

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRANSMISSÃO E FLUÊNCIA DE FÓTONS NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO PARA  
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FEIXE E BLINDAGENS

por

Sandro Fernandes Firmino

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2010.

TRANSMISSÃO E FLUÊNCIA DE FÓTONS NA ÁREA DE RADIODIAGNÓSTICO PARA  
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE FEIXE E BLINDAGENS

por

Sandro Fernandes Firmino  
Bacharel e Licenciado em Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Marco Tullio Mena Barreto de Vilhena

Co-Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Gabriela Hoff - PUCRS

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Cássio Stein Moura FAFIS/PUCRS

Prof. Dr. Antônio Carlos Marques Alvim ENG. NUCLEAR/UFRJ

Prof. Dr. Volnei Borges DENUC/UFRGS

Prof. Dr. Horácio A Vielmo

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Março de 2010.

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha filha e esposa, Yasmin Soares Firmino e Taís Aguiar Soares.

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo da influencia das composições dos materiais de blindagem e variações nos espectros emitidos por equipamentos de raios X através da utilização de um programa computacional que utiliza a técnica de Monte Carlo. Foi determinada a fluência de fótons depois das blindagens, com geometrias realísticas de feixe primário, para espectros de energias utilizados na prática da radiologia diagnóstica, gerando, dessa maneira, um banco de dados representativos da transmissão média e fluência para os materiais estudados. Com o método proposto, busca-se analisar a influencia da composição da argamassa baritada, e do concreto em curvas de transmissão, bem como sua influencia na determinação da espessura de blindagem, e a influencia da alteração das características do espectro da radiação X na transmissão de fótons. A metodologia desse trabalho foi realizada em duas etapas distintas: a análise com dados de fluência e da transmissão com espectros monoenergéticos e polienergéticos, mantendo-se as mesmas configurações das geometrias internas de simulação, como por exemplo, a filtração total, o *ripple* e o ângulo efetivo do feixe, mas considerando um material de blindagem para o espectro monoenergético e três materiais para o espectro polienergético; a intercomparação entre o mesmo material de blindagem, através da alteração da filtração total, do *ripple*, e do ângulo de voo da geometria interna de simulação. Como resultado, foi possível analisar os dados simulados, apresentando diferenças aparentemente significativas entre os dados das transmissões médias de fótons, devido às diferentes composições, mas estas diferenças não são significativas a ponto de influenciarem nas estimativas das espessuras das blindagens na construção civil. Este trabalho também apresenta um banco de dados contendo as fluências de radiação X, depois das blindagens para as diferentes configurações de feixe e materiais da parede, e um banco de dados contendo as curvas e suas equações de ajuste das curvas de transmissão para os diferentes materiais estudados. A avaliação da alteração da transmissão em função de variações no espectro de emissão de radiação X demonstrou grande importância para a influencia destes fatores na formação do espectro. As alterações nas composições do espectro, devido às variações da filtração total de alumínio, aumentaram o poder de penetração no material absorvedor e em sua energia média do feixe. As mudanças na composição do espectro devido a alterações do ângulo de inclinação do anodo e do *ripple*, evidenciaram seu grau de influencia nas estimativas das curvas de transmissão de fótons X, onde o aumento do ângulo efetivo e do *ripple* no espectro aumenta a participação de fótons de baixa energia, e diminui a energia média do feixe e a camada semirredutora, tendo uma participação diferenciada na formação da imagem radiográfica. Trabalhos futuros poderão ser realizados com simulações de maior número de pontos de espessuras e de histórias, possibilitando uma melhor estatística dos dados simulados, minimizando assim os erros relativos. Além disso, sugere-se que esse método seja aplicado a diferentes materiais e composições de materiais utilizados na construção de blindagens, com o intuito de gerar um banco de dados que auxilie na proteção radiológica na área da radiologia geral.

Palavras-chave: Fluxo de fótons; composição; transmissão; camada semirredutora; blindagem.

## ABSTRACT

This work presents a study of the influence of the compositions of shielding materials and variations in the spectra emitted by X-ray equipment by using a computer program that uses the Monte Carlo technique. The flux of photons was determined after the shielding material, with realistic geometries of the primary beam energy spectra used in the practice of diagnostic radiology, generating in this way, a database representative of the average transmission and fluence for the materials studied. With the proposed method, we seek to analyze the influence of barium composition of the mortar, and concrete transmission curves and their influence in determining the shielding thickness, and the influence of altering the characteristics of the radiation spectrum in the transmission of X photons. The methodology of this study was conducted in two stages: analysis with data streaming and transmission spectra with monoenergetic and polienegetic beams, keeping the same settings of the internal geometry of the simulation, for example, the total filtration, the *ripple* and the effective angle beam, although considering a shielding material for the monoenergetic spectrum and three materials for the polienegetic spectrum; the intercomparison between the same shielding material by changing the total filtration, *ripple*, and the angle of flight of the internal geometry simulation. As a result it was possible to analyze the simulated data, presenting among mean transmission data of photons, due to different compositions, but these differences are not significant enough to influence the thicknesses of shielding estimation used in the construction industry. This work also presents a database containing the fluence of X-irradiation, the shielding for the various beams and wall materials, and a database containing the curves and their equations to fit the curves of transmission for different materials studied. The evaluation of the change in transmission due to variations in the emission spectrum of X-rays showed great importance on the influence of these factors in the formation of the spectrum. Changes in the composition of the spectrum, due to variations in the total aluminum filtration, increased the power of penetration into the absorbing material and its average energy. Changes in the composition of the spectrum due to changes in the angle of the anode and the *ripple*, showed their influence in the estimation of transmission curves of X-photons, where the increase in the effective angle and *ripple* in the spectrum increases the participation of low energy photons, and decreases the average energy of the beam and half-value layer, and a differentiated participation in the formation of radiographies. Future work will be carried on simulations of many points of thicknesses and stories, allowing a better statistical analysis of simulated data, thus minimizing the relative errors. Moreover, it is suggested that this method be his applied to different materials and compositions of shielding materials in order to generate a database to assist in radiological protection in the field of general radiology.

Keywords: Flux of photons; composition; transmission; half value-layer; shielding.

# ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivos Gerais .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.1 O Método Monte Carlo .....	6
2.1.1 Simulação Monte Carlo do Transporte de Radiação na Matéria.....	8
2.2 Programa de Simulação Monte Carlo GEANT4.....	9
2.2.1 Os modelos físicos eletromagnéticos do GEANT4.....	10
2.2.2 Cortes de passagem e limites de produção de partículas.....	11
2.2.3 Estrutura Básica do GEANT4, Versão 9.1 p2.....	12
2.3 Raios X: produção e fatores que a influenciam.....	14
2.4 Produção dos Espectros de Raios X .....	16
2.4.1 Filtração .....	18
2.4.2 Tensão do Tubo .....	20
2.4.3 Carga Transportada pelo Tubo .....	21
2.4.4 Suprimento de Alta Tensão .....	22
2.5 Grandezas Dosimétricas .....	24
2.5.1 Fluência .....	25
2.5.2 Fluência de Energia .....	25
2.5.3 Espectro de Energia.....	26
2.5.4 Camada Semirredutora – CSR.....	27
2.5.5 <i>KERMA</i> .....	27
2.5.6 Transmissão .....	28
2.6 Interação de Fótons com a Matéria.....	28
2.6.1 Absorção da Radiação por Efeito Fotoelétrico.....	29
2.6.2 Secção de Choque.....	31
2.6.3 Espalhamento Coerente ou Rayleigh.....	32
2.6.4 Espalhamento Incoerente ou Compton.....	34
2.6.5 Coeficiente de Atenuação Linear Total .....	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Construção Virtual da Geometria Espacial da Simulação.....	37
3.2 Determinação do <i>KERMA</i> .....	44
3.3 Estimativa da Transmissão .....	44
3.4 Tempo de Execução das Simulações.....	45
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	47
4.1 Espectros Monoenergéticos.....	48
4.1.1 Fluxo de fótons .....	48
4.1.2 Transmissão de Fótons .....	50

4.2 Espectros Polienergéticos .....	53
4.2.1 Argamassa Baritada .....	53
4.2.2 Concreto .....	58
4.2.3 Influencia da Alteração das Características do Espectro da Radiação X na Transmissão de Fótons .....	62
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	67
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
ANEXO A: Tabela de dados dos espectros normalizados por tensão de pico do tubo de raios X de tungstênio [W] com variação de 15 keV até 150 keV, ao passo de 0,5 keV, para tensões máximas aceleradoras de 80, 90, 100, 120, 150 kVp. ....	73
ANEXO B: Transmissão de fótons em função da espessura do material BM1, para espectro monoenergético com tensões de pico de tubo de raios X de 60 a 150 keV, ao passo de 10 keV. ....	78
ANEXO C: Diferentes tensões aceleradoras de tubo e espectro monoenergético simuladas neste trabalho, para a argamassa baritada. ....	79
ANEXO D: Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto por argamassa baritada BM1, BM2, BM3 e BM4, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm. ....	80
ANEXO E: Curva de ajuste da espessura em função da transmissão para diferentes tensões aceleradoras de tubo simuladas neste trabalho, para a argamassa baritada. ....	83
ANEXO F: Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto de concreto das referências NIST e Simpkin, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm. ....	84
ANEXO G: Curva de ajuste da espessura em função da transmissão para diferentes tensões aceleradoras de tubo simuladas neste trabalho, para o concreto das referências NIST e Simpkin Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto de concreto das referências NIST e Simpkin, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm. ....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura das classes do GEANT4 utilizadas neste trabalho para a simulação do transporte da radiação na matéria.....	13
Figura 2: Gráfico ilustrativo da forma geral do espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 100 kVp, a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997].....	17
Figura 3: Espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 90 keV, a 750 mm do ponto focal, com variações da filtração adicional de 2,0; 2,5, 3,0 e 4,0 mm de alumínio, <i>ripple</i> de 0 % e ângulo de voo de 6°[CRANLEY, 1997]. .....	20
Figura 4: Gráfico ilustrativo da alteração da forma do espectro de emissão de raios X do tungstênio, devido à variação da tensão aceleradora aplicada a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997]. .....	21
Figura 5: Gráfico ilustrativo da alteração da forma do espectro de emissão de raios X do tungstênio, devido à variação da carga transportada pelo tubo de raios X aplicada a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997].....	22
Figura 6: Forma de onda sem retificação (monofásica) 1, Retificação de meia onda (monofásica) 2 , Retificação de onda completa (monofásica) 3, Retificação de onda completa (trifásica) 4 e Retificação de onda multi-pulsos (alta frequência) 5 [FIRMINO, 2006].....	23
Figura 7: Espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 100 kVp, a 750 mm do ponto focal, com variações de <i>ripple</i> de 6 %, 12 % e 22 % [CRANLEY, 1997].....	24
Figura 8: Representação esquemática da interação da radiação com o meio [EIKA, 2003].....	29
Figura 9: Representação do efeito fotoelétrico [CNEN/IRD, 2003] .....	30
Figura 10: Percentual da transferência de energia em função da energia do fóton incidente na água, considerando intervalo de energia [JOHNS, 1983]. .....	32
Figura 11: Representação do Efeito Compton [CNEN/IRD, 2003].....	34
Figura 12: Gráfico ilustrativo do Coeficiente de Atenuação Linear e absorvido por energia do fóton, para o material ar, definido conforme especificações da ICRU 44 [ICRU 44], [NIST, 2006].....	36
Figura 13: Figura ilustrativa da geometria de simulação: (A) geometria espacial; (B) geometria virtual simulada: contendo um mundo virtual esférico com 2,5 m de raio, uma parede de cor verde situada a 100 cm do ponto focal de tubo de raios X e um volume sensível de cor amarela a 10 cm da parede, gerada pela interface gráfica do GEANT4 <i>wired</i> . .....	38
Figura 14: Ilustração (A) da análise dos elementos químicos que constituem a argamassa baritada e (B) da heterogeneidade composição química da amostra estudada, obtidos através de técnicas de <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM). .....	39
Figura 15: Gráficos ilustrativos (A) dos espectros de emissão de raios X do ponto focal, considerando alvo de tungstênio [W], filtração total de alumínio de 3,0 mm, ângulo efetivo de 6°, tensões de pico de 80, 100, 120 e 150 kVp, com <i>ripple</i> de 0 %; e (B) da probabilidade de fluência de fótons por energia de fótons emitidos pela fonte, para as mesmas condições. Espectros baseados no catálogo de Cranley (1997) com regressão ao ponto focal e adição de filtração total de alumínio realizada pelo autor.....	41

Figura 16: Gráficos ilustrativos dos espectros de emissão de raios X do ponto focal, considerando alvo de tungstênio [W], para (A) filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm, <i>ripple</i> constante de 5 % e 6° de ângulo efetivo do tubo; (B) <i>ripple</i> variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; e (C) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, <i>ripple</i> de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio. Espectros baseados no catálogo de Cranley (1997) com regressão ao ponto focal e adição de filtração total de alumínio realizada pelo autor. ....	43
Figura 17: Gráficos do fluxo de fótons de saída da superfície da parede de blindagem considerando mesma composição de material (BM1) com diferentes espessuras para os espectros monoenergéticos de 60 keV e 150 keV para as espessuras de 0,1, 0,5 e 1,0 para a energia de 60 keV, e 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mm para a energia de entrada na blindagem de 150 keV: (A) considerando fluxo total para todas as energias e (B) considerando o fluxo para energias abaixo de 150 keV. ....	48
Figura 18: Gráfico do fluxo de fótons na saída da superfície da parede de blindagem considerando o fluxo de fótons para a mesma espessura (2,0 mm) para materiais de composição diferente BM1, BM2, BM3 e BM4. ....	49
Figura 19 Gráfico da transmissão de fótons em função da espessura do material de blindagem e de diferentes composições da argamassa de barita, para espectros monoenergéticos de (a) 60 keV e (b) 150 keV. ....	50
Figura 20: Transmissão de fótons em função da espessura do material absorvedor com espectros polienergéticos de 80, 100, 120 e 150 kVp, para o material de blindagem composto de argamassa baritada, considerando o mesmo material, mas de composições diferentes: BM1, BM2, BM3 e BM4. ....	54
Figura 21: Transmissão de fótons em função da espessura do material com espectros polienergéticos de 80, 100, 120 e 150 kVp para o material de blindagem composto de concreto das referências NIST [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995]. ....	59
Figura 22: Transmissão de fótons em função da espessura do material com espectro polienergético de 90 kVp para o material de blindagem composto de ferro, com ângulo de voo de 6°, <i>ripple</i> de 5 % e filtração total de alumínio variável. ....	63
Figura 23: Gráficos ilustrativos das curvas de transmissão de fótons em função da espessura do material absorvedor, com espectro polienergético de 90 kVp; para (A) <i>ripple</i> variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; (B) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, <i>ripple</i> de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio. ....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fração de massa e densidade de cada elemento: Concreto NIST [NIST, 2008], Concreto Simpkin [SIMPKIN, 1995], e Argamassa Baritada para as quatro coletas da mesma amostra denominadas BM1, BM2, BM3 e BM4. ....	40
Tabela 2: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para a intercomparação entre materiais, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, filtração total de alumínio de 3,0 mm, ângulo efetivo de 6°, tensões de pico de 80, 100, 120 e 150 kVp, e <i>ripple</i> de 0 %. ....	41
Tabela 3: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com filtração total, ângulo efetivo de 6° e <i>ripple</i> variáveis para a tensão de pico de 90 kVp. ....	42
Tabela 4: Configurações dos computadores utilizados nas simulações .....	46
Tabela 5: Materiais de blindagens com tempo de simulação estimado para todas as energias simuladas .....	46
Tabela 6: Diferença percentual da Transmissão de fótons para espectros monoenergéticos, considerando energias entre 60 e 150 keV, com passo de 10 keV. ....	52
Tabela 7: Dados de <i>KERMA</i> , camada semirredutora e energia média do espectro de saída da blindagem; e energia depositada por fóton, e a energia absorvida no volume sensível e transmissão de fótons dos materiais de blindagem compostos por argamassa baritada BM1, BM2, BM3 e BM4, com energia de tubo de 150 kVp, alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm. ....	56
Tabela 8: Diferença percentual da transmissão média de fótons para espectros polienergéticos, considerando energias de 80, 100, 120 150 kVp. ....	57
Tabela 9: Dados simulados da transmissão de fótons e <i>KERMA</i> para o material de blindagem composto de concreto da referência NIST (considerado material padrão no cálculo da diferença percentual) [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995], considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm. ....	60
Tabela 10: Diferença percentual da Transmissão de fótons para espectros polienergéticos de energias de 80, 100, 120 150 kVp, para o material de blindagem composto de concreto da referência NIST (considerado material padrão no calculo da diferença percentual) [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995]. ....	61
Tabela 11: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com <i>ripple</i> e ângulo efetivo fixo, e filtração total variável para a tensão de pico de 90 kVp. ....	64
Tabela 12: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com <i>ripple</i> e ângulo efetivo fixo, e filtração total variável para a tensão de pico de 90 kVp; para (A) <i>ripple</i> variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; (B) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, <i>ripple</i> de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio. ....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Área [m <sup>2</sup> ]
$E$	Exposição [C.kg <sup>-1</sup> ]
$E_{ab}$	Energia absorvida [J]
$E_{lig}$	Função trabalho [eV]
$E_{tr}$	Energia transferida [J]
$h$	Constante de Planck
$I$	Intensidade do feixe
$I_0$	Intensidade inicial do feixe
$K_i$	Taxas de <i>KERMA</i> no ar com barreira [ J.kg <sup>-1</sup> ]
$K_0$	Taxas de <i>KERMA</i> no ar sem barreira [ J.kg <sup>-1</sup> ]
SF	Função Espalhamento
$t$	Tempo final [s]
$T$	Transmissão
$t_0$	Tempo inicial [s]
$\nu$	Frequência da radiação [Hz]
$X$	Livre caminho médio [m]
$Z$	Número atômico
$\varphi$	Densidade de fluxo [m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\Phi$	Fluência [m <sup>-2</sup> ]
$\Psi$	Fluência de energia [J.m <sup>-2</sup> ]
$\mu$	coeficiente linear de atenuação total do material [m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
$n$	Número aleatório entre 0 e 1
$\sigma$	Secção de choque [m <sup>2</sup> ]
$\Phi(E)$	Função de Klein-Nishina
$\mu_{tr}$	Coeficiente mássico de transmissão de energia [m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Densidade [kg.m <sup>-3</sup> ]

## LISTA DE ABREVIATURAS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSR	Camada Semirredutora [mm]
EADL	<i>Evaluated Atomic Data Library</i>
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva de raios X
EEDL	<i>Evaluated Electrons Data Library</i>
EPDL	<i>Evaluated Photons Data Library</i>
FOV	“ <i>Field of view</i> ” / Campo de visão
GEANT	<i>GEometry ANd Tracking</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
ICRU	<i>International Commission on Radiation Units and Measurements</i>
KERMA	Soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas pelas radiações ionizantes sem cargas [ J.kg <sup>-1</sup> ]
LCM	Livre Caminho Médio [cm]
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
NCRP	<i>National Commission on Radiological Protection</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
<i>Ripple</i>	Varição de um sinal de tensão contínua
SI	Sistema Internacional de Unidades
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
WIRED	Interface gráfica do GEANT4

# 1 INTRODUÇÃO

A proteção radiológica é o ramo da ciência da física radiológica que estuda as aplicações das radiações com segurança, tendo como finalidade proteger os indivíduos, regulamentando e limitando o uso das radiações aceitáveis.

Os possíveis danos causados pelo uso das radiações ionizantes a trabalhadores e pacientes expostos a este tipo de radiação, justificam o desenvolvimento de uma proteção que minimize riscos e maximize os benefícios desta técnica.

Com o objetivo de estudar os efeitos e determinar recomendações de limites seguros para as aplicações das radiações, foi estabelecida uma comissão de peritos em proteção radiológica para sugerir limites de dose e outros procedimentos de trabalho seguro em radiações ionizantes. Esta comissão, a *Internacional Commission on Radiological Protection* (ICRP), surgiu em 1928 e ainda continua como um órgão científico que elabora recomendações sobre a utilização segura de materiais radioativos e de radiações ionizantes [MAZZILLI, 2002].

Com base nas recomendações internacionais da ICRP documento 60 [ICRP, 1990] e da legislação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) NE 3.01 [CNEN, 1998], e da Portaria Federal nº 453 do Ministério da Saúde [MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998], considera-se que o principal objetivo da proteção radiológica é proteger os indivíduos e a humanidade, em geral, dos efeitos prejudiciais/danosos das radiações ionizantes.

Para que tal objetivo seja alcançado, se faz necessário estabelecer os princípios de radioproteção, sendo eles: justificação, limitação de dose, otimização e prevenção de acidentes. Ainda que os limites de dose sejam obedecidos e ocorra a justificação das radiações ionizantes, é preciso otimizar os níveis de radiação de maneira que a exposição de indivíduos a fontes radioativas seja “tão baixo quanto razoavelmente exequível”, filosofia do princípio fundamental

de proteção radiológica conhecida como ALARA (“*As Low As Reasonably Achievable*”) [MAZZILLI, 2002].

De acordo com a norma estabelecida pela Portaria Federal nº 453 [MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998] procura-se otimizar a proteção radiológica estimando a espessura da blindagem mínima necessária, através da utilização das curvas de transmissão de fótons, para diferentes materiais com propriedades de atenuação estruturais que interceptam os feixes de raios X utilizados em radiologia diagnóstica.

Em radiologia diagnóstica são utilizados diferentes parâmetros para estimar a espessura da blindagem. Um dos parâmetros fundamentais utilizado é a transmissão de fótons para determinados materiais, doravante denominada transmissão. As curvas dos dados de transmissão, em função da espessura, para diferentes materiais, podem ser utilizadas para estimar a espessura adequada do material da blindagem para cada aplicação diagnóstica das radiações.

O processo de validação do código GEANT4 para uso em cálculo de blindagens na área da Radiologia Diagnóstica foi realizado no ano de 2007, conforme os trabalhos publicados em congressos internacionais [FIRMINO, 2007; FIRMINO 2, 2007].

Estudos foram realizados sobre as bibliotecas de secção de choque do programa de simulação de Monte Carlo GEANT4 [FIRMINO 3, 2007], em sua versão 8.3, gerando um banco de dados representativo da transmissão média para os materiais comumente recomendados na *National Commission on Radiological Protection* documento 147 [NCRP, 2005], utilizado no Brasil como referência para estimativa de blindagens da área da Radiologia Diagnóstica.

A validação consistiu em comparar os dados simulados pelo programa GEANT4 com dados coletados por outras ferramentas computacionais por Simpkin e *in locu* por De Paula ET AL [SIMPKIN, 1995; DE PAULA, 2006].

Diferentes autores já publicaram sobre curvas de transmissão como função da espessura do material da blindagem, mas os dados publicados são limitados a poucos materiais. Atualmente os dados utilizados para estes cálculos são publicados por Simpkin [SIMPKIN, 1995] e Firmino [FIRMINO, 2007] para o concreto, e para a argamassa baritada por Firmino [FIRMINO 3, 2007] e Costa [DE PAULA, 2006]. Tais curvas são baseadas em recomendações internacionais, entre elas pode-se citar a NCRP documento 147, e os dados gerados através de simulações computacionais e de medidas experimentais.

A argamassa baritada vem sendo utilizada como blindagem de radiação X no Brasil, pois apresenta alta eficiência na blindagem, porém, não existe um banco de dados das curvas de transmissão como função da espessura para se fazer uma estimativa da espessura da blindagem para diferentes materiais [FIRMINO 3, 2007; DE PAULA, 2006].

Neste trabalho será realizado um estudo da influencia das composições dos materiais para a determinação das fluências depois das blindagens, com geometrias realísticas de feixe primário, para espectros de energias utilizados na prática da radiologia diagnóstica, gerando, dessa maneira, um banco de dados representativos da transmissão média e fluência para os materiais estudados. Construir um banco de dados contendo as fluências de radiação depois das blindagens e as curvas de transmissão para os diferentes materiais estudados.

### 1.1 Justificativa

Ao longo dos últimos anos, têm sido estudadas por diversos pesquisadores [SIMPKIN, 1995; DE PAULA, 2006; FIRMINO 3, 2007] curvas de atenuação da radiação ionizante de diferentes energias, para chumbo, concreto, ferro, dentre outros materiais utilizados nas blindagens de instalações radioativas. Contudo, observa-se que a argamassa baritada (cimento, areia, água, sulfato e bário) vem sendo utilizada como blindagem de radiações X e gama, em virtude de apresentar algumas vantagens, tais como a alta eficiência na blindagem de radiação, aplicação de fácil manuseio, facilidade de ser encontrada no mercado nacional e baixo custo.

O dimensionamento da argamassa baritada, utilizada no revestimento e construções de paredes, é determinado atualmente pelo princípio da equivalência de espessura em relação ao concreto ou ao chumbo, o que o torna superestimado pela utilização desse princípio, podendo ocorrer erros significativos, em função da diferença de densidade específica entre o chumbo ou o concreto e a barita, acarretando muitas vezes sobrecarga na estrutura da instalação.

Este fato decorre da falta de padronização quanto à descrição da composição padrão desse material, e curvas de transmissão, por documentos oficiais nacionais e/ou órgãos

internacionais, como, por exemplo, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) [ICRP, 1990], o *National Institute of Standard and Technology*, EUA [NIST, 2008] e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [CNEN, 1998].

A análise da influencia da composição da argamassa baritada em curvas de transmissão e, conseqüentemente, sua influencia na determinação da espessura de blindagem, possibilita garantir uma maior segurança quanto ao cálculo da espessura da blindagem a ser utilizada nas instalações radioativas, minimizando os riscos para os pacientes e funcionários da saúde, maximizando os benefícios desta prática e reduzindo os custos para a construção de blindagem sem risco adicional para a integridade da proteção.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Analisar a influencia da composição da argamassa baritada, e do concreto em curvas de transmissão, bem como sua influencia na determinação da espessura de blindagem.

Analisar a influencia da alteração das características do espectro da radiação X na transmissão de fótons.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

1. Simular, através de um programa computacional que utiliza a técnica de Monte Carlo, o *KERMA* e a energia absorvida para diferentes materiais de blindagem, assim como as considerações de espectros de radiação, aplicadas à Radiologia Diagnóstica para geometria de feixe primário;
2. Construir um banco de dados contendo as fluências de radiação X, depois das blindagens para as diferentes configurações de feixe e materiais da parede, para verificar a influencia da radiação primária nestas estimativas.
3. Construir um banco de dados contendo as curvas e suas equações de ajuste das curvas de transmissão para os diferentes materiais estudados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a adequada compreensão da metodologia utilizada e dos resultados deste trabalho, será necessária a descrição histórica dos dois grandes temas envolvidos: o método de Monte Carlo e as formas de interação da radiação com a matéria, incluindo as grandezas dosimétricas descritoras de um feixe de raios X. Os temas abordados serão exemplificados na faixa energética da radiologia diagnóstica, considerando os espectros de raios X e suas características.

### 2.1 O Método Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um método estatístico de simulação numérica, geralmente utilizada para resolução de problemas demasiadamente complexos para serem resolvidos analiticamente, ou seja, é um método que combina automatização de cálculos e conceitos estatísticos com a geração de números aleatórios como, por exemplo, a simulação de geometrias tridimensionais do comportamento de sistemas físicos, matemáticos e também biológicos [MANNO, 1999].

Um dos primeiros documentos que relatam a utilização deste método foi escrito pelo naturalista francês Georges-Louis Leclerc, *Le Comte de Buffon* (1707-1788). Naquele documento Buffon relata o problema, mais conhecido como a agulha de Buffon (*l'aiguille de Buffon*), onde trata sobre um problema de probabilidade de uma agulha de comprimento  $l$  interceptar uma linha,

quando ela é solta sobre uma superfície plana cortada por linhas paralelas igualmente espaçadas de uma distância  $d$ . O problema foi reproduzido com a solução em 1777 por Buffon [BUFFON, 1777]<sup>1</sup>.

O primeiro artigo sobre o método foi publicado em 1949 ("*The Monte Carlo method*") [METROPOLIS, 1949], com os trabalhos realizados por S. Ulam, J. von Neumann N. Metropolis, E. Fermi e outros. Apesar disso, o método de Monte Carlo já era conhecido há muito tempo, mas sua ampla aplicação somente foi possível com o surgimento dos computadores eletrônicos [DOOLEN, 1987]. A partir da década de 50, uma série de códigos de transporte, utilizando o método de Monte Carlo, começaram a surgir [SOBOL, 1983].

O método é utilizado na resolução de cálculos numéricos com processos simulados com dependências de variáveis aleatórias, representando mediante experimentos probabilísticos o comportamento aleatório de sistemas reais. Também pode ser utilizado para resolução de problemas que não dependem de variáveis aleatórias por meio de métodos probabilísticos [MANNO, 1999].

*“Um experimento probabilístico é aquele que tem mais de uma possibilidade de resultado. O resultado de um experimento probabilístico não pode ser previsto, apenas seus possíveis resultados e suas probabilidades de ocorrência podem ser estimadas através da simulação de uma história. Dessa forma, quanto maior for o número de histórias, melhor será a representação desta probabilidade nos resultados obtidos. Desta forma, o gerador de números aleatórios, juntamente com o número total de histórias simuladas são os principais parâmetros para o funcionamento adequado deste método [CASSOLA, 2005].”*

Para ambos os métodos, analítico e numérico, a formulação do problema é semelhante. Na resolução do problema por método numérico um algoritmo numérico é aplicado, tendo a precisão do resultado geralmente menor, porém, este método torna o problema mais geral e se aproxima de casos reais. Para o método analítico pode-se ter uma resposta mais precisa para um caso específico, com condições de contorno determinadas. Os problemas que envolvem o transporte da radiação na matéria, em geometrias tridimensionais, com feixes polienergéticos e materiais compostos, são geralmente difíceis de obter resultados com alta precisão. Além disto, para uma solução analítica, se as condições de contorno mudam, o problema tem que ser reestruturado novamente desde o início [CASSOLA (2), 2007; JANSEN, 1998].

---

<sup>1</sup> Uma versão eletrônica do artigo pode ser encontrada em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97517m>.

O método de Monte Carlo é muito importante em física computacional e outros campos de aplicação relacionados, principalmente no estudo de sistemas de geometrias complexas e nas simulações teóricas de processos físicos, como por exemplo, a interação da radiação com a matéria.

### 2.1.1 Simulação Monte Carlo do Transporte de Radiação na Matéria

Existem dois itens importantes a se considerar para a utilização do método de simulação Monte Carlo, objetivando simular o transporte de radiação na matéria: primeiro, as leis físicas que descrevem o livre caminho médio entre os eventos de interações sucessivos; e segundo, os números aleatórios uniformes sorteados no intervalo entre 0 e 1.

Para simular o transporte de uma partícula, por método Monte Carlo, uma série de eventos consecutivos é sorteada aleatoriamente.<sup>2</sup>

O tipo de interação é escolhido aleatoriamente, considerando as probabilidades de ocorrência estimadas por suas secções de choque.

A probabilidade de não ocorrer uma interação durante o transporte de um fóton é igual a  $e^{-\mu x}$ , onde  $\mu$  é o coeficiente linear de atenuação total do material, obtido do coeficiente mássico de atenuação,  $\mu\rho$  que depende do material do volume do material de interação, e  $x$  a distância percorrida pelo fóton.

O livre caminho médio para o transporte de um fóton,  $x$ , entre duas interações seguidas é derivado da lei da atenuação,

$$X = -\frac{\ln(n)}{\mu} \quad \text{(Equação 2.1)} \quad \text{[JANSEN, 1998]}$$

onde  $n$  é um número aleatório entre 0 e 1.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Para maiores esclarecimentos sobre o funcionamento dos geradores de números aleatórios do programa GEANT4, pesquisar no site: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/>

<sup>3</sup> A escolha de um único número aleatório  $n$  não tem significância física, mas ao selecionar, com a equação (1), os livres caminhos médios para um grande número de fótons pode ser obtida uma distribuição aproximada dos livres caminhos médios feitos por fótons de um feixe de raios X atravessando a matéria [CASSOLA(2), 2007].

Se não houver mudança do material ou da densidade nesta distância, o fóton é transportado até a nova posição. Entretanto, se houver a mudança de material, uma nova distância é calculada com o coeficiente de atenuação do novo material, a partir do ponto em que há a mudança de material.

## 2.2 Programa de Simulação Monte Carlo GEANT4

O Geant4 (*GEometry ANd Tracking*) é um conjunto de ferramentas computacionais de distribuição livre de simulação das interações das partículas e dos campos eletromagnéticos com a matéria, baseado no método Monte Carlo [CERN, 2006b]. Sua aplicação inclui a física de partículas, física de altas energias, física médica, raios cósmicos, astrofísica e astronomia. A faixa de energia para as simulações pode ir de 250 eV se estendendo até a ordem de 1 TeV, em algumas situações.

A linguagem de programação utilizada pelos seus desenvolvedores foi a linguagem C++, orientada a objetos, proporcionando inúmeras vantagens quanto à transparência dos processos físicos [APOSTOLAKIS et al, 1999; CASSOLA, 2005].

Para simulações na área da medicina e a obtenção de uma melhor estimativa dos possíveis danos estocásticos e determinísticos das radiações, é necessário que a energia absorvida devida às partículas incidentes e de suas partículas secundárias nos tecidos seja a mais precisa possível. O GEANT4 possui um pacote específico, *Low Energy Electromagnetic*, em que a simulação dos processos físicos para elétrons, fótons e íons, se estende até energias abaixo de 1 keV. Desta forma, pode-se obter uma melhor distribuição tridimensional da dose absorvida por órgãos e/ou tecidos bem como o fluxo de fótons e elétrons, utilizando volumes menores de irradiação e, conseqüentemente, menores energias de corte (para elétrons e fótons) [CHAUVIE et al, 2004].

Nesta modelagem, todos os processos envolvem duas fases distintas: o cálculo da secção de choque total e a geração do estado final, após a interação.

Ambas as fases utilizam parametrizações dos dados disponíveis nas bibliotecas EADL (*Evaluated Atomic Data Library*) [PERKINS, 1991], EEDL (*Evaluated Electrons Data*

*Library*) [PERKINS, 1991] e EPDL97 (*Evaluated Photons Data Library*) [CULLEN et al, 1997].

Estas bibliotecas provêm dos dados necessários para a simulação dos seguintes processos de baixa energia no GEANT4: as secções de choque total para os efeitos fotoelétrico, Compton, Rayleigh e radiação de *bremsstrahlung*; o espectro de energia para elétrons secundários; as funções de espalhamento para o efeito Compton; os fatores de forma para o efeito Rayleigh; a energia de ligação para os elétrons de todas as subcamadas; a probabilidade de transição entre camadas por fluorescência e por efeito *Auger*. [APOSTOLAKIS et al, 1999; CHAUVIE et al, 2004].

O intervalo de energia coberto por estas bibliotecas compreende as energias desde 1 eV a 100 GeV para os efeitos Rayleigh e Compton, até a menor energia de ligação de cada elemento para o efeito fotoelétrico, até 10 eV para *bremsstrahlung* e até a menor energia de ligação de cada elemento para a ionização [APOSTOLAKIS et al, 1999].

### 2.2.1 Os modelos físicos eletromagnéticos do GEANT4

Utilizando a ferramenta GEANT4 é possível simular uma grande variedade de processos físicos eletromagnéticos, incluindo simulações com elétrons, pósitrons, fótons, hádrons e interações óticas [CERN, 2006].

O GEANT4 possui três modelos desenvolvidos para trabalhar com fótons e elétrons: *Standard*, *Low Energy* e *Penélope*. Estes são baseados em modelos teóricos e adotam diferentes bases de dados de seções de choque e algoritmos de amostragem de estado final. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo com a interação de um feixe primário de fótons considerando os seus subprodutos, e o modelo físico utilizado nos processos eletromagnéticos foi o *Low Energy*.

É possível selecionar os processos físicos eletromagnéticos nos diferentes modelos existentes no código para uma única simulação, com exceção dos processos de ionização e *bremsstrahlung* para elétrons, que sempre devem ser escolhidos do mesmo modelo [POON, 2005]. Como por exemplo, o caso mais comum é do espalhamento múltiplo de elétrons [URBÁN, 2002], implementado somente no modelo *Standard*, mas é adequado para simulações nas faixas de energias compreendidas pelos três modelos.

Para validar as interações das partículas nas faixas de energias menores do que os processos eletromagnéticos do modelo físico *Standard*, foram adicionados os processos eletromagnéticos *Low Energy*. Atualmente, estes processos físicos do modelo *Low Energy* são válidos para as energias compreendidas entre 250 eV até aproximadamente 100 GeV [CERN, 2006]. Este modelo adota um conjunto de base de dados de distribuição pública, fornecendo dados para o cálculo de seções de choque e amostragem do estado final para a modelagem da interação de fótons e elétrons com a matéria. Ele utiliza também dados das seções de choque para as camadas eletrônicas de elementos com números atômicos 1 a 99.

Além disso, ele inclui em sua extensão os seguintes processos: espalhamento *Compton*, espalhamento *Rayleigh*, efeito fotoelétrico, produção de pares, ionização, *bremsstrahlung* e processo de desexcitação do átomo depois da criação de uma vacância por uma interação primária. A desexcitação do átomo, que contempla o modelo *Low Energy*, pode ocorrer por meio de efeito *Auger* ou fluorescência para os processos primários de efeito fotoelétrico ou ionização. Todas as fases envolvidas nestes processos incluem o cálculo e o uso das seções de choque total e a geração do estado final.

As bases de dados do modelo *Low Energy* são responsáveis por fornecer inúmeras informações para as simulações [CULLEN, 1997; PERKINS, 1997], como por exemplo: as seções de choque total para espalhamento *Compton* e *Rayleigh*, efeito fotoelétrico, produção de pares, *bremsstrahlung*, e seções de choque para as subcamadas dos efeitos fotoelétricos e ionização; as energias de ligação para elétrons para todas as subcamadas, funções de espalhamento para efeito *Compton* e fatores de forma para espalhamento *Rayleigh*; as probabilidades de transição entre subcamadas para os efeitos *Auger* e de fluorescência e as tabelas de poder de freamento.

### 2.2.2 Cortes de passagem e limites de produção de partículas

O corte de energia é amplamente utilizado em simulações de transporte de radiação que utilizam o método de Monte Carlo para diminuir o tempo de simulação. Para esta condição de otimização, o transporte de uma partícula é realizado até que sua energia cinética seja zero.

Para evitar processamento de máquina desnecessário nas simulações, o corte de passagem de partículas é adotado como uma solução por muitos códigos, onde o transporte de uma determinada partícula é interrompido quando a partícula alcança o valor de energia mínima específica em um determinado local da simulação, sendo que essa energia restante é considerada como depositada localmente nesse ponto.

O corte é definido pelo método `SetCut()`, onde é dado em unidades de distância e convertido em energia para todos os materiais presentes na simulação, com exceção do processo de decaimento radioativo onde esse limite não se aplica. O corte de passagem de partículas propriamente dito, em termos de energia ou distância, também pode ser feito através de uma classe denominada `G4UserSpecialCut` [POON, 2005]. Além disso, também é possível escolher um tamanho de passo máximo para qualquer volume simulado, em termos de distância percorrida ou energia perdida, utilizando a classe `G4UserLimits`.

A ferramenta de transporte de radiação GEANT4 foi utilizada e foram definidos os limites de cortes de energia diferenciados, sendo utilizados como energias de corte de 990 eV para fótons e elétrons no volume sensível de ar e 29,34 keV para o material da blindagem tanto para fótons quanto para elétrons.

### 2.2.3 Estrutura Básica do GEANT4, Versão 9.1 p2.

Para a realização deste trabalho foi utilizado o programa de simulação computacional GEANT4, em sua versão 9.1.p2. Será apresentado um resumo das regras de cada categoria de classe para do programa. As subclasses definidas neste programa se dividem em dois grupos gerais gerenciados pela classe `G4RunManager`. Na Figura 1 observa-se que a hierarquia das classes definidas no programa de simulação GEANT4 se divide em dois grupos, sendo gerenciada pela classe `G4RunManager`.

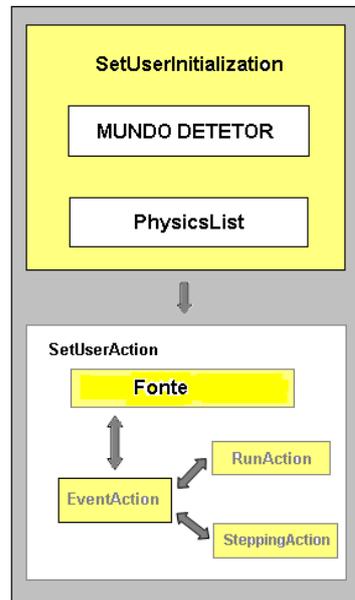


Figura 1: Estrutura das classes do GEANT4 utilizadas neste trabalho para a simulação do transporte da radiação na matéria.

O primeiro grupo de gerenciamento é inicializado pela *SetUserInitialization*, onde estão contidas as subclasses:

1. *MundoDetetor*: onde o mundo é construído; é nesta classe que são definidas as geometrias internas de simulação necessárias para a realização da simulação, ou seja, é onde são definidos os materiais, elementos químicos, volumes sólidos (esferas, cubos, cilindros, etc.), atributos de visualização (são utilizadas classes, do GEANT4. 9.1 p2).
2. *PhysicsList*: é onde se define a energia de corte e as bibliotecas dos processos físicos relevantes para a simulação.

O segundo grupo, inicializado através da *SetUserAction*, contém as classes:

1. *Fonte*: nesta classe é estabelecido o tipo de partícula, sua posição no mundo, sua energia com respectiva probabilidade de interação e a sua direção inicial de propagação, ou seja: parâmetros para geração de um evento primário. Parâmetros estes definidos através das características da fonte a ser simulada.
2. *RunAction*: esta classe inicia com a emissão da primeira partícula da fonte e termina quando todas as histórias forem simuladas, sendo o número de eventos primários definido pelo usuário, onde cada evento representa uma história, ou seja: esta classe é responsável por iniciar a simulação dos eventos primários.

3. *EventAction*: É a subclasse responsável por iniciar uma história. Inicia com a emissão de uma partícula da fonte e finaliza com a morte de todas as partículas secundárias (se houver) produzidas por uma única partícula da fonte.
4. *SteppingAction*: É responsável pelo gerenciamento dos processos físicos relevantes. Relaciona-se com a propagação da partícula através dos materiais e volumes, pela análise dos fatores limitantes da propagação.

Cada uma das classes descreve um conjunto de objetos individuais. Os objetos podem ser variáveis, constantes, procedimentos ou funções. O mecanismo de orientação a objetos que permite compartilhar atributos e operações entre classes baseada em um relacionamento hierárquico é chamado de Herança [CASSOLA, 2005].

*“De maneira simplificada, numa simulação, pode-se dizer que a classe RunAction é executada uma vez e termina após todas as histórias serem processadas. O número de histórias define quantas vezes a classe EventAction será executada, a qual termina quando os caminhos de todas as partículas produzidas forem processados. A classe SteppingAction representa o número de interações com a matéria que a partícula sofreu durante o seu caminho” [CASSOLA, 2005].*

Para maiores informações sobre a estrutura básica e processos do programa GEANT4 consultar seu manual virtual [GEANT, 2006]

### 2.3 Raios X: produção e fatores que a influenciam

Ao realizar experiências com raios catódicos em novembro de 1895, Wilhelm Conrad Roentgen descobriu uma forma ainda desconhecida de radiação, denominada radiação X.

Os raios X são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda da ordem de, aproximadamente,  $1.0 \text{ \AA}$ . Apresentam propriedades típicas de ondas como polarização, difração e interferência, da mesma forma que a luz e todas as outras radiações eletromagnéticas, podendo se propagar através de qualquer material, ou mesmo no vácuo [ATTIX, 1986].

A produção de raios X ocorre em equipamentos conhecidos como aparelhos de raios X que têm como função básica gerar um fluxo controlado de elétrons, produzindo uma quantidade de radiação X na qualidade desejada [JOHNS, 1983].

Os tubos de raios X são formados por um tubo de vidro revestido por uma camada de óleo e chumbo. No seu interior há um filamento de tungstênio, um alvo de tungstênio e vácuo.

A aplicação de uma tensão no filamento de tungstênio do cátodo produz uma corrente que, por emissão termoiônica, emite elétrons que são acelerados pela diferença de potencial  $V$  até atingirem o alvo do catodo, o qual geralmente é composto de molibdênio, tungstênio e/ou rênio. A colisão desses elétrons no alvo gera a emissão de raios X na forma de radiação de *bremsstrahlung* e característica.

A corrente do filamento de tungstênio utilizada no tubo de raios X está entre 4 a 8 A , e a diferença de potencial entre o pólo positivo e negativo é dada em quilovolts (geralmente de 35 a 150 kV). As características de tensão aceleradora, especificada em  $kV$ , e carga transportada pelo tubo, especificada em  $mA.s$ , é que darão o brilho e o contraste da imagem obtida [JOHNS, 1983].

O anodo é o eletrodo negativo do tubo de raios X possuindo duas partes importantes: o filamento e a capa focalizadora (cilindro de welmelt).

A carga transportada no tubo é controlada pelo grau de aquecimento do filamento e o tempo de duração da exposição; quanto mais aquecido for o filamento, mais elétrons serão emitidos por ele, e maior será a corrente que fluirá entre o anodo e o catodo, tendo como limitação o ponto de fusão do material que constitui o filamento. Quanto maior o tempo de exposição, maior será a carga transportada pelo tubo.

Sabe-se que os elétrons são carregados negativamente havendo uma repulsão entre eles. Ao serem acelerados na direção do anodo, ocorre uma perda, devido à dispersão dos mesmos. Para evitar esse efeito, o filamento do anodo é envolvido por uma capa carregada negativamente, denominada capa focalizadora. Mantendo os elétrons unidos em volta do filamento e concentrando os elétrons emitidos em uma área menor do anodo. A eficiência da capa focalizadora é determinada por seu tamanho, sua carga e a forma e posição do filamento dentro da capa focalizadora [JOHNS, 1983].

O catodo é o “alvo” positivo do tubo de raios X e recebe os elétrons emitidos pelo catodo. Além de ser um bom condutor elétrico, o catodo também deve ser um bom condutor térmico. Quando os elétrons se chocam contra a trilha do catodo, mais de 98 % de sua energia

cinética é transformada em calor. Este calor deve ser conduzido para fora rapidamente para não derreter o anodo. Os materiais mais utilizados na trilha do catodo são de tungstênio em base de cobre, por ambos serem adequados à dissipação do calor. O tungstênio é utilizado como trilha do alvo, pois suas principais características são ter um ponto de fusão alto, em torno de 3380°C e um número atômico alto ( $Z$ ) 74. A trilha do alvo é o local do catodo onde ocorre o impacto dos elétrons e, portanto, onde os raios X são gerados [JOHNS, 1983].

O material que constitui o alvo deve ter um  $Z$  alto porque a razão entre a perda de energia por unidade de comprimento de onda dos elétrons por radiação X,  $\frac{dE}{dx}_{rad}$ , e a perda de energia dos elétrons por ionização,  $\frac{dE}{dx}_{ion}$ , é dada pela razão entre os poderes de freamento do material, conforme demonstrada na (Equação 2.2 [ATTIX, 1986]).

$$\frac{\frac{dE}{dx}_{rad}}{\frac{dE}{dx}_{ion}} = \frac{Ec.Z}{800} \quad (\text{Equação 2.2})$$

#### 2.4 Produção dos Espectros de Raios X

O choque do feixe de elétrons, acelerados do anodo para o catodo com a trilha do alvo, produz radiação X por dois processos diferentes: por *bremsstrahlung* e por ionização. A produção de radiação X por *bremsstrahlung* ocorre através do processo de freamento dos elétrons acelerados e contribui para a formação do espectro contínuo. Este tipo de produção de radiação é resultado da desaceleração do elétron durante a penetração no catodo e a interação destas partículas com o campo nuclear coulombiano. Desta forma, ocorre alteração nos vetores direção e aceleração deste elétron sendo a energia perdida radiada sob forma de radiação eletromagnética. O outro tipo resulta do choque entre o elétron incidente e outro elétron pertencente à estrutura atômica. A resposta de átomo a esta ionização é a geração de efeito cascata para estabilizar a eletrosfera. Isso gera a produção do espectro de linhas. Assim, cada espectro de raios X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do material do alvo, conforme demonstrado na Figura 2.

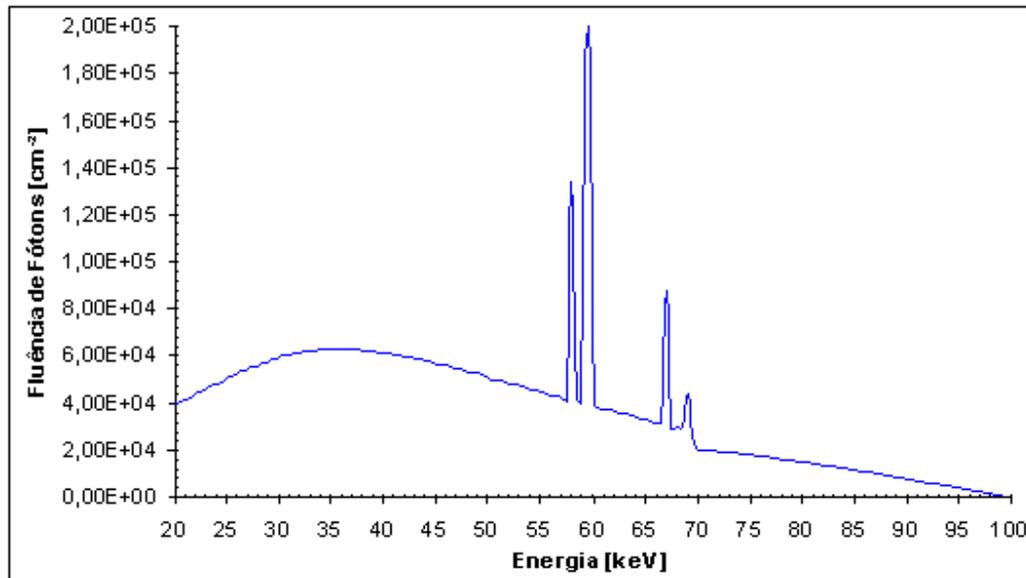


Figura 2: Gráfico ilustrativo da forma geral do espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 100 kVp, a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997].

O elétron incidente ioniza os átomos do alvo, ejetando um elétron da camada K, L ou M (camadas mais internas). Surge, então, um nível vazio nessa camada, que deve ser preenchido. Este nível é preenchido por um elétron de uma camada mais externa, resultando dessa transição, a emissão de um fóton de raios X com energia igual à diferença entre os dois níveis [ATTIX, 1986]. Da probabilidade total de ocorrência deste tipo de interação estima-se que 80 % da radiação característica produzida ocorrem no nível K dos átomos, sendo os 20 % restantes, produzidos nos níveis L e M [ATTIX, 1986]. A denominação “característico” se deve ao fato da intensidade relativa dos fótons emitidos por transição revelarem detalhes da estrutura da eletrosfera do elemento químico do alvo. As radiações eletromagnéticas características podem possuir energias na ordem de eV a dezenas de keV, por serem um fenômeno relacionado à energia de ligação dos elétrons aos diversos níveis da eletrosfera [ATTIX, 1986]

O espectro de emissão de fótons do ponto focal é fundamental para descrever os processos de produção de imagem em um aparelho de raios X. Esse espectro é obtido através de dados de frequência do fluxo de fótons em função da energia.

A energia máxima dos fótons, em keV, é a energia cinética máxima dos elétrons que se chocam na trilha e é proporcional à tensão de aceleração, em kV. Nota-se, na Figura 2 que existem poucos fótons desta energia. A maneira geral da forma do espectro emitido pelo ponto

focal é a mesma para qualquer aparelho de raios X. Devido ao efeito anódico, produzindo através da auto absorção do espectro emitido pelo ponto focal, o número de fótons de energia abaixo de 10 keV é pequeno, atingindo quase zero para energias abaixo de 5 keV [CASSOLA, 2005]. Já os traços correspondentes às radiações características dependem do material do alvo; para o alvo de tungstênio os traços das radiações características só aparecem nos espectros gerados com tensão acima de 70 kV [ATTIX, 1986].

O espectro de emissão de raios X pode ser modificado em quantidade e/ou qualidade. Diz-se que, se o espectro de emissão de raios X sofrer alteração no número de fótons, em cada energia, então houve mudança na qualidade da radiação, ou seja, no poder de penetração do feixe. Por outro lado, se o espectro varia de maneira que sua forma permanece inalterada, isto é, o número de fótons em cada energia muda pelo mesmo fator, diz-se que houve mudança na quantidade da radiação.

O espectro é modificado por três fatores: filtração, tensão do tubo e tipo de suprimento de alta tensão. Os dois últimos são os que mais influenciam os fótons de alta energia, que participam mais significativamente na formação da imagem radiográfica. A filtração, que afeta os fótons de baixa energia, não tem grande influencia na imagem gerada e sim na exposição do paciente. Se a energia média do feixe for aumentada por qualquer método, tornando o feixe mais penetrante, a dose total por paciente será reduzida.

Outro fator importante, que afeta o espectro contínuo e o espectro característico, é o material que compõe a trilha do alvo. No espectro contínuo o aumento do número atômico do material da trilha do alvo aumenta a eficiência da produção de radiação por freamento, aumentando o número de fótons com maior energia. Considerando o espectro de linhas, átomos com  $Z$  mais alto têm energia de ligação da camada K mais elevada o que resulta em raios X característicos com energias mais altas.

#### 2.4.1 Filtração

A filtração total de um feixe de raios X consiste na filtração inerente mais a filtração adicional. A filtração inerente é constituída pelo vidro do tubo de raios X, o óleo isolante, o

espelho e o vidro da janela. O tubo está contido em uma capa protetora (cabeçote) de ferro e chumbo que possui uma janela por onde sai o feixe útil de radiação X. A janela convencional é, geralmente, de vidro e em casos especiais, como o do mamógrafo, constituída de berílio. A filtração adicional, por sua vez, é usada para completar a filtração inerente até ultrapassar a filtração mínima. Em radiodiagnóstico a filtração adicional é feita, geralmente, por placas de alumínio.

*“O material que constitui um filtro é escolhido em função das energias que se deseja eliminar do espectro e a sua geometria é projetada em função da fração de fótons destas energias que se deseja remover”*  
[HOFF, 2005].

A principal função do filtro nos equipamentos de raios X é modular o espectro de raios X para sua utilização absorvendo os fótons de energias inferiores a 50 keV, objetivando a diminuição da dose recebida pelo paciente, sendo também importante para obter um melhor diagnóstico e eliminar fótons com altas energias, quando se deseja tratar regiões do corpo de espessura muito fina. [ADAD, 2005].

A filtração mínima recomendada pela Portaria Federal Nº453 [MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998] para o espectro de tensão máximo acima de 70 kV é de 2,5 mm de alumínio. A espessura do filtro exerce um papel importante junto com o grau de colimação do feixe. A alteração da espessura do filtro gera mudanças de posição do pico de energia e uma variação na amplitude do espectro de raios X e na área resultante conforme demonstrada na Figura 3. Isto acontece porque o filtro de alumínio absorve, em grande parte, raios X de baixa energia, diminuindo o número de fótons nesta parte do espectro e aumentando a penetrabilidade do feixe.

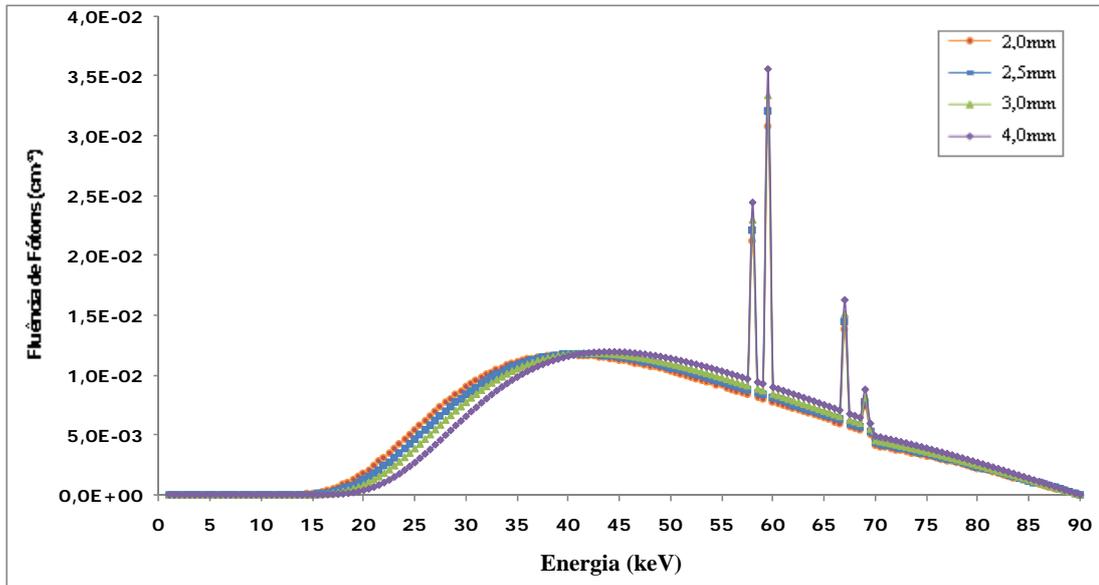


Figura 3: Espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 90 keV, a 750 mm do ponto focal, com variações da filtração adicional de 2,0; 2,5, 3,0 e 4,0 mm de alumínio, *ripple* de 0 % e ângulo de voo de  $6^\circ$  [CRANLEY, 1997].

#### 2.4.2 Tensão do Tubo

Mudando o potencial de aceleração do tubo, muda-se também o espectro do feixe. O aumento da tensão aceleradora dos elétrons implica num aumento do número de fótons de maior energia e o aumento da camada semirredutora [ATTIX, 1986]. Mantidos constantes outros fatores, como a corrente de tubo,  $mA$ , e o tempo de exposição,  $t$ , a exposição,  $E$  cresce aproximadamente com o quadrado da tensão (kV) aplicada no tubo [ATTIX, 1986]. Isto se dá por dois motivos: primeiro como demonstrado na Figura 4, a variação na tensão aplicada no tubo altera a qualidade da radiação já que a energia máxima é maior, então a conversão da energia dos elétrons em raios X torna-se mais eficiente (diminuindo a fração da energia convertida em calor); e segundo, com o aumento da tensão no tubo de raios X os elétrons têm mais energia para converter em radiação X quando atingem o alvo, sofrendo em média maior número de colisões com o material do alvo no processo de perda da energia cinética. Cabe lembrar que a energia das

linhas características não muda para as diferentes tensões, somente a intensidade das linhas características é que varia com o aumento da tensão aceleradora do tubo.

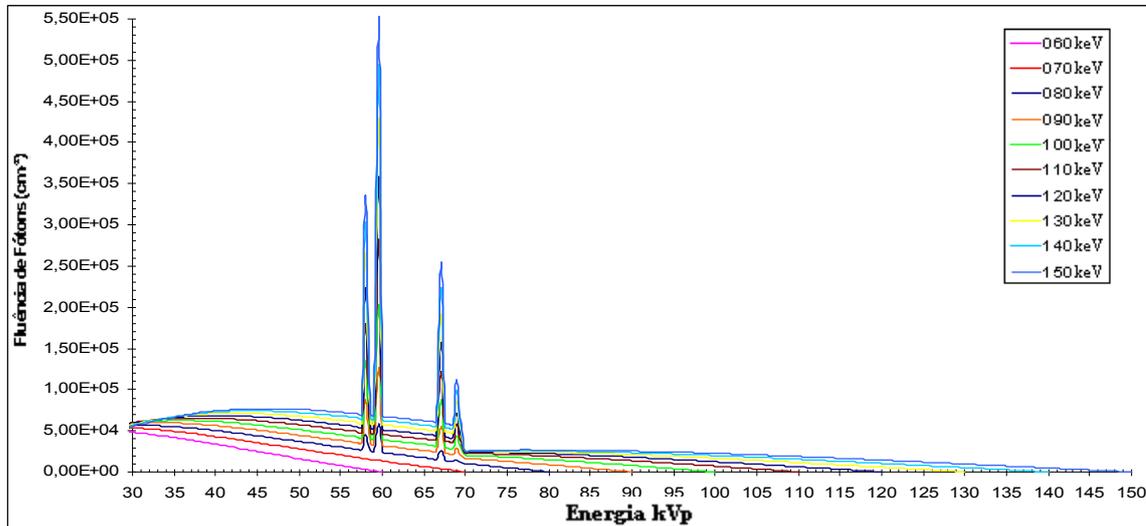


Figura 4: Gráfico ilustrativo da alteração da forma do espectro de emissão de raios X do tungstênio, devido à variação da tensão aceleradora aplicada a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997].

#### 2.4.3 Carga Transportada pelo Tubo

Mudando a carga transportada pelo tubo, muda-se também o espectro do feixe em sua área e não em sua forma. O aumento da carga implica num aumento do número de fótons que interagem com o alvo do tubo, conseqüentemente aumenta de forma proporcional o fluxo de fótons de emissão do tubo de raios X. Mantidos constantes outros fatores, como a tensão no tubo, kVp, e o tempo de exposição,  $t$ , a exposição,  $E$ , tem comportamento proporcional às alterações da carga transportada pelo tubo [ATTIX, 1986].

A Figura 6 ilustra um exemplo de alteração da forma do espectro de raios X do tungstênio, devido à variação da carga transportada pelo tubo de raios X aplicada a 750 mm do ponto focal, de 1, 2 e 4 mAs.

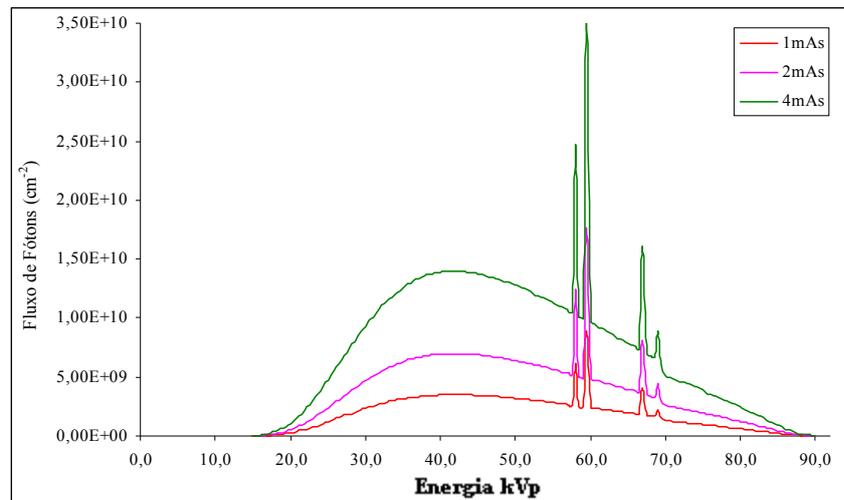


Figura 5: Gráfico ilustrativo da alteração da forma do espectro de emissão de raios X do tungstênio, devido à variação da carga transportada pelo tubo de raios X aplicada a 750 mm do ponto focal [CRANLEY, 1997].

#### 2.4.4 Suprimento de Alta Tensão

Em todos os aparelhos de raios X, a tensão é aumentada por um transformador de linha 110-220 volts para a alta tensão desejada. A forma de onda é a mesma da linha de suprimento, mas muito aumentada em amplitude; de fato, o potencial elétrico é alternado, variando de zero até um valor máximo. Existem vários tipos de circuitos utilizados na amplificação de tensão, entre estes temos: retificação de meia onda, retificação de onda completa, retificação trifásica e multi-pulsos.

Um tipo eficiente de retificação atualmente utilizado inverte a polaridade do ciclo negativo possibilitando a produção de raios X durante todo o ciclo. A utilização deste método, aplicado em um circuito trifásico possibilita a produção de elétrons quase monoenergéticos, dentro de uma pequena variação de quilovoltagem.

O uso de geradores multi-pulsos, possibilita a obtenção de um potencial de aceleração constante. Na Figura 6 pode-se verificar a forma de onda associada sem retificação (monofásica)

e as retificações que podem ser utilizadas nos tubos de raios X, com o *ripple* médio associado a cada tipo de retificação.

*“O ripple é uma ondulação na tensão gerada numa fonte, que depende da frequência do sinal; quanto menor for à frequência, maior será o ripple. Conforme evidenciado na Figura 6, a diminuição do ripple é possível com a utilização de geradores trifásicos. O gerador é responsável pela qualidade da radiação, pela diminuição do tempo de exposição e, conseqüentemente da dose no paciente” [HOFF, 2005].*

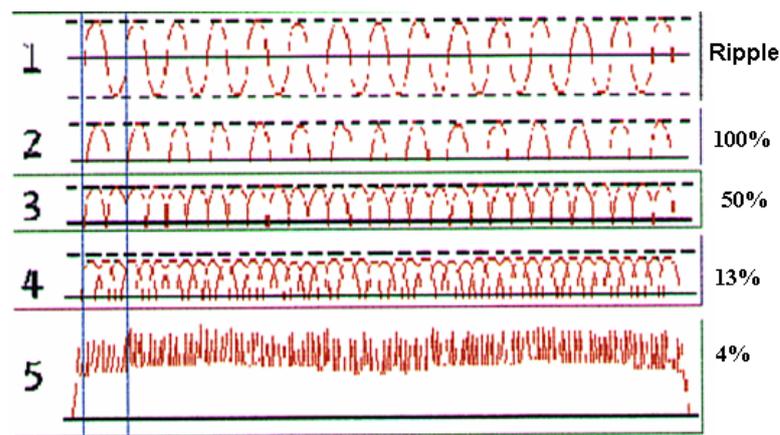


Figura 6: Forma de onda sem retificação (monofásica) 1, Retificação de meia onda (monofásica) 2, Retificação de onda completa (monofásica) 3, Retificação de onda completa (trifásica) 4 e Retificação de onda multi-pulsos (alta frequência) 5 [FIRMINO, 2006].

Um retificador de meia onda só permite a fluência de elétrons durante a metade do ciclo, ou seja, a parte própria para a produção de raios X, enquanto o retificador de onda completa utiliza toda onda, isto é, todo ciclo da tensão alternada fornecida pelo transformador, invertendo a polaridade das ligações no tubo entre cada ciclo. Essas características resultam num grande *ripple*, ou seja, os raios X produzidos não apresentam qualidade e quantidade satisfatórias. Uma das formas de resolver essa dificuldade é utilizar três tensões cujas formas de onda são deslocadas com alguma defasagem de tempo uma em relação à outra. Esse sistema chama-se circuito trifásico. Cada fase é retificada em onda completa gerando seis pulsos em cada ciclo. Existe ainda uma forma de gerar seis tensões defasadas no tempo, que, retificadas em onda completa, nos darão doze pulsos com *ripple* extremamente pequeno, como se pode ver na Figura 6. Atualmente, tubos de raios X apresentam retificação de onda de alta frequência, com *ripple* inferior a 4 % [BARNES, 1999].

Os sistemas de radiologia convencional devem possuir gerador do tipo pulsado retificado ou de armazenamento de carga. Fica proibido a utilização de sistemas auto-retificados ou retificação de meia onda [MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998].

Observa-se que a modificação da forma de onda de monofásica para trifásica, por exemplo, faz com que haja o aumento na frequência de ciclos em que os elétrons são acelerados em direção ao catodo aumentando, portanto, o número de elétrons que interagem com o alvo o que aumenta o número de fótons no espectro de emissão. Além disso, uma onda mais homogênea aumenta o número de fótons de maior energia (próximos à tensão de pico – kVp). Portanto, a forma de onda afeta a qualidade, refletindo num aumento da camada semirredutora. A Figura 7 ilustra a alteração no espectro de 100 keV devido à alteração da forma de onda.

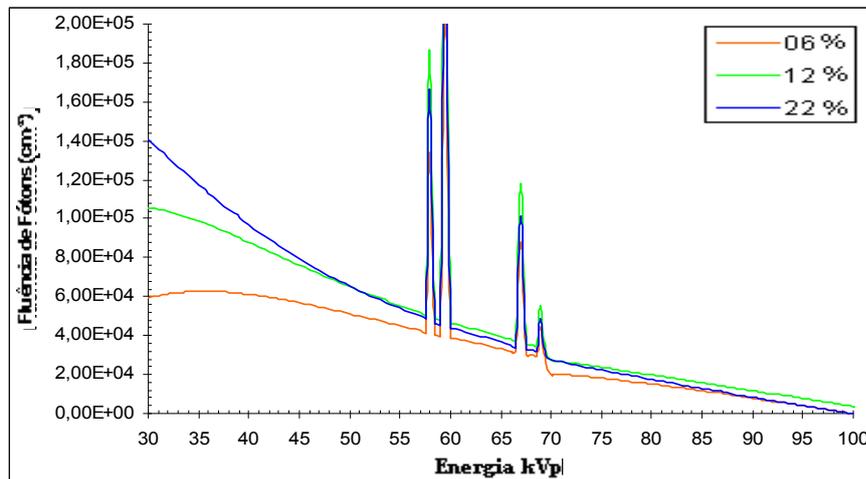


Figura 7: Espectro de emissão de raios X do tungstênio, com 100 kVp, a 750 mm do ponto focal, com variações de *ripple* de 6 %, 12 % e 22 % [CRANLEY, 1997].

## 2.5 Grandezas Dosimétricas

O comportamento de um feixe de raios X apresenta características que dependem de fatores probabilísticos dos processos radioativos e, para sua descrição, se faz necessário conhecer os conceitos que têm, em sua origem, valores médios. Pode-se, então, estimar o espectro de energia dos raios X através de uma distribuição de energia de feixe. Também se podem prever os

números de fótons, que em média chegam a uma determinada área em um intervalo de tempo [CASSOLA, 2005]. Para tanto, é preciso conhecer as grandezas dosimétricas apresentadas a seguir.

### 2.5.1 Fluência

Um feixe de fótons produzido em um tubo de raios X normalmente possui uma distribuição de intensidades em diferentes energias. Considerando um feixe homogêneo pode-se descrever a fluência como o quociente do número de partículas incidentes,  $dN$ , sobre uma esfera de secção de área,  $da$ .

$$\Phi = \frac{dN_e}{da} \quad \text{(Equação 2.3)} \\ \text{[LNMRI,2002]}$$

A fluência é expressa em  $\text{m}^{-2}$  (SI).

A densidade de fluxo, ou taxa de fluência, é definida como a fluência num intervalo determinado de tempo  $t$ .

$$\Phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dN_e}{da} \right) \quad \text{(Equação 2.4)} \\ \text{[LNMRI,2002]}$$

Onde  $d\Phi$  representa o incremento de fluência, num intervalo de tempo infinitesimal  $dt$ . Usualmente a taxa de fluência, ou densidade de fluxo, é expressa em  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (SI).

### 2.5.2 Fluência de Energia

Pode-se descrever também o feixe através da fluência de energia. Considerando, desta forma, a energia total,  $dR$ , carregada pelo número esperado de fótons que atingem a área,  $da$ , num intervalo de tempo escolhido arbitrariamente desde um tempo inicial  $t_0$  até um tempo final  $t$  [ATTIX, 1986; JOHNS, 1983].

$$\Phi = \frac{dN_e \cdot h\nu}{da} = \frac{dR}{da} \quad \begin{array}{l} \text{(Equação 2.5)} \\ \text{[LNMRI,2002]} \end{array}$$

A fluência de energia é expressa em  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$  (SI).

A ICRU 60 [ICRU, 1980] denomina R como energia radiante que é definido como “a energia das partículas (excluindo a sua massa de repouso) emitidas, transferidas ou recebidas” [ATTIX, 1986].

A taxa de fluência de energia pode ser definida, a partir da (Equação 2.5, para todos os valores compreendidos num intervalo de tempo.

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dR}{da} \right) \quad \begin{array}{l} \text{(Equação 2.6)} \\ \text{[LNMRI,2002]} \end{array}$$

Onde o incremento de fluência de energia num intervalo de tempo infinitesimal  $dt$  é  $d\Psi$ . A taxa de fluência de energia é expressa em  $\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (SI) [LNMRI, 2002].

Para um caso especial onde apenas a energia  $E$  está presente, ou seja, um feixe monoenergético, a taxa de fluência de energia será  $\Psi = E \Phi$ , onde  $\Phi$  é a fluência.

### 2.5.3 Espectro de Energia

Os raios X oriundos do feixe de radiação, vindos do tubo de raios X, possuem fótons com diferentes energias. Esta variação na energia resulta numa distribuição diferencial chamada espectro de energia [ATTIX, 1986], representada por:

$$\text{Espectro} = \frac{d\Phi(E)}{dE} \quad \text{(Equação 2.7)}$$

A (Equação 2.7 indica a fluência correspondente a cada energia existente no feixe, onde se pode determinar a fluência total integrando esta equação sobre todas as energias presentes no feixe, como mostra a (Equação 2.8 [ATTIX, 1986]:

$$\Phi = \int_{E_0}^E d\Phi(E) \quad \text{(Equação 2.8)}$$

#### 2.5.4 Camada Semirredutora – CSR

A camada semirredutora (CSR) é a espessura de material que o feixe deve atravessar para que sua intensidade seja reduzida à metade; a unidade da camada semirredutora é dada em mm.

$$CSR = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (\text{Equação 2.9})$$

*“Como o feixe é polienergético e o comportamento de atenuação para cada energia é diferenciado, faz-se necessária a análise de cada componente do espectro, para chegar-se ao valor da CSR. A CSR pode ser estimada, através da (Equação 2.10 abaixo evidenciada)” [HOFF, 2005].*

$$CSR = \ln \left( \frac{\frac{e}{W_{par}} \int \phi E \frac{\mu_{tr}}{\rho} dE \Big|_{final}}{\frac{e}{W_{par}} \int \phi E \frac{\mu_{tr}}{\rho} dE \Big|_{inicial}} \right) - \frac{\rho}{\mu \rho} [mm] \quad (\text{Equação 2.10})$$

A CSR é a grandeza dosimétrica que define a qualidade do feixe de radiação e pode ser calculada através do espectro de radiação e/ou medida experimentalmente.

#### 2.5.5 KERMA

O KERMA, cujo símbolo é  $K$ , é o quociente entre a soma de todas as energias cinéticas iniciais transferidas de todas as partículas carregadas, liberadas por partículas neutras ou fótons,  $dE_{tr}$ , incidentes por quantidade em um material de massa  $dm$  [LNMRI, 2002].

$$K = \frac{d(E_{tr})}{dm} \quad (\text{Equação 2.11})$$

[HOFF, 2005]

A unidade de medida do *KERMA* é joule por quilograma ( $\text{J.kg}^{-1}$ ), que recebe o nome de Gray (Gy).

O *KERMA*, num ponto para fótons monoenergéticos, está relacionado com a fluência de energia ( $\Phi$ ) através do coeficiente mássico de transmissão de energia  $(\mu_{tr} / \rho)_{E,Z}$ , característico para a energia do fóton incidente e do número atômico do material no ponto:

$$K = \Phi \cdot \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \quad (\text{Equação 2.12})$$

Onde, o coeficiente mássico de transmissão de energia  $(\mu_{tr} / \rho)_{E,Z}$  tem como unidade  $\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$ , e a fluência de energia ( $\Phi$ ) em  $\text{J.m}^{-2}$ . Portanto, o *KERMA* será expresso em  $\text{J.kg}^{-1}$  ou Gy.

### 2.5.6 Transmissão

No caso do feixe de raios X, a transmissão,  $T$ , é a quantidade de radiação que atravessa uma barreira de material com certa espessura  $d$ , dada por:

$$T = \frac{K_i}{K_o} \quad (\text{Equação 2.13})$$

onde,  $K_i$  e  $K_o$  são as taxas de *KERMA* no ar com barreira e sem barreira, respectivamente, medida a uma distância fixa da fonte de raios X.

## 2.6 Interação de Fótons com a Matéria

Existem, pelo menos, quatro fatores importantes que afetam as interações dos fótons com a matéria, são eles: a densidade, a espessura, o número atômico do material e a energia do fóton incidente. A Figura 8 representa, esquematicamente, a passagem de um fóton pelo material.

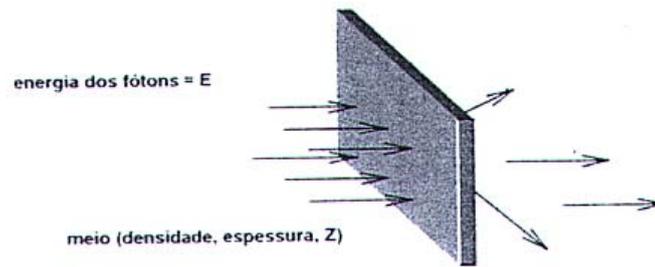


Figura 8: Representação esquemática da interação da radiação com o meio [EIKA, 2003].

Quando um feixe de raios X passa por um material, alguns dos fótons do feixe podem ser absorvidos, espalhados, ou não interagir com o material. Os fótons que são absorvidos pelo material são removidos do feixe, entretanto os raios X não são absorvidos da mesma forma por diferentes materiais [OKUNO, 1982], como por exemplo: o concreto, o ferro, e a argamassa baritada.

A absorção dos raios X pela matéria é decorrente dos efeitos do espalhamento e da absorção de energia. Para a realização de exames diagnósticos costuma-se utilizar feixes de raios X com tensão inferior a 150 keV; nestas condições a radiação é espalhada devido aos efeitos Compton (espalhamento incoerente) e Rayleigh (espalhamento coerente), enquanto que a absorção da radiação ocorre devido ao efeito fotoelétrico.

### 2.6.1 Absorção da Radiação por Efeito Fotoelétrico

Neste processo de absorção por efeito fotoelétrico, um fóton incidente com energia  $h\nu$  interage com um elétron de uma camada atômica mais interna, com energia de ligação significativa, e transfere toda sua energia ao elétron, desaparecendo o fóton. Neste processo ocorre a transferência total da energia do fóton ao elétron que é ejetado com energia cinética correspondente a  $E = h\nu - E_{lig}$ , onde,  $h$ , é a constante de Planck,  $\nu$ , a frequência da radiação e,  $E_{lig}$ , é a função trabalho, ou seja, a energia dissipada para romper a energia de ligação do elétron orbital com o átomo.

Para fótons na faixa da radiologia diagnóstica a secção de choque para a absorção fotoelétrica atômica pode equivaler à aproximadamente  $\sigma \tau \cong k \frac{Z^n}{(h\nu)^m}$  (cm<sup>2</sup>/“átomo”) onde  $n$  e  $m$  são índices que sofrem alteração em função da energia do feixe e do material, bem como em função do tipo de coeficiente (mássico, eletrônico, atômico). O valor de  $m$  tende a 4 e  $n$  tende a 3 para energias na faixa da radiologia diagnóstica, sendo  $k$  uma constante que depende do elemento [ATTIX, 1986].

Segundo documento informativo da CNEN, o efeito fotoelétrico é predominante para baixas energias e para elementos químicos de elevados números atômicos  $Z$ . A probabilidade de ocorrência aumenta com  $Z^4$  e decresce rapidamente com o aumento da energia [CNEN/IRD, 2003].

A direção em que os fotoelétrons são emitidos tende a ser perpendicular à direção dos fótons incidentes com energias na faixa da radiologia diagnóstica e tendem a se alinhar à medida que a energia aumenta como mostra a Figura 9 [ATTIX, 1986].

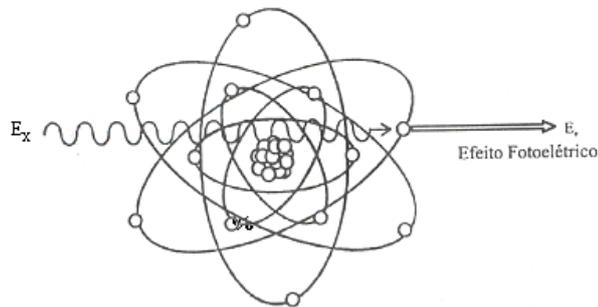


Figura 9: Representação do efeito fotoelétrico [CNEN/IRD, 2003]

Para fótons incidentes de alta energia o número de fotoelétrons emitidos é máximo em ângulos pequenos com a direção do fóton incidente enquanto que, para fótons de baixa energia, o número de fótons emitidos será máximo em ângulos grandes com a direção do fóton incidente.

A modelagem do efeito fotoelétrico no GEANT4 [2004] encontra-se descrito em seu manual [GEANT4, 2005]. No GEANT a simulação do efeito fotoelétrico, sempre que um fóton é absorvido, faz com que o elétron emitido possua a mesma direção do fóton incidente. Portanto, a energia cinética do elétron é igual à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação do elétron antes da interação [CASSOLA, 2005].

A subcamada da qual o elétron é emitido é selecionada aleatoriamente de acordo com as secções de choque relativas de todas as subcamadas, determinada através da energia fornecida, interpolando os valores de secção de choque disponíveis no banco de dados EPDL971 [CASSOLA, 2005].

### 2.6.2 Secção de Choque

Secção de choque ( $\sigma$ ) para uma radiação, em relação a um dado material, é a probabilidade de interação por unidade de fluência de partículas daquela radiação por centro de interação do material, sendo a dimensão da secção de choque [ $L^2$ ] e a unidade no SI,  $m^2$ . Como é utilizada para dimensões da ordem do raio do núcleo, é adotada uma unidade especial, o *barn* ( $b$ ), que vale  $10^{-24} m^2$  [CNEN, 2003].

No GEANT4 a secção de choque total está descrita em seu manual de referências físicas [CERN, 2006] como uma composição de processos disponíveis em sua biblioteca. Desde que as bibliotecas forneçam a secção de choque para a energia específica de incidência,  $E$ , a secção de choque total é obtida pela interpolação de acordo com a (Equação 2.14,

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1)\log(E_2/E) + \log(\sigma_2)\log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)} \quad (\text{Equação 2.14})$$

onde as energias  $E_1$  e  $E_2$  são, respectivamente, a menor e a maior energia mais próxima da energia  $E$  cuja as secções de choque ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) estão disponíveis.

A distância média percorrida por uma partícula ou um fóton, com energia  $E$ , sem interagir, o livre caminho médio ( $LCM$ ), é calculada por:

$$LCM = \frac{1}{\sum_i \sigma_i(E)n_i} \quad (\text{Equação 2.15})$$

onde  $\sigma_i(E)$  é secção de choque para o processo considerado com energia  $E$ , e  $n_i$  é a densidade atômica do  $i$ -ésimo, elemento constituinte da composição do material. O somatório é realizado

para todos os elementos que compõem o material. As secções de choque são determinadas através da Equação 2.3 [CERN, 2006].

O gráfico apresentado na Figura 10 ilustra o percentual de transferência de energia segundo o processo de interação da radiação com a água, para energias observadas em radiodiagnóstico.

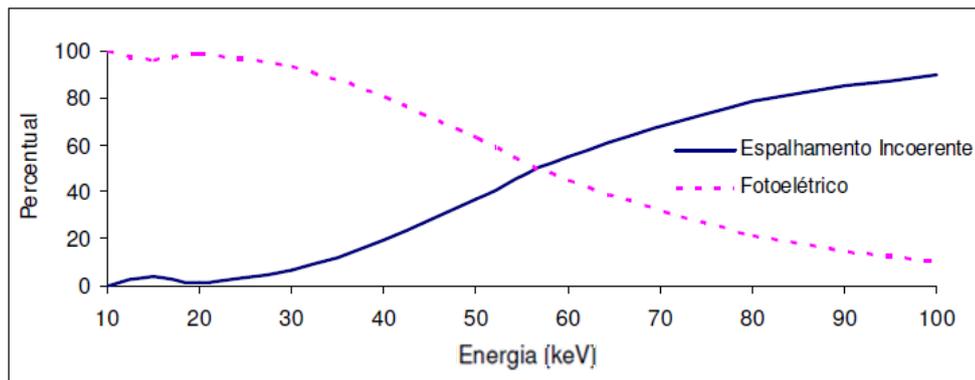


Figura 10: Percentual da transferência de energia em função da energia do fóton incidente na água, considerando intervalo de energia [JOHNS, 1983].

No gráfico da Figura 10 se percebe uma diminuição da contribuição na deposição de energia pelo efeito fotoelétrico com o aumento da energia do fóton incidente, pois a probabilidade de ocorrência desse efeito diminui com o aumento da energia da radiação incidente. Já a contribuição por parte do espalhamento incoerente aumenta, pois a probabilidade de interação por esse processo aumenta com o aumento da energia da radiação incidente. Há uma inversão no processo prioritário de deposição a partir da energia de 58 keV [JOHNS, 1983].

### 2.6.3 Espalhamento Coerente ou Rayleigh

O espalhamento coerente ocorre quando, após a interação da radiação com a matéria, a radiação sofre uma insignificante mudança na direção, sem depositar energia significativa no local.

O coeficiente de espalhamento clássico, definido por Thomson, considera que o campo elétrico da onda eletromagnética incidente provoca a vibração de um elétron do átomo. O elétron ao vibrar, por ser uma carga acelerada, emite radiação no mesmo comprimento de onda. Neste tipo de espalhamento, o elétron não cede energia para o meio circundante e, por essa razão, considera-se que nenhuma energia é absorvida [JOHNS, 1983].

Para este tipo de espalhamento pode-se definir a secção de choque diferencial para o espalhamento clássico,  $\sigma_0$ , que representa a fração de energia incidente que é espalhada por elétron e por unidade de ângulo sólido  $d\Omega$ , conforme mostrado na (Equação 2.16).

$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (\text{Equação 2.16})$$

Onde  $r_0$  representa o raio clássico do elétron com valor definido como  $2,81794 \cdot 10^{-15}$  m e  $\theta$  representa o ângulo formado pela direção da radiação incidente e a direção de espalhamento.

*“A participação de espalhamento coerente decresce rapidamente com o aumento da energia e pode ser desconsiderado para energias superiores a 100 keV e para elementos de baixo número atômico semelhantes aos tecidos moles do corpo” [HOFF, 2005].*

O Espalhamento Coerente envolve todos os elétrons do átomo, onde a radiação de baixa energia encontra os elétrons de um átomo e coloca-os vibrando com a mesma frequência do fóton. As ondas eletromagnéticas emitidas pelos diferentes elétrons do átomo formam um feixe de radiação espalhada que se propaga com diferença de fase constante no tempo, ou seja, coerente [JOHNS, 1983].

Este tipo de espalhamento ocorre predominantemente para baixas energias e altos números atômicos.

O ângulo de espalhamento ( $\theta$ ) no programa GEANT4 é obtido de acordo com o produto da fórmula de Rayleigh ( $[1 + \cos^2 \theta] \sin \theta$ ) e o quadrado do Fator de Forma de Hubbell ( $FF$ ) [CERN, 2006; HUBBELL et al, 1975]

$$\Phi(E, \theta) = [1 + \cos^2 \theta] \sin \theta \times FF^2(q) \quad (\text{Equação 2.17})$$

onde  $q = 2E \sin(\theta/2)$  é o momento transferido.

O fator de forma possui uma dependência com a energia inicial (E) do fóton quando incide nos átomos. A fórmula de Rayleigh não considera este fator. Para baixas energias, o fator

de forma é isotrópico e não afeta a distribuição angular. Com o aumento da energia, o espalhamento se torna predominantemente frontal [JOHNS, 1983].

#### 2.6.4 Espalhamento Incoerente ou Compton

O espalhamento incoerente ocorre quando fótons interagem com elétrons fracamente ligados, cedendo parcialmente sua energia para estes elétrons. Como resultado desta interação ter-se-á a observação de um elétron com energia cinética e um fóton com energia inferior à incidente que se move em uma direção diferente da direção do fóton incidente Figura 11.

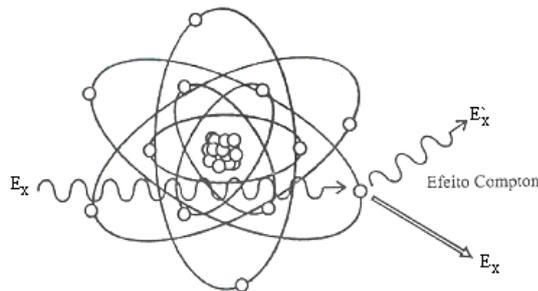


Figura 11: Representação do Efeito Compton [CNEN/IRD, 2003]

À medida que a energia do fóton incidente aumenta, menor será a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, tornando o efeito compton mais importante, sendo em radiologia, a maior parte da radiação espalhada proveniente do efeito compton.

Para baixas energias (<GeV) no GEANT4 o processo de espalhamento incoerente é simulado utilizando a secção de choque de Klein-Nishina, conforme o modo padrão, com a adição do fator de espalhamento incoerente de Hubbell para um determinado elemento de número atômico  $Z$ ,  $SF(q)$  [CERN, 2006]. A distribuição angular e de energia do fóton espalhado é, então, obtida através do produto da função de Klein-Nishina e a função de espalhamento  $SF$ .

$$P(\varepsilon, q) = \Phi(\varepsilon) \times SF(q) \quad (\text{Equação 2.18})$$

Onde  $\varepsilon$  é a relação entre a energia do fóton espalhado, e a energia do fóton incidente.

O valor da função de Klein-Nishina,  $\Phi(\varepsilon)$ , é obtida por:

$$\Phi(\varepsilon) \cong \left[ \frac{1}{\varepsilon} + \varepsilon \right] \left[ 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2} \sin^2 \theta \right] \quad (\text{Equação 2.19})$$

O efeito da função de espalhamento se torna significativa para baixas energias, especialmente para suprimir espalhamentos para frente [CERN, 2006].

### 2.6.5 Coeficiente de Atenuação Linear Total

Quando um feixe de radiação X incide sobre um material de espessura  $x$ , parte do feixe é espalhada, parte é absorvida pelos processos já descritos, e uma fração atravessa o material sem interagir. A intensidade  $I$  do feixe emergente está associada à intensidade  $I_0$  do feixe incidente, considerando um feixe monoenergético esse decréscimo da intensidade pode ser descrito pela seguinte expressão exponencial (Equação 2.20).

$$I_0 = I e^{\mu \cdot x} \quad (\text{Equação 2.20})$$

onde  $I$  é a intensidade do feixe após a passagem de um meio de espessura  $x$ ;  $I_0$  é a intensidade inicial do feixe;  $\mu$  é a probabilidade por unidade de comprimento do feixe sofrer atenuação, independente do processo de interação, por isso denominado de coeficiente de atenuação total ou linear [CNEN/IRD, 2003; OKUNO, 1982].

Na Figura 12 está ilustrado o coeficiente de atenuação para o ar em função da energia do fóton.

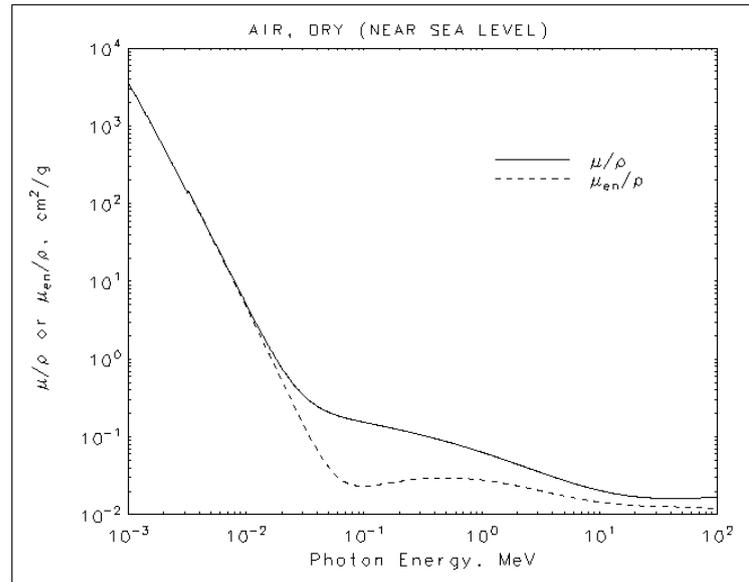


Figura 12: Gráfico ilustrativo do Coeficiente de Atenuação Linear e absorvido por energia do fóton, para o material ar, definido conforme especificações da ICRU 44 [ICRU 44], [NIST, 2006].

Em ambiente de simulação computacional, e para aplicações na área da proteção radiológica, faz-se necessário o conhecimento das definições das grandezas dosimétricas para a adequada obtenção dos dados e análise dos resultados obtidos.

### 3 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizado um estudo das normas, das regulamentações nacionais e internacionais sobre curvas de transmissão. Além disso, para a realização deste trabalho foi utilizado o programa de simulação computacional GEANT4, em sua versão 9.1.p2.

#### 3.1 Construção Virtual da Geometria Espacial da Simulação

Neste trabalho, a estruturação e a definição das geometrias internas necessárias para a realização da análise da influencia da composição dos materiais de blindagem, foram divididas em duas etapas:

1. na análise com dados de fluência e da transmissão com espectros monoenergéticos e polienergéticos, mantendo-se as mesmas configurações das geometrias internas de simulação, como por exemplo, a filtração adicional, o *ripple* e o ângulo de voo do feixe, mas considerando um material de blindagem para o espectro monoenergético e três materiais para o espectro polienergéticos;
2. na intercomparação entre o mesmo material de blindagem através da alteração da filtração total, do *ripple*, e do ângulo de voo da geometria interna de simulação.

Estas duas etapas foram realizadas considerando um mundo virtual esférico de simulação, com 2,5 m de raio. A fonte pontual de raios X foi definida de modo a localizar-se no centro geométrico espacial do mundo, onde o feixe primário de radiação X possuiu uma

distribuição homogênea em forma de um quadrado de interação com 70 cm de raio, determinado pela abertura do feixe (que corresponde à abertura do colimador durante a realização das medidas “*in locu*”).

A radiação X irradia diretamente uma parede de material da blindagem a 100 cm de distância do ponto focal do tubo de raios X, interagindo com a mesma. A 110 cm da fonte, atrás da parede, localiza-se o volume sensível de coleta (Figura 13).

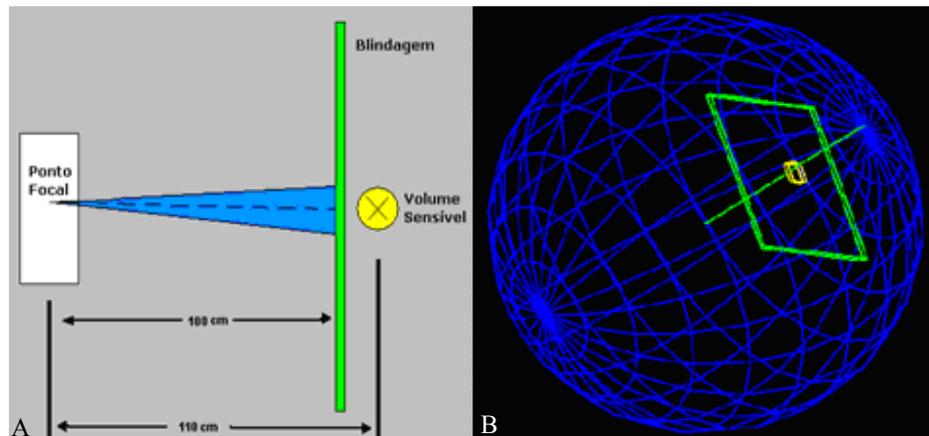


Figura 13: Figura ilustrativa da geometria de simulação: (A) geometria espacial; (B) geometria virtual simulada: contendo um mundo virtual esférico com 2,5 m de raio, uma parede de cor verde situada a 100 cm do ponto focal de tubo de raios X e um volume sensível de cor amarela a 10 cm da parede, gerada pela interface gráfica do GEANT4 *wired*.

Foi adicionada computacionalmente a filtração total de alumínio com espessuras fixas de 2,5; 3,0 e 4,0 mm (Equação 3.1). Cabe ressaltar que o espectro de emissão simulado considera a filtração total em sua descrição, reduzindo o tempo de simulação sem alterar significativamente os resultados.

$$\Phi = \Phi_0 e^{\left( d_{AR} \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{AR} \rho_{AR} - d_{AL} \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{AL} \rho_{AL} \right)} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde,  $d_{AR}$  é a distância da posição do ponto focal à blindagem no ar, e  $d_{AL}$  é a distância da posição do ponto focal à posição do filtro de alumínio,  $\left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{AR}$  é o coeficiente mássico de transmissão no ar, e  $\left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{AL}$  é o coeficiente mássico de transmissão no alumínio,  $\rho_{AR}$  é a densidade do ar e  $\rho_{AL}$  a densidade do alumínio.

A filtração de alumínio adicionada computacionalmente está em concordância com a recomendada para radiodiagnóstico pela Portaria Federal ° 453, parágrafo 4.13 (inciso c), onde se estabelece que:

*“(...) todo equipamento de radiodiagnóstico médico deve possuir: (...) c) Filtração total permanente do feixe útil de radiação de, no mínimo o equivalente a: 2,5mm de alumínio (...). [MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1998]”.*

A filtração de alumínio é utilizada para absorver fótons de raios X de baixa energia e modelar o espectro de emissão do ponto focal, com o intuito de diminuir o número de fótons de baixa energia no espectro de raios X, e, por conseguinte, aumentar a qualidade do feixe e, conseqüentemente, a sua camada semirredutora no material a ser analisado.

Os materiais de blindagens que constituíram a parede na simulação computacional foram: ferro 100 %, argamassa baritada, de acordo com análise elementar de composição definida pela técnica de microscopia eletrônica por varredura, e concreto de acordo com as descrições elementares definidas pelo NIST e por Simpkin [SIMPKIN, 1995].

A composição dos elementos químicos do material de blindagem composto de argamassa baritada foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica - PUCRS através de técnicas de “SEM” (*Scanning Electron Microscope*) conforme demonstrado pela Figura 14 (A), e sua imagem ilustrada na Figura 14 (B).

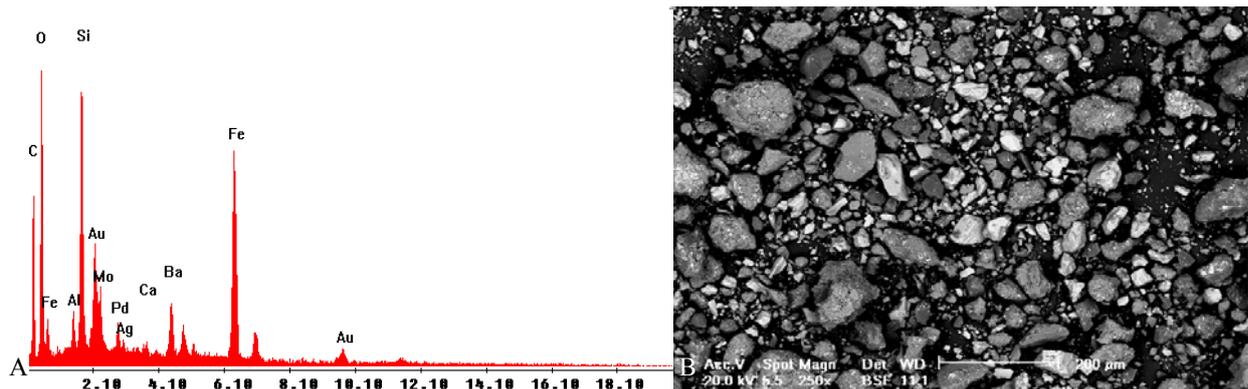


Figura 14: Ilustração (A) da análise dos elementos químicos que constituem a argamassa baritada e (B) da heterogeneidade composição química da amostra estudada, obtidos através de técnicas de *Scanning Electron Microscope* (SEM).

A fração de massa e densidade de cada elemento constituinte dos materiais utilizados nas blindagens está demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1: Fração de massa e densidade de cada elemento: Concreto NIST [NIST, 2008], Concreto Simpkin [SIMPKIN, 1995], e Argamassa Baritada para as quatro coletas da mesma amostra denominadas BM1, BM2, BM3 e BM4.

Elemento Químico	Concreto NIST	Concreto Simpkin	BM1	BM2	BM3	BM4
Al	0.019953	0.045600	0.012400	0.014270	0.015837	0.012394
Ba	NA	NA	0.087800	0.143146	0.171611	0.155453
C	0.002484	NA	0.180900	0.155281	0.142891	0.182720
Ca	0.042951	0.082600	0.003800	0.008764	0.010519	0.008853
H	0.022101	0.005600	NA	NA	NA	NA
Fe	0.006435	0.012200	0.246600	0.245056	0.283773	0.217540
K	0.010045	0.019200	NA	NA	NA	NA
Mg	0.001266	0.002400	NA	NA	0.002600	NA
Mo	NA	NA	0.036200	0.051910	NA	0.061025
Na	0.015208	0.017100	NA	NA	NA	NA
O	0.574930	0.498300	0.320400	0.301348	0.301500	0.293908
Pd	NA	NA	0.022300	0.022360	0.022811	0.022663
S	NA	0.001200	NA	NA	NA	NA
Si	0.304627	0.315800	0.089600	0.057865	0.048458	0.045444
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	<b>2300.0</b>	<b>2350.0</b>	<b>3436.3</b>	<b>3689.0</b>	<b>3524.5</b>	<b>3613.6</b>

\* NA representa que este elemento químico não existe em sua composição química.

Para verificar a existência de diferenças entre as composições, optou-se por utilizar inicialmente espectros monoenergéticos para a mesma geometria de simulação. Dessa forma, foi possível descrever e evidenciar as diferenças para cada energia formadora do espectro polienergético. Para este estudo foram considerados espectros monoenergéticos entre as energias de 60 a 150 keV, ao passo de 10 keV.

Para realizar a intercomparação entre matéria de diferentes composições foram consideradas as especificações encontradas nos equipamentos de raios X em geral. Foi estimado o espectro de emissão do ponto focal do tubo de raios X (polienergético), utilizando como referência os dados do *Catalogue of Diagnostic X-Ray Spectra and Other Data* [CRANLEY, 1997]. Os espectros simulados foram gerados com tensões aceleradoras máximas de 80, 100, 120 e 150 kVp, em configuração de feixe estreito com área de (10 x 10) cm<sup>2</sup>. Os dados de camada semirredutora e de energia média do espectro foram calculados a partir dos espectros gerados, utilizando recursos da planilha Excel® e são apresentados na Tabela 4. Foi necessário realizar a regressão dos valores gerados dos espectros de 750 mm de ar para a posição do ponto focal, Figura 15 (a), transformando-os em valores de probabilidade de fluxo de fótons por energia de fótons emitido da fonte, Figura 15 (b).

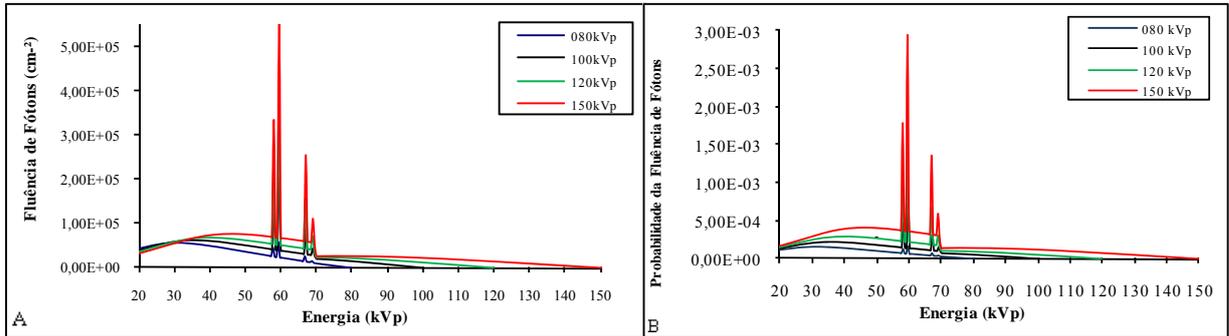


Figura 15: Gráficos ilustrativos (A) dos espectros de emissão de raios X do ponto focal, considerando alvo de tungstênio [W], filtração total de alumínio de 3,0 mm, ângulo efetivo de 6°, tensões de pico de 80, 100, 120 e 150 kVp, com *ripple* de 0 %; e (B) da probabilidade de fluência de fótons por energia de fótons emitidos pela fonte, para as mesmas condições. Espectros baseados no catálogo de Cranley (1997) com regressão ao ponto focal e adição de filtração total de alumínio realizada pelo autor.

A Tabela 2 apresenta os dados das camadas semirredutoras e energias médias dos espectros de emissão de raios X do ponto focal, utilizados para a intercomparação entre materiais, com filtração total de 3,0 mm de alumínio, ângulo efetivo do tubo de 6°, tensões de pico de 80, 100, 120 e 150 kVp, e *ripple* de 0%.

Tabela 2: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para a intercomparação entre materiais, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, filtração total de alumínio de 3,0 mm, ângulo efetivo de 6°, tensões de pico de 80, 100, 120 e 150 kVp, e *ripple* de 0 %.

Tensão de Pico (kVp)	Energia Média (keV)	CSR (mm)
80	45,7	9,2
100	52,7	10,3
120	58,5	11,2
150	66,6	12,2

Como o espectro é modificado por três fatores: filtração, tensão do tubo e tipo de suprimento de alta tensão, foram realizadas simulações de intercomparação de dados com tensão de tubo de 90 kVp.

Para avaliar os fatores que influenciam na formação do espectro, foram gerados novos espectros, considerando três diferentes possibilidades (conforme ilustra a Tabela 3): com

filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm, *ripple* constante de 5 % e 6° de ângulo efetivo do tubo; com *ripple* característico do equipamento variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; e com ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5% e filtração total de 3,0 mm de alumínio.

Tabela 3: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com filtração total, ângulo efetivo de 6° e *ripple* variáveis para a tensão de pico de 90 kVp.

Ângulo efetivo (°)	<i>Ripple</i> (%)	Filtração Total (mm de Al)	Energia Média (keV)	CSR (mm)
6	5	2,5	48,5	9,5
		3,0	49,2	9,9
		4,0	50,4	10,4
6	5	3,0	49,2	9,9
	15		47,7	9,6
	25		46,4	9,4
6	5	3,0	49,2	9,9
12			47,0	9,1
22			45,4	8,6

A Figura 16 apresenta os espectros de emissão de raios X do ponto focal baseados do catálogo de Cranley (1997) com regressão ao ponto focal e adição de filtração total de alumínio, com alvo de tungstênio [W]. Para o gráfico (A) filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm com *ripple* constante de 5 % e 6° de ângulo efetivo do tubo, (B) *ripple* variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; e a (C) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio.

Para o gráfico (A) da Figura 16 o aumento da filtração total de alumínio no espectro influencia na redução de fótons de baixa energia, aumentando assim a penetrabilidade do feixe e a energia média do feixe. Já os gráficos (B e C) da Figura 16 são os que mais influenciam os fótons de baixa energia, que participam mais significativamente na formação da imagem radiográfica.

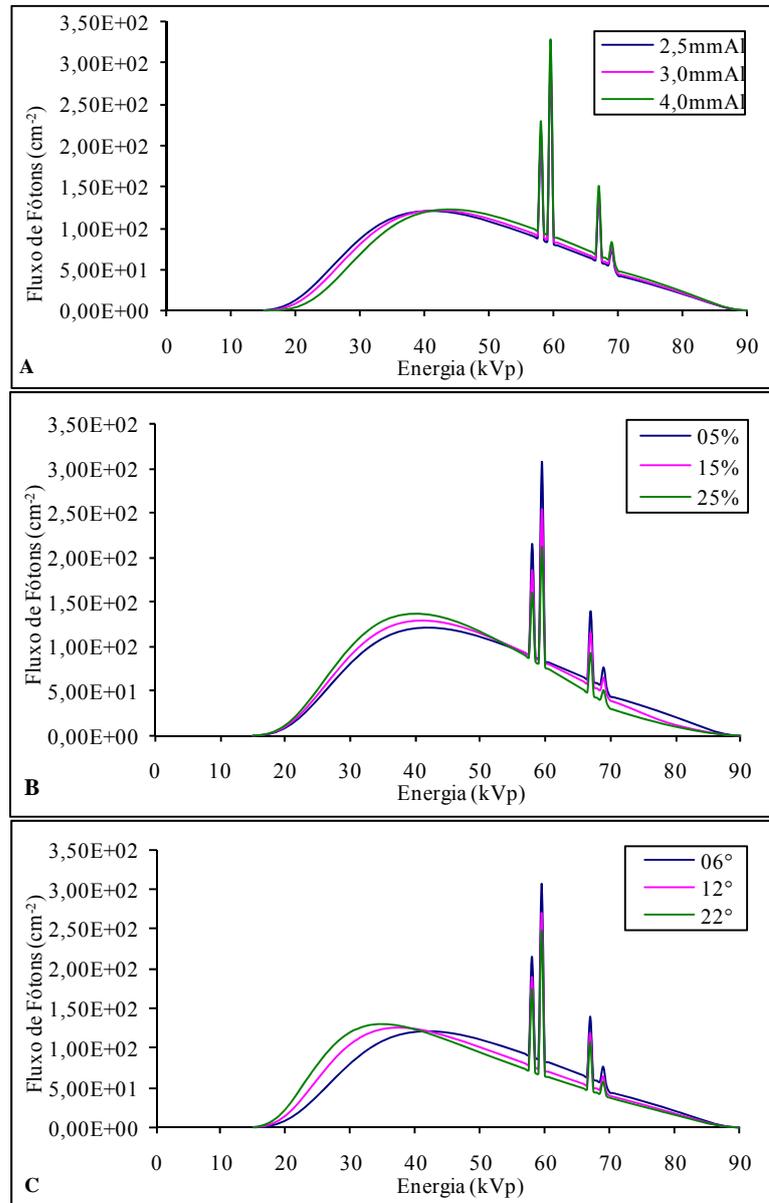


Figura 16: Gráficos ilustrativos dos espectros de emissão de raios X do ponto focal, considerando alvo de tungstênio [W], para (A) filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm, *ripple* constante de 5 % e 6° de ângulo efetivo do tubo; (B) *ripple* variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; e (C) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio. Espectros baseados no catálogo de Cranley (1997) com regressão ao ponto focal e adição de filtração total de alumínio realizada pelo autor.

### 3.2 Determinação do *KERMA*

Para fótons polienergéticos, o *KERMA* foi estimado através do somatório de todas as interações no volume sensível para cada energia do espectro, estando relacionado com a fluência de energia ( $\Psi$ ) e o coeficiente mássico de transmissão de energia  $(\mu_{tr} / \rho)_{E,Z}$ , característico para a energia do fóton incidente e do número atômico do material no ponto:

$$K = \sum_{i=1}^N \Psi \cdot \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} \quad (\text{Equação 3.2})$$

onde o *KERMA* tem como unidade  $\text{J.kg}^{-1}$ .

### 3.3 Estimativa da Transmissão

A transmissão,  $T$ , pode ser estimada através das taxas de *KERMA* no ar, com barreira e sem barreira, medidas a uma distância fixa do ponto focal do tubo de raios X.

O *KERMA* no ar,  $K$ , para energias compreendidas neste trabalho, foi estimado através da energia absorvida,  $E_{ab}$ , no volume sensível. Para a energia de aplicação deste trabalho, podem ser consideradas as energias transferidas,  $E_{tr}$ , e absorvidas,  $E_{ab}$ , como grandezas de mesma magnitude,  $E_{ab}=E_{tr}$ , visto que, a participação da perda de radiação, através do processo de *bremstrahlung*, é insignificante para elétrons gerados nesta faixa energética [HOFF, 2005]. Logo,

$$K = \frac{\epsilon_{tr}}{m} \equiv \frac{\epsilon_{ab}}{m} \quad (\text{Equação 3.4})$$

onde,  $m$  é a massa do volume sensível.

$$K = \frac{d(\epsilon_{tr})}{dm} \quad (\text{Equação 3.5})$$

O *KERMA* pode ser determinado pelo somatório de todas as energias cinéticas transferidas,  $d(E_{tr})$ , incidentes por quantidade em um material de massa,  $dm$ .

Como, a transmissão é,  $T = \frac{K_i}{K_o}$  sendo  $K_i$  e  $K_o$  o *KERMA* no ar com e sem barreira, respectivamente, pode-se afirmar que:

$$\frac{K_i}{K_o} = \frac{\left. \frac{d(E_{tr})}{dm} \right|_i}{\left. \frac{d(E_{tr})}{dm} \right|_o} = \frac{d(E_{tr})_i}{d(E_{tr})_o} \equiv \frac{d(E_{ab})_i}{d(E_{ab})_o} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Portanto,

$$T = \frac{d(E_{ab})_i}{d(E_{ab})_o} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde, índice  $i$  representa a medida no ar, com barreira, e o índice  $o$  a medida no ar sem barreira (medida de referência).

Os dados adquiridos pela simulação correspondem ao espectro de energia e à energia total depositada no volume sensível para cada energia e espessura simuladas, com o seu erro relativo associado calculado pelo programa GEANT4.

### 3.4 Tempo de Execução das Simulações

As simulações foram realizadas em diferentes configurações de computadores, resultando em diferentes tempos de execução. A Tabela 4 mostra a configuração dos computadores utilizados e o número de computadores em cada configuração. A Tabela 5 ilustra os tempos estimados das simulações, materiais de blindagens, espectro, tempo estimado para o número de simulações e as energias simuladas.

Para a conclusão deste trabalho foram executadas 1012 simulações, demandando um tempo médio de 45649 horas de simulações, isso se fosse utilizada apenas um computador para realizar as simulações. Como o tempo foi dividido em 18 máquinas, o trabalho tornou-se exequível.

Tabela 4: Configurações dos computadores utilizados nas simulações

Nº de computadores	Configuração Processador	Memória RAM
8	Pentium IV 2.8GHz HT	1 GHz
8	Core 2 Duo	2 GHz
2	Dual Core 2.8GHz	1 GHz

Tabela 5: Materiais de blindagens com tempo de simulação estimado para todas as energias simuladas

Material de Blindagem	Espectro	Energia (keV)	Tempo (s)	Tempo (h)	TEMPO (dia)	Nº de simulações
BM1	Monoenergético	60	1162856	323	13	13
		70	1631401	453	19	17
		80	1642632	456	19	17
		90	1656889	460	19	17
		100	1850866	514	21	19
		110	1850866	514	21	21
		120	2003858	557	23	21
		130	1850866	514	21	21
		140	1850866	514	21	21
		150	2035385	565	24	21
BM2	Monoenergético	60	1081235	300	13	13
		70	1531401	425	18	17
		80	1542632	429	18	17
		90	1556889	432	18	17
		100	1750866	486	20	19
		110	1750866	486	20	21
		120	1903858	529	22	21
		130	1950866	542	23	21
		140	1950866	542	23	21
		150	1935385	538	22	21
BM3	Monoenergético	60	1081235	300	13	13
		70	1531401	425	18	17
		80	1542632	429	18	17
		90	1556889	432	18	17
		100	1750866	486	20	19
		110	1750866	486	20	21
		120	1903858	529	22	21
		130	1950866	542	23	21
		140	1950866	542	23	21
		150	1935385	538	22	21
BM4	Monoenergético	60	1081235	300	13	13
		70	1531401	425	18	17
		80	1542632	429	18	17
		90	1556889	432	18	17
		100	1750866	486	20	19
		110	1750866	486	20	21
		120	1903858	529	22	21
		130	1950866	542	23	21
		140	1950866	542	23	21
		150	1935385	538	22	21
Material de Blindagem	Espectro	Tensão (kVp)	Tempo (s)	Tempo (h)	TEMPO (dia)	Nº de simulações
BM1	Polienergético	80	2662856	740	31	6
		100	3750866	1042	43	8
		120	4538589	1261	53	10
		150	4569388	1269	53	11
BM2	Polienergético	80	2530590	703	29	6
		100	3621281	1006	42	8
		120	4421649	1228	51	10
		150	4357516	1210	50	11
BM3	Polienergético	80	2529856	703	29	6
		100	3632895	1009	42	8
		120	4412264	1226	51	10
		150	4292056	1192	50	11
BM4	Polienergético	80	2528965	702	29	6
		100	3628912	1008	42	8
		120	4426499	1230	51	10
		150	4386049	1218	51	11
CONCRETO NIST	Polienergético	80	3553760	987	41	9
		100	3512001	976	41	9
		120	3456122	960	40	9
		150	3538748	983	41	9
CONCRETO Simpkin	Polienergético	80	3253760	904	38	9
		100	3339838	928	39	9
		120	3330967	925	39	9
		150	3506169	974	41	9
Fe	Polienergético	90	8154235	2265	94	48
<b>Total</b>			<b>164336908</b>	<b>45649</b>	<b>1902</b>	<b>1012</b>

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

A avaliação da influencia de diferentes parâmetros na determinação das curvas de transmissão foi realizada com base em duas possibilidades de intercomparação dos dados: fluxo de fótons e *KERMA*. O fluxo de fótons possibilita a avaliação da alteração efetiva do espectro causado pelo material de blindagem e como esta influencia o fluxo em função da composição e espessuras, bem como a influencia de alterações no espectro que podem alterar a curva de transmissão determinada. O *KERMA* é a grandeza dosimétrica que está relacionada com a quantidade de energia absorvida por um volume de ar. Esta grandeza está diretamente relacionada com a determinação das medidas de transmissão.

Nesta dissertação, a avaliação está enfocando a influencia de alterações no espectro na determinação das curvas de transmissão, bem como a influencia da blindagem (especialmente a composição do material) na determinação das curvas de transmissão. A avaliação das alterações da composição foi realizada em duas etapas distintas, considerando feixes monoenergéticos e polienergéticos. As considerações em relação aos espectros foram realizadas com base em feixes polienergéticos e as possibilidades de alteração dos mesmos em função do *ripple*, tensão aceleradora e ângulo médio efetivo do feixe de elétrons.

## 4.1 Espectros Monoenergéticos

As simulações para feixes monoenergéticos foram realizadas com  $1.10^9$  histórias, utilizando a geometria espacial descrita na Figura 13 da subseção 3.1; o material escolhido para a parede nestas simulações foi a argamassa baritada, com espessuras de 0,1 a 2,0 mm, ao passo de 0,1 mm, e energias entre 60 a 150 keV, ao passo de 10 keV.

O material denominado como BM1 é considerado como padrão comparativo (FOV grande na EDS), e os outros materiais BM2, BM3 e BM4 (FOV estreito na EDS) são as diferentes amostras deste mesmo material.

### 4.1.1 Fluxo de fótons

A Figura 17 (A e B) apresenta e exemplifica o comportamento do fluxo de fótons na saída da parede de blindagem do material BM1, considerando o espectro monoenergético de 60 e 150 keV com diferentes espessuras de blindagem do material (0,2, 0,6, 1,0, 1,4 e 2,0 mm).

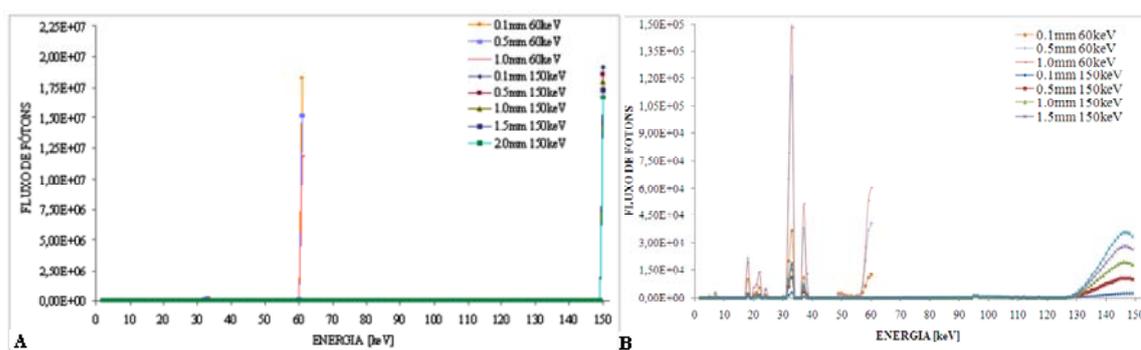


Figura 17: Gráficos do fluxo de fótons de saída da superfície da parede de blindagem considerando mesma composição de material (BM1) com diferentes espessuras para os espectros monoenergéticos de 60 keV e 150 keV para as espessuras de 0,1, 0,5 e 1,0 para a energia de 60 keV, e 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mm para a energia de entrada na blindagem de 150 keV: (A) considerando fluxo total para todas as energias e (B) considerando o fluxo para energias abaixo de 150 keV.

A Figura 17 (A) ilustra a influencia do fluxo de fótons com o aumento da espessura da blindagem para as energias do espectro, ocorrendo uma redução do fluxo total de fótons, como era esperada, demonstrando como é a sua configuração. Isso possibilitou definir a energia eficaz para cada grupo de energia da aplicação e otimizar a espessura da blindagem de um modo mais seguro.

Na Figura 17 (B) foi retirada a energia de 150 keV do espectro, possibilitando assim uma melhor visualização das diferenças nos pontos de pico do gráfico, com variações mais significativas nos fótons de baixa energia, especialmente para energias entre 15 keV, 45 keV e 149 keV, e variações para os picos de energias estudados. O mesmo comportamento foi apresentado para todas as energias estudadas, onde as maiores diferenças ocorrem para os espectros de energias menores (ANEXO A apresenta todos os espectros utilizados nas simulações).

O gráfico apresentado na Figura 18 mostra que os espectros podem ser sensíveis às diferenças na composição do material da blindagem, apresentando um espectro monoenergético de 150 keV e com mesma espessura de blindagem (2,0 mm), mas de materiais de composições diferentes BM1 (padrão comparativo), BM2, BM3 e BM4.

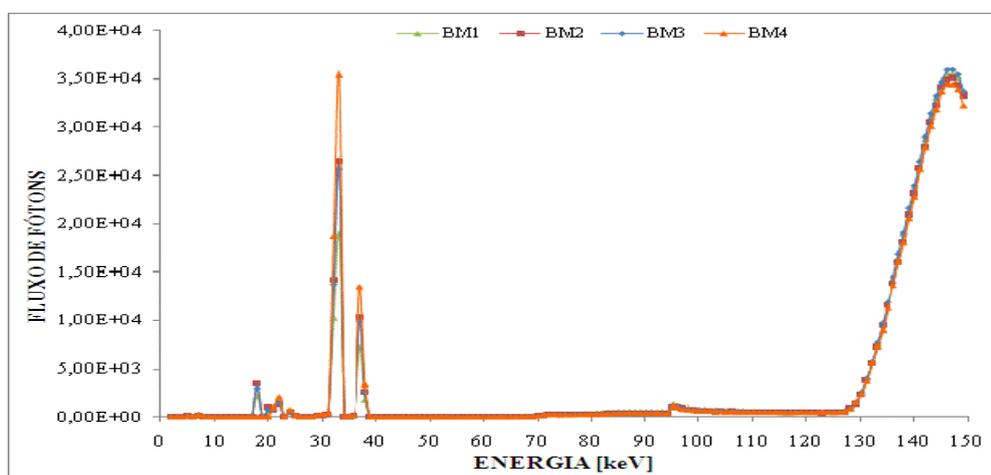


Figura 18: Gráfico do fluxo de fótons na saída da superfície da parede de blindagem considerando o fluxo de fótons para a mesma espessura (2,0 mm) para materiais de composição diferente BM1, BM2, BM3 e BM4.

As maiores diferenças no fluxo de fótons se encontram nos pontos de picos do gráfico, com variações mais significativas nas energias de 15 a 45 keV, e no pico de energia

estudado. É importante levar em conta que o gráfico apresentado nesta Figura 18 ilustra um caso de maior energia estudada e, conseqüentemente, apresenta variações do fluxo de fótons mais baixas. O mesmo comportamento foi apresentado para todas as outras energias estudadas, ocorrendo diferenças maiores para as energias de espectro monoenergético inferiores a 150 keV.

#### 4.1.2 Transmissão de Fótons

A Figura 19 apresenta curvas de transmissão para as diferentes composições de argamassa de barita. Note que o material BM1 é considerado como padrão comparativo (FOV grande na EDS). Os outros BM2, BM3 e BM4 (FOV estreito na EDS) são as diferentes amostras do mesmo material em coleta de EDS focada. A influencia da composição na determinação da curva de transmissão foi estudada em feixe monoenergético dentro do intervalo de energia entre 60 keV e 150 keV, ao passo de 10 keV.

Os dados simulados da transmissão de fótons em função da espessura de todas as composições de argamassa baritada estudada como material de blindagem para as energias de 60 a 150 keV, ao passo de 10 keV, está demonstrado no ANEXO B.

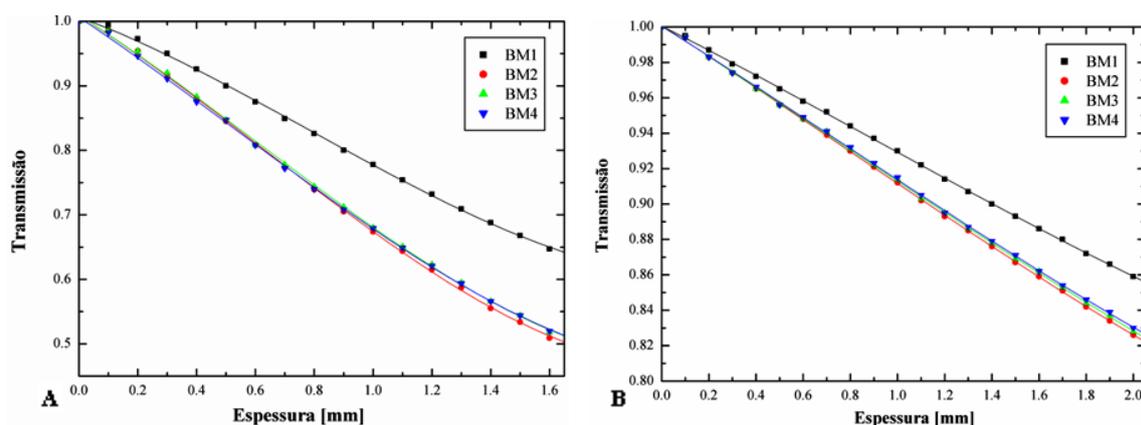


Figura 19 Gráfico da transmissão de fótons em função da espessura do material de blindagem e de diferentes composições da argamassa de barita, para espectros monoenergéticos de (a) 60 keV e (b) 150 keV.

Os dados que geraram o gráfico da Figura 19, foram utilizados como ponto de partida para a estimativa das equações de ajuste de interpolações de dados para determinação das curvas de transmissão. Estas curvas foram definidas fazendo-se uso dos recursos do programa Origin® e a geração de interpolação polinomial de terceira ordem. O ANEXO C apresenta as equações de ajuste geradas para as curvas de tendências dos dados simulados da transmissão de fótons, em função da espessura para todas as composições de argamassa baritada estudadas, para todas as tensões de tubo estudadas neste trabalho.

A Figura 19 (A e B) mostra um exemplo do comportamento da transmissão de fótons para as energias de 60 keV e 150 keV com as respectivas curvas de ajuste para estes materiais. Demonstrando uma superposição em todos os pontos do gráfico, com o aumento da espessura da blindagem, para os materiais BM2, BM3 e BM4. O material BM1 apresentou uma diferença maior se comparado com os pontos dos outros materiais, possivelmente devido à baixa quantidade do elemento químico bário (Ba) em sua composição, diminuindo assim o poder de atenuação do fluxo de fótons na blindagem. Como a atenuação da radiação X é o resultado do processo de interação deste tipo de radiação com a matéria, a intensidade do feixe de saída da blindagem está relacionada com a densidade do material, a composição e o número atômico médio do meio atenuador.

Este comportamento foi verificado para todas as energias estudadas e, como já era esperada, a maior variação da transmissão de fótons ocorreu nas blindagens mais espessas. Já as maiores variações das diferenças entre as transmissões de fótons calculadas ocorreram para o feixe de 60 keV, com variações de cerca de 23 %, e a maior variação calculada para o feixe de fótons monoenergético de 150 keV foi de cerca de 4 %. A Tabela 6 apresenta as diferenças calculadas entre o material BM1 e os materiais BM2, BM3 e BM4, para todas as energias e espessuras estudadas.

Tabela 6: Diferença percentual da Transmissão de fótons para espectros monoenergéticos, considerando energias entre 60 e 150 keV, com passo de 10 keV.

Espessura (mm)	Energia: 60keV			Energia: 70keV			Energia: 80keV			Energia: 90keV			Energia: 100keV		
	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	1,10	1,20	1,91	0,80	0,80	-1,21	0,65	0,65	0,83	0,55	0,55	0,68	0,50	0,50	0,50
0,2	3,00	3,00	4,24	1,95	1,95	-2,77	1,53	1,53	1,90	1,15	1,15	1,33	1,02	0,92	1,02
0,3	5,03	4,82	6,32	3,37	3,16	-4,11	2,48	2,38	2,89	1,88	1,78	2,11	1,55	1,45	1,53
0,4	6,79	6,68	8,13	4,86	4,64	-5,51	3,46	3,24	3,74	2,72	2,51	2,74	2,09	1,99	2,09
0,5	9,04	8,46	9,85	6,11	5,89	-5,89	4,54	4,33	4,71	3,44	3,22	3,49	2,76	2,44	2,57
0,6	10,88	10,40	11,61	7,66	7,66	-7,66	5,40	5,07	5,50	4,07	3,86	4,02	3,33	3,01	3,07
0,7	12,99	12,23	13,49	8,95	8,36	-9,07	6,50	6,16	6,51	4,97	4,63	4,75	3,92	3,59	3,60
0,8	15,24	14,45	15,37	10,53	9,93	-10,41	7,48	7,02	7,37	5,68	5,23	5,43	4,52	4,08	4,11
0,9	16,94	16,12	16,67	11,88	11,00	-11,50	8,54	7,95	8,19	6,41	5,96	6,09	5,03	4,58	4,61
1,0	19,14	17,84	18,27	13,37	12,60	-12,72	9,74	9,02	9,15	7,22	6,64	6,67	5,66	5,10	5,08
1,1	21,17	19,82	20,27	14,59	13,66	-13,93	10,63	9,77	9,93	7,94	7,35	7,36	6,08	5,63	5,51
1,2	22,96	21,54	21,86	15,98	14,89	-15,16	11,56	10,67	10,81	8,77	7,93	7,02	6,74	6,28	6,09
1,3	NA	NA	NA	17,21	16,08	-16,22	12,53	11,63	11,74	9,45	8,72	8,59	7,30	6,71	6,63
1,4	NA	NA	NA	19,33	17,73	-17,73	13,61	12,56	12,55	10,18	9,43	9,27	8,00	7,28	7,19
1,5	NA	NA	NA	20,06	18,56	-18,56	14,47	13,53	13,35	11,06	10,05	9,97	8,47	7,75	7,53
1,6	NA	NA	NA	21,33	19,94	-19,63	15,47	14,23	14,20	11,56	10,66	10,53	8,96	8,22	8,04
1,7	NA	NA	NA	9,69	8,82	8,62									
1,8	NA	NA	NA	10,20	9,32	9,09									
1,9	NA	NA	NA												
2,0	NA	NA	NA												
Espessura (mm)	Energia: 110keV			Energia: 120keV			Energia: 130keV			Energia: 140keV			Energia: 150keV		
	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)	BM1-BM2 (%)	BM1-BM3 (%)	BM1-BM4 (%)
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	0,30	0,29	0,39	-0,86	-0,96	-0,93	0,18	0,18	0,16	0,21	0,21	0,19	0,16	0,14	0,16
0,2	0,81	0,77	0,90	0,72	0,62	0,61	0,52	0,52	0,51	0,40	0,38	0,37	0,36	0,37	0,37
0,3	1,23	1,14	1,02	1,09	0,99	1,03	0,81	0,82	0,79	0,63	0,59	0,57	0,58	0,55	0,53
0,4	1,66	1,55	1,46	1,48	1,37	1,36	1,05	1,04	1,02	0,87	0,80	0,79	0,69	0,69	0,63
0,5	2,10	1,95	1,94	1,63	1,56	1,51	1,28	1,31	1,26	1,12	1,02	1,03	0,96	0,94	0,89
0,6	2,65	2,41	2,39	2,14	2,04	2,00	1,48	1,50	1,45	1,37	1,31	1,23	1,09	1,05	0,99
0,7	3,00	2,82	2,87	2,35	2,31	2,24	1,79	1,81	1,73	1,59	1,47	1,40	1,33	1,17	1,14
0,8	3,47	3,17	3,22	2,79	2,61	2,48	1,99	2,01	1,97	1,82	1,71	1,60	1,51	1,40	1,35
0,9	3,84	3,61	3,53	2,99	2,93	2,82	2,21	2,23	2,17	2,06	1,89	1,78	1,71	1,62	1,53
1,0	4,32	4,00	4,07	3,26	3,22	3,11	2,61	2,62	2,56	2,29	2,12	2,00	1,92	1,78	1,68
1,1	4,82	4,47	4,58	3,60	3,54	3,41	2,79	2,81	2,76	2,53	2,34	2,21	2,08	1,98	1,85
1,2	5,21	4,83	4,94	4,02	3,90	3,72	2,92	2,93	2,89	2,79	2,61	2,47	2,31	2,14	2,04
1,3	5,61	5,17	5,24	4,35	4,24	4,08	3,21	3,25	3,18	3,01	2,84	2,63	2,45	2,37	2,19
1,4	6,13	5,67	5,77	4,72	4,61	4,39	3,45	3,47	3,40	3,21	3,03	2,83	2,69	2,47	2,34
1,5	6,67	6,08	6,18	5,07	4,95	4,72	3,71	3,73	3,67	3,47	3,20	3,04	2,88	2,71	2,51
1,6	6,98	6,39	6,50	5,38	5,26	5,03	4,01	3,95	3,90	3,73	3,49	3,26	3,06	2,78	2,67
1,7	7,42	6,86	6,92	5,71	5,60	5,35	4,29	4,32	4,24	3,95	3,68	3,43	3,30	3,03	2,89
1,8	7,86	7,27	7,52	5,87	5,75	5,49	4,42	4,46	4,38	4,21	3,93	3,68	3,48	3,24	2,99
1,9	8,31	7,68	7,80	6,31	6,19	5,88	4,82	4,85	4,78	4,41	4,08	3,83	3,69	3,40	3,18
2,0	8,78	8,02	8,11	6,58	6,46	6,19	5,01	5,06	4,94	4,64	4,30	4,03	3,90	3,59	3,36

\*NA representa dados não simulados devido à baixa significância estatística.

## 4.2 Espectros Polienergéticos

A análise da transmissão de fótons foi realizada através dos resultados obtidos com o *KERMA* e a energia absorvida coletados no volume sensível virtual simulado, considerando materiais de blindagem composto de argamassa baritada e concreto, com tensões aceleradoras máximas do tubo de raios X de 80, 100, 120 e 150 kVp.

### 4.2.1 Argamassa Baritada

A simulação foi realizada com  $1.10^9$  histórias, utilizando a geometria espacial descrita na Figura 13 da subseção 3.1, para o material de blindagem composto de argamassa baritada (conforme descrito na composição dos materiais na Tabela 1 da subseção 3.1), com espessuras na ordem de 0,2 a 2,0 mm, ao passo de 0,2 mm. Também foram estimadas medidas de *KERMA* e energia absorvida sem blindagem, para se obter o valor do feixe incidente inicial de referência,  $I_0$ .

Os dados simulados estão demonstrados na Figura 20 com tensões de pico do tubo de raios X de 80, 100, 120 e 150 kVp, para os materiais: BM1, BM2, BM3 e BM4. Conforme mencionado na subseção 3.2, as transmissões de fótons foram calculados através das energias absorvidas no volume sensível.

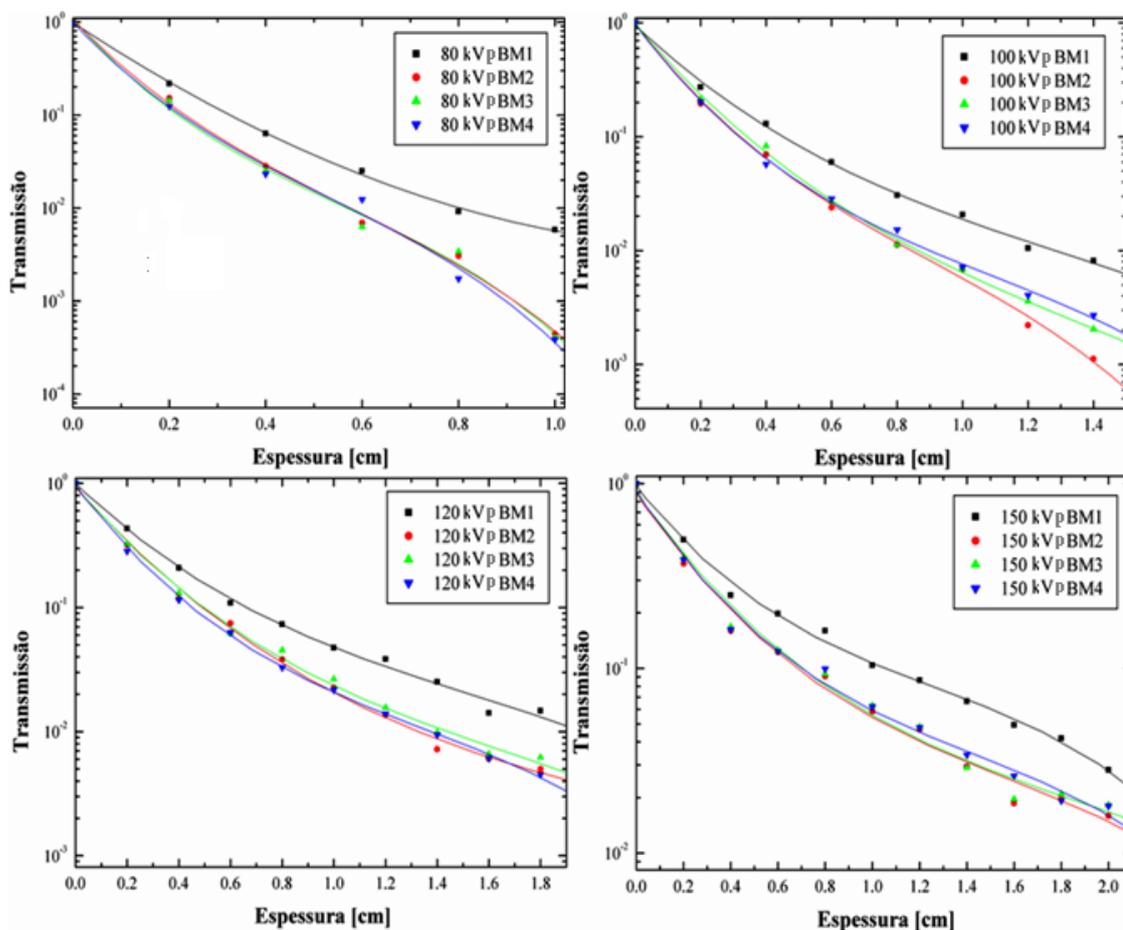


Figura 20: Transmissão de fótons em função da espessura do material absorvedor com espectros polienergéticos de 80, 100, 120 e 150 kVp, para o material de blindagem composto de argamassa baritada, considerando o mesmo material, mas de composições diferentes: BM1, BM2, BM3 e BM4.

A Figura 20 apresenta as curvas de transmissão da argamassa baritada em função da espessura da blindagem para as diferentes composições e energias estudadas, tendo um comportamento decrescente das curvas de transmissão com o aumento da espessura da parede. O comportamento apresentado é semelhante ao do espectro monoenergético deste material, mas com pontos um pouco mais espaçados entre os dados das composições BM2, BM3 e BM4.

A Tabela 7 apresenta os dados simulados e calculados para as transmissões de fótons das composições: BM1 e as composições BM2, BM3 e BM4, considerando o espectro polienergético de 150 kVp (os dados das demais energias estão disponibilizados no ANEXO D), e os resultados das simulações, fornecendo informações sobre o *KERMA*, a camada

semirredutora, a energia média do espectro de saída da blindagem; a energia absorvida no volume sensível e a transmissão calculada. A transmissão foi calculada de duas maneiras distintas:

- primeiro, através dos dados coletados no volume sensível das contagens em cada região das energias do espectro polienergético, ou seja, o fluxo de fótons que passa pelo material absorvedor. Através destes resultados foi estimado o *KERMA* no ar, com e sem blindagem.
- segundo, pela energia absorvida coletada no volume sensível, com e sem barreira.

Os dados que geraram o gráfico da Figura 20 foram utilizados para a estimativa de equações de ajuste de interpolações de dados através do programa gráfico Origin®, conforme demonstrado no ANEXO E.

O cálculo das energias médias dos espectros obtidos, conforme mostra a Tabela 7, possibilitou a análise de uma grandeza que é muito utilizada por hospitais e laboratórios de pesquisa para avaliar os espectros de raios X, onde os valores encontrados se mostraram muito próximos entre si. Essa análise, junto com os cálculos das camadas semirredutoras, possibilita fazer uma excelente estimativa das grandezas utilizadas para a caracterização de um espectro de raios X.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados das espessuras das camadas semirredutoras obtidos para as composições das argamassas baritadas estudadas para as diferentes energias para efeito de comparação, demonstrando valores muito próximos em quase todas as composições, isto é, possuem um comportamento das camadas semirredutoras em função das energias semelhantes.

Tabela 7: Dados de *KERMA*, camada semirredutora e energia média do espectro de saída da blindagem; e energia depositada por fóton, e a energia absorvida no volume sensível e transmissão de fótons dos materiais de blindagem compostos por argamassa baritada BM1, BM2, BM3 e BM4, com energia de tubo de 150 kVp, alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm.

Espessura (cm)	Transmissão de fótons obtido pelo KERMA				Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.15E-07	13.34	67.55	1.00E+00	3.68E-08	2.72%		1.00E+00	2.72%
0.2	3.11E-07	14.54	82.71	3.82E-01	1.36E-08	4.21%	3.20%	3.70E-01	6.93%
0.4	1.64E-07	15.91	94.24	2.01E-01	5.90E-09	6.18%	25.29%	1.60E-01	8.89%
0.6	1.05E-07	16.52	101.08	1.28E-01	4.53E-09	7.10%	4.18%	1.23E-01	9.82%
0.8	7.29E-08	16.75	105.33	8.95E-02	3.34E-09	8.88%	-1.50%	9.08E-02	11.59%
1.0	5.23E-08	16.97	108.40	6.42E-02	2.15E-09	10.91%	9.84%	5.85E-02	13.63%
1.2	3.89E-08	17.08	110.51	4.77E-02	1.71E-09	14.03%	2.31%	4.67E-02	16.74%
1.4	2.89E-08	17.21	112.31	3.55E-02	1.08E-09	14.52%	20.35%	2.95E-02	17.23%
1.6	2.19E-08	17.33	113.65	2.68E-02	6.83E-10	16.18%	44.54%	1.86E-02	18.90%
1.8	1.66E-08	17.41	115.12	2.04E-02	7.49E-10	17.71%	-0.10%	2.04E-02	20.42%
2.0	1.27E-08	17.54	116.18	1.56E-02	5.83E-10	18.60%	-1.68%	1.59E-02	21.32%
<b>BM3</b>									
Espessura (cm)	Transmissão de fótons obtido pelo KERMA				Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.15E-07	13.34	67.55	1.00E+00	3.62E-08	2.74%	0.00%	1.00E+00	2.74%
0.2	3.31E-07	14.84	80.68	4.06E-01	1.44E-08	4.23%	1.73%	3.99E-01	6.97%
0.4	1.70E-07	16.14	92.74	2.09E-01	6.09E-09	6.01%	24.25%	1.68E-01	8.75%
0.6	1.08E-07	16.66	99.94	1.32E-01	4.53E-09	7.33%	5.64%	1.25E-01	10.07%
0.8	7.47E-08	16.86	104.58	9.17E-02	3.38E-09	8.97%	-1.90%	9.34E-02	11.71%
1.0	5.35E-08	17.08	107.52	6.57E-02	2.27E-09	10.09%	4.70%	6.27E-02	12.83%
1.2	4.02E-08	17.18	109.89	4.93E-02	1.74E-09	13.07%	2.62%	4.80E-02	15.81%
1.4	3.00E-08	17.21	111.69	3.68E-02	1.05E-09	14.06%	26.73%	2.90E-02	16.80%
1.6	2.26E-08	17.36	113.22	2.78E-02	7.10E-10	15.03%	41.48%	1.96E-02	17.77%
1.8	1.73E-08	17.40	114.51	2.13E-02	7.52E-10	17.31%	2.27%	2.08E-02	20.05%
2.0	1.33E-08	17.44	115.73	1.63E-02	6.61E-10	18.61%	-10.58%	1.82E-02	21.35%
<b>BM4</b>									
Espessura (cm)	Transmissão de fótons obtido pelo KERMA				Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.15E-07	13.34	67.55	1.00E+00	3.68E-08	2.72%	0.00%	1.00E+00	2.72%
0.2	3.05E-07	14.47	82.99	3.75E-01	1.42E-08	4.14%	-3.23%	3.87E-01	6.86%
0.4	1.59E-07	15.88	94.75	1.95E-01	5.94E-09	6.40%	20.45%	1.62E-01	9.12%
0.6	1.01E-07	16.48	101.61	1.24E-01	4.54E-09	7.84%	0.61%	1.24E-01	10.56%
0.8	6.95E-08	16.77	105.81	8.53E-02	3.65E-09	8.87%	-14.22%	9.94E-02	11.59%
1.0	4.98E-08	16.96	108.84	6.11E-02	2.29E-09	10.54%	-1.71%	6.22E-02	13.25%
1.2	3.69E-08	17.10	111.09	4.52E-02	1.76E-09	11.78%	-5.56%	4.79E-02	14.50%
1.4	2.74E-08	17.13	112.67	3.36E-02	1.25E-09	13.82%	-0.94%	3.40E-02	16.53%
1.6	2.07E-08	17.25	114.11	2.54E-02	9.64E-10	15.83%	-3.20%	2.62E-02	18.54%
1.8	1.56E-08	17.35	115.26	1.91E-02	7.06E-10	17.28%	-0.45%	1.92E-02	19.99%
2.0	1.43E-08	17.44	115.73	1.75E-02	6.62E-10	18.31%	-2.38%	1.80E-02	21.03%

A CSR apresentada na Tabela 8 acima apresenta um comportamento crescente com o aumento da espessura da barreira de blindagem, conforme o esperado. As diferenças calculadas foram maiores que 3,0 mm Al, com exceção da BM1 que apresentou um valor superior a

2,8 mm Al. Todas as CSR para todos os materiais e energias estudadas apresentaram o mesmo comportamento.

Para avaliar a diferença percentual entre as composições de um mesmo material, foram estimadas as diferenças nas transmissões médias calculadas para cada composição de argamassa baritada e tensões de tubo de raios X estudados. Os dados da Tabela 8 apresentam as diferenças percentuais das transmissões médias de fótons pela espessura do material absorvedor, considerando o material de referência de comparação BM1.

Tabela 8: Diferença percentual da transmissão média de fótons para espectros polienergéticos, considerando energias de 80, 100, 120 150 kVp.

Energia: 80 kVp				Energia: 100 kVp			
Espessura (cm)	BM1-BM2	BM1-BM3	BM1-BM4	Espessura (cm)	BM1-BM2	BM1-BM3	BM1-BM4
0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,0	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	-30,32%	-34,31%	-43,04%	0,2	-28,23%	-21,96%	-25,91%
0,4	-55,54%	-60,71%	-63,23%	0,4	-46,28%	-36,37%	-56,04%
0,6	-72,37%	-74,88%	-50,99%	0,6	-59,99%	-55,00%	-52,59%
0,8	-66,73%	-62,48%	-81,11%	0,8	-63,10%	-62,98%	-50,34%
1,0	-92,45%	-93,12%	-93,41%	1,0	-52,41%	-66,81%	-65,25%
1,2	NA	NA	NA	1,2	-78,87%	-46,66%	-42,12%
1,4	NA	NA	NA	1,4	-86,29%	-38,20%	-66,93%
1,6	NA	NA	NA	1,6	NA	NA	NA
1,8	NA	NA	NA	1,8	NA	NA	NA
2,0	NA	NA	NA	2,0	NA	NA	NA
Energia: 120 kVp				Energia: 150 kVp			
Espessura (cm)	BM1-BM2	BM1-BM3	BM1-BM4	Espessura (cm)	BM1-BM2	BM1-BM3	BM1-BM4
0,0	0,00%	0,00%	0,00%	0,0	0,00%	0,00%	0,00%
0,2	-26,40%	-25,46%	-34,44%	0,2	-25,58%	-19,77%	-22,16%
0,4	-43,65%	-37,54%	-44,66%	0,4	-35,57%	-32,48%	-35,12%
0,6	-31,73%	-43,31%	-42,49%	0,6	-37,89%	-36,89%	-37,68%
0,8	-47,91%	-38,17%	-55,28%	0,8	-43,38%	-41,75%	-38,01%
1,0	-52,15%	-43,90%	-54,11%	1,0	-43,96%	-39,87%	-40,40%
1,2	-64,48%	-59,38%	-63,79%	1,2	-45,93%	-44,32%	-44,51%
1,4	-71,53%	-61,12%	-62,77%	1,4	-55,59%	-56,31%	-48,88%
1,6	-57,11%	-53,46%	-56,92%	1,6	-62,44%	-60,32%	-46,95%
1,8	-66,11%	-57,90%	-69,31%	1,8	-51,26%	-50,29%	-54,06%
2,0	NA	NA	NA	2,0	-27,44%	-16,74%	-17,97%

\*NA representa dados não simulados para a espessura definida.

Através da Tabela 8 pode-se verificar uma análise comparativa da transmissão de fótons entre o padrão BM1 e as outras composições BM2, BM3 e BM4, considerando os espectros polienergéticos estudados. As maiores variações das diferenças verificadas entre as transmissões médias de fótons calculadas ocorreram para o feixe menos energético de 80 kVp, com variações de aproximadamente 94 %, e a maior variação calculada para o feixe de fótons mais energético simulado (150 kVp) foi de cerca de 63 %.

Estas diferenças apresentadas na Tabela 8 demonstram que a composição do material influencia diretamente na atenuação da radiação X, onde os materiais das composições BM2, BM3 e BM4, fazem o feixe de fótons terem uma energia média maior, devido ao efeito de filtração e espalhamento da radiação para essas composições.

Esse comportamento pode ser explicado pela baixa participação do elemento químico bário (Ba) na composição de referência BM1, e de uma maior concentração nas demais composições. Esta diferença de concentração deste elemento químico de alto número atômico influencia nas variações de densidades entre as composições e, conseqüentemente, no poder de atenuação da radiação X do material absorvedor.

Estas diferenças dos dados das transmissões médias de fótons devido às diferentes composições demonstram a importância de estimativas mais seguras das espessuras das blindagens na construção civil, uma vez que a composição do material absorvedor influencia diretamente nas estimativas de curvas de transmissão de fótons X.

#### 4.2.2 Concreto

A simulação foi realizada com  $1,5 \cdot 10^9$  histórias, utilizando a geometria espacial descrita na Figura 13 da subseção 3.1, para o material de blindagem composto de concreto, com espessuras na ordem de 0,25 a 20,0 mm, ao passo de 0,25 mm. Também foram estimadas medidas de *KERMA* e energia absorvida sem blindagem, para se obter o valor do feixe incidente inicial de referência,  $I_0$ .

A Figura 21 ilustra a transmissão média de fótons calculada através da energia absorvida, coletada no volume sensível em função da espessura do material absorvedor com espectros polienergéticos de 80, 100, 120 e 150 kVp para o material da parede composto de concreto das referências NIST [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995] (conforme descrito a composição dos materiais na Tabela 1 da subseção 3.1).

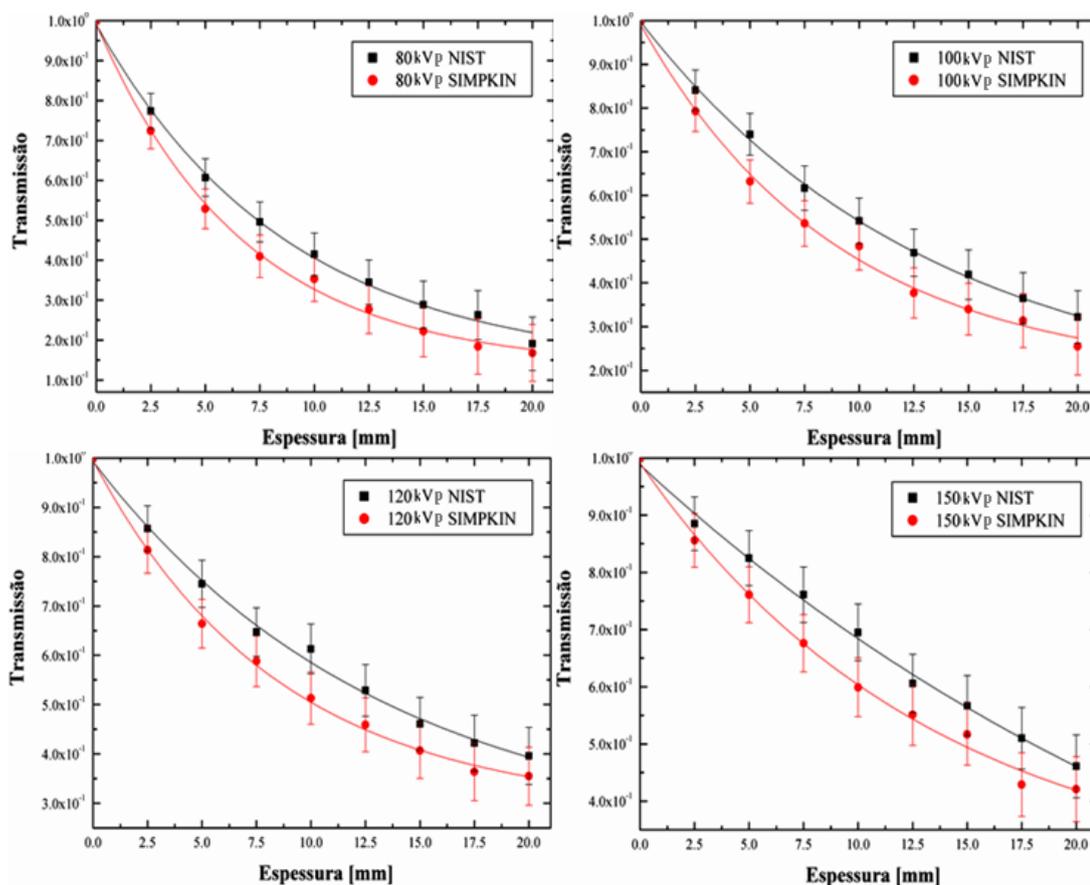


Figura 21: Transmissão de fótons em função da espessura do material com espectros polienergéticos de 80, 100, 120 e 150 kVp para o material de blindagem composto de concreto das referências NIST [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995].

A Figura 21 apresenta as curvas de transmissão do concreto em função da espessura da blindagem para as duas composições e energias estudadas, tendo um comportamento decrescente das curvas de transmissão com o aumento da espessura da parede e uma separação entre todos os pontos simulados para os dois materiais analisados em todas as espessuras, mas dentro das margens de erros simulados em quase todos os pontos simulados. Somente a energia de 100 kVp e o ponto de espessura da blindagem de 5 mm apresentaram uma separação entre as barras de erros simulados.

A Tabela 9 apresenta os dados simulados e calculados para as transmissões de fótons dos concretos simulados de NIST e Simpkin, considerando o espectro polienergético de 150 kVp (as dados das demais energias estão disponibilizados no ANEXO F). A tabela fornece informações sobre o *KERMA*, a camada semirredutora, a energia média do espectro de saída da

blindagem, a energia absorvida no volume sensível e a transmissão calculada. A transmissão foi calculada de duas maneiras distintas:

- primeiro, através dos dados coletados no volume sensível das contagens em cada região das energias do espectro polienérgico, ou seja, o fluxo de fótons que passa pelo material absorvedor. Através destes resultados foi estimado o *KERMA* no ar, com e sem blindagem.
- segundo, pela energia absorvida coletada no volume sensível com e sem barreira.

Os dados que geraram o gráfico da Figura 20, foram utilizados para a estimativa de equações de ajuste de interpolações de dados através do programa gráfico Origin®, conforme demonstrado no ANEXO G.

Tabela 9: Dados simulados da transmissão de fótons e *KERMA* para o material de blindagem composto de concreto da referência NIST (considerado material padrão no cálculo da diferença percentual) [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995], considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm.

Energia: 150kVp									
CONCRETO NIST									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.22E-06	13.40	67.61	1.00E+00	3.57E-08	2.29%	0.00%	1.00E+00	2.29%
2.5	1.08E-06	14.16	68.97	8.88E-01	3.09E-08	2.39%	2.64%	8.65E-01	4.68%
5.0	9.82E-07	14.57	70.09	8.05E-01	2.87E-08	2.50%	-0.03%	8.05E-01	4.78%
7.5	8.97E-07	14.82	71.01	7.35E-01	2.72E-08	2.58%	-3.41%	7.61E-01	4.86%
10.0	8.23E-07	14.99	71.85	6.74E-01	2.48E-08	2.68%	-3.08%	6.95E-01	4.96%
12.5	7.57E-07	15.11	73.32	6.20E-01	2.16E-08	2.80%	2.32%	6.06E-01	5.08%
15.0	6.97E-07	15.20	73.97	5.71E-01	2.03E-08	2.97%	0.66%	5.67E-01	5.26%
17.5	6.43E-07	15.27	73.97	5.27E-01	1.82E-08	3.08%	3.40%	5.10E-01	5.37%
20.0	5.96E-07	15.31	74.56	4.88E-01	1.65E-08	3.21%	5.96%	4.61E-01	5.50%
CONCRETO SIMPKIN									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.22E-06	13.40	67.61	1.00E+00	3.57E-08	2.29%	0.00%	1.00E+00	2.29%
2.5	1.04E-06	14.34	69.59	8.55E-01	3.05E-08	2.41%	-0.05%	8.56E-01	4.70%
5.0	9.22E-07	14.79	71.18	7.56E-01	2.72E-08	2.60%	-0.69%	7.61E-01	4.88%
7.5	8.24E-07	15.05	72.48	6.75E-01	2.41E-08	2.71%	-0.05%	6.76E-01	5.00%
10.0	7.45E-07	15.19	73.57	6.10E-01	2.14E-08	2.84%	1.78%	5.99E-01	5.13%
12.5	6.75E-07	15.31	74.63	5.53E-01	1.97E-08	3.04%	0.53%	5.51E-01	5.32%
15.0	6.15E-07	15.43	75.58	5.04E-01	1.85E-08	3.13%	-2.61%	5.17E-01	5.41%
17.5	5.61E-07	15.48	76.43	4.59E-01	1.53E-08	3.27%	6.99%	4.29E-01	5.56%
20.0	5.12E-07	15.58	77.25	4.20E-01	1.50E-08	3.41%	-0.28%	4.21E-01	5.69%

Nesta tabela estão apresentados os resultados das energias médias e espessuras das camadas semirredutoras obtidos para as duas composições de concreto estudadas, bem como para as diferentes energias, para efeito de comparação, demonstrando valores muito próximos em quase todas as composições, isto é, possuem um comportamento das camadas semirredutoras em função da energia semelhantes, e o cálculo das energias médias dos espectros obtidos possibilitou fazer uma estimativa das grandezas utilizadas para a caracterização de um espectro de raios X.

Para avaliar a diferença percentual entre as composições de um mesmo material foram estimadas as diferenças nas transmissões médias calculadas para cada composição do concreto e tensões de tubo de raios X estudados. Os dados da Tabela 10 apresentam as diferenças percentuais das transmissões médias de fótons pela espessura do material absorvedor, considerando o material de referência de comparação Concreto NIST.

Tabela 10: Diferença percentual da Transmissão de fótons para espectros polienergéticos de energias de 80, 100, 120 150 kVp, para o material de blindagem composto de concreto da referência NIST (considerado material padrão no calculo da diferença percentual) [NIST, 2008] e Simpkin [SIMPKIN, 1995].

<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tensão Aceleradora</b>			
	<b>80 kVp</b>	<b>100 kVp</b>	<b>120 kVp</b>	<b>150 kVp</b>
<b>0,0</b>	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>2,5</b>	-6,43%	-5,77%	-5,04%	-1,06%
<b>5,0</b>	-12,83%	-14,59%	-10,93%	-5,49%
<b>7,5</b>	-17,32%	-13,09%	-9,08%	-11,20%
<b>10,0</b>	-15,08%	-10,80%	-16,21%	-13,80%
<b>12,5</b>	-19,58%	-19,72%	-13,40%	-9,21%
<b>15,0</b>	-23,30%	-18,92%	-11,71%	-8,84%
<b>17,5</b>	-30,08%	-14,17%	-13,82%	-15,77%
<b>20,0</b>	-17,45%	-20,75%	-10,48%	-8,64%

Através da Tabela 10 pode-se verificar uma análise comparativa da transmissão de fótons entre o padrão concreto NIST e o concreto Simpkin, considerando os espectros polienergéticos estudados. As diferenças apresentadas nesta tabela demonstram que a composição do material influencia na atenuação da radiação X, onde as maiores variações das diferenças verificadas entre as transmissões médias de fótons calculadas ocorreram para o feixe menos energético de 80 kVp, com variações de aproximadamente 31 %, e a maior variação calculada para o feixe de fótons mais energético simulado (150 kVp) foi de cerca de 16 %.

O concreto da referência Simpkin faz os feixes de fótons terem uma maior energia média, devido ao efeito de filtração e espalhamento da radiação para essa composição, por ter em sua composição uma maior densidade atômica que o concreto da referência NIST. Estas diferenças de densidades entre os materiais influenciam no poder de atenuação da radiação X do material absorvedor.

#### 4.2.3 Influência da Alteração das Características do Espectro da Radiação X na Transmissão de Fótons

A seguir são apresentados os resultados obtidos das simulações computacionais para a avaliação da alteração da transmissão, em função de variações no espectro de emissão de radiação X, de acordo com os parâmetros exibidos na Tabela 3.

As simulações foram realizadas com  $2,0 \cdot 10^9$  histórias, utilizando a geometria espacial descrita na Figura 13 da subseção 3.1, para o material de blindagem composto de ferro, com espessuras na ordem de 0,25 a 0,75 mm, ao passo de 0,25 mm. Também foram estimadas medidas de *KERMA* e energia absorvida sem blindagem, para se obter o valor do feixe incidente inicial de referência,  $I_0$ .

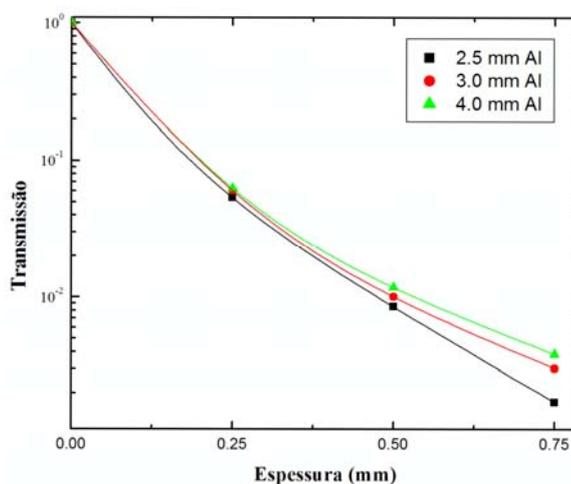
O espectro foi modificado em três fatores: filtração total, *ripple* e ângulo de voo. As combinações de *ripple*, ângulo de inclinação do ânodo e filtração total, foram escolhidas para obter uma variação desses parâmetros que sejam comuns na área da radiologia diagnóstica representada pelos espectros com tensão do tubo de 90 kVp (os espectros utilizados podem ser visualizados no ANEXO B).

Os espectros foram gerados considerando três diferentes possibilidades (conforme ilustra a Tabela 3): com filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm, *ripple* constante de 5 % e 6° de ângulo efetivo do tubo; com *ripple* característico do equipamento variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; e com ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5% e filtração total de 3,0 mm de alumínio.

A Figura 22 apresenta as curvas de transmissão do ferro em função da espessura da blindagem, com filtração total de alumínio variável de 2,5, 3,0 e 4,0 mm, 6° de ângulo de

inclinação do anodo e *ripple* de 5 %. O comportamento apresentado evidencia a influencia da filtração total nas curvas de transmissão, onde o aumento da filtração total de alumínio no espectro influencia na redução de fótons de baixa energia, aumentando assim a penetrabilidade do feixe e a energia média do feixe.

Figura 22: Transmissão de fótons em função da espessura do material com espectro polienergético de 90 kVp para o material de blindagem composto de ferro, com ângulo de voo de  $6^\circ$ , *ripple* de 5 % e filtração total de alumínio variável.



A Tabela 11 apresenta os dados simulados e calculados para as transmissões de fótons em função da espessura do material absorvedor, considerando espectro polienergético de 90 kVp e os resultados das simulações. Fornecendo informações sobre o *KERMA*, a camada semirredutora, a energia média do espectro de saída da blindagem, a energia absorvida no volume sensível, o erro da simulação e a transmissão calculada.

Com o aumento da filtração total na composição do espectro de radiação X, o feixe aumenta seu poder de penetração no material absorvedor e sua energia média, devido à redução de fótons de baixa energia do espectro.

Tabela 11: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com *ripple* e ângulo efetivo fixo, e filtração total variável para a tensão de pico de 90 kVp.

Espessura (mm)	Filtração Total (mm Al)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	TRANSMISSÃO	ERRO
0,00	2,5	1,96E-06	8,42	49,12	4,14E-08	1,81%	1,00E+00	1,81%
0,25		9,66E-08	12,84	67,01	2,22E-09	7,91%	5,36E-02	9,72%
0,50		1,96E-08	13,68	71,73	3,53E-10	10,05%	8,52E-03	11,86%
0,75		5,04E-09	14,21	74,60	7,18E-11	15,43%	1,73E-03	17,23%
0,00	3,0	1,89E-06	8,98	49,83	3,97E-08	1,85%	1,00E+00	1,85%
0,25		1,01E-07	12,87	67,06	2,41E-09	7,49%	6,06E-02	9,34%
0,50		2,04E-08	13,73	71,78	4,61E-10	10,59%	1,01E-02	12,44%
0,75		5,42E-09	14,32	74,62	1,33E-10	16,34%	3,05E-03	18,19%
0,00	4,0	1,78E-06	9,94	51,04	3,77E-08	1,91%	1,00E+00	1,91%
0,25		1,08E-07	12,99	67,28	2,36E-09	6,94%	6,28E-02	8,85%
0,50		2,24E-08	13,84	71,92	4,43E-10	10,45%	1,18E-02	12,36%
0,75		6,86E-09	14,51	74,72	1,45E-10	16,87%	3,85E-03	18,78%

A Figura 23 (A e B) apresenta as curvas de transmissão do ferro em função da espessura da blindagem, com *ripple* variável de 5, 15 e 25 %, filtração total de alumínio de 3,0 mm e 6° de ângulo de inclinação do anodo, e ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio. O comportamento apresentado evidencia a influencia do *ripple* e do ângulo de inclinação do anodo nas curvas de transmissão, onde o aumento do ângulo de voo e do *ripple* no espectro influencia nos fótons de alta energia, tendo uma participação mais significativa na formação da imagem radiográfica.

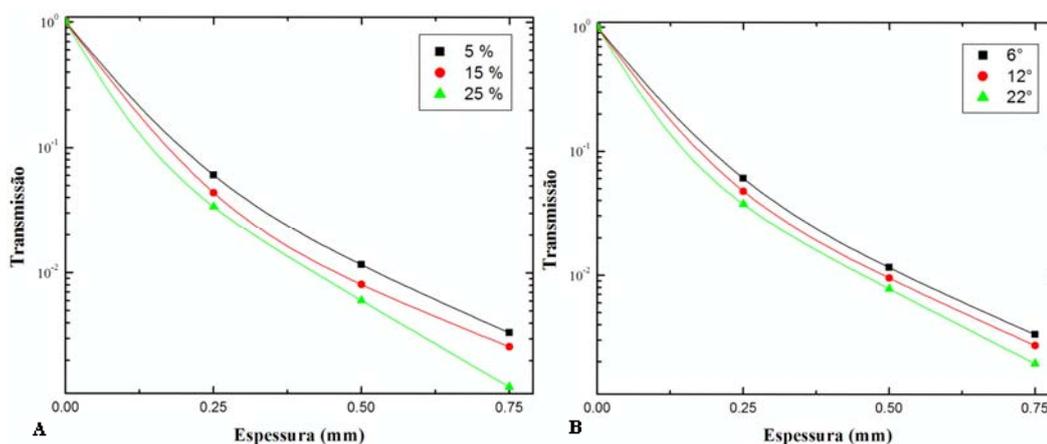


Figura 23: Gráficos ilustrativos das curvas de transmissão de fótons em função da espessura do material absorvedor, com espectro polienergético de 90 kVp; para (A) *ripple* variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; (B) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio.

A Tabela 12 (A e B) apresenta os dados simulados e calculados para as transmissões de fótons em função da espessura do material absorvedor, considerando espectro polienergético de 90 kVp e os resultados das simulações, fornecendo informações sobre o *KERMA*, a camada semirredutora, a energia média do espectro de saída da blindagem, a energia absorvida no volume sensível, o erro da simulação e a transmissão calculada.

Com o aumento do *ripple* na composição do espectro de radiação X, aumenta a participação de fótons menos energéticos no espectro, a energia média do feixe e a camada semirredutora diminuem com o aumento do *ripple* na composição do espectro.

Tabela 12: Dados de energia média e camada semirredutora dos espectros utilizados para o estudo da influencia do espectro na determinação das curvas de transmissão, considerando espectro de emissão de raios X do ponto focal com alvo de W, com *ripple* e ângulo efetivo fixo, e filtração total variável para a tensão de pico de 90 kVp; para (A) *ripple* variável de 5, 15 e 25 %, com filtração total de 3,0 mm e ângulo efetivo 6°; (B) ângulo de voo variável de 6°, 12° e 22°, *ripple* de 5 % e filtração total de 3,0 mm de alumínio.

TABELA - A								
Espessura (mm)	<i>Ripple</i>	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	TRANSMISSÃO	ERRO
0,00	5	1,89E-06	8,98	49,83	3,97E-08	1,85%	1,00E+00	1,85%
0,25		1,01E-07	12,87	67,06	2,41E-09	7,49%	6,06E-02	9,34%
0,50		2,04E-08	13,73	71,78	4,61E-10	10,59%	1,01E-02	12,44%
0,75		5,42E-09	14,32	74,62	1,33E-10	16,34%	3,05E-03	18,19%
0,00	15	1,95E-06	8,63	48,33	4,23E-08	1,80%	1,00E+00	1,80%
0,25		8,53E-08	12,67	65,66	1,86E-09	8,45%	4,39E-02	10,26%
0,50		1,57E-08	13,65	70,36	3,43E-10	11,94%	8,10E-03	13,75%
0,75		3,83E-09	14,05	73,35	1,10E-10	17,87%	2,59E-03	19,67%
0,00	25	2,02E-06	8,25	47,01	4,50E-08	1,77%	1,00E+00	1,77%
0,25		7,38E-08	12,43	65,01	1,53E-09	8,75%	3,39E-02	10,53%
0,50		1,31E-08	13,65	70,08	2,71E-10	12,35%	6,03E-03	14,12%
0,75		3,05E-09	14,06	73,09	5,58E-11	18,67%	1,24E-03	20,44%

TABELA - B								
Espessura (mm)	Ângulo de Voo	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	TRANSMISSÃO	ERRO
0,00	6°	1,89E-06	8,98	49,83	3,97E-08	1,85%	1,00E+00	1,85%
0,25		1,01E-07	12,87	67,06	2,41E-09	7,49%	6,06E-02	9,34%
0,50		2,04E-08	13,73	71,78	4,61E-10	10,59%	1,01E-02	12,44%
0,75		5,42E-09	14,32	74,62	1,33E-10	16,34%	3,05E-03	18,19%
0,00	12°	2,07E-06	7,95	47,62	4,36E-08	1,76%	1,00E+00	1,76%
0,25		8,67E-08	12,86	66,90	2,08E-09	8,15%	4,78E-02	9,91%
0,50		1,73E-08	13,95	71,70	3,41E-10	11,41%	9,55E-03	13,17%
0,75		4,50E-09	14,20	74,48	8,48E-11	17,12%	2,73E-03	18,89%
0,00	22°	2,22E-06	7,21	46,14	4,56E-08	1,70%	1,00E+00	1,70%
0,25		7,87E-08	12,76	66,94	1,71E-09	9,14%	3,75E-02	10,84%
0,50		1,58E-08	13,52	71,69	4,35E-10	12,48%	7,82E-03	14,18%
0,75		4,09E-09	13,45	74,46	1,24E-10	19,54%	1,95E-03	21,24%

A CSR apresentada acima na Tabela 12 apresenta um comportamento crescente, com o aumento da espessura da barreira de blindagem, conforme o esperado. Onde o aumento do ângulo de voo e do *ripple* no espectro diminui a espessura da camada semirredutora, apresentando diferenças significativas para a determinação dos dados de transmissão. Todas as CSR, para todos os materiais e energias estudadas, apresentaram o mesmo comportamento.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A proposta deste trabalho foi de simular, através de um programa computacional que utiliza a técnica de Monte Carlo, o *KERMA*, e a energia absorvida para diferentes materiais de blindagem, assim como as considerações de espectros de radiação aplicadas à Radiologia Diagnóstica para geometria de feixe primário, sendo realizada com êxito, possibilitando a análise da influencia das composições dos materiais nas curvas de transmissão de fótons.

Entre os resultados encontrados tornou-se claro que, nas diferenças entre os dados das transmissões das composições das blindagens compostas de argamassa baritada, a baixa participação do elemento químico bário (Ba) na composição de referência BM1, e de uma maior concentração nas demais composições, influenciaram significativamente nos dados das transmissões de fótons. Esta diferença de concentração deste elemento químico de alto número atômico influenciou no poder de atenuação da radiação X do material absorvedor devido às variações de densidades entre as composições. Entretanto, em análise geral para o *KERMA* coletado pelo volume sensível, essa diferença tornou-se insignificante estatisticamente.

O concreto da referência Simpkin tem uma energia média maior que o concreto da referência NIST, por ter em sua composição uma maior densidade atômica, alterando as curvas de transmissão de fótons em todas as espessuras da blindagem. Estas diferenças entre os dados das transmissões são devidas ao efeito de filtração e espalhamento da radiação da composição da referência Simpkin, influenciando assim no poder de atenuação da radiação X do material absorvedor. O material apresentou diferenças não significativas quanto à determinação dos dados de transmissão para as diferentes composições estudadas.

Este trabalho também apresentou um banco de dados contendo as fluências de radiação X, depois das blindagens para as diferentes configurações de feixe e materiais da parede,

para verificar a influencia da radiação primária nestas estimativas, e um banco de dados contendo as curvas e suas equações de ajuste das curvas de transmissão para os diferentes materiais estudados.

Os resultados obtidos nas simulações computacionais para a avaliação da alteração da transmissão em função de variações no espectro de emissão de radiação X demonstraram grande importância para a influencia destes fatores na formação do espectro. As alterações nas composições do espectro devido às variações da filtração total de alumínio aumentaram o poder de penetração no material absorvedor e em sua energia média, devido à redução de fótons de baixa energia do espectro. As mudanças na composição do espectro devido a alterações do ângulo de inclinação do anodo e do *ripple*, evidenciaram seu grau de influencia nas estimativas das curvas de transmissão de fótons X, onde o aumento do ângulo de voo e do *ripple* no espectro aumenta a participação de fótons de baixa energia, e diminui a energia média do feixe e da camada semirredutora, tendo uma participação mais significativa na formação da imagem radiográfica.

Trabalhos futuros poderão ser realizados com simulações de maior número de pontos de espessuras, com melhoraria no tratamento estatístico dos dados, minimizando assim os erros relativos. Além disso, sugere-se que esse método seja aplicado a diferentes materiais (tijolo maciço, pedra gres, divisórias, etc...) e composições de materiais utilizados na construção de blindagens, com o intuito de gerar um banco de dados que auxilie na proteção radiológica na área da radiologia geral.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAD, MARIA C. B. T., **Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para a Realização de Cálculo de Blindagem na Área de Radiologia Diagnóstica**, Bacharelado em Física Médica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

APOSTOLAKIS, J., et al. **GEANT4 Low Energy Electromagnetic Models for Electrons and Photons**. CERN-OPEN-99-034, 19 ago 1999.

ATTIX, FRANK H., **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. Editora J. Wiley, 1986.

BARNES, GARY T., **Mammography Imaging Physics: X-Ray Equipment Considerations**, RSNA – Categorical Course in Breast Imaging, p.41 – 57, 1999.

BUFFON, G. L.. **Essai d'arithmétique morale."Histoire naturelle, générale et particulière**, Supplément 4, 1777.

CASSOLA, VAGNER F., **Simulação Computacional de Dosimetria do Exame de Seios da Face – Posição Lateral, Utilizando Modelo Voxel de Cabeça e o Programa Monte-Carlo GEANT4**, Bacharelado em Física Médica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CASSOLA(2), VAGNER F., **Acoplamento dos Fantomas Tomográficos FAX06 e MAX06 ao Código Monte Carlo GEANT4**, Dissertação de Mestrado em Ciências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

CERN, **GEANT4 Physics Reference Manual**, Switzerland, 2006a. Versão: GEANT4 8.0. Disponível em: <<http://cern.ch/GEANT4>>. Acesso em: 20 nov. 2009.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), **Diretrizes Básicas de Radioproteção** – CNEN – NE 3.01, 1998.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos** – CNEN/IRD, 2003.

CRANLEY, KIERAN et al, **Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data**. Report No 78. The Institute of Physics and Engineering in Medicine, 1997.

CULLEN, D. E.; HUBBELL, J. H.; KISSEL, L. EPDL97: **the Evaluated Photon Data Library**. Livermore, CA, UCRL-50400-V.6-REV.5, 1997.

DE PAULA, F.T., NERISSIAN, D. Y., COSTA, P. R., **Estudo das Propriedades de Atenuação da Argamassa Baritada utilizadas em Proteção Radiológica**, XI Congresso Brasileiro de Física Médica, Ribeirão Preto, São Paulo, 2006.

DOOLEN, G. D.; HENDRICKS, J., **Monte Carlo at work**. Los Alamos Science Special Issue, p. 142-143, 1987.

EISBERG, ROBERT; RESNICK, ROBERT, **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**, Editora Campus, 8ª edição, Rio de Janeiro, 1988.

FIRMINO, SANDRO F.; HOFF, GABRIELA. (FIRMINO) **GEANT4 Validation Estimating Transmission Curves Applied to Diagnostic Diagnostic**, INAC, Santos, São Paulo, Brasil, 2007.

FIRMINO, SANDRO F.; HOFF, GABRIELA. (FIRMINO 2) **Validation on GEANT4 use Applied to Estimation Transmission Curves to Diagnostic Energies to Concrete and Lead**, IEEE, Havai, EUA, 2007.

FIRMINO, SANDRO F.; HOFF, GABRIELA. (FIRMINO 3) **Transmission Curves to Primary Beams to Diagnostic Radiology: a Comparison Among Barite Concrete, Barite Mortar and Concrete**, IEEE, Hawai, EUA, 2007.

GEANT4. **Physics Reference Manual**, <http://GEANT4.web.cern.ch/GEANT4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.html> / *Versão: GEANT4 8.0 Dezembro de 2005*.

HOFF, GABRIELA, **Cálculo da Dose em Glândula Mamária, Utilizando o Código de Transporte de Monte Carlo MCNP, para as Energias Utilizadas em Mamografia**, Rio de Janeiro, Universidade do Estado do rio de Janeiro, Doutorado em Biociências Nucleares - Física Médica, 2005.

HUBBEL, J. H. et al. **Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Function, and Photon Scattering Cross Sections**. J. Phys. Chem. Ref. Data, v. 4, n. 3, p. 471-538, 1975.

ICRU 44. International Commission on Radiation Units and Measurements, **Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement**, Report n°44, Bethesda, MD, 1989.

ICRU 60. International Commission on Radiological Units and Measurements, **Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement**. Report n° 60, 1980.

JANSEN, JAN T. M., **Monte Carlo calculations in diagnostic radiology: dose conversion factors and risk benefit analyses**. Meppel: Rijkuniversiteit te Leiden, 1998.

JOHNS, HAROLD E., CUNNINGHAM, JOHN R.; **The physics of radiology**. Springfield: Charles C Thomas Publisher, 1983.

KELLEY, JOHN P. B.S., and E. DALE, TROUT, D. Sc.; **Broad-Beam Attenuation in Lead for X Rays from 50 to 300 kVp**, Radiology n°104 : p.171 -175, Julho de 1972.

LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES (LNMRI), IRD/CNEN, 2002.

MANNO, I, **Introduction to the Monte-Carlo Method**, Budapest: Akademiai Kiado, 1999.

MARTINS, R. A., **A Descoberta dos Raios X: O Primeiro Comunicado de Roentgen**, Revista Brasileira e Ensino de Física, vol.20, nº4, Dezembro de 1998.

MAZZILLI, BÁRBARA P., **Noções Básicas de Proteção Radiológica**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002.

METROPOLIS, N; ULAM, S., **The Monte Carlo method. J. Amer. Statistical Assoc.**, v. 44, p. 335-341, 1949.

MINISTÉRIO DA SAÚDE – Secretaria de Vigilância Sanitária – Portaria Federal nº. 453, **Diretrizes de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico Médica e Odontológico**, p. 38, 1998.

NAKAHARA, EIKA, **Determinação dos Coeficientes de atenuação de Diferentes tipos de Tijolos Cerâmicos**. Porto Alegre: PUCRS, Bacharelado em Física Médica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2003.

NCRP 60. National Council on Radiation Protection and Measurements, **Recomendaciones**, Report nº 60, 1990.

NCRP 147. National Council on Radiation Protection and Measurements, **Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities**, Report nº 147, 2005.

NIST. **National Institute of Standards and Technology – Physical Reference Data**. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html>, 2010.

OKUNO, EMIKO, **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo, 1982.

OLIVEIRA, SANDRO S., **Intercomparação de Testes de Constância entre Equipamentos de Raios X Fixos de Três instituições de Porto Alegre**. Porto Alegre: PUCRS, Bacharelado em Física Médica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 1997.

PERKINS, S. T. et al., **Tables and Graphs of Atomic Subshell and Relaxation Data Derived from the LLNL Evaluated Atomic Data Library (EADL), Z=1-100**. Livermore, CA, UCRL-50400-V.30, 1997.

POON, E.; VERHAEGEN, F., **Accuracy of the photon and electron physics in GEANT4 for radiotherapy applications**. Medical Physics, v. 32, p. 1696-1711, 2005.

POON, E.; SEUNTJENS, J.; VERHAEGEN, F., **Consistency test of the electron transport algorithm in the GEANT4 Monte Carlo code**. Physics in Medicine and Biology. v. 50, p. 681-694, 2005.

SIMPKIN, DOUGLAS J., **Transmission Data For Shielding Diagnostic X-Ray Facilities**, Health Physics nº5 vol. 68, May 1995.

SOBOL, I., **O método de Monte Carlo**. Moscou: Ed. Mir, 1983.

SOUZA, SANDRO F., Introdução ao uso do GEANT4. In: **CD Workshop Monte Carlo**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN, dez 2004.

URBÁN, L., **Multiple scattering model in GEANT4**. In: CERN Open 70. Switzerland: [s.n.], 2002.

ANEXO A: Tabela de dados dos espectros normalizados por tensão de pico do tubo de raios X de tungstênio [W] com variação de 15 keV até 150 keV, ao passo de 0,5 keV, para tensões máximas aceleradoras de 80, 90, 100, 120, 150 kVp.

ESPECTRO NORMALIZADO POR TENSÃO DE PICO DO TUBO

Energia (keV)	Ângulo: 6°, Ripple: 5%, Filtro: 3,0mm Al				Ângulo: 6°, Ripple: 5%			Ângulo: 6°, Ripple: 15%	Ângulo: 6°, Ripple: 25%	Ângulo: 12°, Ripple: 5%	Ângulo: 22°, Ripple: 5%
	80 kVp	100 kVp	120 kVp	150 kVp	Filtro: 2,5mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 4,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al
	90 kVp										
15,00	7,17075E-03	4,54291E-03	3,20563E-03	2,16406E-03	4,58676E-05	1,69023E-05	2,26905E-06	1,95873E-05	2,28586E-05	2,92156E-05	2,09546E+07
15,50	7,40058E-03	4,70416E-03	3,32663E-03	2,25060E-03	7,76254E-05	3,15701E-05	5,16222E-06	3,65522E-05	4,26089E-05	5,46069E-05	3,89467E+07
16,00	7,63532E-03	4,86939E-03	3,45091E-03	2,33967E-03	1,24421E-04	5,52465E-05	1,07681E-05	6,39076E-05	7,44135E-05	9,56222E-05	6,76760E+07
16,50	7,87316E-03	5,03745E-03	3,57765E-03	2,43073E-03	1,87564E-04	8,98291E-05	2,03689E-05	1,03819E-04	1,20749E-04	1,55544E-04	1,09015E+08
17,00	8,11388E-03	5,20843E-03	3,70667E-03	2,52345E-03	2,73200E-04	1,40175E-04	3,64811E-05	1,61860E-04	1,88039E-04	2,42719E-04	1,68136E+08
17,50	8,35610E-03	5,38158E-03	3,83771E-03	2,61798E-03	3,79304E-04	2,06535E-04	6,05373E-05	2,38268E-04	2,76480E-04	3,57404E-04	2,44277E+08
18,00	8,59955E-03	5,55672E-03	3,97064E-03	2,71400E-03	5,12240E-04	2,94408E-04	9,61428E-05	3,39325E-04	3,93263E-04	5,08751E-04	3,42564E+08
18,50	8,84431E-03	5,73443E-03	4,10589E-03	2,81186E-03	6,72907E-04	4,06025E-04	1,46139E-04	4,67522E-04	5,41147E-04	6,99994E-04	4,63767E+08
19,00	9,08860E-03	5,91350E-03	4,24258E-03	2,91102E-03	8,59765E-04	5,41693E-04	2,12577E-04	6,23111E-04	7,20268E-04	9,30721E-04	6,06121E+08
19,50	9,33167E-03	6,09392E-03	4,38098E-03	3,01168E-03	1,07566E-03	7,04798E-04	2,99129E-04	8,09873E-04	9,34817E-04	1,20548E-03	7,71107E+08
20,00	9,57299E-03	6,27549E-03	4,52080E-03	3,11363E-03	1,31776E-03	8,94294E-04	4,07178E-04	1,02647E-03	1,18303E-03	1,52084E-03	9,55065E+08
20,50	9,81107E-03	6,45801E-03	4,66216E-03	3,21678E-03	1,58066E-03	1,10657E-03	5,36130E-04	1,26859E-03	1,45973E-03	1,86880E-03	1,15177E+09
21,00	1,00454E-02	6,64114E-03	4,80466E-03	3,32133E-03	1,88165E-03	1,35702E-03	6,97743E-04	1,55371E-03	1,78475E-03	2,27317E-03	1,37480E+09
21,50	1,02743E-02	6,82427E-03	4,94837E-03	3,42694E-03	2,19306E-03	1,62272E-03	8,78314E-04	1,85539E-03	2,12742E-03	2,69308E-03	1,59838E+09
22,00	1,04971E-02	7,00711E-03	5,09306E-03	3,53384E-03	2,53639E-03	1,92297E-03	1,09270E-03	2,19546E-03	2,51255E-03	3,15837E-03	1,83978E+09
22,50	1,07123E-02	7,18920E-03	5,23876E-03	3,64175E-03	2,89130E-03	2,23994E-03	1,32905E-03	2,55337E-03	2,91629E-03	3,63727E-03	2,08026E+09
23,00	1,09193E-02	7,37009E-03	5,38500E-03	3,75073E-03	3,27032E-03	2,58544E-03	1,59750E-03	2,94236E-03	3,35356E-03	4,14695E-03	2,32941E+09
23,50	1,11165E-02	7,54912E-03	5,53191E-03	3,86086E-03	3,64554E-03	2,93314E-03	1,87713E-03	3,32272E-03	3,78975E-03	4,64338E-03	2,56280E+09
24,00	1,13032E-02	7,72554E-03	5,67904E-03	3,97190E-03	4,05933E-03	3,32394E-03	2,20327E-03	3,76939E-03	4,27735E-03	5,18994E-03	2,81590E+09
24,50	1,14787E-02	7,89901E-03	5,82622E-03	4,08394E-03	4,45440E-03	3,70205E-03	2,52793E-03	4,19024E-03	4,74410E-03	5,69780E-03	3,04061E+09
25,00	1,16420E-02	8,06847E-03	5,97304E-03	4,19686E-03	4,84940E-03	4,08516E-03	2,86594E-03	4,61485E-03	5,21273E-03	6,19480E-03	3,25326E+09
25,50	1,17927E-02	8,23370E-03	6,11943E-03	4,31060E-03	5,27332E-03	4,50269E-03	3,24537E-03	5,07632E-03	5,72054E-03	6,72488E-03	3,47741E+09
26,00	1,19302E-02	8,39373E-03	6,26465E-03	4,42508E-03	5,68894E-03	4,91699E-03	3,63122E-03	5,53205E-03	6,21938E-03	7,23090E-03	3,68376E+09
26,50	1,20542E-02	8,54817E-03	6,40850E-03	4,54017E-03	6,08870E-03	5,31970E-03	4,01447E-03	5,97267E-03	6,69884E-03	7,70166E-03	3,86774E+09
27,00	1,21644E-02	8,69618E-03	6,55058E-03	4,65583E-03	6,50891E-03	5,74863E-03	4,43295E-03	6,44065E-03	7,20661E-03	8,19267E-03	4,05804E+09
27,50	1,22606E-02	8,83749E-03	6,69030E-03	4,77182E-03	6,90312E-03	6,15472E-03	4,83673E-03	6,88102E-03	7,68118E-03	8,63430E-03	4,22060E+09
28,00	1,23430E-02	8,97145E-03	6,82740E-03	4,88813E-03	7,31268E-03	6,58183E-03	5,27114E-03	7,34287E-03	8,17752E-03	9,08959E-03	4,38719E+09
28,50	1,24116E-02	9,09778E-03	6,96152E-03	5,00439E-03	7,68560E-03	6,97378E-03	5,67632E-03	7,76361E-03	8,62598E-03	9,48182E-03	4,52123E+09
29,00	1,24665E-02	9,21587E-03	7,09193E-03	5,12042E-03	8,06842E-03	7,38073E-03	6,10575E-03	8,19924E-03	9,08907E-03	9,88134E-03	4,65718E+09
29,50	1,25080E-02	9,32560E-03	7,21829E-03	5,23607E-03	8,40403E-03	7,73985E-03	6,48991E-03	8,58008E-03	9,48968E-03	1,02054E-02	4,75662E+09
30,00	1,25365E-02	9,42662E-03	7,34044E-03	5,35100E-03	8,74420E-03	8,10771E-03	6,89084E-03	8,96913E-03	9,89779E-03	1,05312E-02	4,85642E+09
30,50	1,25525E-02	9,51895E-03	7,45763E-03	5,46504E-03	9,08868E-03	8,48423E-03	7,30893E-03	9,36629E-03	1,03133E-02	1,08591E-02	4,95672E+09
31,00	1,25561E-02	9,60231E-03	7,56989E-03	5,57800E-03	9,37373E-03	8,79774E-03	7,66137E-03	9,69260E-03	1,06495E-02	1,10988E-02	5,01689E+09
31,50	1,25480E-02	9,67672E-03	7,67674E-03	5,68932E-03	9,68433E-03	9,14346E-03	8,05765E-03	1,00533E-02	1,10222E-02	1,13731E-02	5,09306E+09
32,00	1,25290E-02	9,74222E-03	7,77795E-03	5,79901E-03	9,95557E-03	9,44792E-03	8,41189E-03	1,03675E-02	1,13429E-02	1,15906E-02	5,14421E+09
32,50	1,24992E-02	9,79890E-03	7,87320E-03	5,90654E-03	1,02181E-02	9,74567E-03	8,76417E-03	1,06734E-02	1,16535E-02	1,17959E-02	5,19072E+09
33,00	1,24591E-02	9,84670E-03	7,96246E-03	6,01178E-03	1,04573E-02	1,00197E-02	9,09377E-03	1,09525E-02	1,19340E-02	1,19694E-02	5,22406E+09
33,50	1,24095E-02	9,88598E-03	8,04536E-03	6,11444E-03	1,06787E-02	1,02762E-02	9,40758E-03	1,12118E-02	1,21921E-02	1,21200E-02	5,24845E+09
34,00	1,23511E-02	9,91675E-03	8,12205E-03	6,21435E-03	1,08816E-02	1,05139E-02	9,70353E-03	1,14499E-02	1,24265E-02	1,22472E-02	5,26388E+09
34,50	1,22840E-02	9,93934E-03	8,19228E-03	6,31102E-03	1,10722E-02	1,07401E-02	9,99024E-03	1,16750E-02	1,26462E-02	1,23605E-02	5,27455E+09
35,00	1,22092E-02	9,95401E-03	8,25600E-03	6,40450E-03	1,12351E-02	1,09365E-02	1,02447E-02	1,18673E-02	1,28298E-02	1,24399E-02	5,27202E+09
35,50	1,21269E-02	9,96104E-03	8,31344E-03	6,49437E-03	1,13927E-02	1,11289E-02	1,04984E-02	1,20549E-02	1,30079E-02	1,25157E-02	5,26924E+09
36,00	1,20377E-02	9,96065E-03	8,36437E-03	6,58048E-03	1,15290E-02	1,12987E-02	1,07279E-02	1,22176E-02	1,31588E-02	1,25672E-02	5,25763E+09
36,50	1,19421E-02	9,95303E-03	8,40896E-03	6,66275E-03	1,16439E-02	1,14452E-02	1,09318E-02	1,23551E-02	1,32821E-02	1,25950E-02	5,23740E+09
37,00	1,18404E-02	9,93875E-03	8,44728E-03	6,74094E-03	1,17528E-02	1,15866E-02	1,11329E-02	1,24868E-02	1,33990E-02	1,26193E-02	5,21714E+09
37,50	1,17336E-02	9,91815E-03	8,47945E-03	6,81495E-03	1,18399E-02	1,17041E-02	1,13066E-02	1,25925E-02	1,34876E-02	1,26200E-02	5,18847E+09
38,00	1,16216E-02	9,89123E-03	8,50562E-03	6,88470E-03	1,19210E-02	1,18161E-02	1,14767E-02	1,26924E-02	1,35697E-02	1,26178E-02	5,15994E+09
38,50	1,15048E-02	9,85864E-03	8,52593E-03	6,95010E-03	1,19802E-02	1,19038E-02	1,16182E-02	1,27659E-02	1,36234E-02	1,25926E-02	5,12328E+09
39,00	1,13840E-02	9,82030E-03	8,54042E-03	7,01108E-03	1,20255E-02	1,19762E-02	1,17428E-02	1,28231E-02	1,36596E-02	1,25546E-02	5,08277E+09
39,50	1,12591E-02	9,77696E-03	8,54944E-03	7,06763E-03	1,20652E-02	1,20434E-02	1,18630E-02	1,28747E-02	1,36894E-02	1,25145E-02	5,04269E+09
40,00	1,11311E-02	9,72893E-03	8,55325E-03	7,11974E-03	1,20914E-02	1,20957E-02	1,19661E-02	1,29103E-02	1,37021E-02	1,24624E-02	4,99898E+09
40,50	1,09996E-02	9,67615E-03	8,55177E-03	7,16727E-03	1,21042E-02	1,21330E-02	1,20518E-02	1,29299E-02	1,36977E-02	1,23985E-02	4,95172E+09
41,00	1,08653E-02	9,61909E-03	8,54540E-03	7,21041E-03	1,21037E-02	1,21555E-02	1,21199E-02	1,29337E-02	1,36764E-02	1,23230E-02	4,90104E+09
41,50	1,07283E-02	9,55808E-03	8,53426E-03	7,24907E-03	1,20902E-02	1,21633E-02	1,21703E-02	1,29219E-02	1,36383E-02	1,22365E-02	4,84707E+09
42,00	1,05891E-02	9,49345E-03	8,51861E-03	7,28335E-03	1,20721E-02	1,21664E-02	1,22162E-02	1,29052E-02	1,35949E-02	1,21489E-02	4,79381E+09
42,50	1,04478E-02	9,42528E-03	8,49879E-03	7,31342E-03	1,20496E-02	1,21651E-02	1,22579E-02	1,28838E-02	1,35465E-02	1,20606E-02	4,74130E+09
43,00	1,03047E-02	9,35414E-03	8,47485E-03	7,33922E-03	1,20067E-02	1,21398E-02	1,22689E-02	1,28371E-02	1,34711E-02	1,19522E-02	4,68191E+09
43,50	1,01599E-02	9,27978E-03	8,44696E-03	7,36079E-03	1,19679E-02	1,21202E-02	1,22888E-02	1,27963E-02	1,34020E-02	1,18529E-02	4,62708E+09
44,00	1,00137E-02	9,20294E-03	8,41535E-03	7,37828E-03	1,19092E-02	1,20770E-02	1,22782E-02	1,27308E-02	1,33066E-02	1,17342E-02	4,56562E+09
44,50	9,86633E-03	9,12370E-03	8,38045E-03	7,39198E-03	1,18552E-02	1,20402E-02	1,22771E-02	1,26718E-02	1,32180E-02	1,16251E-02	4,50877E+09
45,00	9,71790E-03	9,04206E-03	8,34213E-03	7,40174E-03	1,17818E-02	1,19802E-02	1,22457E-02	1,25885E-02	1,31038E-02	1,14972E-02	4,44548E+09

## ESPECTRO NORMALIZADO POR TENSÃO DE PICO DO TUBO

Energia (keV)	Ângulo: 6°, Ripple: 5%, Filtro: 3,0mm Al				Ângulo: 6°, Ripple: 5%			Ângulo: 6°, Ripple: 15%	Ângulo: 6°, Ripple: 25%	Ângulo: 12°, Ripple: 5%	Ângulo: 22°, Ripple: 5%
	80 kVp	100 kVp	120 kVp	150 kVp	Filtro: 2,5mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 4,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al
	90 kVp										
15,00	7,17075E-03	4,54291E-03	3,20563E-03	2,16406E-03	4,58676E-05	1,69023E-05	2,26905E-06	1,95873E-05	2,28586E-05	2,92156E-05	2,09546E+07
15,50	7,40058E-03	4,70416E-03	3,32663E-03	2,25060E-03	7,76254E-05	3,15701E-05	5,16222E-06	3,65522E-05	4,26089E-05	5,46609E-05	3,89467E+07
16,00	7,63532E-03	4,86939E-03	3,45091E-03	2,33967E-03	1,24421E-04	5,52465E-05	1,07681E-05	6,39076E-05	7,44135E-05	9,56222E-05	6,76760E+07
16,50	7,87316E-03	5,03745E-03	3,57765E-03	2,43073E-03	1,87564E-04	8,98291E-05	2,03689E-05	1,03819E-04	1,20749E-04	1,55544E-04	1,09015E+08
17,00	8,11388E-03	5,20843E-03	3,70667E-03	2,52345E-03	2,73200E-04	1,40175E-04	3,64811E-05	1,61860E-04	1,88039E-04	2,42719E-04	1,68136E+08
17,50	8,35610E-03	5,38158E-03	3,83771E-03	2,61798E-03	3,79304E-04	2,06535E-04	6,05373E-05	2,38268E-04	2,76480E-04	3,57404E-04	2,44277E+08
18,00	8,59955E-03	5,55672E-03	3,97064E-03	2,71400E-03	5,12240E-04	2,94408E-04	9,61428E-05	3,39325E-04	3,93263E-04	5,08751E-04	3,42564E+08
18,50	8,84431E-03	5,73443E-03	4,10589E-03	2,81186E-03	6,72907E-04	4,06025E-04	1,46139E-04	4,67522E-04	5,41147E-04	6,99994E-04	4,63767E+08
19,00	9,08860E-03	5,91350E-03	4,24258E-03	2,91102E-03	8,59765E-04	5,41693E-04	2,12577E-04	6,23111E-04	7,20268E-04	9,30721E-04	6,06121E+08
19,50	9,33167E-03	6,09392E-03	4,38098E-03	3,01168E-03	1,07566E-03	7,04798E-04	2,99129E-04	8,09873E-04	9,34817E-04	1,20548E-03	7,71107E+08
20,00	9,57299E-03	6,27549E-03	4,52080E-03	3,11363E-03	1,31776E-03	8,94294E-04	4,07178E-04	1,02647E-03	1,18303E-03	1,52084E-03	9,55056E+08
20,50	9,81107E-03	6,45801E-03	4,66216E-03	3,21678E-03	1,58066E-03	1,10657E-03	5,36130E-04	1,26859E-03	1,45973E-03	1,86880E-03	1,15177E+09
21,00	1,00454E-02	6,64114E-03	4,80466E-03	3,32133E-03	1,88165E-03	1,35702E-03	6,97743E-04	1,55371E-03	1,78475E-03	2,27317E-03	1,37480E+09
21,50	1,02743E-02	6,82427E-03	4,94837E-03	3,42694E-03	2,19306E-03	1,62272E-03	8,78314E-04	1,85539E-03	2,12742E-03	2,69308E-03	1,59838E+09
22,00	1,04971E-02	7,00711E-03	5,09306E-03	3,53384E-03	2,53639E-03	1,92297E-03	1,09270E-03	2,19546E-03	2,51255E-03	3,15837E-03	1,83987E+09
22,50	1,07123E-02	7,18920E-03	5,23876E-03	3,64175E-03	2,89130E-03	2,23994E-03	1,32905E-03	2,55337E-03	2,91629E-03	3,63727E-03	2,08026E+09
23,00	1,09193E-02	7,37009E-03	5,38500E-03	3,75073E-03	3,27032E-03	2,58544E-03	1,59750E-03	2,94236E-03	3,35356E-03	4,14695E-03	2,32941E+09
23,50	1,11165E-02	7,54912E-03	5,53191E-03	3,86086E-03	3,64554E-03	2,93314E-03	1,87713E-03	3,33227E-03	3,78975E-03	4,64338E-03	2,56280E+09
24,00	1,13032E-02	7,72554E-03	5,67904E-03	3,97190E-03	4,05937E-03	3,32394E-03	2,20327E-03	3,76939E-03	4,27735E-03	5,18994E-03	2,81590E+09
24,50	1,14787E-02	7,89901E-03	5,82622E-03	4,08394E-03	4,45440E-03	3,70205E-03	2,52793E-03	4,19024E-03	4,74410E-03	5,69780E-03	3,04061E+09
25,00	1,16420E-02	8,06847E-03	5,97304E-03	4,19686E-03	4,84940E-03	4,08516E-03	2,86594E-03	4,61485E-03	5,21273E-03	6,19480E-03	3,25326E+09
25,50	1,17927E-02	8,23370E-03	6,11943E-03	4,31060E-03	5,27332E-03	4,50269E-03	3,26537E-03	5,07632E-03	5,72054E-03	6,72488E-03	3,47741E+09
26,00	1,19302E-02	8,39373E-03	6,26465E-03	4,42508E-03	5,68894E-03	4,91699E-03	3,63122E-03	5,53205E-03	6,21938E-03	7,23090E-03	3,68376E+09
26,50	1,20542E-02	8,54817E-03	6,40850E-03	4,54017E-03	6,08870E-03	5,31970E-03	4,01447E-03	5,97267E-03	6,69884E-03	7,70166E-03	3,86774E+09
27,00	1,21644E-02	8,69618E-03	6,55058E-03	4,65583E-03	6,50891E-03	5,74863E-03	4,43295E-03	6,44065E-03	7,20661E-03	8,19267E-03	4,05804E+09
27,50	1,22606E-02	8,83749E-03	6,69030E-03	4,77182E-03	6,90312E-03	6,15472E-03	4,83673E-03	6,88102E-03	7,68118E-03	8,63430E-03	4,22060E+09
28,00	1,23430E-02	8,97145E-03	6,82740E-03	4,88813E-03	7,31268E-03	6,58183E-03	5,27114E-03	7,34287E-03	8,17752E-03	9,08959E-03	4,38719E+09
28,50	1,24116E-02	9,09778E-03	6,96152E-03	5,00439E-03	7,68560E-03	6,97378E-03	5,67632E-03	7,76361E-03	8,62598E-03	9,48182E-03	4,51231E+09
29,00	1,24665E-02	9,21587E-03	7,09193E-03	5,12042E-03	8,06842E-03	7,38073E-03	6,10575E-03	8,19924E-03	9,08907E-03	9,88134E-03	4,65718E+09
29,50	1,25080E-02	9,32560E-03	7,21829E-03	5,23607E-03	8,40403E-03	7,73985E-03	6,48991E-03	8,58008E-03	9,48968E-03	1,02054E-02	4,75662E+09
30,00	1,25366E-02	9,42662E-03	7,34044E-03	5,35100E-03	8,74420E-03	8,10771E-03	6,89084E-03	8,96913E-03	9,89779E-03	1,05312E-02	4,85642E+09
30,50	1,25525E-02	9,51895E-03	7,45763E-03	5,46504E-03	9,08868E-03	8,48423E-03	7,30893E-03	9,36629E-03	1,03133E-02	1,08591E-02	4,95672E+09
31,00	1,2561E-02	9,60231E-03	7,56989E-03	5,57800E-03	9,37373E-03	8,79774E-03	7,66137E-03	9,69260E-03	1,06495E-02	1,10988E-02	5,01689E+09
31,50	1,25480E-02	9,67674E-03	7,67674E-03	5,68932E-03	9,68433E-03	9,14346E-03	8,05765E-03	1,00533E-02	1,10222E-02	1,13731E-02	5,09306E+09
32,00	1,25290E-02	9,74222E-03	7,77795E-03	5,79901E-03	9,95557E-03	9,44792E-03	8,41189E-03	1,03675E-02	1,13429E-02	1,15906E-02	5,14421E+09
32,50	1,24992E-02	9,79890E-03	7,87320E-03	5,90654E-03	1,02181E-02	9,74567E-03	8,76417E-03	1,06734E-02	1,16535E-02	1,17959E-02	5,19072E+09
33,00	1,24591E-02	9,84670E-03	7,96246E-03	6,01178E-03	1,04573E-02	1,00197E-02	9,09377E-03	1,09525E-02	1,19340E-02	1,19694E-02	5,22406E+09
33,50	1,24095E-02	9,88598E-03	8,04536E-03	6,11444E-03	1,06787E-02	1,02762E-02	9,40758E-03	1,12118E-02	1,21921E-02	1,21200E-02	5,24845E+09
34,00	1,23511E-02	9,91675E-03	8,12205E-03	6,21435E-03	1,08816E-02	1,05139E-02	9,70353E-03	1,14499E-02	1,24265E-02	1,22472E-02	5,26388E+09
34,50	1,22840E-02	9,93934E-03	8,19228E-03	6,31102E-03	1,10722E-02	1,07401E-02	9,99024E-03	1,16750E-02	1,26462E-02	1,23605E-02	5,27455E+09
35,00	1,22092E-02	9,95401E-03	8,25600E-03	6,40450E-03	1,12351E-02	1,09365E-02	1,02447E-02	1,18673E-02	1,28298E-02	1,24399E-02	5,27202E+09
35,50	1,21269E-02	9,96104E-03	8,31344E-03	6,49437E-03	1,13927E-02	1,11289E-02	1,04984E-02	1,20549E-02	1,30079E-02	1,25157E-02	5,26924E+09
36,00	1,20377E-02	9,96065E-03	8,36437E-03	6,58048E-03	1,15290E-02	1,12987E-02	1,07279E-02	1,22176E-02	1,31588E-02	1,25672E-02	5,25763E+09
36,50	1,19421E-02	9,95303E-03	8,40896E-03	6,66275E-03	1,16439E-02	1,14452E-02	1,09318E-02	1,23551E-02	1,32821E-02	1,25950E-02	5,23740E+09
37,00	1,18404E-02	9,93875E-03	8,44728E-03	6,74094E-03	1,17528E-02	1,15866E-02	1,11329E-02	1,24868E-02	1,33990E-02	1,26193E-02	5,21714E+09
37,50	1,17336E-02	9,91815E-03	8,47945E-03	6,81495E-03	1,18399E-02	1,17041E-02	1,13066E-02	1,25925E-02	1,34876E-02	1,26200E-02	5,18847E+09
38,00	1,16216E-02	9,89123E-03	8,50562E-03	6,88470E-03	1,19210E-02	1,18161E-02	1,14767E-02	1,26924E-02	1,35697E-02	1,26178E-02	5,15994E+09
38,50	1,15048E-02	9,85864E-03	8,52593E-03	6,95010E-03	1,19802E-02	1,19038E-02	1,16182E-02	1,27659E-02	1,36234E-02	1,25926E-02	5,12328E+09
39,00	1,13840E-02	9,82030E-03	8,54042E-03	7,01108E-03	1,20255E-02	1,19762E-02	1,17428E-02	1,28231E-02	1,36596E-02	1,25546E-02	5,08277E+09
39,50	1,12591E-02	9,77696E-03	8,54944E-03	7,06763E-03	1,20652E-02	1,20434E-02	1,18630E-02	1,28747E-02	1,36894E-02	1,25145E-02	5,04269E+09
40,00	1,11311E-02	9,72893E-03	8,55325E-03	7,11974E-03	1,20914E-02	1,20957E-02	1,19661E-02	1,29103E-02	1,37021E-02	1,24624E-02	4,99898E+09
40,50	1,09996E-02	9,67615E-03	8,55177E-03	7,16727E-03	1,21042E-02	1,21330E-02	1,20518E-02	1,29299E-02	1,36977E-02	1,23985E-02	4,95172E+09
41,00	1,08653E-02	9,61909E-03	8,54540E-03	7,21041E-03	1,21037E-02	1,21555E-02	1,21199E-02	1,29337E-02	1,36764E-02	1,23230E-02	4,90104E+09
41,50	1,07283E-02	9,55808E-03	8,53426E-03	7,24907E-03	1,20902E-02	1,21633E-02	1,21703E-02	1,29219E-02	1,36383E-02	1,22365E-02	4,84707E+09
42,00	1,05891E-02	9,49345E-03	8,51861E-03	7,28335E-03	1,20721E-02	1,21664E-02	1,22162E-02	1,29052E-02	1,35949E-02	1,21489E-02	4,79381E+09
42,50	1,04478E-02	9,42528E-03	8,49879E-03	7,31342E-03	1,20496E-02	1,21651E-02	1,22579E-02	1,28838E-02	1,35465E-02	1,20606E-02	4,74130E+09
43,00	1,03047E-02	9,35414E-03	8,47485E-03	7,33922E-03	1,20067E-02	1,21398E-02	1,22689E-02	1,28371E-02	1,34711E-02	1,19522E-02	4,68191E+09
43,50	1,01599E-02	9,27978E-03	8,44696E-03	7,36079E-03	1,19679E-02	1,21202E-02	1,22888E-02	1,27963E-02	1,34020E-02	1,18529E-02	4,62708E+09
44,00	1,00137E-02	9,20294E-03	8,41535E-03	7,37828E-03	1,19092E-02	1,20770E-02	1,22782E-02	1,27308E-02	1,33066E-02	1,17342E-02	4,56562E+09
44,50	9,86633E-03	9,12370E-03	8,38045E-03	7,39198E-03	1,18552E-02	1,20402E-02	1,22771E-02	1,26718E-02	1,32180E-02	1,16251E-02	4,50877E+09
45,00	9,71790E-03	9,04206E-03	8,34213E-03	7,40174E-03	1,17818E-02	1,19802E-02	1,22457E-02	1,25885E-02	1,31038E-02	1,14972E-02	4,44548E+09

## ESPECTRO NORMALIZADO POR TENSÃO DE PICO DO TUBO

Energia (keV)	Ângulo: 6°, Ripple: 5%, Filtro: 3,0mm Al				Ângulo: 6°, Ripple: 5%			Ângulo: 6°, Ripple: 15%	Ângulo: 6°, Ripple: 25%	Ângulo: 12°, Ripple: 5%	Ângulo: 22°, Ripple: 5%
	80 kVp	100 kVp	120 kVp	150 kVp	Filtro: 2,5mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 4,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al
	90 kVp										
45,50	9,56848E-03	8,95841E-03	8,30084E-03	7,40773E-03	1,17133E-02	1,19266E-02	1,22240E-02	1,25120E-02	1,29965E-02	1,13788E-02	4,38672E+09
46,00	9,41843E-03	8,87301E-03	8,25664E-03	7,41019E-03	1,16339E-02	1,18602E-02	1,21855E-02	1,24220E-02	1,28750E-02	1,12514E-02	4,32527E+09
46,50	9,26761E-03	8,78577E-03	8,20973E-03	7,40909E-03	1,15441E-02	1,17814E-02	1,21307E-02	1,23190E-02	1,27398E-02	1,11154E-02	4,26128E+09
47,00	9,11624E-03	8,69701E-03	8,16036E-03	7,40471E-03	1,14596E-02	1,17093E-02	1,20859E-02	1,22231E-02	1,26118E-02	1,09890E-02	4,20169350
47,50	8,96455E-03	8,60707E-03	8,10866E-03	7,39706E-03	1,13650E-02	1,16253E-02	1,20251E-02	1,21146E-02	1,24706E-02	1,08542E-02	4,13961E+09
48,00	8,81245E-03	8,51585E-03	8,05481E-03	7,38638E-03	1,12606E-02	1,15294E-02	1,19485E-02	1,19937E-02	1,23165E-02	1,07114E-02	4,07511E+09
48,50	8,66024E-03	8,42360E-03	7,99902E-03	7,37272E-03	1,11619E-02	1,14407E-02	1,18822E-02	1,18803E-02	1,21698E-02	1,05781E-02	4,01486E+09
49,00	8,50785E-03	8,33024E-03	7,94120E-03	7,35613E-03	1,10537E-02	1,13405E-02	1,18004E-02	1,17549E-02	1,20107E-02	1,04369E-02	3,95222E+09
49,50	8,35551E-03	8,23626E-03	7,88175E-03	7,33689E-03	1,09364E-02	1,12292E-02	1,17036E-02	1,16179E-02	1,18396E-02	1,02882E-02	3,88734E+09
50,00	8,20312E-03	8,14147E-03	7,82080E-03	7,31524E-03	1,08251E-02	1,11255E-02	1,16174E-02	1,14887E-02	1,16763E-02	1,01489E-02	3,82657E+09
50,50	8,05070E-03	8,04616E-03	7,75840E-03	7,29088E-03	1,07049E-02	1,10109E-02	1,15164E-02	1,13483E-02	1,15013E-02	1,00023E-02	3,76354E+09
51,00	7,89861E-03	7,95028E-03	7,69468E-03	7,26434E-03	1,05835E-02	1,08949E-02	1,14136E-02	1,12063E-02	1,13246E-02	9,85674E-03	3,70143E+09
51,50	7,74663E-03	7,85402E-03	7,62978E-03	7,23572E-03	1,04610E-02	1,07775E-02	1,13090E-02	1,10628E-02	1,11464E-02	9,71229E-03	3,64020E+09
52,00	7,59484E-03	7,75738E-03	7,56380E-03	7,20488E-03	1,03303E-02	1,06500E-02	1,11903E-02	1,09089E-02	1,09574E-02	9,58275E-03	3,57687E+09
52,50	7,44345E-03	7,66075E-03	7,49683E-03	7,17211E-03	1,02058E-02	1,05302E-02	1,10823E-02	1,07628E-02	1,07760E-02	9,41861E-03	3,51732E+09
53,00	7,29224E-03	7,56374E-03	7,42905E-03	7,13753E-03	1,00734E-02	1,04006E-02	1,09607E-02	1,06065E-02	1,05844E-02	9,26955E-03	3,45570E+09
53,50	7,14136E-03	7,46665E-03	7,36045E-03	7,10115E-03	9,94022E-03	1,02700E-02	1,08378E-02	1,04494E-02	1,03917E-02	9,12171E-03	3,39492E+09
54,00	6,99096E-03	7,36942E-03	7,29124E-03	7,06322E-03	9,80636E-03	1,01386E-02	1,07135E-02	1,02911E-02	1,01978E-02	8,97494E-03	3,33493E+09
54,50	6,84110E-03	7,27214E-03	7,22147E-03	7,02379E-03	9,66537E-03	9,99820E-03	1,05766E-02	1,01238E-02	9,99487E-03	8,82214E-03	3,27305E+09
55,00	6,69150E-03	7,17532E-03	7,15120E-03	6,98299E-03	9,53037E-03	9,86523E-03	1,04500E-02	9,96385E-03	9,79908E-03	8,67761E-03	3,21460E+09
55,50	6,54237E-03	7,07837E-03	7,08044E-03	6,94073E-03	9,38845E-03	9,72356E-03	1,03111E-02	9,79507E-03	9,59451E-03	8,52715E-03	3,15427E+09
56,00	6,39373E-03	6,98145E-03	7,00931E-03	6,89731E-03	9,24616E-03	9,58138E-03	1,01713E-02	9,62566E-03	9,38931E-03	8,3785E-03	3,09468E+09
56,50	6,24561E-03	6,88492E-03	6,93800E-03	6,85288E-03	9,10361E-03	9,43875E-03	1,00308E-02	9,45582E-03	9,18356E-03	8,22976E-03	3,03585E+09
57,00	6,09798E-03	6,78841E-03	6,86645E-03	6,80728E-03	8,96078E-03	9,29569E-03	9,88941E-03	9,28541E-03	8,97271E-03	8,02772E-03	2,97770E+09
57,50	5,95081E-03	6,69224E-03	6,79453E-03	6,76070E-03	8,81765E-03	9,15215E-03	9,74723E-03	9,11448E-03	8,77333E-03	7,93680E-03	2,92022E+09
58,00	1,01911E-02	2,12881E-02	2,80284E-02	3,22779E-02	2,07740E-02	2,15738E-02	2,30014E-02	1,85539E-02	1,60546E-02	1,90157E-02	7,04801E+09
58,50	5,65842E-03	6,50082E-03	6,65065E-03	6,66500E-03	8,52500E-03	8,85677E-03	9,45050E-03	8,76418E-03	8,34833E-03	7,64176E-03	2,80487E+09
59,00	5,51295E-03	6,40572E-03	6,57870E-03	6,61606E-03	8,38136E-03	8,71225E-03	9,30634E-03	8,59209E-03	8,14023E-03	7,49890E-03	2,74927E+09
59,50	1,30332E-02	3,23094E-02	4,46859E-02	5,32539E-02	2,96255E-02	3,00768E-02	3,26350E-02	2,54028E-02	2,211730E-02	2,10370E-02	3,103010E+10
60,00	5,22367E-03	6,21622E-03	6,43470E-03	6,51615E-03	8,08261E-03	8,40852E-03	8,99648E-03	8,23326E-03	7,71019E-03	7,20415E-03	2,63542E+09
60,50	5,08007E-03	6,12214E-03	6,36290E-03	6,46538E-03	7,93326E-03	8,25650E-03	8,84099E-03	8,05367E-03	7,49509E-03	7,05837E-03	2,57939E+09
61,00	4,93699E-03	6,02845E-03	6,29117E-03	6,41408E-03	7,78406E-03	8,10450E-03	8,68526E-03	7,87405E-03	7,28005E-03	6,91368E-03	2,52396E+09
61,50	4,79434E-03	5,93504E-03	6,21952E-03	6,36244E-03	7,63482E-03	7,95234E-03	8,52912E-03	7,69427E-03	7,06493E-03	6,76988E-03	2,46906E+09
62,00	4,65243E-03	5,84218E-03	6,14819E-03	6,31037E-03	7,48573E-03	7,80021E-03	8,37273E-03	7,51450E-03	6,84991E-03	6,62781E-03	2,41469E+09
62,50	4,51121E-03	5,74965E-03	6,07700E-03	6,25792E-03	7,33670E-03	7,64802E-03	8,21603E-03	7,33464E-03	6,63496E-03	6,48522E-03	2,36083E+09
63,00	4,37049E-03	5,65767E-03	6,00612E-03	6,20534E-03	7,18299E-03	7,48981E-03	8,05042E-03	7,14902E-03	6,41491E-03	6,33912E-03	2,30559E+09
63,50	4,23044E-03	5,56614E-03	5,93545E-03	6,15241E-03	7,03424E-03	7,33768E-03	7,89330E-03	6,96926E-03	6,20024E-03	6,19907E-03	2,25272E+09
64,00	4,09107E-03	5,47495E-03	5,86505E-03	6,09939E-03	6,88558E-03	7,18551E-03	7,73588E-03	6,78942E-03	5,98570E-03	6,05981E-03	2,20028E+09
64,50	3,95221E-03	5,38429E-03	5,79483E-03	6,04614E-03	6,73253E-03	7,02769E-03	7,57006E-03	6,60430E-03	5,76669E-03	5,91658E-03	2,14654E+09
65,00	3,81404E-03	5,29397E-03	5,72513E-03	5,99279E-03	6,57979E-03	6,87012E-03	7,40432E-03	6,41946E-03	5,54816E-03	5,77433E-03	2,09329E+09
65,50	3,67656E-03	5,20431E-03	5,65556E-03	5,93946E-03	6,43171E-03	6,71822E-03	7,24649E-03	6,23996E-03	5,33451E-03	5,63758E-03	2,04217E+09
66,00	3,53978E-03	5,11498E-03	5,58651E-03	5,88603E-03	6,27949E-03	6,56100E-03	7,08073E-03	6,05554E-03	5,11687E-03	5,49706E-03	1,98980E+09
66,50	3,40346E-03	5,02615E-03	5,51771E-03	5,83251E-03	6,12757E-03	6,4000E-03	6,91503E-03	5,87144E-03	4,99884E-03	5,35742E-03	1,93788E+09
67,00	3,26798E-03	4,9050E-03	5,43050E-03	5,78395E-03	6,03975E-03	6,25795E-03	6,73588E-03	5,76142E-03	4,8984E-03	5,27864E-03	1,88503E+09
67,50	3,13311E-03	4,84980E-03	5,38104E-03	5,72568E-03	5,82471E-03	6,09077E-03	6,58392E-03	5,50423E-03	4,46750E-03	5,08068E-03	1,83528E+09
68,00	2,99889E-03	4,76233E-03	5,31346E-03	5,67242E-03	5,67384E-03	5,93460E-03	6,41857E-03	5,32116E-03	4,25497E-03	4,94357E-03	1,78459E+09
68,50	2,86533E-03	4,67515E-03	5,24609E-03	5,61912E-03	5,52320E-03	5,77861E-03	6,25323E-03	5,13838E-03	4,06922E-03	4,80720E-03	1,73427E+09
69,00	2,73989E-03	4,59039E-03	5,17073E-03	5,55812E-03	5,40111E-03	5,64851E-03	6,03249E-03	5,10931E-03	3,86477E-03	4,64471E-03	1,68477E+09
69,50	2,66000E-03	4,50509E-03	5,10280E-03	5,49280E-03	5,28056E-03	5,51837E-03	5,76142E-03	4,66648E-03	3,63312E-03	4,47141E-03	1,62196E+09
70,00	2,53946E-03	4,42823E-03	5,03735E-03	5,42631E-03	5,20461E-03	5,44609E-03	5,63907E-03	4,59073E-03	3,46156E-03	4,02370E-03	1,51154E+09
70,50	2,43385E-03	4,34242E-03	4,96062E-03	5,34422E-03	5,15156E-03	5,34824E-03	5,47156E-03	4,47156E-03	3,38331E-03	3,91655E-03	1,46781E+09
71,00	2,02720E-03	4,18945E-03	4,80326E-03	5,24899E-03	4,05217E-03	4,24471E-03	4,60453E-03	3,69988E-03	2,81599E-03	3,80568E-03	1,42306E+09
71,50	1,91956E-03	4,15345E-03	4,75011E-03	5,25337E-03	3,95357E-03	4,14255E-03	4,49614E-03	3,56240E-03	2,6994E-03	3,69739E-03	1,37953E+09
72,00	1,81099E-03	4,11632E-03	4,70061E-03	5,25736E-03	3,85302E-03	4,03828E-03	4,38534E-03	3,42288E-03	2,58367E-03	3,58852E-03	1,33607E+09
72,50	1,70157E-03	4,07806E-03	4,66366E-03	5,26096E-03	3,74803E-03	3,92877E-03	4,26757E-03	3,27870E-03	2,47036E-03	3,47626E-03	1,29160E+09
73,00	1,59136E-03	4,03870E-03	4,62985E-03	5,26429E-03	3,64384E-03	3,82059E-03	4,15231E-03	3,13545E-03	2,35897E-03	3,36647E-03	1,24827E+09
73,50	1,48041E-03	4,00983E-03	4,59746E-03	5,26710E-03	3,53546E-03	3,70745E-03	4,03043E-03	2,98794E-03	2,25031E-03	3,25348E-03	1,20401E+09
74,00	1,36883E-03	3,98206E-03	4,56928E-03	5,26955E-03	3,42783E-03	3,59556E-03	3,91091E-03	2,84126E-03	2,14343E-03	3,14280E-03	1,16083E+09
74,50	1,25661E-03	3,95147E-03	4,54012E-03	5,27168E-03	3,31629E-03	3,47903E-03	3,78518E-03	2,69072E-03	2,03921E-03	3,02918E-03	1,11679E+09
75,00	1,14387E-03	3,92140E-03	4,51363E-03	5,27335E-03	3,20546E-03	3,36367E-03	3,66165E-03	2,54095E-03	1,93667E-03	2,91772E-03	1,07375E+09
75,50	1,03063E-03	3,89219E-03	4,48636E-03	5,27460E-03	3,09100E-03	3,24400E-03	3,53233E-03	2,38771E-03	1,83678E-03	2,80358E-03	1,02993E+09
76,00	9,16989E-04	3,86204E-03	4,45978E-03	5,27558E-03	2,97520E-03	3,12289E-03	3,40137E-03	2,2334E-03	1,73706E-03	2,68929E-03	9,86254E+08
76,50	8,03014E-04	3,83929E-03	4,43299E-03	5,27608E-03	2,86010E-03	3,00289E-0					

## ESPECTRO NORMALIZADO POR TENSÃO DE PICO DO TUBO

Energia (keV)	Ângulo: 6°, Ripple: 5%, Filtro: 3,0mm Al				Ângulo: 6°, Ripple: 5%			Ângulo: 6°, Ripple: 15%	Ângulo: 6°, Ripple: 25%	Ângulo: 12°, Ripple: 5%	Ângulo: 22°, Ripple: 5%		
	80 kVp	100 kVp	120 kVp	150 kVp	Filtro: 2,5mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 4,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al		
					90 kVp								
80,50		2,33824E-03	2,74386E-03	2,56539E-03	1,88566E-03	1,98220E-03	2,16539E-03	1,13583E-03	9,51325E-04	1,65945E-03	6,00476E+08		
81,00		2,28521E-03	2,72235E-03	2,56217E-03	1,75964E-03	1,84999E-03	2,02151E-03	1,03941E-03	8,74153E-04	1,54457E-03	5,58193E+08		
81,50		2,23171E-03	2,70034E-03	2,55866E-03	1,63295E-03	1,71702E-03	1,87671E-03	9,49651E-04	8,01235E-04	1,42979E-03	5,16074E+08		
82,00		2,17742E-03	2,67759E-03	2,55469E-03	1,50664E-03	1,58464E-03	1,73296E-03	8,61577E-04	7,29512E-04	1,31621E-03	4,74511E+08		
82,50		2,12246E-03	2,65431E-03	2,55030E-03	1,37864E-03	1,45021E-03	1,58637E-03	7,79082E-04	6,61503E-04	1,20161E-03	4,32696E+08		
83,00		2,06705E-03	2,63043E-03	2,54554E-03	1,25013E-03	1,31520E-03	1,43908E-03	6,97593E-04	5,94175E-04	1,08718E-03	3,91061E+08		
83,50		2,01114E-03	2,60602E-03	2,54037E-03	1,12113E-03	1,17965E-03	1,29110E-03	6,22328E-04	5,31367E-04	9,72943E-04	3,49601E+08		
84,00		1,95460E-03	2,58112E-03	2,53483E-03	9,91053E-04	1,04278E-03	1,14131E-03	5,47670E-04	4,68940E-04	8,58237E-04	3,08078E+08		
84,50		1,89773E-03	2,55557E-03	2,52888E-03	8,61358E-04	9,06440E-04	9,92353E-04	4,79748E-04	4,11669E-04	7,44553E-04	2,67022E+08		
85,00		1,84023E-03	2,52941E-03	2,52256E-03	7,31363E-04	7,69745E-04	8,42930E-04	4,12940E-04	3,55252E-04	6,31145E-04	2,26161E+08		
85,50		1,78225E-03	2,50287E-03	2,51585E-03	6,01100E-04	6,32731E-04	6,93077E-04	3,52524E-04	3,03859E-04	5,18026E-04	1,85496E+08		
86,00		1,72395E-03	2,47571E-03	2,50885E-03	4,74123E-04	4,99140E-04	5,46893E-04	2,93313E-04	2,53420E-04	4,08188E-04	1,46087E+08		
86,50		1,66516E-03	2,44814E-03	2,50134E-03	3,81918E-04	4,02124E-04	4,40714E-04	2,40832E-04	2,08429E-04	3,28307E-04	1,17408E+08		
87,00		1,60598E-03	2,42008E-03	2,49356E-03	2,94761E-04	3,10398E-04	3,40277E-04	1,89688E-04	1,64531E-04	2,53047E-04	9,04315E+07		
87,50		1,54646E-03	2,39140E-03	2,48529E-03	2,24285E-04	2,36215E-04	2,59024E-04	1,45905E-04	1,26739E-04	1,92248E-04	6,86501E+07		
88,00		1,48661E-03	2,36246E-03	2,47672E-03	1,56984E-04	1,65356E-04	1,81371E-04	1,03672E-04	9,02463E-05	1,34387E-04	4,79563E+07		
88,50		1,42643E-03	2,33290E-03	2,46777E-03	1,05204E-04	1,10815E-04	1,21548E-04	6,09768E-05	6,09768E-05	8,99116E-05	3,20607E+07		
89,00		1,36594E-03	2,30295E-03	2,45853E-03	5,69511E-05	5,99966E-05	6,58253E-05	3,83667E-05	3,35090E-05	4,86180E-05	1,73261E+07		
89,50		1,30519E-03	2,27263E-03	2,44889E-03	2,75352E-05	2,90115E-05	3,18386E-05	1,85950E-05	1,62470E-05	2,34677E-05	8,35634E+06		
90,00		1,24416E-03	2,24180E-03	2,43887E-03	2,29519E-06	2,41858E-06	2,65498E-06	1,55020E-06	1,35444E-06	1,95422E-06	6,95494E+05		
90,50		1,18293E-03	2,21059E-03	2,42855E-03									
91,00		1,12145E-03	2,17888E-03	2,41794E-03									
91,50		1,05978E-03	2,14692E-03	2,40694E-03									
92,00		9,97942E-04	2,11458E-03	2,39555E-03									
92,50		9,35943E-04	2,08186E-03	2,38387E-03									
93,00		8,73819E-04	2,04876E-03	2,37190E-03									
93,50		8,11569E-04	2,01529E-03	2,35963E-03									
94,00		7,49217E-04	1,98145E-03	2,34700E-03									
94,50		6,86796E-04	1,94735E-03	2,33415E-03									
95,00		6,24297E-04	1,91299E-03	2,32091E-03									
95,50		5,61770E-04	1,87826E-03	2,30738E-03									
96,00		4,99218E-04	1,84329E-03	2,29358E-03									
96,50		4,36665E-04	1,80793E-03	2,27956E-03									
97,00		3,74115E-04	1,77244E-03	2,26515E-03									
97,50		3,11588E-04	1,73659E-03	2,25057E-03									
98,00		2,49109E-04	1,70060E-03	2,23557E-03									
98,50		1,86699E-04	1,66425E-03	2,22041E-03									
99,00		1,24368E-04	1,62775E-03	2,20503E-03									
99,50		6,21313E-05	1,59102E-03	2,18937E-03									
100,00		5,17457E-06	1,55403E-03	2,17341E-03									
100,50			1,51680E-03	2,15717E-03									
101,00			1,47942E-03	2,14082E-03									
101,50			1,44194E-03	2,12409E-03									
102,00			1,40419E-03	2,10725E-03									
102,50			1,36633E-03	2,09014E-03									
103,00			1,32835E-03	2,07274E-03									
103,50			1,29010E-03	2,05522E-03									
104,00			1,25182E-03	2,03742E-03									
104,50			1,21337E-03	2,01943E-03									
105,00			1,17490E-03	2,00151E-03									
105,50			1,13407E-03	1,97937E-03									
106,00			1,09734E-03	1,96438E-03									
106,50			1,05845E-03	1,94560E-03									
107,00			1,01948E-03	1,92664E-03									
107,50			9,80436E-04	1,90758E-03									
108,00			9,41328E-04	1,88823E-03									
108,50			9,02136E-04	1,86877E-03									
109,00			8,62892E-04	1,84913E-03									
109,50			8,23611E-04	1,82939E-03									
110,00			7,84281E-04	1,80946E-03									
110,50			7,44927E-04	1,78934E-03									
111,00			7,05536E-04	1,76911E-03									
111,50			6,66122E-04	1,74870E-03									
112,00			6,26703E-04	1,72817E-03									
112,50			5,87279E-04	1,70746E-03									
113,00			5,47857E-04	1,68666E-03									
113,50			5,08449E-04	1,66576E-03									
114,00			4,69054E-04	1,64466E-03									
114,50			4,29687E-04	1,62356E-03									
115,00			3,90346E-04	1,60218E-03									
115,50			3,51045E-04	1,58079E-03									
116,00			3,11782E-04	1,55931E-03									
116,50			2,72572E-04	1,53763E-03									
117,00			2,33414E-04	1,51596E-03									
117,50			1,94321E-04	1,49409E-03									
118,00			1,55292E-04	1,47212E-03									
118,50			1,16342E-04	1,45015E-03									
119,00			7,74737E-05	1,42799E-03									
119,50			3,86922E-05	1,40585E-03									
120,00			3,22198E-06	1,38359E-03									

**ESPECTRO NORMALIZADO POR TENSÃO DE PICO DO TUBO**

Ângulo: 6°, Ripple: 5%, Filtro: 3,0mm Al					Ângulo: 6°, Ripple: 5%			Ângulo: 6°, Ripple: 15%	Ângulo: 6°, Ripple: 25%	Ângulo: 12°, Ripple: 5%	Ângulo: 22°, Ripple: 5%
					Filtro: 2,5mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 4,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al	Filtro: 3,0mm Al
Energia (keV)	80 kVp	100 kVp	120 kVp	150 kVp	90 kVp						
120,50				1,36124E-03							
121,00				1,33879E-03							
121,50				1,31624E-03							
122,00				1,29370E-03							
122,50				1,27105E-03							
123,00				1,24831E-03							
123,50				1,22559E-03							
124,00				1,20275E-03							
124,50				1,17982E-03							
125,00				1,15689E-03							
125,50				1,13396E-03							
126,00				1,11094E-03							
126,50				1,08782E-03							
127,00				1,06479E-03							
127,50				1,04157E-03							
128,00				1,01845E-03							
128,50				9,95243E-04							
129,00				9,71958E-04							
129,50				9,48683E-04							
130,00				9,25388E-04							
130,50				9,02076E-04							
131,00				8,78735E-04							
131,50				8,55376E-04							
132,00				8,32015E-04							
132,50				8,08628E-04							
133,00				7,85242E-04							
133,50				7,61843E-04							
134,00				7,38439E-04							
134,50				7,15036E-04							
135,00				6,91639E-04							
135,50				6,68228E-04							
136,00				6,44832E-04							
136,50				6,21442E-04							
137,00				5,98061E-04							
137,50				5,74687E-04							
138,00				5,51328E-04							
138,50				5,27984E-04							
139,00				5,04656E-04							
139,50				4,81348E-04							
140,00				4,58064E-04							
140,50				4,34806E-04							
141,00				4,11572E-04							
141,50				3,88364E-04							
142,00				3,65190E-04							
142,50				3,42042E-04							
143,00				3,18927E-04							
143,50				2,95849E-04							
144,00				2,72813E-04							
144,50				2,49814E-04							
145,00				2,26855E-04							
145,50				2,03948E-04							
146,00				1,81078E-04							
146,50				1,58259E-04							
147,00				1,35489E-04							
147,50				1,12768E-04							
148,00				9,01033E-05							
148,50				6,74913E-05							
149,00				4,49360E-05							
149,50				2,24393E-05							
150,00				1,86847E-06							

ANEXO B: Transmissão de fótons em função da espessura do material BM1, para espectro monoenergético com tensões de pico de tubo de raios X de 60 a 150 keV, ao passo de 10 keV.

Espessura (cm)	Energia: 60keV				Energia: 70keV				Energia: 80keV				Energia: 90keV				Energia: 100keV			
	BM1	BM2	BM3	BM4																
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.1	0.9970	0.9860	0.9850	0.9780	0.9940	0.9860	0.9860	0.9820	0.9925	0.9860	0.9860	0.9843	0.9925	0.9860	0.9860	0.9843	0.9910	0.9860	0.9860	0.9860
0.2	0.9670	0.9380	0.9380	0.9260	0.9730	0.9540	0.9540	0.9460	0.9769	0.9620	0.9620	0.9584	0.9769	0.9620	0.9620	0.9584	0.9790	0.9690	0.9700	0.9690
0.3	0.9340	0.8870	0.8890	0.8750	0.9500	0.9180	0.9200	0.9110	0.9588	0.9350	0.9360	0.9311	0.9588	0.9350	0.9360	0.9311	0.9670	0.9520	0.9530	0.9522
0.4	0.8980	0.8370	0.8380	0.8250	0.9260	0.8810	0.8830	0.8750	0.9395	0.9070	0.9090	0.9043	0.9395	0.9070	0.9090	0.9043	0.9550	0.9350	0.9360	0.9351
0.5	0.8630	0.7850	0.7900	0.7780	0.9000	0.8450	0.8470	0.8470	0.9219	0.8800	0.8820	0.8785	0.9219	0.8800	0.8820	0.8785	0.9430	0.9170	0.9200	0.9188
0.6	0.8270	0.7370	0.7410	0.7310	0.8750	0.8080	0.8080	0.8080	0.9017	0.8530	0.8560	0.8521	0.9017	0.8530	0.8560	0.8521	0.9310	0.9000	0.9030	0.9025
0.7	0.7930	0.6900	0.6960	0.6860	0.8490	0.7730	0.7780	0.7720	0.8834	0.8260	0.8290	0.8259	0.8834	0.8260	0.8290	0.8259	0.9190	0.8830	0.8860	0.8859
0.8	0.7610	0.6450	0.6510	0.6440	0.8260	0.7390	0.7440	0.7400	0.8647	0.8000	0.8040	0.8009	0.8647	0.8000	0.8040	0.8009	0.9070	0.8660	0.8700	0.8697
0.9	0.7260	0.6030	0.6090	0.6050	0.8000	0.7050	0.7120	0.7080	0.8463	0.7740	0.7790	0.7770	0.8463	0.7740	0.7790	0.7770	0.8950	0.8500	0.8540	0.8538
1.0	0.6950	0.5620	0.5710	0.5680	0.7780	0.6740	0.6800	0.6790	0.8288	0.7480	0.7540	0.7529	0.8288	0.7480	0.7540	0.7529	0.8830	0.8330	0.8380	0.8381
1.1	0.6660	0.5250	0.5340	0.5310	0.7540	0.6440	0.6510	0.6490	0.8101	0.7240	0.7310	0.7297	0.8101	0.7240	0.7310	0.7297	0.8710	0.8180	0.8220	0.8230
1.2	0.6360	0.4900	0.4990	0.4970	0.7320	0.6150	0.6230	0.6210	0.7926	0.7010	0.7080	0.7069	0.7926	0.7010	0.7080	0.7069	0.8600	0.8020	0.8060	0.8077
1.3	NA	NA	NA	NA	0.7090	0.5870	0.5950	0.5940	0.7752	0.6780	0.6850	0.6842	0.7752	0.6780	0.6850	0.6842	0.8490	0.7870	0.7920	0.7927
1.4	NA	NA	NA	NA	0.6880	0.5550	0.5660	0.5660	0.7582	0.6550	0.6630	0.6631	0.7582	0.6550	0.6630	0.6631	0.8380	0.7710	0.7770	0.7777
1.5	NA	NA	NA	NA	0.6680	0.5340	0.5440	0.5440	0.7413	0.6340	0.6410	0.6423	0.7413	0.6340	0.6410	0.6423	0.8260	0.7560	0.7620	0.7638
1.6	NA	NA	NA	NA	0.6470	0.5090	0.5180	0.5200	0.7252	0.6130	0.6220	0.6222	0.7252	0.6130	0.6220	0.6222	0.8150	0.7420	0.7480	0.7495
1.7	NA	NA	NA	NA	0.8050	0.7270	0.7340	0.7356												
1.8	NA	NA	NA	NA	0.7940	0.7130	0.7200	0.7219												
1.9	NA	NA	NA	NA																
2.0	NA	NA	NA	NA																
Espessura (cm)	Energia: 110keV				Energia: 120keV				Energia: 130keV				Energia: 140keV				Energia: 150keV			
	BM1	BM2	BM3	BM4																
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.1	0.9910	0.9880	0.9881	0.9871	0.9800	0.9884	0.9894	0.9891	0.9930	0.9912	0.9912	0.9914	0.9941	0.9920	0.9920	0.9922	0.9953	0.9937	0.9939	0.9937
0.2	0.9820	0.9740	0.9744	0.9732	0.9840	0.9769	0.9779	0.9780	0.9873	0.9821	0.9821	0.9823	0.9874	0.9835	0.9836	0.9837	0.9866	0.9831	0.9830	0.9830
0.3	0.9720	0.9600	0.9610	0.9621	0.9760	0.9653	0.9663	0.9659	0.9800	0.9720	0.9720	0.9722	0.9809	0.9747	0.9751	0.9753	0.9795	0.9738	0.9740	0.9742
0.4	0.9620	0.9460	0.9471	0.9479	0.9680	0.9537	0.9547	0.9549	0.9720	0.9618	0.9619	0.9621	0.9742	0.9657	0.9664	0.9665	0.9722	0.9655	0.9655	0.9661
0.5	0.9520	0.9320	0.9335	0.9336	0.9580	0.9423	0.9430	0.9435	0.9650	0.9527	0.9523	0.9529	0.9680	0.9571	0.9582	0.9581	0.9650	0.9557	0.9559	0.9564
0.6	0.9420	0.9170	0.9193	0.9195	0.9510	0.9306	0.9316	0.9320	0.9570	0.9428	0.9426	0.9431	0.9617	0.9486	0.9492	0.9499	0.9582	0.9478	0.9482	0.9487
0.7	0.9320	0.9040	0.9058	0.9053	0.9420	0.9199	0.9203	0.9209	0.9500	0.9330	0.9328	0.9335	0.9549	0.9398	0.9409	0.9416	0.9517	0.9390	0.9405	0.9408
0.8	0.9220	0.8900	0.8928	0.8923	0.9330	0.9070	0.9087	0.9099	0.9430	0.9242	0.9240	0.9245	0.9485	0.9312	0.9323	0.9333	0.9443	0.9300	0.9311	0.9315
0.9	0.9120	0.8770	0.8791	0.8798	0.9250	0.8974	0.8979	0.8989	0.9350	0.9143	0.9142	0.9147	0.9421	0.9226	0.9243	0.9253	0.9370	0.9210	0.9218	0.9227
1.0	0.9020	0.8630	0.8659	0.8653	0.9160	0.8861	0.8865	0.8875	0.9290	0.9048	0.9046	0.9052	0.9356	0.9142	0.9158	0.9169	0.9303	0.9125	0.9138	0.9147
1.1	0.8930	0.8500	0.8531	0.8521	0.9080	0.8753	0.8759	0.8770	0.9220	0.8963	0.8961	0.8966	0.9292	0.9057	0.9074	0.9086	0.9216	0.9025	0.9033	0.9045
1.2	0.8830	0.8370	0.8404	0.8394	0.9000	0.8639	0.8649	0.8665	0.9140	0.8873	0.8873	0.8876	0.9229	0.8971	0.8988	0.9000	0.9141	0.8930	0.8946	0.8955
1.3	0.8730	0.8240	0.8279	0.8273	0.8920	0.8532	0.8542	0.8556	0.9070	0.8779	0.8776	0.8782	0.9167	0.8891	0.8908	0.8927	0.9071	0.8849	0.8856	0.8872
1.4	0.8640	0.8110	0.8150	0.8142	0.8840	0.8423	0.8433	0.8452	0.9000	0.8689	0.8687	0.8694	0.9100	0.8808	0.8825	0.8843	0.9002	0.8760	0.8780	0.8791
1.5	0.8550	0.7980	0.8030	0.8022	0.8760	0.8316	0.8326	0.8347	0.8930	0.8599	0.8597	0.8602	0.9040	0.8726	0.8750	0.8765	0.8930	0.8673	0.8688	0.8706
1.6	0.8450	0.7860	0.7910	0.7901	0.8680	0.8213	0.8223	0.8244	0.8860	0.8505	0.8510	0.8515	0.8980	0.8644	0.8666	0.8687	0.8862	0.8591	0.8616	0.8625
1.7	0.8360	0.7740	0.7787	0.7782	0.8600	0.8109	0.8119	0.8140	0.8800	0.8423	0.8420	0.8427	0.8916	0.8564	0.8588	0.8610	0.8799	0.8508	0.8532	0.8545
1.8	0.8270	0.7620	0.7668	0.7648	0.8510	0.8011	0.8021	0.8043	0.8720	0.8335	0.8338	0.8338	0.8856	0.8484	0.8509	0.8531	0.8722	0.8418	0.8439	0.8461
1.9	0.8180	0.7500	0.7552	0.7542	0.8440	0.7907	0.7917	0.7943	0.8660	0.8243	0.8240	0.8246	0.8793	0.8405	0.8434	0.8456	0.8663	0.8343	0.8368	0.8387
2.0	0.8090	0.7380	0.7442	0.7434	0.8360	0.7810	0.7820	0.7842	0.8590	0.8160	0.8155	0.8166	0.8733	0.8328	0.8358	0.8382	0.8590	0.8255	0.8281	0.8301

ANEXO C: Diferentes tensões aceleradoras de tubo e espectro monoenergético simuladas neste trabalho, para a argamassa baritada.

ENERGIA [keV]	MATERIAL	CURVA DE TENDÊNCIA	R <sup>2</sup>
60	BM1	$T = 1.00588 - 0.16734 X - 0.30074 X^2 + 0.15472 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00999 - 0.33353 X - 0.30485 X^2 + 0.18706 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00937 - 0.33056 X - 0.29146 X^2 + 0.17949 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00882 - 0.40743 X - 0.15684 X^2 + 0.11946 X^3$	0.999
70	BM1	$T = 1.00675 - 0.16963 X - 0.10372 X^2 + 0.04395 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00907 - 0.28832 X - 0.10129 X^2 + 0.05457 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00924 - 0.28995 X - 0.0876 X^2 + 0.04898 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00644 - 0.30379 X - 0.06611 X^2 + 0.0418 X^3$	0.999
80	BM1	$T = 1.00411 - 0.13985 X - 0.0612 X^2 + 0.02512 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00519 - 0.22276 X - 0.06774 X^2 + 0.0341 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.005 - 0.22092 X - 0.06057 X^2 + 0.03096 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00445 - 0.2405 X - 0.03194 X^2 + 0.02081 X^3$	0.999
90	BM1	$T = 1.00191 - 0.1227 X - 0.03299 X^2 + 0.01415 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00282 - 0.18678 X - 0.03716 X^2 + 0.01948 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00266 - 0.18468 X - 0.03199 X^2 + 0.01724 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.003 - 0.20292 X - 0.00102 X^2 + 0.00507 X^3$	0.999
100	BM1	$T = 1.00125 - 0.11218 X - 0.01097 X^2 + 0.00526 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00172 - 0.16685 X - 0.00696 X^2 + 0.00595 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00134 - 0.1601 X - 0.01 X^2 + 0.00684 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00136 - 0.16525 X - 0.00177 X^2 + 0.00415 X^3$	0.999
110	BM1	$T = 1.00063 - 0.09545 X - 0.00519 X^2 + 0.00255 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00119 - 0.13861 X - 0.002 X^2 + 0.00282 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00101 - 0.13581 X - 0.00148 X^2 + 0.00259 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00044 - 0.13144 X - 0.0076 X^2 + 0.00452 X^3$	0.999
120	BM1	$T = 0.99897 - 0.0783 X - 0.00609 X^2 + 0.00229 X^3$	0.999
	BM2	$T = 0.99999 - 0.11588 X + 3.41268E-4 X^2 + 0.00145 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00041 - 0.11435 X - 0.00122 X^2 + 0.00192 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00032 - 0.11421 X + 9.92765E-4 X^2 + 0.00102 X^3$	0.999
130	BM1	$T = 1.00041 - 0.06986 X - 0.00355 X^2 + 0.00159 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.0006 - 0.09654 X + 4.40165E-4 X^2 + 8.18636E-4 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00082 - 0.09898 X + 0.00389 X^2 - 3.67905E-4 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00044 - 0.09536 X - 5.27339E-4 X^2 + 0.00116 X^3$	0.999
140	BM1	$T = 1.00021 - 0.0649 X + 1.63947E-4 X^2 + 2.65816E-4 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.00027 - 0.08509 X - 0.00239 X^2 + 0.00152 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.0004 - 0.08489 X - 0.00115 X^2 + 0.00123 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00026 - 0.08334 X - 0.00134 X^2 + 0.00125 X^3$	0.999
150	BM1	$T = 1.0005 - 0.06742 X - 0.00611 X^2 + 0.00224 X^3$	0.999
	BM2	$T = 1.0008 - 0.08615 X - 0.00561 X^2 + 0.0025 X^3$	0.999
	BM3	$T = 1.00069 - 0.08597 X - 0.0036 X^2 + 0.00175 X^3$	0.999
	BM4	$T = 1.00045 - 0.08344 X - 0.00581 X^2 + 0.00251 X^3$	0.999

ANEXO D: Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto por argamassa baritada BM1, BM2, BM3 e BM4, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm.

Energia: 80kVp									
BM1									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.01E-06	8.26	46.79	1.00E+00	4.25E-08	2.54%	0.00%	1.00E+00	2.54%
0.2	2.15E-07	8.80	53.13	2.14E-01	9.27E-09	5.49%	-1.97%	2.18E-01	8.03%
0.4	6.38E-08	10.22	58.19	6.32E-02	2.69E-09	8.09%	0.09%	6.32E-02	10.63%
0.6	2.40E-08	11.12	61.32	2.38E-02	1.07E-09	12.03%	-4.96%	2.51E-02	14.57%
0.8	1.02E-08	11.55	63.42	1.01E-02	3.89E-10	16.98%	10.81%	9.15E-03	19.52%
1.0	4.92E-09	11.51	64.93	4.88E-03	2.48E-10	19.72%	-16.39%	5.84E-03	22.26%
1.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM2									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.01E-06	8.26	46.79	1.00E+00	4.25E-08	2.54%	0.00%	1.00E+00	2.54%
0.2	2.60E-07	9.07	54.35	2.57E-01	6.46E-09	4.72%	69.47%	1.52E-01	7.26%
0.4	5.46E-08	10.51	60.09	5.42E-02	1.19E-09	9.73%	92.94%	2.81E-02	12.27%
0.6	7.90E-09	11.27	63.48	7.83E-03	2.94E-10	15.09%	13.19%	6.92E-03	17.63%
0.8	2.63E-09	12.17	65.64	2.61E-03	1.29E-10	17.64%	-14.39%	3.04E-03	20.19%
1.0	9.95E-10	12.81	66.31	9.87E-04	1.87E-11	21.67%	123.88%	4.41E-04	24.22%
1.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM3									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.01E-06	8.26	46.79	1.00E+00	4.25E-08	2.54%	0.00%	1.00E+00	2.54%
0.2	1.54E-07	9.84	52.16	1.53E-01	6.46E-09	4.72%	6.95%	1.43E-01	7.26%
0.4	3.25E-08	11.02	57.78	3.22E-02	1.19E-09	10.73%	29.84%	2.48E-02	13.27%
0.6	9.08E-09	11.63	61.37	9.00E-03	2.94E-10	16.09%	43.10%	6.29E-03	18.63%
0.8	2.99E-09	12.68	64.04	2.97E-03	1.29E-10	18.64%	-13.50%	3.43E-03	21.19%
1.0	1.07E-09	13.01	65.28	1.07E-03	1.87E-11	22.67%	165.46%	4.01E-04	25.22%
1.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM4									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.01E-06	8.26	46.79	1.00E+00	4.25E-08	2.54%	0.00%	1.00E+00	2.54%
0.2	1.26E-07	8.72	54.23	1.25E-01	5.28E-09	7.03%	0.74%	1.24E-01	9.57%
0.4	2.54E-08	10.29	60.03	2.52E-02	9.88E-10	10.67%	8.36%	2.32E-02	13.22%
0.6	7.18E-09	10.78	63.42	7.12E-03	5.22E-10	16.96%	-42.03%	1.23E-02	19.50%
0.8	2.35E-09	11.78	65.52	2.33E-03	7.35E-11	18.85%	35.13%	1.73E-03	21.39%
1.0	8.29E-10	12.08	66.38	8.22E-04	1.64E-11	22.77%	113.71%	3.85E-04	25.32%
1.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

\* NA representa dados não simulados para a espessura definida.

Energia: 100kVp									
BM1									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.85E-07	9.94	53.72	1.00E+00	3.96E-08	2.66%	0.00%	1.00E+00	2.66%
0.2	2.75E-07	10.56	61.31	3.10E-01	1.08E-08	4.76%	13.78%	2.73E-01	7.42%
0.4	1.11E-07	12.12	67.40	1.26E-01	5.16E-09	7.31%	-3.68%	1.30E-01	9.97%
0.6	5.50E-08	12.83	71.34	6.21E-02	2.38E-09	10.35%	3.45%	6.00E-02	13.01%
0.8	3.03E-08	13.33	74.32	3.42E-02	1.21E-09	13.73%	12.02%	3.06E-02	16.39%
1.0	1.76E-08	13.57	76.56	1.99E-02	8.20E-10	14.91%	-3.84%	2.07E-02	17.57%
1.2	1.07E-08	13.74	78.48	1.21E-02	4.14E-10	16.63%	15.39%	1.05E-02	19.29%
1.4	6.77E-09	13.94	79.66	7.64E-03	3.23E-10	18.85%	-6.34%	8.16E-03	21.51%
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM2									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.85E-07	9.94	53.72	1.00E+00	3.96E-08	2.66%	0.00%	1.00E+00	2.66%
0.2	1.86E-07	10.85	63.21	2.11E-01	7.75E-09	5.67%	7.69%	1.96E-01	8.33%
0.4	5.96E-08	12.60	70.44	6.73E-02	2.77E-09	8.82%	-3.86%	7.00E-02	11.48%
0.6	2.52E-08	13.41	74.84	2.85E-02	9.51E-10	11.59%	18.53%	2.40E-02	14.25%
0.8	1.20E-08	13.62	77.71	1.36E-02	4.46E-10	14.32%	20.53%	1.13E-02	16.98%
1.0	6.12E-09	13.89	80.22	6.91E-03	3.90E-10	16.70%	-29.87%	9.86E-03	19.36%
1.2	3.37E-09	14.25	81.64	3.81E-03	8.75E-11	18.59%	72.39%	2.21E-03	21.25%
1.4	1.90E-09	14.61	82.85	2.15E-03	4.43E-11	20.73%	91.78%	1.12E-03	23.39%
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM3									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.85E-07	9.94	53.72	1.00E+00	3.96E-08	2.66%	0.00%	1.00E+00	2.66%
0.2	2.09E-07	11.58	61.16	2.36E-01	8.42E-09	5.33%	10.90%	2.13E-01	7.99%
0.4	6.60E-08	13.03	68.58	7.45E-02	3.28E-09	9.01%	-10.13%	8.29E-02	11.67%
0.6	2.70E-08	13.29	73.39	3.06E-02	1.07E-09	11.44%	13.15%	2.70E-02	14.10%
0.8	1.29E-08	13.48	76.56	1.45E-02	4.48E-10	14.37%	28.60%	1.13E-02	17.03%
1.0	6.62E-09	13.95	79.11	7.48E-03	2.72E-10	16.43%	8.80%	6.87E-03	19.09%
1.2	3.50E-09	14.06	80.53	3.95E-03	2.21E-10	18.29%	-29.11%	5.58E-03	20.95%
1.4	1.99E-09	14.69	82.01	2.25E-03	2.00E-10	20.29%	-55.46%	5.04E-03	22.95%
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM4									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.85E-07	9.94	53.72	1.00E+00	3.96E-08	2.66%	0.00%	1.00E+00	2.66%
0.2	1.82E-07	10.50	63.21	2.06E-01	8.00E-09	5.57%	1.99%	2.02E-01	8.23%
0.4	5.70E-08	12.30	70.49	6.44E-02	2.27E-09	9.21%	12.45%	5.73E-02	11.87%
0.6	2.34E-08	13.23	74.96	2.64E-02	1.13E-09	11.52%	-7.21%	2.85E-02	14.18%
0.8	1.09E-08	13.70	78.08	1.23E-02	6.01E-10	14.68%	-18.92%	1.52E-02	17.34%
1.0	5.59E-09	13.85	79.99	6.31E-03	2.85E-10	16.20%	-12.29%	7.20E-03	18.86%
1.2	3.01E-09	14.10	81.48	3.41E-03	2.40E-10	18.87%	-43.73%	6.05E-03	21.53%
1.4	1.62E-09	14.69	82.01	1.83E-03	1.07E-10	20.24%	-32.07%	2.70E-03	22.90%
1.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

\* NA representa dados não simulados para a espessura definida.

Energia: 120kVp									
BM1									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.34E-07	11.45	59.45	1.00E+00	3.50E-08	2.77%	0.00%	1.00E+00	2.77%
0.2	3.24E-07	12.19	68.37	3.89E-01	1.52E-08	4.11%	-10.24%	4.33E-01	6.88%
0.4	1.57E-07	13.66	75.82	1.88E-01	7.27E-09	6.02%	-9.31%	2.08E-01	8.79%
0.6	9.13E-08	14.39	80.95	1.09E-01	3.82E-09	7.65%	0.20%	1.09E-01	10.42%
0.8	5.78E-08	14.99	84.77	6.93E-02	2.57E-09	9.81%	-5.54%	7.33E-02	12.57%
1.0	3.90E-08	15.15	87.73	4.68E-02	1.65E-09	11.58%	-1.05%	4.73E-02	14.35%
1.2	2.71E-08	15.36	89.80	3.25E-02	1.34E-09	13.48%	-15.27%	3.84E-02	16.24%
1.4	1.94E-08	15.75	91.63	2.33E-02	8.83E-10	15.42%	-7.88%	2.52E-02	18.19%
1.6	1.40E-08	15.92	92.97	1.68E-02	4.95E-10	17.84%	18.91%	1.41E-02	20.61%
1.8	1.01E-08	16.00	94.15	1.21E-02	5.14E-10	20.23%	-17.62%	1.47E-02	23.00%
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM2									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.34E-07	11.45	59.45	1.00E+00	3.50E-08	2.77%	0.00%	1.00E+00	2.77%
0.2	3.24E-07	12.19	68.37	3.89E-01	1.12E-08	4.81%	21.96%	3.19E-01	7.58%
0.4	9.70E-08	14.30	80.26	1.16E-01	4.10E-09	7.54%	-0.74%	1.17E-01	10.30%
0.6	5.12E-08	14.95	85.85	6.13E-02	2.61E-09	9.58%	-17.71%	7.46E-02	12.35%
0.8	2.98E-08	15.44	89.62	3.58E-02	1.34E-09	12.34%	-6.38%	3.82E-02	15.11%
1.0	1.85E-08	15.62	92.19	2.22E-02	7.92E-10	13.82%	-1.86%	2.26E-02	16.59%
1.2	1.18E-08	16.00	94.20	1.42E-02	4.77E-10	16.49%	4.09%	1.36E-02	19.26%
1.4	7.74E-09	16.25	95.60	9.28E-03	2.52E-10	18.18%	29.03%	7.19E-03	20.95%
1.6	5.20E-09	16.40	96.89	6.23E-03	2.12E-10	19.07%	2.74%	6.06E-03	21.84%
1.8	3.48E-09	16.70	97.61	4.17E-03	1.74E-10	21.44%	-16.30%	4.98E-03	24.21%
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM3									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.34E-07	11.45	59.45	1.00E+00	3.50E-08	2.77%	0.00%	1.00E+00	2.77%
0.2	2.56E-07	13.11	69.10	3.07E-01	1.13E-08	4.80%	-4.81%	3.23E-01	7.56%
0.4	1.04E-07	14.56	78.55	1.25E-01	4.54E-09	7.18%	-3.98%	1.30E-01	9.94%
0.6	5.37E-08	15.23	84.53	6.44E-02	2.17E-09	10.19%	4.02%	6.19E-02	12.96%
0.8	3.11E-08	15.58	88.57	3.73E-02	1.59E-09	12.23%	-17.79%	4.53E-02	15.00%
1.0	1.94E-08	15.82	91.35	2.32E-02	9.28E-10	14.88%	-12.50%	2.65E-02	17.64%
1.2	1.24E-08	16.14	93.34	1.49E-02	5.46E-10	17.74%	-4.70%	1.56E-02	20.51%
1.4	8.11E-09	16.24	94.84	9.73E-03	3.44E-10	18.45%	-0.92%	9.82E-03	21.22%
1.6	5.39E-09	16.35	96.08	6.46E-03	2.30E-10	19.78%	-1.85%	6.58E-03	22.54%
1.8	3.69E-09	16.45	96.98	4.42E-03	2.17E-10	21.33%	-28.53%	6.19E-03	24.10%
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BM4									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (cm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	8.34E-07	11.45	59.45	1.00E+00	3.50E-08	2.77%	0.00%	1.00E+00	2.77%
0.2	2.31E-07	12.39	71.18	2.76E-01	9.94E-09	5.06%	-2.69%	2.84E-01	7.83%
0.4	9.40E-08	14.01	80.40	1.13E-01	4.03E-09	7.83%	-2.01%	1.15E-01	10.60%
0.6	4.87E-08	14.96	86.15	5.84E-02	2.20E-09	9.98%	-7.04%	6.28E-02	12.75%
0.8	2.80E-08	15.32	89.88	3.36E-02	9.75E-10	14.31%	2.39%	3.28E-02	17.08%
1.0	1.73E-08	15.67	92.54	2.08E-02	5.94E-10	15.31%	-4.37%	2.17E-02	18.08%
1.2	1.10E-08	16.18	94.54	1.32E-02	5.21E-10	17.10%	-5.40%	1.39E-02	19.87%
1.4	7.32E-09	16.29	95.82	8.77E-03	3.65E-10	18.14%	-6.70%	9.40E-03	20.90%
1.6	4.70E-09	16.52	97.01	5.64E-03	2.13E-10	19.42%	-7.40%	6.09E-03	22.18%
1.8	3.15E-09	16.83	98.07	3.77E-03	7.44E-11	21.68%	-16.37%	4.51E-03	24.45%
2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

\* NA representa dados não simulados para a espessura definida.

ANEXO E: Curva de ajuste da espessura em função da transmissão para diferentes tensões aceleradoras de tubo simuladas neste trabalho, para a argamassa baritada.

ENERGIA [kVp]	COMPOSIÇÃO	CURVA DE TENDÊNCIA	R <sup>2</sup>
80	BM1	$\text{Log}(T)=-0.00701-3.41402 X+1.08798 X^2+0.08737 X^3$	0,999
	BM2	$\text{Log}(T)=0.02382-5.39222 X+4.88054 X^2-2.83636 X^3$	0,997
	BM3	$\text{Log}(T)=0.0333-5.95132 X+6.3038 X^2-3.73908 X^3$	0,994
	BM4	$\text{Log}(T)=-0.0056-5.51097X+5.52401X^2-3.45224X^3$	0,994
100	BM1	$\text{Log}(T)=-0.02144-2.70749 X+1.34552 X^2-0.34097 X^3$	0,997
	BM2	$\text{Log}(T)=-0.01046-3.79202 X+2.46576 X^2-0.90699 X^3$	0,998
	BM3	$\text{Log}(T)=-0.00906-3.41707 X+1.62905 X^2-0.39585 X^3$	0,999
	BM4	$\text{Log}(T)=-0.01489-3.80398 X+2.44685 X^2-0.74691 X^3$	0,998
120	BM1	$\text{Log}(T)=-0.00354-2.00062 X+0.87011 X^2-0.18791 X^3$	0,995
	BM2	$\text{Log}(T)=-0.03649-2.31904 X+0.77924 X^2-0.11087 X^3$	0,996
	BM3	$\text{Log}(T)=-0.02798-2.42816 X+1.03078 X^2-0.20545 X^3$	0,996
	BM4	$\text{Log}(T)=-0.02184-2.75448 X+1.4463 X^2-0.35555 X^3$	0,999
150	BM1	$\text{Log}(T)=-0.01642-1.62448 X+0.91008 X^2-0.24098 X^3$	0,995
	BM2	$\text{Log}(T)=-0.05372-1.90253 X+0.87382 X^2-0.1831 X^3$	0,992
	BM3	$\text{Log}(T)=-0.04907-1.80508 X+0.72945 X^2-0.12947 X^3$	0,991
	BM4	$\text{Log}(T)=-0.04324-1.96857 X+1.01992 X^2-0.23663 X^3$	0,990

ANEXO F: Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto de concreto das referências NIST e Simpkin, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm.

Energia: 80kVp									
CONCRETO NIST									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.51E-06	8.29	46.88	1.00E+00	4.30E-08	2.06%	0.00%	1.00E+00	2.06%
2.5	1.15E-06	9.69	48.50	7.64E-01	3.33E-08	2.37%	-1.29%	7.74E-01	4.42%
5.0	9.16E-07	10.69	49.75	6.08E-01	2.61E-08	2.65%	0.10%	6.07E-01	4.71%
7.5	7.50E-07	11.30	50.78	4.98E-01	2.14E-08	2.97%	0.31%	4.96E-01	5.02%
10.0	6.25E-07	11.77	51.62	4.15E-01	1.79E-08	3.28%	-0.08%	4.15E-01	5.34%
12.5	5.27E-07	12.10	52.37	3.50E-01	1.48E-08	3.51%	1.37%	3.45E-01	5.56%
15.0	4.48E-07	12.30	52.99	2.97E-01	1.24E-08	3.86%	2.77%	2.89E-01	5.92%
17.5	3.83E-07	12.46	53.57	2.54E-01	1.13E-08	4.05%	-3.54%	2.63E-01	6.11%
20.0	3.30E-07	12.58	54.04	2.19E-01	8.22E-09	4.65%	14.66%	1.91E-01	6.70%
CONCRETO SIMPKIN									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Varição Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.51E-06	8.29	46.88	1.00E+00	4.30E-08	2.06%	0.00%	1.00E+00	2.06%
2.5	1.05E-06	10.10	49.09	6.99E-01	3.11E-08	2.44%	-3.42%	7.24E-01	4.50%
5.0	7.96E-07	11.19	50.70	5.28E-01	2.28E-08	2.91%	-0.25%	5.29E-01	4.97%
7.5	6.26E-07	11.83	51.93	4.15E-01	1.77E-08	3.27%	1.22%	4.10E-01	5.33%
10.0	5.04E-07	12.20	52.93	3.35E-01	1.52E-08	3.54%	-5.07%	3.53E-01	5.60%
12.5	4.13E-07	12.51	53.80	2.74E-01	1.19E-08	3.98%	-1.23%	2.77E-01	6.04%
15.0	3.42E-07	12.67	54.53	2.27E-01	9.54E-09	4.34%	2.38%	2.22E-01	6.39%
17.5	2.87E-07	12.76	55.15	1.90E-01	7.92E-09	4.85%	3.29%	1.84E-01	6.90%
20.0	2.41E-07	12.92	55.72	1.60E-01	7.22E-09	5.06%	1.47%	1.58E-01	7.11%

Energia: 100kVp									
CONCRETO NIST									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.33E-06	9.98	53.79	1.00E+00	3.72E-08	2.19%	0.00%	1.00E+00	2.19%
2.5	1.08E-06	11.26	55.33	8.17E-01	3.13E-08	2.41%	-2.84%	8.41E-01	4.61%
5.0	9.15E-07	12.10	56.52	6.91E-01	2.75E-08	2.60%	-6.73%	7.40E-01	4.79%
7.5	7.90E-07	12.58	57.47	5.96E-01	2.29E-08	2.85%	-3.37%	6.17E-01	5.05%
10.0	6.88E-07	12.90	58.30	5.19E-01	2.02E-08	3.02%	-4.17%	5.42E-01	5.21%
12.5	6.05E-07	13.11	58.98	4.57E-01	1.74E-08	3.21%	-2.60%	4.69E-01	5.40%
15.0	5.35E-07	13.26	59.61	4.04E-01	1.56E-08	3.47%	-3.67%	4.19E-01	5.66%
17.5	4.74E-07	13.38	60.14	3.58E-01	1.36E-08	3.66%	-2.14%	3.65E-01	5.86%
20.0	4.22E-07	13.48	60.65	3.18E-01	1.20E-08	3.82%	-1.21%	3.22E-01	6.01%

CONCRETO SIMPKIN									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.33E-06	9.98	53.79	1.00E+00	3.72E-08	2.19%	0.00%	1.00E+00	2.19%
2.5	1.02E-06	11.61	55.90	7.66E-01	2.95E-08	2.45%	-3.29%	7.93E-01	4.65%
5.0	8.24E-07	12.48	57.48	6.22E-01	2.35E-08	2.79%	-1.72%	6.32E-01	4.98%
7.5	6.88E-07	12.95	58.69	5.20E-01	1.99E-08	3.04%	-3.07%	5.36E-01	5.23%
10.0	5.86E-07	13.22	59.68	4.42E-01	1.80E-08	3.23%	-8.57%	4.84E-01	5.42%
12.5	5.05E-07	13.42	60.54	3.81E-01	1.40E-08	3.56%	1.17%	3.77E-01	5.75%
15.0	4.37E-07	13.54	61.30	3.30E-01	1.26E-08	3.71%	-2.90%	3.40E-01	5.91%
17.5	3.80E-07	13.66	61.94	2.87E-01	1.17E-08	3.99%	-8.52%	3.14E-01	6.18%
20.0	3.33E-07	13.76	62.54	2.52E-01	9.49E-09	4.36%	-1.45%	2.55E-01	6.55%

Energia: 120kVp									
CONCRETO NIST									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.25E-06	11.49	59.56	1.00E+00	3.68E-08	2.21%	0.00%	1.00E+00	2.21%
2.5	1.06E-06	12.59	60.95	8.52E-01	3.15E-08	2.37%	-0.57%	8.57E-01	4.58%
5.0	9.32E-07	13.20	62.11	7.46E-01	2.74E-08	2.58%	0.20%	7.45E-01	4.79%
7.5	8.28E-07	13.57	63.03	6.63E-01	2.38E-08	2.70%	2.52%	6.47E-01	4.91%
10.0	7.41E-07	13.81	63.83	5.94E-01	2.25E-08	2.83%	-3.14%	6.13E-01	5.04%
12.5	6.67E-07	13.96	64.56	5.34E-01	1.95E-08	3.03%	0.91%	5.29E-01	5.24%
15.0	6.02E-07	14.10	65.19	4.82E-01	1.70E-08	3.16%	4.61%	4.61E-01	5.37%
17.5	5.44E-07	14.19	65.76	4.36E-01	1.55E-08	3.44%	3.30%	4.22E-01	5.65%
20.0	4.94E-07	14.24	66.26	3.96E-01	1.46E-08	3.58%	-0.13%	3.96E-01	5.79%

CONCRETO SIMPKIN									
Transmissão de fótons obtido pelo KERMA					Transmissão de fótons obtido pela Energia Absorvida				
Espessura (mm)	KERMA (J.cm <sup>2</sup> /kg)	CSR (mm)	Energia Média (keV)	TRANSMISSÃO	Energia Absorvida (MeV)	ERRO Simulado	Variação Percentual (Transmissão)	TRANSMISSÃO	ERRO
0.0	1.25E-06	11.49	59.56	1.00E+00	3.68E-08	2.21%	0.00%	1.00E+00	2.21%
2.5	1.01E-06	12.87	61.57	8.09E-01	2.99E-08	2.46%	-0.50%	8.13E-01	4.67%
5.0	8.56E-07	13.52	63.10	6.86E-01	2.44E-08	2.71%	3.33%	6.64E-01	4.92%
7.5	7.42E-07	13.87	64.30	5.95E-01	2.16E-08	2.92%	1.11%	5.88E-01	5.13%
10.0	6.51E-07	14.10	65.35	5.22E-01	1.89E-08	3.08%	1.59%	5.13E-01	5.28%
12.5	5.75E-07	14.24	66.27	4.61E-01	1.69E-08	3.25%	0.48%	4.59E-01	5.46%
15.0	5.10E-07	14.37	67.10	4.08E-01	1.50E-08	3.45%	0.29%	4.07E-01	5.65%
17.5	4.56E-07	14.44	67.80	3.65E-01	1.34E-08	3.67%	0.50%	3.64E-01	5.88%
20.0	4.07E-07	14.52	68.48	3.26E-01	1.30E-08	3.67%	-8.05%	3.55E-01	5.88%

ANEXO G: Curva de ajuste da espessura em função da transmissão para diferentes tensões aceleradoras de tubo simuladas neste trabalho, para o concreto das referências NIST e Simpkin Dados da transmissão de fótons do material de blindagem composto de concreto das referências NIST e Simpkin, com energia de tubo de raios X de 80, 100 e 120 kVp, considerando alvo de tungstênio e filtração adicional de 3,0 mm.

Energia [KVp]	Referência	Equação de ajuste	R <sup>2</sup>
80	NIST	$T = 0.13145 + 0.85887 e^{(-x/8.76251)}$	0,9978
80	SIMPKIN	$T = 0.13204 + 0.85983 e^{(-x/6.74481)}$	0,9976
100	NIST	$T = 0.12732 + 0.86892 e^{(-x/13.4899)}$	0,9989
100	SIMPKIN	$T = 0.18568 + 0.80400 e^{(-x/9.06461)}$	0,9953
120	NIST	$T = 0.22168 + 0.77097 e^{(-x/13.3143)}$	0,9958
120	SIMPKIN	$T = 0.28632 + 0.70803 e^{(-x/8.51422)}$	0,9980
150	NIST	$T = -0.16060 + 1.14829 e^{(-x/32.556)}$	0,9960
150	SIMPKIN	$T = 0.25205 + 0.73890 e^{(-x/13.450)}$	0,9956