Nondestructive test. Density contrast. Voids. Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquema do processo de corrosão da armadura que leva ao lascamento do concreto.....	15
Figura 2	– Exemplos de pilar e viga com armadura em estágio avançado de corrosão resultando no lascamento do concreto.....	15
Figura 3	– Equipamento para realização de ensaio de ultrassom	19
Figura 4	– Equipamento para a realização do ensaio de frequência ressonante em concreto modelo E-Meter MK II.....	20
Figura 5	– Pacômetro para realização de ensaios por correntes <i>eddy</i>	21
Figura 6	– Cinemática do espalhamento Compton ($h\nu' < h\nu$)	29
Figura 7	– Regiões de domínio das três principais interações da radiação eletromagnética com a matéria.....	30
Figura 8	– Seção de choque diferencial do espalhamento Compton, por unidade de ângulo sólido, em função do ângulo de espalhamento θ_γ e para energias incidentes entre 10 keV e 10 MeV.....	33
Figura 9	– Diagrama de um experimento de retroespalhamento Compton típico.	36
Figura 10	– Parâmetros que influenciam na acurácia do sistema de espalhamento Compton e suas inter-relações.....	38
Figura 11	– Janela principal do FLAIR.....	43
Figura 12	– Janela da base de dados de materiais do FLAIR	45
Figura 13	– Vista superior do bloco de concreto (15 x 7,5 x 10 cm) usado na simulação contendo um furo de $\varnothing 10$ mm posicionado a 1,5 cm da superfície.....	46
Figura 14	– Desenho esquemático das duas geometrias testadas na simulação.....	50
Figura 15	– Diagrama da fluência de fótons na geometria 01 (acima) e geometria 02 (abaixo).	51
Figura 16	– Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados contados pelo detector nas duas geometrias testadas.....	52

Figura 17 – Sequência mostrando a fluência de fótons em três posições do feixe incidente em relação à barra de aço localizada no interior do bloco de concreto. Energia: 59,54 keV	54
Figura 18 – Espectros de contagens <i>versus</i> energia obtidos na simulação para um feixe incidente de 59,54 keV e ângulo de espalhamento de 135°	56
Figura 19 – Contagem líquida obtida na simulação dos fótons retroespalhados em dois ângulos - 135° e 150° - em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de Ø10 mm	57
Figura 20 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois ângulos de espalhamento: 135° e 150°	58
Figura 21 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhado em dois ângulos - 135° e 150° - em função da posição do bloco de concreto contendo um orifício de Ø10 mm..	59
Figura 22 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois ângulos de espalhamento: 135° e 150°.	60
Figura 23 – Simulação da contagem líquida em função dos quatro tamanhos de colimadores testados. Incidência em quatro alvos diferentes e em dois ângulos de espalhamento: 135° e 150°	63
Figura 24 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para dois colimadores: Ø7 x 30 mm e Ø5 x 15 mm, em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de Ø10 mm	65
Figura 25 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois colimadores: Ø7 x 30 mm e Ø5 x 15 mm	66
Figura 26 – Contagem líquida simulada em função dos quatro tamanhos de colimadores: Ø5 x 15 mm, Ø3 x 15 mm e Ø1,5 x 15 mm feitos em alumínio e Ø7 x 30 mm feito em latão	67
Figura 27 – Simulação de espalhamento com o colimador de 15 mm feito de alumínio	68

Figura 28 – Contagem líquida simulada dos fótons retroespalhados em 135 em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de Ø10 mm, comparando dois colimadores de Ø5 x 15 mm feitos de latão e alumínio.....	69
Figura 29 – Corte esquemático dos dois colimadores cônicos usados na simulação.....	70
Figura 30 – Geometria utilizada na simulação com colimadores cônicos para detecção de uma barra de aço com Ø10 mm posicionada a 1,5 cm da superfície de um bloco de concreto.....	70
Figura 31 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois colimadores cônicos: Ø5 mm / Ø9 mm e Ø3 mm / Ø9 mm.	71
Figura 32 – Simulação que compara os valores de contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para dois colimadores cilíndricos (Ø5 X 15 mm e Ø7 mm X 30 mm) e um cônico (Ø5 mm / Ø9 mm).....	72
Figura 33 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para duas energias: 59,54 keV e 122,1 keV, em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de Ø10 mm.....	73
Figura 34 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para as duas energias incidentes: 59,54 keV e 122,1 keV.....	74
Figura 35 – Simulação do contraste em função da profundidade da inclusão de aço no interior do bloco de concreto para quatro energias: 59,54 keV (²⁴¹ Am), 122,1 keV (⁵⁷ Co), 356 keV (¹³³ Ba) e 662 keV (¹³⁷ Cs).....	75
Figura 36 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para um bloco de acrílico contendo uma inclusão de vários materiais.....	77
Figura 37 – Espectro de energia da fonte de ²⁴¹ Am. A região de interesse (ROI) selecionada (em azul) corresponde ao pico de 59,54 keV.....	81

Figura 38 – Espectro de energia (contagens x energia) da fonte de ⁵⁷ Co com o pico principal de 122,1 keV selecionado em azul.....	82
Figura 39 – Diagrama do detector de CdTe mostrando a janela protetora de berílio, o cristal e o sistema de resfriamento.....	83
Figura 40 – Visão do detector de CdTe modelo X-123 da Amptek Inc. usado neste trabalho	84
Figura 41 – Diagrama da arquitetura e das conexões necessárias para alimentação e aquisição de dados do detector de CdTe X-123.....	84
Figura 42 – Resolução do detector de CdTe X-123 para as energias principais das fontes de ²⁴¹ Am e ⁵⁷ Co.....	85
Figura 43 – Gráfico log-log da eficiência do detector de CdTe X-123 entre 1 keV e 1 MeV.....	85
Figura 44 – Bloco de acrílico com furos. Bloco de gesso com furos. Bloco de gesso com barras de aço de Ø8 mm e Ø10 mm. Bloco de gesso com barras de aço de Ø5 mm em diferentes profundidades.....	87
Figura 45 – Amostras de concreto. Bloco com furos de Ø8 mm. Bloco com britas. Bloco com barras de aço de Ø8 mm em diferentes profundidades. Bloco com barra de aço e brita.....	88
Figura 46 – Deslocamento do pico de retroespalhamento Compton devido a fótons espalhados fora do volume de inspeção e que atingem o detector sem colimação.....	89
Figura 47 – Colimador de Ø7 x 30 mm feito de latão (esquerda); colimadores com Ø5 x 15 mm, Ø3 x 15 mm e Ø1,5 x 15 mm feitos de alumínio.....	90
Figura 48 – Arranjo experimental do sistema de retroespalhamento Compton. 1 – Fonte radioativa. 2 - Detector. 3 - Colimador. 4 - Amostra. 5 - Suporte da amostra.....	91
Figura 49 – Telas do aplicativo ADMCA contendo espectros típicos de intensidade <i>versus</i> energia para os alvos de gesso, concreto, acrílico e alumínio.....	92

Figura 50 – Contagem líquida obtida com os quatro colimadores testados ($\varnothing 7 \times 30$ mm, $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm) em dois ângulos de espalhamento (135° e 150°).	94
Figura 51 – Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm	96
Figura 52 – Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm (esquerda). Somente contagem líquida (direita).	97
Figura 53 – Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm (esquerda). Somente contagem líquida (direita).	97
Figura 54 – Contagem líquida em função da posição do bloco de acrílico contendo defeitos de $\varnothing 10$ mm, $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 3$ mm.	98
Figura 55 – Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo defeitos de $\varnothing 12,3$ mm, $\varnothing 8,5$ mm, $\varnothing 6,5$ mm e $\varnothing 4$ mm	99
Figura 56 – Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm, posicionado à 14 mm da superfície da amostra.	100
Figura 57 – Ajuste gaussiano das curvas de contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm	101
Figura 58 – Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 8$ mm, posicionado 14 mm da superfície da amostra	102
Figura 59 – Contraste em função da profundidade para uma amostra de gesso contendo inclusões de aço com $\varnothing 5$ mm em quatro diferentes profundidades: 8, 12, 18 e 24 mm (esquerda). Desenho esquemático da amostra (direita).	103
Figura 60 – Contagem líquida em função da posição das duas amostras de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm e o furo de $\varnothing 12,3$ mm, ambos posicionados à 14 mm da superfície da amostra	104

Figura 61 – Contagem líquida em função da posição amostra de gesso contendo vergalhão de aço com Ø10 mm em dois ângulos de espalhamento: 135° e 150°	105
Figura 62 – Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo defeitos de Ø8 mm, posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície	106
Figura 63 – Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo inclusões de aço de Ø8 mm, posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície.....	107
Figura 64 – Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo britas de aproximadamente Ø15 mm, posicionadas a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície.....	109
Figura 65 – Gráfico do contraste em função da profundidade para aço, defeito e brita com os seus respectivos ajustes lineares	110
Figura 66 – Comparação entre os valores do coeficiente angular dos ajustes lineares para as curvas de contraste versus profundidade das inclusões de aço, defeito e brita	112
Figura 67 – Espectros de espalhamento (contagens x energia) feitos com a fonte de ⁵⁷ Co. Feixe incidindo somente na região com concreto (acima) e feixe incidindo sobre a inclusão de aço (abaixo).....	114
Figura 68 – Aparelho portátil de fluorescência de raios-X fabricado pela empresa Bruker AXS	118
Figura 69 – Sensor eletrônico de distância à laser, modelo SPR-04 fabricado pela empresa DynaVision	119
Figura 70 – Exemplos de guias lineares, modelos Shaft Linear Guide System e AccuMini Linear Guide fabricados pela empresa Thomson.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Principais interações de raios-X e gama abaixo de 1 MeV.....	32
Tabela 2	– Composição do concreto comum utilizado na simulação	46
Tabela 3	– Características do feixe incidente de raios gama usado na simulação.....	47
Tabela 4	– Dimensões dos quatro colimadores testados na simulação deste trabalho.....	62
Tabela 5	– Densidades e coeficiente de atenuação linear dos materiais simulados como alvo para a energia de 59,54 keV	64
Tabela 6	– Valores de FM e avaliação da resolução espacial entre parâmetros de cada teste simulado.....	79
Tabela 7	– Resultados do ajuste linear e análise de variância das curvas de contraste <i>versus</i> profundidade obtidas para inclusões de aço, defeito e brita.....	111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 TESTES NÃO DESTRUTIVOS	18
2.1 MÉTODO DO ULTRASSOM	18
2.2 MÉTODO DA FREQUÊNCIA RESSONANTE	19
2.3 MÉTODO DA EMISSÃO ACÚSTICA.....	20
2.4 CORRENTES <i>EDDY</i>	21
2.5 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	22
2.6 RADIOGRAFIA	22
2.7 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	22
2.8 TÉCNICA PROPOSTA NESTE TRABALHO	23
3 ESPALHAMENTO COMPTON DE RAIOS GAMA APLICADO AO CONCRETO	25
4 O ESPALHAMENTO COMPTON	28
4.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
4.2 SEÇÃO DE CHOQUE COMPTON E DISTRIBUIÇÃO ANGULAR.....	32
4.3 O MÉTODO DE INSPEÇÃO	36
5 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	39
5.1 O MÉTODO DE MONTE CARLO NO TRANSPORTE DE RADIAÇÃO.....	39
5.2 O CÓDIGO FLUKA	42
5.3 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO	45
5.4 VARIÁVEIS DEPENDENTES	47
5.4.1 Contagem Líquida	48
5.4.2 Contraste.....	48
5.4.3 Resolução Espacial.....	49
5.5 TESTE DE GEOMETRIA.....	50
5.6 TESTE DE ÂNGULO DE ESPALHAMENTO	53
5.7 TESTE DE COLIMAÇÃO.....	61
5.8 TESTE DE ENERGIA	73

5.9	TESTE DE DIFERENCIAÇÃO DE MATERIAIS	76
5.10	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	78
6	MATERIAIS E MÉTODOS	80
6.1	FONTES DE GAMA	80
6.2	DETECTOR	82
6.3	AMOSTRAS.....	86
6.4	COLIMADORES.....	88
6.5	O MÉTODO EXPERIMENTAL..	90
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	94
7.1	COLIMADORES.....	94
7.2	DETECÇÃO DE DEFEITOS	95
7.3	DETECÇÃO DE INCLUSÕES	100
7.4	ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE CONCRETO	106
7.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	114
8	DISCUSSÃO CONCEITUAL SOBRE O DESIGN DO APARATO EXPERIMENTAL.....	117
8.1	CRITÉRIOS DE DESIGN	117
8.2	COMPONENTES DO APARELHO DE INSPEÇÃO.....	118
9	CONCLUSÕES	121
10	PESPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS	123
	REFERÊNCIAS.....	124
	APÊNDICES	133
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE MONTE CARLO	134
	APÊNDICE B – VALOR MÍNIMO PARA O CONTRASTE	144
	APÊNDICE C – CÁLCULO DA ESPESSURA DA BLINDAGEM.....	146
	APÊNDICE D – Produção Bibliográfica.....	147

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado são os elementos de engenharia mais utilizados na construção civil. O concreto armado é uma combinação de dois materiais: o concreto e a armadura. O concreto comum é confeccionado com uma mistura de cimento, areia, pedra britada e água. A armadura é uma malha de barras de aço imersa na pasta de concreto para fornecer resistência à esforços de tração e torção.

Embora a adição da armadura ao concreto forneça uma grande resistência à estrutura, a mesma introduz o problema inevitável da corrosão. O concreto é permeável e, portanto, a armadura vai eventualmente entrar em contato com o meio ambiente na qual a estrutura se encontra. Este problema pode ter sua ocorrência acelerada se o concreto for muito poroso ou se fissuras, trincas e rachaduras estiverem presentes na estrutura. Essa condição permite a passagem de oxigênio, água, cloretos, CO_2 e gases poluentes, como SO_2 e SO_3 , que irão deteriorar o próprio concreto e quando atingirem a interface concreto - aço, proporcionarão as condições favoráveis ao processo de corrosão eletroquímica das armaduras (TEXSA, 2010).

Os produtos da corrosão são uma gama variada de óxidos e hidróxidos de ferro que passam a ocupar no interior do concreto, volumes de 3 a 10 vezes superiores ao volume original da armadura, podendo causar tensões internas maiores que 15 MPa (CASCUDO, 1997). Isso produz esforços no concreto na direção radial das barras os quais geram tensões de tração que levam ao aparecimento de fissuras. Se o processo não for detido, as fissuras evoluem devido ao aumento da corrosão, culminando no lascamento da peça de concreto como mostra a figura 1. Com a armadura exposta ao meio ambiente o processo de corrosão se intensifica. O aço corroído perde sua resistência e ductilidade, tornando-se quebradiço. No caso de elementos estruturais submetidos a flexocompressão, com pilares por exemplo (figura 2), essa condição resulta na deformação ou ruptura das barras longitudinais. Se não houver uma intervenção nesse processo, sua evolução fatalmente implicará no colapso da estrutura de concreto armado.

Figura 1 – Esquema do processo de corrosão da armadura que leva ao lascamento do concreto. A – aço, C – produtos da corrosão, P – tensões radiais, F – Fissuras, L – lasca de concreto.

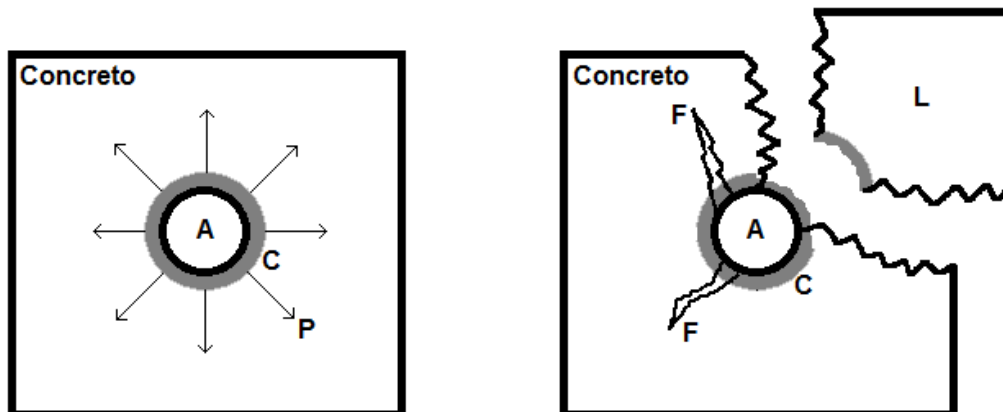


Figura 2 – Exemplos de pilar e viga com armadura em estágio avançado de corrosão resultando no lascamento do concreto (extraído de LIMA, 2010).



Foi justamente o que aconteceu quando, em fevereiro de 2006, a queda da marquise de um auditório na Universidade Estadual de Londrina, provocou a morte de duas pessoas e ferimentos em várias outras. A investigação

que apurou as causas do acidente apontou que problemas no projeto e falhas na execução causaram o colapso da estrutura. São erros que favorecem o aparecimento de defeitos e aceleram o processo de degradação nas marquises de concreto armado, mas que podem ser evitados com alguns cuidados importantes em todas as fases da obra, incluindo a manutenção preventiva após a obra pronta. Este acidente motivou a criação da Lei Municipal nº 10.229, de maio de 2007, que instituiu a obrigatoriedade de apresentação de parecer técnico com avaliação das condições de uso e manutenção das marquises e sacadas das edificações do município de Londrina (LONDRINA, 2007). Ocorrências como esta em outras partes do país levaram outros municípios a elaborar diretrizes semelhantes. A prefeitura do Rio de Janeiro tem um programa de vistorias nas marquises da cidade e aplica multas e notificações quando necessário. Em Porto Alegre, a legislação municipal exige que um relatório técnico, assinado por profissional registrado no CREA (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia), seja apresentado a cada três anos na Secretaria Municipal de Obras e Viação. Já na cidade de Santos, em São Paulo, desde 2002 uma lei municipal determina que periodicamente os donos de imóveis cujos elementos estejam sobre logradouro público apresentem à prefeitura uma ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) emitida por um profissional, engenheiro ou arquiteto, responsável pela vistoria (ALVES, 2007). Em outros municípios como Salvador na Bahia e Caxias do Sul no Rio Grande do Sul tramitam na câmara de vereadores projetos de lei que tratam da manutenção e vistoria de estruturas em balanço (LOPES, 2010). Mesmo com essas boas iniciativas notamos que no Brasil ainda são poucas as cidades que exigem a manutenção das marquises e que realizam inspeções periódicas. Em São Paulo, por exemplo, que é a maior cidade do país, a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE, enviou à Câmara Municipal em junho de 2007 uma minuta de projeto de lei que pretendia tornar obrigatória a vistoria técnica estrutural para a avaliação das condições de uso e manutenção de marquises e sacadas construídas em todos os edifícios da cidade, ainda que a data do habite-se fosse igual ou inferior a cinco anos (ABECE, 2011). Em julho de 2008 o projeto foi aprovado tornando-se a lei Lei Municipal nº 14.806, porém, infelizmente, todos os artigos referentes à inspeção das marquises foram vetados, sendo que os artigos finais dispõem agora somente sobre propaganda em locais públicos (SÃO PAULO, 2008).

À medida que mais cidades elaborem legislação sobre o assunto e a sociedade em geral se conscientize da importância da fiscalização e manutenção de estruturas de concreto armado, haverá uma demanda crescente no país por meios, técnicas e equipamentos que possam ser utilizados para serviços de fiscalização e manutenção dessas estruturas que efetivamente realizem verificações *in situ* das propriedades do concreto para certificação de sua qualidade e para a avaliação das condições existentes. É preferível que estes métodos de inspeção sejam não destrutíveis para que não haja dano à estrutura e suas funções e que permitam refazer os testes nos mesmo locais examinados anteriormente com o objetivo de avaliar mudanças de propriedades ao longo do tempo de vida da estrutura.

Comparado com o desenvolvimento dos testes não destrutivos (Non Destructive Testing – NDT) para outros materiais, o desenvolvimento deste tipo de metodologia de inspeção teve um progresso mais lento para o concreto, visto que este material possui propriedades que o tornam inerentemente mais complexo. O concreto é altamente heterogêneo em escala macroscópica, não conduz eletricidade, pode ser feito com diferentes proporções de seus constituintes dependendo da finalidade e, no caso do concreto armado, é um material composto que geralmente se encontra em estruturas de espessura elevada. Apesar dessas dificuldades a partir dos anos 80, impulsionados pela urgente necessidade de inspeção e manutenção das estruturas de concreto armado existentes que atingiam idades críticas, alguns testes não destrutivos foram criados ou adaptados para esse tipo de material. Falaremos mais sobre eles na seção a seguir.

2 TESTES NÃO DESTRUTIVOS

Como já brevemente comentado os testes não destrutivos são aqueles que não causam nenhum dano ao material ensaiado e não alteram suas características físicas.

De maneira geral, existem duas categorias de ensaios não destrutivos para aplicação em estruturas de concreto. A primeira consiste em métodos utilizados para estimar a resistência do material, tais como o ensaio de dureza superficial (esclerometria), resistência à penetração e método da maturidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A segunda categoria inclui métodos que medem outras características e defeitos internos do concreto além das condições da armadura.

Nesta seção avaliaremos brevemente as principais metodologias da segunda categoria. Uma revisão mais detalhada desses ensaios pode ser encontrada facilmente em outras referências (IAEA, 2002; MALHOTRA; CARINO, 2004; MAIERHOFER; REINHARDT; DOBMANN, 2010).

2.1 MÉTODO DO ULTRASSOM

O método do ultrassom é baseado no conceito de que a velocidade de um pulso de ondas longitudinais através de um material depende de suas propriedades elásticas e densidade. Para se realizar o ensaio usa-se um gerador de onda e um transmissor que introduz o pulso de onda no concreto. Do outro lado da estrutura um receptor é posicionado para detectar a chegada do pulso e medir o tempo de trânsito através do material. Defeitos ou inclusões no caminho do pulso alteram sua velocidade, dado esse registrado pelo aparelho como a presença de uma anomalia. Já existem equipamentos portáteis disponíveis para a execução do ensaio de ultrassom em estruturas de concreto (figura 3). No Brasil, o procedimento de ensaio pelo método do ultrassom é estabelecido na NBR 8802:1994 (ABNT, 1994).

Figura 3 – Equipamento para realização de ensaio de ultrassom (extraído de PROCEQ, 2011)



Apesar de ser largamente utilizado o teste por ultrassom apresenta uma série de limitações. A resolução da técnica para detecção de aço é pobre e a localização de defeitos é influenciada por diversos fatores relacionados com a composição, cura do concreto, geometria da peça ensaiada e a própria presença de armadura, necessitando de calibração prévia (MALHOTRA; CARINO, 2004). A necessidade de acesso aos dois lados da estrutura (no caso do ensaio por transmissão) e a alta atenuação acústica apresentada pelo concreto, são complicadores adicionais, limitando a técnica à estruturas de pouca espessura.

2.2 MÉTODO DA FREQUÊNCIA RESSONANTE

Neste método um vibrador é acoplado ao concreto variando-se sua frequência de oscilação num intervalo de 10Hz a 10.000Hz, com o objetivo de encontrar a frequência fundamental de ressonância do material ensaiado. Como este valor está relacionado principalmente com o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade do material, é possível avaliar a integridade de uma estrutura a partir de correlações matemáticas entre eles (MALHOTRA; CARINO, 2004). Embora o equipamento básico e o procedimento de ensaio associados ao método de frequência de ressonância tenham sido normatizados em diversos países e há equipamento de ensaio disponível comercialmente (figura 4), a utilização desse

método também é limitada. Diversas tentativas têm sido feitas para se estabelecer relações empíricas entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência do concreto. Algumas relações obtidas parecem se manter para alguns tipos particulares de concreto, mas uma relação generalizada ainda não foi estabelecida entre essas propriedades (EVANGELISTA, 2002). Além disso, o ensaio é mais adequado para corpos de prova do que para grandes estruturas.

Figura 4 – Equipamento para a realização do ensaio de frequência ressonante em concreto modelo E-Meter MK II (extraído de QUALITEST, 2011).



2.3 MÉTODO DA EMISSÃO ACÚSTICA

Esta é uma técnica passiva de análise de pulsos sônicos emitidos por um defeito no momento de sua ocorrência ou propagação (EVANGELISTA, 2002). No concreto, as emissões acústicas devem-se principalmente à fissuração do concreto ou à perda de aderência entre o concreto e a armadura. As ondas geradas se propagam através do material e são detectadas por transdutores piezoelétricos posicionados na superfície do elemento ensaiado. Visto que as ondas elásticas se propagam no meio, não é necessário focar uma localização específica para detectar a fonte do evento, assim a técnica pode ser utilizada para monitorar grandes áreas de uma estrutura simultaneamente. Este método, portanto, somente

consegue detectar trincas ou fraturas e com limitada resolução espacial. Além disso, o equipamento tem alto custo e demanda um operador com larga experiência.

2.4 CORRENTES *EDDY*

Neste método é usada uma bobina para induzir correntes elétricas dentro da estrutura ensaiada, se valendo das propriedades de condutividade e/ou permeabilidade magnética que o material apresenta. Sendo que as correntes serão afetadas somente por materiais condutores, esta metodologia é exclusiva para a detecção da armadura e suas características como diâmetro, cobrimento e orientação, não sendo adequada para a localização de trincas e fissuras. Já existe um equipamento portátil disponível para a execução do ensaio por correntes *eddy* chamado pacômetro (figura 5). Este equipamento apresenta bons resultados quando o concreto é pouco armado. No caso de elementos muito armados as barras de aço muito próximas afetam a confiabilidade da leitura (EVANGELISTA, 2002).

Figura 5 – Pacômetro para realização de ensaios por correntes *eddy* (extraído de KOLECTRIC, 2011).



2.5 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Esta técnica se baseia no princípio de que anomalias abaixo da superfície dos materiais afetam o fluxo de calor através dos mesmos. Por exemplo, uma cavidade de ar no interior do concreto apresenta uma condutividade térmica menor que o concreto circundante. Um detector de radiação infravermelha na superfície desta seção da estrutura contendo a cavidade vai detectar uma temperatura levemente diferente de outra região que não apresenta a anomalia. A técnica é mais adequada para grandes defeitos e delaminações no interior das estruturas. No entanto, ela é sensível a condições ambientais e ao teor de umidade do concreto e, além disso, não fornece informações sobre a profundidade da falha (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.6 RADIOGRAFIA

Nesta metodologia incide-se uma radiação penetrante, como os raios-X ou gama em um dos lados do material a ser analisado. Do lado oposto é colocado um filme sensível à radiação ou um detector que vai registrar os fótons que deixam o corpo. Descontinuidades presentes no interior da estrutura tais como vazios ou inclusões irão atenuar a radiação em diferentes níveis, os quais são mostrados como imagens sombreadas na imagem radiográfica.

Além de exigir acesso aos dois lados da estrutura quanto maior a espessura do elemento ensaiado mais elevada deve que ser a energia da radiação incidente, para atingir maior penetração. Energias muito elevadas, no entanto, diminuem o grau de atenuação, ocasionando baixo contraste entre os diferentes materiais e fazendo com que a técnica perca sensibilidade.

2.7 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Uma técnica originalmente desenvolvida na área médica para produzir imagens de seções transversais do corpo humano, atualmente sua aplicação na área de testes não destrutivos tem alcançado importante relevância.

Na tomografia industrial o ensaio, em geral, consiste em colocar o objeto a ser analisado entre uma fonte de raios X e um detector sobre uma mesa

giratória. Para a formação das seções tomográficas (tomografias 2D) é necessário realizar a aquisição de projeções, rotacionando o objeto a um dado ângulo. Essas projeções são posteriormente combinadas por meio de um algoritmo para a construção da imagem tridimensional do objeto. O fato da possibilidade de visualização interna de amostras motivou o estudo do desempenho da tomografia computadorizada em materiais de maior atenuação como o concreto, verificando a possibilidade de detecção e visualização simultânea de vazios, armadura e brita (SALEH; LIVINGSTON, 2004; GHESHLAGHI et al., 2005; DAIGLE et al. 2005; MENDES et al., 2009; MENDES, 2010).

Apesar dos bons resultados encontrados a técnica apresenta custo elevado e, devido à sua própria metodologia, ela exige a retirada de testemunhos da estrutura para que sejam examinados no laboratório.

2.8 TÉCNICA PROPOSTA NESTE TRABALHO

Vimos que os ensaios não destrutivos para inspeção e avaliação de estruturas de concreto, apresentam muitas limitações envolvendo sua aplicação e abrangência de características que podem ser analisadas simultaneamente.

O método de ultrassom é talvez o teste mais utilizado para se localizar falhas e descontinuidades dentro do concreto, porém possui baixa resolução espacial quando se trata da armadura. Para este caso é quase obrigatória a utilização conjunta do pacômetro, que utiliza as correntes *eddy* como princípio físico. A análise, no entanto, fica restrita a estruturas com pouca armadura localizadas em baixa profundidade. Além disso, a necessidade de utilização de duas técnicas complementares para uma nem sempre acurada caracterização da estrutura, eleva os custos e o tempo da análise à patamares indesejáveis.

Métodos convencionais que empregam radiação ionizante como a radiografia, são quase impossíveis de se aplicar em campo, visto as grandes espessuras encontradas nas estruturas de concreto armado. Contornar essa limitação usando fontes de radiação com alta energia e intensidade traz outros problemas para as aplicações em campo relacionados à proteção radiológica. Os outros métodos apresentados são limitados, caros ou ainda não possuem um desenvolvimento satisfatório para uma aplicação generalizada.

Neste trabalho propomos a utilização de uma técnica de caracterização não destrutiva que utiliza a metodologia de retroespalhamento da radiação gama. O princípio físico é baseado na interação Compton dos fótons incidentes com os elétrons que compõem a matéria. A intensidade dos fótons espalhados está relacionada com a densidade eletrônica do material. Uma abordagem mais completa do fenômeno será feita numa seção posterior.

A técnica proposta deverá distinguir simultaneamente diferentes tipos de inclusões e defeitos não somente no interior do concreto bem como em outros materiais. Esta versatilidade permitirá que a metodologia seja incorporada no rol das técnicas de caracterização disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UEL, sendo utilizada em materiais diversos e com propósitos mais abrangentes. Além disso, deve apresentar resultados de fácil interpretação e ser aplicada em somente um dos lados da amostra sendo desnecessário o acesso aos dois lados da mesma. O equipamento utilizado deverá ser leve e compacto visando a portabilidade sem negligenciar a segurança do operador e do meio ambiente com relação às normas de proteção radiológica.

3 ESPALHAMENTO COMPTON DE RAIOS GAMA APLICADO AO CONCRETO

Nesta seção apresentaremos uma revisão bibliográfica dos trabalhos que utilizaram o espalhamento Compton para inspecionar o concreto. Uma revisão mais abrangente das aplicações desta metodologia em diversos campos de estudo pode ser encontrada no trabalho de BOLDO e APPOLONI (2010).

Um dos principais fatores que influenciam a resistência do concreto é a fração de ar que fica presa nos poros que se formam após o endurecimento. Isso também afeta sua durabilidade, visto que a maior parte dos processos de degradação é controlada pela taxa de penetração da umidade que eventualmente atinge a armadura (BEER et al., 2005). As propriedades de transporte de fluidos no interior do concreto são influenciadas pela quantidade e grau de interconectividade dos poros presentes na estrutura. Portanto conhecer informações sobre a densidade do concreto por meio de uma técnica não destrutiva é de grande interesse. O espalhamento de raios gama é uma das técnicas adequadas para este fim. Algumas agências governamentais provêm normas para testar o concreto por espalhamento Compton (ASTM, 2001). Neste tipo de aplicação a técnica mede apenas a densidade média da região do concreto inspecionada pelo feixe de raios gama (ADIL, 1977). Outras aplicações estão sendo investigadas e têm sido propostas com relativo sucesso como veremos nos trabalhos citados a seguir.

A primeira aplicação do espalhamento Compton de raios gama na inspeção de concreto armado foi realizada por GAUTAN e colaboradores (1983). Utilizando uma fonte de ^{192}Ir e um detector de NaI, ambos colimados, eles localizaram barras de aço com diâmetros entre 0,95 a 2,5 cm colocadas num bloco de concreto a 3,7 cm de profundidade. Outro experimento neste mesmo trabalho foi realizado para detectar vazios com 1,5 cm de diâmetro de forma cilíndrica produzidos artificialmente no concreto e também localizados a 3,7 cm de profundidade. Em ambos os experimentos, realizados com uma geometria de espalhamento de 90° , o contraste de densidade das interfaces aço/concreto e ar/concreto foi detectado com sucesso nos espectros de contagens versus posição do volume inspecionado, mostrando bom acordo com os resultados de simulação. Empregando uma fonte de ^{60}Co , Hill e Peak (1987) também obtiveram sucesso em

medir variações de densidade relativa ao longo de um plano perpendicular à amostra, para discriminar entre vazios, falhas e inclusões.

Trabalho semelhante foi realizado por TUZI e SATO (1989, 1990). Neste estudo foram utilizadas fontes de raios gama de ^{57}Co e ^{133}Ba que incidiam perpendicularmente à amostra sendo que o feixe retroespalhado era detectado por um cintilador de NaI localizado a 135° em relação a direção do feixe incidente. Dos espectros de contagens versus posição da amostra foi possível determinar a posição, espaçamento, tamanho e profundidade de três barras de ferro localizados a 3 cm a partir da superfície de um bloco de concreto. Foi detectada uma influência da qualidade do concreto nos resultados. Concretos menos homogêneos e mais porosos induziram maior variabilidade no valor das contagens. Posteriormente os mesmos autores realizaram comparações entre os resultados experimentais e teóricos obtidos com simulação de Monte Carlo obtendo boa concordância entre os mesmos (TUZI; SATO, 1992, 1993).

HUSSEIN e WHYNOT (1989) também estudaram a aplicabilidade do retroespalhamento Compton para localização espacial de barras de aço e vazios em concreto. Neste trabalho, uma fonte colimada de ^{137}Cs (300 mCi) foi utilizada incidindo seu feixe a um ângulo fixo de 45° sobre a amostra. Diferentes ângulos de espalhamento foram testados com o objetivo de otimizar a resposta do detector de NaI. Verificou-se que o ângulo de espalhamento ótimo, depende da profundidade do volume inspecionado a partir da superfície do bloco de concreto. À medida que a profundidade cresce o ângulo de espalhamento deve ser maior para encurtar o caminho do feixe espalhado dentro da amostra reduzindo assim sua atenuação. A resolução espacial para a detecção do aço e espaços vazios foi estimada em 5 e 10 mm respectivamente. Mais recentemente a mesma resolução espacial foi reportada por SHIVARAMU (2006) empregando um feixe de igual energia (662 keV) da fonte de ^{137}Cs numa geometria de 90° , porém agora utilizando um detector plano de HPGe. Com uma precisão estatística melhor de 0,1%, um contraste de densidade entre materiais de 0,5% pode ser detectado. SHIVARAMU (2002) também já utilizou a técnica de espalhamento gama para a determinação de teor de umidade em concreto feito com pedra calcária (limestone). Apesar do ambiente alcalino proporcionado pelo concreto proteger as barras de reforço contra a corrosão (GHORBANPOOR; BENISH, 2003), uma porosidade elevada pode permitir que ar e umidade entrem em contato com o metal provocando o defeito. O aumento da área

corroída introduz pontos de pressão no concreto que são uma das causas de rachaduras na estrutura. Neste sentido investigou-se a presença de corrosão em barras de aço inoxidável (SEKINE et al., 1992) e de aço doce (mild steel) (SHIVARAMU, 2004) ocultas em concreto e argamassa, através da diferença entre a intensidade espalhada proveniente do metal com e sem corrosão. Verificou-se que esta diferença decresce e torna-se irregular em função de dois fatores: 1) o tipo de matriz e sua espessura e 2) a forma da inclusão de aço dentro da matriz.

Apesar dos resultados promissores aqui apresentados nenhum dos trabalhos citados empregou equipamentos que realmente pudessem ser utilizados na construção de um dispositivo portátil para inspeção *in situ* de concreto armado. Fontes de césio emitem fótons de energia elevada e, portanto, requerem blindagem considerável para serem usadas com segurança. Alguns detectores de NaI tem tamanho relativamente reduzido, mas ainda são grandes para serem usados num sistema de fácil manuseio e aplicabilidade. Além disso, esse tipo de detector possui baixa resolução em energia. Detectores que possuem alta resolução em energia, como o HPGe, apresentam ótima performance mas exigem um sistema de resfriamento e blindagem que inviabilizam sua portabilidade. Os sistemas de colimação usados foram projetados visando unicamente a melhora da resolução espacial sem considerar a otimização de características como peso e tamanho. Por último, o concreto utilizado em todos os trabalhos está longe de se parecer com o concreto real utilizado na construção civil. Os simulantes empregados nos testes eram na sua totalidade argamassas sem nenhum agregado, nem mesmo o mais comum, a pedra britada, foi utilizada. Considerando todos esses fatores apresentados o objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade de um sistema portátil que utiliza o retroespalhamento Compton de raios gama para a medida *in situ* das características de inclusões e defeitos em estruturas de concreto armado avaliando sua adaptabilidade e desempenho em amostras que reflitam uma condição real de aplicação.

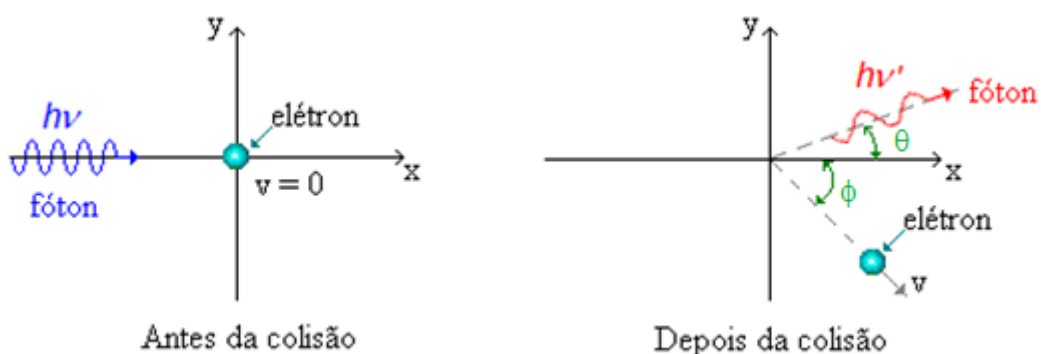
4 O ESPALHAMENTO COMPTON

4.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No intervalo de energia que abrange a maioria das transições nucleares, isto é, entre 0,01 até 10 MeV, um feixe incidente interage com a matéria através de três principais processos: efeito fotoelétrico, espalhamento (coerente ou incoerente), e produção de pares. No efeito fotoelétrico, o fóton incidente é totalmente absorvido por um elétron, o qual é ejetado do átomo com energia cinética correspondente a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron. Esta forma de interação é predominante no intervalo de baixas energias (até 200 keV). Acima do limiar de 1,022 MeV a produção de pares começa a ocorrer. Neste processo o fóton incidente interage com o intenso campo elétrico do núcleo atômico e se converte num par elétron-pósitron. À medida que a energia do fóton incidente cresce acima do limiar, a produção de pares torna-se o processo dominante. Interações via espalhamento coerente entre fóton incidente e elétron orbital, somente alteram a direção do fóton sem que este perca energia. Esta interação só possui probabilidade significativa para elementos pesados sendo atingidos por fótons de baixa energia e, além disso, os ângulos de espalhamento são pequenos.

Por fim, no intervalo de energia entre 200 keV até 5 MeV, dependendo do material alvo, o espalhamento incoerente, mais conhecido como espalhamento Compton, é o processo dominante. Nesta interação o fóton incidente choca-se inelasticamente com o elétron orbital, perdendo parte de sua energia e sendo espalhado dentro de um ângulo sólido $d\Omega$. Devido a energia do fóton incidente ser muito maior do que as energias típicas de ligação elétron-átomo, o elétron é considerado livre e em repouso. Com a energia cedida pelo fóton, o elétron é ejetado do átomo numa direção resultante da conservação de energia e momento relativísticos durante a colisão. A figura 6 mostra um esquema da cinemática do processo.

Figura 6 – Cinemática do espalhamento Compton ($h\nu' < h\nu$) (extraído de CURSOS, 2012).



A partir da hipótese da conservação de energia, podemos escrever a seguintes equações para a energia e momento relativísticos:

$$\text{Energia:} \quad h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2 \quad (1)$$

$$\text{Momento (x):} \quad \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi \quad (2)$$

$$\text{Momento (y):} \quad 0 = \frac{h}{\lambda'} \text{sen} \theta - mv \text{sen} \phi \quad (3)$$

onde, h é a constante de Planck; m_0 a massa de repouso do elétron; c a velocidade da luz e λ e λ' são os comprimentos de onda do fóton antes e após a colisão.

Eliminado os termos com θ das equações (2) e (3) e realizando algumas operações encontra-se a conhecida equação deduzida por Arthur H. Compton que relaciona a energia do fóton incidente e espalhado (COMPTON, 1923a; 1923b):

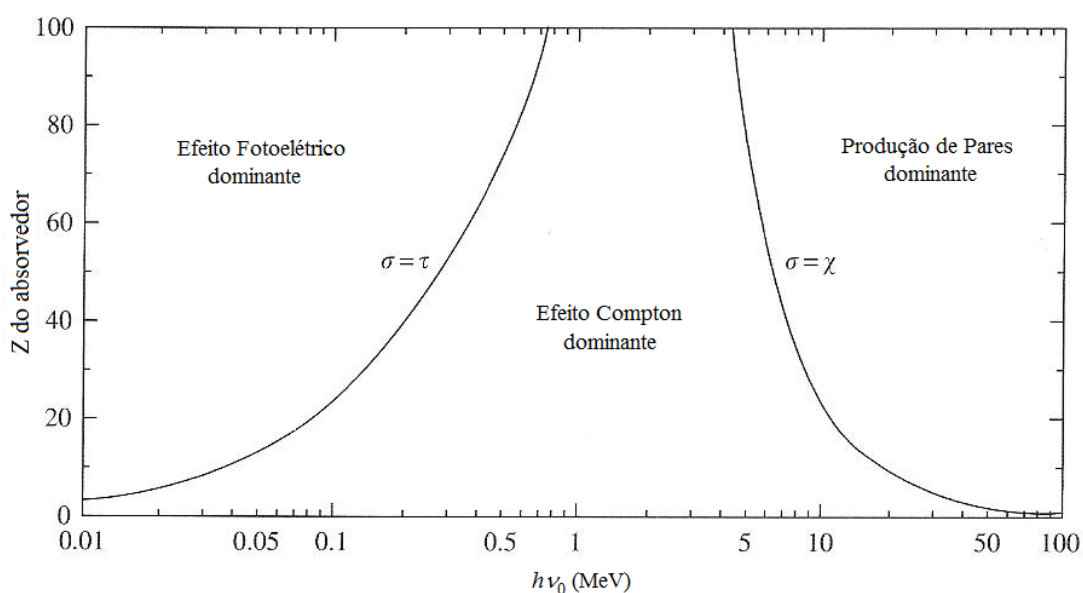
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c} (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

onde: $h\nu'$ é a energia do fóton defletido, θ é o ângulo entre a direção de incidência e a direção do espalhamento e m_0c^2 é a energia de repouso do elétron com valor

igual a 511 keV. O elétron de recuo, que é ejetado com energia $E = hv - hv'$ é rapidamente reabsorvido por processos de ionização e excitação.

A probabilidade de ocorrência dos três processos de interação da radiação com a matéria é influenciada pela energia do fóton incidente, mas também há uma dependência em relação ao número atômico do material alvo. A figura 7 mostra as regiões de dominância de cada interação em função de Z e da energia $h\nu$ da radiação incidente.

Figura 7 – Regiões de domínio das três principais interações da radiação eletromagnética com a matéria. As linhas indicam os valores de Z e $h\nu$ que são coincidentes para processos vizinhos (extraído de EVANS, 1972).



O intervalo de energia que abrange os fótons emitidos pela maioria dos radioisótopos mais comuns disponíveis comercialmente está entre 60 keV e 1,33 MeV. Observando a figura 7 podemos perceber que para este intervalo de energia o modo de interação predominante é o efeito Compton para materiais tão distintos como solo, metais, tecidos humanos, etc. considerando seus números atômicos efetivos. Isso mostra a relevância deste princípio físico para ser utilizado como técnica de caracterização em conjunto com uma fonte de raios gama.

As diferentes interações da radiação promovem uma atenuação do feixe incidente quando este atravessa a matéria. Esta atenuação é exponencial dada pela seguinte equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

onde I é a intensidade do feixe após atravessar uma distância x do material, I_0 é a intensidade do feixe incidente e μ é o coeficiente de atenuação linear. No coeficiente de atenuação linear estão presentes as contribuições dos três principais processos de interação. Sendo assim ele é dado por:

$$\mu = \mu_{ef} + \mu_C + \mu_{pp} \quad (6)$$

onde μ_{ef} , μ_C e μ_{pp} são os coeficientes de atenuação devido ao efeito fotoelétrico, ao efeito Compton e a produção de pares respectivamente. Valores tabelados de μ para vários elementos e compostos em função da energia podem ser encontrados na literatura (HUBBEL; SELTZER, 1995), calculados através de programas computacionais (GERWARD et. al., 2004) ou em sítios na internet (NIST, 2012).

Podemos escrever o coeficiente de atenuação em função das seções de choque de cada interação como segue:

$$\mu = N(\sigma_{ef} + \sigma_{pp}) + NZ\sigma_C \quad (7)$$

onde: N é o número de átomos do material por m^3 , Z é seu número atômico e σ_{ef} , σ_{pp} e σ_C são as seções de choque para o efeito fotoelétrico, a produção de pares e o efeito Compton respectivamente.

A tabela 1 mostra um resumo das principais interações da radiação com energia abaixo de 1 MeV, junto com a dependência da seção de choque para cada interação em função do número atômico Z do elemento.

Tabela 1 – Principais interações de raios-X e gama abaixo de 1 MeV.

Nome do processo	Dependência da seção de choque com o número atômico Z	Intervalo de energia de maior probabilidade de ocorrência	Tipo de interação
Efeito fotoelétrico	Z^4 (baixa energia) Z^5 (alta energia)	1 – 500 keV Decresce rapidamente quando a energia cresce	Absorção completa de energia durante a interação
Espalhamento Compton (inelástico)	Z	10 – 1000 keV Variação lenta com a energia	Perda parcial de energia dependendo da energia incidente e do ângulo de espalhamento
Espalhamento Rayleigh (elástico)	Z^2 (baixo ângulo) Z^3 (alto ângulo)	1 – 500 keV Cresce rapidamente quando a energia decresce	Não há perda de energia para elétrons ligados

4.2 SEÇÃO DE CHOQUE COMPTON E DISTRIBUIÇÃO ANGULAR

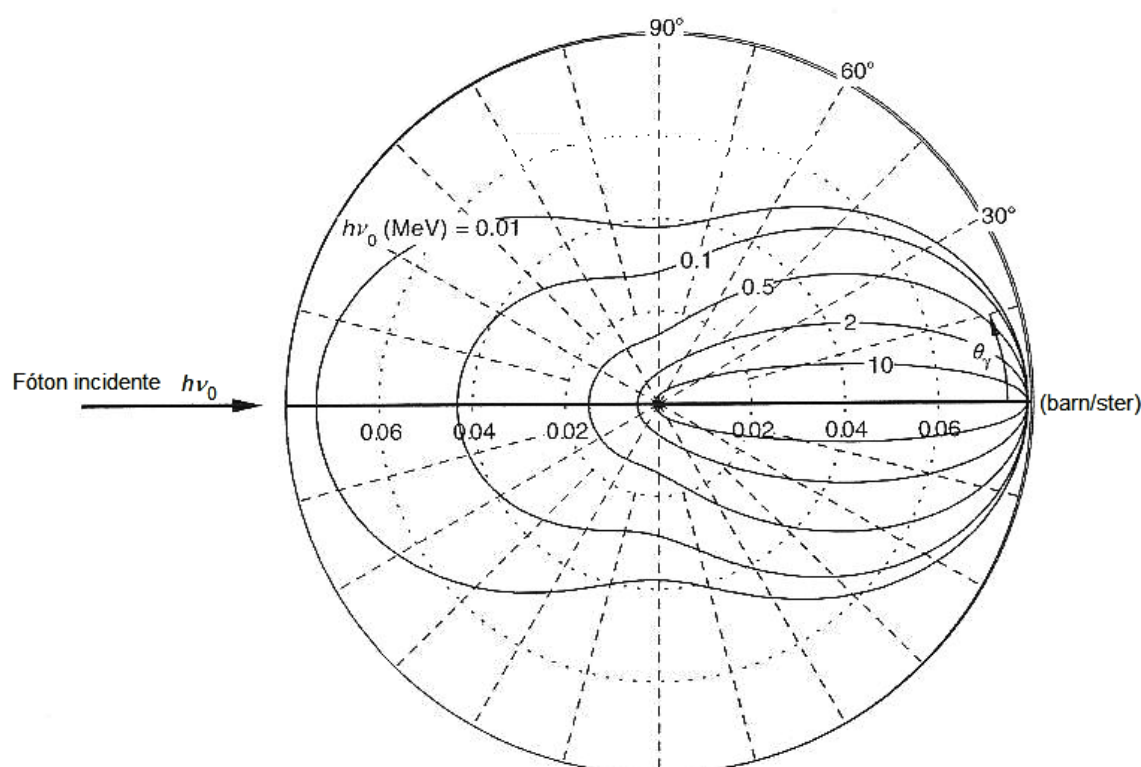
A seção de choque diferencial por elétron do efeito Compton para uma radiação incidente não polarizada, é dada pela equação de Klein-Nishina (KLEIN e NISHINA, 1929; COOPER et al., 2004):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{KN} = \frac{r_0^2}{2} \left[\frac{1 + \cos^2 \theta}{(1 + \alpha(1 - \cos \theta))^2} * \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)(1 + \alpha(1 - \cos \theta))} \right) \right] \quad (8)$$

onde: r_0 é o raio clássico do elétron = $(e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2,818 \times 10^{-15}$ m; e α é a razão entre a energia do fóton incidente e a energia de repouso do elétron. Valores de seção de choque experimentais e teóricos para vários elementos e energias incidentes podem ser encontrados na literatura (HUBBELL, 1969; SHAHI et al., 2001).

A equação 8 sugere que o número de fótons espalhados por unidade de ângulo sólido varia com a energia do fóton incidente. Isto pode ser visto na figura 8 que mostra o comportamento da seção de choque diferencial por elétron para energias incidentes entre 10 keV (0,01 MeV) e 10 MeV em função do ângulo de espalhamento (θ_γ). Para baixas energias a seção de choque é simétrica em torno de 90° , indicando igual probabilidade de os fótons serem espalhados para frente ou para trás após a colisão com o elétron. Porém, para energias acima de 200 keV, a seção de choque torna-se fortemente assimétrica com a probabilidade de retroespalhamento diminuindo à medida que a energia aumenta.

Figura 8 – Seção de choque diferencial do espalhamento Compton, por unidade de ângulo sólido, em função do ângulo de espalhamento θ_γ e para energias incidentes entre 10 keV e 10 MeV. O comprimento da linha gerada na origem até uma dada energia em um determinado ângulo fornece a probabilidade da interação (extraído de CARRON, 2007).



A seção de choque diferencial Compton representada pela equação de Klein-Nishina (eq. 8) é válida somente na aproximação de elétron livre e em repouso. Considerando que o elétron está sempre ligado a um átomo específico, podemos escrever a seção de choque total Compton da seguinte maneira:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_C = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{KN} S(q, Z) \quad (9)$$

onde: $(d\sigma/d\Omega)_{KN}$ é a seção de choque Klein-Nishina por elétron (eq. 8) e $S(q, Z)$ é a chamada função de espalhamento incoerente, incluída para considerar a influência da ligação eletrônica na correção do valor da seção de choque. Valores teóricos dessa função são encontrados na literatura (HUBBELL et. al., 1975; HUBBELL; ØVERBØ, 1979; KAHANE, 1998; KRISHNAVENI; GOWDA, 2005) e dependem, além do número atômico Z , da transferência de momento do fóton incidente para o elétron, q , dada por:

$$q = \frac{\sin \theta / 2}{\lambda_0} = \frac{E_0}{hc} \left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (10)$$

onde: λ_0 é o comprimento de onda do fóton incidente, E_0 é a energia do fóton, h a constante de Planck, c a velocidade da luz e θ o ângulo de espalhamento.

A teoria de espalhamento aqui apresentada supõem que os elétrons são centros espalhadores independentes um dos outros. Desta maneira a contribuição total para o efeito Compton depende da densidade de elétrons do material alvo. A densidade eletrônica, ou seja, o número de elétrons por cm^3 é dada por:

$$\rho_e = \rho N_A \left(\frac{Z}{A} \right) \quad (11)$$

onde: ρ é a densidade do material (g/cm^3), N_A é o número de Avogadro, Z o número atômico e A o peso atômico. Para materiais com baixo número atômico, $(Z/A) \approx 1/2$ (exceto hidrogênio e materiais hidrogenóides), então a equação 11 pode ser escrita como:

$$\rho_e \cong \frac{N_A}{2} \rho \quad (12)$$

ou seja ρ_e é diretamente proporcional a ρ .

Acrescentando a atenuação do feixe no caminho percorrido dentro do material além de parâmetros experimentais e de equipamento, podemos finalmente construir a equação que fornece o número de fótons espalhados que realmente são detectados no detector (BALOGUN, 2003):

$$N_C = I_0 t \varepsilon \left[\exp\left(-\int_{x_1} \mu_1(E) dx\right) \exp\left(-\int_{x_2} \mu_2(E) dx\right) \right] \rho_e \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{C\Omega} \int d\Omega \int_V dV + M \quad (13)$$

onde: I_0 é a intensidade do feixe incidente com energia E ;

t é o tempo em segundos do período de contagem;

ε é a eficiência do detector para a energia do fóton espalhado;

x_1 e x_2 são os caminhos percorridos dentro do material pelos fótons incidentes e espalhados;

μ_1 e μ_2 são coeficientes de atenuação linear para os respectivos caminhos percorridos;

ρ_e é a densidade eletrônica do material (eq. 11);

$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_C$ é a seção de choque diferencial por elétron do efeito Compton (eq. 9);

$d\Omega$ é o ângulo diferencial relacionado com a seção de choque;

dV é o volume diferencial inspecionado, definido pela sobreposição dos ângulos sólidos da colimação do feixe e detector;

M é a componente de múltiplos espalhamentos.

Se o volume inspecionado é suficientemente pequeno, podemos substituir as variáveis na equação 13 por seus valores centrais, omitindo assim as integrais. Empregando um sistema de colimação adequado o fator de múltiplos espalhamentos também pode ser negligenciado, tornando esta equação que

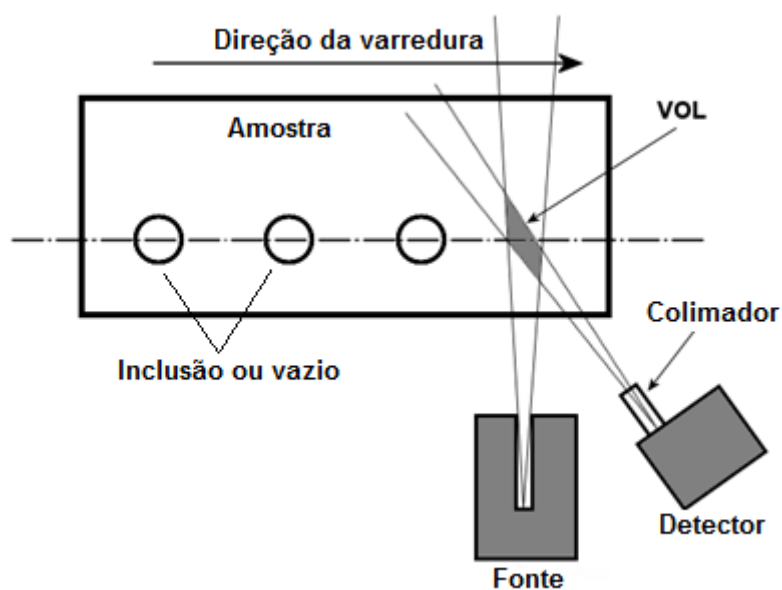
fornece o número de espalhamentos únicos uma forma simples de se determinar a densidade eletrônica do material após várias medidas de N_c .

4.3 O MÉTODO DE INSPEÇÃO

Em função da teoria apresentada nas seções anteriores, notamos que o número de fótons espalhados por efeito Compton é diretamente proporcional a densidade do meio espalhador conforme mostra a equação 13. Portanto, este fato pode ser utilizado como o princípio de uma técnica de inspeção que identifica regiões de diferentes densidades (inclusões ou vazios, por exemplo) no interior de um material. O contraste dessas densidades será percebido em função do aumento ou diminuição da intensidade espalhada quando o feixe incidente intercepta materiais de diferentes densidades

A figura 9 ilustra esquematicamente um arranjo experimental para realização da técnica de retroespalhamento Compton numa configuração típica.

Figura 9 – Diagrama de um experimento de retroespalhamento Compton típico, a intersecção dos ângulos sólidos da fonte e detector define e volume de inspeção (*VOL*) onde os espalhamentos únicos podem ocorrer



O sistema é composto por uma fonte de raios gama e um detector, ambos colimados, posicionados do mesmo lado em relação à amostra. O detector conta os fótons retroespalhados pelo material num determinado ângulo. Numa condição ideal estes fótons devem ser provenientes do volume de inspeção (*VOL*), uma região formada pela intersecção dos campos de visão da fonte e detector respectivamente.

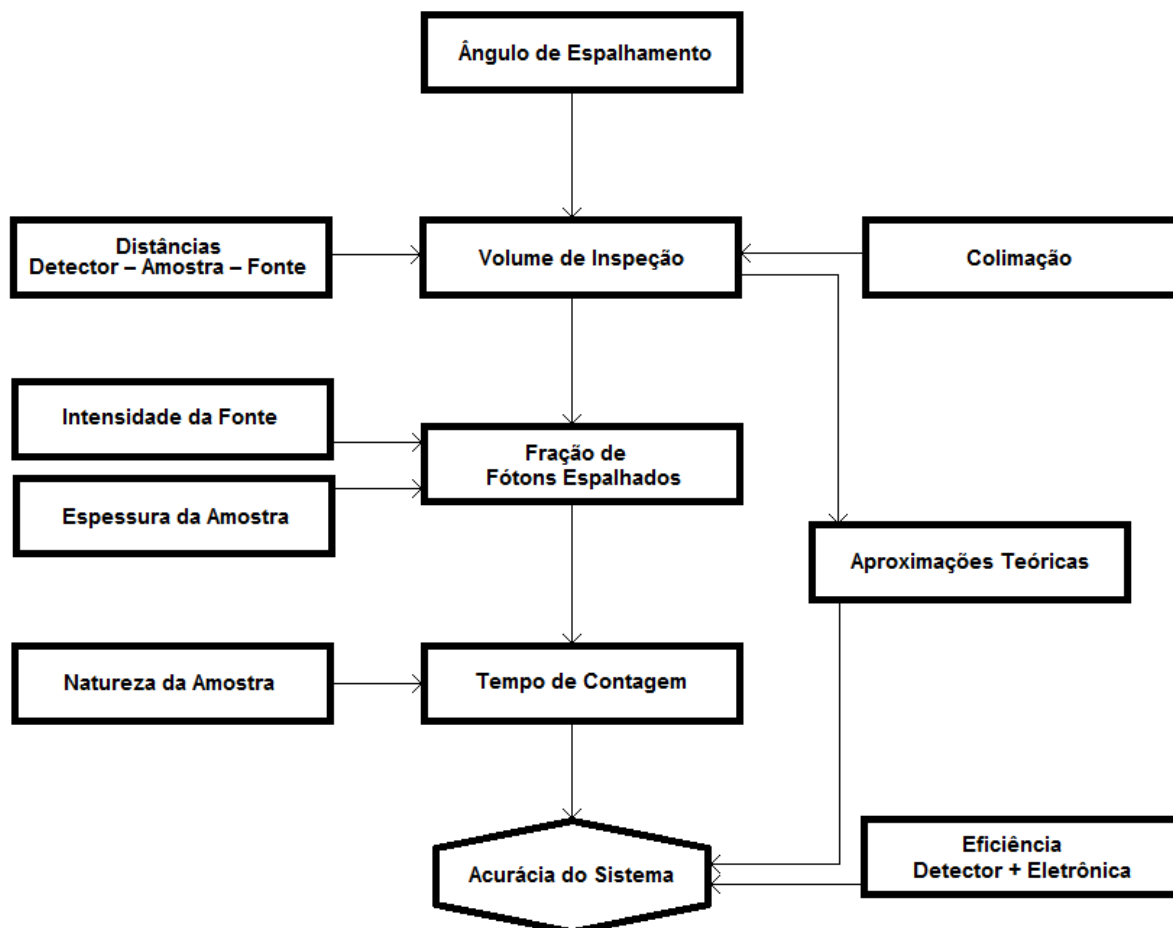
A varredura é realizada com o movimento do conjunto fonte-detector ou da amostra de modo que o volume de inspeção percorra as regiões de interesse dentro do material.

Fonte e detector devem possuir uma colimação adequada para se obter uma boa resolução espacial, porém a diminuição excessiva das dimensões do *VOL* pode resultar numa baixa contagem forçando o aumento do tempo de coleta de dados. A colimação também auxilia na redução do background proveniente de fótons que sofreram espalhamento múltiplo ou de outras regiões exteriores ao *VOL*. Estes parâmetros, portanto, devem ser ponderados na otimização do experimento.

Outro fator importante é o ângulo entre a fonte e o detector, que também determina ao tamanho e forma do volume inspecionado o que influencia a intensidade do feixe retroespalhado (BALOGUM, 1999). O caminho percorrido pelo feixe incidente e espalhado dentro da amostra também é alterado para diferentes ângulos de espalhamento refletindo nos efeitos de atenuação. A fonte utilizada também deve ser escolhida visando à otimização do experimento. Fontes de alta energia emitem fótons que penetram mais profundamente na matéria visto que o coeficiente de atenuação linear decresce com o aumento da energia. No entanto, a probabilidade do retroespalhamento acontecer diminui com o aumento da energia para um dado ângulo conforme estabelecido pela relação de Klein-Nishina (eq. 8). A intensidade do fluxo de fótons proveniente da fonte deve ser alta, já que o número de fótons espalhados é diretamente proporcional ao fluxo como visto na equação 13.

Deste modo concluímos que há um compromisso entre muitas variáveis para a otimização da acurácia do sistema que devem ser cuidadosamente estudadas com mostra o diagrama da figura 10. A energia da fonte, a colimação e o ângulo de espalhamento são, no entanto, os três parâmetros mais importantes na configuração que afetam diretamente a contagem no detector (LAWSON, 2002).

Figura 10 – Parâmetros que influenciam na acurácia do sistema de espalhamento Compton e suas inter-relações.



5 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é um método de simulação computacional que pode ser utilizado para um melhor entendimento da física associada ao problema de um experimento real e sua relação com os parâmetros de configuração da experiência.

Como vários parâmetros estão influenciando simultaneamente a acurácia do aparato experimental proposto neste trabalho, foi decidido pela utilização do método de Monte Carlo para a simulação do experimento. Tal simulação pode fornecer um melhor entendimento do processo físico encontrado e, portanto, proporcionar um melhor entendimento do conceito proposto. Além disso, parâmetros físicos individuais que afetam o experimento podem ser estudados.

Métodos de simulação eliminam muitos dos problemas com equipamentos encontrados nos experimentos reais de laboratório. Um estudo dos efeitos individuais pode então ser realizado para eliminar ou compensar quaisquer efeitos indesejados.

Além de servir como lastro teórico para a técnica proposta, a simulação serve também como ferramenta de projeto. Em particular ela pode facilitar a escolha da geometria e colimação do experimento para se conseguir um melhor contraste de densidades entre os materiais inspecionados ou uma maior contagem dos fótons Compton espalhados, por exemplo. Em alguns casos, este tipo procedimento pode ser extremamente demorado se for realizado experimentalmente em laboratório.

5.1 O MÉTODO DE MONTE CARLO NO TRANSPORTE DE RADIAÇÃO

A técnica de Monte Carlo pode ser descrita como um método estatístico, onde se utiliza uma seqüência de números aleatórios para a realização de uma simulação.

Simulações estatísticas diferem dos métodos convencionais de discretização das variáveis de um processo físico, que tipicamente são aplicados em sistemas de equações diferenciais parciais ou ordinárias.

Em muitas aplicações práticas de Monte Carlo o processo físico é simulado diretamente, sem a necessidade de descrever as equações matemáticas

que representam o comportamento do sistema, sendo que o único requisito necessário é que esse comportamento possa ser descrito por funções densidades de probabilidade. Uma vez que estas funções sejam conhecidas, a simulação de Monte Carlo é realizada através da amostragem aleatória destas funções. O resultado desejado é obtido através da estimativa do valor médio das grandezas observadas, durante um determinado número de simulações. Portanto, a característica essencial do método de Monte Carlo é o uso de técnicas de amostragem para se chegar à solução do problema físico. Em contraste, métodos numéricos convencionais partem de modelos matemáticos do sistema físico, através da discretização de equações diferenciais, resolvendo um conjunto de equações algébricas.

Aplicado ao caso do transporte de radiação, o processo estocástico pode ser visto como uma família de partículas cujas coordenadas de cada partícula individual mudam aleatoriamente em cada colisão. O comportamento médio destas partículas é descrito em termos de grandezas macroscópicas como fluxo ou densidade de partículas. O valor esperado destas grandezas corresponde à solução determinística da equação de Boltzmann, que rege o fenômeno de transporte de radiação. Grandezas específicas como energia depositada ou dose são derivadas destas grandezas (YORIYAZ, 2010).

O histórico de colisões de um fóton pode ser representado por um conjunto de S_j^k , tal que $j = 1, 2, 3, \dots, N_k$ e $k = 1, 2, 3, \dots, M$, onde S_j^k indica o estado do fóton antes de sua j -ésima colisão:

$$S_j^k = (r_j^k, \Omega_j^k, E_j^k, W_j^k) \quad (14)$$

onde r_j , Ω_j e E_j são a posição, direção e energia do k -ésimo fóton imediatamente antes da j -ésima colisão. W_j^k corresponde a probabilidade com que o k -ésimo fóton escape de ser absorvido nas primeiras $j-1$ colisões.

Cada estado S_j de uma sequência $\{S_j\}$ pode ser amostrado através de uma função de probabilidade condicional $P(S_j|S_{j-1})$ a qual considera o conjunto de todas as trajetórias possíveis pela equação de Boltzmann. Desta forma a escolha do estado S_j^k , dado S_{j-1}^k envolve o seguinte sequência (YORIYAZ, 2010):

- 1) Atribuindo a energia e direção resultante da $(j-1)$ -ésima colisão:
 - a) Se $j = 1 \rightarrow$ colisão de fótons primários: atribui-se randomicamente uma trajetória inicial Ω_1 , posição r_1 e energia E_1 , a partir da amostragem da função fonte $S(r, \Omega, E)$.
 - b) Se $j \geq 2 \rightarrow$ fótons previamente espalhados:
 - i) escolhe-se randomicamente o processo de interação na $(j-1)$ -ésima colisão baseado nas magnitudes relativas das seções de choque no processo competitivo entre efeito fotoelétrico, σ_{ef} , espalhamento coerente e Compton, σ_R, σ_C , etc.
 - ii) amostragem da função de probabilidade definida pela seção de choque diferencial do processo escolhido em i), para a escolha da direção de emergência após a $(j-1)$ -ésima colisão, isto é, a quantidade Ω^k .
 - iii) calcula-se a energia E_j após a $(j-1)$ -ésima colisão da relação energia-ângulo de espalhamento.
- 2) Atribui-se o peso W_j^k após a $(j-1)$ -ésima colisão.
- 3) Determina-se a posição da j -ésima colisão r_j , tal que:

$$r_j = r_{j-1} + \Omega_j * S \quad (15)$$

a partir da amostragem da função probabilidade $P(S)$ tal que:

$$P(S) = \sigma(E_j) \exp(-\sigma(E_j) * S) \quad (16)$$

onde S é a distância entre a posição da $(j-1)$ -ésima e a j -ésima colisão.

- 4) Determina-se a contribuição desta colisão para a quantidade de interesse.
- 5) Retornar ao passo 1.

5.2 O CÓDIGO FLUKA

Atualmente existem vários códigos de simulação de Monte Carlo adequados para diferentes tipos de aplicações, que exigem pouca programação por parte do usuário dependendo do tipo de problema físico estudado.

Neste trabalho usamos o código FLUKA, que é um pacote totalmente integrado de simulação de Monte Carlo que usa uma programação sofisticada para lidar com o transporte de partículas através da matéria, sendo particularmente adequado para problemas de espalhamento (FASSO et al., 2005). Além disso, ele pode ser empregado em muitas outras aplicações como na física experimental de alta energia, estudos de blindagem, projeto de detectores e telescópios, estudos de raios cósmicos, dosimetria, física médica e radiobiologia (BALLARINI et al., 2006; BATTISTONI et al., 2007). Os resultados obtidos pelo FLUKA já foram avaliados frente a dados experimentais e teóricos provenientes de outros códigos de simulação mostrando excelente concordância entre os mesmos (BESKROVNAIA et al., 2008; KIMSTRAND et al., 2008; TALEEI; SHAHRIARI, 2009; BÖHLEN et al., 2010; JOOHEE et al., 2011). No trabalho de RANDENIYA et. al. (2009), o FLUKA se mostrou 4x mais rápido do que o MCNPX e 14x mais rápido do que o GEANT4, dois códigos de simulação também bastante empregados nos problemas de transporte de partículas.

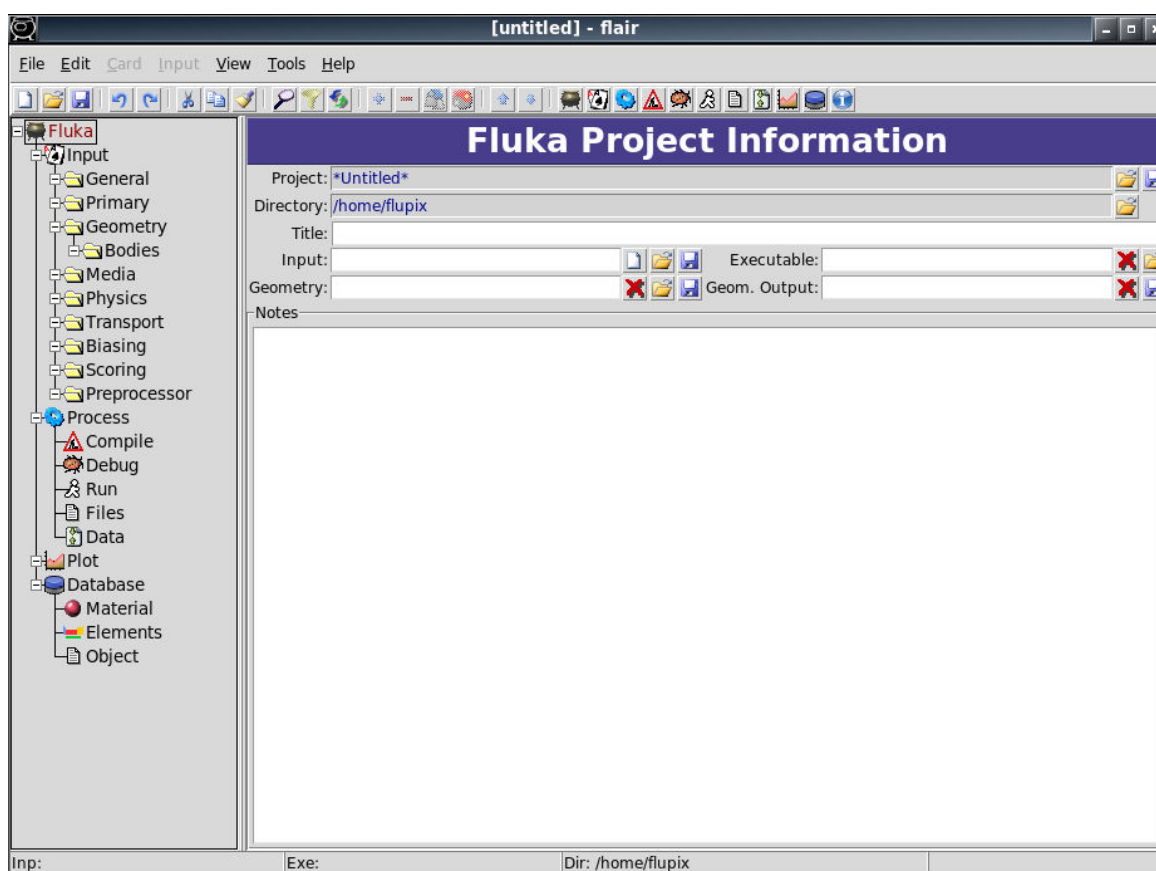
O FLUKA pode simular com alta precisão a interação e propagação de fótons na matéria com energias incidentes partindo de 1 keV. No caso específico do efeito Compton, ele leva em conta as ligações atômicas no cálculo da probabilidade de espalhamento usando os fatores de forma inelásticos de Hartree-Fock. O código pode lidar com geometrias complexas usando versões melhoradas dos pacotes de Geometria Combinatorial e possui várias ferramentas de visualização e procura de defeitos (*debugging*). O FLUKA foi desenvolvido em colaboração entre as equipes dos laboratórios CERN¹ e INFN², atualmente está na versão 0.9.3 lançada em maio de 2011, é executado na plataforma Linux e pode ser usado gratuitamente através do site oficial do programa (FLUKA, 2011).

¹ CERN – European Organization for Nuclear Research, localizado em Genebra, Suíça.

² INFN – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, localizado em Roma, Itália.

O FLUKA possui ainda uma interface de usuário avançada conhecida como FLAIR (VLACHOUDIS, 2009). A janela inicial do programa é mostrada na figura 11.

Figura 11 – Janela principal do FLAIR que apresenta as ferramentas padrão como barra de menus, barra de ferramentas, barra de status e a árvore de navegação principal que agrupa todos os cartões do projeto usados para editar os arquivos de entrada e manipular os arquivos de saída.



O FLAIR facilita a edição dos arquivos de entrada do FLUKA, a execução dos códigos e a visualização dos arquivos de saída. É um programa inteiramente baseado nas linguagens de programação *python* e *Tkinker*. Algumas das funcionalidades do FLAIR são (FLAIR, 2011):

- ✓ Interface de usuário amigável para uma edição fácil e praticamente sem erros dos arquivos de entrada, bem como a validação dos mesmos;

- ✓ Compilação, *debugging*, execução e monitoramento do processo durante a execução da simulação;
- ✓ Pós-processamento dos arquivos de saída e geração de gráficos através da interface *gnuplot* ou de imagens 3D com a interface *povray*;
- ✓ Base de dados com propriedades de todos os núclídeos conhecidos e seus isótopos;
- ✓ Base de dados de aproximadamente 300 materiais pré-definidos junto com seus parâmetros de Sterheimer (STERHEIMER et al., 1984) (figura 12);
- ✓ Biblioteca de objetos geométricos, para fácil edição, armazenamento e compartilhamento entre projetos.

O princípio do FLAIR é trabalhar num nível intermediário de interface do utilizador. Não tão alto para esconder as funcionalidades do FLUKA ao usuário, não tão baixo para que gere a necessidade de constantes consultas ao manual para verificar as opções disponíveis em cada entrada de dados.

Figura 12 – Janela da base de dados de materiais do FLAIR que contém aproximadamente 300 materiais reunidos em grupos de interesse e suas propriedades.

Material Database

Search:

Group

- Biological-Human
- Biological-Misc
- General
- ICRU
- Implantation
- Liquids / Gases
- Metal Alloys
- Plastics / Polymers
- Targets
- User

Material List

Material	Density	Stoichiometry
Thyroid	1.05	H-10.4, C-11.9, N-2.4, O-...
728 Cyclohexanone	0.9478	H-10, C-6, O-1
227 Teflon	2.2	C-2, F-4
Stainless-Steel (typical)	8.0	Cr-8, Fe-74, Ni-18
Superconductor YBaCuO (123)	6.54	Y-1, Ba-2, Cu-3, O-7
307 Alcohol-Propyl (Propanol)	0.8035	H-8, C-3, O-1
Cyclobutane	0.00125	H-8, C-4
680 Vinyl bromide (Bromo ethene)	0.0046	C-2, H-3, Br-1
Brass (typical)	8.52	Cu-62, Zn-35, Pb-3

Material Properties

Title: 728 Cyclohexanone

Notes:

Chemical Formula

C	H	O
6	10	0

Names:

No.728
Cyclohexanone

Stoichiometry | Sternheimer | Neutron

Composition: atom Density: 0.9478 Group: Liquids / Gases

Z	A	EI	Name	Frac
1		H	Hydrogen	10.0
6		C	Carbon	6.0
8		O	Oxygen	1.0

5.3 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

O propósito inicial da simulação era investigar a influência dos parâmetros: geometria, ângulo de espalhamento, colimação e energia da fonte na otimização do experimento visando a maior contagem de fótons retroespalhados, melhor contraste entre os diferentes materiais da amostra e a melhor resolução espacial na detecção de inclusões ou falhas no interior de um material (estas três variáveis serão descritas com maiores detalhes na próxima seção: 5.4).

Para isso simulou-se o espalhamento Compton de raios gama em um bloco de concreto com dimensões de 15 x 7,5 x 10 cm. Dentre as várias composições possíveis para o concreto foi escolhido o concreto estrutural comum

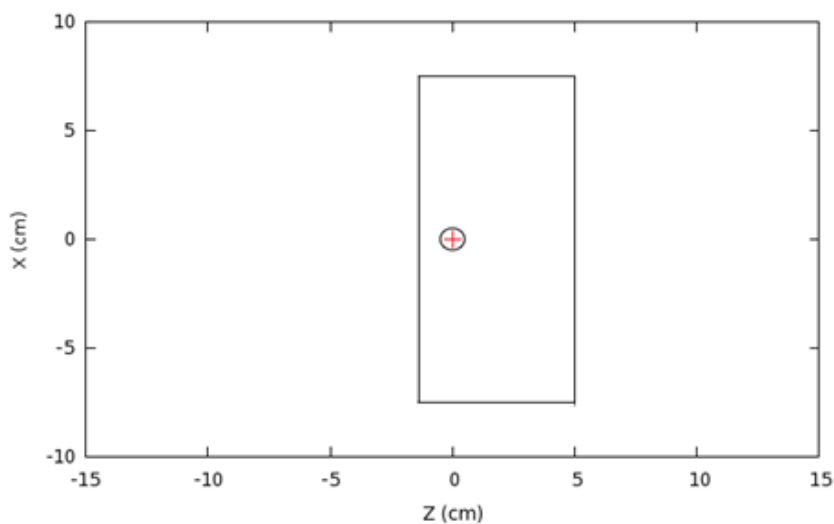
com 10% de umidade e com densidade de $2,34 \text{ g/cm}^3$. Sua composição é dada na tabela 2:

Tabela 2 – Composição do concreto comum utilizado na simulação.

Elemento	Nome	Z	Fração (%)
C	Carbono	6	23,0
O	Oxigênio	8	40,0
Si	Silício	14	12,0
Ca	Cálcio	20	12,0
H	Hidrogênio	1	10,0
Mg	Magnésio	12	2,0

No bloco de concreto podemos posicionar um orifício cilíndrico paralelo a face frontal possuindo $\varnothing 10,0 \text{ mm}$ de diâmetro e localizado a $1,5 \text{ cm}$ da superfície do bloco. Este furo pode simular uma falha no interior do concreto ou ser preenchido com aço ou outro material, para simular uma barra de reforço presente no concreto armado, por exemplo. A figura 13 mostra uma vista superior da amostra, gerada através da interface gráfica da simulação.

Figura 13 – Vista superior do bloco de concreto ($15 \times 7,5 \times 10 \text{ cm}$) usado na simulação contendo um furo de $\varnothing 10 \text{ mm}$ posicionado a $1,5 \text{ cm}$ da superfície.



Duas energias de feixe incidente foram escolhidas: 59,54 keV correspondente a energia de emissão do ^{241}Am e 122,1 keV que corresponde a energia do isótopo ^{57}Co . São duas fontes de gama disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada e que serão testadas posteriormente na fase experimental deste trabalho. Mais detalhes do motivo da escolha dessas duas fontes serão dados no capítulo de Materiais de Métodos. A energia limiar para o término de todas as interações e transporte de fótons dentro do material foi ajustada para uma ordem de grandeza menor que a do feixe incidente. Outros parâmetros do feixe são dados na tabela 3. O código completo de Monte Carlo usado nesta simulação pode ser encontrado no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 3 – Características do feixe incidente de raios gama usado na simulação.

Energia	59,54 keV e 122,1 keV
Distância fonte - amostra	10,0 cm
Distância amostra - detector	10,0 cm
Forma do feixe	Cilíndrica
Diâmetro do feixe	2,0 mm
Número de partículas primárias	$1,2 \times 10^6$ fótons
Peso de cada partícula	1,0
Divergência	Plana

5.4 VARIÁVEIS DEPENDENTES

As variáveis que denominamos de dependentes são aquelas quantidades que deverão ser otimizadas através dos diferentes testes de simulação. As seguintes variáveis foram escolhidas por serem consideradas relevantes no processo de inspeção com o equipamento proposto:

- Contagem Líquida;
- Contraste;
- Resolução Espacial.

5.4.1 Contagem Líquida

A contagem líquida é definida com a área integrada total abaixo do pico Compton, subtraída da contagem de fundo da mesma região. Contagens líquidas elevadas indicam boa relação pico/fundo além de permitirem tempos menores de medida para obtenção de valores estatisticamente significativos. No entanto, a taxa de contagem é influenciada por muitos fatores, desde geométricos, como o tamanho do volume de inspeção, até de equipamento, como a atividade da fonte de raios gama. Por isso essa variável tem que ser avaliada caso a caso ponderando sua influência nos parâmetros escolhidos para o experimento.

5.4.2 Contraste

O contraste define a habilidade do equipamento em distinguir materiais de diferentes densidades no interior da amostra.

Neste trabalho definimos contraste matematicamente como:

$$\text{Contraste} = C = \left(\frac{C_{bulk} - C_{inclus\tilde{a}o}}{C_{bulk}} \right) \times 100\% \quad (17)$$

onde C_{bulk} é a média integrada das contagens registradas pelo detector nos pontos onde o feixe incidente está somente sobre o material da amostra e $C_{inclus\tilde{a}o}$ é a média das contagens quando o feixe incidente está interceptando uma inclusão no interior da amostra. Para a maioria das inclusões e materiais analisados neste trabalho, $C_{bulk} > C_{inclus\tilde{a}o}$ e, portanto, o contraste é positivo. Um valor mínimo de contraste é exigido para que o equipamento possa distinguir regiões de diferentes densidades com acurácia. Se adotarmos um nível de confiabilidade de 95%, os valores de C_{bulk} e $C_{inclus\tilde{a}o}$ devem diferir um do outro por um valor correspondente a dois desvios padrões, assumindo uma distribuição normal para o erro. De acordo com a distribuição de Poisson o desvio padrão é igual a raiz quadrada da contagem. A distribuição de Poisson é equivalente ao limite da distribuição Gaussiana quando a população é grande e a probabilidade de ocorrência de um evento é baixa, que é

o caso da contagem de fótons espalhados (KNOLL, 2000). Então o valor mínimo para o contraste com 95% de confiabilidade é aquele definido pela menor estimativa para a média das contagens somente no material (*bulk*) e a maior estimativa da média das contagens quando o feixe intercepta uma inclusão. Usando essa interpretação em conjunto com a eq. 17, o valor mínimo (C_{min}) é dado por:

$$C_{min} = \frac{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}}) - (C_{inclusão} + 2\sqrt{C_{inclusão}})}{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}})} \quad (18)$$

Este valor mínimo assume que o erro na média das contagens de C_{bulk} e $C_{inclusão}$ está ajustado na direção que traz os dois valores mais próximos um do outro. O contraste estimado pelos dados experimentais deve ser maior que o valor do contraste mínimo (eq. 18) para satisfazer a condição de 95% de confiabilidade. Quando esta condição não for satisfeita o fato será destacado no texto. Mais detalhes e a derivação completa da fórmula do valor mínimo para o contraste pode ser encontrada no Apêndice B ao final desta tese.

5.4.3 Resolução Espacial

A resolução espacial vai ser avaliada em função de dois aspectos:

1) O quão próximo o valor do tamanho das inclusões fornecido pelo sistema é do tamanho real da inclusão dentro do material. Como veremos a seguir as curvas de contagem líquida *versus* posição da amostra possuem a forma de vale quando o feixe atinge a inclusão. O tamanho da inclusão será fornecido pelo valor do FWHM (*full width at half maximum* ou largura a meia altura) obtido de um ajuste Gaussiano destas curvas. Particularmente neste caso o ajuste Gaussiano não tem qualquer sentido físico, apenas foi escolhido como parâmetro de comparação entre as curvas, pois foi o que melhor se adaptou à forma apresentada pelas mesmas.

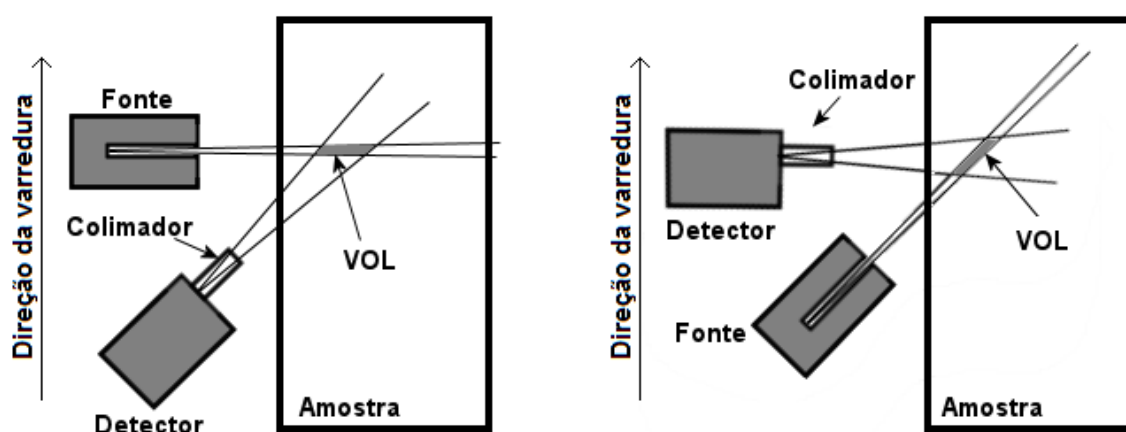
2) O outro aspecto da avaliação da resolução espacial do sistema será através do menor tamanho de falha que o sistema conseguirá detectar. Esta análise será realizada somente na parte experimental deste trabalho, visto que ela não é fundamental para a escolha dos parâmetros testados nesta fase de simulação.

5.5 TESTE DE GEOMETRIA

Duas configurações de fonte e detector foram testadas neste trabalho. Uma consiste em posicionar o feixe incidente perpendicular à amostra (geometria 1). Na outra (geometria 2) detector e fonte trocam de posição e agora são os fótons retroespalhados que são detectados na direção perpendicular à amostra (figura 14).

Para realizar a investigação do material, fonte e detector movem-se em conjunto paralelamente a amostra, promovendo uma varredura de tal modo que o volume de inspeção percorra o material numa mesma profundidade. Ambas as geometrias foram ajustadas para que o centro do volume de inspeção (VOL) estivesse posicionado à 1,5 cm de profundidade em relação a superfície da amostra voltada aos equipamentos.

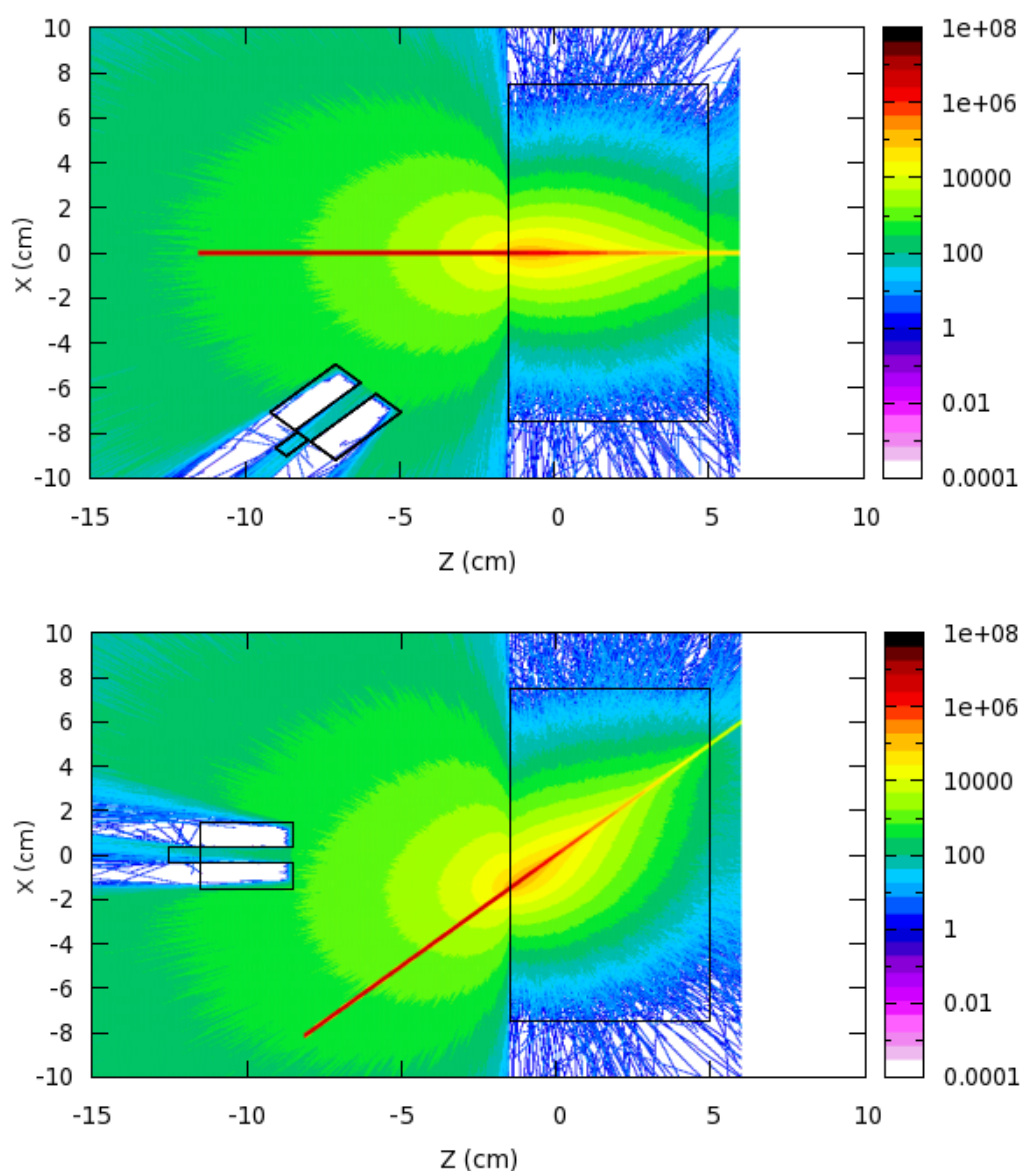
Figura 14 – Desenho esquemático das duas geometrias testadas na simulação. Geometria 1 (esquerda) – fonte perpendicular a amostra. Geometria 2 (direita) detector perpendicular a amostra.



A figura 15 mostra a fluência dos fótons espalhados nas duas geometrias após a incidência do total de partículas primárias da simulação ($1,2 \times 10^6$ fótons). A escala de cores está normalizada em função do número total de fótons. O feixe incidente é a linha vermelha. A configuração da fluência nas duas figuras tem a forma esperada da distribuição espacial de espalhamento dada pela

equação de Klein-Nishina (eq. 8) adicionando-se os efeitos de atenuação do feixe espalhado dentro do material. A figura também mostra o colimador do detector usado nesta simulação.

Figura 15 – Diagrama da fluência de fótons na geometria 01 (acima) e geometria 02 (abaixo). A escala de cores está normalizada para $1,2 \times 10^6$ fótons. Colimador do detector com $\varnothing 7$ mm x 30 mm feito de latão. Energia incidente 59,54 keV.

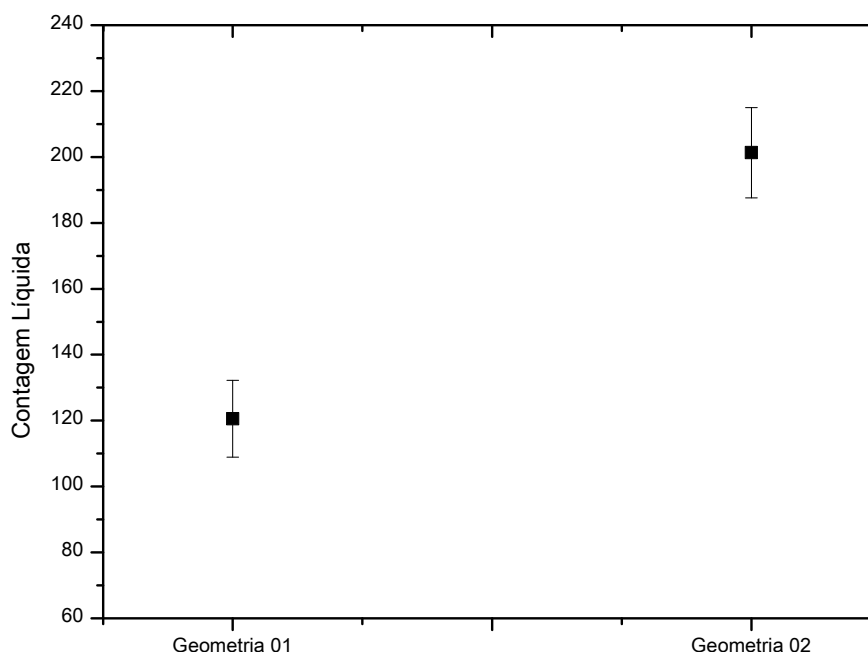


Analisando as duas fluências percebemos que, apesar das duas geometrias parecerem equivalentes com relação ao retroespalhamento, na verdade não são, devido a “deformação” que a geometria 2 apresenta na sua distribuição

espacial de espalhamento como consequência da incidência oblíqua do feixe em relação a superfície da amostra.

O valor da contagem líquida de fótons retroespalhados que chegam ao detector nas duas geometrias é mostrado na figura 16. Cada ponto representa a média de cinco contagens simuladas em pontos diferentes da amostra com seu respectivo desvio. Na geometria 2 uma porção maior do volume de inspeção está mais próxima da superfície. Além disso, e como consequência de, o caminho percorrido dentro do material pelos fótons espalhados na direção do detector é menor. Estes dois motivos justificam a maior contagem de fótons apresentada pela geometria 2. Esta característica é importante porque contagens maiores implicam em tempos menores de medição durante o experimento para se obter valores estatisticamente significativos.

Figura 16 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados contados pelo detector nas duas geometrias testadas. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV.



Entretanto, aspectos de cunho prático nos fizeram descartar o uso da geometria 2. Nesta, o posicionamento do volume de inspeção é oblíquo em relação à superfície da amostra e seu tamanho ao longo desta direção depende principalmente da colimação do detector. Neste caso, eventualmente o volume de inspeção pode atingir uma região de interesse dentro da amostra sem que o detector esteja exatamente sobre a mesma. Deste modo, não temos uma referência externa da posição da região de interesse, seja ela uma inclusão ou defeito.

Empregando a geometria 1 a direção do feixe incidente pode ser usada como referência externa. No momento em que o feixe perpendicular à superfície atinge uma região que apresente algum contraste de densidade dentro da amostra, este sofrerá uma alteração no seu espalhamento, sendo imediatamente registrada pelo detector. Portanto, um aparelho de detecção construído com base nesta geometria conseguirá identificar diretamente a localização de defeitos ou inclusões escondidos sob a superfície da amostra em função da posição do feixe incidente. Nos próximos testes de simulação adotaremos a geometria 1 como padrão.

5.6 TESTE DE ÂNGULO DE ESPALHAMENTO

Na configuração de retroespalhamento, ângulos muito baixos próximos a 90° , não são adequados porque aumentam consideravelmente o caminho percorrido pelo feixe espalhado dentro da amostra e isso implica num acréscimo da atenuação. Para radiações incidentes de baixa energia, como as usadas neste trabalho, ângulos mais elevados também possuem maior probabilidade de espalhamento. Além disso, tendo em vista o estudo de um aparelho portátil de inspeção, fonte e detector devem estar próximos para facilitar a manipulação e tornar o conjunto mais compacto.

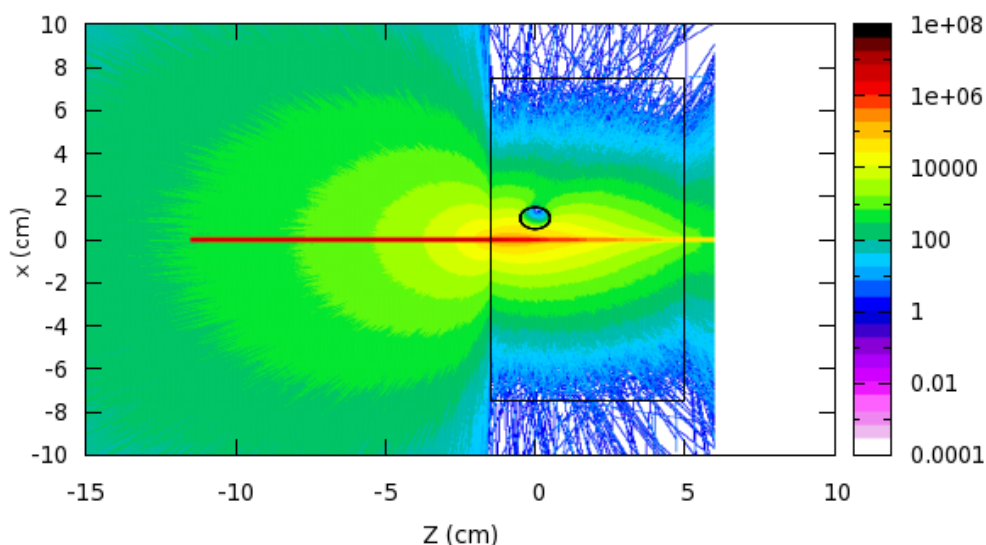
No entanto temos que levar em conta a blindagem adequada que deve envolver a fonte de raios gama e o tamanho do detector e sistema de colimação quando testamos possíveis posicionamentos do conjunto.

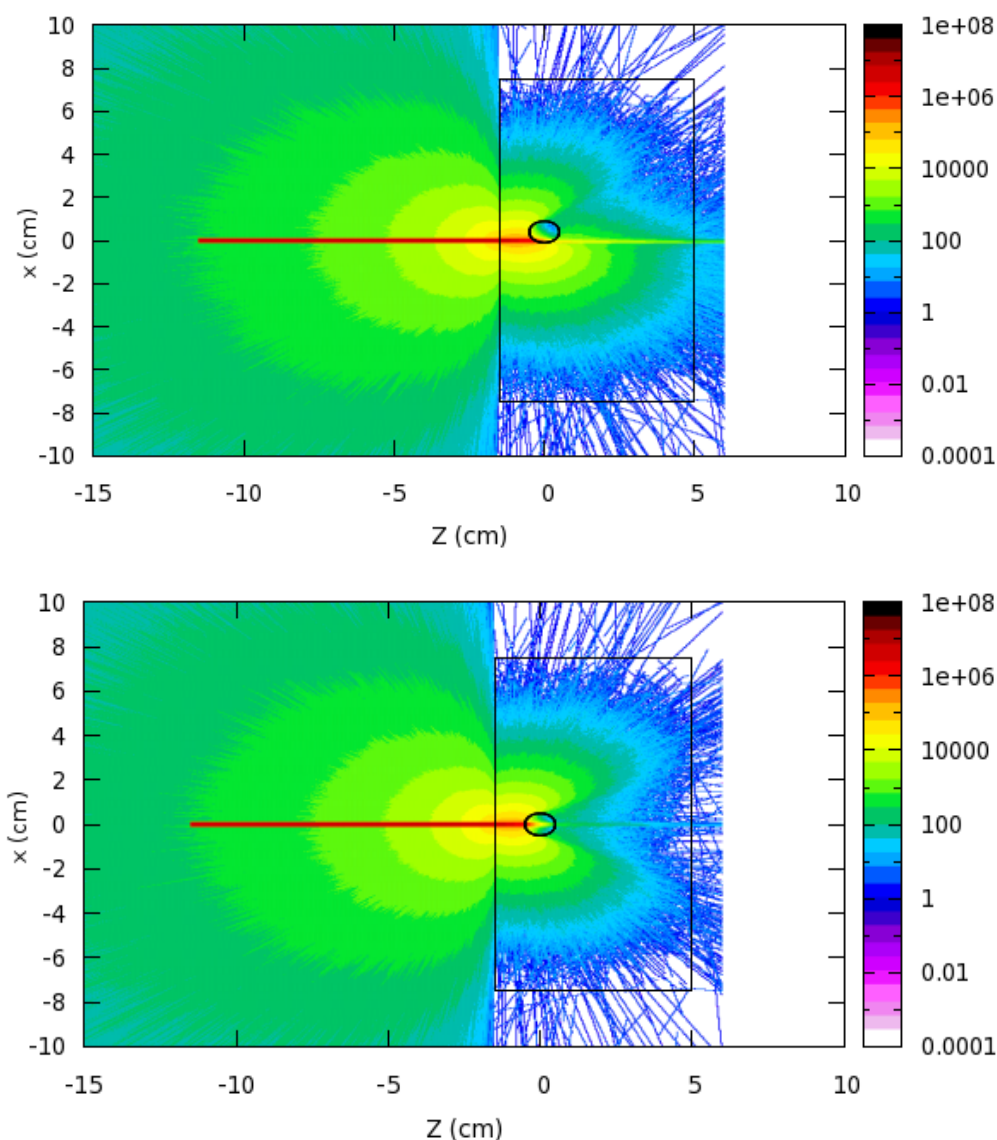
Neste sentido, dois ângulos de retroespalhamento foram avaliados na simulação: 135° e 150° . Estas duas configurações se beneficiam da alta probabilidade de espalhamento e ainda proporcionam espaço suficiente para posicionar os componentes de equipamento.

Para esse teste foi introduzida no bloco de concreto uma região cilíndrica paralela à face frontal possuindo $\varnothing 10,0$ mm de diâmetro e localizada a 1,5 cm da superfície (figura 13). Nesta região podem ser atribuídos dois tipos de materiais: 1) vácuo; simulando uma falha na estrutura como uma trinca, por exemplo, e 2) aço; que neste caso estaria simulando uma das barras que compõem a armadura do concreto armado.

A figura 17 mostra uma sequência de imagens obtidas na simulação que representam a fluência de fótons à medida que o feixe incidente se aproxima e logo após intercepta a barra de aço dentro da amostra de concreto. Podemos observar a deformação na configuração de espalhamento devido à forte atenuação provocada no feixe incidente e espalhado pela barra de aço.

Figura 17 – Sequência mostrando a fluência de fótons em três posições do feixe incidente em relação à barra de aço localizada no interior do bloco de concreto. Energia: 59,54 keV.

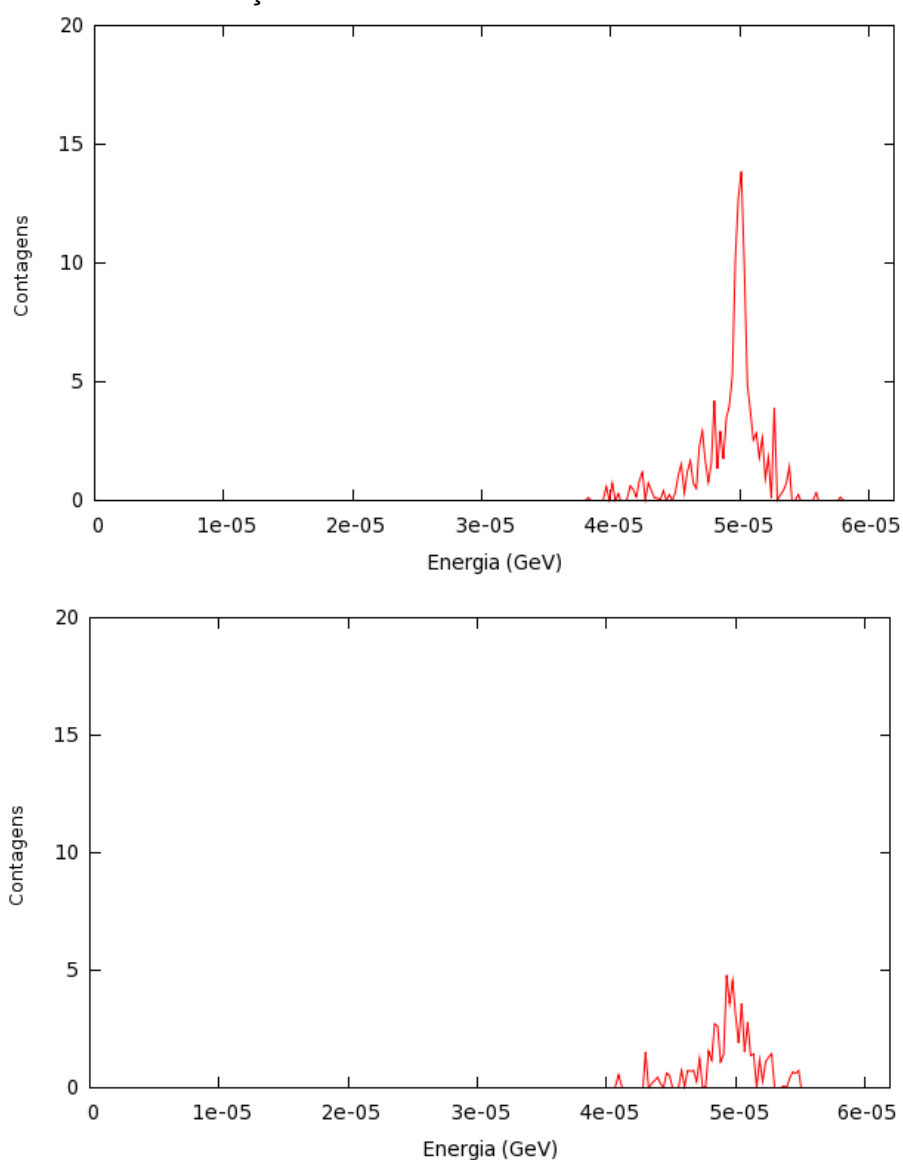




Um exemplo dos espectros de contagens *versus* energia obtidos na simulação é mostrado na figura 18.

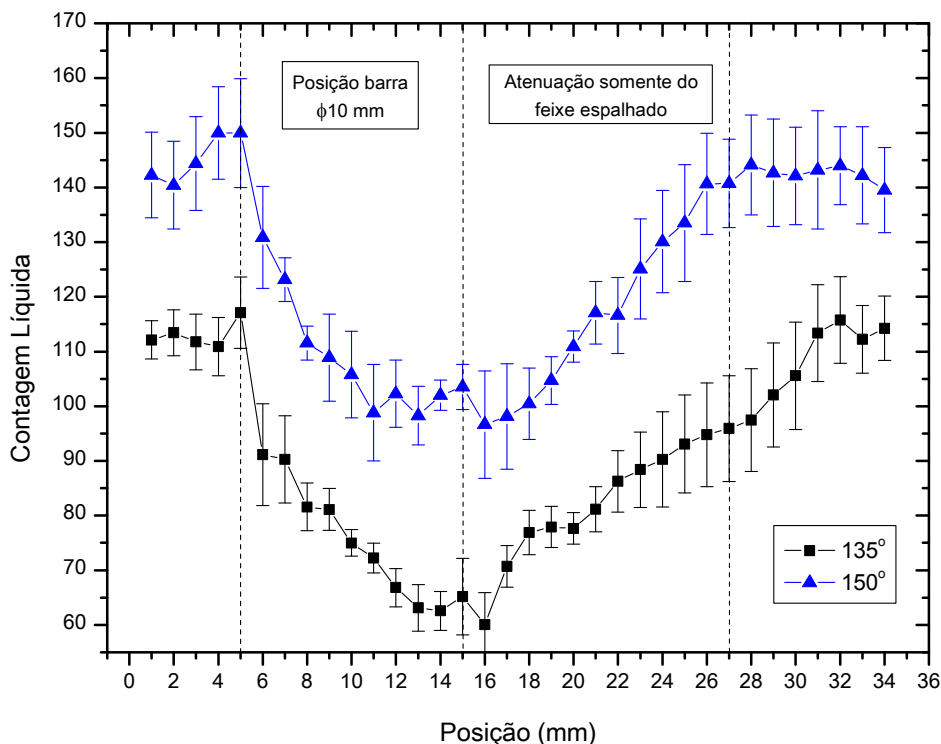
Neste caso em particular a energia incidente é de 59,54 keV e os fótons foram detectados em 135° . No espectro superior o feixe incidente está a uma distância de 5 mm da barra de aço, enquanto que na imagem inferior o feixe intercepta a barra no seu centro. As duas situações correspondem, respectivamente, a primeira e última configuração mostrada na figura 17. É visível a diminuição do pico indicando a queda de contagem devido à atenuação do feixe incidente e espalhado no interior do aço. Ambos os picos tem seu centróide posicionado na energia de 49,66 keV determinada pela relação de unicidade entre a energia incidente e o ângulo de espalhamento dada pela equação Compton (eq. 4).

Figura 18 – Espectros de contagens *versus* energia obtidos na simulação para um feixe incidente de 59,54 keV e ângulo de espalhamento de 135°. Superior: feixe a 5 mm da barra de aço. Inferior: feixe incidindo no centro da barra.



Finalmente na figura 19 temos o teste entre os dois ângulos de espalhamento propostos neste trabalho, para a amostra de concreto com a barra de aço. Cada ponto corresponde contagem líquida integrada do pico Compton na energia correspondente aos dois ângulos de espalhamento segundo a eq. 4.

Figura 19 – Contagem líquida obtida na simulação dos fótons retroespalhados em dois ângulos - 135° e 150° - em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de Ø10 mm. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV. Varredura com passo de 1 mm.

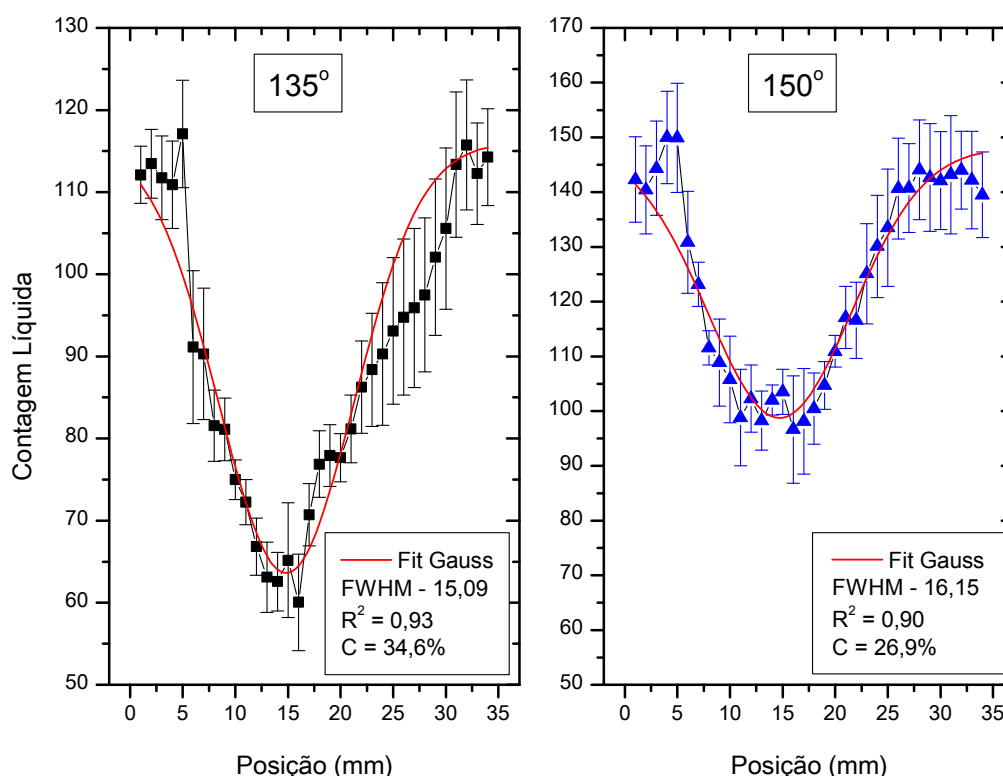


Quando o volume de inspeção intercepta a barra de aço ($\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$) mais densa do que o concreto, há um decréscimo das contagens indicando diretamente no gráfico o início do posicionamento da barra dentro da amostra. Assim que o feixe incidente ultrapassa a posição da inclusão, o valor das contagens volta a crescer. Nesta região somente o feixe espalhado está sendo atenuado pelo aço e a influência deste material vai diminuindo à medida que o feixe espalhado intercepta porções menores deste material. Ao final dessa região, as contagens voltam ao patamar inicial. Por estar em um ângulo menor, o feixe espalhado à 135° fica sob influência da barra por uma distância maior, visto que o bloco teve que ser deslocado mais 4 mm para que as contagens voltassem aos valores iniciais neste caso.

As maiores contagens obtidas em 150° são facilmente entendidas visto que a seção de choque diferencial de Klein-Nishina (eq. 08) prevê uma maior probabilidade de espalhamento neste ângulo, para a energia incidente utilizada.

O ângulo de 135° , no entanto, é o que apresenta melhor contraste ($C_{135^\circ} = 34,6\%$; $C_{150^\circ} = 26,9\%$) conforme mostra a figura 20 onde, agora, os gráficos foram colocados lado a lado para melhor visualização.

Figura 20 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois ângulos de espalhamento: 135° e 150° . Contraste calculado: $C_{135^\circ} = 34,6\%$; $C_{150^\circ} = 26,9\%$.



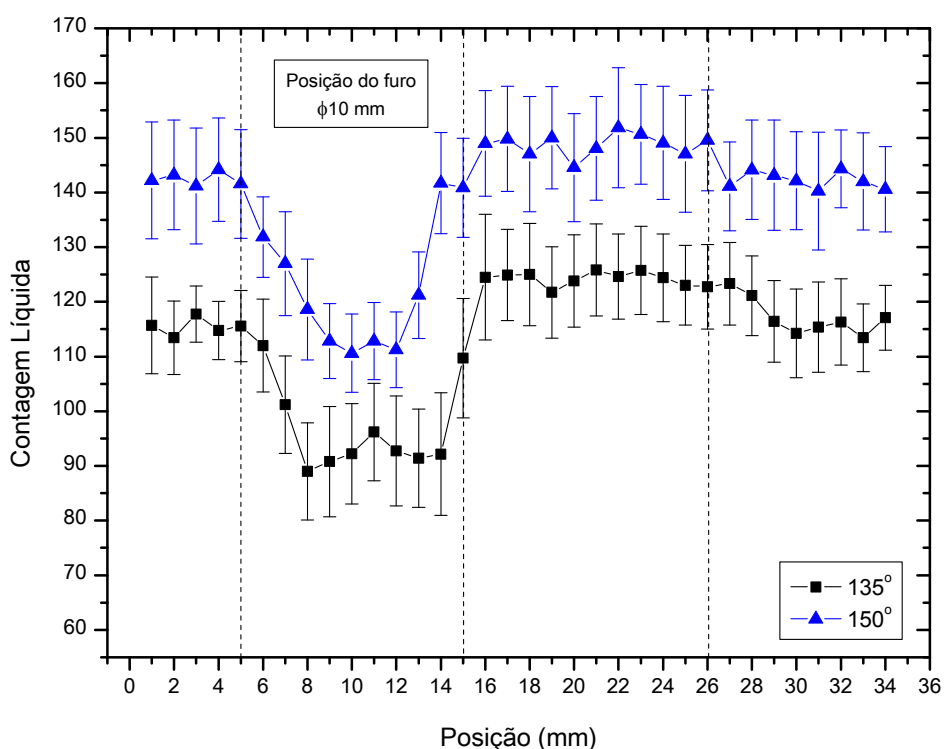
A diminuição do contraste para ângulos maiores pode ser atribuída ao tamanho do volume de inspeção. Esta região, formada pela intersecção entre os ângulos sólidos da fonte e do detector, cresce em tamanho à medida que o ângulo de espalhamento também cresce. Quanto maior o volume de inspeção menor é a resolução e o contraste de densidade, o que afeta a capacidade da técnica em distinguir pequenas regiões de diferentes materiais dentro da amostra.

Para ambos os ângulos de espalhamento os valores de FWHM encontrados no ajuste gaussiano superestimaram o tamanho da barra. Isso se deve a grande região onde o feixe retroespalhado ainda sofre influência do material mais

denso. Porém, devido ao maior contraste, o ângulo de 135° foi o que apresentou o resultado mais próximo ao valor nominal do diâmetro da barra.

Toda a análise anterior pode ser repetida para o bloco de concreto contendo um orifício vazio de Ø10 mm onde antes tínhamos a barra de aço. Para isso, na simulação atribuímos vácuo àquela região cilíndrica e refazemos a tomada dos fótons espalhados em cada ângulo em função da posição da amostra. O objetivo é avaliar a capacidade do sistema de detectar uma eventual falha no interior do concreto. O resultado da experiência é mostrado na figura 21.

Figura 21 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em dois ângulos - 135° e 150° - em função da posição do bloco de concreto contendo um orifício de Ø10 mm. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV. Varredura com passo de 1 mm.

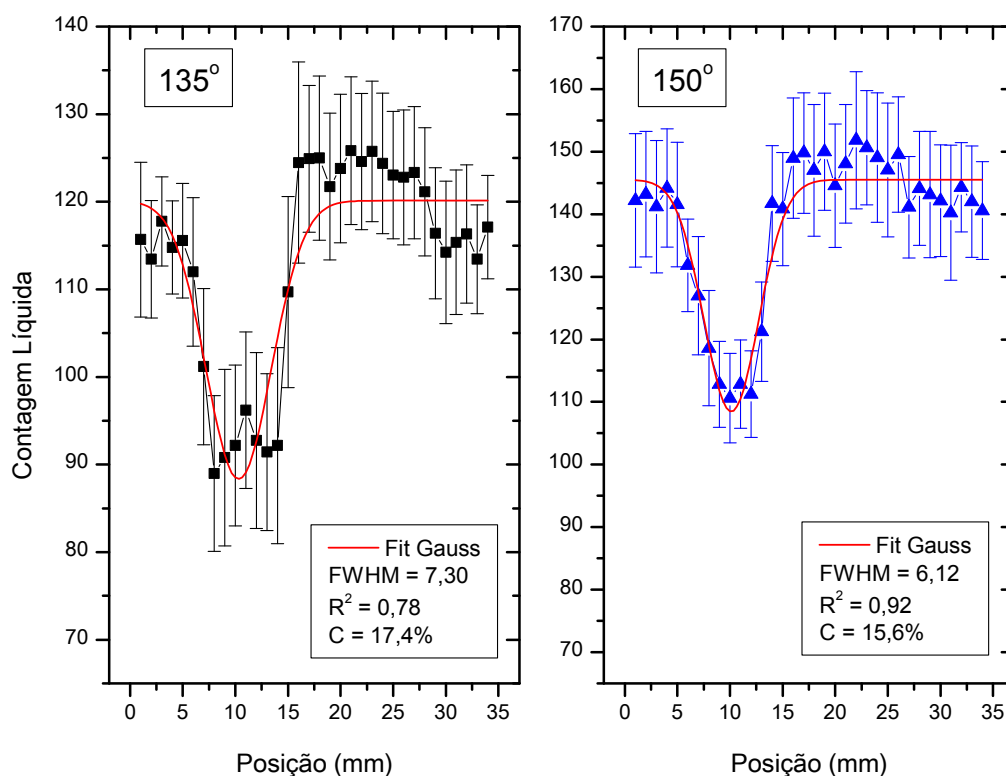


Quando o feixe incidente intercepta o orifício, o valor da contagem diminui, comportamento esse semelhante ao obtido na experiência anterior com o bloco de concreto contendo a barra de aço. No entanto, aqui não é o aumento da atenuação e sim a queda brusca da densidade eletrônica na região do furo que faz

a contagem dos fótons espalhados diminuir. A região adjacente posterior à posição do furo apresenta um comportamento característico neste caso. A intensidade espalhada é ligeiramente maior porque agora o feixe espalhado sofre menor atenuação quando passa pelo furo no caminho para fora da amostra.

Na figura 22 está representada a análise de contraste e de resolução espacial.

Figura 22 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois ângulos de espalhamento: 135° e 150° . Contraste calculado: $C_{135^\circ} = 17,4\%$; $C_{150^\circ} = 15,6\%$.



Novamente o ângulo de espalhamento de 135° graus foi que apresentou melhor contraste entre as contagens obtidas fora e dentro da inclusão. No entanto, a diferença entre os dois diminuiu visto que o valor do contraste para ambos os ângulos sofreu uma queda acentuada. A varredura em 135° também apresentou a melhor estimativa para o tamanho da falha simulada. Neste caso,

porém, ambos os valores subestimaram o valor nominal do furo de acordo como o padrão do ajuste Gaussiano adotado neste trabalho.

5.7 TESTE DE COLIMAÇÃO

A abertura e o comprimento dos colimadores usados no arranjo experimental são as principais características que definem o tamanho do volume de inspeção dentro da amostra. No caso de colimadores cilíndricos, como os usados neste trabalho, a abertura é definida com o diâmetro do orifício o qual permite que a radiação atinja o detector e o comprimento é a extensão do colimador medida em relação à direção da radiação incidente.

Conforme a abertura do colimador diminui é esperado que a taxa de contagem também diminua, devido à redução da área do detector exposta à radiação espalhada. O contraste, no entanto, deve aumentar visto a diminuição do tamanho do volume de inspeção. Com o aumento do comprimento do colimador também é esperado que as contagens diminuam e o contraste de densidade aumente. Além de alterar o tamanho do volume de inspeção, comprimentos maiores asseguram uma maior blindagem para a absorção de fótons que espalharam em outros ângulos além daqueles de interesse ou que sofreram múltiplos espalhamentos.

Alguns estudos na literatura já propuseram a aplicação da técnica de espalhamento Compton sem o emprego de colimação (MULLIN; HUSSEIN, 1994; ANGHAIE e HUMPHRIES, 1989; ANGHAIE et. al., 1990a; 1990b) ou usando colimadores de larga abertura (PRETTYMAN et al., 1993; ARENDSZ; HUSSEIN, 1995a; 1995b; JAMA et al., 1998; JAMA; HUSSEIN, 1999; HO; HUSSEIN, 2000). Apesar dos resultados promissores, este tipo de metodologia requer uma grande manipulação dos dados obtidos nos espectros de energia para corrigir os efeitos de atenuação e múltiplos espalhamentos. Outro tipo de abordagem é o uso de vários detectores (HARDING; TISCHLER, 1986; HARDING, 1989). Isso, no entanto, além de encarecer em demasia todo o aparato experimental, não se presta para um equipamento portátil como o aqui proposto.

Concluindo então que o uso de colimação para o nosso caso é imprescindível, quatro colimadores posicionados em frente ao detector com diferentes tamanhos foram testados na simulação. As dimensões dos mesmos são

dadas na tabela 4. Essas medidas foram escolhidas porque eram adequadas ao tamanho de inclusão que desejávamos detectar e, além disso, poderíamos usar colimadores de dimensões semelhantes já disponíveis no laboratório, que necessitariam de apenas algumas adaptações por meio de usinagem. A blindagem das fontes que serão usadas na parte experimental já possui uma colimação também cilíndrica de $\varnothing 2$ mm x 18 mm e esta foi mantida fixa.

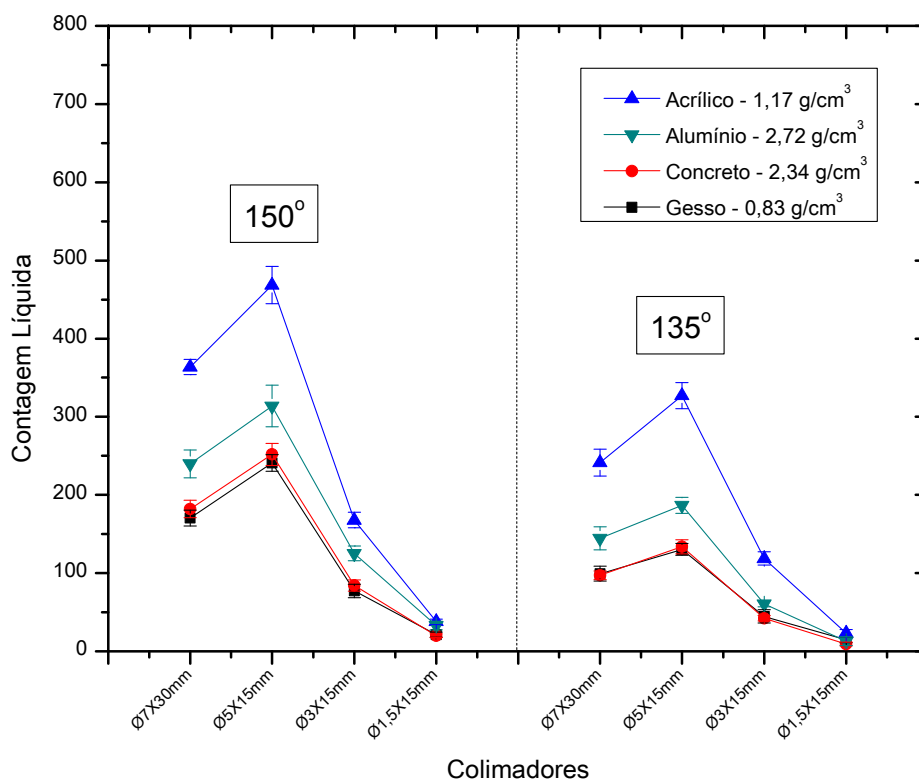
Tabela 4 – Dimensões dos quatro colimadores testados na simulação deste trabalho.

Colimador	Abertura (mm)	Comprimento (mm)
1	$\varnothing 7$	30
2	$\varnothing 5$	15
3	$\varnothing 3$	15
4	$\varnothing 1,5$	15

Na simulação o material atribuído aos colimadores foi o latão. Esta liga, composta principalmente pelos metais cobre e zinco ($\rho \approx 8,6$ g/cm³), é barata, fácil de ser usinada e pode ser fabricada com pequenas quantidades de chumbo na sua composição, fazendo com que o material apresente alto coeficiente de atenuação.

Os resultados da intensidade espalhada com os colimadores em quatro alvos distintos são mostrados na figura 23.

Figura 23 – Simulação da contagem líquida em função dos quatro tamanhos de colimadores testados. Incidência em quatro alvos diferentes e em dois ângulos de espalhamento: 135° e 150°. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV



As maiores contagens obtidas na simulação em 150° estão relacionadas com a maior probabilidade de espalhamento neste ângulo conforme comentado anteriormente. Percebe-se, no entanto, que o fenômeno de espalhamento nesta energia é mais influenciado pela atenuação e as propriedades do material do que sua densidade eletrônica. O acrílico foi o alvo que proporcionou as maiores contagens, mesmo não sendo o de maior densidade. Isso acontece porque este material tem baixa capacidade de atenuação (ver tabela 5). Outro dado interessante que pode ser tirado deste gráfico é que os perfis de espalhamento de concreto e gesso são muito semelhantes, mesmo com a diferença significativa do valor da densidade entre os dois materiais. Isso porque concreto e gesso compartilham propriedades físicas semelhantes, com a não-homogeneidade elevada e porosidade. Este fato permite o uso do gesso como simulante de concreto em amostras para os experimentos de retroespalhamento.

Tabela 5 – Densidades e coeficiente de atenuação linear dos materiais simulados como alvo para a energia de 59,54 keV.

Material	Densidade (g/cm³)	Densidade eletrônica (e⁻/cm²)*	μ (cm⁻¹)*
Acrílico	1,17	3,52 x 10 ²³	0,224
Alumínio	2,72	8,13 x 10 ²³	0,763
Concreto	2,34	7,31 x 10 ²³	0,807
Gesso	0,83	2,50 x 10 ²³	0,359

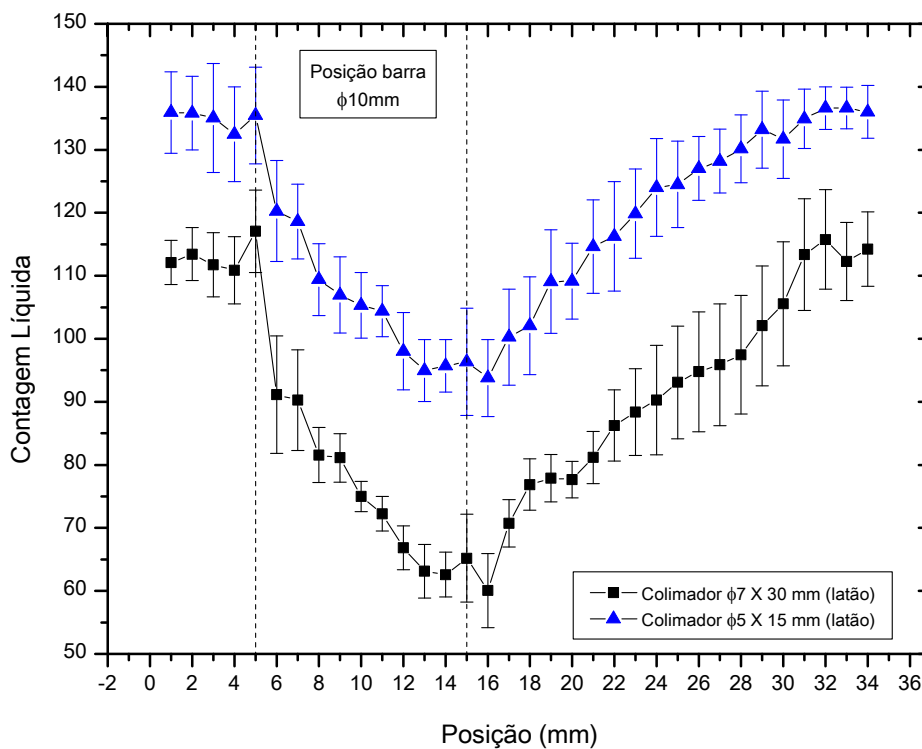
*Fonte: NIST - XCOM: Photon Cross Sections Database (NIST, 2012).

Contagens abaixo de 100 fótons espalhados como as obtidas com os colimadores de Ø3 x 15 mm e Ø1,5 x 15 mm no ângulo de 135°, foram consideradas muito baixas e por isso eles foram descartados. O emprego desses colimadores implicaria num grande aumento do tempo de contagem que, em termos práticos, inviabiliza seu uso no equipamento mesmo com eventual benefício do aumento na resolução espacial e contraste.

Entre os colimadores de Ø7 x 30 mm e Ø5 x 15 mm, este último proporcionou as maiores contagens. Apesar de possuir a menor abertura, a diminuição do seu comprimento pela metade faz com que o ângulo sólido formado pelo ponto de vista do colimador crie um volume de inspeção maior no interior da amostra.

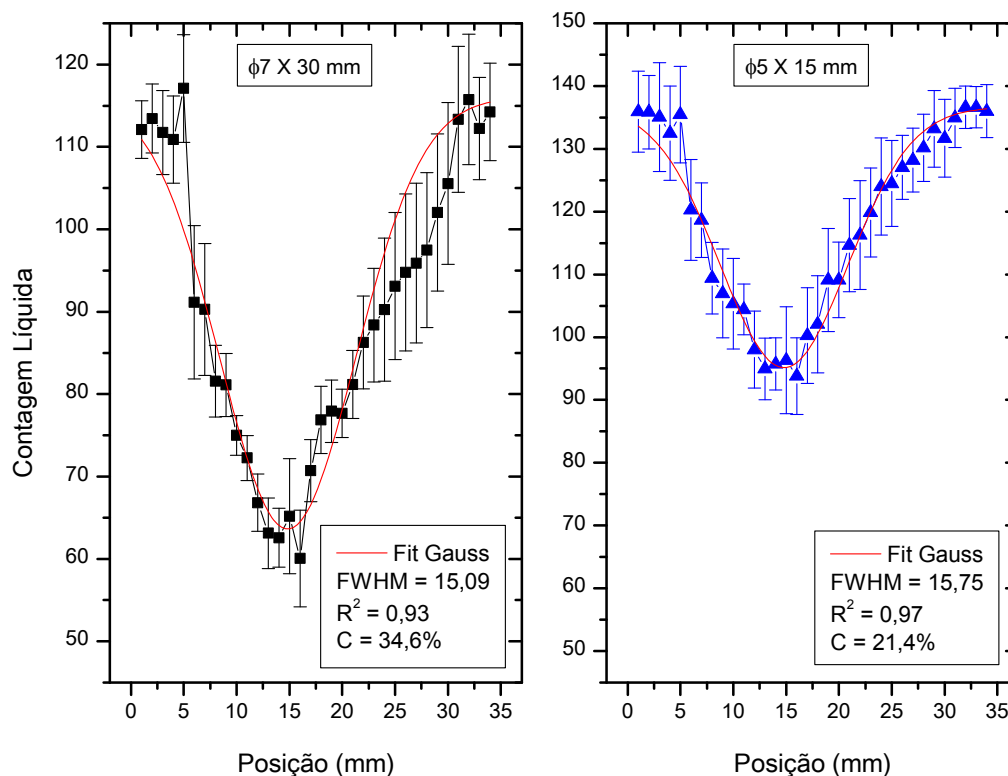
A figura 24 mostra a simulação do desempenho dos dois colimadores na detecção da barra de aço com Ø10 mm no interior do bloco de concreto. As curvas obtidas são semelhantes com as contagens voltando ao patamar inicial na mesma posição.

Figura 24 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para dois colimadores: $\varnothing 7 \times 30$ mm e $\varnothing 5 \times 15$ mm, em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de $\varnothing 10$ mm. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV. Varredura com passo de 1 mm.



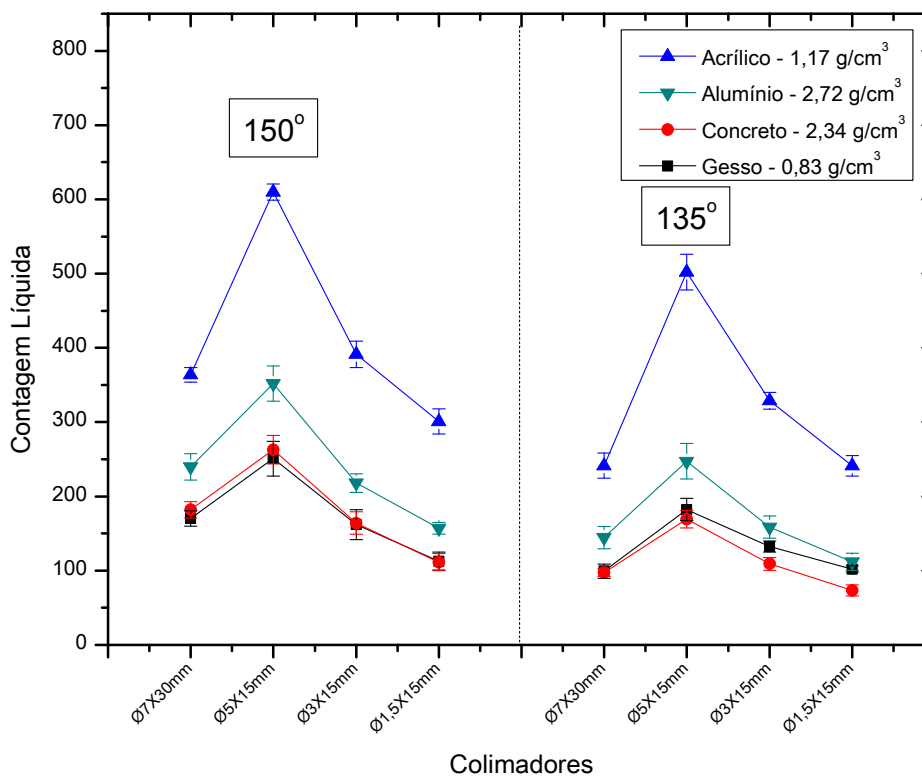
Na figura 25 temos a análise de contraste e resolução espacial entre os dois colimadores. O colimador de $\varnothing 5 \times 15$ mm apresentou o menor contraste ($C_{\varnothing 5 \times 15 \text{ mm}} = 21,4\%$), devido ao maior volume de inspeção gerado por suas dimensões. No ajuste Gaussiano, ambos os colimadores obtiveram valores de FWHM muito próximos.

Figura 25 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para os dois colimadores: $\varnothing 7 \times 30$ mm e $\varnothing 5 \times 15$ mm. Ângulo de espalhamento: 135° . Contraste calculado: $C_{\varnothing 7 \times 30 \text{mm}} = 34,6\%$; $C_{\varnothing 5 \times 15 \text{mm}} = 21,4\%$.



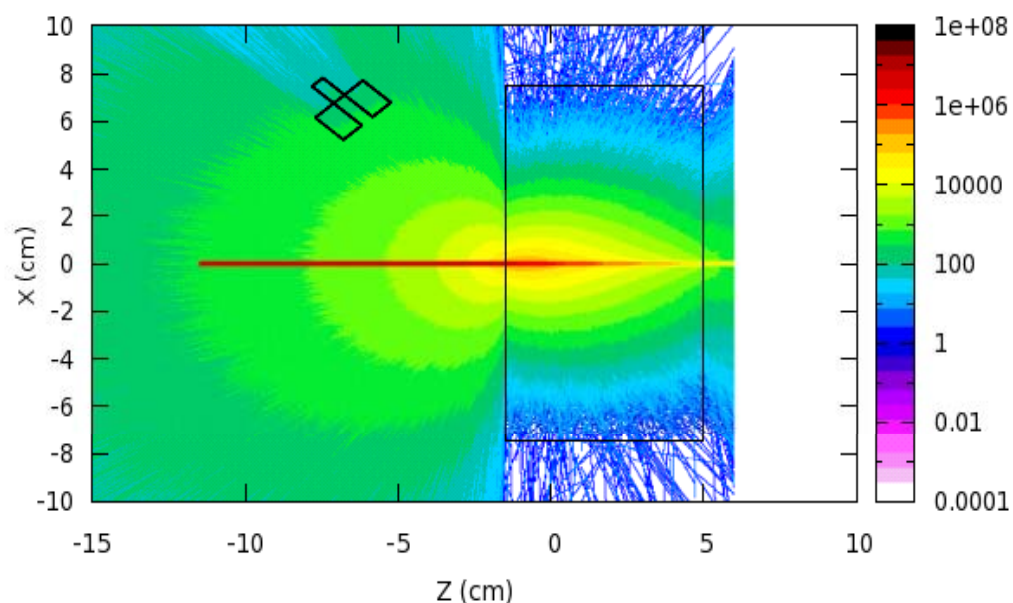
Uma simulação com os colimadores de $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm, agora feitos de alumínio, também foi realizada. Este teste tinha como objetivo verificar a possibilidade de usar elementos mais leves do que o latão no equipamento portátil, além de aproveitar colimadores já disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada na parte experimental deste trabalho. Os resultados da intensidade espalhada para esses colimadores são mostrados na figura 26. O valor obtido com o colimador de $\varnothing 7 \times 30$ mm feito em latão também é incluído no gráfico como referência.

Figura 26 – Contagem líquida simulada em função dos quatro tamanhos de colimadores: $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm feitos em alumínio e $\varnothing 7 \times 30$ mm feito em latão. Incidência em quatro alvos diferentes e em dois ângulos de espalhamento: 135° e 150° . Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV



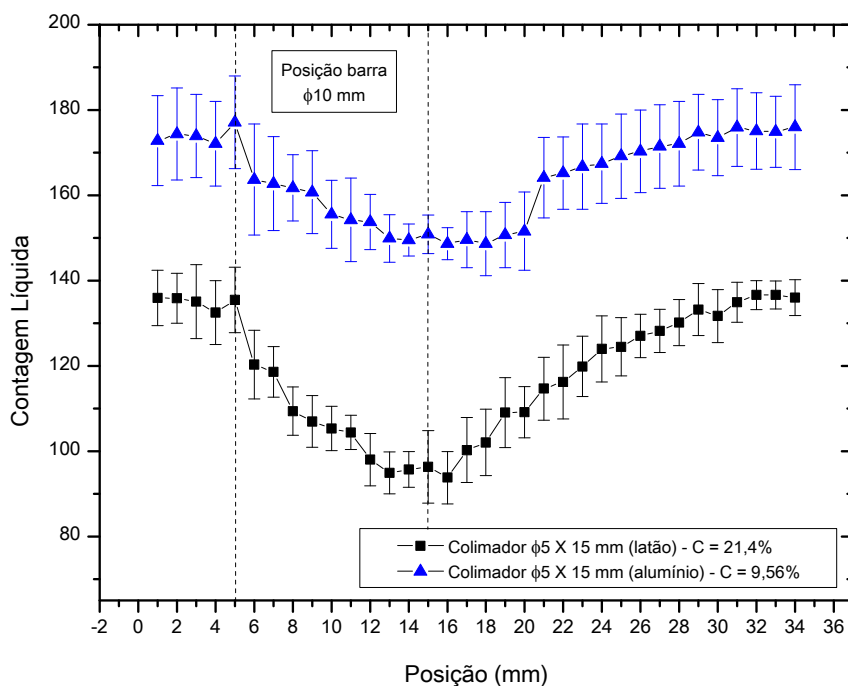
Percebe-se que houve um aumento nas contagens obtidas pelos colimadores de alumínio, principalmente nos de menor abertura, se comparadas com os valores já representados na figura 23 para os colimadores de latão. Visto que a abertura dos colimadores não foi modificada, isso indica que a espessura desses colimadores de alumínio (15 mm) não é suficiente para absorver a maioria os fótons provenientes da amostra, como podemos observar no gráfico de fluência mostrado na figura 27. De fato, considerando a energia do gama espalhado em 135° (46,66 keV) e o coeficiente de absorção linear do alumínio para essa energia ($\mu_{46,66\text{keV}} = 1,01 \text{ cm}^{-1}$) somente uma espessura de aproximadamente 29,5 mm absorveria 95% dos fótons que incidissem no colimador.

Figura 27 – Simulação de espalhamento com o colimador de 15 mm feito de alumínio mostrando que esta espessura não é suficiente para absorver os fótons espalhados provenientes da amostra. Energia incidente: 59,54 keV.



Como os colimadores de alumínio estão permitindo que fótons que espalham fora da região de interesse cheguem ao detector, isso deve gerar uma queda no valor do contraste. É justamente o que podemos observar na figura 28 onde realizamos uma comparação entre os colimadores de latão e alumínio na detecção da barra de aço no bloco de concreto. O valor do contraste calculado para o colimador de alumínio é muito pobre, apenas 9,56%, por essa razão o uso dos colimadores de alumínio com essas dimensões foi descartado.

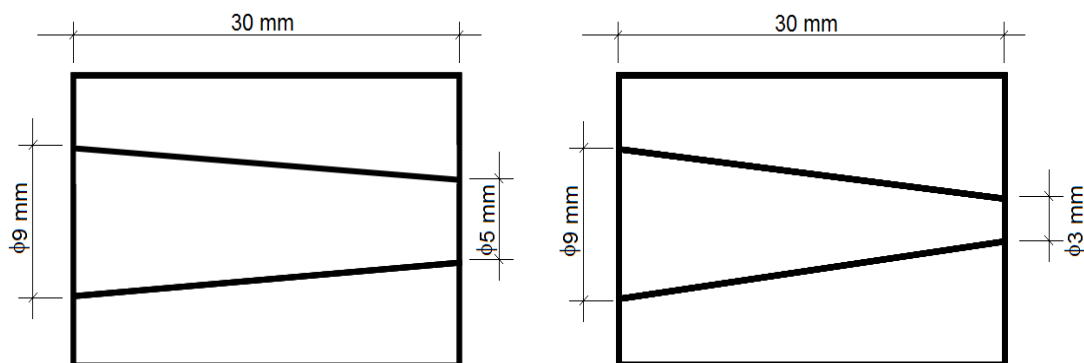
Figura 28 – Contagem líquida simulada dos fótons retroespalhados em 135° em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de $\varnothing 10$ mm, comparando dois colimadores de $\varnothing 5 \times 15$ mm feitos de latão e alumínio. Contraste calculado: $C_{\varnothing 5 \times 15 \text{mm(Latão)}} = 21,4\%$; $C_{\varnothing 5 \times 15 \text{mm(Al)}} = 9,56\%$. Energia incidente de 59,54 keV e varredura com passo de 1 mm.



Como um exercício de experimentação realizamos também uma simulação com colimadores cônicos. Em alguns trabalhos esse formato de colimador tem sido utilizado para otimizar o foco e a resolução de sistemas de imageamento e fluorescência de raios-X, apresentando melhores resultados dessas características em relação ao uso de colimadores com abertura cilíndrica paralela (FIORINI et al., 2001; SONG et al., 2003; QI, 2005). Em nosso caso, um colimador cônico permitiria também um melhor aproveitamento da área útil da janela do detector. Este formato, portanto, poderia ser uma primeira tentativa quando do estudo experimental futuro de novos tipos de colimação para o sistema de espalhamento considerado neste trabalho.

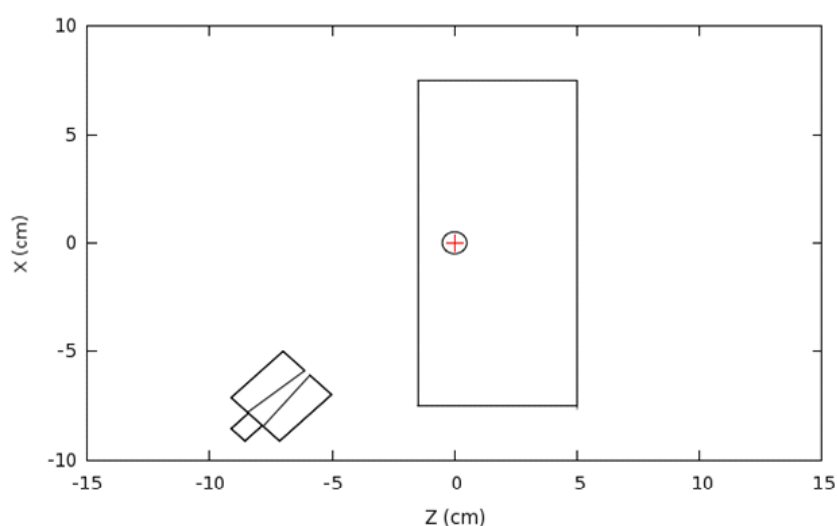
Na simulação proposta usamos dois colimadores com furos na forma de um tronco de cone. O primeiro com aberturas de $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 9$ mm e o segundo com aberturas medindo $\varnothing 3$ mm e $\varnothing 9$ mm (figura 29). Ambos os colimadores com comprimento de 30 mm e feitos de latão.

Figura 29 – Corte esquemático dos dois colimadores cônicos usados na simulação. Aberturas de $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 9$ mm (esquerda) e aberturas de $\varnothing 3$ mm e $\varnothing 9$ mm (direita)



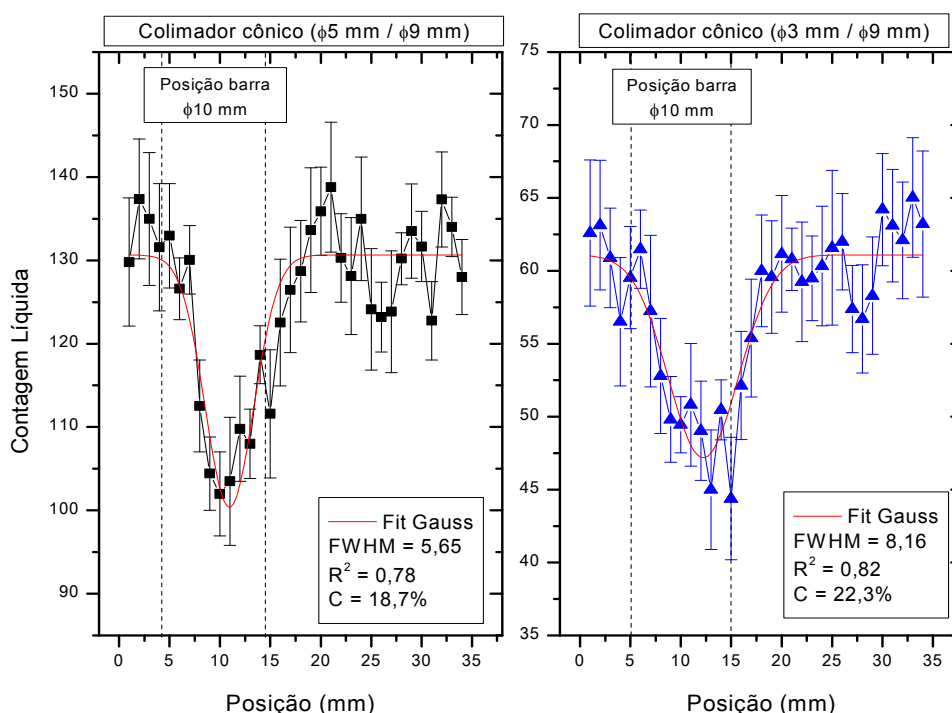
Os colimadores foram usados para a detecção da barra de aço com $\varnothing 10$ mm de diâmetro posicionada à 1,5 cm da superfície do bloco de concreto, conforme mostra a representação da geometria da simulação na figura 30.

Figura 30 – Geometria utilizada na simulação com colimadores cônicos para detecção de uma barra de aço com $\varnothing 10$ mm posicionada a 1,5 cm da superfície de um bloco de concreto (15 x 7,5 x 10 cm).



O resultado da contagem líquida em função da posição do bloco de concreto, juntamente com a análise de contraste e resolução espacial para ambos os colimadores cônicos é mostrada na figura 31.

Figura 31 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida *versus* posição simulada para os dois colimadores cônicos: $\varnothing 5$ mm / $\varnothing 9$ mm e $\varnothing 3$ mm / $\varnothing 9$ mm. Ângulo de espalhamento: 135° . Contraste calculado: $C_{\varnothing 5\text{mm}} = 18,7\%$; $C_{\varnothing 3\text{mm}} = 22,39\%$.

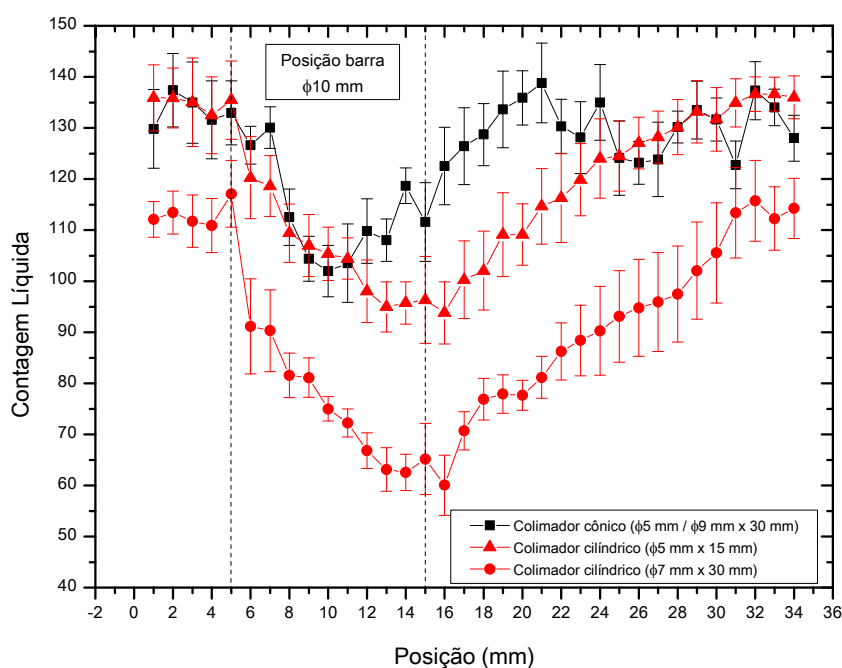


Observamos que o contraste obtido pelo colimador cônico com abertura de $\varnothing 3$ mm e $\varnothing 9$ mm ($C_{\varnothing 3\text{mm}} = 22,3\%$) foi um pouco melhor do que o calculado para o colimador cônico com abertura maior de $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 9$ mm ($C_{\varnothing 5\text{mm}} = 18,7\%$). Isso sugere uma pequena melhora no foco do volume de inspeção sobre a amostra, justificado também pelo melhor resultado do valor de FWHM em comparação com a dimensão real da inclusão de aço. Comparando os valores de resolução espacial e contraste obtidos com o colimador cônico de $\varnothing 3$ mm / $\varnothing 9$ mm e os valores anteriormente conseguidos com o colimador cilíndrico de $\varnothing 5$ x 15 mm podemos observar uma pequena melhora dos parâmetros.

No entanto, como as contagens obtidas com o colimador cônico de abertura menor foram muito baixas, e consequentemente com erros maiores, o valor do contraste mínimo neste caso foi de $C_{\min(\varnothing 3\text{mm})} = 25,1\%$. Como o contraste mínimo foi maior do que o contraste estimado pelos dados da simulação deve-se neste caso adotar tempos de contagem maiores para este colimador, com objetivo de aumentar a confiabilidade da medida, visto que essa não atingiu o patamar de 95%.

Na figura 32, comparamos o desempenho do colimador cônico de $\varnothing 5$ mm / $\varnothing 9$ mm com o resultado anteriormente obtido para a simulação da contagem líquida *versus* posição utilizando os colimadores cilíndricos de $\varnothing 5$ mm X 15 mm e $\varnothing 7$ mm X 30 mm. Nota-se que a região de atenuação somente do feixe espalhado é mais “curta” para o colimador cônico, visto que as contagens voltam aos patamares iniciais mais rapidamente e numa posição anterior se comparado aos pontos obtidos pelos colimadores cilíndricos. Neste caso, entretanto, o uso do colimador cônico não mostrou melhora significativa em relação à resolução espacial e ao contraste. Estes resultados, apesar de bastante preliminares, sugerem que o uso de colimadores cônicos pode trazer benefícios para o sistema de inspeção proposto, visto que eles têm forte influência no tamanho do volume de inspeção e nos valores de contagem. Todavia, um estudo mais detalhado da geometria e condições ideais em relação ao tempo de contagem é necessário para uma avaliação mais criteriosa.

Figura 32 – Simulação que compara os valores de contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para dois colimadores cilíndricos ($\varnothing 5$ X 15 mm e $\varnothing 7$ mm X 30 mm) e um cônico ($\varnothing 5$ mm / $\varnothing 9$ mm) em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de $\varnothing 10$ mm. Parâmetros utilizados da tabela 03 com energia incidente de 59,54 keV. Varredura com passo de 1 mm.



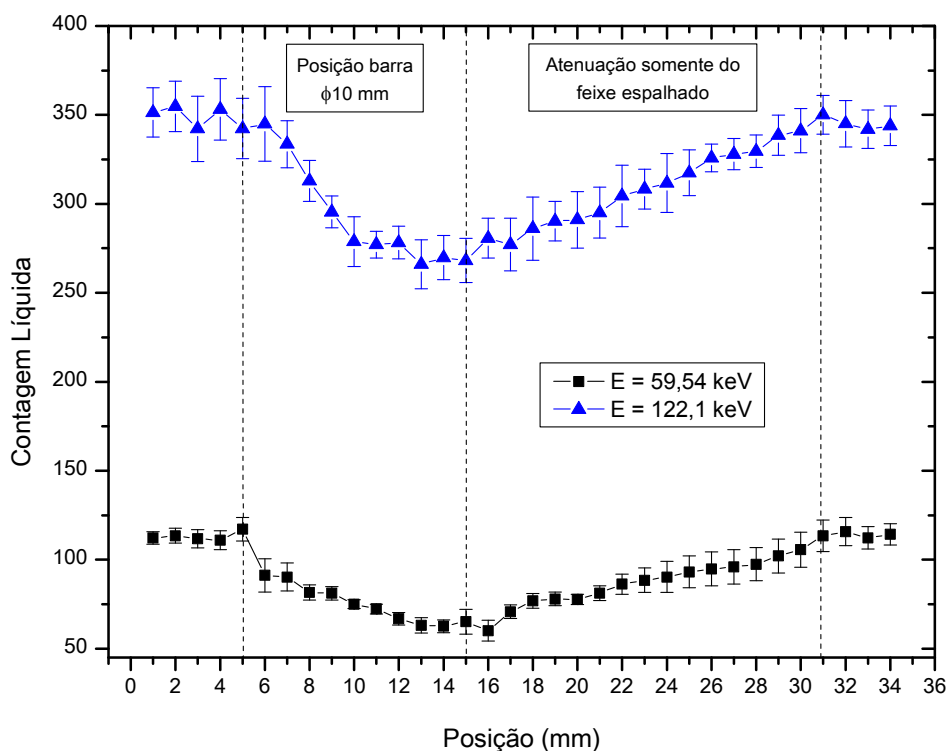
5.8 TESTE DE ENERGIA

Duas energias foram avaliadas nas simulações: 59,54 keV correspondente a energia de emissão principal do ^{241}Am e 122,1 keV que corresponde a energia emitida com maior probabilidade pelo isótopo ^{57}Co . São duas fontes de raios gama disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada e que serão testadas posteriormente na fase experimental deste trabalho.

Usar energias mais elevadas traz a vantagem da maior penetração da radiação na matéria, permitindo que inclusões localizadas numa profundidade maior dentro da amostra sejam identificadas. No entanto, pode haver um comprometimento do contraste se energias muito grandes forem utilizadas.

A figura 33 mostra a simulação da intensidade espalhada no ângulo de 135° em função da posição do bloco de concreto contendo a barra de aço de $\varnothing 10$ mm.

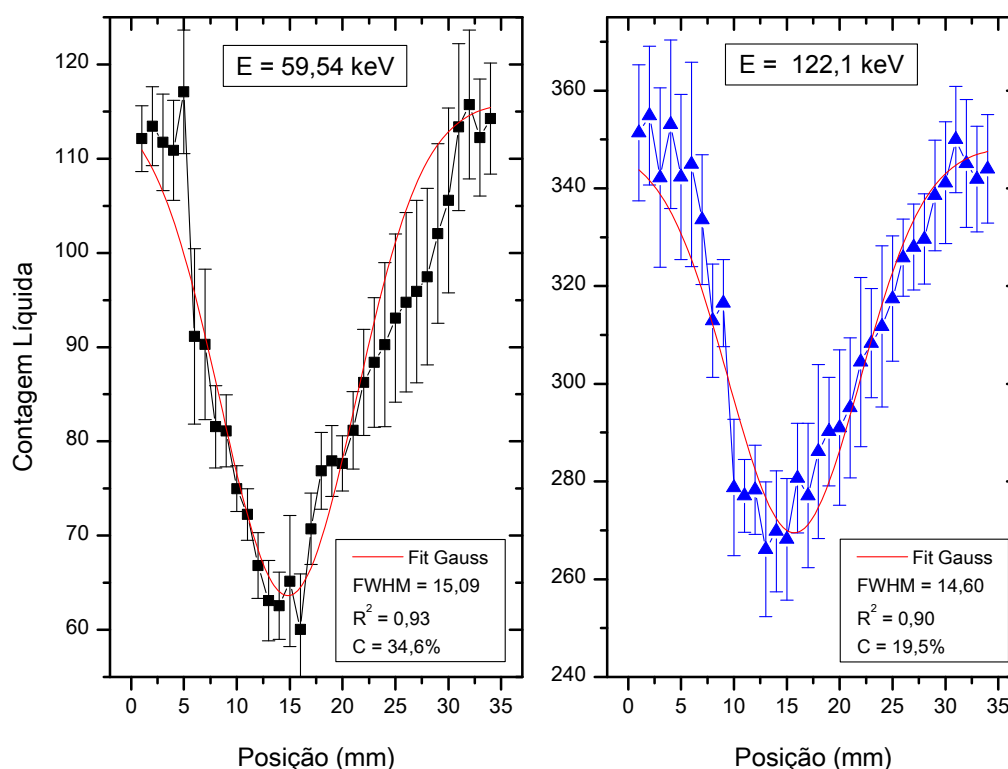
Figura 33 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para duas energias: 59,54 keV e 122,1 keV, em função da posição do bloco de concreto contendo uma barra de aço de $\varnothing 10$ mm. Varredura com passo de 1 mm.



A maior contagem de fótons obtida quando usamos a energia de 122,1 keV é devida a menor atenuação que o feixe espalhado de maior energia sofre dentro do material. Como o tamanho do volume de inspeção não sofreu alteração nas duas varreduras a posição em que as contagens voltam ao patamar inicial (ponto 31) é a mesma.

O ajuste gaussiano para a análise de resolução espacial e o contraste calculado para as duas energias estão representados na figura 34.

Figura 34 – Ajuste Gaussiano da curva de contagem líquida X posição simulada para as duas energias incidentes: 59,54 keV e 122,1 keV. Ângulo de espalhamento: 135°. Contraste calculado: $C_{59,54\text{keV}} = 34,6\%$; $C_{122,1\text{keV}} = 19,5\%$.

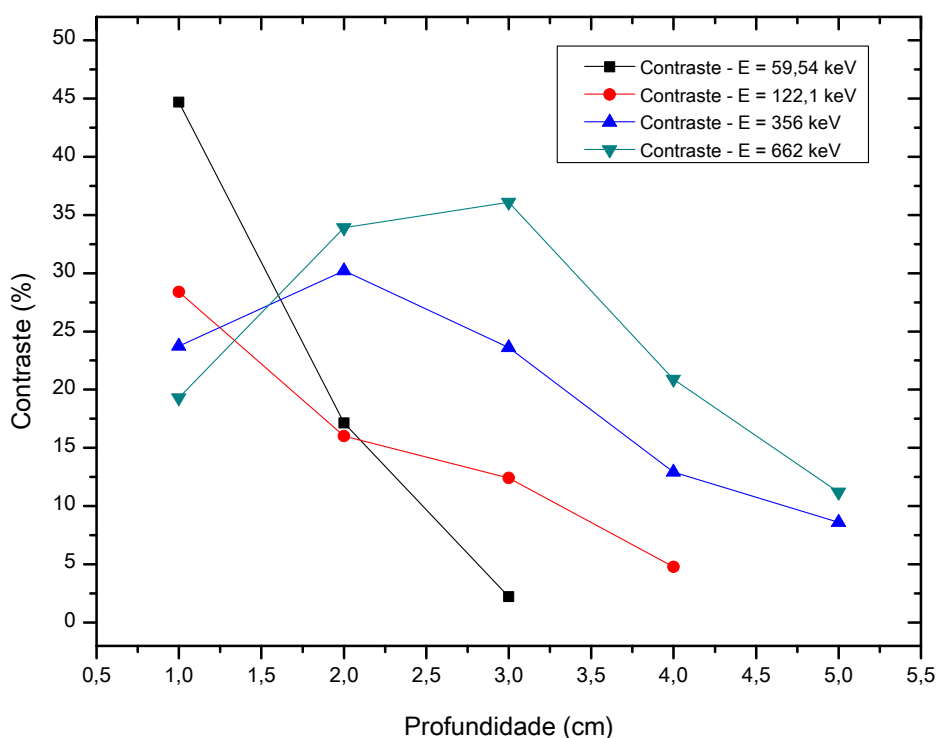


O espalhamento dentro e fora da inclusão com a energia de 59,54 keV apresenta o maior contraste ($C_{59,54\text{keV}} = 34,6\%$), devido à forte atenuação que o feixe de menor energia sofre quando intercepta a barra de aço. O valor do FWHM encontrado no ajuste para ambas as energias foi bastante semelhante. Como não

houve alteração do tamanho do volume de inspeção em teoria a resolução espacial deve ser a mesma nos dois casos.

Para exemplificar a capacidade do sistema em identificar inclusões posicionadas em uma distância maior dentro da amostra em relação ao aumento da energia, valores do módulo do contraste em função da profundidade da inclusão são mostrados na figura 35 para quatro energias. As energias de 356 keV e 662 keV estão associadas às emissões principais das fontes de ^{133}Ba e ^{137}Cs respectivamente.

Figura 35 – Simulação do contraste em função da profundidade da inclusão de aço no interior do bloco de concreto para quatro energias: 59,54 keV (^{241}Am), 122,1 keV (^{57}Co), 356 keV (^{133}Ba) e 662 keV (^{137}Cs). Ângulo de espalhamento: 135° .



Para inclusões posicionadas mais próximas da superfície da amostra o contraste apresentado pela energia mais baixa é maior visto que a atenuação é grande no material da inclusão (aço) e baixa no curto caminho percorrido dentro da amostra. À medida que a profundidade aumenta os efeitos da atenuação no

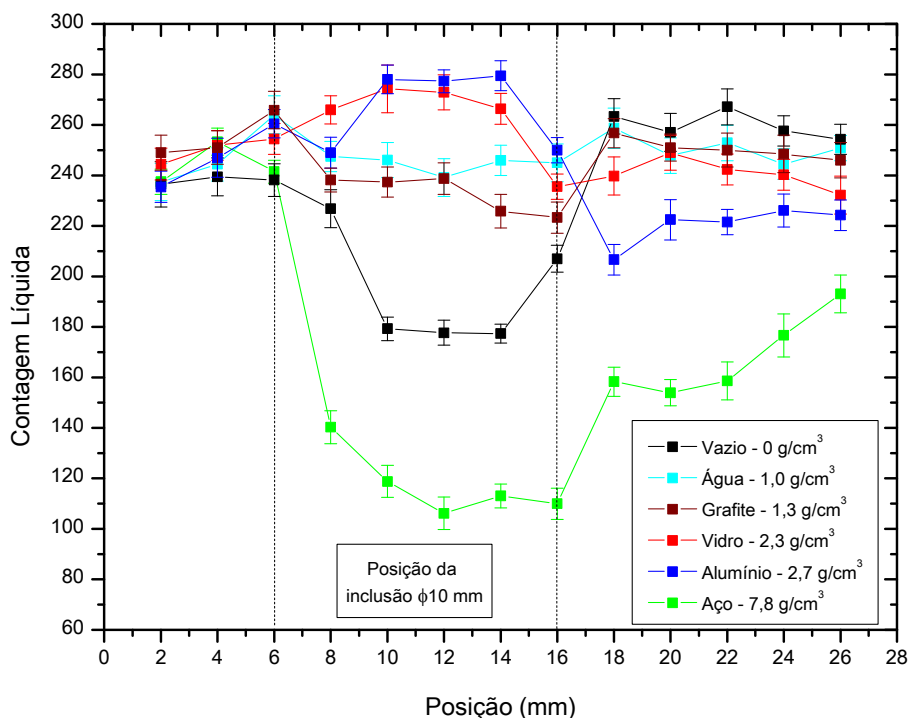
caminho percorrido pelo feixe incidente e espalhado começam a se tornar dominantes e as energias mais altas levam vantagem.

A profundidade de saturação para a energia de 59,54 keV fica em torno de 2,5 cm considerando um contraste mínimo aceitável de 10%. A partir dessa profundidade esta energia não é mais capaz de identificar inclusões de aço em concreto. Usando a energia de 122,1 keV, inclusões em até aproximadamente 3,5 cm de profundidade podem ser localizadas. Para energias mais altas esse valor aumenta conforme podemos verificar no gráfico. Essas curvas podem ser utilizadas para a calibração do equipamento com a configuração usada para se determinar a profundidade de uma inclusão em função da diminuição do contraste de densidade.

5.9 TESTE DE DIFERENCIAÇÃO DE MATERIAIS

Esta simulação tem como objetivo verificar se o equipamento proposto neste trabalho tem capacidade de distinguir materiais com diferentes densidades dentro de uma amostra. Para evidenciar a dependência da intensidade espalhada com a variação de densidade, um bloco de acrílico com dimensões de 15 cm x 10 cm x 7,5 cm foi usado como amostra. Desta forma os efeitos de atenuação no caminho percorrido pelo feixe incidente e espalhado no interior da amostra serão minimizados. No bloco de acrílico posicionamos um orifício cilíndrico paralelo a face frontal com $\varnothing 10,0$ mm de diâmetro e localizado a 1,5 cm da superfície. Nesta inclusão foram atribuídos alguns materiais com densidades diferentes e verificado a intensidade espalhada em função da posição da amostra através de uma varredura com passo de 2 mm para cada material. O resultado é mostrado na figura 36.

Figura 36 – Simulação da contagem líquida dos fótons retroespalhados em 135° para um bloco de acrílico contendo uma inclusão de vários materiais. Energia incidente de 59,54 keV e varredura com passo de 2 mm.



Pela análise da figura 36, verificamos que o sistema não conseguiu distinguir a inclusão de água ($\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$) e grafite ($\rho = 1,3 \text{ g/cm}^3$), materiais esses que possuem densidades muito próximas a da matriz de acrílico ($\rho = 1,17 \text{ g/cm}^3$) que compõem a amostra. Para materiais de média densidade como o vidro ($\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$) e alumínio ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$), há um aumento da intensidade espalhada na região da inclusão. Apesar do baixo contraste, com esses materiais podemos perceber o efeito do aumento da densidade prevalecendo sobre a atenuação na quantidade de fótons retroespalhados. Para o aço o efeito se inverte, com a atenuação predominando fortemente sobre o aumento da densidade e resultando numa queda das contagens. No entanto, através da forma da curva e do contraste podemos facilmente distinguir entre a inclusão de aço e o vazio. Para a energia incidente utilizada, o aço sempre apresentará maior contraste para uma mesma profundidade e os valores das contagens da varredura sobre o vazio voltam rapidamente ao patamar inicial assim que o feixe incidente ultrapassa a região da

inclusão. No aço devido à atenuação do feixe espalhado o sistema tem que percorrer uma distância maior para o mesmo ocorrer.

O sistema, portanto, pode distinguir entre vazios e uma inclusão mais densa, sendo adequado para o posicionamento e diferenciação entre uma falha e uma barra de reforço no concreto armado, por exemplo, mesmo havendo uma queda da intensidade espalhada nos dois tipos de inclusões.

5.10 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Visto que nos testes de energia e colimação a resolução espacial encontrada entre os valores analisados é muito semelhante, é necessário introduzir outro indicador que envolva o contraste e a taxa de contagem, a fim de se determinar qual é a melhor configuração recomendada pela simulação através da análise das variáveis dependentes descritas na seção 5.4.

Este novo parâmetro, chamado de figura de mérito (FM) é definido pelo contraste multiplicado pela média da contagem líquida na região da amostra (C_{bulk}).

$$\text{Figura de Mérito} = FM = C \times C_{bulk} \quad (19)$$

Como o alto contraste permite uma melhor detecção de materiais com diferentes densidades e o alto fluxo de fótons detectado permite reduzir o tempo de aquisição, um equipamento otimizado é aquele que possui FM máximo.

A tabela 6 agrupa os valores de FM calculado para três testes simulados anteriormente junto com a avaliação da resolução espacial entre os valores de cada teste para o posicionamento da barra de aço no interior do bloco de concreto.

Tabela 6 – Valores de FM e avaliação da resolução espacial entre parâmetros de cada teste simulado.

Teste	Parâmetro (valor)	Resolução espacial	Figura de Mérito (FM)
Teste de Ângulo de Espalhamento	$\theta = 135^\circ$	Melhor	3896
	$\theta = 150^\circ$	Pior	3819
Teste de Colimação	$\varnothing 7 \times 30$ mm	Melhor	3896
	$\varnothing 5 \times 15$ mm	Pior	2889
Teste de Energia	$E = 59,54$ keV	Igual	3896
	$E = 122,1$ keV	Igual	6793

Analisando a avaliação de resolução espacial e os valores de *FM* apresentados na tabela 06, concluímos que a melhor configuração para o sistema de espalhamento Compton preconizada pelos testes de simulação é aquela que utiliza o ângulo de espalhamento de 135° , o colimador de $\varnothing 7 \times 30$ mm e a energia de 122,1 keV.

Vale destacar que os parâmetros usados na simulação se restringiram em sua maioria aos equivalentes experimentais disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada, visto que queríamos comprovar experimentalmente as conclusões aqui obtidas. No entanto as possibilidades de ajuste são enormes e as ferramentas de simulação aqui utilizadas se mostraram extremamente úteis para esse estudo de otimização dos parâmetros utilizados no aparato experimental.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Em função dos resultados promissores obtidos pela simulação de Monte Carlo, um aparato experimental foi montado no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UEL com o objetivo de por em prática a inspeção de materiais utilizando a técnica retroespalhamento Compton. Os equipamentos que compõem o sistema de inspeção, as amostras e o método são descritos a seguir.

6.1 FONTES DE GAMA

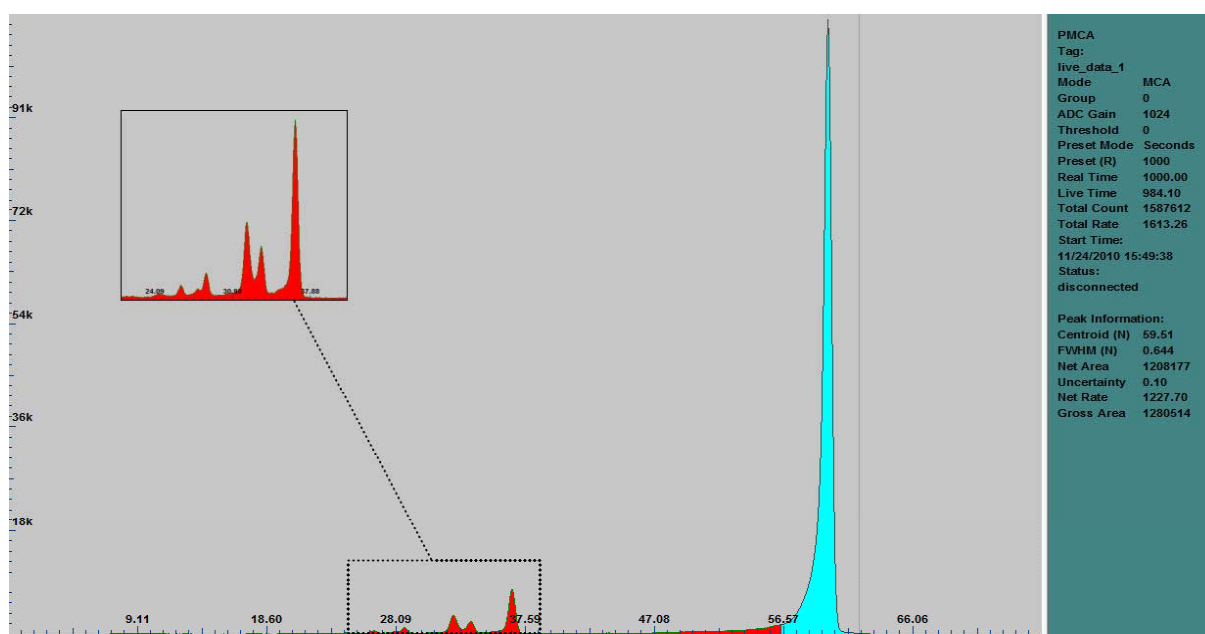
A escolha de uma fonte de raios gama como forma de radiação usada por um dispositivo portátil de espalhamento Compton para realização de testes não destrutivos traz alguns benefícios. Fontes de gama são leves, pequenas e não precisam de equipamentos adicionais que forneçam eletricidade para operar, como no caso de um tubo de raios-X.

Além disso, a radiação gama possui boa penetração na matéria e há uma boa variedade de energias disponíveis comercialmente. O espectro de energia de uma fonte de raios gama é caracterizado por picos bem distintos os quais permitem a identificação precisa da energia do feixe incidente na amostra e a aplicação da relação de unicidade entre a energia e o ângulo de espalhamento. No entanto, quando utilizamos fontes gama geralmente o fluxo de radiação é muito menor do que o obtido por um tubo de raios X, por exemplo, levando a tempos de varredura mais elevados. A faixa de energia utilizada também deve ser convenientemente escolhida visto que fontes com energia muito elevada exigem uma blindagem compatível para a proteção radiológica do usuário.

Neste sentido duas fontes disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada foram escolhidas para a realização dos experimentos: o Amerício 241 (^{241}Am) e o Cobalto 57 (^{57}Co).

O ^{241}Am possui meia vida de 432,2 anos e decai por fissão espontânea para um estado excitado do elemento ^{237}Np (Neptúnio) através de uma emissão α . Este, por sua vez, quando se de-excita emite radiação gama com probabilidade de 85,2% para a energia de 59,54 keV (LEDERER, 1978). O espectro de energia do ^{241}Am é mostrado na figura 37.

Figura 37 – Espectro de energia (contagens x energia) da fonte de ^{241}Am . A região de interesse (ROI) selecionada (em azul) corresponde ao pico de 59,54 keV. Tempo de aquisição 1000s.

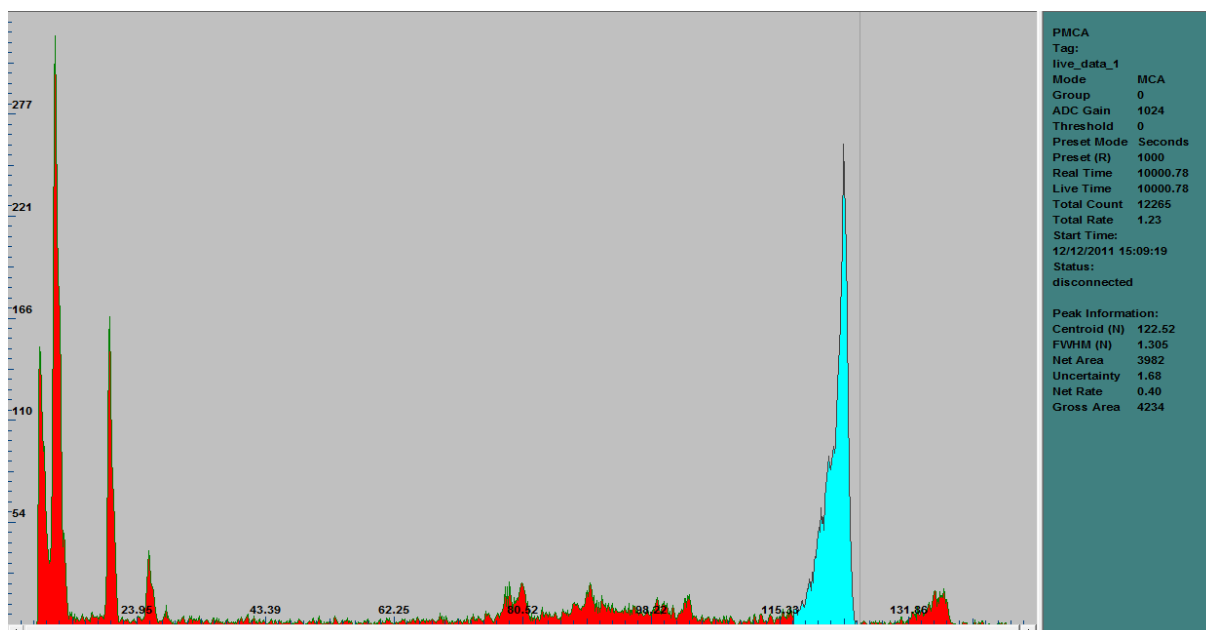


A fonte de ^{241}Am utilizada possui atividade de 100 mCi e é encapsulada num disco metálico, modelo AMC 66 da Amerisham International. Devido à baixa energia do gama emitido, o valor da Camada Semi-Redutora³ no chumbo para o Amerício é de apenas 0,01 cm (RADIATION SAFETY, 2011). Isso permite o uso da fonte com segurança pelo operador mesmo com blindagem de espessura reduzida.

O ^{57}Co possui meia vida de 271,8 dias e se desintegra por captura eletrônica gerando o elemento ^{57}Fe . No processo ele emite um gama principal de 122,1 keV com 85,6% de probabilidade. O espectro de energia do ^{57}Co esta representado na figura 38.

³ A camada semi-redutora, também conhecida como camada de meio valor, é a espessura de um material que atenua o feixe de raios gama incidente em 50% de seu valor original.

Figura 38 – Espectro de energia (contagens x energia) da fonte de ^{57}Co com o pico principal de 122,1 keV selecionado em azul. Tempo de aquisição 10000s.



A fonte de ^{57}Co usada nos experimentos possui atividade de 57 mCi e é selada num disco semelhante ao da fonte de ^{241}Am . O valor da Camada Semi-Redutora do cobalto no chumbo também é baixo, menor que 0,1 cm (RADIATION SAFETY, 2011).

Ambas as fontes são acondicionadas numa caixa de chumbo com abertura de colimação dupla medindo $\varnothing 2$ mm para evitar a divergência acentuada do feixe.

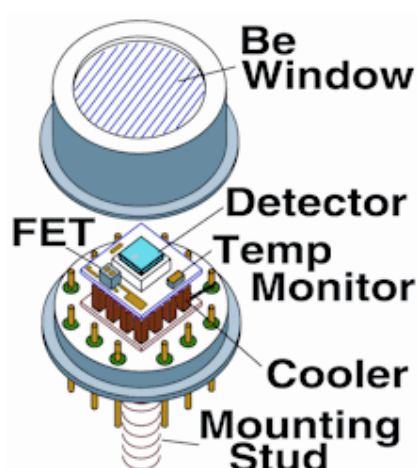
6.2 DETECTOR

Com o avanço tecnológico e a miniaturização dos componentes eletrônicos, hoje dispomos de detectores de alta resolução em energia e tamanho reduzido, ideais para o uso em equipamentos portáteis.

Para registrar a radiação espalhada nos experimentos deste trabalho escolhemos um detector semiconductor de CdTe (telureto de cádmio) modelo X-123 da fabricante Amptek Inc.

O cristal do detector possui 9 mm² de área, 1 mm de espessura e é resfriado por efeito termoelétrico de 2 estágios. Ele fica protegido por uma janela de berílio com 100 µm de espessura (figura 39).

Figura 39 - Diagrama do detector de CdTe mostrando a janela protetora de berílio, o cristal e o sistema de resfriamento (extraído de AMPTEK, 2011).

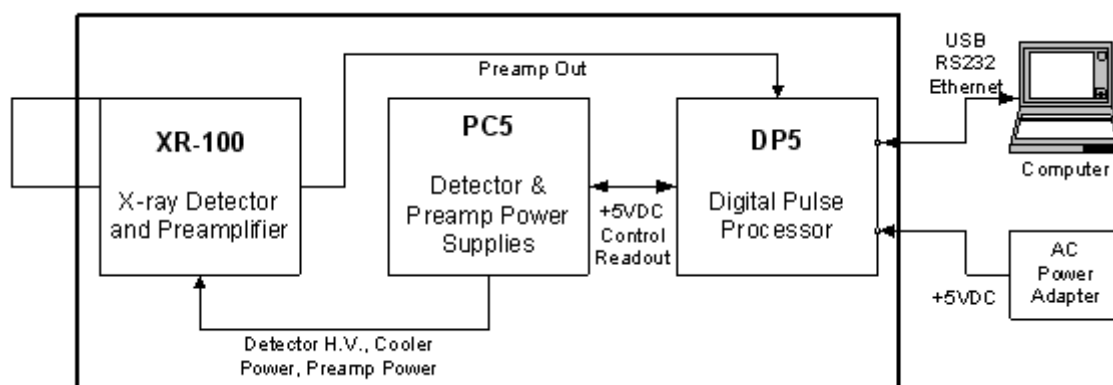


O detector mais a eletrônica necessária para análise do sinal gerado pela radiação formam um sistema integrado pequeno (7 x 10 x 2,5 cm) e leve (180 g) como mostra a figura 40. Dentro da sua caixa já estão embutidos o pré-amplificador e o analisador multicanal (MCA). Para funcionar, o conjunto só precisa de uma fonte de 5 V e um cabo USB ligado a um computador para a aquisição dos dados. Um diagrama da arquitetura do conjunto e das conexões necessárias é apresentado na figura 41.

Figura 40 – Visão do detector de CdTe modelo X-123 da Amptek Inc. usado neste trabalho (extraído de AMPTEK, 2011).



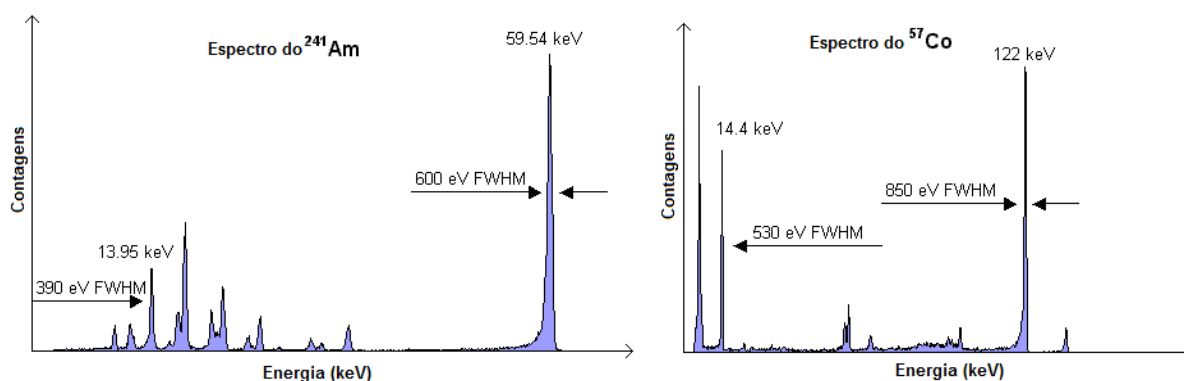
Figura 41 – Diagrama da arquitetura e das conexões necessárias para alimentação e aquisição de dados do detector de CdTe X-123 (extraído de AMPTEK, 2011).



A resolução do detector⁴ para as energias empregadas neste trabalho são mostradas na figura 42. Para o ^{241}Am a resolução no pico principal de 59,54 keV é de 600 eV. Para a fonte de ^{57}Co o valor da resolução é de 850 eV na linha de 122,1 keV.

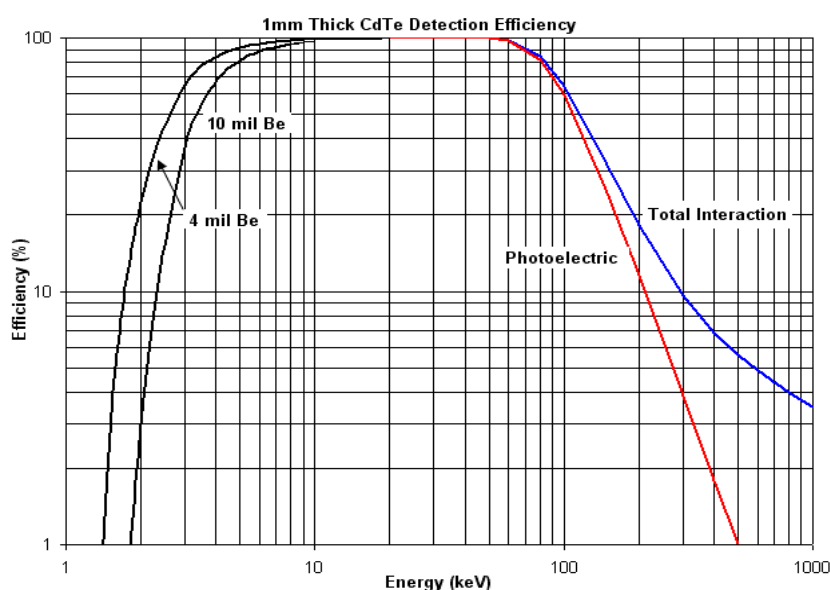
⁴ Medida da largura a meia altura de um único pico em uma determinada energia. Quanto melhor a resolução (menor FWHM) melhor é a capacidade do detector em distinguir dois valores de energia próximos.

Figura 42 – Resolução do detector de CdTe X-123 para as energias principais das fontes de ^{241}Am (esquerda) e ^{57}Co (direita) (extraído de AMPTEK, 2011).



Além do tamanho reduzido outro fator levado em consideração na escolha deste detector foi a faixa de energia na qual vamos trabalhar. Considerando o feixe incidente proveniente das fontes de ^{241}Am e ^{57}Co , o feixe espalhado em 135° terá energias de 49,66 keV e 86,72 keV respectivamente. Estes valores se encontram na faixa próxima a 100% da eficiência intrínseca⁵ do detector como pode ser verificado no gráfico da figura 43.

Figura 43 – Gráfico log-log da eficiência do detector de CdTe X-123 entre 1 keV e 1 MeV (extraído de AMPTEK, 2011).



⁵ $\epsilon_{\text{intrínseca}} = (\text{eventos detectados} / \text{eventos incidindo no detector}) \times 100\%$

6.3 AMOSTRAS

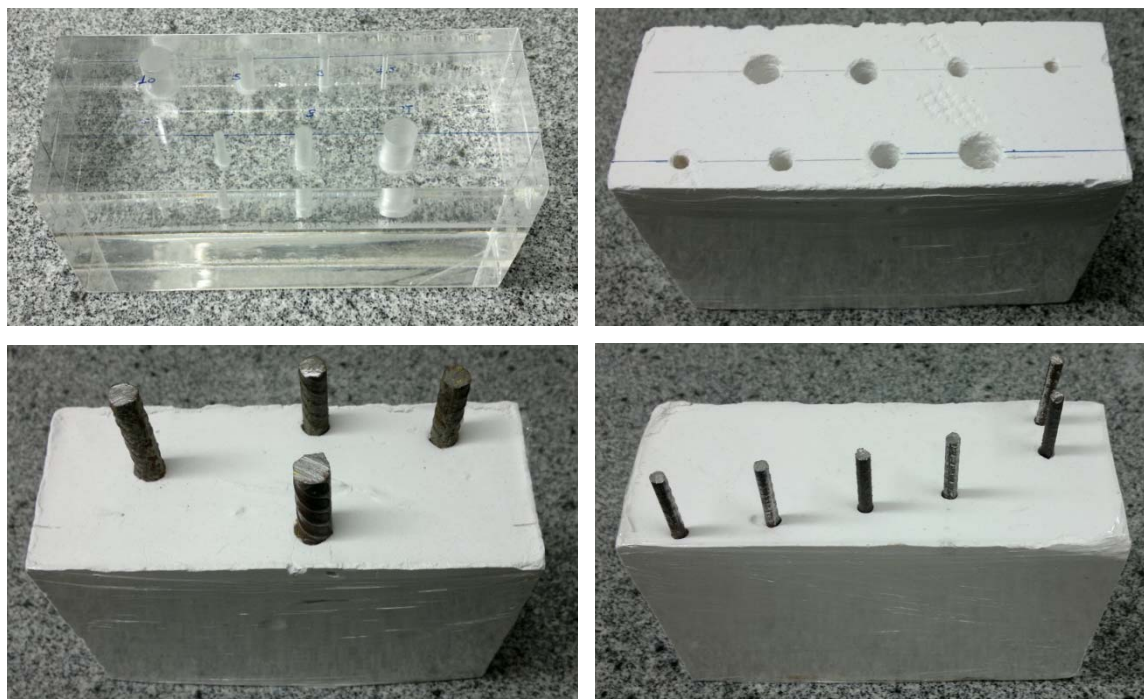
Um conjunto de amostras foi construído para investigar os diferentes aspectos da configuração do sistema de espalhamento Compton.

Para verificar a desempenho do sistema na localização de falhas, foi feito um bloco de acrílico ($\rho = 1,17 \text{ g/cm}^3$) de 15 x 6 x 7 cm com oito orifícios colineares cilíndricos de $\varnothing 10 \text{ mm}$, $\varnothing 5 \text{ mm}$, $\varnothing 3 \text{ mm}$ e $\varnothing 1,5 \text{ mm}$ simulando defeitos, com espaçamento de 25 mm entre eles e posicionados a 11 mm e 19 mm da superfície do bloco. Para a mesma finalidade também foi manufaturado um bloco de gesso ($\rho = 0,83 \text{ g/cm}^3$) com 15 x 7,5 x 10 cm perfurado com orifícios colineares cilíndricos de $\varnothing 12,3 \text{ mm}$, $\varnothing 8,5 \text{ mm}$, $\varnothing 6,5 \text{ mm}$ e $\varnothing 4 \text{ mm}$ com espaçamento de 22 mm entre eles e posicionados a 14 mm e 20 mm da superfície do bloco. O gesso foi escolhido por ser um material barato, fácil de ser manipulado e moldado e, como vimos nos testes de simulação, ele produz um perfil de espalhamento semelhante ao do concreto. Essas duas amostras também podem ser utilizadas para o estudo da relação entre a densidade eletrônica do alvo e variação da intensidade de fótons espalhados registrada pelo sistema, já que outros materiais podem ser inseridos nos orifícios perfurados nas amostras.

Para os testes de posicionamento de inclusões densas em materiais foi confeccionado um bloco de gesso com barras de aço ($\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$) de $\varnothing 8 \text{ mm}$ e $\varnothing 10 \text{ mm}$ de diâmetro posicionadas a 14 mm e 20 mm da superfície do bloco. Estas barras de aço são pedaços de vergalhões comerciais usados no concreto armado.

Um terceiro bloco de gesso com barras de aço de $\varnothing 5 \text{ mm}$ posicionadas em 8 mm, 12 mm, 18 mm e 24 mm em relação a superfície foi usado para a análise de contraste de densidade em função da profundidade. Fotos das quatro amostras descritas são mostradas na figura 44.

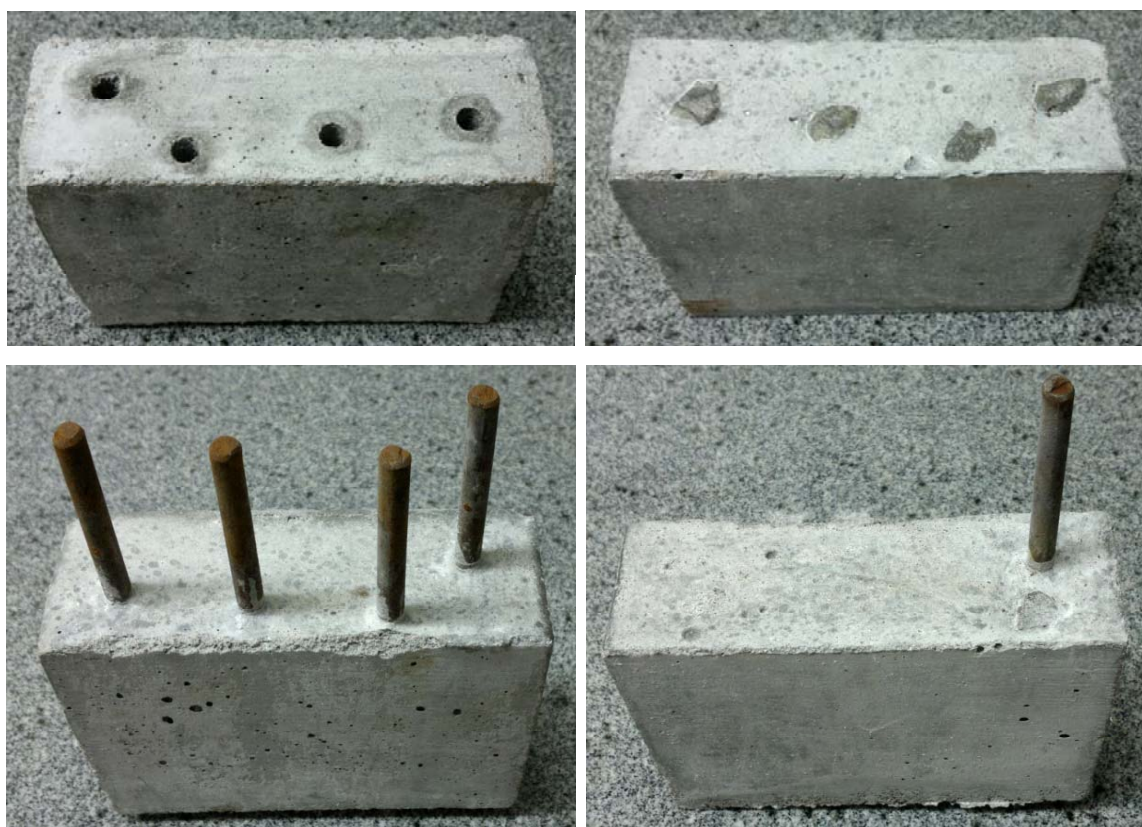
Figura 44 – Bloco de acrílico com furos (acima à esquerda). Bloco de gesso com furos (acima à direita). Bloco de gesso com barras de aço de Ø8 mm e Ø10 mm (abaixo à esquerda). Bloco de gesso com barras de aço de Ø5 mm em diferentes profundidades (abaixo à direita).



Além das amostras da figura 44 foram encomendados ao Laboratório de Materiais de Construção do departamento de Construção Civil da UEL, quatro blocos de concreto com dimensões de 15 x 7,5 x 10 cm possuindo furos, barras de aço e pedra britada em posições conhecidas (figura 45). A primeira amostra possui furos de Ø8 mm de diâmetro posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície do bloco. Na segunda foram adicionadas britas selecionadas com tamanho aproximado de Ø15 mm (devido à irregularidade das mesmas) nas posições de 10 mm, 15 mm e 20 mm em relação da superfície do bloco. No terceiro bloco foram introduzidos pedaços de vergalhões comerciais com Ø8 mm de diâmetro também posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície. Por último temos uma amostra com brita (1,5 mm da superfície) posicionada na frente de uma inclusão de aço (a 30 mm da superfície). Desta forma poderemos testar o sistema de espalhamento Compton numa situação mais real, visto que a brita é o agregado mais comum usado no concreto armado e pode influenciar a intensidade espalhada bem como a localização e posicionamento da armadura.

Argamassa para preparação dessas amostras teve proporção 1:2, ou seja, uma parte de cimento para duas partes de areia. Esta proporção é recomendada para elementos estruturais como lajes e vigas.

Figura 45 – Amostras de concreto. Bloco com furos de Ø8 mm (acima à esquerda). Bloco com britas (acima à direita). Bloco com barras de aço de Ø8 mm em diferentes profundidades (abaixo à esquerda). Bloco com barra de aço e brita (abaixo à direita)

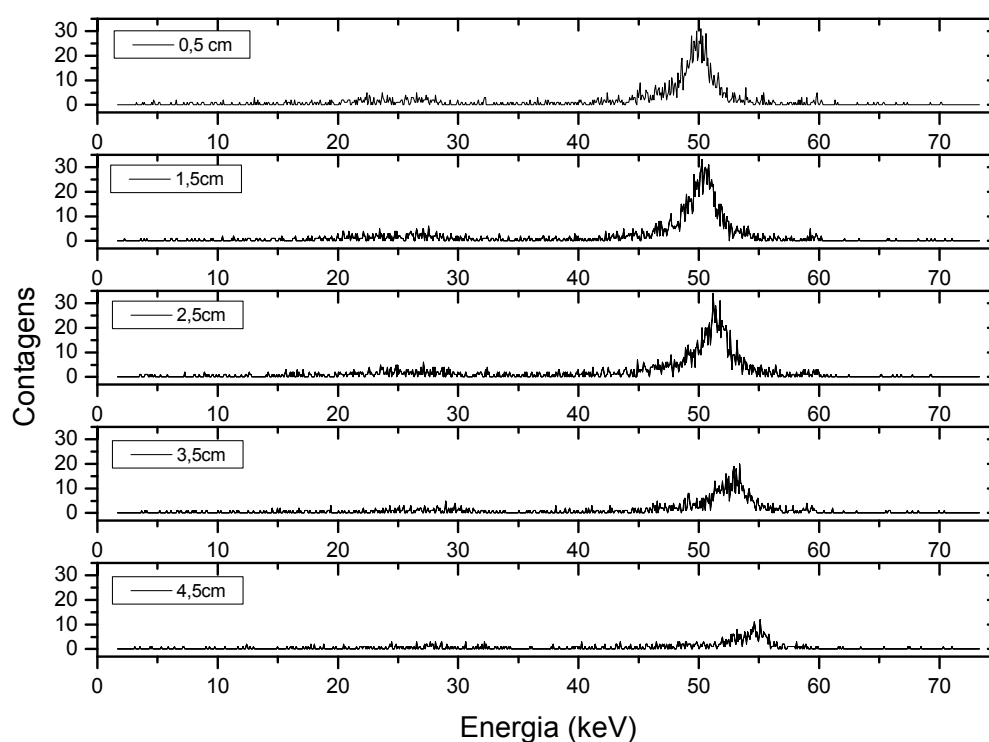


6.4 COLIMADORES

Como já comentado o uso de colimação física no detector é fundamental para a configuração do sistema de inspeção por retroespalhamento proposto neste trabalho. A colimação adequada restringe a região de interesse no interior da amostra proporcionando melhores contrastes. Além disso, sem o uso de colimação fótons que espalham fora do volume de inspeção chegam ao detector causando o efeito mostrado na figura 46. Nela estão representados cinco espectros de contagens *versus* energia, onde foi variada a distância do volume de inspeção

em relação à superfície da amostra. As contagens foram registradas sem o uso de colimação no detector. Como podemos observar, à medida que a profundidade aumenta o pico Compton se desloca para energias maiores. Isso acontece porque fótons provenientes de espalhamento em regiões próximas à superfície da amostra (fora do volume de inspeção) estão atingindo o detector. Estes fótons da superfície são de ângulos de espalhamento menores e, conseqüentemente, possuem energias maiores, ocasionando o deslocamento do pico Compton.

Figura 46 – Deslocamento do pico de retroespalhamento Compton devido a fótons espalhados fora do volume de inspeção e que atingem o detector sem colimação. Alvo: concreto, feixe incidente de 59,54 keV e ângulo de espalhamento de 135°.



Quatro colimadores cilíndricos para o detector com medidas de $\varnothing 7 \times 30$ mm, $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm foram usados. O primeiro colimador de 30 mm é feito de latão e os restantes de alumínio (figura 47).

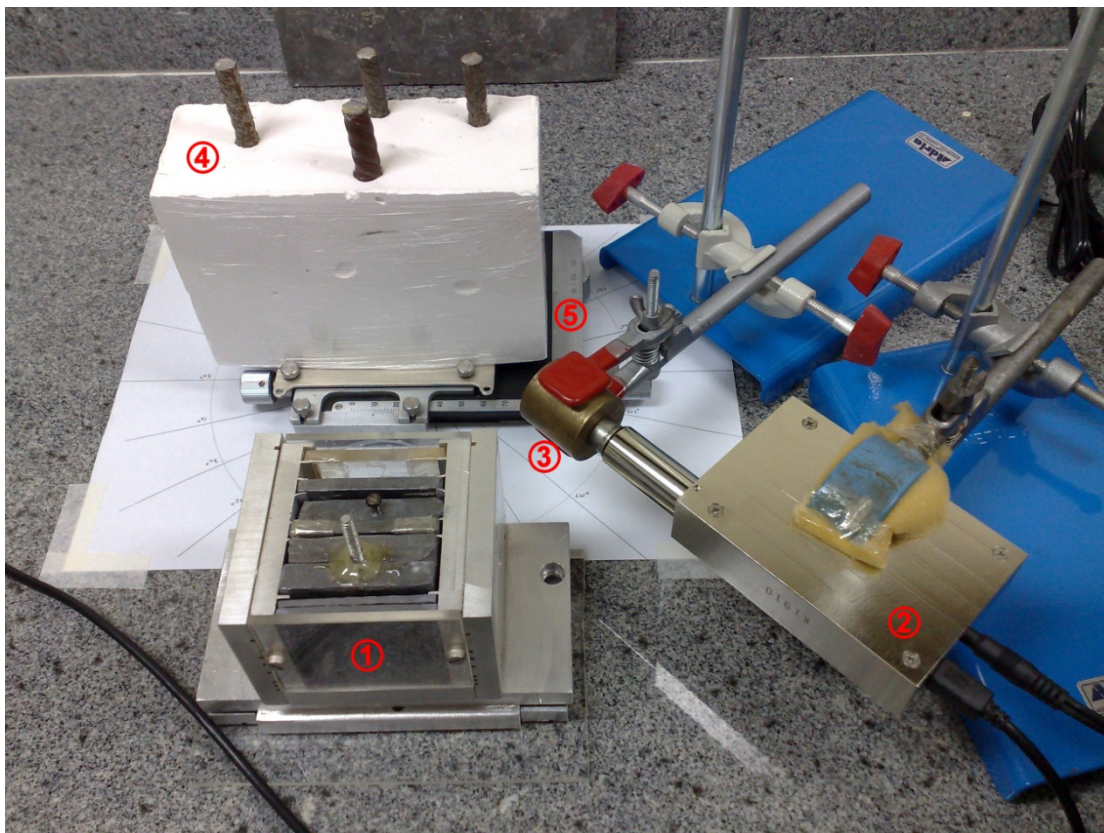
Figura 47 – Colimador de $\varnothing 7 \times 30$ mm feito de latão (esquerda); colimadores com $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm feitos de alumínio.



6.5 O MÉTODO EXPERIMENTAL

A figura 48 mostra o aparato experimental montado. A fonte gama colimada ($\varnothing 2$ mm) é posicionada a uma distância 10 cm da amostra. O detector CdTe, colocado no mesmo lado da fonte em relação a amostra, analisa o espectro de energia espalhado. A distância entre superfície da amostra e o detector também é de 10 cm. As amostras são montadas num suporte móvel que permite movimentação horizontal em duas dimensões. Portanto, para realizarmos a varredura do volume de inspeção no interior do material, conservamos o conjunto fonte e detector fixos e movimentamos a amostra lateralmente mantendo sua superfície perpendicular ao feixe incidente. Os passos utilizados foram de 1 mm e 2 mm. A cada posição a janela da fonte é aberta e iniciamos a contagem dos fótons retroespalhados. O detector é ligado diretamente a um notebook para coleta e análise dos dados.

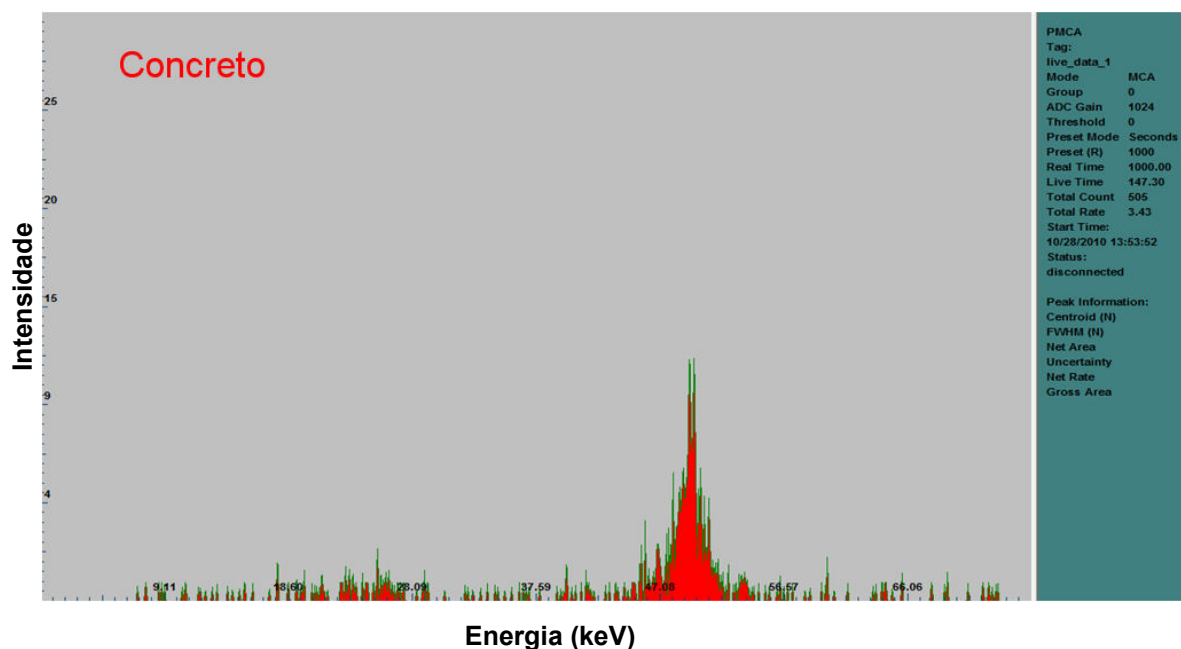
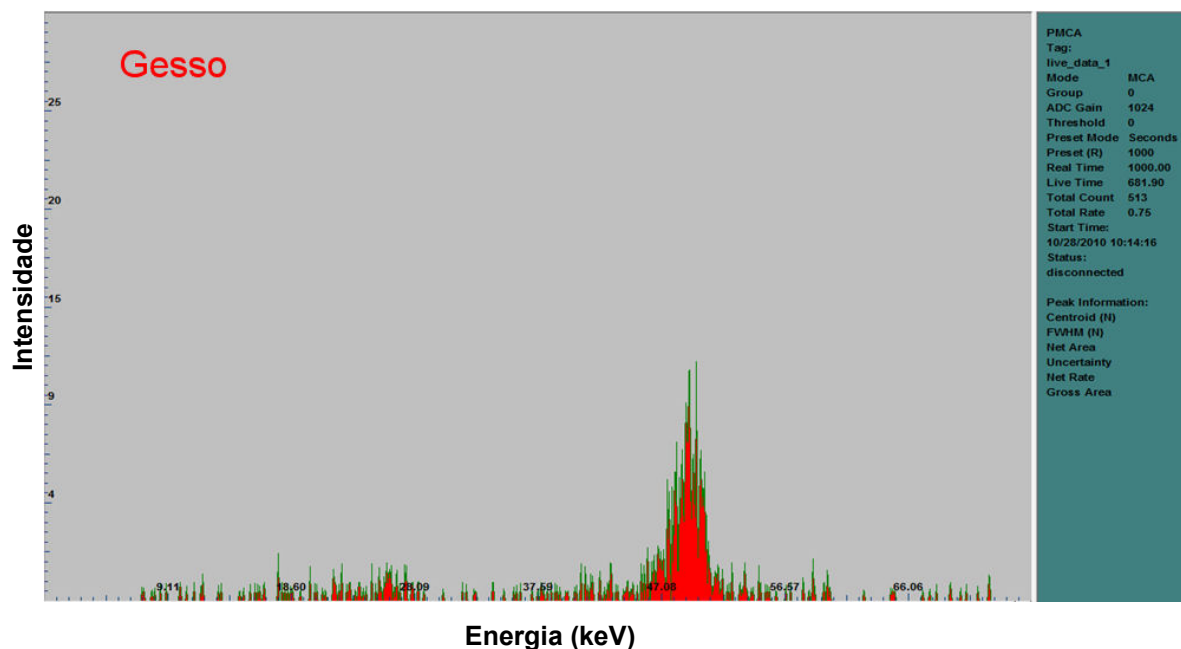
Figura 48 – Arranjo experimental do sistema de retroespalhamento Compton. 1 – Fonte radioativa. 2 - Detector. 3 - Colimador. 4 - Amostra. 5 - Suporte da amostra.

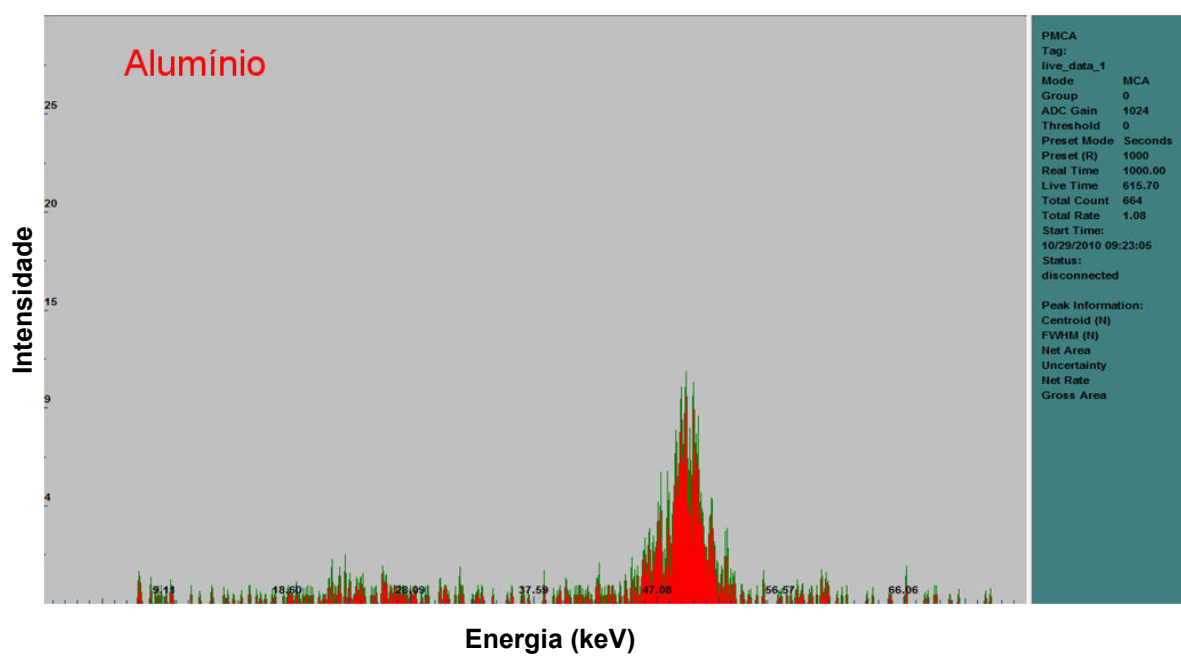
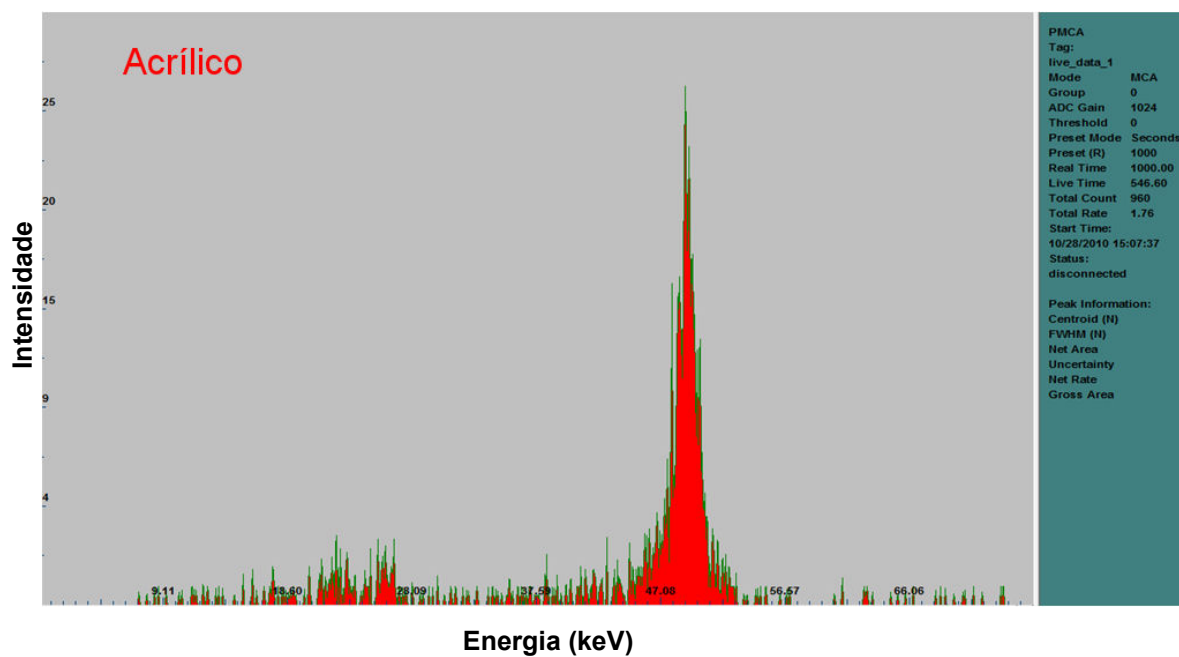


Espectros típicos de energia *versus* intensidade para quatro alvos diferentes (gesso, concreto, acrílico e alumínio) estão representados na figura 49. Estes espectros, obtidos após a calibração do sistema, mostram o pico Compton com centróide na energia de 49,66 keV correspondente ao espalhamento em 135° do feixe incidente de 59,54 keV. A contagem líquida do pico Compton que será usada nos resultados é obtida selecionando a região de interesse que inclui apenas o pico. Desta maneira, além da colimação física, fazemos uma colimação via software, descartando outras regiões do espectro que contém radiação de fundo, bem como contagens de múltiplos espalhamentos e de outras regiões que não são representativas do volume de inspeção.

Para esta análise usamos o programa *ADMCA - Display and Acquisition Software*, fornecido gratuitamente pela Amptek Inc., empresa fabricante do detector (ADMCA, 2011). Os espectros da figura 49 são exibidos na interface do programa como exemplo.

Figura 49 – Telas do aplicativo ADMCA contendo espectros típicos de intensidade *versus* energia para os alvos de gesso, concreto, acrílico e alumínio. Para o espectro de alumínio foi utilizado um pedaço deste material disponível no laboratório. Feixe incidente: 59,54 keV, ângulo de espalhamento: 135°, tempo de contagem: 1000 s.





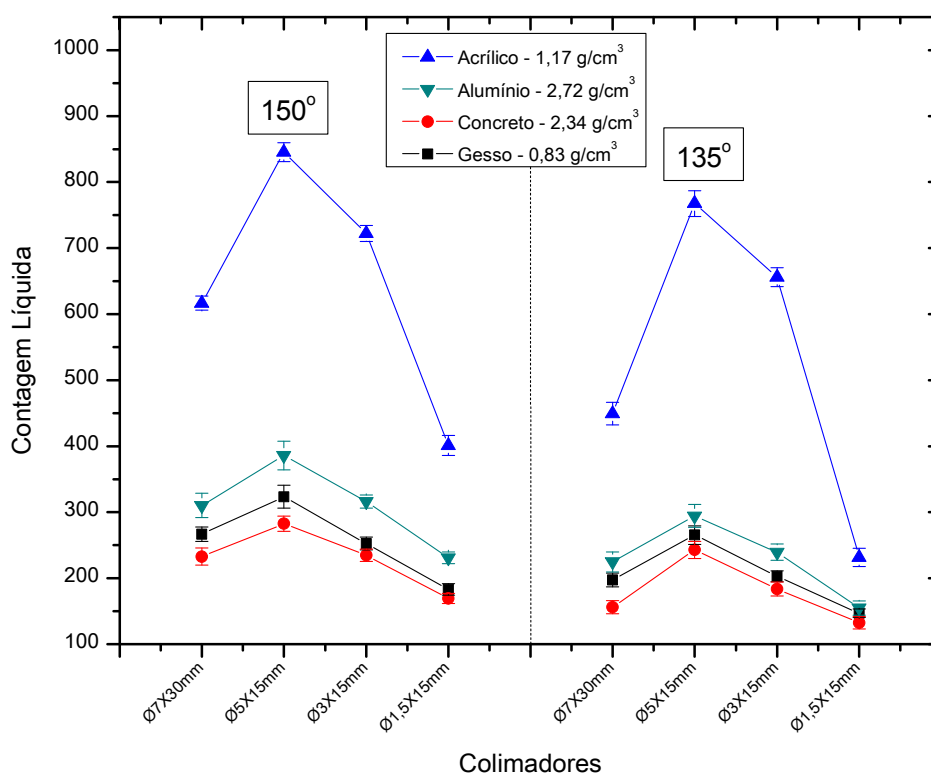
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção apresentaremos os resultados experimentais obtidos com a configuração testada na simulação com o objetivo de verificar a capacidade do arranjo experimental proposto para o posicionamento de defeitos e inclusões em materiais.

7.1 COLIMADORES

A figura 50 mostra a intensidade espalhada com os colimadores testados experimentalmente neste trabalho. Cada ponto representa a média de cinco medidas da contagem integrada do pico Compton. Dois ângulos (135° e 150°) foram testados em quatro alvos distintos: acrílico, alumínio, concreto e gesso.

Figura 50 – Contagem líquida obtida com os quatro colimadores testados ($\varnothing 7 \times 30$ mm, $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm) em dois ângulos de espalhamento (135° e 150°). Tempo de medida: 1000 s em cada ponto. Energia incidente 59,54 keV.



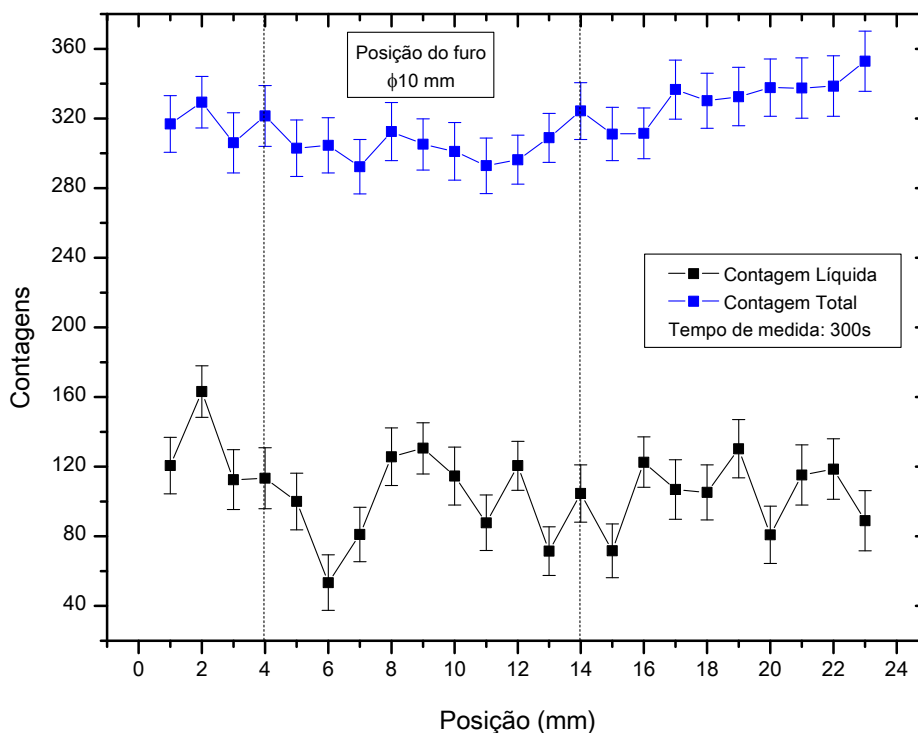
O perfil de espalhamento obtido experimentalmente com os quatro colimadores se assemelha muito com o resultado teórico da simulação representado na figura 26. As maiores contagens obtidas em 150° são devido à maior probabilidade de espalhamento neste ângulo, para a energia incidente utilizada (COOPER et al., 2004). Nota-se também que o processo é fortemente influenciado pela atenuação. As maiores contagem são obtidas com o acrílico, material que possui a segunda menor densidade, porém é o que proporciona a menor atenuação. Gesso e concreto possuem perfis de espalhamento semelhante apesar da diferença de suas densidades. Como visto na simulação, no entanto, os colimadores de $\varnothing 5 \times 15$ mm, $\varnothing 3 \times 15$ mm e $\varnothing 1,5 \times 15$ mm feitos de alumínio não possuíam espessura suficiente para atenuar com eficiência os fótons espalhados, gerando baixo contraste. Por essa razão, o uso destes colimadores de alumínio foi descartado e os próximos resultados serão apresentados utilizando-se o colimador de $\varnothing 7 \times 30$ mm feito de latão.

7.2 DETECÇÃO DE DEFEITOS

Na figura 51 está representada uma tentativa preliminar de localização de um defeito de $\varnothing 10$ mm na amostra de acrílico usando um tempo de contagem 300 s. Os pontos em preto representam a contagem líquida do pico Compton em cada posição. Os pontos em azul representam a contagem total integrada em todo o espectro de energia. Nesta fase inicial da investigação essa contagem total foi analisada porque alguns trabalhos na literatura (ARENDSZ; HUSSEIN, 1995a; 1995b; JAMA et al., 1998; HO; HUSSEIN, 2000) usavam esta informação para obter a localização de defeitos.

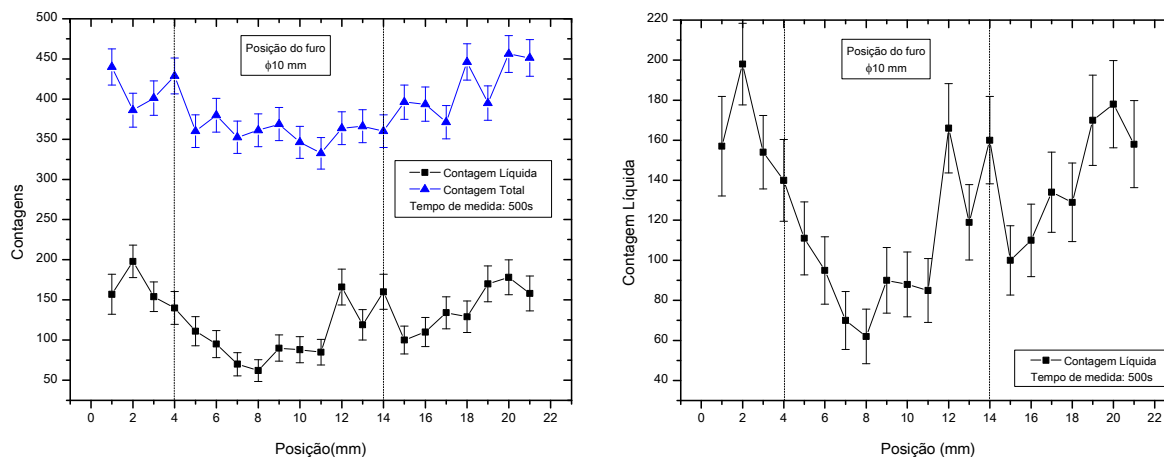
Como podemos observar nenhuma das duas contagens indica a localização do furo com uma queda da contagem como seria esperado, devido à diminuição da densidade eletrônica dentro do orifício. A variação entre valores adjacentes é atribuída somente à flutuação estatística presente neste tipo de experimento. Para a fonte de gama utilizada, portanto, conclui-se que o tempo de 300 s de medida para cada ponto é insuficiente para se obter valores estatisticamente significativos em função da baixa relação pico/fundo apresentada pelos espectros tomados com esse tempo de contagem.

Figura 51 – Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 300 s, varredura com passo de 1 mm.



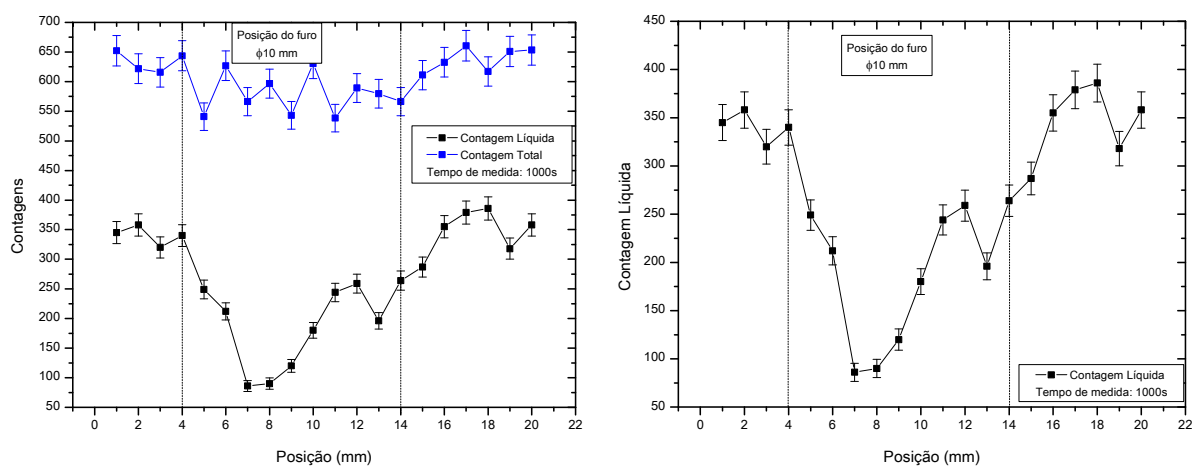
Em função dos resultados anteriores decidimos aumentar o tempo de contagem para 500 s em cada ponto (figura 52). Neste caso, apesar de presença da flutuação estatística e do erro elevado, a contagem líquida (direita) já mostra um comportamento de queda de contagem na região onde está localizado o defeito. No entanto o baixo contraste calculado entre as contagens obtidas fora e dentro o orifício indica que este tempo ainda não é suficiente para ser empregado no equipamento com confiabilidade para localização de defeitos.

Figura 52 - Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm (esquerda). Somente contagem líquida (direita). Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 500 s, varredura com passo de 1 mm.



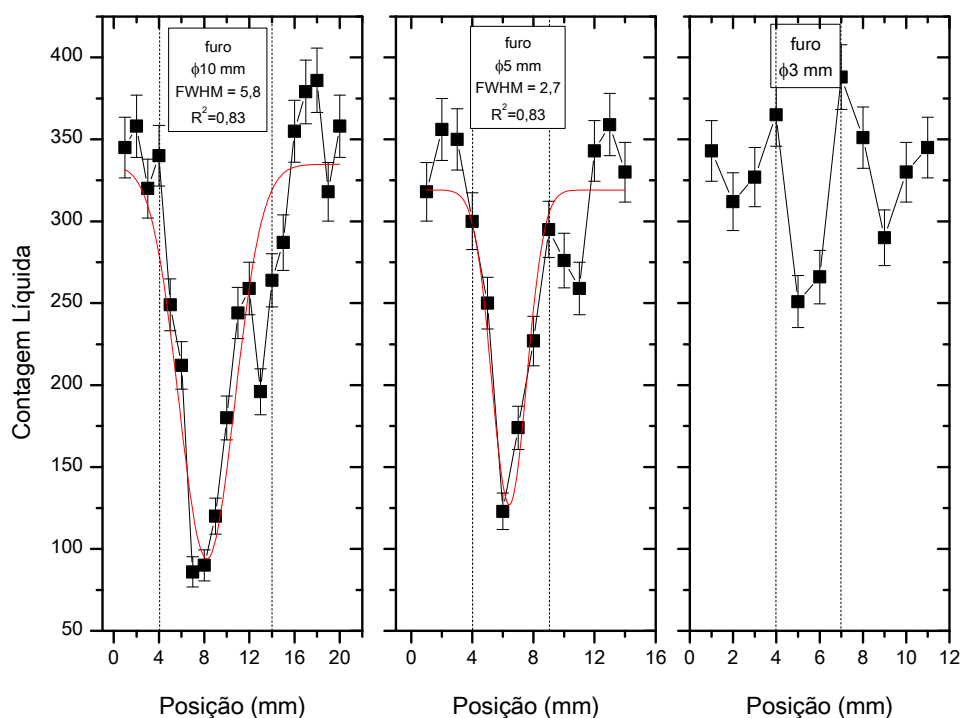
Com o objetivo de melhorar ainda mais o contraste uma varredura com um tempo de 1000 s em cada ponto foi realizada como mostra a figura 53.

Figura 53 - Contagens de fótons retroespalhados em função da posição do bloco de acrílico contendo um orifício cilíndrico de $\varnothing 10$ mm (esquerda). Somente contagem líquida (direita). Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



Podemos observar que a contagem total (em azul) ainda não é afetada pela diferença de densidade em função da presença do defeito dentro da amostra. Isso indica que a relação pico/fundo mesmo com o tempo de 1000 s ainda é baixa para que a contagem total do espectro seja influenciada pela contagem integrada apenas no pico Compton. Entretanto, a contagem líquida sugere a presença do orifício com a queda do valor da contagem nos pontos da varredura posicionados dentro do furo. O bom contraste apresentado nesta curva nos levou a considerar o uso da contagem líquida e do tempo de 1000 s por ponto como padrão para os próximos experimentos. Na figura 54 estendemos a varredura para os outros defeitos presentes na amostra medindo $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 3$ mm usando esta configuração.

Figura 54 - Contagem líquida em função da posição do bloco de acrílico contendo defeitos de $\varnothing 10$ mm, $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 3$ mm. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



O contraste calculado para os furos de $\varnothing 10$ mm, $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 3$ mm foi de $C_{10\text{mm}} = 46,6\%$, $C_{5\text{mm}} = 43,3\%$ e $C_{3\text{mm}} = 21,2\%$ respectivamente. O valor do contraste diminui porque o volume de inspeção, com tamanho fixo, ilumina uma

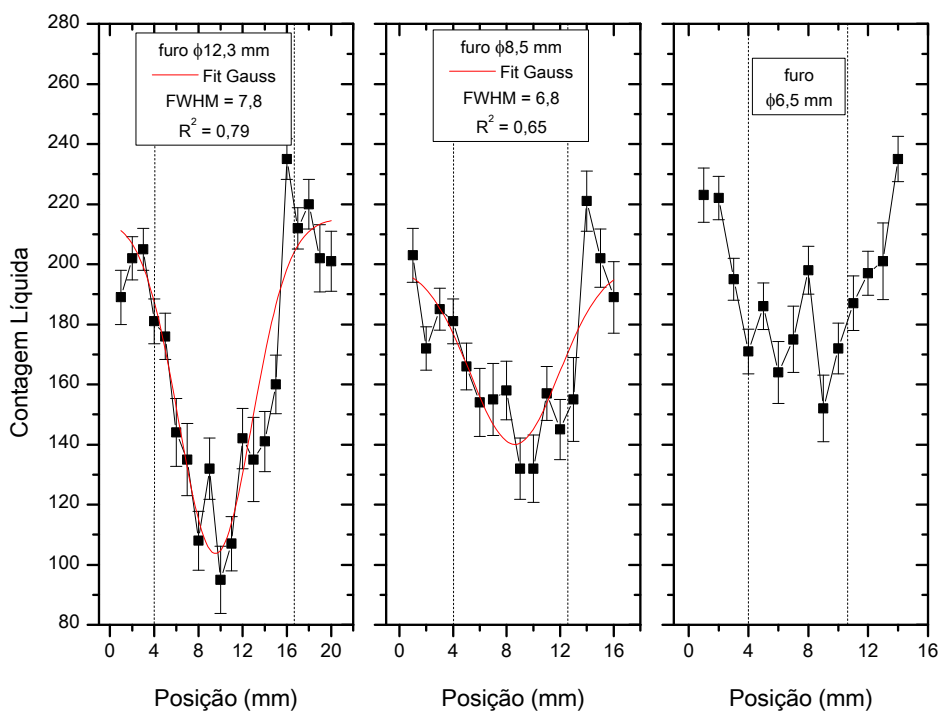
porção maior de acrílico à medida que o diâmetro do defeito fica menor. Com isso, a influência da queda de densidade devido ao furo no total de fótons espalhados dentro do volume de inspeção é menor.

O ajuste gaussiano subestimou os valores nominais dos defeitos. O valor de FWHM para os defeitos de $\varnothing 10$ mm e $\varnothing 5$ mm foi de $\text{FWHM}_{10\text{mm}} = 5,8$ e $\text{FWHM}_{5\text{mm}} = 2,7$ respectivamente. Não foi possível fazer o ajuste gaussiano no defeito de $\varnothing 3$ mm devido ao baixo contraste.

Esta amostra de acrílico ainda possuía um orifício de $\varnothing 1,5$ mm. A varredura sobre ele não indicou sua presença visto que seu tamanho é menor do que o diâmetro do feixe proveniente da colimação da fonte de raios gama ($\varnothing 2$ mm). Neste sentido, podemos afirmar que a resolução do equipamento para a localização de defeitos em acrílico fica em torno de 3 ~ 5 mm.

A figura 55 mostra a tentativa de localização de defeitos na amostra de gesso contendo furos de $\varnothing 12,3$ mm, $\varnothing 8,5$ mm, $\varnothing 6,5$ mm e $\varnothing 4$ mm posicionados a 14 mm da superfície do bloco.

Figura 55 - Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo defeitos de $\varnothing 12,3$ mm, $\varnothing 8,5$ mm, $\varnothing 6,5$ mm e $\varnothing 4$ mm. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.

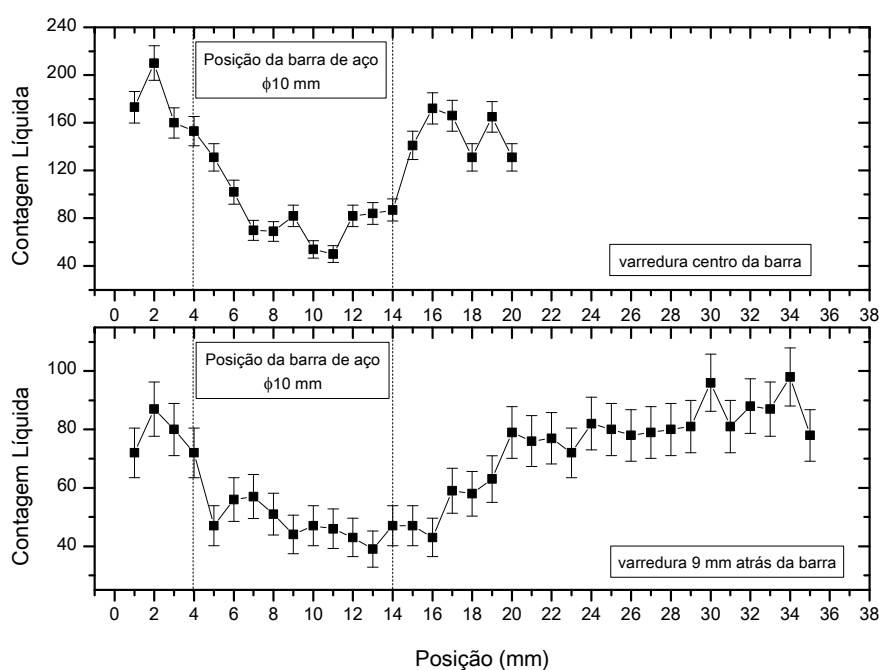


Devido à baixa homogeneidade apresentada pelo gesso há uma alta flutuação entre contagens de pontos adjacentes, prejudicando a resolução espacial do equipamento. Não foi possível localizar o furo de $\varnothing 4$ mm e tão pouco calcular o ajuste gaussiano no furo de $\varnothing 6,5$ mm. Mesmo no furo maior de $\varnothing 8,5$ mm o ajuste gaussiano não representou com acurácia a distribuição dos dados visto o baixo valor do coeficiente de determinação. O valor do FWHM encontrado para os furos de $\varnothing 12,3$ mm e $\varnothing 8,5$ mm foi de $\text{FWHM}_{12,3\text{mm}} = 7,8$ e $\text{FWHM}_{8,5\text{mm}} = 6,8$ respectivamente. Já os de contrastes calculados para os defeitos tiveram valores de $C_{12,3\text{mm}} = 33,1\%$, $C_{8,5\text{mm}} = 20,3\%$ e $C_{6,5\text{mm}} = 13,6\%$.

7.3 DETECÇÃO DE INCLUSÕES

O mesmo método de varredura utilizado para o posicionamento de defeitos pode ser empregado na detecção de inclusões. A figura 56 mostra a contagem líquida do pico Compton em função da posição da amostra de gesso com uma barra de aço de $\varnothing 10$ mm posicionada a 14 mm da superfície.

Figura 56 - Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm, posicionado à 14 mm da superfície da amostra. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



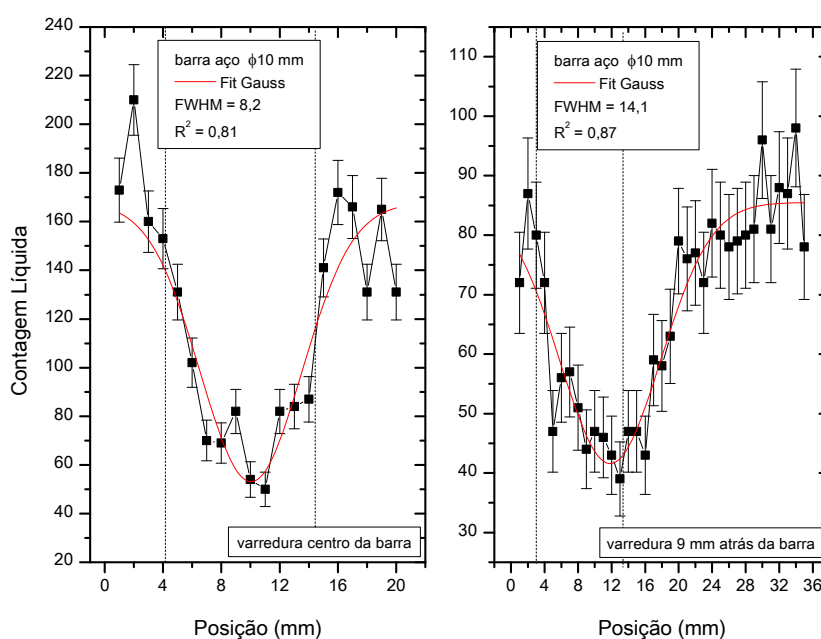
Duas varreduras são apresentadas, uma feita no centro da barra (acima) e a outra feita 9 mm atrás do centro da barra (abaixo). Assim podemos analisar a influência da atenuação do feixe espalhado nos resultados.

Quando o volume de inspeção intercepta a barra de aço mais densa do que o gesso há um decréscimo das contagens indicando que o efeito de atenuação do feixe incidente e espalhado dentro do material mais denso (aço) é preponderante nesta interação. Para a varredura 9 mm atrás da barra as contagens voltam ao patamar inicial somente depois do bloco ter sido deslocado por uma distância maior. Isso acontece porque à medida que a varredura é feita mais no interior da amostra maior é a região em que somente feixe espalhado é atenuado pela barra de aço.

O espaçamento entre dois vales pode fornecer aproximadamente a distância entre duas barras. Mesmo para concretos muito armados esta técnica mostra-se adequada para a determinação do espaçamento entre duas barras relativamente próximas.

Na figura 57 o ajuste gaussiano é calculado para as duas varreduras.

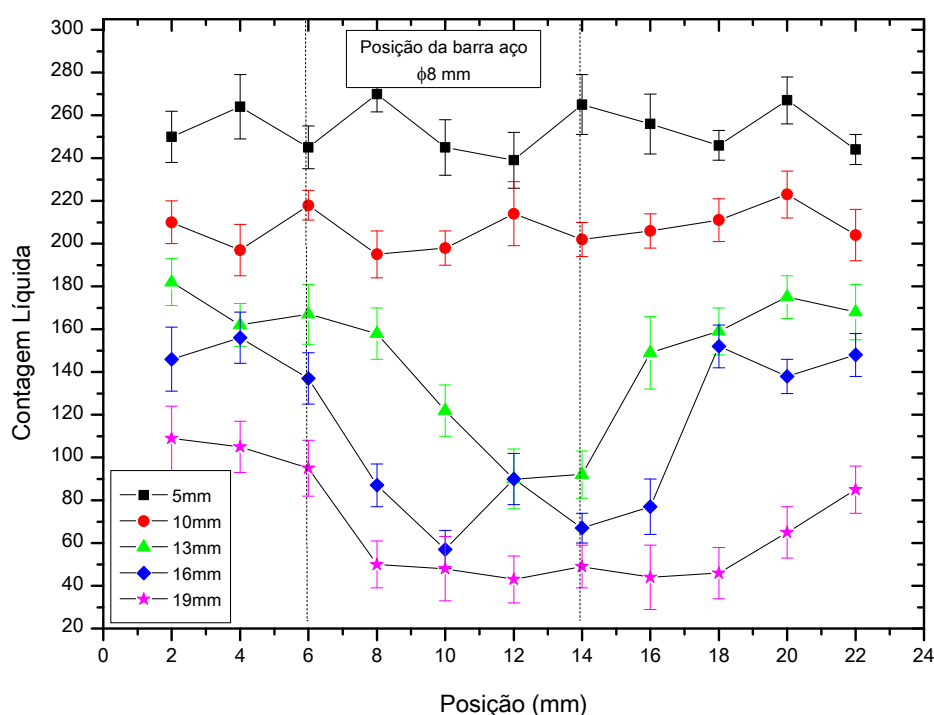
Figura 57 – Ajuste gaussiano das curvas de contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm.



O valor de FWHM encontrado para as duas varredura é de $FWHM_{\text{centro}} = 8,2$ e $FWHM_{\text{atrás}} = 14,1$. Para a varredura no centro da barra novamente o ajuste gaussiano subestimou o tamanho da inclusão. Para a varredura atrás da barra o ajuste foi fortemente influenciado pela região de atenuação somente do feixe espalhado que apresenta baixa contagem. Isso indica que para se obter medidas confiáveis do diâmetro de inclusões o aparelho de inspeção necessita de calibração em função da profundidade de varredura e do contraste.

Isso pode ser realizado com dois tipos de medidas. A primeira, mostrada na figura 58, consiste em varreduras em diferentes profundidades em relação à superfície da amostra. Neste caso em particular o bloco de gesso possui uma barra de aço de $\varnothing 8$ mm posicionada a 14 mm da superfície e cada varredura foi realizada com 2 mm de passo.

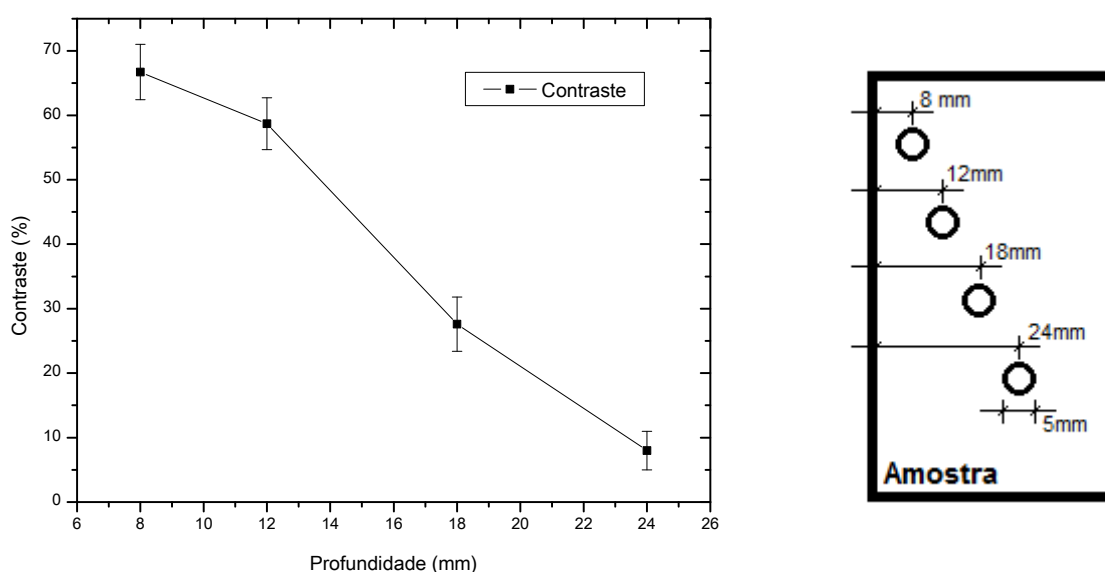
Figura 58 - Contagem líquida em função da posição do bloco de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 8$ mm, posicionado 14 mm da superfície da amostra. Varredura em 5, 10, 13, 16 e 19 mm da superfície. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 2 mm.



As duas primeiras varreduras em 5 mm e 10 mm que não interceptam a barra de aço somente mostram a flutuação na contagem devido a não-homogeneidade dentro do gesso. À medida que as varreduras penetram no material a atenuação do feixe leva a uma queda da contagem e do contraste.

A diminuição do contraste quando porções mais interiores da amostra são analisadas levam ao segundo tipo de medida. Na figura 59 (esquerda) os pontos são os contrastes de densidade em função da profundidade para um bloco de gesso com barras de aço de $\varnothing 5$ mm posicionadas em 8, 12, 18 e 24 mm em relação à sua superfície (direita). Como podemos observar, o contraste decresce com a profundidade da inclusão até a espessura saturação.

Figura 59 – Contraste em função da profundidade para uma amostra de gesso contendo inclusões de aço com $\varnothing 5$ mm em quatro diferentes profundidades: 8, 12, 18 e 24 mm (esquerda). Desenho esquemático da amostra (direita). Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s.

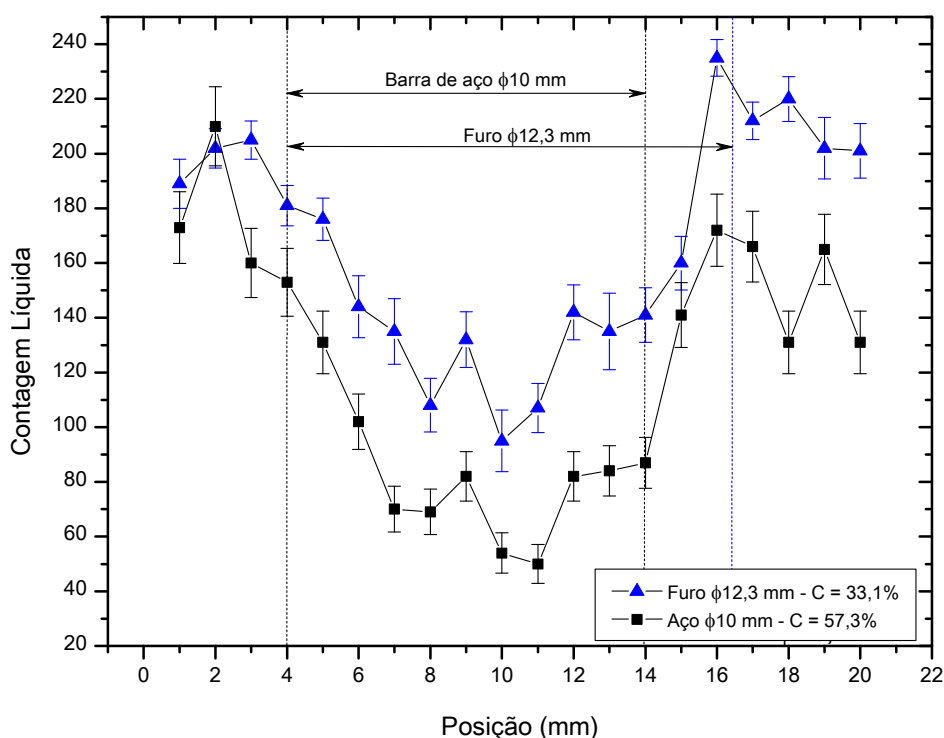


O valor do contraste também pode ser utilizado para a identificação simultânea de regiões contendo defeitos e barras de aço dentro da amostra. Vimos que o comportamento das curvas de contagem líquida *versus* posição da amostra obtidas com as varreduras sobre vazios e inclusões de aço é semelhante. No caso dos defeitos quando o volume de inspeção intercepta um furo dentro da amostra as

contagens caem devido à queda da densidade eletrônica na região. Já para o caso de barras de aço, as contagens também diminuem, mas agora por causa da forte atenuação que o feixe de baixa energia sofre no material mais denso.

A figura 60 mostra no mesmo gráfico as contagens obtidas na varredura do volume de inspeção sobre o furo de $\varnothing 12,3$ mm e sobre a barra de aço de $\varnothing 10$ mm, ambos posicionados a 14 mm da superfície da amostra de gesso.

Figura 60 - Contagem líquida em função da posição das duas amostras de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm e o furo de $\varnothing 12,3$ mm, ambos posicionados à 14 mm da superfície da amostra. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.

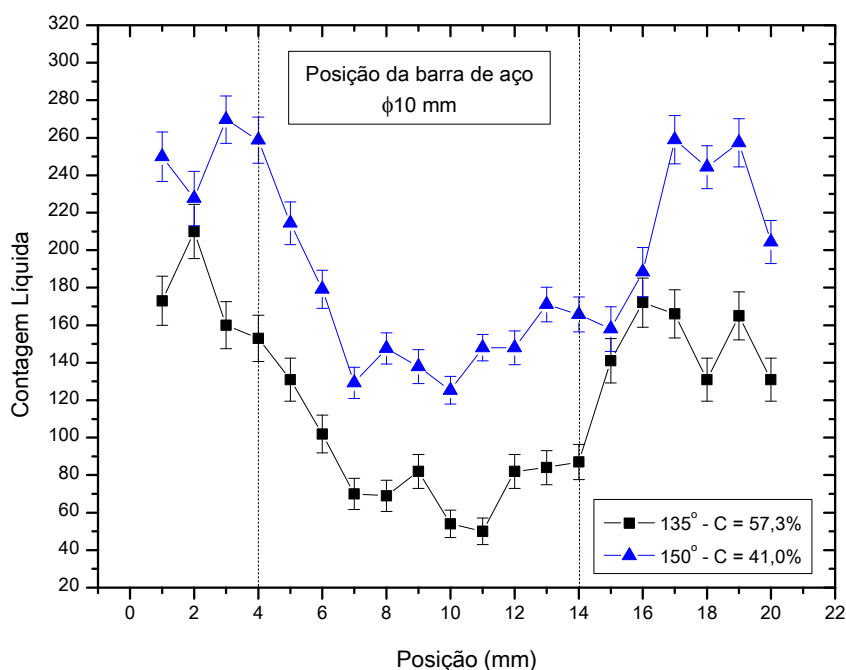


Para energia do feixe incidente utilizada nesta análise o contraste apresentado pela varredura na barra de aço ($C = 57,3\%$) será sempre maior do que o valor calculado para a inspeção sobre o defeito ($C = 33,1\%$) se ambos estiverem posicionados na mesma distância em relação à superfície da amostra. Isso acontece porque o valor elevado do coeficiente de atenuação linear para o aço tem

mais peso na componente exponencial da equação 13, fazendo com que sua contribuição para a contagem de fótons retroespalhados prevaleça sobre a queda de densidade eletrônica na região do furo. Além disso, na região adjacente posterior ao furo a contagem é ligeiramente maior porque o feixe espalhado sofre menor atenuação no seu caminho de volta até o detector. Este resultado, que foi observado nas simulações, pode ser verificado aqui com menor intensidade devido à alta flutuação entre as contagens, no entanto esta característica também pode ser utilizada para diferenciar ambas as regiões dentro da amostra.

Outro resultado obtido durante a simulação de Monte Carlo reproduzido experimentalmente foi a verificação do maior contraste apresentado pela varredura num ângulo de espalhamento de 135° em relação à mesma análise adotando um ângulo de 150° . A figura 61 mostra os pontos de contagem líquida em função da posição da amostra de gesso com a barra de aço de $\varnothing 10$ mm obtidos experimentalmente para ambos os ângulos. O contraste calculado para os ângulos de 135° e 150° foi de $C_{135^\circ} = 57,3\%$ e $C_{150^\circ} = 41,0\%$, respectivamente.

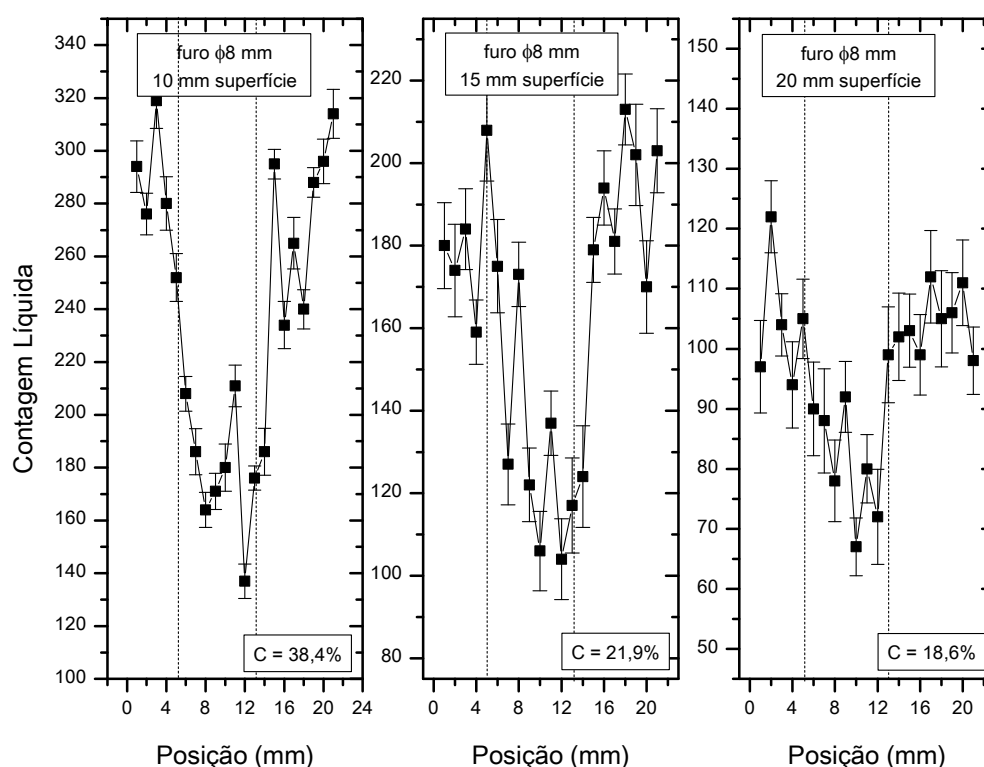
Figura 61 - Contagem líquida em função da posição amostra de gesso contendo vergalhão de aço com $\varnothing 10$ mm em dois ângulos de espalhamento: 135° e 150° . Energia incidente de 59,54 keV, tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



7.4 ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE CONCRETO

Na figura 62 temos a contagem líquida do pico Compton em função da posição do bloco de concreto contendo orifícios de $\varnothing 8$ mm posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície. As varreduras foram realizadas paralelamente a superfície do bloco de modo que o volume de inspeção passasse pelo centro de cada defeito.

Figura 62 - Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo defeitos de $\varnothing 8$ mm, posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



As amostras de concreto apresentam baixa homogeneidade. Em determinados pontos é visível alguns orifícios formados pelo aprisionamento de bolhas de ar durante o processo de cura do material. Isso se reflete nas curvas de contagem *versus* posição pela alta flutuação estatística entre pontos adjacentes de contagem. Esta flutuação prejudica a identificação da região característica posterior à posição do furo onde a intensidade espalhada é ligeiramente maior em função da

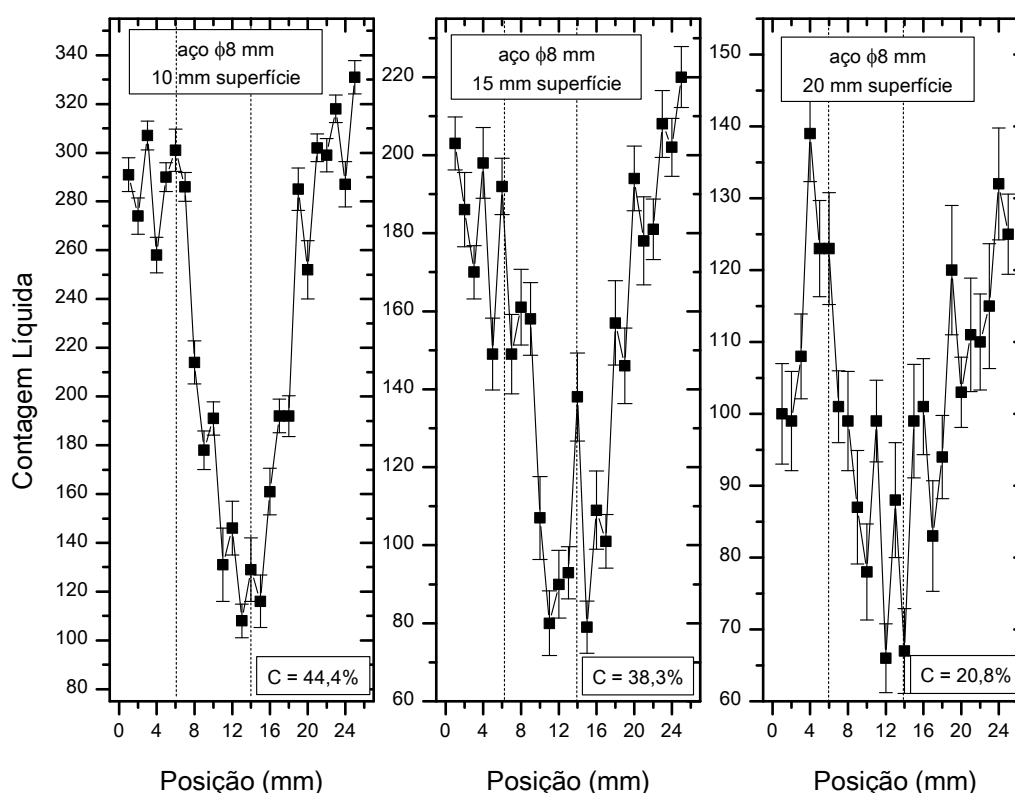
menor atenuação que o feixe espalhado sofre quando passa pelo furo no caminho para fora da amostra.

Através da queda de contagem, é possível identificar o defeito de $\varnothing 8$ mm, na profundidade de 10 mm e 15 mm, e com maior dificuldade, devido ao baixo contraste e ao erro em cada ponto, na posição mais distante da superfície: 20 mm.

O contraste calculado para os defeitos tiveram valores de $C_{10\text{mm}} = 38,4\%$, $C_{15\text{mm}} = 21,9\%$ e $C_{20\text{mm}} = 18,6\%$, respectivamente. Como já foi comentado, o valor decresce devido ao aumento da atenuação do material sobre o gama incidente e espalhado, em função da maior profundidade do orifício dentro da amostra.

A detecção de inclusões de aço com $\varnothing 8$ mm de diâmetro posicionadas a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície da amostra de concreto é mostrada na figura 63.

Figura 63 - Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo inclusões de aço de $\varnothing 8$ mm, posicionados a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



As contagens observadas para as amostras de concreto foram semelhantes às obtidas nas amostras de gesso para uma mesma profundidade de inspeção, novamente comprovando um resultado observado na simulação. No entanto, o concreto apresenta maior flutuação estatística devido a sua maior não-homogeneidade em relação ao gesso, o que pode prejudicar a estimativa da localização e tamanho de inclusões, principalmente aquelas posicionadas em maior profundidade.

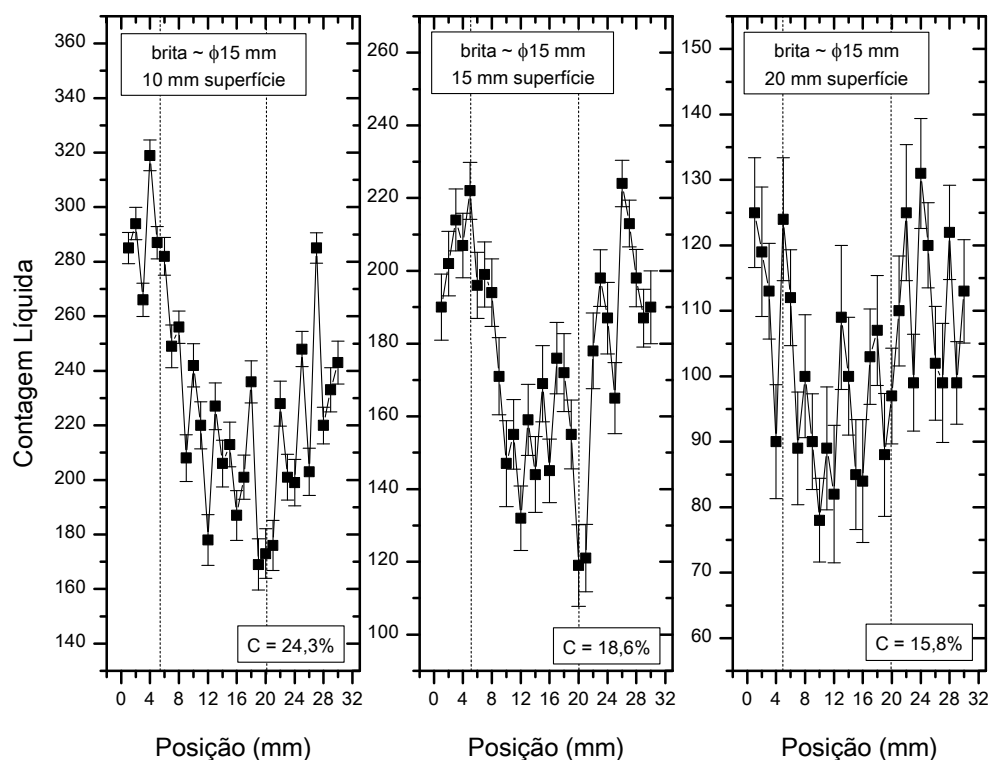
Agora podemos observar claramente a região de atenuação somente do feixe espalhado, caracterizada por alguns pontos de baixa contagem além da posição da inclusão de aço indicada pelas linhas pontilhadas nos gráficos.

O contraste calculado neste caso foi de $C_{10\text{mm}} = 38,4\%$, $C_{15\text{mm}} = 21,9\%$ e $C_{20\text{mm}} = 18,6\%$. Estes valores são superiores aos encontrados para os furos na mesma profundidade, resultado esse que já tinha sido observado com as amostras de gesso. No entanto, a diferença entre os contrastes diminui para a profundidade de 20 mm, visto que a fonte utilizada de baixa energia começa a perder a capacidade de diferenciação através do contraste, porque nesta profundidade o efeito de atenuação sobre o feixe incidente e espalhado prevalece sobre a variação de densidade.

Na figura 64 temos a contagem líquida em função da posição dos blocos de concreto contendo britas em posições conhecidas.

Podemos notar que quando o feixe incidente intercepta a região contendo a pedra, há uma queda na contagem. Isso acontece porque a brita utilizada nesta amostra é de origem basáltica, uma das mais utilizadas na construção civil. Esta rocha vulcânica possui em sua composição quantidade considerável de óxidos de ferro e titânio, materiais estes com elevado coeficiente de atenuação (SCHIAVON et al., 2007). Além disso, temos que considerar a própria irregularidade espacial da pedra, o que gera grande flutuação nas contagens entre pontos adjacentes. Estes fatores podem ser complicadores para a detecção e posicionamento de um defeito ou armadura que esteja atrás de uma brita numa estrutura real, por exemplo.

Figura 64 - Contagem líquida em função da posição do bloco de concreto contendo britas de aproximadamente $\varnothing 15$ mm, posicionadas a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície. Energia incidente de 59,54 keV, ângulo de espalhamento 135° , tempo de contagem 1000 s, varredura com passo de 1 mm.



Os valores de contraste calculados foram de $C_{10\text{mm}} = 24,3\%$, $C_{15\text{mm}} = 18,6\%$ e $C_{20\text{mm}} = 15,8\%$, para as britas posicionadas a 10 mm, 15 mm e 20 mm da superfície, respectivamente.

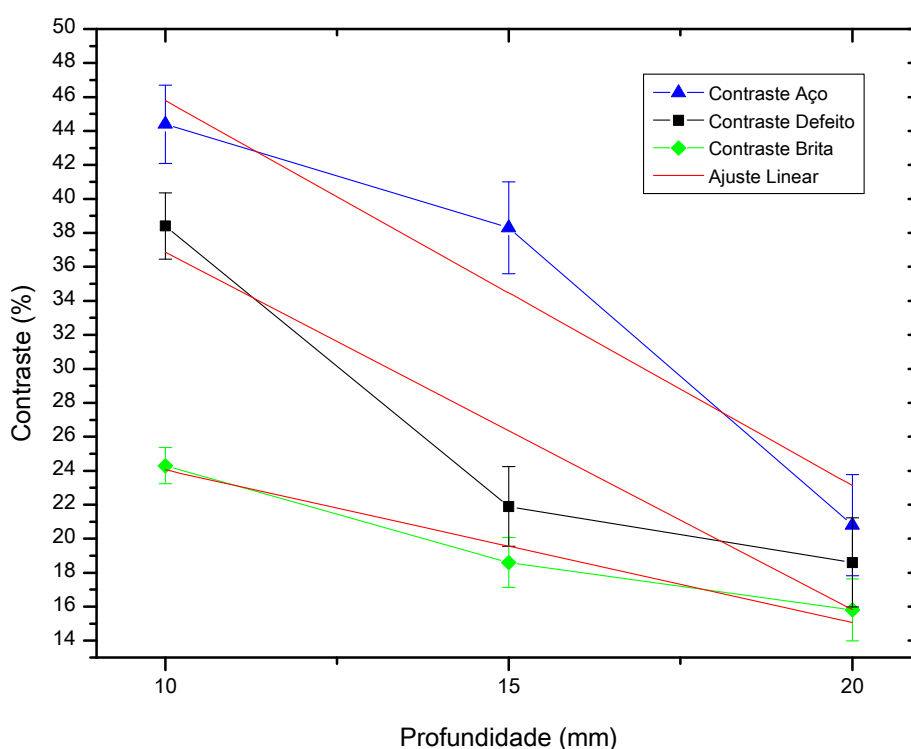
Esses valores foram menores que os encontrados na investigação das amostras com defeitos e com inclusões de aço. No entanto, a média dos valores de contagem quando o feixe intercepta a brita, a qual é utilizada para o cálculo do contraste, está sendo mais influenciada pela flutuação das contagens nesta região do que propriamente pela atenuação. Adicionalmente, o valor de contraste encontrado para a brita posicionada a 20 mm da superfície é menor do que o contraste mínimo calculado neste caso ($C_{\text{min}} = 25,1\%$), indicando que esse resultado não possui 95% de confiabilidade.

Usando os valores dos contrastes para aço, defeitos e brita em diferentes profundidades que foram aqui determinados, podemos exemplificar uma

possível calibração do equipamento objetivando a identificação simultânea de diferentes tipos de inclusões nas amostras.

Na figura 65 temos os valores de contraste em função da profundidade para as três inclusões estudadas. Para cada curva, um ajuste linear foi realizado.

Figura 65 - Gráfico do contraste em função da profundidade para aço, defeito e brita com os seus respectivos ajustes lineares.



Os valores dos coeficientes angular e linear da equação da reta que descreve cada ajuste, juntamente com o resultado da análise de variância (ANOVA) que testa a significância estatística da regressão, são sumarizados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ajuste linear e análise de variância das curvas de contraste *versus* profundidade obtidas para inclusões de aço, defeito e brita.

Aço	Ajuste Linear					ANOVA				
	Coef. Angular		Coef. Linear		R ²	Fonte	GL	SQ	MQ	F
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Modelo				
	-2,26	0,64	68,44	9,48	0,85	Erro	1	2,99	2,99	
						Total	2	39,99		

Defeito	Ajuste Linear					ANOVA				
	Coef. Angular		Coef. Linear		R ²	Fonte	GL	SQ	MQ	F
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Modelo				
	-2,10	0,74	57,90	10,8	0,77	Erro	1	5,31	5,31	
						Total	2	47,93		

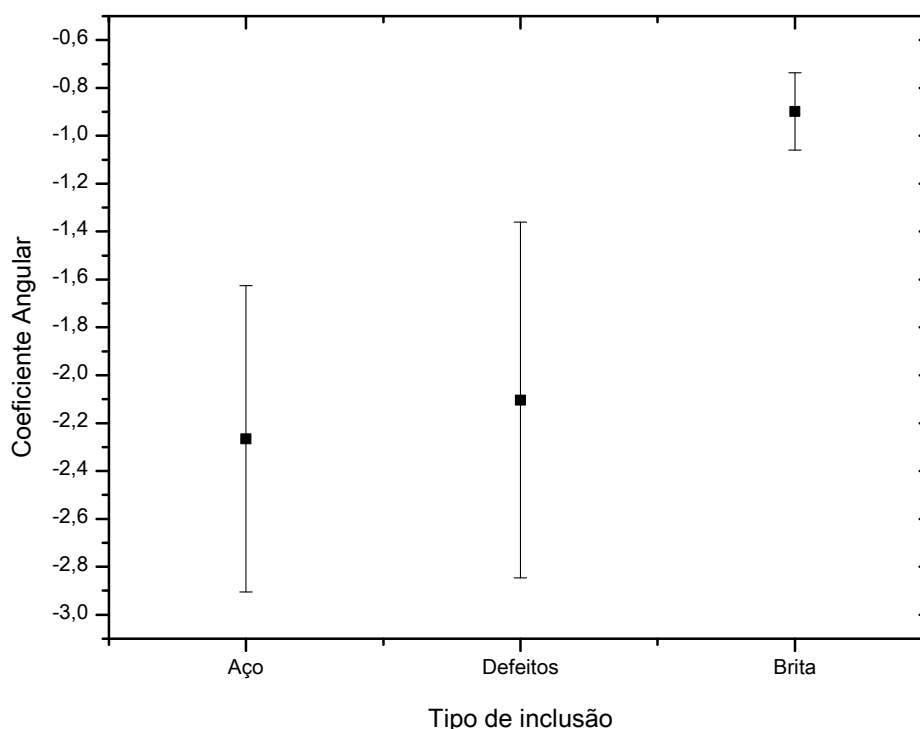
Brita	Ajuste Linear					ANOVA				
	Coef. Angular		Coef. Linear		R ²	Fonte	GL	SQ	MQ	F
	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Modelo				
	-0,89	0,16	33,04	2,22	0,93	Erro	1	0,64	0,64	
						Total	2	20,48		

GL = Graus de Liberdade, SQ = Soma dos Quadrados, MQ = Média dos Quadrados, F = Teste F = MQM/MQE

Podemos agora comparar os valores dos coeficientes angulares de cada reta com o propósito de utilizar este parâmetro como indicador para o tipo de inclusão. É importante frisar que a análise ANOVA, pelos valores de SQ do Modelo na tabela 07, mostra que o modelo linear não é bom e um resultado melhor certamente seria obtido com um modelo quadrático ou exponencial. No entanto, como se trata de uma análise com poucos pontos, mesmo um modelo melhor ainda seria apenas indicativo do comportamento desta função. Desta forma, discutiremos os resultados com base na análise linear.

Para melhor visualização colocamos os valores dos coeficientes lineares e seus respectivos erros em função de cada inclusão no gráfico mostrado na figura 66.

Figura 66 – Comparação entre os valores do coeficiente angular dos ajustes lineares para as curvas de contraste *versus* profundidade das inclusões de aço, defeito e brita.



Vimos que os valores de contraste são sempre maiores para as inclusões de aço do que para os defeitos, ambos posicionados na mesma profundidade. No caso dos coeficientes angulares a figura 66 mostra que as retas possuem valores estatisticamente semelhantes para esses dois tipos de inclusões. A atenuação do feixe nos caminhos incidente e espalhado pode explicar esse comportamento para as curvas ajustadas somente em três pontos. A atenuação opera de forma igual para ambos os defeitos e inclusões de aço, visto que o caminho percorrido é o mesmo em cada profundidade.

Já o coeficiente angular da curva formada com os valores de contraste da brita apresentou valor distinto das outras duas inclusões. Como comentado anteriormente, os contrastes obtidos para essa inclusão estão sendo bastante influenciados pela variação elevada dos valores de contagem com os quais se calculam as médias de C_{bulk} e $C_{inclusão}$. Infelizmente esta flutuação das contagens, apesar de ser um comportamento característico desse material, é de difícil previsibilidade.

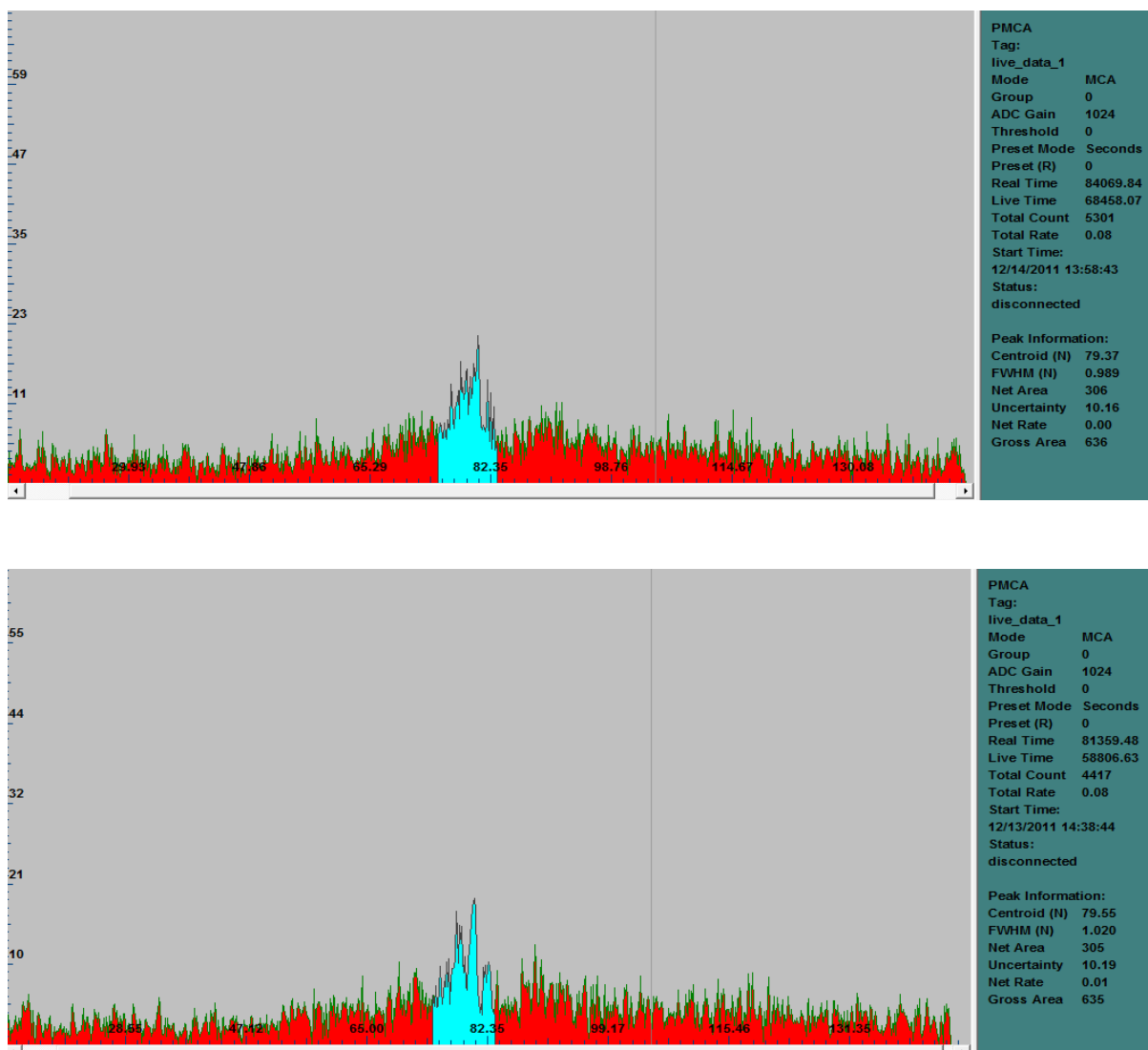
Todavia, vale novamente ressaltar que este estudo é somente um indicador da possível calibração do equipamento, pois a dependência do contraste com a profundidade não é estritamente linear. Mais pontos de contraste para todas as inclusões são necessários para a construção de um modelo como maior grau de confiabilidade.

Poderíamos melhorar a análise das amostras contendo brita utilizando a fonte de ^{57}Co que possui uma energia maior e proporciona contrastes aceitáveis até 3,5 cm de profundidade, conforme simulado na figura 35. O exame de todas as amostras de concreto com essa fonte estava programada no cronograma original do projeto. No entanto, a fonte de ^{57}Co (57 mCi) que conseguimos através de empréstimo, foi fabricada em 1999. Devido a curta meia vida do isótopo ^{57}Co (271 dias) a fonte apresentava atividade tão baixa que inviabilizou a realização das medidas.

Uma tentativa de utilização dessa fonte foi realizada. Na figura 67 temos dois espectros de espalhamento obtidos com uma exposição de aproximadamente 24 horas da amostra de concreto contendo inclusões de aço. No superior o feixe está incidindo somente no concreto enquanto que no inferior o feixe incide sobre a região da amostra contendo a barra de aço. Não há diferença significativa entre as contagens do pico Compton (selecionado em azul) que possa ser utilizada para a análise de contrastes, visto que a relação pico/fundo é muito baixa para essa fonte. Não foi possível, portanto, fazer a investigação da amostra de concreto contendo uma brita em frente à barra de aço com a fonte de ^{57}Co . Mesmo utilizando a fonte de ^{241}Am , esta análise não seria possível, porque a inclusão de aço nesta amostra está a uma profundidade de 30 mm e, nesta distância, a fonte de Amerício não fornece valores de contraste confiáveis para o concreto.

Esforços ainda estão sendo empreendidos no Laboratório de Física Nuclear Aplicada na tentativa de empréstimo de uma fonte de ^{57}Co de maior atividade para concluir estas análises previamente programadas, porém até o momento não obtivemos sucesso. Infelizmente, parte do problema da escassez de fontes disponíveis se deve às elevadas dificuldades burocráticas que as agências governamentais no Brasil estão atualmente impondo à compra e importação de fontes radioativas.

Figura 67 – Espectros de espalhamento (contagens x energia) feitos com a fonte de ^{57}Co . Feixe incidindo somente na região com concreto (acima) e feixe incidindo sobre a inclusão de aço (abaixo). Energia: 122,1 keV, ângulo de espalhamento: 135° , tempo de contagem: aproximadamente 24 h.



7.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O dispositivo de análise não destrutiva que utiliza a técnica de retroespalhamento Compton avaliado através dos resultados experimentais da seção anterior teve sucesso em localizar inclusões superficiais em acrílico, gesso e concreto, sendo que podemos afirmar que o mesmo princípio pode ser empregado para uma gama maior de materiais.

Da maneira como foi concebido e com os equipamentos utilizados ele já pode ser empregado numa variedade de investigações importantes do ponto

de vista científico e de controle de qualidade como, por exemplo: a detecção de descolamentos e trincas internas em afrescos (CASTELLANO et al., 2005a; 2005b; BONIFAZZI et al., 2004; HARDING; HARDING, 2010), identificação de pontos de ferrugem sub-superficiais em chapas e tubos metálicos (YACOUT et al., 1997; EVANS et al., 1998; ABDUL-MAJID; TAYYEB, 2005), localização de falhas em soldas (JAMA et al., 1998), etc. além de outras aplicações que não exijam feixes com grande penetração e com a vantagem dos equipamentos portáteis que compõem o sistema aqui proposto.

Usando uma fonte com maior atividade ou mesmo um tubo de raios-X com monocromador, o qual proporciona feixes monoenergéticos de intensidade elevada, poderíamos utilizar colimadores de abertura menor, sem prejudicar a significância estatística da contagem e assim melhorar consideravelmente a resolução espacial do dispositivo. Esses aperfeiçoamentos podem consolidar a técnica de retroespalhamento Compton como uma das técnicas disponíveis para a caracterização de materiais no Laboratório de Física Nuclear Aplicada.

No caso específico do concreto armado, material que era o alvo da investigação neste trabalho, a fonte de ^{241}Am se mostrou pouco adequada para a análise de estruturas reais devido à sua limitada capacidade de penetração neste material. Todavia, verificamos que, como técnica de caracterização não destrutiva, o retroespalhamento Compton pode ser empregado para a mensuração de inclusões dentro do concreto com boa acurácia. Estes resultados experimentais se forem comparados com o projeto arquitetônico e estrutural da obra com concreto armado, o qual agrega informações de posição e tamanho da armadura, podem identificar defeitos ou mesmo o estreitamento de uma barra de aço interna provocada por corrosão.

Os dados experimentais também indicam, ainda que parcialmente, a possibilidade de calibração do equipamento através dos contrastes de densidade com o objetivo de identificação simultânea de vazios e inclusões de aço. Entretanto, mais pontos experimentais são necessários para que um modelo confiável seja elaborado.

Agregados como a brita, por serem materiais com atenuação elevada, podem mascarar principalmente defeitos em pontos específicos. Novamente a comparação como projeto original da obra pode fornecer elementos

descomplicadores, no entanto uma investigação mais apurada para encontrar uma solução para esta questão deve ser realizada.

Visto que há uma demanda por esse tipo de equipamento e uma carência de soluções versáteis e confiáveis para a inspeção não destrutiva do concreto atualmente disponíveis no mercado, esta pesquisa se mostra ainda bastante promissora neste campo de análise.

8 DISCUSSÃO CONCEITUAL SOBRE O DESIGN DO APARATO EXPERIMENTAL

Nos capítulos anteriores avaliamos teórica e experimentalmente o uso da técnica de retroespalhamento Compton como metodologia não destrutiva para detecção e identificação de inclusões em materiais. Neste capítulo, discutiremos alguns aspectos que devem ser levados em consideração para a montagem de um aparato experimental portátil que utiliza a técnica estudada. Alguns aspectos como a escolha da fonte e a colimação já foram abordados anteriormente no texto, agora vamos tratar de alguns outros que são igualmente importantes.

8.1 CRITÉRIOS DE DESIGN

Os critérios de design de um sistema experimental em termos dos parâmetros operacionais que são exigidos para aplicações específicas podem ser bastante variados. Cada situação de análise pode requerer algumas configurações que são particulares àquela medida. No entanto, podemos listar algumas condições que são necessárias para que o aparato experimental preencha os requisitos de um sistema de inspeção com propósitos mais gerais podendo ser utilizado numa grande variedade de materiais. A seguinte lista de características do sistema visa atender à essa expectativa:

- ✓ Deve possuir blindagem para a fonte radioativa ou tubo de raios-X tal que assegure a segurança do operador e que já forneça uma colimação para o feixe incidente;
- ✓ Permita a troca da fonte, da colimação e se possível o ajuste do ângulo de espalhamento;
- ✓ Tenha boa mobilidade e portabilidade;

- ✓ Ter baixo consumo de energia, sendo possível operá-lo através de baterias;
- ✓ Seja capaz de inspecionar materiais seja manipulando o sistema ou movendo o material investigado;
- ✓ Deve medir automaticamente a distância do sistema ao material inspecionado;
- ✓ Ter fácil registro e interpretação dos dados coletados durante uma medida, através de um software de processamento de dados.

8.2 COMPONENTES DO APARELHO DE INSPEÇÃO

O sistema de inspeção por espalhamento Compton deve ser composto pelos seguintes componentes: fonte, blindagem, detector, colimador do detector, sensor de proximidade, mecanismo de movimentação. Com os componentes utilizados neste trabalho, poderíamos satisfazer a maioria dos critérios de design elencados com um formato tipo “pistola”. Esta forma já pode ser encontrada em alguns equipamentos portáteis como, por exemplo, o aparelho de fluorescência de raios-X fabricado pela empresa Bruker AXS mostrado na figura 68.

Figura 68 – Aparelho portátil de fluorescência de raios-X fabricado pela empresa Bruker AXS (extraído de BRUKER, 2012)



O gatilho no nosso caso acionaria uma janela de abertura da fonte, permitindo que a radiação incida na amostra. Para a fonte de ^{241}Am , a blindagem poderia ser acomodada facilmente, visto que a fonte tem baixo poder de penetração no chumbo. Para exemplificar, necessitaríamos de uma blindagem aproximada de apenas 2,00 mm de espessura para que a dose de radiação emitida pelo aparelho ficasse abaixo de 1 mSv/ano. Esse valor é a dose máxima recomendada para o público em geral pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICPR, 2007). Mais detalhes sobre o cálculo da blindagem podem ser encontrados no Apêndice C ao final deste trabalho. O detector compacto de CdTe poderia ser alojado ao lado da fonte, com afastamento, ângulo, abertura e colimação adequadamente posicionados.

A acurácia na localização de defeitos e inclusões depende da localização do ponto onde o feixe incidente atinge a amostra. O aparelho tem que possuir um mecanismo que confiavelmente mostre esta localização, já que este ponto é usado como referência externa à amostra. Novamente fazendo analogia com a pistola, um método acurado e simples de “mira” pode ser conseguido utilizando-se um pequeno laser acoplado ao aparelho.

O posicionamento das inclusões em função da profundidade é calculado em função da distância do sistema em relação à superfície da amostra. Portanto é crítico que esse valor seja conhecido com precisão. Acoplar um sensor de proximidade e distância ao dispositivo pode ser a solução. Uma acurácia de 1 mm é suficiente para essa aplicação. Muitos sensores eletrônicos de distância estão disponíveis comercialmente, como por exemplo, o modelo SPR-04 fabricado pela empresa DynaVision (figura 69) e o critério de escolha pode ser o tamanho objetivando manter o aparelho de inspeção o mais compacto possível.

Figura 69 – Sensor eletrônico de distância à laser, modelo SPR-04 fabricado pela empresa DynaVision (extraído de LMI TECHNOLOGIES, 2011)



Após se estabelecer a distância do aparelho à superfície da amostra para a análise, este valor não pode sofrer flutuações durante a realização da varredura. Além disso, a manipulação lateral do dispositivo deve ser controlada. Nesta direção uma acurácia de 1 mm é desejável para o posicionamento preciso das inclusões.

Essas exigências podem ser atingidas, por exemplo, usando um dispositivo guia automaticamente controlado ao qual o aparelho de inspeção pode ser acoplado. Guias lineares desse tipo também são encontrados comercialmente. Tais sistemas podem ser conectados a motores de passo controlados por computador que oferecem movimentação precisa. Exemplos que podem ser citados são os modelos: 2DA Dual Shaft Linear Guide System ou AccuMini Linear Guide da empresa Thomson (figura 70).

Figura 70 - Exemplos de guias lineares, modelos Shaft Linear Guide System (esquerda) e AccuMini Linear Guide (direita) fabricados pela empresa Thomson (extraído de THOMSON, 2011)



Por último o software de processamento e análise de dados deve executar as etapas de coleta de dados, integração da contagem do pico de espalhamento Compton, análise das curvas de intensidade *versus* posição e cálculo do posicionamento das inclusões. Todos esses passos podem ser executados por sub-rotinas dentro de um único programa, que pode ser executado no mesmo computador conectado ao detector. Ao operador o programa deve apresentar informações sobre a localização, tipo e tamanho das inclusões, podendo estas ser acompanhadas de representações gráficas para uma melhor visualização dos resultados.

9 CONCLUSÕES

- A técnica de retroespalhamento Compton se mostrou adequada para detecção e identificação simultânea de vazios e inclusões de aço superficiais em amostras de gesso e concreto;
- Há a possibilidade de posicionamento dessas inclusões com informação de espaçamento e de profundidade, diretamente dos dados experimentais e por meio de calibração do equipamento através das curvas de contraste em função da profundidade;
- Dentre as variáveis estudadas a simulação de Monte Carlo indicou que a melhor configuração experimental que obtém a máxima figura de mérito consiste em:
 - ✓ Fonte perpendicular a amostra;
 - ✓ Ângulo de espalhamento: 135° ;
 - ✓ Colimador: $\varnothing 7 \times 30$ mm de latão;
 - ✓ Energia incidente: 122,1 keV.
- Os testes que foram reproduzidos experimentalmente confirmaram os resultados preconizados pela simulação;
- A forma e o tamanho da colimação posicionada em frente ao detector tem influência direta nos valores de contraste e resolução espacial;
- Para fontes de baixa energia, a atenuação do feixe tem um maior efeito sobre a intensidade espalhada do que o aumento da densidade do material;
- Agregados que são adicionados ao concreto, tais como a brita, podem esconder inclusões sob investigação em estruturas reais, se utilizado fontes de baixa energia;
- A resolução espacial do aparato experimental avaliado na localização de defeitos é de 3~5 mm para o acrílico e 6,5~8,5 mm para o gesso e concreto;

- Com os componentes utilizados é possível a construção de um equipamento leve, compacto e portátil para ser utilizado em medidas *in situ*;
- Algumas limitações encontradas:
 - ✓ Os resultados experimentais subestimam o diâmetro de inclusões e vazios;
 - ✓ Pouco alcance em profundidade;
 - ✓ Tempo elevado de medida.

Sugestões para a solução dessas limitações são apresentadas na próxima seção que comenta as perspectivas e trabalhos futuros.

10 PERSPECTIVAS E TRABALHOS FUTUROS

Dos resultados obtidos nesta tese abrem-se as seguintes perspectivas e trabalhos futuros relacionados com o tema estudado.

- Estudo teórico e prático do sistema de inspeção na geometria de 180° utilizando fontes em forma de anel para verificar a possibilidade de melhora da resolução espacial nesta configuração;
- Investigação de novas formas de colimação que aumentem a resolução espacial sem comprometer o fluxo de fótons retroespalhados que atingem o detector;
- Averiguar a capacidade do sistema de inspeção em detectar estágios diferenciados de corrosão da armadura;
- Simulação de um sistema com duas fontes simultâneas, o que poderia agregar informações para a calibração do aparelho;
- Emprego de diferentes fontes de raios gama e/ou raios-X de alta intensidade que permitam melhorar o alcance em profundidade e diminuir o tempo de aquisição durante a inspeção;
- Investigar a possibilidade de imageamento 2D e 3D através da interpretação dos contrastes de densidade.

REFERÊNCIAS

ABDUL-MAJID, S. ; TAYYEB, Z. Use of gamma ray back scattering method for inspection of corrosion under insulation. In: 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Nov. 2005, Bahrain, Manama. **Proceedings...** Saudi Arabian Section of the American Society for Nondestructive Testing (SAS-ASNT), 2005.

ABECE - **Projeto de Lei sobre vistorias periódicas em marquises e sacadas**. Disponível em: < http://www.abece.com.br/web/serv_plmarquises.asp>. Acesso em: 20 janeiro 2011.

ADMCA - **Amptek Display and Acquisition Software**. Disponível em: <<http://www.amptek.com/admca.html>>. Acesso em: 25 fevereiro 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica - Método de ensaio**. NBR 8802:1994, Rio de Janeiro, 1994. 8 p.

ADIL, N. The measurement of concrete density by back-scattered gamma radiation. **British Journal of Non-Destructive Testing**, v. 19, n. 01, p. 72-77, 1977.

ALVES, A. Perigo suspenso - Queda de marquises alerta para o risco de projetos mal-executados e falta de manutenção. **Revista Técnica**, v.14, n. 120, p. 34-37, 2007.

AMPTEK. **The X-123 CdTe detector**. Disponível em: <<http://www.amptek.com/x123cdte.html>>. Acesso em: 20 fevereiro 2011.

ANGHAIE, S.; HUMPHRIES, L. L. Inspection and monitoring of nuclear power plant piping by differential gamma-ray. In: SMiRT 10, 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. G - Fracture Mechanics and Non-Destructive Evaluation, Aug. 1989, Anaheim, CA USA. **Proceedings...** International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, p. 269-275, 1989.

ANGHAIE, S.; HUMPHRIES, L. L. e DIAZ, N. J. Material characterization and flaw detection, sizing, and location by the differential gamma scattering spectroscopy technique. Part I: Development of theoretical basis. **Nuclear Technology**, v. 91, n. 03, p. 361-375, 1990a.

ANGHAIE, S.; HUMPHRIES, L. L. e DIAZ, N. J. Material characterization and flaw detection, sizing, and location by the differential gamma scattering spectroscopy technique. Part II: Experiment. **Nuclear Technology**, v. 91, n. 03, p. 376-387, 1990b.

ARENDTSZ, N. V.; HUSSEIN, E. M. A. Energy-spectral Compton scatter imaging - part I: Theory and mathematics. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 42, n. 06, p. 2155-2165, 1995a.

ARENDSZ, N. V.; HUSSEIN, E. M. A. Energy-spectral Compton scatter imaging - part II: Experiments. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 42, n. 06, p. 2166-2172, 1995b.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard test methods for density of unhardened and hardened concrete in place by nuclear methods**. C 1040-93. West Conshohocken, Pennsylvania, American Society for Testing and Materials (ASTM), 2001. 6 p.

BALLARINI, F.; BATTISTONI, G.; CAMPANELLA, M.; CARBONI, M.; CERUTTI, F.; EMPL, A.; FASSO, A. e FERRARI, A. The FLUKA code: an overview. In: EPS Euroconference XIX Nuclear Physics Divisional Conference. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 41, p. 151-160, 2006.

BALOGUN, F. A. Angular variation of scattering volume and its implications for Compton scattering tomography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 50, n. 02, p. 317-323, 1999.

BALOGUN, F. A.; CRUVINEL, P. E. Compton scattering tomography in soil compaction study. **NIM in Physics Research A**, v. 505, n. 01-02, p. 502-507, 2003.

BATTISTONI, G.; MURARO, S.; SALA, P. R.; CERUTTI, F.; FERRARI, A.; ROESLER, S.; FASSO, A.; RANFT, J. The FLUKA code: Description and benchmarking. In: Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6-8 Sep. 2006, M. Albrow, R. Raja ed., **AIP Conference Proceeding**, v. 896, p. 31-49, 2007.

BEER, F. C.; ROUX, J. J. ; KEARSLEY, E. P. Testing the durability of concrete with neutron radiography. **NIM in Physics Research A**, v. 542, n. 01-03, p. 226-231, 2005.

BESKROVNAIA, L.; FLORKO, B.; PARAIPAN, M.; SOBOLEVSKY, N. e TIMOSHENKO, G. Verification of Monte Carlo transport codes FLUKA, GEANT4 and SHIELD for radiation protection purposes at relativistic heavy ion accelerators. **NIM in Physics Research B**, v. 266, n. 18, p. 4058-4060, 2008.

BÖHLEN, T. T.; CERUTTI, F.; DOSANJH, M.; FERRARI, A.; GUDOWSKA, I.; MAIRANI, A. e QUESADA, J. M. Benchmarking nuclear models of FLUKA and GEANT4 for carbon ion therapy. **Physics in Medicine & Biology**, v. 55, n. 19, p. 5833-5847, 2010.

BOLDO, E. M.; APPOLONI, C. R. Aplicações do espalhamento Compton de raios gama. **LFNATEC**, v. 14, n. 01, 2010. Disponível em <<http://www.fisica.uel.br/gfna/publictec.html>>. Acesso em: 25 outubro 2010.

BONIFAZZI, C.; LODI, E.; MAINO, G.; MUZZIOLI, V.; NANETTI, L.; LUDWIG, N.; MILAZZO, M. e TARTARI, A. Investigation of defects in fresco substrates by means of the ECoSp imaging system and the principal component image analysis, **NIM in Physics Research B**, v. 213, n. 01, p. 707-711, 2004.

BRUKER - **Tracer III-V⁺ handheld XRF analyzer**. Disponível em: <<http://www.bruker-axs.com/handheldproducts.html>>. Acesso em: 15 fevereiro 2012.

CARRON, N. J. **An introduction to the passage of energetic particles through matter**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 362p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997. 237 p.

CASTELLANO, A.; CESAREO, R.; BUCCOLIERI, G.; DONATIVI, M.; PALAMÀ, F.; QUARTA, S.; NUNZIO, G. DE; BRUNETTI, A.; MARABELLI, M. e SANTAMARIA, U. Detection of detachments and inhomogeneities in frescos by Compton scattering. **NIM in Physics Research B**, v. 234, n. 04, p. 548-554, 1995a.

CASTELLANO, A.; CESAREO, R.; BUCCOLIERI, G.; DONATIVI, M.; PALAMÀ, F.; QUARTA, S.; NUNZIO, G. DE; BRUNETTI, A.; MARABELLI, M. e SANTAMARIA, U. A frescos inspection device based on Compton backscattered x-rays. In: 8th International Conference on "Non Destructive Investigations and Micronalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, May 2005, Lecce, Italy. **Proceedings...** v. 01, n.01, p. 01-15, 1995b.

COMPTON, A. H. A quantum theory of the scattering of x-rays by light elements. **Physical Review**, v. 21, n. 05, p. 483-502, 1923a.

COMPTON, A. H. The spectrum of scattered X-Rays. **Physical Review**, v. 22, n. 05, p. 409-413, 1923b.

COOPER, M. J. et. al. **X-Ray Compton Scattering**. New York: Oxford University Press, 2004. 374p.

CURSOS. **Aula 5 – O Efeito Compton**. Disponível em <<http://www.cursosvirt2.dominiotemporario.com/EaD/qq/aula-5/aula-5.htm>>. Acesso em: 31 mar. 2012.

DAIGLE, M.; FRATTA, D.; WANG, L. B. Ultrasonic and X-ray tomographic imaging of highly contrasting inclusions in concrete specimens. In: American Society of Civil Engineers Conference - GeoFrontier 2005. Jan. 24-26, 2005 Austin, Texas. Proceedings.... Sessions of the GeoFrontiers 2005 Congress, p. 53-58, 2005.

EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. 2002. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

EVANS, R. D. The Atomic Nucleus. 14th ed., McGraw-Hill, New York, 1972. 972 p.

EVANS, B. L.; MARTIN, J. B.; BURGGRAF, L. W.; ROGGEMANN, M. C. Nondestructive inspection using Compton scatter tomography. IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 45, n. 3, p. 950-956, 1998.

FASSO, A.; FERRARI, A.; RANFT, J. e SALA, P. R. FLUKA: a multi-particle transport code. CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, 2005. 406 p.

FIORINI, C.; LONGONI, A.; BJEOUNIKHOV, A. A new detection system with polycapillary conic collimator for high-localized analysis of X-ray fluorescence emission. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 48, n. 03, p. 268-271, 2001.

FLAIR – The FLUKA Advanced Interface. Disponível em <<http://www.fluka.org/flair/index.html>>. Acesso em: 10 abr. 2011.

FLUKA – The official FLUKA site. Disponível em <<http://www.fluka.org>>. Acesso em: 10 abr. 2011.

GAUTAM, S. R.; HOPKINS, F. F.; KLINKSIEK, R.; MORGAN, I. L. Compton interaction tomography I. Feasibility studies for applications in earthquake engineering. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. NS-30, n. 02, p. 1680-1684, 1983.

GERWARD, L.; GUILBERT, N.; JENSEN, K. B.; LEVRING, H. WinXCom - A program for calculating x-ray attenuation coefficients. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 71, n. 03-04, p. 653-654, 2004.

GHESLAGHI, F.; SANTAMARINA, C.; WIESE, D.; THOMAS, M.; POLAK, M. E CARATIN, G. Tomographic imaging concrete structures. In: International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Sep. 1995, Berlin. **Proceedings...** Ed. by G. Schickert, H. Wiggenger, v. 01, p. 297-304, 1995.

GHORBANPOOR, A.; BENISH, N. **Non-destructive testing of wisconsin highway bridges**. Final Report of Wisconsin Highway Research Program Project n. 0092-00-15, University of Wisconsin-Milwaukee, 2003. 108 p.

HARDING, G.; TISCHLER, R. Dual-energy Compton scatter tomography. **Physics in Medicine and Biology**, v. 31, n. 05, p. 477-489, 1986.

HARDING, G. Scattered X-ray beam nondestructive testing. **NIM in Physics Research A**, v. 280, n. 02-03, p. 517-528, 1989.

HARDING, G.; HARDING, E. Compton scatter imaging: a tool for historical exploration. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, n. 06, p. 993-1005, 2010.

HILL, D. W.; PEAK, J. C. Development of a one-sided gamma ray tomography system. In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Jun. 1987, Williamsburg, Virginia, US. **Abstracts...** v. 7A, p. 415-424. Edited by D. D. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, 1988.

HO, A. C.; HUSSEIN, E. M. A. Quantification of gamma-ray Compton-scatter nondestructive testing. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 53, n. 04-05, p. 541-546, 2000.

HUBBELL, J. H. **Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV**. NSRDS-NBS 29, Washington, National Bureau of Standards, 1969. 90 p.

HUBBELL, J. H.; VEIGELE, Wm. J.; BRIGGS, E. A.; BROWN, R. T.; CROMER, D. T. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v.04, n. 03, p. 471-538, 1975.

HUBBELL, J. H.; ØVERBØ, I. Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross sections. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v.08, n. 01, p. 69-105, 1979.

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. **Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 2 MeV for elements z = 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Report NISTIR 5632, 1995.

HUSSEIN, E. M. A.; WHYNOT, T. M. A Compton scattering method for inspecting concrete structures. **NIM in Physics Research A**, v. 283, n. 01, p. 100-106, 1989.

IAEA - **Guidebook on non-destructive testing of concrete structures**. International Atomic Energy Agency, TCS-17, Vienna, 2002.

ICRP. Publication 103 - The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Ann. ICRP**, v. 37, n. 2-4, 2007.

JAMA, H. A.; HUSSEIN, E. M. A. e LEE-SULLIVAN, P. Detection of debonding in composite-aluminum joints using gamma-ray Compton scattering. **NDT & E International**, v. 31, n. 02, p. 99-103, 1998.

JAMA, H. A.; HUSSEIN, E. M. A. Design aspects of a gamma-ray energy-spectral Compton-scatter nondestructive testing method. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 50, n. 02, p. 331-342, 1999.

JOOHEE, O.; HEE-SEOCK, L.; SUYEL, P.; MINHO, K.; SUKMO, H.; SEUNGKOOK K. e WOON-KAB, C. Comparison of the FLUKA, MCNPX, and PHITS Codes in yield calculation of secondary particles produced by intermediate energy proton beam. **Progress in Nuclear Science and Technology**, v. 01, p. 85-88, 2011.

KAHANE, S. Relativistic Dirac-Hartree-Fock photon incoherent scattering functions. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**, v. 68, n. 02, p. 323-347, 1998.

KIMSTRAND, P.; TILLY, N.; AHNESJÖ, A.; TRANEUS, E. Experimental test of Monte Carlo proton transport at grazing incidence in GEANT4, FLUKA and MCNPX. **Physics in Medicine & Biology**, v. 53, n. 04, p. 1115-1129, 2008.

KLEIN, O. e NISHINA, T. Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac. **Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei**, v. 52, n. 11-12, p. 853-868, 1929.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 3^a Ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2000. 816 p.

KOLECTRIC. **8020 Series Technical Specifications**. Disponível em: <<http://www.kolectric.com/technical.html>>. Acesso em: 22 janeiro 2011.

KRISHNAVENI, S.; RAMAKRISHNA GOWDA. Incoherent scattering functions of iron, copper, zirconium, tin, tantalum, tungsten, gold and lead, in the momentum range $2 \text{ \AA}^{-1} \leq q \leq 46 \text{ \AA}^{-1}$ at 661.6 keV photon energy. **NIM in Physics Research B**, v. 229, n. 03-04, p. 333-338, 2005.

LAWSON, L. R. Backscatter Imaging. **Materials Evaluation**, v. 60, n. 11, p. 1295-1316, 2002.

LEO, W. R. **Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments**. 2^o Ed. Springer-Verlag, 1994, 378 p.

LEDERER, C. M. **Table of Isotopes**. 7^a Ed, New York: John Wiley & Sons Inc, 1978. 1632 p.

LIMA, J. M. **Patologias das estruturas de concreto armado com ênfase a execução**. Belém, 2000. TCC (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará. Pará. Disponível em: <<http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/>> Acesso em: 10 dezembro 2010.

LMI TECHNOLOGIES. **The LMI DynaVision SPR-04's small size and short range sensor**. Disponível em: <<http://www.kenda.net/EAD/LMI/index.htm>>. Acesso em: 11 dezembro 2011.

LONDRINA. **Lei nº 10.229 de 21 de maio de 2007**. Institui no município a obrigatoriedade da apresentação de parecer técnico com avaliação das condições de uso e manutenção das marquises e sacadas das edificações do Município. Prefeitura Municipal de Londrina, Of. nº 1125, 2007.

LOPES, V. **Vistoria obrigatória em marquises e sacadas**. Disponível em: <http://www.cms.ba.gov.br/noticia_int.aspx?id=2420>. Acesso em: 10 dezembro 2010.

MAIERHOFER, C.; REINHARDT, H. W. E DOBMANN, G. **Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Volume 02: Non-destructive testing method**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2010.

MALHOTRA, V. M.; CARINO N. J. **Handbook of nondestructive testing of concrete**. 2^o ed., Boca Raton: CRC Press, 2004. 384 p.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3^a Ed., São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, P. **A tomografia computadorizada de raios-X como método não destrutivo de análise volumétrica de concreto**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, PIPE Tecnologia, Paraná.

MENDES, R.; PORTELLA, K. F.; GALVÃO, J. C. A.; GODOI, W. C. e SWINKA-FILHO, V. Reconhecimento de patologias de concreto utilizando a técnica de Tomografia Industrial de Raios-X (TRX). In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Curitiba, 2009. **Proceedings...** IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto), v. 01, p. 172-172, 2009.

MULLIN, S. K.; HUSSEIN, E. M. A. A Compton-scatter spectrometry technique for flaw detection. **NIM in Physics Research A**, v. 353, n. 01-03, p. 663-667, 1994.

NIST. **XCOM: Photon Cross Sections Database**. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>. Acesso em: 31 março 2012.

PRETTYMAN, T. H.; GARDNER, R. P.; RUSS, J. C. e VERGHESE, K. A combined transmission and scattering tomographic approach to composition and density imaging. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 44, n. 10-11, p. 1327-1341, 1993.

PROCEQ. **Concrete Test Equipment**. Disponível em: <<http://www.proceq.com/en/non-destructive-test-equipment/concrete-testing.html?pqr=3>>. Acesso em: 20 janeiro 2011.

QI, Y. Optimized collimator designs for small animal SPECT imaging with a compact gamma camera. In: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. **Proceedings...** IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, v. 02, n. 01, p. 1780-1782, 2005.

QUALITEST. E-Meter MK II - for determination of the Resonant Frequency of materials. Disponível em: <<http://www.worldoftest.com/e-meter.htm>>. Acesso em: 22 outubro 2011.

RADIATION SAFETY. **Isotope Factsheet** - University of Cincinnati. Disponível em <<http://researchcompliance.uc.edu/radsafety/RADFACT.html>>. Acesso em: 20 fevereiro 2011.

RANDENIYA, S. D.; TADDEI, P. J.; NEWHAUSER, W. D.; YEPES P. Intercomparison of Monte Carlo Radiation Transport Codes MCNPX, GEANT4 and FLUKA for simulating proton radiotherapy of the eye. **Nuclear Technology**, v. 168, n. 03, p.810–814, 2009.

SALEH, H. H.; LIVINGSTON, R. The use of X-ray computed tomography (CT) techniques to study the internal structures of concrete. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 09, n. 02, p. 65-66, 2004.

SÃO PAULO. **Lei nº 14.806 de 04 de julho de 2008**. Dispõe (VETADO) sobre propaganda nos lugares que especifica e dá outras providências. *Secretaria do Governo Municipal*. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=05072008L%20148060000> Acesso em: 20 janeiro 2011.

SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, v. 53, n. 326, p. 212-217, 2007.

SEKINE, L.; YUASA, M. e HOTTA, A. Non-destructive exploratory tests of corrosion of steel embedded in cement-paste and mortar by gamma-ray backscattering. **Corrosion Engineering**, v. 41, n. 03, p. 203-214, 1992.

SHAHI, J. S.; KUMAR, A.; METHA, D.; PURI, S.; GARG, M. L.; SINGH, N. Inelastic scattering of 59.5 keV photons by elements with $13 \leq Z \leq 82$. **NIM in Physics Research B**, v. 179, n. 01, p. 15-23, 2001.

SHIVARAMU; VIJAYAKUMAR, R.; RAJASEKARAN, L.; RAMAMURTHY, N. Determining the moisture content in limestone concrete by gamma scattering method: a feasibility study. In: National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Dez. 2002, Chennai, India. **Proceedings...** Indian Society for Nondestructive Testing, 2002, CD-ROM.

SHIVARAMU. Nde of corrosion of MS reinforcing in concrete structures by gamma scattering method. In: National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Dez. 2004, Pune, India. **Proceedings...** Indian Society for Nondestructive Testing, 2004, CD-ROM.

SHIVARAMU. A gamma scattering technique for inspecting concrete structures. In: National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Dez. 2006, Hyderabad, India. **Proceedings...** Indian Society for Nondestructive Testing, 2006, CD-ROM.

SONG, T. Y.; CHOI, Y; JUNG, H.; LEE; K. L.; KIM, B. T. Optimization of pinhole collimator for small animal SPECT using Monte Carlo simulation. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 03, p. 327-332, 2003.

STERNHEIMER, R. M.; BERGER, M. J. e SELTZER, S. M. Density effect for the ionization loss of charged particles in various substances. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**. v. 30, n. 02, p. 261-271, 1984.

TALEEI, R.; SHAHRIARI, M. Monte Carlo simulation of X-ray spectra and evaluation of filter effect using MCNP4C and FLUKA code. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 67, n. 02, p. 266-271, 2009.

TEXSA. **Corrosão do concreto e das armaduras**. Disponível em: <<http://www.texsa.com.br/Livro%2007.htm>>. Acesso em: 10 dezembro 2010.

THOMSON – **Linear Motion - Guides & Slides**. Disponível em < <http://www.thomsonlinear.com>>. Acesso em: 11dezembro 2011.

TUZI, S.; SATO, O. Positioning of reinforcing bars in reinforced concrete by backscattered gamma rays. **Transactions of the American Nuclear Society**, v. 56, n. 03. p. 24-25, 1989.

TUZI, S. ; SATO, O. Locating the positions of reinforcing bars in reinforced concrete using backscattered gamma rays. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 41, n. 10-11, p. 1013-1018, 1990.

TUZI, S.; SATO, O. Positioning of reinforcing bars in reinforced concrete by backscattered gamma rays-II: experimental and Monte Carlo results. **Transactions of the American Nuclear Society**, v. 65, n. 02, p. 69-70, 1992.

TUZI, S.; SATO, O. Determination of positions of reinforcing bars in reinforced concrete by backscattered gamma rays-ii. Experimental and Monte Carlo Results. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 44, n. 10-11, p. 1279-1284, 1993.

VLACHOUDIS, V. FLAIR: a powerful but user friendly graphical interface. In: International Conference on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics. Saratoga Springs, New York, May 3-7, 2009, **Proceedings...** American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 2009.

YACOUT, A. M.; VAN HAAREN, M. H. e DUNN, W. L. A limited-scan backscattering technique for detection of hidden corrosion. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 48, n. 10-12, p. 1313-1320, 1997.

YORIYAZ, H. **Fundamentos do método de Monte Carlo para transporte de radiação**. TNR-5763, São Paulo: Ipen-Cnen, 2010. 91 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código de Monte Carlo

```

*=====
*
* FFFFF L      U  U  K  K   AAA      222   000   1   000 *
* F      L      U  U  K  K   A  A      2   2   0   0   11   0   0 *
* F      L      U  U  K  K   A  A      2   0   0   1   1   0   0 *
* FFFF   L      U  U  KK   AAAAA ==   2   0   0   1   0   0 *
* F      L      U  U  K  K   A  A      2   0   0   1   0   0 *
* F      L      U  U  K  K   A  A      2   0   0   1   0   0 *
* F      LLLLL  UUU   K   K   A  A      22222  000  11111  000 *
*
*
*
*          Version of Fluka2010 for GNU/Linux operating system
*          By :
*
*          Alfredo Ferrari & Paola Sala INFN Milan & CERN/AB
*
*          Alberto Fasso` SLAC, Stanford
*          Fasso@slac.stanford.edu
*
*          Johannes Ranft Siegen University
*          Johannes.Ranft@cern.ch
*
*=====

```

```

TITLE
0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000

      barra de aço 10mm concreto 135 graus

GLOBAL
0.000      0.000      0.000      1.000      1.000      0.000

DEFAULTS
0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      EM-CASCA

BEAM
-5.9540E-05  0.000      0.000      0.1000      0.000      -1.000
PHOTON

      **** Density scaling factors start at location
      1 and end at      4000 (I*4 addr.) ****

BEAMPOS
0.000      0.000      -11.50      0.000      0.000      0.000
POSITIVE

GEOBEGIN
0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
COMBNAME

```

Body data

```

*
*----- Black body -----*
*
*
*----- Void sphere -----*
*

SPH blkbody          1  0.00000000E+00  0.00000000E+00  0.00000000E+00
0.10000000E+08  0.00000000E+00  0.00000000E+00          5

*
*----- Retangular target -----*
*
  SPH void            2  0.00000000E+00  0.00000000E+00
0.00000000E+00  0.10000000E+07  0.00000000E+00  0.00000000E+00      15

*
*----- Colimador -----*
*
  RPP target          3 -0.75000000E+01  0.75000000E+01 -
0.50000000E+01  0.50000000E+01 -0.14000000E+01  0.50000000E+01      25

*
*----- Furo do colimador -----*
*
  RCC corpo           4 -0.60100000E+01  0.00000000E+00 -
0.60100000E+01 -0.21200000E+01  0.00000000E+00 -0.21200000E+01      35
                    0.15000000E+01

*
*----- Detector -----*
*
  RCC furocoli        5 -0.60100000E+01  0.00000000E+00 -
0.60100000E+01 -0.21200000E+01  0.00000000E+00 -0.21200000E+01      46
                    0.35000000E+00

*
*----- Inclusao no alvo -----*
*
  RCC detector        6 -0.81300000E+01  0.00000000E+00 -
0.81300000E+01 -0.70700000E+00  0.00000000E+00 -0.70700000E+00      57
                    0.25000000E+00

  RCC inclusao        7 -0.14000000E+01 -0.50000000E+01
0.00000000E+00  0.00000000E+00  0.10000000E+02  0.00000000E+00      68
                    0.50000000E+00

  END                 8  0.00000000E+00  0.00000000E+00
0.00000000E+00  0.00000000E+00  0.00000000E+00  0.00000000E+00      79

Number of bodies          7
Length of FPD-Array      84

```

Input region data

```

*
*----- Black hole -----*
*
BLKBODY      5 +blkbody -void
*
*----- Void around -----*
*
VOID         5 +void -target -corpo -furocoli -detector -inclusao
*
*----- Target -----*
*
TARGET       5 +target -inclusao
*
*----- Corpo do Colimador -----*
*
CORPOCOL     5 +corpo -furocoli
*
*----- Furo do Colimador -----*
*
FUROCOLI     5 +furocoli
*
*----- Detector -----*
*
DETECTOR     5 +detector
*
*----- Inclusao do alvo -----*
*
INCLUSAO     5 +inclusao
END

```

```

Number of input regions      7
Number of code zones        7
Length of integer array     187

```

CODE ZONE	INPUT REGION	ZONE DATA LOC.	NO. OF BODIES	REGION NO.
1	1	50	2	1
2	2	59	6	2
3	3	84	2	3
4	4	93	2	4
5	5	102	1	5
6	6	107	1	6
7	7	112	1	7

Interpreted body echo

```

Body n.      1 SPH blkbody
0.000000    0.000000    0.000000    0.1000000E+08

Body n.      2 SPH void
0.000000    0.000000    0.000000    1000000.

Body n.      3 RPP target

```

-7.500000	7.500000	-5.000000	5.000000
-1.400000	5.000000		
Body n.	4 RCC corpo		
-6.010000	0.000000	-6.010000	-2.120000
0.000000	-2.120000	1.500000	
Body n.	5 RCC furocoli		
-6.010000	0.000000	-6.010000	-2.120000
0.000000	-2.120000	0.3500000	
Body n.	6 RCC detector		
-8.130000	0.000000	-8.130000	-0.7070000
0.000000	-0.7070000	0.2500000	
Body n.	7 RCC inclusao		
-1.400000	-5.000000	0.000000	0.000000
10.00000	0.000000	0.5000000	

Interpreted region echo

Region n.	1 BLKBODY				
	1 -2				
Region n.	2 VOID				
	2 -3	-4	-5	-6	-7
Region n.	3 TARGET				
	3 -7				
Region n.	4 CORPOCOL				
	4 -5				
Region n.	5 FUROCOLI				
	5				
Region n.	6 DETECTOR				
	6				
Region n.	7 INCLUSAO				
	7				

MATERIAL					
0.000	0.000	2.340	0.000	0.000	0.000
Concrete					

MATERIAL					
0.000	0.000	1.170	0.000	0.000	0.000
Plexigla					

MATERIAL					
30.00	65.39	7.133	0.000	0.000	0.000
ZINC					

MATERIAL					
0.000	0.000	8.520	0.000	0.000	0.000
Brass					

MATERIAL					
48.00	112.4	8.650	0.000	0.000	0.000
CADMIUM					
MATERIAL					
52.00	127.6	6.240	0.000	0.000	0.000
TELLURIU					
MATERIAL					
0.000	0.000	6.200	0.000	0.000	0.000
CdTe					
MATERIAL					
16.00	32.07	2.070	0.000	0.000	0.000
SULFUR					
MATERIAL					
0.000	0.000	0.8000	0.000	0.000	0.000
GYPSUM					
EMF					
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
COMPOUND					
23.00	6.000	40.00	8.000	12.00	14.00
Concrete					
COMPOUND					
12.00	21.00	10.00	3.000	2.000	9.000
Concrete					
COMPOUND					
6.000	3.000	4.000	6.000	2.000	8.000
Plexigla					
COMPOUND					
62.00	12.00	35.00	28.00	3.000	17.00
Brass					
COMPOUND					
-0.4684	30.00	-0.5316	31.00	0.000	0.000
CdTe					
COMPOUND					
-2.3416E-02	3.000	-0.5576	8.000	-0.1862	33.00
GYPSUM					

COMPOUND					
-0.2328	21.00	0.000	0.000	0.000	0.000
GYPSUM					
RANDOMIZ					
1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
EMFRAY					
6.000	3.000	0.000	1.000	0.000	0.000
EMFRAY					
6.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
2.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
34.000	3.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
29.000	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
2.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
27.000	6.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ASSIGNMA					
11.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
EMFCUT					
5.4590E-06	0.000	0.000	2.000	17.00	1.000
PHOT-THR					
USRBIN					
10.00	7.000	-50.00	10.00	1.000	6.000
Fluence					
USRBIN					
-10.00	-1.000	-15.00	500.0	1.000	500.0

USRTRACK

1.000 7.000 -51.00 6.000 1.000 256.0
Track

USRTRACK

0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
&

START

1.2000E+06 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

=== Material compositions: ===

Material Inelastic Number&Name Scattering Length for PHOTON at Beam energy Momentum cm	Atomic Elastic Number Scattering Length for PHOTON at Beam energy Momentum cm	Atomic Radiation Weight Length PHOTON at Beam energy Momentum cm	Density Inelastic Scattering Length for neutrons at Threshold g/cm**3 cm
1 BLCKHOLE	0.000	0.000	0.000
0.1000E+31	0.1000E+31	0.1000E+31	0.1000E+31
2 VACUUM	0.000	0.000	0.000
0.1000E+31	0.1000E+31	0.1000E+31	0.1000E+31
3 HYDROGEN	1.000	1.008	0.8370E-04
0.1195E+35	0.1195E+35	0.7532E+06	0.1738E+10
4 HELIUM	2.000	4.003	0.1660E-03
0.6024E+34	0.6024E+34	0.5682E+06	0.3363E+06
5 BERYLLIU	4.000	9.012	1.848
0.5411E+30	0.5411E+30	35.28	30.69
6 CARBON	6.000	12.01	2.000
0.5000E+30	0.5000E+30	21.35	31.60
7 NITROGEN	7.000	14.01	0.1170E-02
0.8547E+33	0.8547E+33	0.3247E+05	0.5636E+05
8 OXYGEN	8.000	16.00	0.1330E-02
0.7519E+33	0.7519E+33	0.2574E+05	0.5127E+05
9 MAGNESIU	12.00	24.30	1.740
0.5747E+30	0.5747E+30	14.39	45.60
10 ALUMINUM	13.00	26.98	2.699
0.3705E+30	0.3705E+30	8.896	30.80
11 IRON	26.00	55.84	7.874
0.1270E+30	0.1270E+30	1.757	12.31
12 COPPER	29.00	63.55	8.960
0.1116E+30	0.1116E+30	1.436	11.26
13 SILVER	47.00	107.9	10.50
0.9524E+29	0.9524E+29	0.8543	11.68

14 SILICON	14.00	28.09	2.329
0.4294E+30	0.4294E+30	9.370	34.03
15 GOLD	79.00	197.0	19.32
0.5176E+29	0.5176E+29	0.3344	7.862
16 MERCURY	80.00	200.6	13.55
0.7382E+29	0.7382E+29	0.4752	11.05
17 LEAD	82.00	207.2	11.35
0.8811E+29	0.8811E+29	0.5612	13.09
18 TANTALUM	73.00	180.9	16.65
0.6005E+29	0.6005E+29	0.4094	8.750
19 SODIUM	11.00	22.99	0.9710
0.1030E+31	0.1030E+31	28.56	77.87
20 ARGON	18.00	39.95	0.1660E-02
0.6024E+33	0.6024E+33	0.1178E+05	0.5358E+05
21 CALCIUM	20.00	40.08	1.550
0.6452E+30	0.6452E+30	10.42	51.00
22 TIN	50.00	118.7	7.310
0.1368E+30	0.1368E+30	1.206	17.37
23 TUNGSTEN	74.00	183.8	19.30
0.5181E+29	0.5181E+29	0.3504	7.583
24 TITANIUM	22.00	47.87	4.540
0.2203E+30	0.2203E+30	3.560	20.45
25 NICKEL	28.00	58.69	8.902
0.1123E+30	0.1123E+30	1.424	10.98
26 Concrete	9.091	18.11	2.340
0.4274E+30	0.4274E+30	10.57	31.01

Material	Number	Atom content	Partial Densities
CARBON	6	0.23232	0.36055
OXYGEN	8	0.40404	0.83528
SILICON	14	0.12121	0.43988
CALCIUM	20	0.12121	0.62770
HYDROGEN	1	0.10101	0.13155E-01
MAGNESIU	12	0.20202E-01	0.63444E-01
27 Plexigla	3.833	7.174	1.170
0.8547E+30	0.8547E+30	34.13	59.85

Material	Number	Atom content	Partial Densities
HYDROGEN	1	0.50000	0.82191E-01
CARBON	6	0.33333	0.65293
OXYGEN	8	0.16667	0.43488

28 ZINC	30.00	65.39	7.133
0.1402E+30	0.1402E+30	1.743	14.40
29 Brass	30.94	68.50	8.520
0.1174E+30	0.1174E+30	1.367	12.27

Material	Number	Atom content	Partial Densities
COPPER	29	0.62000	4.9003
ZINC	30	0.35000	2.8466
LEAD	82	0.30000E-01	0.77313

30 CADMIUM	48.00	112.4	8.650
0.1156E+30	0.1156E+30	1.040	14.38
31 TELLURIU	52.00	127.6	6.240
0.1603E+30	0.1603E+30	1.415	20.67
32 CdTe	50.00	120.0	6.200
0.1613E+30	0.1613E+30	1.436	20.45

Material	Number	Atom content	Partial Densities
CADMIUM	30	0.50000	2.9038
TELLURIU	31	0.50000	3.2962
33 SULFUR	16.00	32.07	2.070
0.4831E+30	0.4831E+30	9.419	39.97
34 GYPSUM	7.333	14.35	0.8000
0.1250E+31	0.1250E+31	30.77	93.48

Material	Number	Atom content	Partial Densities
HYDROGEN	1	0.33332	0.18733E-01
OXYGEN	8	0.50002	0.44606
SULFUR	16	0.83321E-01	0.14897
CALCIUM	20	0.83341E-01	0.18624

=== Regions: materials and fields ===

Region N.	Name	Material N.	Name	Magn./El.	Field (on/off)	Minimum	Maximum
step size (cm)							
1	BLKBODY	1	BLCKHOLE	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
2	VOID	2	VACUUM	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
3	TARGET	34	GYPSUM	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
4	CORPOCOL	29	Brass	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
5	FUROCOLI	2	VACUUM	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
6	DETECTOR	27	Plexigla	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04
7	INCLUSAO	11	IRON	OFF		0.00000E+00	9.99852E+04

=== End of the output associated with the input ===

```

=====
Summary of FLUKA-2010 run (Copyright 1989-2009 INFN & CERN)
  Authors:  A.Fasso` (SLAC),  A.Ferrari (CERN & INFN),
           J.Ranft (Siegen), P.R.Sala (INFN)
=====

```

Total number of primaries run: 1200000 for a weight of: 1.200000E+06
 !!!Please remember that all results are normalized per unit weight !!!
 The main stack maximum occupancy was 1 out of 40000 available

Total CPU time used to follow all primary particles: 4.065E+01
 seconds of:

Average CPU time used to follow a primary particle: 3.388E-05
 seconds of:
 Maximum CPU time used to follow a primary particle: 2.003E-03
 seconds of:
 Residual CPU time left: 1.000E+30
 seconds of:

5.9540E-05 (100.%) GeV available per beam particle divided into
 Prompt radiation Radioactive decays
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV hadron and muon dE/dx
 3.9487E-05 (66.3%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV electro-magnetic showers
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV nuclear recoils and heavy
 fragments
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV particles below threshold
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV residual excitation energy
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV low energy neutrons
 2.0053E-05 (33.7%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV particles escaping the
 system
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV particles discarded
 0.0000E+00 (0.0%) 0.0000E+00 (0.0%) GeV particles out of time limit
 -2.1521E-16 (0.0%) GeV missing

```

=====
                End of FLUKA-2010 run (Copyright 1989-2009 INFN & CERN)
                Authors:  A.Fasso` (SLAC),  A.Ferrari (CERN & INFN),
                        J.Ranft (Siegen), P.R.Sala (INFN)
=====
  
```

APÊNDICE B – Valor Mínimo para o Contraste

Neste apêndice derivamos a equação 18 do valor mínimo para o contraste (C_{min}). Esta quantidade representa o nível mínimo de contraste estabelecido para que os resultados obtidos pelo equipamento de inspeção Compton tenham confiabilidade de 95% assegurada. O contraste definido pela equação 17 serve de base para o contraste mínimo. Para se determinar o valor mínimo de contraste a média das contagens do material da amostra (C_{bulk}) e da inclusão ($C_{inclusão}$), é acrescida ou subtraída dos seus respectivos erros no sentido de aproximar os dois valores resultantes.

Para 95% de confiança a média das contagens provenientes do material e da inclusão deve ser conhecida dentro de um intervalo de mais ou menos dois desvios padrões, assumindo uma distribuição normal para o erro. Segundo a distribuição de Poisson o desvio padrão associado a uma contagem é definido como (KNOLL, 2000):

$$\sigma = \sqrt{C} \quad (B1)$$

onde C é a média da contagem líquida.

Desta maneira, o intervalo de 95% de confiança para essa contagem é representado por:

$$C \pm 2\sqrt{C} \quad (B2)$$

Para se determinar o valor mínimo para o contraste, o mais baixo valor para C_{bulk} e o mais alto valor para $C_{inclusão}$ devem ser substituídos na equação 17. Com esse procedimento, estamos usando a “pior” estimativa de ambas as contagens para compor o valor mínimo para o contraste, dado por:

$$C_{min} = \frac{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}}) - (C_{inclusão} + 2\sqrt{C_{inclusão}})}{(C_{bulk} - 2\sqrt{C_{bulk}})} \quad (B3)$$

onde C_{bulk} é a média integrada das contagens registradas pelo detector nos pontos onde o feixe incidente está somente sobre o material da amostra e $C_{inclusão}$ é a média das contagens quando o feixe incidente está interceptando uma inclusão no interior da amostra.

APÊNDICE C - Cálculo da Espessura da Blindagem

Nesta seção determinamos a espessura da blindagem de chumbo para que a dose recebida pelo operador do aparato experimental contendo a fonte de ^{241}Am com atividade de 100 mCi, seja de no máximo 1 mSv/ano. Este valor é estabelecido pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2007), como a dose máxima de radiação para o público em geral no período de um ano.

A dose recebida (D) pode ser calculada pela seguinte relação (LEO, 1994):

$$D = 0,87 \frac{\Gamma A}{d^2} e^{-\mu x} \quad (\text{C1})$$

Onde: Γ é a constante específica da radiação gama, A é a atividade da fonte, d é a distância média da fonte ao operador, μ é o coeficiente de atenuação linear do material que compõem a blindagem e x é a espessura.

Considerando que o operador trabalhe 250 dias no ano / 8 horas por dia, a dose máxima permitida é de aproximadamente 5×10^{-7} Sv/h ou $4,19 \times 10^{-6}$ R/h. O valor da constante específica da radiação gama para o ^{241}Am é de: $\Gamma = 0,313723$ Rm²/Cih. A atividade de nossa fonte é de: $A = 100$ mCi. O coeficiente de atenuação linear do chumbo para a energia de 59,54 keV tem valor de: $\mu_{\text{Pb}}(59,54 \text{ keV}) = 5786$ m⁻¹. Por fim, a distância média entre o operador e o dispositivo foi considerada em 30 cm.

Rearranjando os termos da equação C1 e explicitando a espessura da blindagem, temos que:

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{d^2 D}{0,87 \Gamma A}\right) \quad (\text{C2})$$

Após a substituição dos valores na equação, temos o resultado para a espessura da blindagem de chumbo no valor de $x = 1,93$ mm.

APÊNDICE D – Produção Bibliográfica

Este apêndice relaciona as publicações produzidas durante o doutorado.

D.1 ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

BOLDO, E. M. e APPOLONI, C. R. Detection of defects in acrylic and steel inclusions in gypsum using Compton backscattered gamma rays. **AIP Conference Proceedings**, v. 1351, p. 321-325, 2011.

D.2 ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

BOLDO, E. M.; PRESTES, A. A. e C.R. APPOLONI. A geometry and collimation study of a Compton backscatter device for inclusions detection in materials. **Proceedings of Science**, v. 01, p. 1-7, 2011.

BOLDO, E. M.; PRESTES, A. A. e APPOLONI, C. R. Positioning of steel rods inclusions in reinforced concrete simulant by Compton backscattering. In: International Nuclear Atlantic Conference, 2011, Belo Horizonte. **Proceedings... 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011**. v. 01, p. 1-6, 2011.

D.3 RESUMOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSOS

BOLDO, E. M. e APPOLONI, C. R. Detection of defects in acrylic and steel inclusions in gypsum using Compton backscattered gamma rays. In: XXXIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2010, Campos do Jordão. Livro de Programa e Resumos da XXXIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, v. 01, p. 44, 2010.

D.4 DEMAIS TIPOS DE PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA

BOLDO, E. M. e APPOLONI, C. R. Aplicações do Espalhamento Compton de Raios Gama. **LFNATEC** - Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (ISSN 2178-4507), v. 14, n. 01, 2010. 74 p.