

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

**Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares**

**Aplicação das Tomografias Computadorizadas de Raios-X e  
Gama na Análise de Solo Simulado**

**ALEXANDRA CAROLINA GOMES DA FONSECA**

**Orientador: Dr. Carlos Costas Dantas**

**Orientador Externo: Dr. Richard John Heck**

**Co-Orientador: Dr. Antônio Celso Dantas Antonino**

**Recife, PE**

**04 de Julho, 2017**

**ALEXANDRA CAROLINA GOMES DA FONSECA**

**Aplicação das Tomografias Computadorizadas de Raios-X e  
Gama na Análise de Solo Simulado**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Doutor em Ciências, Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Indústria e Medicina.

**Orientador: Dr. Carlos Costas Dantas**

**Orientador Externo: Dr. Richard John Heck**

**Co-Orientador: Dr. Antônio Celso Dantas Antonino**

**Recife, PE**

**04 de Julho, 2017**

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

F676a Fonseca, Alexandra Carolina Gomes da  
Aplicação das tomografias computadorizadas de Raios-X e  
Gama na análise de Solo Simulado / Alexandra Carolina  
Gomes da Fonseca. - Recife: O Autor, 2017.  
180 f. : il., tabs.

Orientador: Dr. Carlos Costa Dantas.  
Orientador externo: Dr. Richard John Heck.  
Coorientador: Dr. Antônio Celso Dantas Antonino.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias  
Energéticas e Nucleares, 2017.

Inclui referências bibliográficas e apêndice.

1. Tomografia de Raios-X. 2. Tomografia de Raios Gama.  
3. Fantom do solo. I. Dantas, Carlos Costa, orientador. II.  
Heck, Richard John, orientador. III. Antonino, Antônio Celso  
Dantas, coorientador. IV. Título.

CDD 621.48 (21. ed.)

UFPE  
BDEN/2017-29

# **Aplicação das Tomografias Computadorizadas de Raios-X e Gama na Análise de Solo Simulado**

**Alexandra Carolina Gomes da Fonseca**

**APROVADA EM: 18.07.2017**

**ORIENTADORES : Prof. Dr. Carlos Costa Dantas**

**Prof. Dr. Richard John Heck**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino**

*COMISSÃO EXAMINADORA:*

---

**Prof. Dr. Carlos Costa Dantas -DEN/UFPE**

---

**Prof. Dr. Mario Augusto Bezerra da Silva –DEN/UFPE**

---

**Prof. Dr. Silvio de Barros Melo –CIN/UFPE**

---

**Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa –UAEPetro**

---

**Profa. Dra. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel - FITANTROP/UFRPE-**

Visto e permitida a impressão

---

Coordenador (a) do PROTEN/DEN/UFPE

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por permitir a existência de sonhos... À minha família, em especial as tias Lidia Maria e Lenita Fonseca que estavam tão próximas nas lutas e nas percas, aos tios (Romeu Fonseca, Pedro Fonseca, Delio M. Fonseca), tias (Marluce e Fatima) e primos, cunhados e sogra por sempre me apoiarem em minhas decisões.

Ao Prof. Dr. Carlos Costa Dantas por inicialmente aceitar me orientar e por todo o trajeto ser um grande incentivador. Obrigada pela colaboração e dedicação ao meu trabalho, obrigada pela disposição incondicional.

Ao Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino por me presentear com a oportunidade de trabalhar em um equipamento maravilhoso e pela confiança em todos os anos de interação com o laboratório.

Ao Prof. Dr. Richard John Heck pela oportunidade, confiança e interação ao longo desse trabalho.

Aos professores, Carlos Alberto Brayner de O. Lira, Mario Augusto Bezerra da Silva e Silvio Barros Melo, pela participação e colaboração em minhas bancas de seminários, qualificação e defesa.

Aos amigos Marcio Paixão, Larissa Fernandes, Cassia Machado, Alex Moura, Wallace e Rodrigo Lustosa com os quais sempre pude contar, obrigada pelo companheirismo e carinho.

A todos os membros do Laboratório de Radioquímica/ Fluidodinâmica e Tomografia de Raios Gama do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco por toda interação, dedicação e experiência ao longo do trabalho.

A instituição CAPES por conceder a minha bolsa de estudo, ao Lab. de Aplicações da Radiação Gama e X à Tomografia, Reconstrução, Fluidodinâmica e testes não destrutivos do Departamento de Energia Nuclear por fornece a infraestrutura necessária para desenvolvimento de minha pesquisa.

A

**Maria Gomes da Fonseca** (In memoriam),

‘Em palavras a gratidão, o amor e a saudade tornam-se pequenas.

Obrigada por ser meu exemplo de mulher... Poucas ...muito poucas... Conseguirão ser generosa, amável e forte. Como você mãe.’

**‘As Rosas Não Falam**

(Cartola)

‘Bate outra vez

Com esperanças o meu coração

Pois já vai terminando o verão enfim

Volto ao jardim

Com a certeza que devo chorar

Pois bem sei que não queres voltar para mim

Queixo-me às rosas, mas que bobagem

As rosas não falam

Simplesmente as rosas exalam

O perfume que roubam de ti, ai...

Devias vir

Para ver os meus olhos tristonhos

E, quem sabe, sonhar os meus sonhos

Por fim.’

“Ao Marido, amigo e companheiro de vida... Enivaldo ... Obrigada pelo amor, carinho e por me trazer de volta ... por amar a garota que dirigia às quatro da manhã muito brava devido a tantos erros da equipe de saúde e para chegar a tempo ao hospital (foram muitas as peregrinações) ... obrigada por estar com essa garota em todos os momentos.”

## RESUMO

A aplicação das duas tomografias teve como objetivo o estudo do comportamento do feixe de Raios – X em um fantom de solo tropical, após a filtração adicional e operando em intervalos de tensões entre 100 kV a 225kV. Para esse estudo foram utilizadas duas metodologias amplamente difundidas, que formaram uma metodologia única para a caracterização de materiais minerais do solo. Os equipamentos utilizados foram um micro - CT de Raios – X e um tomógrafo industrial de Raios Gama. Além da parte experimental, o estudo contou com uma fase simulada com os softwares *XCOM* e *SpekCalc*, essa fase foi de suma importância porque serviu de referência para as análises dos dados com as duas tomografias. As medições para avaliação da qualidade do feixe foram realizadas com software *SpekCalc*, as mesmas foram realizadas utilizando os mesmos parâmetros da fase de medidas do tomógrafo de Raios – X, os dados de saída analisados foram camada semi-redutora, energia média, energia efetiva e coeficiente de homogeneidade. Com o tomógrafo de Raios gama foi encontrado dado de intensidade relativa para os materiais puros, e a partir deles foram obtidos os valores de coeficiente de atenuação e densidade dos materiais. Com a técnica de atenuação de Raios – X foram realizadas medidas no fantom do solo e obtidos valores da atenuação de Hounsfield. A junção das metodologias mostrou que a boa resolução de densidade da tomografia de Raios gama foi de suma importância ao longo do estudo, porque indicou as melhorias da fase de construção do fantom, além de indicar os ajustes necessários para fase de medidas. Além da boa resolução temporal e espacial da tomografia de Raios – X, que detém um menor tempo de escaneamento e uma capacidade maior de detalhamento de materiais com dimensões muito pequenas ou particuladas (como os minerais utilizados) devido a sua resolução espacial.

**Palavras Chaves:** Tomografia de Raios-X. Tomografia de Raios Gama. Fantom do solo.

## **ABSTRACT**

The application of the two tomographies had the objective of studying the behavior of the X-ray beam in a tropical soil phantom, after additional filtration and operating in voltage ranges between 100 kV and 225 kV. For this study, two widely used methodologies were used which formed a unique methodology for the characterization of soil mineral materials. The equipment used was a micro-CT of X-rays and an industrial tomograph of gamma rays. In addition to the experimental part, the study had a simulated phase with the XCOM and SpekCalC softwares this phase was of great importance because it served as reference for the analysis of the data with the two tomographies. Measurements for beam quality evaluation were performed using SpekCalC software, which were performed using the same parameters as the X-ray tomograph measurements, the output data analyzed were semi-red, medium energy, effective energy and coefficient of homogeneity. With the gamma ray tomography, relative intensity data were obtained for the pure materials, and from them the values of the attenuation coefficient and density of the materials were obtained. With the X-ray attenuation technique, measurements were made on soil phantom and Hounsfield attenuation values were obtained. The combination of methodologies showed that the good resolution of gamma ray tomography was of paramount importance during the study because it indicated the improvements of the phantom construction phase, besides indicating the necessary adjustments for the measurement phase. In addition to the good temporal and spatial resolution of X-ray tomography, which has a shorter scanning time and a greater capacity for detailing materials with very small or particulate dimensions (such as the minerals used) due to their spatial resolution.

**Keywords:** Tomography of X-rays. Tomography of Gamma Rays. Phantom of the soil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais óxidos do solo .....	27
Figura 2: Formação da imagem .....	31
Figura 3: Visualização de uma amostra de solo em 3D. ....	33
Figura 4: Influência dos materiais do filtro no feixe de Raios-X, sobre a atenuação aparente do material do solo. ....	33
Figura 5: Influência da energia do fóton e número atômico do absorvedor, no processo de absorção da radiação pela matéria .....	34
Figura 6: Espectro característico do $^{137}\text{Cs}$ .....	38
Figura 7: Espectro característico do tomógrafo de Raios –X.....	39
Figura 8: Componentes básicos do Tomógrafo .....	40
Figura 9: Componentes do Tubo de Raios – X. ....	41
Figura 10: Variação da corrente no espectro de Raios – X. ....	41
Figura 11: Aumento da tensão (kV) no espectro de Raios-X.....	42
Figura 12: Tomógrafo de primeira geração .....	45
Figura 13: Tomógrafo de Segunda Geração .....	45
Figura 14: Tomógrafo de terceira Geração.....	46
Figura 15: Tomógrafo de Quarta Geração.....	47
Figura 16: Perfil de cone de alumínio obtido com tomográfica de Raios – X. ....	48
Figura 17: Fluxograma das etapas experimentais.....	50
Figura 18: Interface de entrada para determinação de mistura, composto ou elemento no software XCOM. ....	51
Figura 19: Interface de entrada para utilização da faixa de energia e fração mássica da mistura no <i>software</i> XCOM. ....	52
Figura 20: Fluxograma das etapas do <i>software</i> XCOM.....	53
Figura 21: Variáveis de entrada e saída do software SpekCalc.....	55
Figura 22: Espectro de Raios – X simulado a partir do <i>software</i> SpekCalc, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de $18^\circ$ , filtração inerente de $0,5\text{ mm}$ de <i>Be</i> , tensão aplicada ao tubo de Raios – X de $225\text{ kV}$ .....	56
Figura 23: Suporte de tudo de ensaio e a dimensões do mesmo. ....	61
Figura 24: Tubo de ensaio de plástico transparente. ....	61
Figura 25: Recipiente das amostras do presente trabalho. ....	62

Figura 26: Suporte de tubo de ensaio individual para os experimentos no tomógrafo computadorizado de raios gama. ....	62
Figura 27: Materiais Puro da Tabela 3 e mais Água em tubos de ensaio. ....	63
Figura 28: Misturas $A_n$ e $B_n$ confinadas nos tubos de ensaios, em ordem decrescente da quantidade de oxido de sílica, da esquerda para a direita. ....	64
Figura 29: Fantom solo tropical utilizando no presente trabalho. ....	65
Figura 30: Organização dos Materiais do Fantom solo tropical. ....	66
Figura 31: Volume de referência para determinação da densidade do material particulado. ....	66
Figura 32: Tubos de ensaios com os materiais da Tabela 3. ....	67
Figura 33: Região delimitada para determinação da densidade. ....	68
Figura 34: Tomógrafo de terceira geração com fonte de radiação de Raios – X, modelo XT H 225 ST da Empresa Nikon Metrology. ....	69
Figura 35: Fonte de radiação de Raios – X do TCi – 3 <sup>a</sup> G. ....	70
Figura 36: Conjunto de filtros adicionais do TCi – 3 <sup>a</sup> G. ....	71
Figura 37: Detector de Raios – X de tela plana. ....	72
Figura 38: Sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X. ....	72
Figura 39: Sistema de controle do TCi – 3 <sup>a</sup> G, modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology. ....	73
Figura 40: Interfase de entrada do software Inspect-X. ....	73
Figura 41: As diferentes espessuras e tensões para os materiais de filtros adicionais de Raios – X, como alumínio ( <sup>13</sup> Al); cobre ( <sup>29</sup> Cu) e estanho ( <sup>50</sup> Sn), utilizados no presente trabalho. ....	74
Figura 42: Fluxograma de Medidas com Tomografia de Raios – X. ....	75
Figura 43: Projecção e sinograma na condição de tensão no tubo de Raios – X de 125 kV, corrente eléctrica de 194 µA e filtro adicional de cobre de espessura de 0,1 mm. ....	76
Figura 44: Interface do software CT PRO 3D. ....	77
Figura 45: Resultado tomográfico do fantom solo tropical. ....	78
Figura 46: Fluxograma de tratamento de imagens no ImageJ ou MatLab. ....	78
Figura 47: Máscaras dos volumes de análise no presente trabalho, conforme a Tabela 8. ....	79
Figura 48: Localização dos materiais conforme o processo de cluster (ver Tabela 9). ....	82
Figura 49: Histograma dos materiais que compõem o fantom solo tropical. ....	83
Figura 50: Histograma do material $M_{B, VII}$ (Tabela 10). ....	83
Figura 51: Esquema do arranjo fonte, amostra e detector, respectivamente (TGCi – 1 <sup>a</sup> G). ....	85
Figura 52: Sistema de controle TGCi – 1 <sup>a</sup> G do mecanismo de varredura. ....	85

Figura 53: Interface dos programas de controle TGCi – 1ªG.....	86
Figura 54: Região de escaneamento da amostra no presente trabalho. ....	87
Figura 55: Planejamento da Tomografia Gama.....	93
Figura 56: Tubo com Amostras no Suporte.....	95
Figura 57: Tarugo de Resina .....	95
Figura 58: Simulação do logaritmo da intensidade relativa versus o produto $\mu x$ para água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro e cobre, para a energia do gama do $^{241}\text{Am}$ . ....	97
Figura 59: Simulação do logaritmo da intensidade relativa versus o produto $\mu x$ para água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro e cobre, para a energia do gama do $^{137}\text{Cs}$ . ....	98
Figura 60: Logaritmo da intensidade relativa simulada contra o produto $\mu\rho$ obtidos no <i>XCOM</i> da água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro, para a energia do gama do $^{241}\text{Am}$ e valores de $x_1$ e $x_2$ .....	98
Figura 61: Logaritmo da intensidade relativa simulada contra o produto $\mu\rho$ obtidos no <i>XCOM</i> da água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro, para a energia do gama do $^{137}\text{CS}$ e valores de $x_1$ e $x_2$ . ....	99
Figura 62: Variação do coeficiente de atenuação de massa dos óxidos versus a energia do fóton incidente para fonte de $^{137}\text{Cs}$ .....	101
Figura 63: Processo para determinação da intensidade Relativa e do Coeficiente de Atenuação de massa.....	103
Figura 64: Espectro de Raios - X simulado a partir do software <i>SpekCalc</i> , para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV. ....	104
Figura 65: Espectro de Raios – X simulado a partir do <i>software SpekCalc</i> , para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125; 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando – se filtração adicional de 0,50 mm de Al. ....	104
Figura 66: Espectro de Raios – X simulado a partir do <i>software SpekCalc</i> , para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando – se filtração adicional de 0,50 mm de Cu.....	105
Figura 67: Espectro de Raios – X simulado a partir do <i>software SpekCalc</i> , para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões	

aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando-se filtração adicional de 0,50 mm de Sn. ....	105
Figura 68: Atenuação do filtro adicional de alumínio para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X.....	106
Figura 69: Atenuação do filtro adicional de cobre para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X.....	107
Figura 70: Atenuação do filtro adicional de estanho para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X.....	107
Figura 71: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 100 kV. ....	108
Figura 72: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 125 kV. ....	109
Figura 73: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 150 kV. ....	109
Figura 74: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 175 kV. ....	110
Figura 75: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 200 kV. ....	110
Figura 76: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 225 kV. ....	111
Figura 77: Perfil da atenuação ( $I/I_0$ ) para o material puro 100% de $\text{SiO}_2$ para uma tensão de 100 kV. ....	112
Figura 78: Perfil da atenuação ( $I/I_0$ ) para a mistura V (5% de $\text{Al}_2\text{O}_3$ e 95% de $\text{SiO}_2$ ) para uma tensão de 100 kV. ....	113
Figura 79: Densidade do quartzo: valor simulado versus valor de referência.....	114
Figura 80: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio ( $^{13}\text{Al}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.....	116
Figura 81: Perfil da energia média do feixe de Raios – X em função da espessura da filtração adicional de cobre ( $^{29}\text{Cu}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.....	116
Figura 82: Perfil da energia média do feixe de Raios – X em função da espessura da filtração adicional de estanho ( $^{50}\text{Sn}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV. ....	117
Figura 83: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 100 kV.....	118

Figura 84: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 125 kV.....	118
Figura 85: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 150 kV.....	119
Figura 86: Perfil da energia média do feixe de raios X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 175 kV.....	119
Figura 87: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 200 kV.....	120
Figura 88: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 225 kV.....	120
Figura 89: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de alumínio nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV. ....	122
Figura 90: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de cobre nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.....	122
Figura 91: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de estanho nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV. ....	123
Figura 92: Comparação dos perfis dos coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão aplicada ao tubo de Raios X de 100kV. ....	123
Figura 93: Número de fótons transmitidos nas condições de tubo vazio e com materiais.....	124
Figura 94: Número de fótons transmitidos nas condições de tubo vazio e com materiais.....	125
Figura 95: Densidade aparente da água, quartzo, coríndon e hematita numa seção transversal do tubo de ensaio. ....	126
Figura 96: Intensidade relativa da água.....	127
Figura 97: Intensidade relativa do quartzo .....	127
Figura 98: Intensidade relativa do coríndon.....	128
Figura 99: Intensidade relativa da hematita.....	128
Figura 100: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de raios - X, com filtro adicional de alumínio de espessuras 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 2,50mm. ....	133
Figura 101: Potência de entrada no tubo de Raios - X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios - X iguais a 100, 125, 150, 175 e 200kV. ....	134

Figura 102: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV. ....	135
Figura 103: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,50mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 150, 175, 200 e 225kV. ....	136
Figura 104: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 1,00mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175 e 200. ....	137
Figura 105: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 2,00mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV. ....	138
Figura 106: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 2,50mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 175, 200 e 225kV. ....	139
Figura 107: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, com filtro adicional de cobre de espessuras 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 e 2,50mm.....	140
Figura 108: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV. ....	141
Figura 109: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV. ....	142
Figura 110: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 175, 200 e 225kV. ....	143
Figura 111: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 1,0mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV. ....	144
Figura 112: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 1,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV. ....	145

Figura 113: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 2,0mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 175, 200 e 225kV. ....	146
Figura 114: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 2,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 200 e 225kV. ....	147
Figura 115: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, com filtro adicional de estanho de espessuras 0,10; 0,25 e 0,50mm. ....	148
Figura 116: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175 e 225kV. ....	149
Figura 117: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 125, 150, 200 e 225kV. ....	150
Figura 118: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0.5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175 e 225kV. ....	151
Figura 119: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de alumínio, para as tensões aplicadas ao tubo de Raios – X igual a 100; 125; 150; 175; 200 e 225kV. ....	152
Figura 120: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100kV e filtro de alumínio. ....	153
Figura 121: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de alumínio. ....	154
Figura 122: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de alumínio. ....	155
Figura 123: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de alumínio. ....	156

Figura 124: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 200kV e filtro de alumínio. ....	157
Figura 125: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de alumínio. ....	158
Figura 126: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de cobre, para as tensões aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100; 125; 150; 175; 200 e 225kV. ....	159
Figura 127: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100kV e filtro de cobre. ....	160
Figura 128: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de cobre. ....	161
Figura 129: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de cobre. ....	162
Figura 130: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de cobre. ....	163
Figura 131: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 200kV e filtro de cobre. ....	164
Figura 132: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de cobre. ....	165
Figura 133: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de estanho, para as tensões aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125; 150; 175 e 225kV. ....	166
Figura 134: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de estanho. ....	167

Figura 135: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de estanho. ....	168
Figura 136: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de estanho. ....	169
Figura 137: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de estanho. ....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeitos da filtração.....	43
Tabela 2: Fatores Influenciadores do Espectro de Raios – X.....	43
Tabela 3: Propriedades físicas dos materiais utilizados no presente trabalho.....	60
Tabela 4: Equipamentos utilizados na determinação da densidade.....	60
Tabela 5: Massa das misturas utilizadas para simular uma composição de um solo tropical. .	63
Tabela 6: Frações mássicas das misturas particuladas no presente trabalho. ....	65
Tabela 7: Propriedade física dos materiais dos filtros, no presente trabalho. ....	71
Tabela 8: Quantidade de máscaras para o presente estudo.....	80
Tabela 9: Organização da localização das matérias em estudo no processo de cluster.....	80
Tabela 10: Valores atribuídos às regiões contendo as misturas A e B, em estudo.....	81
Tabela 11: Valores atribuídos às matérias de referência em estudo.....	81
Tabela 12: Parâmetros do sistema de controle do TGCi – 1ªG. ....	87
Tabela 13: valores dos diâmetros do tarugo para n=10 em $x_1$ e $x_2$ .....	96
Tabela 14: valores das médias e desvio padrão.....	96
Tabela 15: Valores do $x_{\text{tabelado}}$ e do $x_{\text{calculado}}$ para os níveis de significância de 0.01 e 0.05....	96
Tabela 16: Valor de coeficiente de atenuação linear e da atenuação via $XCOM$ e Tomografia Gama.....	102
Tabela 17: Material do filtro versus $N^\circ$ Atômico.....	108
Tabela 18: Análise da Qualidade da Radiação.....	115
Tabela 19: Análise de HVL do filtro de alumínio.....	121
Tabela 20: Densidade aparente dos materiais utilizando os métodos da balança e Tomografia Gama.....	125
Tabela 21: Valores teórico e experimental do coeficiente de atenuação linear e atenuação..	129
Tabela 22: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de alumínio.....	129
Tabela 23: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de cobre. ....	130
Tabela 24: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de estanho.....	130

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
2.1 O solo.....	27
2.2 Considerações Gerais .....	31
2.3 Interação da Radiação com a Matéria.....	34
2.3.1 Efeito Fotoelétrico .....	34
2.3.2 Espalhamento Compton.....	35
2.3.3 Produção de Pares .....	35
2.4 Atenuação da Radiação .....	36
2.5 Espectros Característicos .....	37
2.5.1 Fatores que Afetam o Espectro de Raios-X.....	39
2.5.1.1 Corrente no tubo.....	41
2.5.1.2 Tensão aplicada no Tubo de Raios – X (Energia – kV) .....	42
2.5.1.3 Filtração Adicional .....	42
2.5.1.4 Material do Alvo (número atômico do material).....	43
2.6 Tomografia Computadorizada .....	44
2.6.1 Geração de Tomógrafos.....	44
2.6.2 Artefatos de Imagem e Endurecimento do Feixe ( <i>Beam Hardening</i> ) .....	47
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1 Descrição dos Ensaios Experimentais.....	50
3.1.1 Simulação determinística.....	51
3.1.1.1 Software XCOM .....	51
3.1.1.1.1 Medidas com XCOM .....	52
3.1.1.2 Software SpekCalc .....	54
3.1.1.2.1 Medidas com SpekCalc.....	56
3.1.2 Preparações das amostras .....	60
3.1.2.1 Construção do fantom solo tropical.....	62
3.1.2.1.1 Fantom Solo Tropical.....	65
3.1.2.2 Construção do fantom densidade.....	66
3.1.2.2.1 Determinação do volume de referência do tubo de ensaio.....	66
3.1.2.2.2 Pesagem das massas dos materiais .....	67

3.1.1.2.3 Fantom densidade.....	67
3.1.2 Método gravimétrico .....	68
3.1.4 Tomógrafo de Raios – X.....	68
3.1.4.1 Componentes de um Sistema TCi – 3 <sup>a</sup> G.....	69
3.1.4.1.1 Fonte de radiação de Raios – X.....	69
3.1.4.1.2 Filtração da radiação dos Raios – X.....	70
3.1.4.1.3 Detector de Raios – X .....	71
3.1.4.1.4 Sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X.....	72
3.1.4.1.5 Aquisição de dados.....	73
3.1.4.2 Condições de operações.....	74
3.1.4.3 Medidas com Tomógrafo de Raios – X.....	75
3.1.4.3.1 Reconstrução tomográfica.....	76
3.1.4.3.2 Técnica de Pré – processamento das imagens tomográficas .....	77
3.1.4.4 Pós-processamento .....	83
3.1.5 Tomógrafo de Raios Gama.....	84
3.1.5.1 Tomógrafo Gama Computadorizado Industrial de 1 <sup>a</sup> Geração (TGCi – 1 <sup>a</sup> G).....	84
3.1.5.4 Técnica de atenuação de radiação gama: Modelagem Matemática.....	87
3.1.5.4.1 Técnica de determinação de parâmetros .....	89
3.1.5.4.2 Curva de calibração .....	90
3.1.5.4.3 Regressão por Mínimos Quadrados .....	91
3.1.5.4.4 Qualidade do ajuste .....	92
3.1.5.5 Medidas com Tomógrafo de Raios Gama .....	93
3.1.5.5.1 Fonte de Erros .....	94
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>100</b>
<b>4.1 Coeficiente de atenuação dos materiais Puros com Tomografia.....</b>	<b>100</b>
<b>4.2 Simulações determinísticas .....</b>	<b>102</b>
4.2.1 Avaliação da atenuação ( $I/I_0$ ) e do Número atômico.....	106
4.2.2 Medidas da Densidade Radiométrica .....	113
4.2.3 Resultados dos parâmetros qualificadores do feixe.....	114
<b>4.3 Transmissão gama dos óxidos em estudo .....</b>	<b>124</b>
4.3.1 Determinação da densidade aparente do meio .....	125
4.3.2 Cálculo do coeficiente de atenuação linear e atenuação.....	126
<b>4.4 Atenuação de Hounsfield da composição da fase sólida mineral .....</b>	<b>129</b>

4.4.1 Influência da tensão aplicada no tubo de Raios – X na determinação da atenuação de Hounsfield. ....	130
4.4.1.1 Análise da espessura do filtro adicional de alumínio .....	133
4.4.1.2 Análise da espessura do filtro adicional de cobre .....	140
4.4.1.3 Análise da espessura do filtro adicional de estanho .....	148
4.4.2 Influência da espessura do filtro de alumínio na determinação da atenuação Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica .....	152
4.4.2.1 Análise da tensão aplicada no tubo de Raios – X, com filtro adicional de alumínio. ....	152
4.4.2.2 Análise da tensão aplicada no tubo de raios – X, com filtro adicional de cobre .....	159
4.4.2.3 Análise da tensão aplicada no tubo de raios – X, com filtro adicional de estanho.....	166
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>171</b>
<b>5.1 CONCLUSÃO.....</b>	<b>171</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS SIMULADOS DO SOFTWARE</b>	
<b>SPEKCALC .....</b>	<b>179</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 1967, na Inglaterra, o engenheiro eletricista Godfrey N. Hounsfield e o biólogo Allan Cormack deram início ao desenvolvimento do primeiro tomógrafo para uso médico. Pelo pioneirismo das pesquisas em tomografia, no ano de 1979, Hounsfield e Cormack dividiram o prêmio Nobel em Fisiologia e Medicina. A mesma por ser um teste não destrutivo abriu novas possibilidades em diversos campos da pesquisa como engenharia, agronomia, biologia, física, química, petroquímica e arqueologia, etc. A tomografia computadorizada faz uso de uma fonte eletromagnética (Raios X ou gama), colocada diametralmente oposta a um detector ou conjunto deles, em volta do objeto ou corpo de estudo (organismos vivos ou materiais diversos). A atenuação sofrida pelo feixe de radiação ao atravessar o objeto é mensurada pelos detectores de radiação que se movimentam em sincronismo com a fonte.

Os dados obtidos pelos detectores são enviados para um software de reconstrução de imagens e processados por um computador. As imagens são obtidas em seções ou ‘fatia’ do objeto. Em termos simplistas uma análise com tomografia indica a quantidade de radiação absorvida por cada parte do objeto analisado e traduz essas variações para escala de cores que se relaciona com a densidade de cada voxel do objeto, por isso a mesma produz uma imagem representativa. Cada pixel da imagem corresponde ao coeficiente de atenuação da radiação  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) de um determinado ponto de absorção do objeto a ser analisado (Carvalho, 2014).

O uso da tomografia computadorizada aplicada à física do solo no Brasil tem registros variando de 1985 e 2017. No entanto, inicialmente eram utilizados equipamentos médicos, mas seu preço e as dificuldades envolvidas na calibração fizeram a sua utilização inviável para a investigação aplicada em física do solo. Por isso, alguns grupos de pesquisa criaram tomógrafos de primeira geração, com fonte de Raios gama para estudar a compactação do solo, a impermeabilização da superfície do solo, os efeitos de ciclos de secagem e umedecimento, sobre a estrutura do solo, a porosidade e distribuição do tamanho de poro, o movimento da água através do solo e os efeitos dos sistemas de gestão agrícolas na estrutura do solo (Pires et al., 2010). Estes scanners, no entanto, apresentaram limitações em relação aos disponíveis comercialmente. Suas fontes de radiação ( $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ ) emitem altos níveis de energia que exigiam blindagem pesada para o operador, e os seus feixes de radiação eram de secção transversal milimétrica, obtendo-se imagens de solo de resolução espacial não muito interessante para o estudo de meios porosos do solo na escala micrométrica, além de requerer um tempo muito longo para aquisição dos dados (várias horas ou mesmos dias)

devido à configuração do sistema, também não permite análises de processos de movimento de águas dinâmicas (Pires et al, 2010).

É importante mencionar que estas contribuições pioneiras usando TC de Raios gama e Raios-X em ciência solo realizados no Brasil foram uma consequência da utilização de radiação gama para a medição da densidade do solo e teor de água do solo pelos cientistas brasileiros Klaus Reichardt e Epaminondas Sansigolo de Barros Ferraz nas suas teses pioneiras (Reichardt, 1965; Ferraz, 1974). Estas contribuições definem praticamente o início da utilização de fontes radioativas na pesquisa física do solo. Entretanto, esses estudos, em sua maioria são realizados na escala milimétrica e em duas dimensões (2D), que não permitem a análise detalhada da estrutura do solo, na escala de micro e mesoporos que são importantes para melhor compreender os processos de retenção e transmissão de água em tais meios. O desenvolvimento mundial de estudos com microtomografia de Raios – X na escala micrométrica para analisar vários fenômenos em física de solo, alavancou o conhecimento da ciência do solo quando trata-se da dinâmica do solo (Brandsma *et al.* de 1999; Baveye *et a.*, 2002; Wildenschild *et al.*, 2002, Rogasik *et al.*, 2003; Monga *et al*, 2007; Tippkotter *et al.*, 2009). No Brasil ainda são incipientes estes estudos, devido ao elevado preço dos scanners comerciais, dedicados exclusivamente à pesquisa ambiental (Macedo *et al.*, 1998; Macedo *et al.*, 1999).

Por conseguinte, em muitas áreas a tomografia vem se tornando uma ferramenta pioneira em construções de novas e modernas metodologias, que causam verdadeiros avanços nesses estudos. Um exemplo muito atual é a aplicação da TC em estudos de testemunho de rochas de reservatório. Mendes (2010), aplicando tomografia em análise de testemunho de concreto, para visualização de vazios, disposição de agregado e identificação do volume de britas no interior das amostras de concreto, mostrou que a tomografia é satisfatória para essa análise, além de ser uma nova proposta metodológica para visualização interna dos vazios das britas e da argamassa. A mesma também dá uma estimativa da massa específica do concreto, além de ser utilizado nas amostras de forma não destrutiva.

Oliveira (2012), na caracterização do espaço poroso com microtomografia computadorizada por transmissão de Raios –X ( $\mu$ -CT), para visualização da estrutura de poros e/ou fraturas, é caracterização da fluidez do reservatório a partir das variações do coeficiente de atenuação do material geológico, mostrou que a TC é aplicável a essa área de descrição do sistema poroso de poços. Porque a mesma permite uma análise tridimensional da distribuição e conectividade dos poros sem causar destruição da amostra, conservando as características

naturais dos poros. Esse estudo concluiu que a técnica é bastante relevante para pesquisa de engenharia de reservatório.

Heck et al (2015), utilizando tomografia, observaram alterações microscópicas na qualidade da estrutura de um solo, durante um ano inteiro, através da geração de imagens em 3D. Para isso, amostras desse solo foram tiradas em pontos diferentes - do pré-plantio, meados da temporada, e pós-colheita. As pequenas alterações do solo são importantes para caracterizar o impacto desses plantios, além de considerar o impacto sobre o solo e o quanto o mesmo pode sustentar a vida das plantas a cada temporada que passa. Uma vez coletada uma amostra do núcleo do solo, a mesma será colocada no tomógrafo computadorizado de Raios-X, para analisar em conjunto a estrutura do solo com a sua textura, além das partículas sólidas, espaços porosos e até mesmo insetos que vivem dentro de cada camada, com essa análise pode-se ter uma noção da hidráulica do solo. Nos trabalhos de Heck et al (2015), uma componente-chave da qualidade do solo, é a forma como o solo é capaz de absorver, reter e mover a água foram analisados. Com a tomografia de amostras de solo, os pesquisadores podem entender melhor o que os diferentes tipos de impacto e suas respectivas estruturas têm haver com o movimento da água no solo. Através das imagens de seus solos, pesquisadores obtêm indicadores da qualidade do mesmo, conseqüentemente os mesmos serão capazes de determinar que qualidades produtores precisam procurar, e que impactos suas práticas de gestão estão relacionadas com seu solo.

Meng et al. (2015), utilizando tomografia para quantificar e analisar a rede de macroporos em colunas de solo intactas, através de características peculiares em diferentes comunidades de florestas, avaliaram e quantificaram a estrutura de macroporos. Este método provou ser acurado na quantificação da estrutura de macroporos. Como resultado, eles obtiveram que as florestas mistas, por terem um sistema mais complexo, com solo com melhor estrutura e maior atividade biológica, apresentaram maiores diâmetros, área de superfície, densidade de rede e comprimento de densidade do que as florestas onde só havia um tipo de árvore.

O estudo de Hu et al. (2016) teve como objetivo quantificar a arquitetura dos solos abaixo de três plantas (*Kobresia meadow*, *Achnatherum splendens* e *Pontetilla fruticosa*), utilizando a tomografia computadorizada, foi coletado cinco amostras (0 – 50cm) e escaneadas. Os resultados indicam que a *A. splendens* e a *P. fruticosa* possuíam maior macroporosidade e são mais desenvolvidos e possuem macroporos mais longos do que nos outros tipos de vegetação, o que pode ser atribuído a um maior desenvolvimento das raízes, além de mostrar que a técnica da tomografia é bastante eficiente nessa análise do solo.

No presente estudo foram utilizados dois tomógrafos com fontes distintas, houve a necessidade de uma revisão que mostre as características típicas desses dois equipamentos, para uma melhor compreensão dos mesmos. O foco foi nas características de cada um dos tomógrafos X e gama, é como essas características podem ser complementares no sentido de consolidar as informações sobre nosso objeto de estudo uma amostra geológica. É importante ressaltar que a complementaridade dos sistemas tem haver com a fonte de energia eletromagnética e detectores de radiação basicamente comuns, que medem transmissão da radiação na geometria do sistema. Considerando nossas instalações, a resolução temporal é as funções de tratar imagens, além-algoritmos de reconstrução próprios do sistema, são vantagens da CT de Raios X. Características típicas do tomógrafo gama como energia discreta do feixe são estudadas para o planejamento do trabalho, de modo que tenhamos resultados que possam apresentar a complementaridade, e informações que possam enriquecer a investigação das propriedades do Fantom do solo. Para isso foi necessário à junção de duas metodologias robustas e muito utilizadas, que unidas formaram uma única metodologia inovadora para análise de fantom do solo. A mesma além de avaliar características importantes para o solo, como coeficiente de atenuação e densidade, também foi avaliado a utilização de filtros metálicos na discriminação das fases minerais, que o fantom foi confeccionado. Além da discriminação de minerais das amostras da fase sólida do solo foi analisado também o comportamento energético da TC de Raios -X com o uso dos filtros metálicos.

- **Objetivos e Metas**

- Geral:**

- Propor uma metodologia de análise de solo, baseada na associação das Tomografias de Raios - X e Raios Gama.

- Específicos:**

- Definir as principais características das tomografias X e Gama como métodos de análise e identificar essa característica nas instalações dos dois tomógrafos existentes no Departamento de Energia Nuclear (DEN), com isso demonstrar a complementaridade dos tomógrafos de Raios - X e gama.

- Sugerir combinações das vantagens de cada método para fundamentar uma metodologia de trabalho. Além de mostrar a contribuição que associação das Tomografias X e Gama deveriam proporcionar.
- Avaliar o comportamento dos materiais através dos valores da Atenuação de Hounsfield pela Micro tomografia de Raios – X e da intensidade relativa pela Tomografia industrial de Raios Gama;
- **Estrutura da Tese**

O presente estudo foi dividido em Introdução, que além de preparar o leitor para os assuntos abordados no trabalho, discorre de forma breve sobre trabalhos recentes que também criaram metodologias com uso de tomografia, para serem aplicadas em suas respectivas áreas de pesquisa. No Capítulo 2, abordou-se aspectos teóricos envolvidos no trabalho, como as características dos solos tropicais dos quais o fantom do solo é um exemplo bastante representativo, além das principais interações que ocorrem com esses dois tipos de radiação (radiação X e gama), e as diferenças de atenuação que essas fontes proporcionam ao fantom do solo. A diferença dos espectros e os fatores que os afetam também foram abordados. No Capítulo três, que e o de material e métodos foram abordados os aspectos gerais da simulação com os softwares *XCOM* e *SpekCalc*, além de detalhar as metodologias peculiares, construídas para cada tomógrafo de forma a analisar os parâmetros de solo, de forma otimizada. No Capítulo quatro, encontra-se resultados e discussões.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 O solo

O solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva e ocupando a maior porção do manto superficial das extensões continentais do planeta (Embrapa, 1999). O território brasileiro se caracteriza por uma grande diversidade de tipos de solos, correspondendo, diretamente, à intensidade de interação das diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados, os quais, por sua vez, condicionam diferentes processos formadores dos solos.

Os solos são desenvolvidos a partir de minerais e matéria orgânica e contêm poros cheios de água, ar e nutrientes solúveis. O mesmo varia de um local para outro, mas geralmente consiste de areia, sedimentos, argila, materiais inorgânicos, água e ar. Os solos têm uma composição química caracterizada pela presença de alguns dos principais compostos:  $\text{SiO}_2$ , que apresentam, numa concentração entre cerca de 40% e 90%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com uma concentração entre 5% e 20%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , com uma concentração compreendida entre 2% e 20%,  $\text{TiO}_2$ , com uma concentração em torno de 1%,  $\text{CaO}$ , com uma concentração entre 0,1% e 4%, de  $\text{MgO}$ , entre 1% e 3%,  $\text{K}_2\text{O}$  com uma concentração entre 1% e 5%, e  $\text{Na}_2\text{O}$ , com uma concentração entre 1% e 3% (Aloian, 2010; Tan, 2010). A densidade, o teor de umidade, porosidade e capacidade de campo são parâmetros muito importantes na ciência do solo. A medição precisa destes parâmetros é necessária para a escolha de culturas adequadas para cada manejo do solo e melhor irrigação (Medhat, 2012). Na Figura 1 pode-se observar a imagem dos principais óxidos do solo.

**Figura 1: Principais óxidos do solo**



(a) óxido de ferro



(b) Óxido de alumínio  
Fonte: Autoria própria



(c) Óxido de sílica

A diversidade dos ecossistemas do território brasileiro é extremamente grande e os solos, que são parte integrante desse complexo de recursos naturais, também variam significativamente. Com base no Mapa de Solos do Brasil e no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, pode-se distinguir grandes classes de solos mapeáveis e representativas das paisagens brasileiras. As grandes classes de solos subdividem-se em diferentes tipos, conforme as características próprias de cada solo, separando-os em unidades mais homogêneas. As definições, conceitos e critérios taxonômicos utilizados na classificação e diferenciação dos mais variados tipos de solos brasileiros estão detalhados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999).

**Latosolos:** são solos resultantes de enérgicas transformações no material originário ou oriundos de sedimentos pré – intemperizados onde predominam, na fração argila, minerais nos últimos estádios de intemperismo (caulinitas, óxidos de ferro e alumínio), sendo a fração areia dominada por minerais altamente resistentes ao intemperismo. Uma característica importante e que sua macroestrutura é fraca ou moderada, no entanto, o típico horizonte latossólico apresenta forte micro estruturação (pseudo – areia), característica comum nos Latossolos Vermelhos Férricos, solos de elevado teor de óxidos de ferro. Os Latossolos são os solos mais representativos do Brasil, ocupando 38,7% da área total do país e distribuem-se em praticamente todo território nacional. Existem variados tipos de Latossolos, que se diferenciam, dentre vários outros atributos, pela sua cor, fertilidade natural, teor de óxidos de ferro e textura.

**Argissolos:** formam uma classe bastante heterogênea que, em geral, tem em comum um aumento substancial no teor de argila em profundidade. São bem estruturados, apresentam profundidade variável e cores predominantemente avermelhadas ou amareladas, textura variando de arenosa a argilosa nos horizontes superficiais e de média a muito argilosa nos subsuperficiais; sua fertilidade é variada e a mineralogia, predominantemente caulínica.

**Alissolos:** compreendem os solos de baixa fertilidade natural e elevados teores de alumínio extraível (Al<sup>3+</sup>); em alguns solos desta classe ocorre um significativo aumento do conteúdo de argila em profundidade; em outros estes aumentos são menos pronunciados.

**Cambissolos:** devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e condições climáticas em que são formados, as características destes solos variam muito de um local para outro. No entanto, uma característica comum é o incipiente estágio de evolução do horizonte sub – superficial, apresentando, em geral, fragmentos de rochas permeando a massa do solo e/ou minerais primários facilmente alteráveis (reserva de nutrientes), além de pequeno ou nulo incremento de argila entre os horizontes superficiais e sub – superficiais. Ocorrem em

praticamente todo o território brasileiro. São particularmente importantes na parte oriental dos planaltos do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, onde os Cambissolos existentes têm alto teor de matéria orgânica e elevados conteúdos de alumínio extraível.

**Espodossolos:** são predominantemente arenosos, com acúmulo de matéria orgânica e compostos de alumínio em profundidade, podendo ou não conter compostos de ferro. São muito pobres e muito ácidos, sendo peculiares os teores de alumínio extraível relativamente elevados em relação aos outros íons básicos presentes no solo.

**Gleissolos:** ocupam, geralmente, as partes de pressionais da paisagem e, como tal, estão permanentes ou periodicamente encharcados, salvo se artificialmente drenados. Comumente, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfismo, como as várzeas e baixadas.

**Luvisolos:** compreendem solos com elevada fertilidade natural, dotados de argilas com alta capacidade de retenção de íons trocáveis (argila de atividade alta) e saturação por bases também alta (elevada capacidade de retenção de nutrientes) nos horizontes subsuperficiais, imediatamente abaixo de horizontes do tipo A fraco ou moderado (baixos teores de matéria orgânica, pouco espessos e baixa a média capacidade de retenção de nutrientes).

**Neossolos:** pouco evoluídos, apresentam pequena expressão dos processos responsáveis pela sua formação, que não conduziram, portanto, a modificações expressivas do material originário. Diferenciam-se em grande parte pelo seu material de origem e paisagem, como depósitos sedimentares (planícies fluviais, sedimentos arenosos marinhos ou não) e regiões de relevo acidentado. Existem quatro grandes tipos de Neossolos, que apresentam, genericamente, as seguintes características: **Neossolos Litólicos** – solos rasos, com espessura inferior a 50cm, possuindo, em geral, uma estreita camada de material terroso sobre a rocha; **Neossolos Regolíticos** – solos mais profundos com espessura superior a 50cm e presença de minerais alteráveis ou fragmentos de rocha; **Neossolos Quartzarênicos** – solos mais profundos, com espessura superior a 50cm, de textura essencialmente arenosa por todo o solo e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (sem reserva de nutrientes); **Neossolos Flúvicos** – solos provenientes de sedimentos aluviais. Normalmente, possuem um horizonte escurecido à superfície sobre camadas estratificadas. Os **Neossolos Litólicos**, em geral, estão associados a muitos afloramentos de rocha.

**Nitossolos:** são solos de textura argilosa ou mais fina que apresentam pouco ou nenhum incremento de argila em profundidade. São normalmente profundos, bem drenados,

estruturados e de coloração variando de vermelho a brunada. Em geral, são moderadamente ácidos, com saturação por bases de baixa a alta, argila de atividade baixa e as vezes contendo elevados conteúdos de alumínio extraível.

**Planossolos:** são mal drenados, com horizonte superficial de textura mais leve, em geral arenosa, que contrasta abruptamente com o horizonte subsuperficial imediatamente subjacente, adensado e extremamente endurecido quando seco, geralmente de acentuada concentração de argila, bem estruturado e de permeabilidade muito lenta, apresentando visíveis sinais de hidromorfismo.

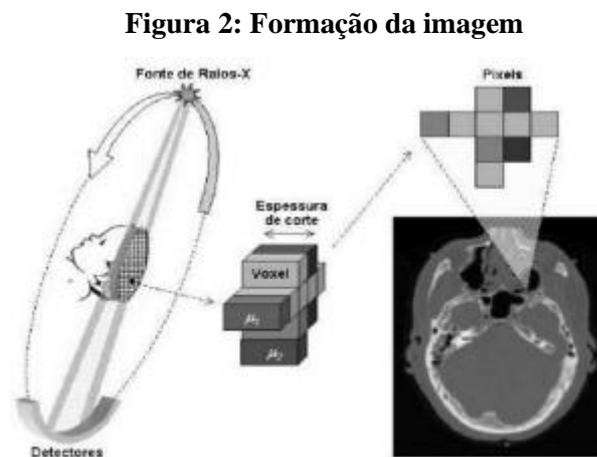
**Plintossolos:** apresentam uma diversificação morfológica e analítica muito grande, no entanto, a característica mais importante desses solos é a presença de manchas ou mosqueados avermelhados (plintita), geralmente compondo um emaranhado de cores bem contrastante com a matriz do solo, podendo ou não conter nódulos ou concreções (petroplintita), os quais são constituídos por uma mistura de argila, pobre em carbono orgânico e rica em ferro, ou ferro e alumínio, com quartzo e outros materiais.

**Vertissolos:** são solos de coloração acinzentada ou preta, sem diferença significativa no teor de argila entre a parte superficial e a subsuperficial do solo. No entanto, a característica mais importante é a pronunciada mudança de volume com a variação do teor de umidade devido ao elevado teor de argilas expansivas (argila de atividade alta), tendo como feição morfológica característica e facilmente identificável, a presença de fendas de retração largas e profundas que se abrem desde a superfície do solo nos períodos secos. São de elevada fertilidade química, mas apresentam problemas de natureza física (Embrapa,1999).

No Brasil, estudos sobre o comportamento espectral dos solos, para caracterizar seus óxidos (parte mineral) e sua possível aplicabilidade para aumentar a eficiência na produção são escassos. Os solos do Brasil têm em sua composição uma variação muito grande, quando trata-se da proporção desses minerais. No entanto, há casos em que podem ocorrer a presença de classes de solos inesperados, isto é, não formadas por este tipo de material, o que sugere um tipo especial de administração para o tratamento de culturas. Além disso, os estudos disponíveis não possuem informações sobre a sua aplicação a diferentes condições ambientais, tais como culturas agrícolas (Chicati et al., 2017). Com base nos processos espectrais preliminares de outros autores e na confecção de uma metodologia própria, foi possível analisar o comportamento espectral de um fantom de solo tropical.

## 2.2 Considerações Gerais

A Tomografia Computadorizada é uma técnica na qual o processamento digital de projeções pode ser usado para gerar uma imagem em três dimensões das regiões de interesse. Tal processamento é realizado a partir de séries de imagens em duas dimensões obtidas por meio da radiação X ou gama que interage com o objeto atenuador e incide no sistema de detecção. As varreduras realizadas pelos feixes de radiação fornecem imagens detalhadas de um objeto, tais como suas dimensões, forma, defeitos e densidade, tanto para diagnóstico médico, como para situações de investigação em centros de pesquisa (Hoffmann, 2010). Para se definir a espessura de corte desejada são usados colimadores. A atenuação local de cada secção é calculada por um processo de reconstrução matemática (Figura 2), esses coeficientes de atenuação local são traduzidos em valores numéricos que são, por sua vez, convertidos em níveis de cinza que irão formar a imagem (Lima, 1995). De forma sucinta para adquirir e apresentar imagem, divide-se o processo em três partes: aquisição de dados, reconstrução matemática e apresentação da imagem.



Fonte: Mathias, 2003

A fase de aquisição de dados ou fase de exploração, ocorre quando os fótons de radiação atravessam a amostra e atingem um detector ou um conjunto de detectores, localizados no lado oposto da amostra, sendo a mesma entre fonte e detector. É importante frisar que os detectores não “veem” uma imagem completa da amostra, apenas uma projeção de uma imagem latente para cada ângulo de visão. Outro fator importante a ser mencionado é que a intensidade do sinal do detector é uma medida de atenuação. Uma projeção é composta

por um conjunto de medidas de atenuação dos fótons de Raios-X ou Gama, denominado perfil de atenuação (Marconato, 2005).

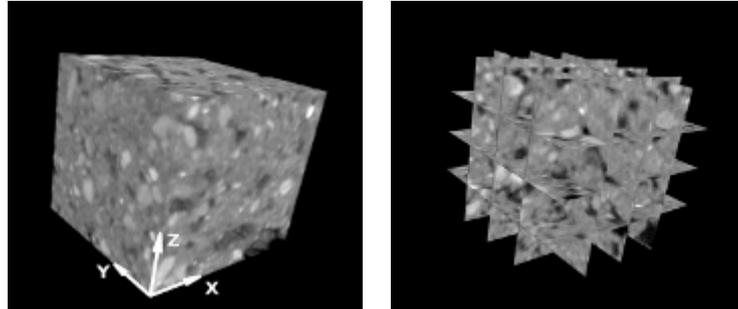
Para produzir a imagem é necessário um conjunto de perfis de atenuação obtidos em diferentes ângulos sequenciais de projeção. Os mesmos são obtidos pela rotação do tubo de Raios-X ou gama em torno das amostras ou do corpo de prova. Durante a varredura, as leituras dos detectores são registradas em intervalos fixos de tempo. O ângulo mínimo de varredura necessário para obter a imagem através do coeficiente de atenuação linear e de  $180^\circ$ , no entanto os dados de rotação completa são de  $360^\circ$ . O número total de medidas de atenuação durante a varredura de corte é dado pelo produto do número de projeções e o número de fótons por projeção. Cada imagem requer uma grande quantidade de medidas, no entanto essa quantidade varia para cada modelo de tomógrafo (Marconato, 2005).

A reconstrução da imagem em TC é realizada em um sistema computadorizado. Os algoritmos matemáticos transformam dados brutos em imagem numérica ou digital. A imagem digital é uma matriz tridimensional em que cada elemento da matriz, denominado pixel, recebe um valor numérico denominado de número de TC. O número de TC está relacionado ao coeficiente de atenuação linear médio de atenuação do objeto, o voxel que ele representa. A secção do objeto deve ser imaginada como se fosse dividida em voxels, e cada voxel é representado por um pixel. O tamanho do voxel é fundamental na qualidade da imagem, sendo selecionado de acordo com o objetivo da pesquisa. Sua altura é igual à espessura do corte e a base é estabelecida pela razão entre o campo de visão e o tamanho da matriz. A fase final da tomografia é a conversão da imagem digital (Marconato, 2005).

Durante a última década, os grandes avanços referentes à reconstrução em duas e três dimensões, das arquiteturas naturais dos meios porosos em escalas muito finas (Pierret et al., 2002; Anderson et al., 2003; Rachman et al., 2005; Gibson et al., 2006; Taina et al., 2008; Garbout et al., 2011), gerou consequências nas análises dos cientistas do solo. Os mesmos puderam usar essa caracterização quantitativa da estrutura do solo e da sua heterogeneidade para compreender mais profundamente os processos biológicos que ocorrem dentro deles seja nas estruturas físicas ou químicas (Young, 2004; Blair et al., 2007). Ao mesmo tempo, estas técnicas reduzem o descarte das amostras, porque o ensaio é não destrutivo, além da digitalização rápida para estudar a dinâmica das amostras em tempo quase real (Garbout et al., 2013). Este é um passo significativo para estudá-la anomalias no meio poroso natural. Outra forma de análise muito importante é da fase mineral (Tarquis et al., 2003), que usa imagens em preto e branco, ou seja, a partir dos dados da escala de cinza das

imagens originais, (Torre et al, 2016). Figura 3. Além da análise dos tons de cinza, tem a avaliação do comportamento espectral dos componentes do solo (variabilidade radiométrica).

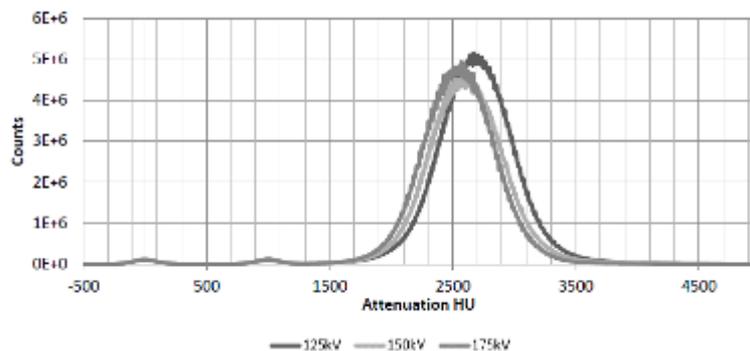
**Figura 3: Visualização de uma amostra de solo em 3D.**



Fonte: Torre et al (2016).

Tian Tian (2016), no seu estudo de variabilidade radiométrica e espacial em solos hidromórficos Canadenses, analisou as variações pedogênicas na microestrutura do solo, a partir das imagens de Tomografia de Raios – X. Para modificar os espectros do feixe de Raios-X, foram utilizados filtros metálicos em 18 configurações de energia-filtração: três tensões (125kV, 150kV, 175kV) e três filtros (0.5mm de Cu, Al Fe e 0.1mm, 1,0mm de Fe), para avaliar a influência desses materiais é de suas espessuras no espectro de Raios – X. Para comparar o desempenho do feixe de Raios- X em várias configurações diferentes, como mencionado, foi necessária a análise do histograma, obtidas das imagens e assim comparar a variabilidade radiométrica de diferentes espectros de Raios-X, Figura 4. A diferença entre a atenuação medida do ar, da água e da amostra foi influenciada pelos espectros de Raios – X, em geral, as energias de excitação mais baixas (125kV, 150kV e 175kV) exibiram uma diferença maior na atenuação de Raios-X.

**Figura 4: Influência dos materiais do filtro no feixe de Raios-X, sobre a atenuação aparente do material do solo.**



Fonte: Tian Tian (2016)

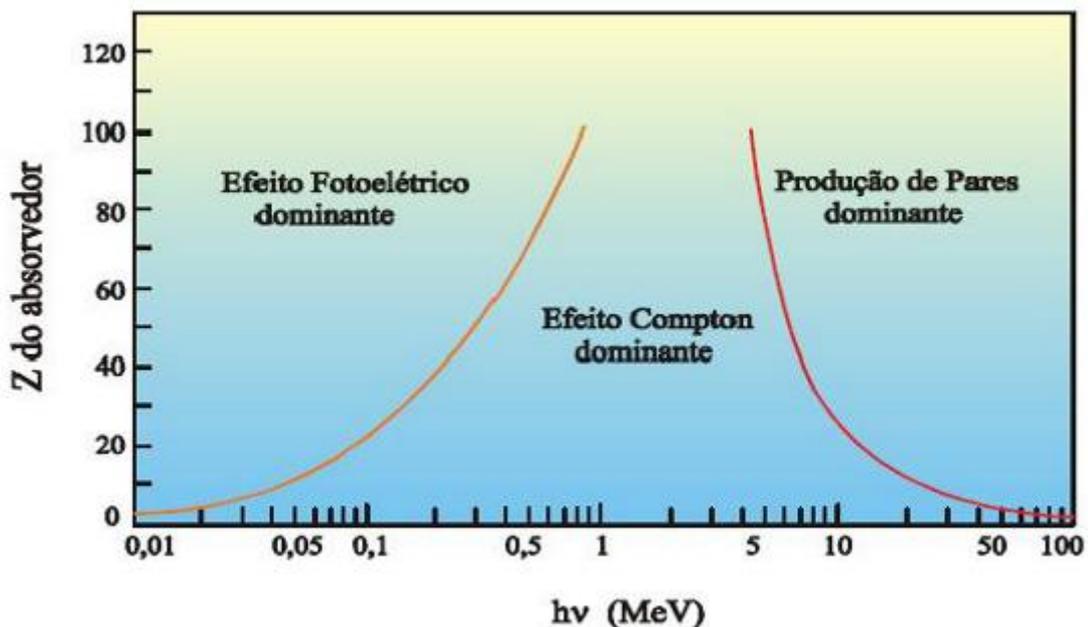
No entanto, o uso das técnicas tomográficas requer o conhecimento de alguns princípios físicos que estão envolvidos no processo.

## 2.3 Interação da Radiação com a Matéria

Os principais processos de interação das radiações com a matéria são: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares (Kaplan, 1979).

As três formas de interação com a matéria são probabilísticas e dependem da energia do fóton incidente e do número atômico do material, a Figura 5 mostra a importância relativa de cada efeito em função do número atômico e da energia dos fótons (Kaplan, 1978).

**Figura 5: Influência da energia do fóton e número atômico do absorvedor, no processo de absorção da radiação pela matéria**



Fonte: Adptado de Atixx (1986)

### 2.3.1 Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total da energia da radiação X ou gama (que desaparece) para um único elétron orbital (Evans, 1976), que é expelido com uma energia cinética  $T$  bem definida:

$$T = h\nu - B_e \quad (1)$$

em que,  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a frequência da radiação e  $B_e$  é a energia de ligação do elétron orbital (Tauhata, 2003).

### 2.3.2 Espalhamento Compton

O espalhamento Compton pode ser considerado como uma colisão entre um fóton incidente e um elétron orbital (KAPLAN, 1978). O fóton incidente é então espalhado por elétrons do átomo, geralmente aqueles ligados ou menos livres. Esses elétrons são arrancados da estrutura atômica sem absorver totalmente a energia disponível  $h\nu$ . O fóton incidente é espalhado em uma direção diferente da inicial, sendo que na colisão, o fóton transfere parte de sua energia para o elétron que se torna um elétron de recuo, segundo um ângulo  $\theta$  ou com energia menor ( $h\nu'$ ) segundo um ângulo  $\theta'$ . A direção do fóton, assim como a energia, é alterada e alguma desta energia será perdida para o elétron com o qual ele colidiu (KNOLL, 1989). Como a transferência da energia depende da direção do elétron emergente, e esta é aleatória, de um fóton de energia fixa podem resultar elétrons com energia variável, com valores de zero até um valor máximo (Attix, 1986). O cálculo da energia do fóton espalhado ( $h\nu'$ ) pode ser previsto pela utilização da Equação 2, que é derivada do princípio da conservação de energia e da quantidade de movimento, onde  $h\nu'$  é a energia do fóton incidente,  $m_0$  é massa de repouso do elétron e  $c$  é a velocidade da luz, em energia  $m_0c^2 = 0,511$  MeV (KNOLL, 1989).

$$h\nu'(\theta) = \frac{h\nu}{1 + \left(\frac{h\nu}{m_0c^2}\right) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (2)$$

A probabilidade de ocorrência do efeito Compton aumenta linearmente com o aumento do número atômico ( $Z$ ) do material absorvedor (KNOLL, 1989).

### 2.3.3 Produção de Pares

Acima das energias de fótons incidentes de 1,02 MeV, um terceiro tipo de interação torna-se mais importante. Esta interação é conhecida como produção de pares, nela o fóton é completamente absorvido e seu lugar aparece um par elétron- pósitron cuja energia total é apenas igual a  $h\nu$ .

$$h\nu = (T_- + m_0c^2) + (T_+ + m_0c^2) \quad (3)$$

em que  $T_-$  e  $T_+$  são a energia cinética do elétron e do pósitron respectivamente e  $m_0c^2 = 0,511$  MeV (Evans, 1976).

As radiações interagem com variados materiais, essa interação é analisada, estudada de forma simplificada pela lei de *Beer-Lambert*.

## 2.4 Atenuação da Radiação

As interações do átomo com a matéria dependem da energia do fóton incidente e do número atômico do material absorvedor. A relação entre os fótons transmitidos pelo absorvedor ( $I$ ) e os fótons transmitidos sem a presença do mesmo ( $I_0$ ) é dada pela lei de *Beer-Lambert*, que é utilizada para um feixe monocromático, (Kaplan, 1978).

$$I = I_0 e^{(-\mu\rho x)} \quad (4)$$

em que  $I_0$  é a intensidade do feixe de radiação incidente,  $I$  é a intensidade do feixe é chamado emergente,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear, que é específico para cada material,  $x$  é a espessura do material analisado. E  $I/I_0$  é a grandeza chamada de Intensidade relativa, (Amaral, 2010). É importante lembrar que a utilização do coeficiente de atenuação linear na Equação (4) é limitada, porque o mesmo varia com a densidade do absorvedor, mesmo que este seja sempre do mesmo material. Por isso, em algumas pesquisas, utiliza-se o coeficiente de atenuação de massa ou coeficiente de atenuação mássico ( $\mu_m$ ), dado por:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

em que,  $\rho$  ( $kg.m^{-3}$ ) representa a densidade física do material absorvedor.

No caso de um feixe policromático como o de Raios-X a situação é mais complicada porque a curva de atenuação já não é exponencial, pelo fato de cada componente do espectro de energia ter um coeficiente linear de atenuação diferente, sua equação de atenuação é representada por (Amaral, 2010):

$$I(s) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Omega(E) \cdot e^{-\int_0^s \mu(E,x) dx} dE \quad (6)$$

em que  $\mu(E;x)$  é o coeficiente de atenuação linear do material [ $cm^{-1}$ ], e  $I_0$  é a intensidade do feixe policromático de Raios – X incidente na amostra, dada por:

$$I_0 = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Omega(E) dE \quad (7)$$

sendo que  $\Omega(E)$  representa o espectro de Raios – X incidente.

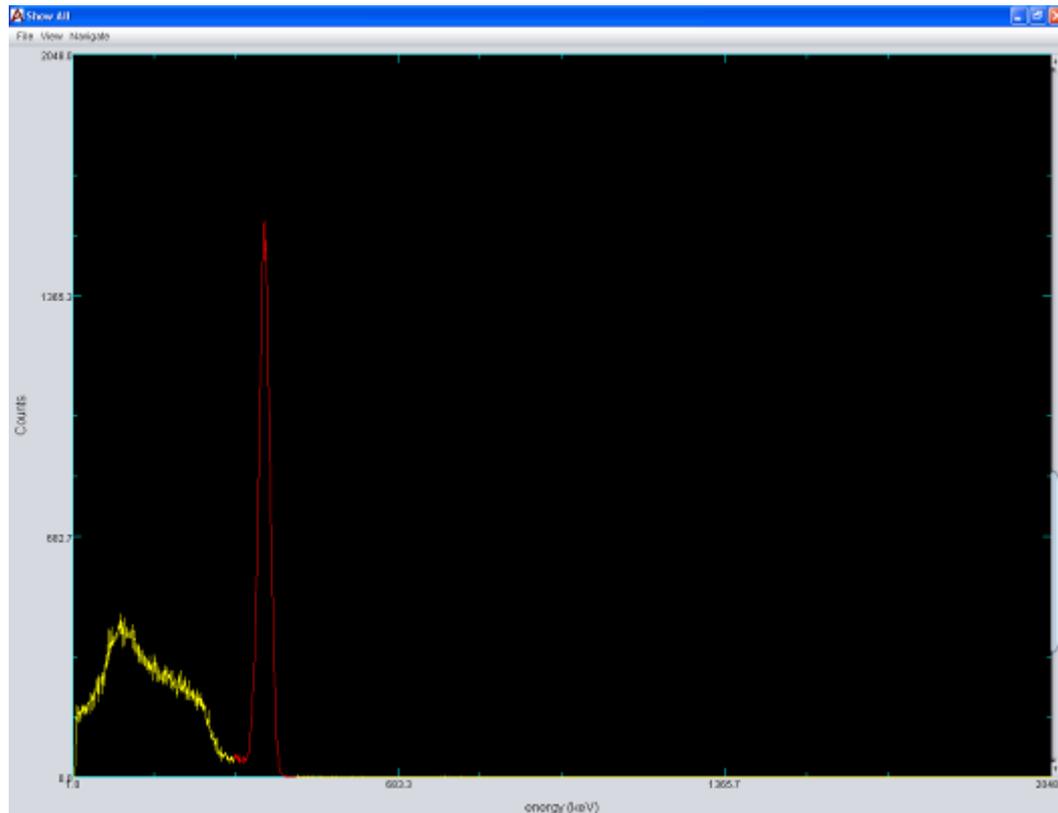
A Equação (6) indica a dependência do espectro de Raios – X incidente,  $\Omega(E)$ , e do coeficiente de atenuação linear do material,  $\mu(E)$ , em função da energia do fóton dos Raios – X.

Como já foi mencionado, cada componente do espectro de energia do Raios-X, tem um componente de atenuação diferente. Por isso é importante o conhecimento do conceito de camada semi – sedutora (HVL), (Amaral, 2010). Para essa definição é necessário determiná-la computacionalmente recorrendo a um dos programas que simulam o espectro de Raios-X.

## 2.5 Espectros Característicos

O espectro de energia é o número de fótons de um feixe de Raios – X ou gama. A radiação gama faz parte do espectro eletromagnético com energia acima de 40 keV. As radiações gama provenientes de elementos radioativos naturais são emitidos com intensidades e energias bem definidas (é característica do radioisótopo considerado. Para cada radioisótopo o espectro tem uma janela de energia bem definida), o que caracteriza um espectro discreto de emissão, (Soares, 2012). Na Figura 6, pode-se observar o espectro característico do  $^{137}\text{Cs}$ .

**Figura 6: Espectro característico do  $^{137}\text{Cs}$**



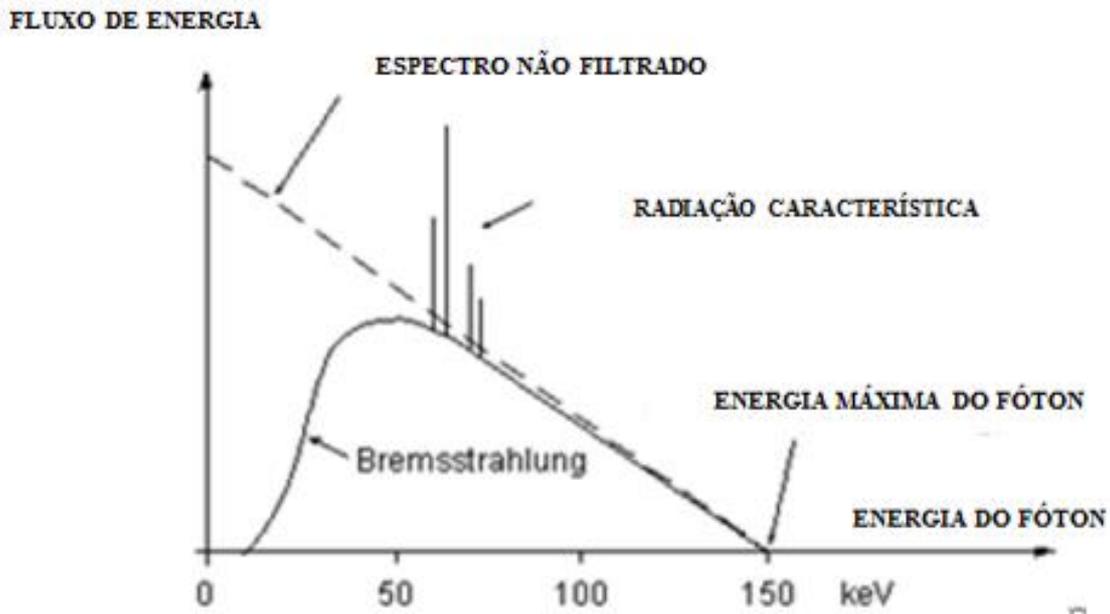
Fonte: Autoria própria.

Os Raios-X são produzidos quando elétrons são acelerados em direção a átomos de um dado material (alvo). As interações dos elétrons com os átomos do alvo permitem a obtenção de Raios-X através de dois diferentes processos de interação. Na primeira interação os elétrons podem colidir com os elétrons próximos ao núcleo atômico dos átomos alvo com energia suficiente para arrancar esses elétrons. Quando esses elétrons são arrancados do átomo, produzindo ionização, os elétrons das camadas mais externas decaem ao nível ionizado emitindo nesse processo Raios-X característico do átomo envolvido na interação. A segunda interação envolve o ‘freamento’ dos elétrons ao passarem próximos do núcleo atômico dos átomos. A radiação produzida pelo efeito de ‘freamento’ vão permanecer na forma de radiação de espectro contínuo, em que os fótons de máxima energia presentes no espectro são obtidos quando a energia de movimento dos elétrons é completamente convertida em energia dos fótons. A radiação produzida nesse processo também é conhecida como radiação de Bremsstrahlung (Kaplan, 1978).

É importante frisar que a energia do feixe de Raios-X varia entre fótons menos energéticos a fótons mais energéticos, pois seu feixe é policromático ou polienergético. Os fótons menos energéticos são derivados dos elétrons que perderam o mínimo de energia

durante o processo de frenamento e os fótons mais energéticos são referentes aos elétrons que foram totalmente barrados durante o processo de frenamento. Dessa forma o feixe de Raios-X apresentará um espectro contínuo entre a energia mínima e a energia máxima de seus fótons. Na Figura 7, pode-se ver uma ilustração do espectro característico da fonte de Raios-X em um tomógrafo de raios - X.

**Figura 7: Espectro característico do tomógrafo de Raios -X.**



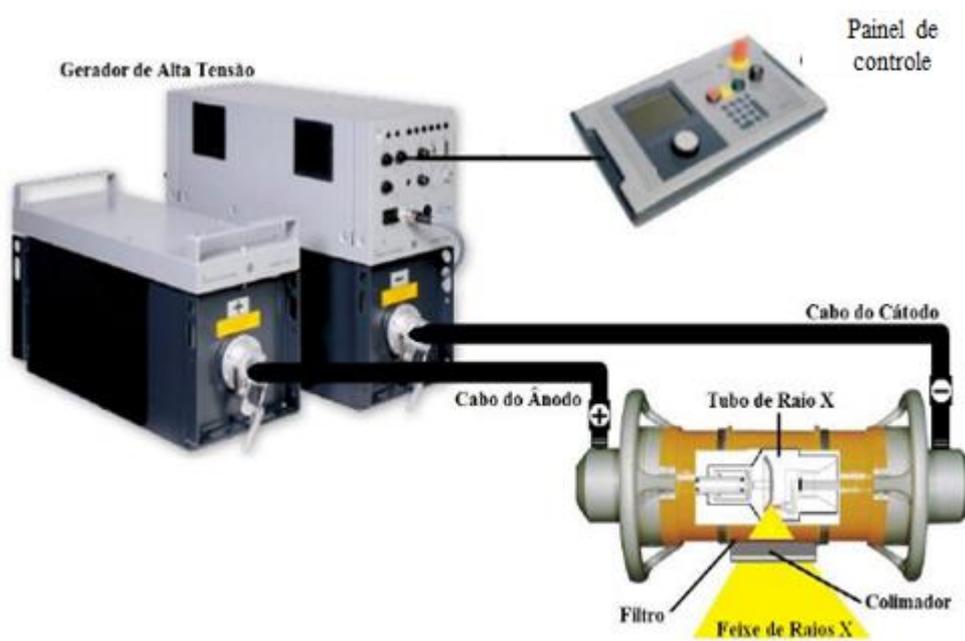
Fonte: Manual do Equipamento.

De uma forma geral o espectro de energia emitido pela fonte de Raios -X informa o número de fótons por faixa de energia, até o valor máximo ajustado aos componentes contínuos e discretos do espectro. Por isso o espectro de Raios X pode ser alterado em função da qualidade e da quantidade de fótons presentes no feixe.

### 2.5.1 Fatores que Afetam o Espectro de Raios-X

Os tomógrafos de Raios -X tanto diagnóstico, quanto industrial são identificados pela sua capacidade de produção de Raios-X e para as aplicações das quais foram projetados. Os tomógrafos de Raios -X hospitalares normalmente operam em uma faixa de tensão de 40 a 150 kV e a corrente entre 25 a 1200 mA. Já os tomógrafos industriais podem ultrapassar 225 kV. Os tomógrafos de Raios-X possuem três componentes principais: tubo de Raios-X, gerador de alta voltagem e o painel de controle, Figura 8.

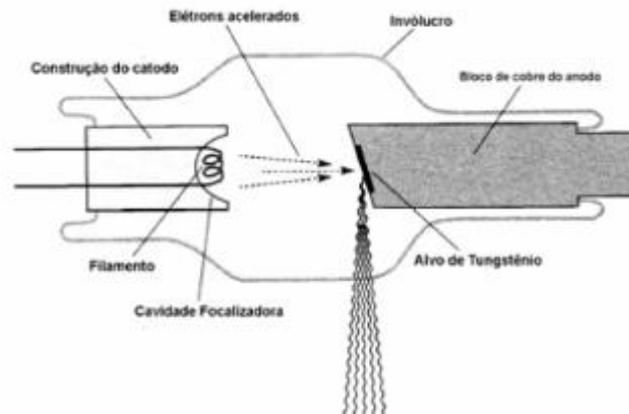
**Figura 8: Componentes básicos do Tomógrafo**



Fonte: Nascimento (2012)

A maneira mais fácil de gerar Raios-X é bombardear um material alvo (usualmente um metal de alto-número-atômico, tal como o tungstênio) com elétrons de elevada energia produzidos por um filamento aquecido, como em um tubo padrão de Raio-X. Um contínuo de energias de Raios-X é produzido devido a várias interações dos elétrons livres de entrada com elétrons ligados no material alvo (Hanna et al, 2017). Então, os Raios-X são gerados dentro de uma ampola especial de vidro. O tubo fica inserido dentro de um cabeçote, envolto em um óleo especial. Esse óleo serve como isolante eletrostático e como dissipador de calor da ampola. O cabeçote possui um revestimento de chumbo para blindagem da radiação que não contribui diretamente na formação da imagem. O cabeçote possui uma janela que permite a passagem do feixe de Raios-X. O tubo de Raios-X é basicamente composto por uma ampola de vidro, o ânodo e cátodo (filamento). É importante frisar que o tubo tem características peculiares à sua função como: possuir boa resistência mecânica, resistência à variação de temperatura, boa vedação (para manter o vácuo), além de possuir bom isolamento para alta tensão, etc. O catodo é o polo negativo do tubo de Raios-X, sendo composto pelo filamento. Uma informação importante sobre o filamento é que o mesmo deve ter alto ponto de fusão e ter boa eficiência termiônica (Hanna et al, 2017). O ânodo é o polo positivo e serve de suporte do material do alvo, o mesmo é formado de material de alto número atômico, o que implica em eficiência de produção de Raios-X (Nascimento, 2012). Os elementos básicos do tubo de Raios-X, podem ser observados na Figura 9.

**Figura 9: Componentes do Tubo de Raios – X.**

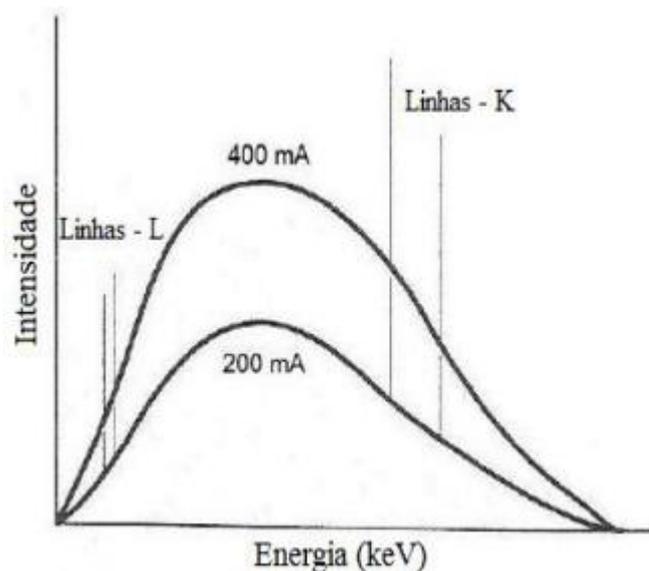


Fonte: Adaptado de Soares (2012)

### 2.5.1.1 Corrente no tubo

A quantidade de elétrons produzidos no filamento do cátodo é controlada pela corrente elétrica. Por isso é importante ressaltar que com o aumento na corrente elétrica (em  $mA$ ) do tubo aumentará o fluxo de elétrons encaminhados do cátodo para o ânodo, tendo como consequência, um número maior de fótons produzidos devido ao maior número de colisões dentro do alvo. Neste sentido, o aumento na intensidade dos fótons, faz com que o espectro apresente uma amplitude maior, devido ao aumento de contagens para cada energia, como pode ser observado na Figura 10. Então o aumento do número de contagens é diretamente proporcional ao aumento da corrente elétrica (Soares, 2012).

**Figura 10: Variação da corrente no espectro de Raios – X.**

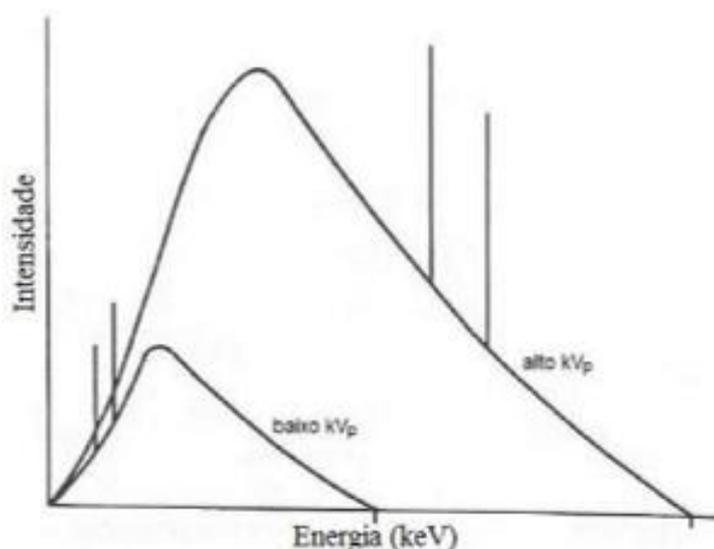


Fonte: Adaptado de Soares (2012).

### 2.5.1.2 Tensão aplicada no Tubo de Raios – X (Energia – kV)

A energia ou o potencial do tubo (kV) de Raios – X tem influência no aumento da energia cinética do feixe de elétrons, aumentando a produção de Raios – X de *bremsstrahlung*. Esta variação reflete-se na energia máxima e média do feixe de radiação. A consequência direta é o alargamento do espectro para a direita (ou seja, para o lado das energias mais altas), aumentando assim a energia média, e a intensidade devido à quantidade maior de fótons, além de possibilitar o aparecimento das linhas de Raios – X característicos (Soares, 2012). Na Figura 11, pode-se visualizar o espectro de Raios – X, com variação da tensão.

**Figura 11: Aumento da tensão (kV) no espectro de Raios-X.**



Fonte: Adaptado de Soares (2012).

### 2.5.1.3 Filtração Adicional

A filtração do feixe de Raios – X pode ser dividida de duas maneiras: a filtração inerente que está relacionada com a filtração do feixe antes de sair do equipamento, a mesma ocorre quando o feixe atravessa algumas estruturas, como o vidro da ampola, o óleo de arrefecimento e até mesmo a janela de saída (Dewulf et al.,2012). A segunda opção de filtração é a adicional, que pode ser realizada com a adição de filtros metálicos, como por exemplo, de alumínio, cobre, estanho e até mesmo prata.

A consequência da filtração é o deslocamento do espectro, para a parte das energias mais altas, sem que isso altere a energia final. No entanto, esse deslocamento aumenta a

energia efetiva (região mais intensa do espectro), diminuindo ou até mesmo retirando as energias mais baixas do espectro, que não tem utilidade nenhuma, quando se trata de qualidade de imagem (Hanna et al, 2017). Na Tabela 1, pode observar de forma sucinta o efeito da filtração no feixe de Raios-X.

**Tabela 1: Efeitos da filtração**

<b>Filtração</b>	<b>Torna o feixe mais penetrante, porque reduz os fótons de baixa energia</b>
Inerente	Os fótons de baixa energia são absorvidos no ânodo, ampola e no óleo.
Adicional	O feixe sofre uma segunda atenuação, pela adição de filtros metálicos.

Fonte: Autoria própria.

#### 2.5.1.4 Material do Alvo (número atômico do material)

Com o aumento do número atômico do alvo, há um aumento do número de colisões dos elétrons incidentes, devido à alta densidade do material, favorecendo o aumento da produção de fótons e o aumento da amplitude do espectro. É importante frisar que para uma determinada tensão (kV) e uma determinada corrente aplicada ao tubo, a quantidade de Raios – X produzidos é proporcional ao número atômico do material do alvo, embora o pico corresponda sempre à mesma energia, determinada pela tensão (kV) escolhida. Os espectros característicos são próprios de cada material, e quanto maior for o número atômico do material do alvo, maior será a energia dos Raios – X característico. Na Tabela 2, observa-se de forma reduzida os efeitos de alguns dos influenciadores do feixe (Soares, 2012).

**Tabela 2: Fatores Influenciadores do Espectro de Raios – X**

<b>O Aumento:</b>	<b>Resulta em:</b>
Corrente (mA)	Aumento da quantidade de fótons e nenhuma alteração na qualidade do feixe.
Tensão (kV)	Aumento da quantidade de fótons e da qualidade do feixe.
Filtração Adicional	Diminuição da quantidade de fótons e aumento da qualidade do feixe.
Nº Atômico (Z) do Alvo	Aumento da quantidade de fótons e da qualidade do feixe

Fonte: Autoria própria.

## 2.6 Tomografia Computadorizada

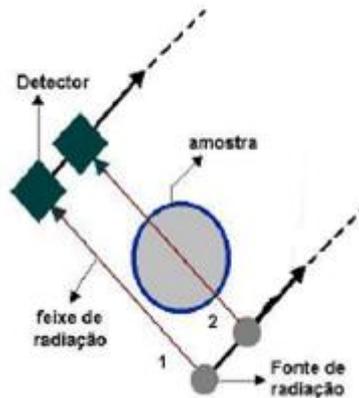
Uma importante informação para as pesquisas com tomografia é o conhecimento prévio da geometria do sistema de cada equipamento. Cada geração de tomógrafos possui uma velocidade de aquisição de dados e detalhes na resolução da imagem obtida. Nas análises para escolha da geração de tomógrafos o tempo para a aquisição de uma determinada imagem é extremamente importante, principalmente em tomografia computadorizada (TC) nas áreas de saúde.

### 2.6.1 Geração de Tomógrafos

A aquisição de dados tomográficos pode ser obtida em várias geometrias, baseadas na configuração de varreduras, ou seja, movimentos de varredura e arranjos do detector. A evolução dessas geometrias é descrita em termos de “gerações” que refletem a evolução da tomografia computadorizada. Os tomógrafos utilizados em ciências do solo no Brasil são geralmente de primeira geração, no entanto, em medicina onde existe uma necessidade maior de diagnósticos precisos e a diminuição do tempo de exposição do paciente às fontes radioativas, utilizam-se tomógrafos de terceira, quarta e quinta geração, (Pires, 2006).

Os tomógrafos de *primeira geração* ou de geometria de feixe paralelo são os tomógrafos mais simples de serem construídos. Para esse tomógrafo múltiplas medidas de radiação X ou gama são obtidas usando um feixe colimado de radiação e um detector. O feixe é transladado em movimentos lineares (passos lineares) ao longo da amostra para se obter um perfil de projeção. A fonte e o detector são rotacionados ao longo da amostra por aproximadamente  $1^\circ$  passo angular e com isso um perfil de projeção é obtido. Este movimento de varredura de translação–rotação é repetido até a fonte e o detector completarem uma rotação de  $180^\circ$ . O movimento de varredura exige um tempo relativamente grande para obtenção de uma imagem. Esta geometria foi à primeira utilizada por Hounsfield (1973) em seu experimento, mas os tomógrafos modernos utilizados em medicina, não utilizam mais esse tipo de sistema (Pires, 2006), ilustrado na Figura 12.

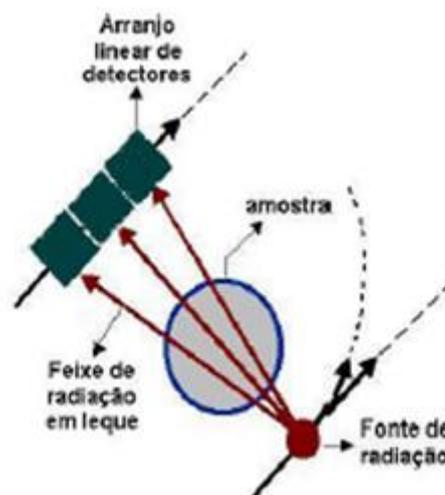
**Figura 12: Tomógrafo de primeira geração**



Fonte: Adaptado de Pires (2006).

Tomógrafos de *segunda geração* ou de múltiplos detectores permitiram a redução do tempo de varredura para aproximadamente trinta segundos, por amostra através de um feixe estreito em forma de leque e um arranjo linear de detectores. Um movimento de varredura de translação rotação é ainda empregado, entretanto, um grande incremento de rotação pode ser usado, o qual resulta em tempos mais curtos de varredura. Os algoritmos de reconstrução para tomógrafos de segunda geração são mais complicados dos que os de primeira geração, justamente pelo fato de trabalharem com dados de projeções de feixes estreitos em forma de leque (Pires, 2006), conforme pode ser visto na Figura 13.

**Figura 13: Tomógrafo de Segunda Geração**

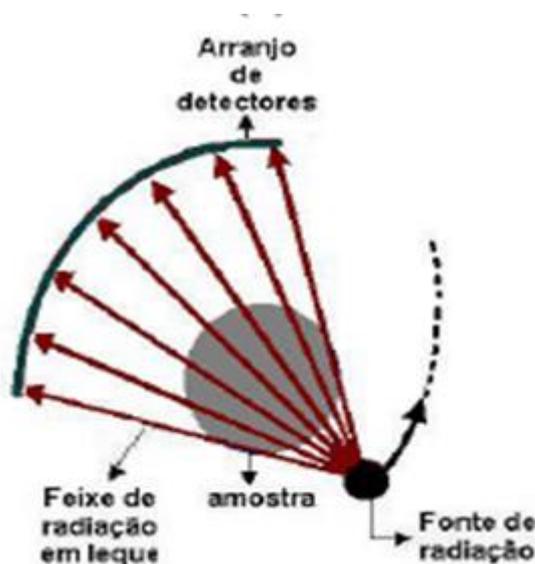


Fonte: Adaptado de Pires (2006).

Tomógrafos de *terceira geração*: sua utilização vem desde 1976, um feixe estreito é rotacionado em  $360^\circ$  ao longo do isocentro. Nenhum movimento de translação é usado, no

entanto, o feixe em forma de leque deve ser amplo o suficiente para conter completamente o objeto que está sendo submetido à tomografia. Um detector em formato curvado, consistindo de dezenas de outros detectores independentes, está mecanicamente acoplado à fonte de Raios-X ou gama, e ambos rotacionam juntos. Com o resultado desse movimento de rotação é possível se obter imagens com um tempo próximo de um segundo. Os tomógrafos de terceira geração possuem a vantagem de possibilitar colocar pequenas placas finas de tungstênio entre cada detector que constitui um arranjo com o objetivo de rejeitar radiação espalhada, as quais quando detectadas podem afetar a qualidade da imagem obtida (Pires, 2006), ilustrado na Figura 14.

**Figura 14: Tomógrafo de terceira Geração**

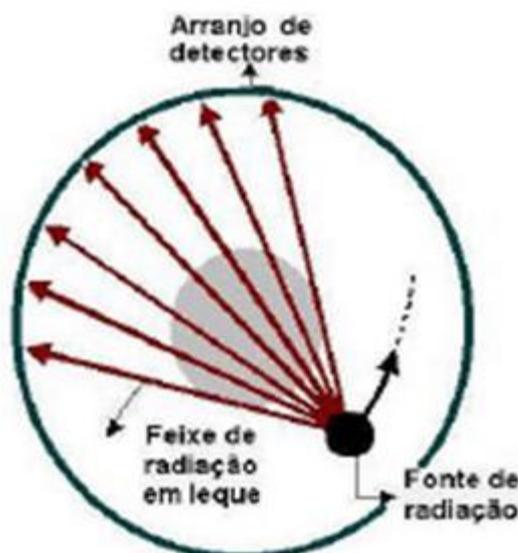


Fonte: Adaptado de Pires (2006).

Tomógrafos de *quarta geração* apresentam fonte de radiação e o feixe de radiação em leque rotacionando ao longo do isocentro, enquanto que o arranjo de detectores permanece fixo. O arranjo de detectores nesse caso pode consistir de 600 até 4800 detectores independentes em um círculo que envolve completamente o objeto que está sendo submetido à tomografia. O tempo de varredura para esses tipos de tomógrafos é próximo aos de terceira geração. É importante frisar que os detectores dos tomógrafos de quarta geração não permitem bloquear a radiação espalhada como no caso dos de terceira, porém os detectores são calibrados duas vezes durante cada rotação da fonte de radiação, fornecendo um sistema de auto calibração. Outro detalhe importante é que sistemas de terceira geração são calibrados em períodos longos (horas). Duas geometrias são utilizadas atualmente para sistemas de quarta geração, a primeira envolve rotação da fonte de radiação dentro de um arranjo fixo de

detectores. Já a segunda rotação da fonte de radiação é fora do arranjo do detector. Ambos os tomógrafos são vendidos comercialmente para área médica, ver Figura 15.

**Figura 15: Tomógrafo de Quarta Geração**



Fonte: Adaptado de Pires (2006).

Tomógrafos de *quinta geração* são os únicos que possibilitam medidas em tempos bastante pequenos. Embora a evolução da geometria dos tomógrafos tenha proporcionado uma otimização bastante satisfatória dos equipamentos de tomografia, nenhuma versão desenvolvida com o feixe em leque possibilitou medidas em tempos muito curtos. Essa geração de tomógrafos é mais utilizada na área médica, (Pires, 2006).

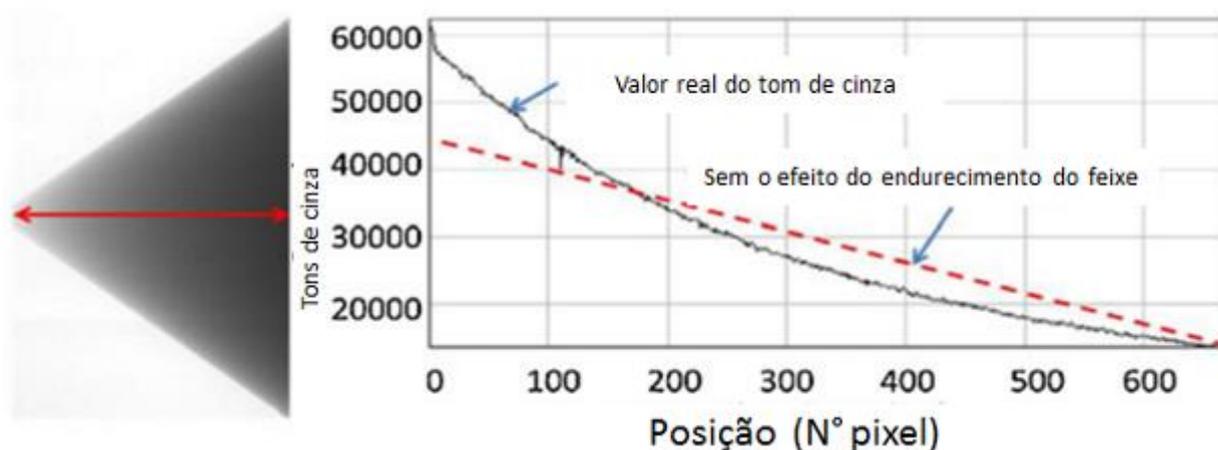
### 2.6.2 Artefatos de Imagem e Endurecimento do Feixe (*Beam Hardening*)

O espectro policromático do feixe de Raios-X provoca artefatos do tipo *beam hardening* (endurecimento do feixe) em imagens reconstruídas de tomografia computadorizada (CT). Isto leva a variações indesejadas dos valores de cinza em modelos de CT, dificultando assim a análise precisa do material inspecionado. Eles resultam do fato de Raios-X menos energéticos serem mais facilmente absorvidos que os mais energéticos. Dessa forma, o emprego de uma fonte policromática favorece a ocorrência deste artefato. Os Raios-X desse tipo de fonte têm a parte de energia mais baixa do espectro absorvida pelo material analisado. Isto também significa que, à medida que o feixe passa através do objeto, o seu coeficiente de atenuação efetivo diminui.

As imagens de tomografia de Raios – X de materiais fortemente atenuantes, o processo geralmente se manifesta como um escurecimento artificial no centro da imagem, e ao longo do trajeto ou mais precisamente perto das extremidades um clareamento irreal das imagens. Por isso, algoritmos de correção foram desenvolvidos para atuar no feixe endurecido desde o início dos anos 1970. Os mesmos melhoraram a qualidade da imagem de CT, compensando assim os efeitos de endurecimento do feixe. No entanto, a correção do feixe endurecido muitas vezes resulta em menos contraste em torno da borda (Dewulf et al, 2012).

À medida que o feixe penetra na amostra, as baixas energias de Raios-X são mais rapidamente atenuadas do que os Raios – X de alta energia. Consequentemente, o número de fótons que atingem um detector de Raios – X (o valor de cinza do pixel correspondente) não está estritamente relacionado com a espessura do material penetrado (Figura 16). Pode – se notar que na Figura 16, que a linha vermelha correspondente valor de cinza, que ilustra atenuação não linear devido ao endurecimento do feixe. A linha pontilhada indica valores de cinza hipotéticos sem endurecimento do feixe. Note – se que a espessura do material penetrada é proporcional à posição do pixel.

**Figura 16: Perfil de cone de alumínio obtido com tomográfica de Raios – X.**



Fonte: Dewulf et al, 2012.

O *Beam hardening* pode ser um artefato danoso porque ele altera o nível de cinza de um material, dependendo de sua localização na imagem. Uma medida que pode ser adotada é remover as extremidades da imagem e analisar apenas o centro. Mas este procedimento soluciona apenas as regiões mais afetadas. Porém como este artefato é contínuo, as regiões mais internas permanecerão possuindo tal defeito. Além disso, se a área da seção transversal

mudar de fatia para fatia, o grau do artefato de *beam hardening* também mudará, tornando a técnica propensa a erro. Existem várias possibilidades de remediar o *beam hardening*, desde preparo da amostra ao escaneamento passando em seguida ao processamento dos dados. A mais simples aproximação é usar um feixe de Raios – X que é energético o suficiente para assegurar que o *beam hardening* seja desprezível. Infelizmente muitas amostras são muito atenuantes e o *beam hardening* estará presente, a menos que a amostra seja muito pequena. Além disso, o uso de um feixe muito energético causa problemas de contraste, tornando difícil distinguir os diferentes materiais contidos na amostra, (Marques, 2008).

Outra forma de prevenção referente ao endurecimento do feixe é o uso de filtros metálicos de materiais variados, ou mesmo o uso de filtros matemáticos pós-aquisição de imagens, no processamento de dados. No entanto, essa técnica pode diminuir o efeito, mas não o previne. Além disso, a filtragem do feixe reduz a sua intensidade global, exigindo, portanto, tempos de aquisição mais longos. Outra técnica é usar um fantom (uma peça projetada com tamanho e geometria conhecida) de material com propriedades de atenuação semelhantes às do material da amostra, também pode ajudar a minimizar os efeitos do endurecimento do feixe, mas requer fantasmas únicos para cada tipo e geometria da amostra (Edey et al.,2013).

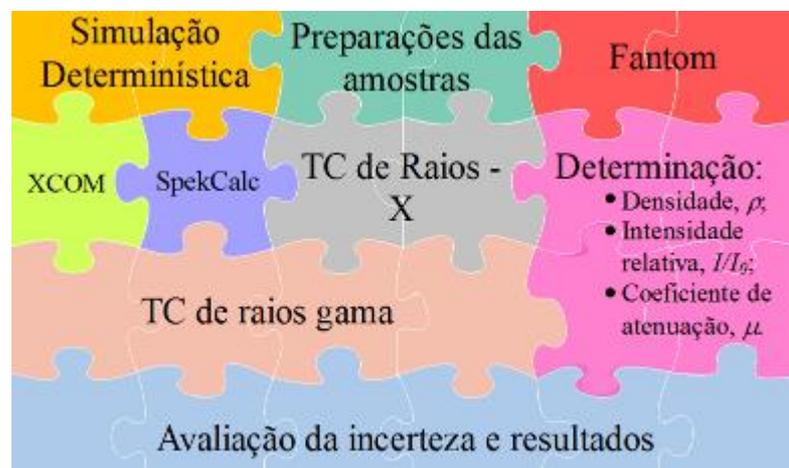
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia foi estruturada, visando à construção de procedimentos teóricos, numéricos e experimentais que permitam otimização, e estimação de parâmetros, que possibilitem a discriminação das fases mineralógicas dos solos tropicais, através de métodos tomográficos de transmissões de Raios – X e Raios Gama.

#### 3.1 Descrição dos Ensaio Experimentais

A metodologia foi dividida em três etapas, preliminarmente tem – se a fase simulada com modelos determinísticos, utilizando os softwares *XCOM* da NIST (National Institute of Standards and Technology), para a determinação dos coeficientes de atenuação de massa e *SpekCalc* para a obtenção do espectro de Raios – X, que é fundamental para descrever os processos de produção de Raios – X, emitidos a partir do ânodo de tungstênio. Sendo necessário, a seleção da energia do feixe em keV, o ângulo do ânodo, a espessura e o tipo de filtração. A segunda etapa a ser utilizada no presente trabalho, consiste na preparação das amostras, a mesma representa a fase de modelagem dos solos simulados, na qual, obtêm – se o fantom solo tropical (fantom físico do solo tropical). A terceira etapa fundamental – se no desenvolvimento de técnicas experimentais de tomografia computadorizada por transmissões de raios gama e microtomografia de Raios – X, aplicada na caracterização mineralógica dos solos, conforme poder ser visto na Figura 17.

**Figura 17: Fluxograma das etapas experimentais.**



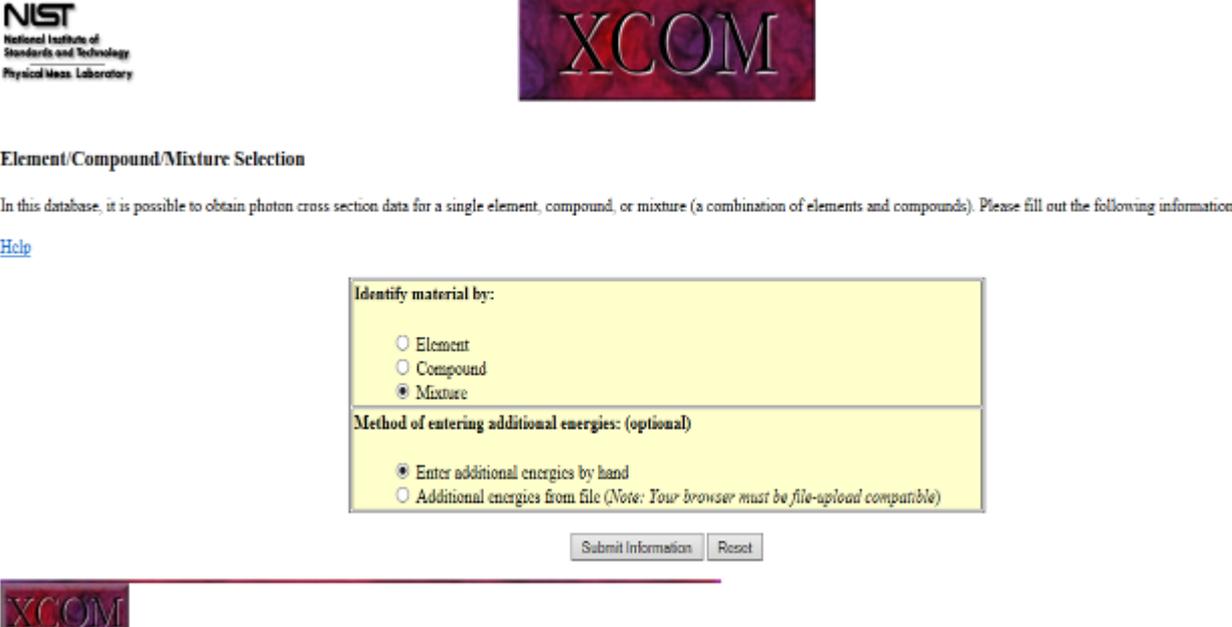
Fonte: Autoria própria.

### 3.1.1 Simulação determinística

#### 3.1.1.1 Software XCOM

O *software* XCOM é um banco de dados da web, desenvolvido pela NIST (*National Institute of Standards and Technology*), que permite calcular seções transversais de choque de espalhamentos incoerentes e coerentes, efeitos fotoelétricos, produções de pares e coeficientes de atenuação total de qualquer elemento ( $z < 100$ ), composto ou mistura (Berger e Hubbell, 1999), com energias de 1 keV até 100 GeV, conforme apresentado na Figura 18.

**Figura 18: Interface de entrada para determinação de mistura, composto ou elemento no software XCOM.**



**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
Physical Mass Laboratory

**XCOM**

**Element/Compound/Mixture Selection**

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:  
[Help](#)

Identify material by:

Element  
 Compound  
 Mixture

Method of entering additional energies: (optional)

Enter additional energies by hand  
 Additional energies from file (Note: Your browser must be file-upload compatible)

Submit Information    Reset

**XCOM**

Fonte: NIST (2016).

Os valores dos coeficientes de atenuação mássicos para diversos materiais são determinados levando-se em consideração a energia da radiação e a composição química de um material (elemento) ou mistura de vários materiais, de acordo com as informações apresentada na Figura 18.

Na Figura 19, tem – se a interface de entrada das informações necessária para o cálculo do coeficiente de atenuação mássico da mistura, que consiste na formula química e frações mássica da composição da mistura do presente trabalho (Levring et al.,2004). E sua energia ou faixa de energia de operação.

**Figura 19: Interface de entrada para utilização da faixa de energia e fração mássica da mistura no software XCOM.**

Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:

H2O 0.9  
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

Optional output title:

**Graph options:**

- Total Attenuation with Coherent Scattering
- Total Attenuation without Coherent Scattering
- Coherent Scattering
- Incoherent Scattering
- Photoelectric Absorption
- Pair Production in Nuclear Field
- Pair Production in Electron Field
- None

**Additional energies in MeV: (optional)** (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

Include the standard grid

**Energy Range:**

Minimum:  MeV

Maximum:  MeV

Fonte: NIST (2016).

Definidas as variáveis de entrada no *software* XCOM que são, por exemplo, a composição da mistura e a faixa de energia em estudo, são calculados os valores dos coeficientes de atenuações mássicos: total com ou sem espalhamento; para o efeito fotoelétrico; para o efeito espalhamento Rayleigh e Compton; e produção de pares no campo do núcleo ou elétron.

### 3.1.1.1.1 Medidas com XCOM

#### **Coefficiente de atenuação**

O coeficiente de atenuação mássico ( $\mu_m$ ), é definido como combinações elementares de cada processo de interação dos fótons com a matéria, dado por:

$$\mu_m = \left( \frac{\tau + \sigma_R + \sigma_C + \kappa}{\rho} \right) \quad (8)$$

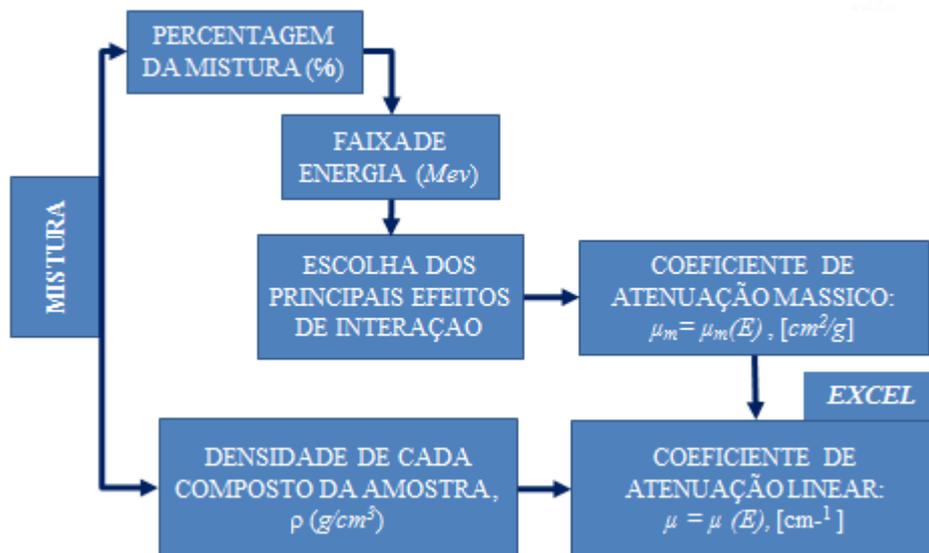
em que  $\tau$ ;  $\sigma_R$ ;  $\sigma_C$  e  $\kappa$  são efeito fotoelétrico, espalhamento coerente, efeito Compton e produções de pares, respectivamente. A unidade de medida do coeficiente de atenuação mássico, no Sistema CGS de unidades, é o  $cm^2/g$ , é conveniente expressar em função da massa, pois independem da densidade do material ( $\rho$ ).

O parâmetro que permite quantificar a quantidade de fótons que interagem em um dado material por unidade de comprimento deste material é o coeficiente de atenuação linear,  $\mu$  ( $cm^{-1}$ ), definidor por:

$$\mu = \rho \mu_m \quad (9)$$

sendo que  $\rho$  é a densidade do material ou do meio, e  $\mu_m$  o coeficiente de atenuação mássico definido pela Equação 8, e calculada pelo software XCOM (ver Seção 3.1.1.1).

**Figura 20: Fluxograma das etapas do software XCOM**



Fonte: Autoria própria.

Para o presente trabalho serão utilizados o valor de energia de 0,662 MeV (662 keV), que está relacionado com a energia da fonte de Césio 137. E os valores na faixa de energia mínima de 0,026 MeV (26 KeV) e de energia máxima de 0,225 MeV (225 keV), que corresponder energia máxima de operação do tomógrafo computadorizado de Raios – X.

## Atenuação de Raios Gama

Considerando a equação de Beer-Lambert que relaciona a intensidade incidente  $I_0$  no material de densidade constante dada por:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu e(x)} \quad (10)$$

sendo que o coeficiente de atenuação linear,  $\mu$ , a espessura ao longo da trajetória da radiação  $e(x)$  e a intensidade transmitida  $I(x)$ . Com a variação de densidade do material ao longo da trajetória da radiação, a intensidade da atenuação medida,  $\mu \cdot e(x)$ , é substituído por uma integral de linha. Então, reescrevendo a Equação 10 chega – se a:

$$I(x) = I_0 e^{-\int_L \mu(x,y) dy} \quad (11)$$

em que  $L$  é o comprimento do material atravessado pelo feixe na direção do eixo  $y$ . Uma linha que atravessa  $\mu(x, y)$  é chamada de raio.

Reescrevendo a Equação 10, tem – se que a atenuação de Raios Gama, é expressar para cada material utilizado no presente trabalho por:

$$-\ln\left(\frac{I(x)}{I_0}\right) = \mu \cdot e(x) \quad (12)$$

tendo que  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear, determinado pela Equação 9, e  $e(x)$  é a espessura ao longo da trajetória da radiação.

### 3.1.1.2 Software SpekCalc

O software SpekCalc é um programa que simula os espectros de Raios – X, emitido por um tubo de Raios – X de ânodo de tungstênio. Possui uma Interface gráfica com o usuário (Graphical User Interface, GUI), isto é, possibilitando uma interação agradável entre o usuário e o programa. Foi desenvolvido, usando a linguagem de programação orientada a objetos REALbasic, normalmente escritos em um pacote de software chamado Real Studio. O REALbasic é um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (Integrated Development Environment, IDE) multiplataforma, para Windows, Mac OS X e Linux, com um dialeto

próprio da linguagem de programação BASIC orientada a objetos. Desenvolvida e comercializada pela REAL Software, Inc. Austin, Texas. Na Figura 21 pode – se observar a interface do *software* SpekCalc (Poludniowski et al., 2009).

**Figura 21: Variáveis de entrada e saída do software SpekCalc.**

Input Parameters (Item 1)			
Peak Energy (T0):	225		keV
Minimum Energy (hVMin):	22.5		keV
Energy Bin (Dhv):	1		keV
Theta (th):	18		Degree
Air Thickness (t_Air):	1000		mm
Beryllium Thickness (t_Be):	0.5		mm
Aluminium Thickness (t_Al):	0		mm
Copper Thickness (t_Cu):	0		mm
Tin Thickness (t_Sn):	0		mm
Tungsten Thickness (t_W):	0		mm
Tantalum Thickness (t-Ta):	0		mm
Water Thickness (t_Wa):	0		mm
Titanium Thickness (t_Ti):	0		mm
Graphite Thickness (t_C):	0		mm
Nf:	1	(0.68 default)	
P:	0.33	(0.33 default)	
Comment:			

Output Parameters (Item 2)			
1st HVL (Al):	5.52	mm	
2nd HVL (Al):	9.71	mm	
HVL1/HVL2 (Al):	0.568	-	
1st HVL (Cu):	0.265	mm	
2nd HVL (Cu):	0.900	mm	
HVL1/HVL2 (Cu):	0.294	-	
Mean Energy:	68.4	keV	
Effective Energy (Al):	44.1	keV	
Effective Energy (Cu):	48.0	keV	
Bremsstrahlung output:	674.7	μGy/mAs @ 1 meter	
Characteristic output:	83.08	μGy/mAs @ 1 meter	

### Item 1: Entrada

- Energia do feixe, T0 [keV];
- Ângulo do anodo de tungstênio, th [graus];
- Espessura e material de filtração, t [mm]. Os materiais pode ser: Ar atmosférico (Air); Berílio (Be); Cobre (Cu); Estanho (Sn); Tungstênio (W); Tântalo (Ta); Água (water); Titânio (Ti) e Grafite (Carbono);
- Os parâmetros normalizados  $N_f$  (Bremsstrahlung) e P (Raios –x característico).

### Item 2: Saída

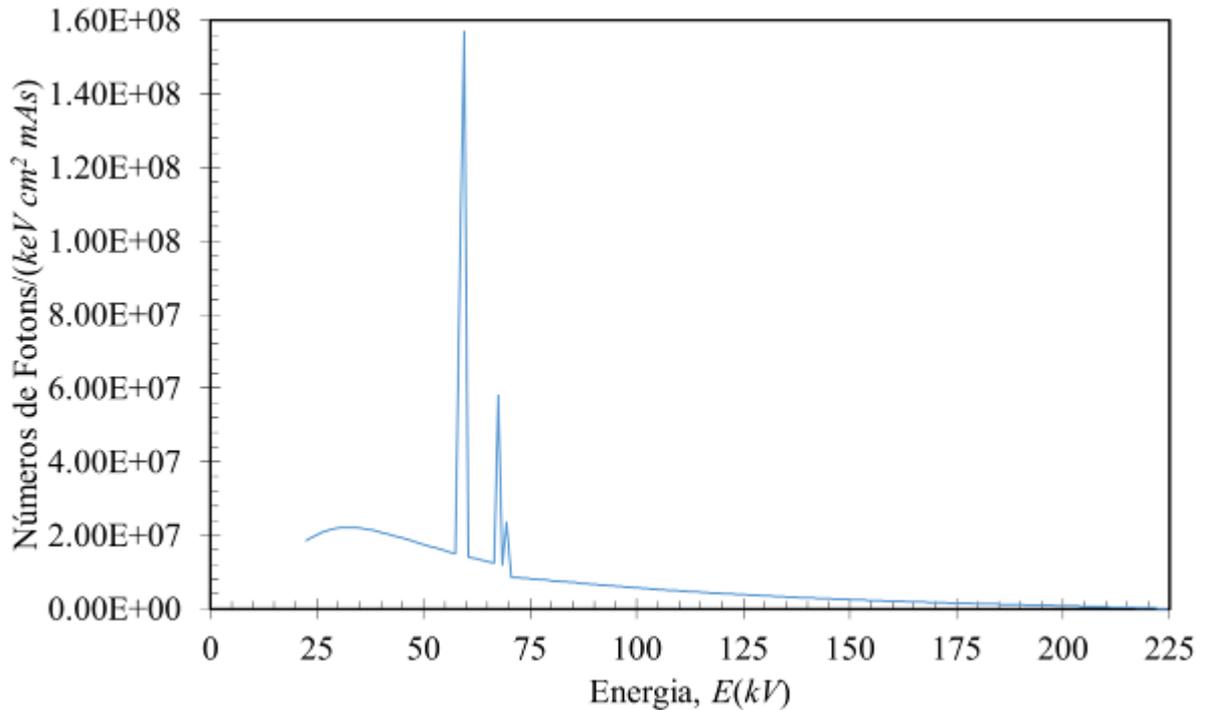
- Camada semi – redutora (HVL) para uma filtração de alumínio ou cobre de um feixe policromático;
- Energia média do espectro de Raios – X;
- Energia efetiva para filtros de alumínio e de cobre;
- Os valores de Raios – X de Freamento (bremsstrahlung) e Raios – X Característicos;
- E o espectro de Raios – X.

Fonte: Autoria própria.

Os valores de  $N_f$  e  $P$  são normalizações gerais do modelo proposto por Poludniowski et al (2009), e eles estão relacionados com as contribuições de Bremsstrahlung e o Raios – X característico para um tudo de Raios – X, respectivamente (ver Figura 21).

Após a definição dos parâmetros de entrada, conforme apresentado na Figura 21, obtém – se o espectro de Raios – X simulado pelo *software* SpekCalc nas condições definidas pelo usuário, como poder ser visto na Figura 22.

**Figura 22: Espectro de Raios – X simulado a partir do *software* SpekCalc, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de  $18^\circ$ , filtração inerente de  $0,5\text{ mm}$  de *Be*, tensão aplicada ao tubo de Raios – X de  $225\text{ kV}$ .**



Fonte: Autoria própria.

Além da modelagem do espectro de Raios – X, têm-se como dado de saída do *software SpekCalc*, os valores da 1<sup>o</sup> e da 2<sup>o</sup> camada semi – redutora, energia media e energia efetiva, que tem seus valores utilizados para caracterizar o espectro de Raios – X (conforme apresentado na Figura 22).

#### 3.1.1.2.1 Medidas com SpekCalc

Segundo SCAFF (1979) apontou dois aspectos físicos fundamentais e distintos que caracterizam um feixe de Raios – X: intensidade (Atenuação) e a energia. A intensidade está relacionada à quantidade de radiação contida no feixe, e a energia está associada ao poder de penetração dos seus fótons, o que expressa à qualidade dessa radiação. A análise de parâmetros que descrevam o comportamento da radiação contida no feixe permite a estimativa da avaliação da sua qualidade, e conseqüentemente, traduz uma estimativa da qualidade da imagem que poderá ser produzida.

## Atenuação de Raios – X

No entanto, sabe – se que uma fonte de Raios – X é uma fonte de feixe polienergético, isto é, cada energia de Raios – X é atenuada de forma diferente. Então, para uma fonte feixe de Raios – X, a Equação 10 é reescrita da seguinte forma:

$$I = I_0 \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} w(E) \exp\left(-\int_L \mu(x, y, E) dx\right) dE \quad (13a)$$

em que  $I$  e  $I_0$  são as intensidades totais de Raios – X transmitido e incidente, respectivamente.  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material e  $w(E)$  é o espectro de Raios – X normalizado definido por:

$$w(E) = \frac{\Omega(E)}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Omega(E) dE} \quad (13b)$$

sendo  $\Omega(E)$  o espectro de Raios – X simulador obtido pelo *software* SpekCalc.

Reescrevendo a Equação 13a, em termo da atenuação,  $-\ln(I/I_0)$ , chega-se à:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\ln\left(\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} w(E) \exp\left(-\int_L \mu(x, y, E) dx\right) dE\right) \quad (14)$$

sendo que  $w(E)$  é o espectro de Raios – X normalizado (Equação 13b);  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material, obtido com o *software* XCOM.  $E_{\min} = 25$  keV e  $E_{\max}$  a energia máxima que correspondera a tensão aplicada ao tubo de Raios – X no presente estudo.

A atenuação policromática não é uma função linear da espessura do material, conforme pode – se observar na Equação 14. Pelo fato das fontes de Raios – X industriais policromáticos, emitirem fracamente um feixe colimado de Raios – X policromático, como consequência, a atenuação difere fortemente da governada pela lei de atenuação de Beer – Lambert.

### Coefficiente de Homogeneidade, $h$

A camada semi – redutora,  $HVL$  (*Half Value Layer*) é definida como sendo a espessura necessária de um determinado material absorvedor, para atenuar a intensidade de um feixe de Raios – X ou gama à metade do seu valor inicial. Portanto, tem – se que a primeira  $HVL$  para um feixe monoenergético (raios gama) é expressa por:

$$HVL_1 = \frac{\ln(2)}{\mu} = \frac{\ln(2)}{\rho \cdot \mu_m} \quad (15)$$

em que  $\mu$  o coeficiente de atenuação linear do material,  $\rho$  a massa específica ( $g/cm^3$ ) e  $\mu_m$  é coeficiente de atenuação mássico ( $cm^2/g$ ).

Na Equação 15, observa – se que o valor  $HVL_1$  é dependente exclusivamente do valor do coeficiente de atenuação linear, que é função da energia do feixe monoenergético e do material utilizado como filtro.

Um feixe polienergético de um equipamento de Raios – X é composto por fótons de várias energias, portanto para o cálculo do valor  $HVL_1$ , pela Equação 1\* não pode ser utilizada. Pois, a  $HVL_1$  é função da energia dos fótons contidas no feixe de Raios – X e da distribuição espectral desse feixe. Então,  $HVL$  é definido como sendo o valor necessário para reduzir à metade do valor da intensidade do kerma (*kinetic energy released per unit mass*) no ar,  $K_a$  ( $\mu J/kg$  ou  $\mu Gy$ ), proveniente do feixe de Raios – X, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$K_a = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \Omega_e(E) \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{ar} dE \quad (16a)$$

em que  $(\mu/\rho)_{ar}$  é o coeficiente de atenuação mássico do ar [ $cm^2/g$ ],  $E[keV]$  a energia dos fótons e a intensidade do espectro transmitido de Raios – X.

$$\Omega_e(E) = \Omega(E) \cdot \exp \left( - \int_L \mu(x, y, E) dx \right) \quad (16b)$$

onde a intensidade do espectro incidente de Raios – X,  $\Omega(E)$ , e o coeficiente de atenuação linear,  $\mu$  [ $cm^{-1}$ ].

Portanto, o coeficiente de homogeneidade ( $h$ ) é a razão entre os valores da primeira camada semi – redutora ( $HVL_1$ ) e segunda camada semi – redutora ( $HVL_2$ ), chega – se a:

$$h = \frac{HVL_1}{HVL_2} \quad (17)$$

Pode – se utilizar a Equação 17, para verificar as características do feixe de Raios – X, isto é, o valor coeficiente de homogeneidade é sempre menor que 1, e o quanto mais próximo de um for o feixe monoenergético se encontra o feixe de Raios – X. É devido a primeira camada semi – redutora ( $HVL_1$ ) absorve a radiação de menor energia do feixe, e a segunda camada semi – redutora ( $HVL_2$ ) absorve a radiação mais penetrante, o que acarretara em um aumento da espessura do feixe e diminuição do valor do coeficiente de homogeneidade ( $h$ ). Então, para um feixe polienergético, o valor da segunda camada semi – redutora é sempre maior que o da primeira camada semi – redutora, devido ao endurecimento do feixe ao ultrapassar a espessura do material absorvedor que compões a última camada semi – redutora (Wolbarst, 1993).

### **Energia Efetiva**

O feixe de Raios – X possui um espectro heterogêneo de energia, por isso, que a taxa de penetração em um material é diferente para cada energia de fóton. Ao se determinar a taxa de atenuação do feixe, pode – se fazer uma comparação entre os espectros do polienergético com um feixe monoenergético, obtendo – se uma energia efetiva que seja equivalente entre eles. O valor da energia efetiva é definido como sendo a energia de um feixe monoenergético que teria o mesmo valor da camada semi – redutora para uma filtração de alumínio (ou cobre) de um feixe policromático (KHAN, 1994).

### 3.1.2 Preparações das amostras

O solo é formado por três fases: sólida, líquida e gasosa. Os solos tropicais têm na sua composição, majoritariamente óxidos de sílica (quartzo), ferro (hematita) e alumínio (coríndon) em proporções variadas. Esses três óxidos contribuem em média com 90 – 93% da composição da fase mineral desses solos (PIRES et al., 2016). A caracterização desses materiais está diretamente relacionada com a estrutura do solo, que influencia em um parâmetro muito importante, quando se trata de manejo do solo que é a retenção de água por esse solo.

### Produtos químicos

Os ensaios para as medições das densidades e coeficientes de atenuações dos materiais foram realizados com os minerais: coríndon, hematita e quartzo, e mais a substância água (Tabela 3).

**Tabela 3: Propriedades físicas dos materiais utilizados no presente trabalho.**

Material	Composto químico, $c$	Massa específica, $\rho_c$ ( $g/cm^3$ )
Coríndon	$Al_2O_3$	3,97000
Hematita	$Fe_2O_3$	5,20000
Quartzo	$SiO_2$	2,32000
Água	$H_2O$	1,00000

Fonte: NIST XCOM (2015)

### Equipamentos

Os equipamentos empregados na preparação das misturas e determinação da densidade dos materiais estão listados na Tabela 4.

**Tabela 4: Equipamentos utilizados na determinação da densidade**

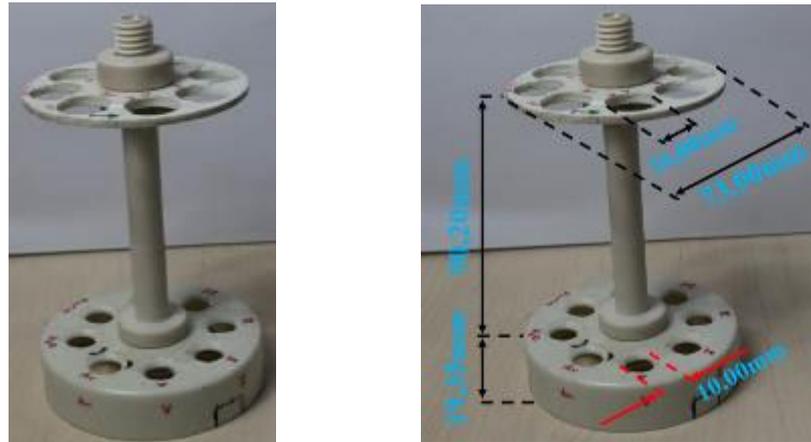
Equipamentos	Marca/modelo
Balança analítica	Shimadzu/AUY220
Paquímetro	Mitutoyo/Digimatic

Fonte: Autoria própria.

## Materiais

Na Figura 23 é apresentado o suporte dos tubos de ensaio, que foi construído em plástico com as dimensões conforme apresentado na Figura 23(b), com o objetivo de acondicionar os tubos de ensaio de plástico com fundo redondo.

**Figura 23: Suporte de tudo de ensaio e a dimensões do mesmo.**



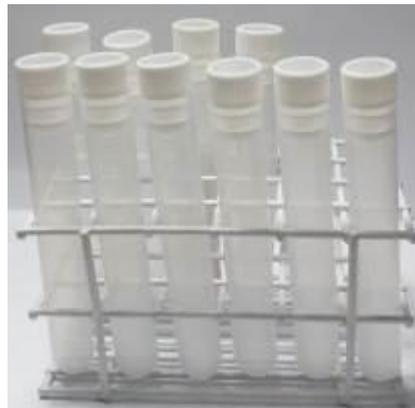
(a) Suporte de tubos de ensaios

(b) Dimensões do suporte.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 24, tem-se os tubos de ensaio de plástico transparente com fundo redondo e tampa de rolha, com dimensão de 15x100mm e capacidade de 10mL, utilizados para acondicionar as amostras no presente trabalho.

**Figura 24: Tubo de ensaio de plástico transparente.**



Fonte: Autoria própria.

O recipiente das amostras é constituído de um suporte de tubo de ensaios e mais oito tubos de ensaios de plásticos transparentes de fundo redondo, conforme poder ser visto

na Figura 25, cujo objetivo deste recipiente é acondicionar os materiais utilizados no presente trabalho, para a construção do fantom solo tropical.

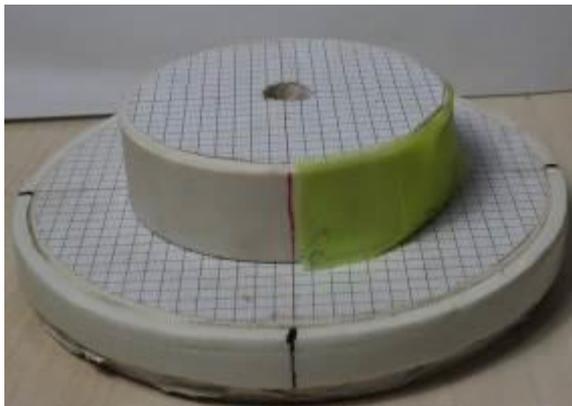
**Figura 25: Recipiente das amostras do presente trabalho.**



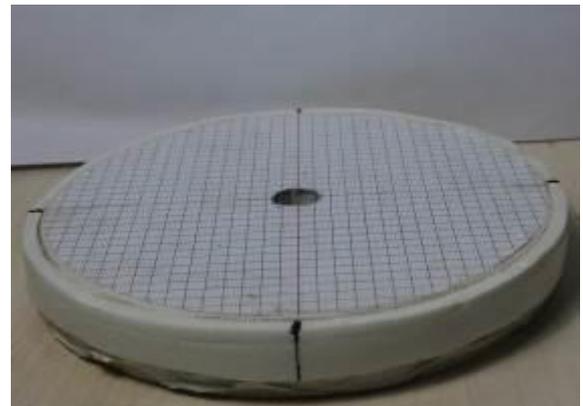
Fonte: Autoria própria.

Os ensaios incertezas para as medições das densidades e coeficientes de atenuações dos materiais foram realizados utilizando os suportes apresentados na Figura 26.

**Figura 26: Suporte de tubo de ensaio individual para os experimentos no tomógrafo computadorizado de raios gama.**



(a) Base para o tubo de ensaios para leitura,  $h_1$ .



(b) Base mais regulador de altura para o tubo de ensaio para leitura,  $h_2$ .

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.1.1 Construção do fantom solo tropical

Para os materiais da Tabela 3, utilizam – se dois tubos de ensaio, sendo um para a água, o outro, para os três materiais particulados, na seguinte ordem: óxidos de sílica, alumínio, ferro e sílica, conforme poder ser visto na Figura 27.

**Figura 27: Materiais Puro da Tabela 3 e mais Água em tubos de ensaio.**



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5, são apresentados os valores das massas de  $A_n$  e  $B_n$ , que são obtidas misturando as massas de óxido de sílica,  $m_{SiO_2}$ , e óxidos de alumínio ( $Al_2O_3$ ) ou óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ),  $m_j$ , nas quantidades definidas.

**Tabela 5: Massa das misturas utilizadas para simular uma composição de um solo tropical.**

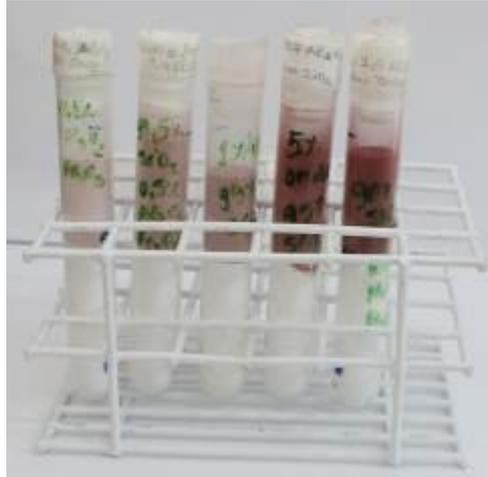
n	Mistura $A_n$		Massa total, $m_t$	n	Mistura $B_n$		Massa total, $m_t$
	$SiO_2(g)$	$Al_2O_3(g)$			$SiO_2(g)$	$Fe_2O_3(g)$	
I	13,9860	0,0140	14,0000	VI	13,9860	0,0140	14,0000
II	13,9300	0,0700	14,0000	VII	13,9300	0,0700	14,0000
III	13,8600	0,1400	14,0000	VIII	13,8600	0,1400	14,0000
IV	13,3000	0,7000	14,0000	IX	13,3000	0,7000	14,0000
V	12,6000	1,4000	14,0000	X	12,6000	1,4000	14,0000

Fonte: Autoria própria.

As massas das misturas  $A_n$  ou  $B_n$ , foram pesadas em uma balança analítica (Shimadzu modelo AUY220), conforme as quantidades de massa de cada composto químico definidos na Tabela 5, totalizando 14 gramas de cada mistura.

As misturas  $A_n$  e  $B_n$ , conforme apresentado na Tabela 5, são colocadas em cinco tubos de ensaios, no qual, utilizou – se o seguinte procedimento: colocou – se a mistura  $A_n$  em um tubo de ensaios até aproximadamente a metade da altura do tubo (50mm), repetindo este passo para os demais tubos de ensaios. Após finalização da etapa anterior, acrescenta – se a mistura  $B_n$  no mesmo tubo de ensaio com fração mássica de mesmo valor, isto é, se o tubo estive com  $A_I$  acrescenta no mesmo tubo  $B_{VI}$ , ou seja, os tubos de ensaios apresentam – se valores de fração mássica de óxido de sílica iguais, conforme poder ser visto na Figura 28.

**Figura 28: Misturas  $A_n$  e  $B_n$  confinadas nos tubos de ensaios, em ordem decrescente da quantidade de óxido de sílica, da esquerda para a direita.**



Fonte: Autoria própria.

A fração mássica de cada mistura particulada da Tabela 5 é determinada por:

$$X_{n,j} = \frac{m_j}{m_{SiO_2} + m_j} \quad (18)$$

em que  $m_j$  é massa de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) ou óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) e  $m_{SiO_2}$  é a massa de óxido de sílica ( $SiO_2$ ). Assim, a fração mássica das misturas é

$$X_{n,j} + X_{n,SiO_2} = 1 \quad (19)$$

sendo que  $X$  é fração mássica da mistura particulada e subscrito  $n$  representa as misturas  $A_n$  e  $B_n$  da Tabela 5 .

Portanto, a Equação 19 poder ser reescrita como:

$$X_{n,SiO_2} = 1 - X_{n,j} \quad (20)$$

Utilizando as Equações 18 e 20, com os valores das respectivas massas das misturas particuladas,  $A_n$  e  $B_n$ , conforme apresentado na Tabela 5. Obtêm – se os valores das frações mássicas para cada mistura, que estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6: Frações mássicas das misturas particuladas no presente trabalho.**

Mistura A <sub>n</sub>			Mistura B <sub>n</sub>		
<i>n</i>	SiO <sub>2</sub> (g)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	<i>n</i>	SiO <sub>2</sub> (g)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)
I	0,9990	0,0010	VI	0,9990	0,0010
II	0,9950	0,0050	VII	0,9950	0,0050
III	0,9900	0,0100	VIII	0,9900	0,0100
IV	0,9500	0,0500	IX	0,9500	0,0500
V	0,9000	0,1000	X	0,9000	0,1000

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.1.1.1 Fantom Solo Tropical

Coloca – se os sete tubos de ensaios com materiais e mais o tubo de ensaio vazio no suporte de tubos de ensaios, obtendo assim o **fantom solo tropical**, que simula a composição da fase mineral dos solos tropicais, conforme poder ser visto na Figura 29.

**Figura 29: Fantom solo tropical utilizando no presente trabalho.**

(a) Mistura e substancias.

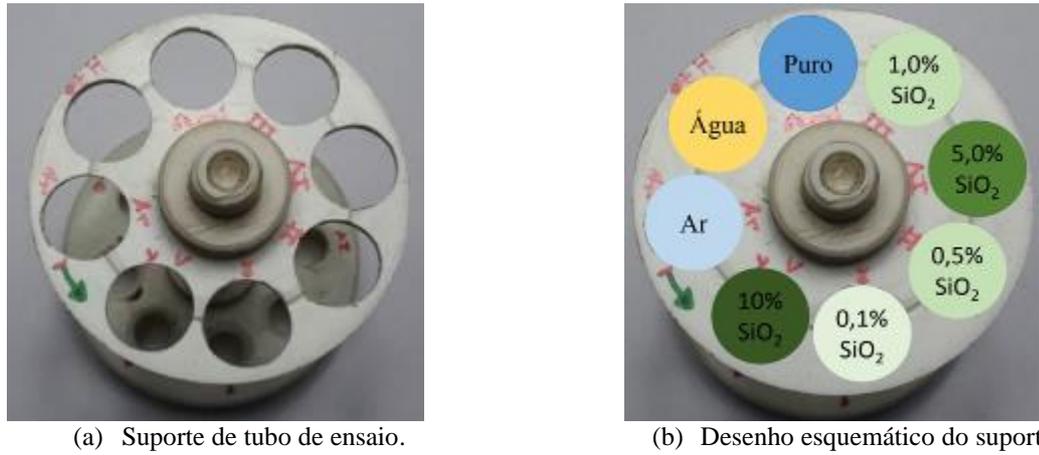


(b) Misturas A e B.

Fonte: Autoria própria.

Os materiais do **fantom solo tropical** apresentado na Figura 29, estão organizados conforme apresentado na Figura 30.

**Figura 30: Organização dos Materiais do Fantom solo tropical.**



Fonte: Autoria própria.

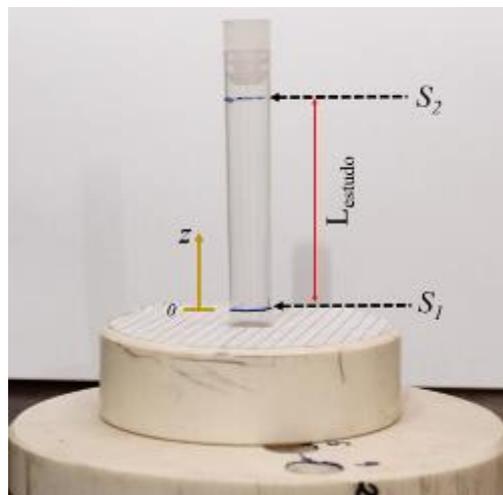
### 3.1.1.2 Construção do fantom densidade

Esta seção tem como objetivo a preparação das amostras das fases sólidas do solo, a ser utilizada na determinação da densidade pelos métodos gravimétrico e de transmissão de Raios gama, e avaliação das incertezas de medição das estimativas de densidades do solo.

#### 3.1.1.2.1 Determinação do volume de referência do tubo de ensaio

Na Figura 31, o recipiente de forma cônica (tubo de ensaio) com diâmetro variado com a altura,  $D = D(z)$  em que  $0 \leq z \leq L_{\text{estudo}}$  (comprimento total do volume de referência).

**Figura 31: Volume de referência para determinação da densidade do material particulado.**



Fonte: Autoria própria

O volume de referência do tubo de ensaio,  $V_{te}$  [ $cm^3$ ], pode ser obtido pelo volume de um troço de cone de seção circular (Figura 31) pode ser expresso com função dos diâmetros das seções  $S_1$  e  $S_2$  que são  $D_1[cm]$  e  $D_2[cm]$ , respectivamente. E de sua altura ( $L_{estudo}[cm]$ ) através da seguinte expressão:

$$V_{te} = \frac{\pi L_{estudo}}{12} (D_1^2 + D_1 D_2 + D_2^2) \quad (21)$$

#### 3.1.1.2.2 Pesagem das massas dos materiais

As massas dos materiais de referenciais foram pesadas em balança analítica (Shimadzu modelo AUY220), apresentados na Tabela 4, e acondicionados em tubos de ensaios conforme apresentado na Figura 32.

**Figura 32: Tubos de ensaios com os materiais da Tabela 3.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 32, da esquerda para a direita são apresentados os tubos de ensaios com os óxidos de ferro, alumínio e sílica, respectivamente. E mais dois tubos de ensaio um com água, outro vazio

#### 3.1.1.2.3 Fantom densidade

Na Figura 33, observa – se o volume de referência (região) para determinações da densidade e atenuação do meio particulado, apresentado na Tabela 3.

**Figura 33: Região delimitada para determinação da densidade.**



(a) tubo de ensaio com material para leitura,  $h_1$ .



(b) tubo de ensaio com material para leitura,  $h_2$ .

Fonte: Autoria própria

### 3.1.2 Método gravimétrico

A densidade aparente do meio particulado ( $\rho_a$ ) poder ser determinada experimentalmente medindo – se a massa do material que representa o meio particulado (Tabela 3) e o volume de referência ( $V_{te}$ ) ocupado pelo material, com o uso de instrumentos de medições adequados (Tabela 4), pela expressão:

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_{te}} \quad (22)$$

em que  $V_{te}$  é volume de referência do tubo de ensaio que é calculado pela Equação 4 e  $m_a$  é massa do material do meio particulado.

### 3.1.4 Tomógrafo de Raios – X

As análises experimentais dos solos tropicais utilizando o fantom solo tropical são realizadas no tomógrafo computadorizado industrial de microfoco de Raios – X, modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology, com potência 225 W, tensão máxima de 225 kV e corrente de 1000  $\mu A$  (Figura 34). Este equipamento possui um ânodo de tungstênio e janela de berílio de 500  $\mu m$  de espessura. Encontra-se no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios – X (LTC – RX) do grupo de pesquisa Física de Solos do Departamento de Energia Nuclear (DEN), do Centro de Tecnologia e Geociências – Escola de Engenharia (CTG – EEP), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), coordenador responsável pelo laboratório Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino.

**Figura 34: Tomógrafo de terceira geração com fonte de radiação de Raios – X, modelo XT H 225 ST da Empresa Nikon Metrology.**



Fonte: A autoria própria.

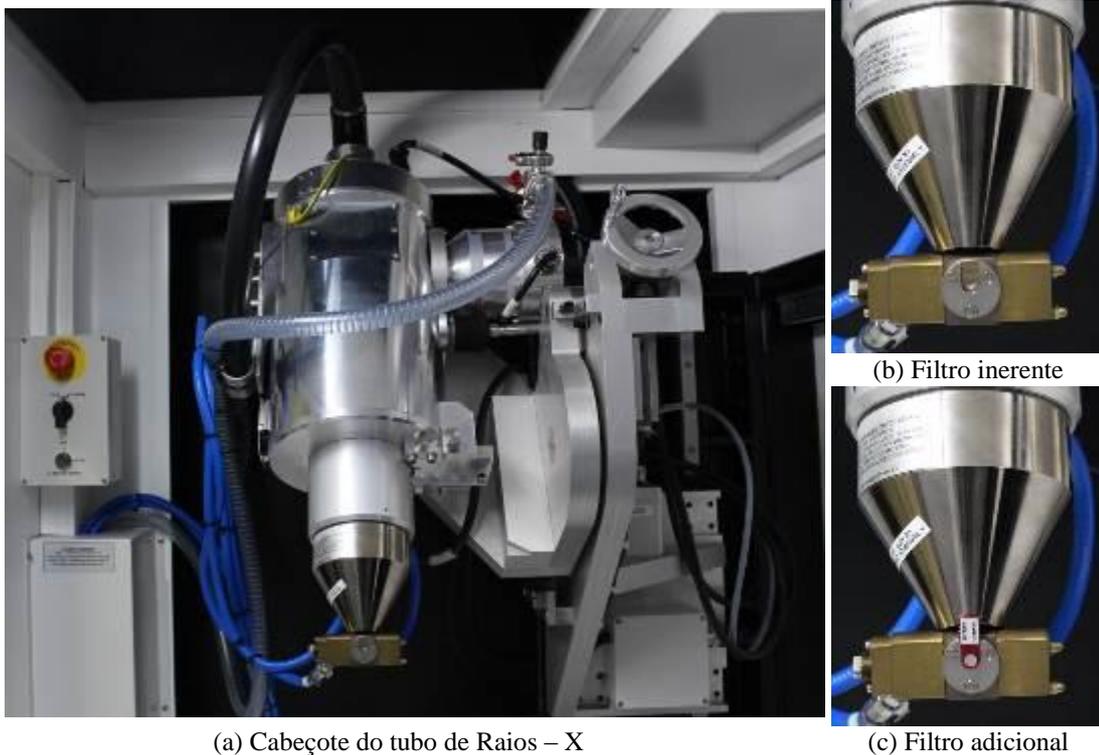
#### **3.1.4.1 Componentes de um Sistema TCi – 3ªG**

O tomógrafo computadorizado modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology é composto de quatro elementos principais: (i) fonte de Raios – X; (ii) detector de Raios – X; (iii) sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X para posicionamento do objeto entre a fonte e o detector, e proporcionando a rotação necessária para o TCi – 3ªG. E (iv) um computador para a aquisição de dados, reconstruindo os dados e subsequente análise de dados.

##### **3.1.4.1.1 Fonte de radiação de Raios – X**

Sistemas de CT industrial tipicamente empregam uma fonte de Raios-X microfocos, isto é, o tamanho do ponto focal de Raios – X é na ordem de micrometro, mostrado na Figura 35. O ângulo entre a saída dos Raios – X e o eixo do tubo (Ângulo do foco efetivo) é igual a 18°.

**Figura 35: Fonte de radiação de Raios – X do TCI – 3ªG.**



A fonte de Raios – X de microfoco exclusiva de 225kV, com tamanho de ponto focal de  $3\mu\text{m}$ , conforme apresentado na Figura 35(a), possui um suporte para filtração da radiação na saída do tubo de Raios – X (ver Figura 35 (b)). Ao acrescentar na saída do tubo de Raios – X um filtro, cujo objetivo é a retirada das radiações de baixa energia, causadoras de artefatos nas imagens (*Beam Hardening*), conforme ilustrado na Figura 35 (c)

#### 3.1.4.1.2 Filtração da radiação dos Raios – X

O sistema de tomografia computadorizada para aplicação industrial vem com um conjunto de filtros adicionais, conforme poder ser visto na **Figura 36**. Os materiais utilizados no presente trabalho como filtro são o berílio com 500  $\mu\text{m}$  de espessura inerente do tubo de Raios – X (filtro inerente), como atenuador, e filtros adicionais de alumínio, cobre e estanho fabricado pela a empresa *X-Tek Systems, Ltd*. Marca pertencente ao grupo *Nikon Metrology Inc.*

**Figura 36: Conjunto de filtros adicionais do TCI – 3<sup>a</sup>G.**



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7 são mostradas as propriedades físico – químicas de cada material utilizado.

**Tabela 7: Propriedade física dos materiais dos filtros, no presente trabalho.**

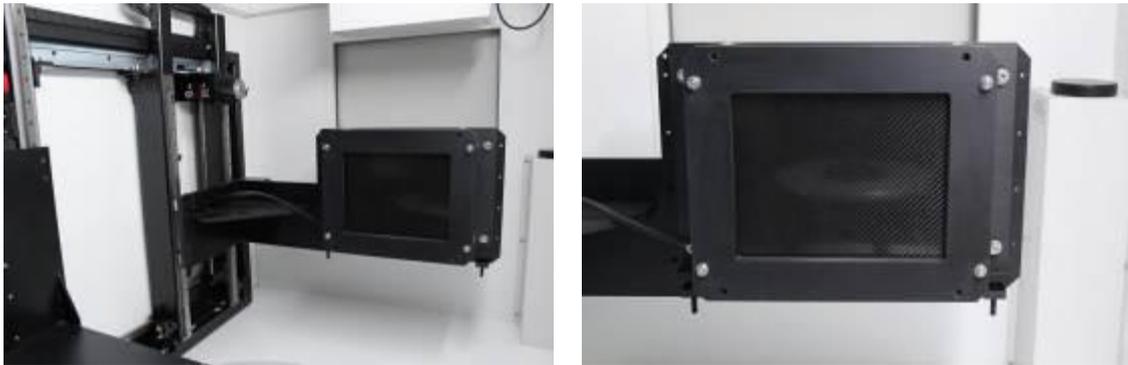
Filtro	Material	Símbolo	Número atômico, $Z$	Densidade, $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
Inerente	Berílio	<i>Be</i>	4	1,848
	Alumínio	<i>Al</i>	13	2,699
Adicional	Cobre	<i>Cu</i>	29	8,960
	Estanho	<i>Sn</i>	50	7,310

Fonte: NIST XCOM (2016)

#### 3.1.4.1.3 Detector de Raios – X

O tomógrafo de Raios – X modelo XT H 225 é configurado com um painel plano (*detector de Raios – X*) modelo Varian 2520 Flat Panel de 250x200mm (Ver Figura 37). Com um ponto focal pequeno e um painel plano de elevada resolução é possível criar imagens com maior definição, isto é, produzindo imagens de 1900x1500 digitalizadas para 16 bits (É importante frisar que a partir da quantidade de sensores ou do tamanho da malha de sensores determina-se a resolução espacial da imagem).

**Figura 37: Detector de Raios – X de tela plana**



(a)

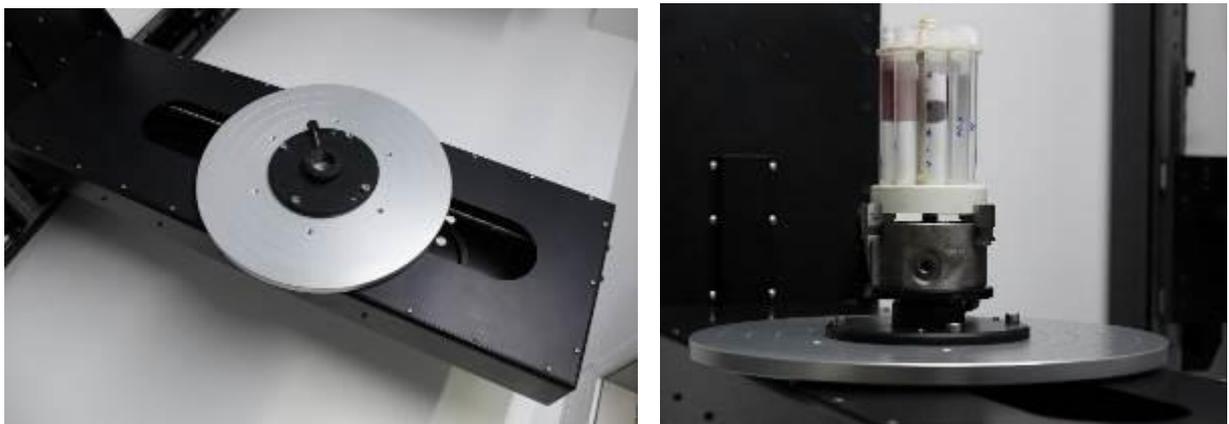
(b)

Fonte: Autoria própria.

#### 3.1.4.1.4 Sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X

O sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X, modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology permite a movimentação relativa do objeto fixo no suporte do porte amostra, ilustrado na Figura 38. Esta movimentação está condicionada a cinco graus de liberdade: Os três graus de liberdade relativos com uma translação num sistema a três dimensões (x, y, z), que corresponde ao deslocamento dos eixos x igual a 460mm, y igual a 470mm e z igual a 600mm. E uma rotação em torno do eixo do eixo z de 360° e mais uma inclinação do braço de  $\pm 30^\circ$ . Também é possível movimentar o detector, aproximando – o ou afastando – o do objeto em estudo.

**Figura 38: Sistema de movimentação do tomógrafo de Raios – X**



(a) suporte do porte amostra

(b) fantom do solo tropical

Fonte: Autoria própria

### 3.1.4.1.5 Aquisição de dados

O tomógrafo computadorizado modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology é um sistema supervisor de automação industrial (software Inspect – X), que propicia uma interface de alto nível do operador. Ver Figura 39.

**Figura 39: Sistema de controle do TCi – 3ªG, modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology.**



(a)

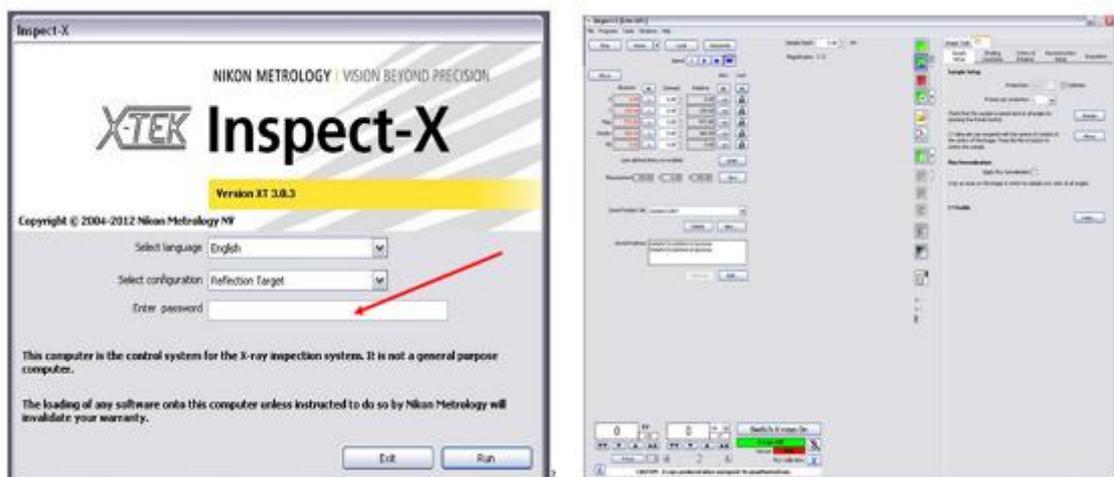


(b)

Fonte: Autoria própria

Para a aquisição de dados utiliza-se o software Inspect-X, o mesmo permite o ajuste dos parâmetros de entrada como: posição, filtração, energia, correntes selecionáveis e tempo de exposição. A janela de entrada deste programa pode ser observada na Figura 40.

**Figura 40: Interfase de entrada do software Inspect-X.**

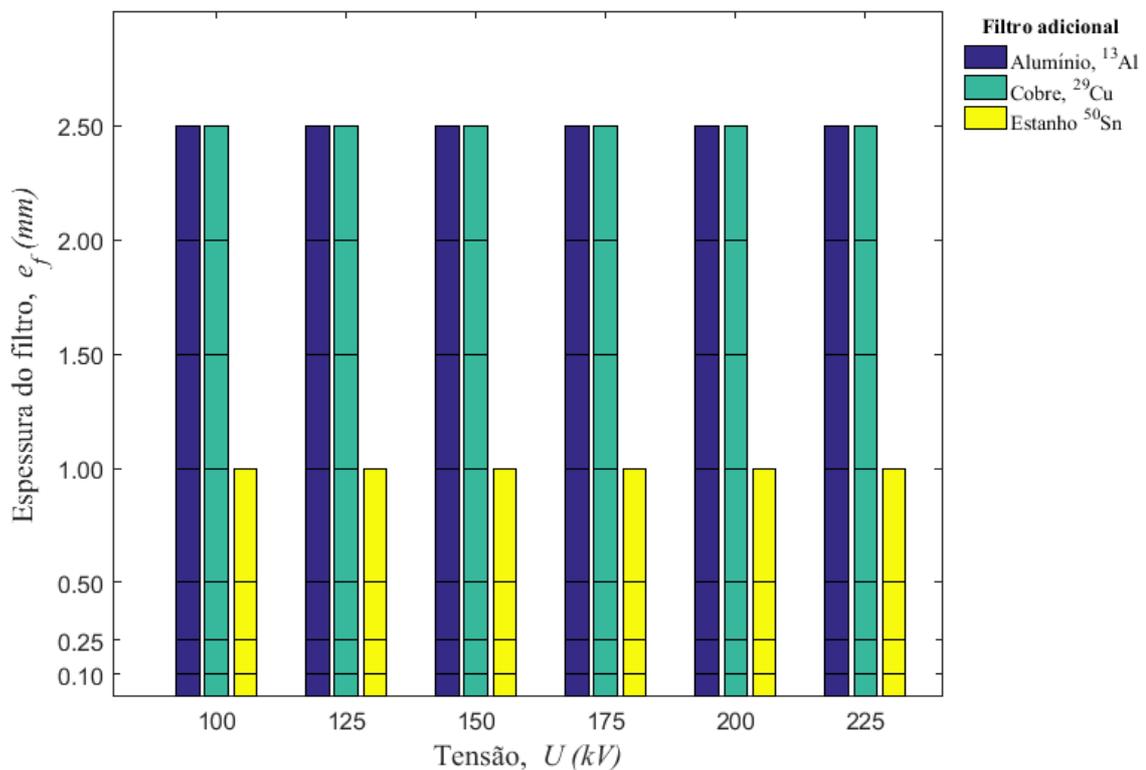


Fonte: Autoria própria.

### 3.1.4.2 Condições de operações

Os materiais utilizados no presente trabalho como filtros foram o berílio com 500  $\mu\text{m}$  de espessura inerente do tubo de Raios – X, como atenuador, e filtros adicionais de alumínio, cobre ou estanho nas tensões (voltagem) aplicadas ao tubo de Raios – X de 100; 125; 150; 175; 200 e 225 kV, conforme pode – se ver na Figura 41.

**Figura 41:** As diferentes espessuras e tensões para os materiais de filtros adicionais de Raios – X, como alumínio ( $^{13}\text{Al}$ ); cobre ( $^{29}\text{Cu}$ ) e estanho ( $^{50}\text{Sn}$ ), utilizados no presente trabalho.



Fonte: Autoria própria.

A quantidade total de experimentos no tomógrafo de Raios – X será 108 dos quais 42 são para o filtro de alumínio utilizando sete espessuras de filtro e seis tensões, 42 para o filtro de cobre nas mesmas condições do de alumínio e o restante para o filtro de estanho.

Os experimentos a serem realizados no presente trabalho consiste em avaliar o fantom solo tropical utilizando o TCI – 3<sup>a</sup>G variando três fatores: tensão no tubo de Raios – X, espessura do filtro adicional e material do filtro adicional.

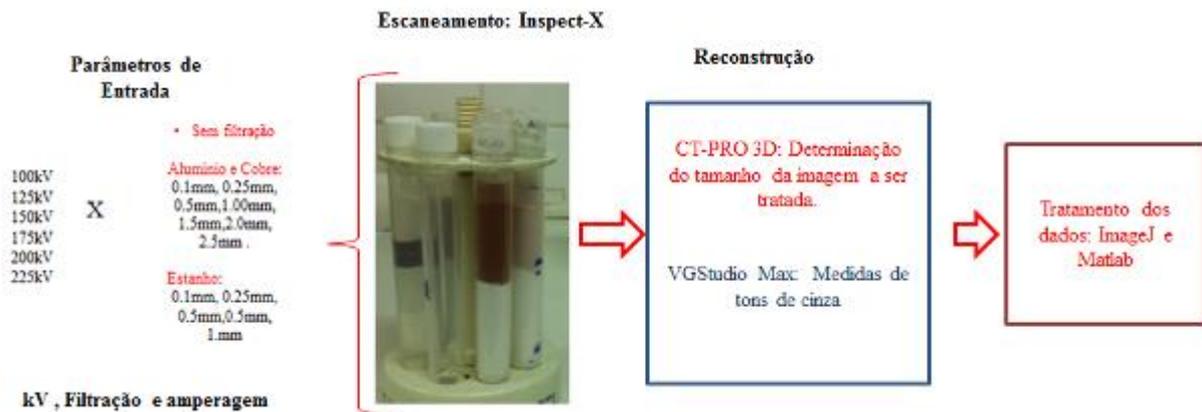
Os valores desejados (set – point) da corrente elétrica que são necessários para verificar a relação entre as variáveis tensões, quantidade de fótons do feixe de Raios – X e números de pixel utilizados, foram obtidos ajustando-se o valor da intensidade da corrente

elétrica até observar, que no histograma do nível de cinza das imagens do presente trabalho, obteve-se um valor máximo, que é na escala de tons de cinza (Gray Level Max.) de aproximadamente 50000, correspondendo aproximadamente a 80% do total de 65536 níveis de cinza, este procedimento é um pré-requisito de escaneamento.

### 3.1.4.3 Medidas com Tomógrafo de Raios – X

Na Figura 42, apresenta-se uma visão geral do processo de medidas com tomógrafo de Raios – X.

**Figura 42: Fluxograma de Medidas com Tomografia de Raios – X**



Fonte: Autoria própria.

As medidas de microtomografia foram realizadas no tomógrafo de Raios – X de terceira geração do laboratório (LTC – RX). Os parâmetros de entrada, que podem ser observados na Figura 42, foram tensão (Energia: 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV), corrente elétrica e filtragem adicional (0.1, 0.25, 0.5, 1.00, 1.5, 2.0 e 2.5mm dos filtros de alumínio e cobre, 0.1, 0.25, 0.5 mm do filtro de estanho). Esses filtros externos foram utilizados entre a fonte e amostra, a finalidade dessa filtração adicional é atenuar as radiações de baixa energia, a fim de tornar esse feixe o mais monoenergético possível. Esse processo é de suma importância porque visa à minimização dos artefatos de imagens, que surgem devido ao endurecimento do feixe, que podem ocorrer durante a atenuação na interface de materiais com diferentes densidades (dentro de uma mesma amostra), como é o caso do fantom do solo.

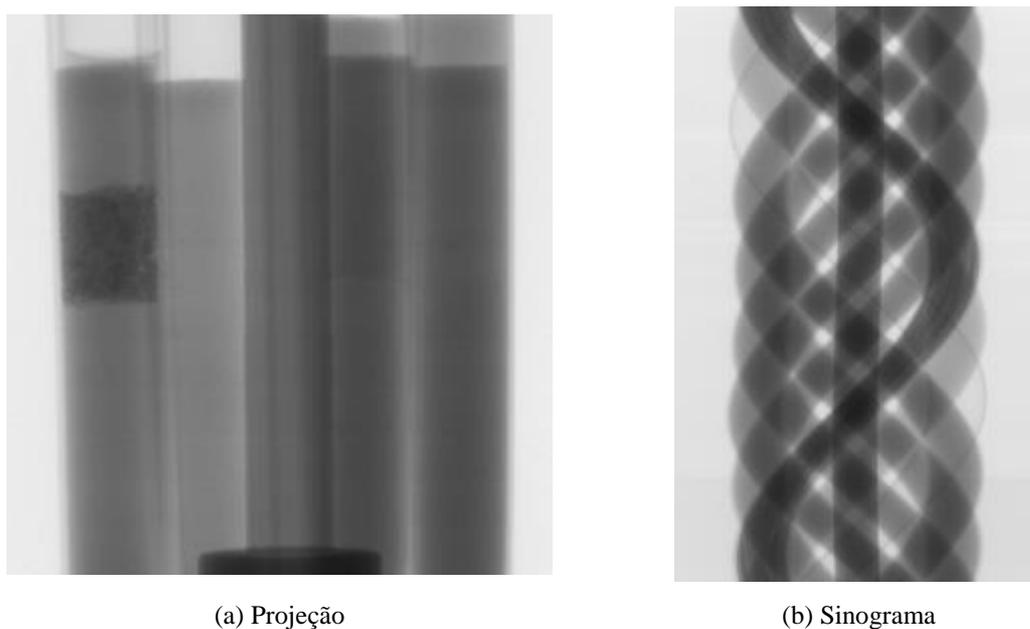
Preliminarmente ao escaneamento é realizada a calibração do equipamento, para cada condição de entrada: tensão, filtração e a corrente elétrica é regulada para cada condição de tensão e filtração. O processo de escaneamento e calibração do equipamento é realizado no

software Inspect-X (Nikon – Metrology), essa fase é antecessora da aquisição das imagens que corresponde efetivamente à primeira etapa do processamento dos dados. Após a amostra sensibilizar o detector, os sistemas eletrônicos transformam os sinais obtidos em dígitos do computador.

#### 3.1.4.3.1 Reconstrução tomográfica

Foram adquiridas 3016 radiografias, para um intervalo angular de  $0,093^\circ$  ilustrado na Figura 43(a), e o sinograma que representa o empilhamento de uma linha de projeção, conforme apresentado na Figura 43(b). Desta forma os dados das imagens são organizados para facilitar a reconstrução das mesmas.

**Figura 43: Projeção e sinograma na condição de tensão no tubo de Raios – X de 125 kV, corrente elétrica de 194  $\mu$ A e filtro adicional de cobre de espessura de 0,1 mm.**



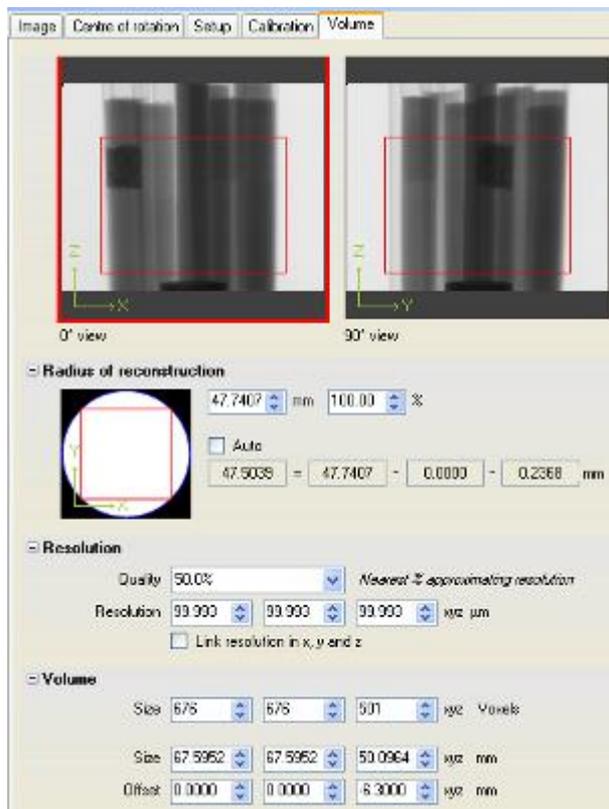
Fonte: Autoria própria

A segunda fase das medidas e de reconstrução no software CT PRO 3D, e poder ser visto na

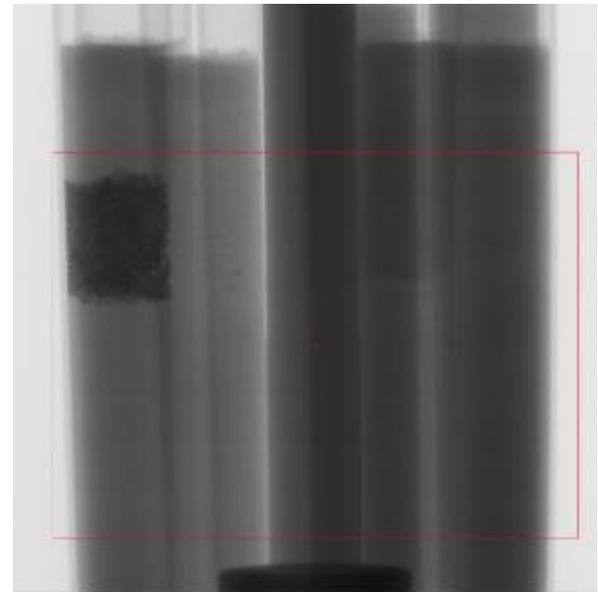
Figura 44. Inicialmente trabalha-se nos arquivos cuja extensão é *xtkct*. Em seguida faz-se um “controle de qualidade” das imagens escaneadas, onde se verifica a existência de algum movimento indesejado do objeto no momento do escaneamento. Após essa análise preliminar, seleciona-se o tamanho da imagem a ser reconstruída, através do subitem ‘volume’. As dimensões desejadas foram 676x676 x 501 (voxels), apresentado na

Figura 44(a).

Figura 44: Interface do software CT PRO 3D



(a) Entrada de dados



(b) visualização da região selecionada

Fonte: Autoria própria

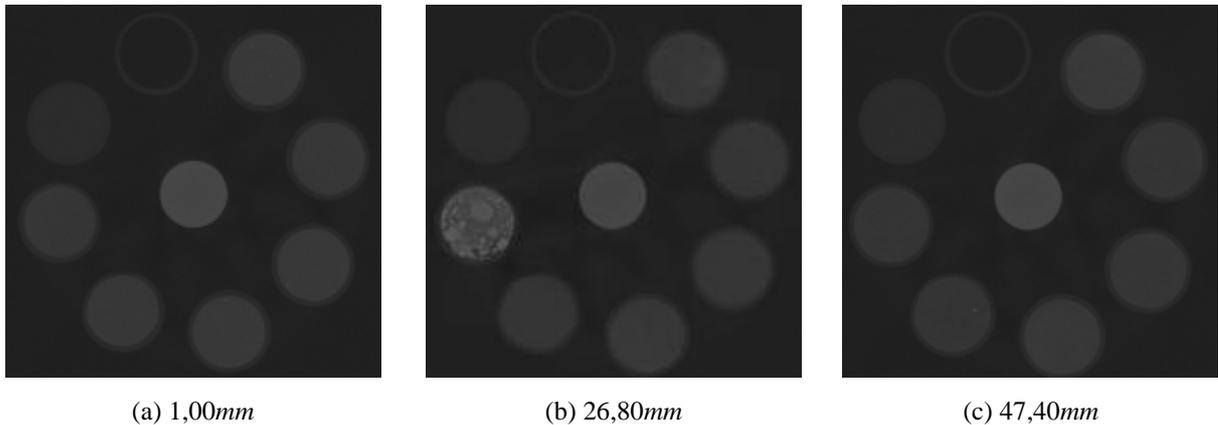
A terceira fase dos métodos é a obtenção dos valores de tons de cinza, que estão relacionados com os valores das intensidades após a interação com as amostras, esse processo é realizado no software *VGStudio Max* (Torre et al., 2017). Nessa fase a imagem é convertida para 16bit e obtêm-se valores de coeficiente de atenuação linear da amostra na escala de tons de cinza, a partir dos valores 'Lowest' e 'Highest' do histograma. A etapa seguinte é de tratamento dos dados.

### 3.1.4.3.2 Técnica de Pré – processamento das imagens tomográficas

A metodologia do processamento das imagens tomográficas dos resultados do tomógrafo de Raios – X foi desenvolvida em parceria com o professor Dr. Richard John Heck do Department of Land Resource Science, School of Environmental Sciences (SES), University of Guelph, Ontario, Canadá.

Para cada experimento, foram reconstruídas 501 fatias de espessura  $100\mu m$ . Os resultados da tomografia computadorizada são mostrados na Figura 45, e representam as reconstruções das fatias da amostra de solo tropical simulado pelo fantom físico.

**Figura 45: Resultado tomográfico do fantom solo tropical**

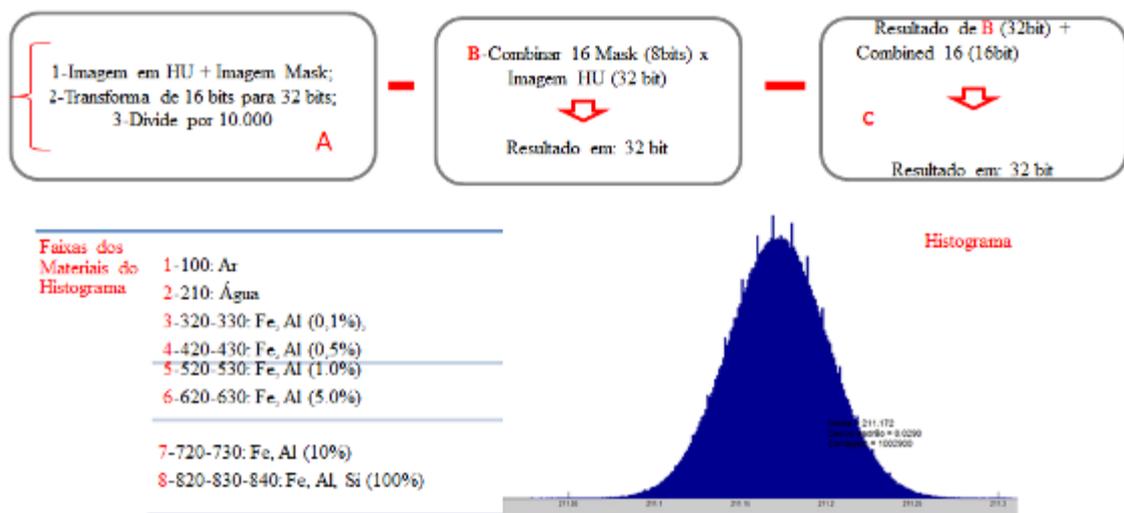


Fonte: Autoria própria

A Figura 45, apresenta uma representação das seções transversais do fantom solo tropical no presente trabalho nas alturas  $1,00mm$ ,  $26,80mm$  e  $47,40mm$ . Representando a distribuição bidimensional dos coeficientes de atenuação linear em escala de tons de cinza dos materiais que compõem o fantom solo tropical.

O fluxograma completo das etapas do pré-processamento das imagens tomográficas é ilustrado na Figura 46.

**Figura 46: Fluxograma de tratamento de imagens no ImageJ ou MatLab**



Fonte: Autoria própria.

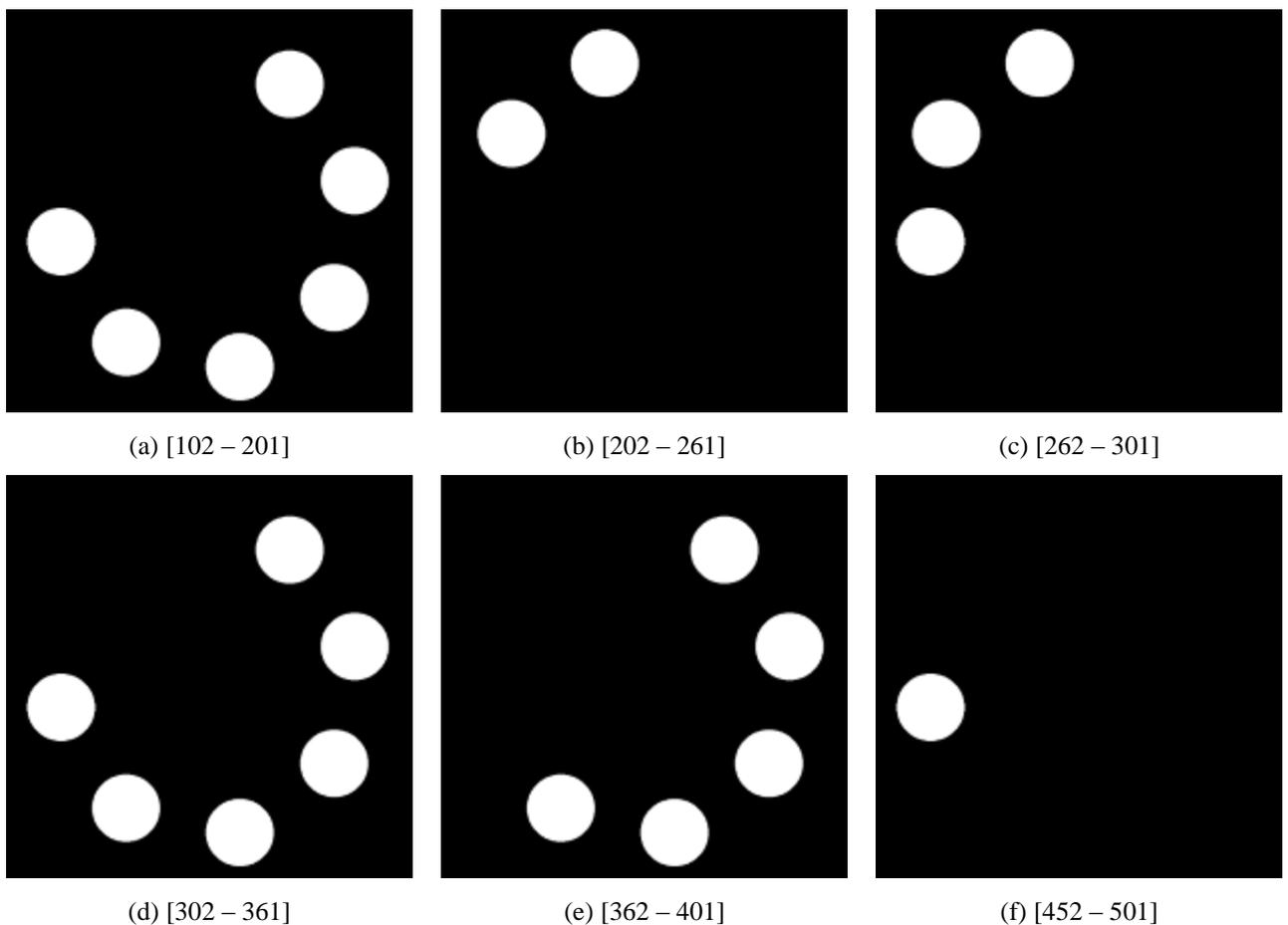
Esses histogramas, ilustrados na Figura 46 mostram a densidade em função da profundidade, nele também pode-se observar que existe um limite entre cada material. A partir dessa análise pode-se delimitar a faixa de cada material nas respectivas proporções e criar a máscara e cluster para aplicar em todas as imagens.

No presente trabalho foram desenvolvidos algoritmos para o processamento das imagens tomográficas utilizando o software *MatLab*.

#### a) Máscara

Obtém – se as imagens binárias com pixels de valor um, representando as regiões interiores ao tubo de ensaio, enquanto que os pixels com valor zero representam a região exterior aos tubos de ensaios que compõem o fantom solo tropical, ilustrado na Figura 47.

**Figura 47: Máscaras dos volumes de análise no presente trabalho, conforme a Tabela 8.**



Fonte: Autoria própria

**Tabela 8: Quantidade de máscaras para o presente estudo.**

Volume	Fatia	Intervalo	Quantidade de fatias
1	0 100	1 101	101
2	101 200	102 201	100
3	201 260	202 261	60
4	261 300	262 301	40
5	301 360	302 361	60
6	361 400	362 401	40
7	401 450	402 451	50
8	451 500	452 501	50
Total de fatias			501

Fonte: Autoria própria

**b) Cluster**

Este é um método não supervisionado de classificação de pixels em grupos ou *clusters*, pois não é necessária nenhuma classificação prévia dos pixels da imagem, sendo esta conseguida a partir da informação existente na imagem (Tabela 9).

**Tabela 9: Organização da localização das matérias em estudo no processo de cluster.**

Fatia	Intervalo	Quantidade de fatias	Valor	Material
0	1	101	0	0
100	101	100	830 (Tabela 11) e Tabela 10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e mistura A
200	201	60	210 e 100 (Tabela 11)	H <sub>2</sub> O e Ar atmosférico
201	202	40	100; 210 e 820 (Tabela 11)	H <sub>2</sub> O; Ar atmosférico e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
260	261	60	820 (Tabela 11)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e mistura B
261	262	40	Tabela 10	Mistura B
300	301	50	0	0
301	302	50	840 (Tabela 11)	SiO <sub>2</sub>
360	361			
361	362			
400	401			
401	402			
450	451			
451	452			
500	501			

Fonte: Autoria própria

**Tabela 10: Valores atribuídos às regiões contendo as misturas A e B, em estudo.**

Mistura, M	Materiais			Valor, V	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		
A	I	0,1	99,9	–	320
	II	0,5	99,5	–	420
	III	1,0	99,0	–	520
	IV	5,0	95,0	–	620
	V	10,0	90,0	–	720
B	VI	–	99,9	0,1	330
	VII	–	99,5	0,5	430
	VIII	–	99,0	1,0	530
	IX	–	95,0	5,0	630
	X	–	90,0	10,0	730

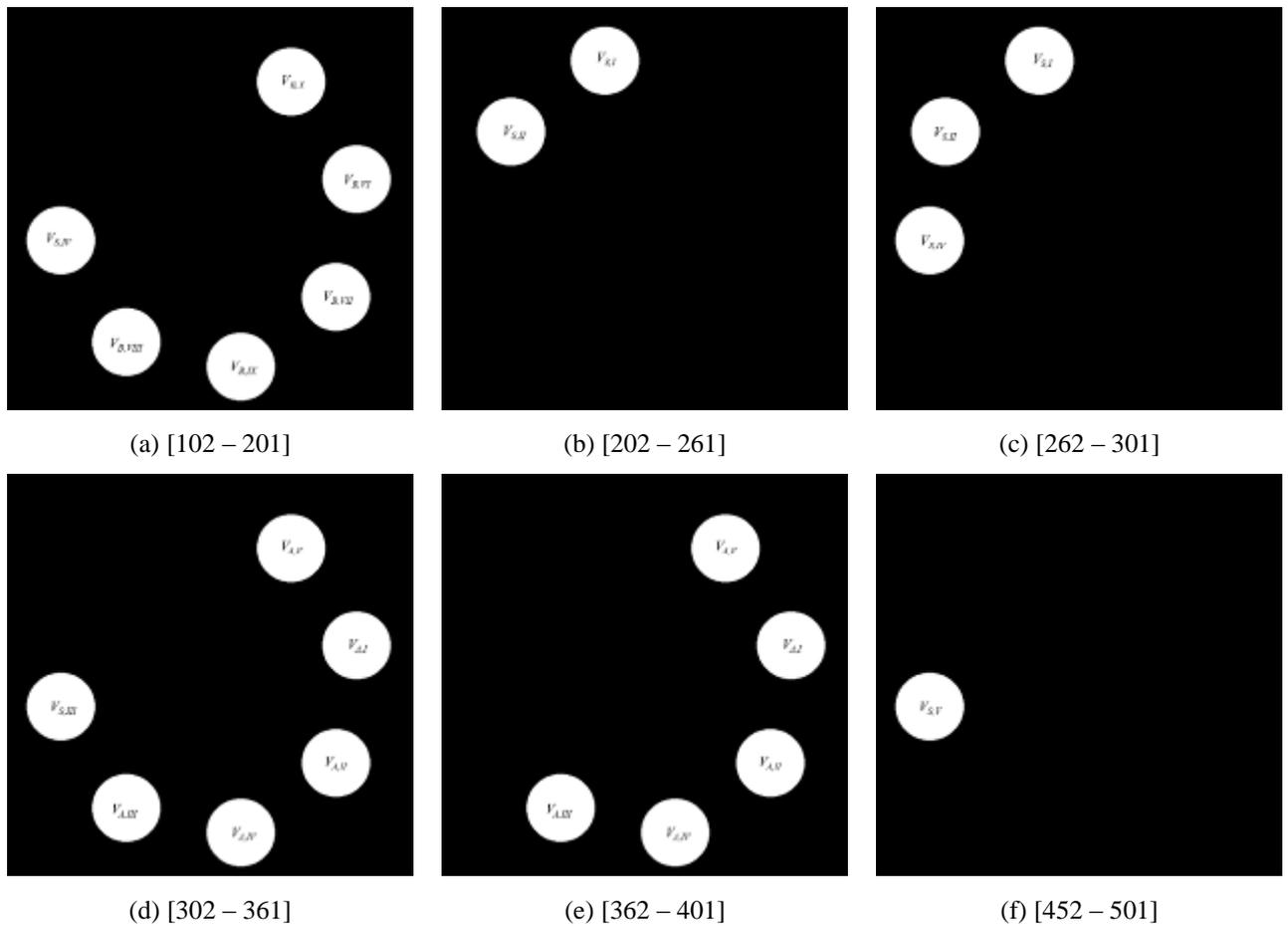
Fonte: Autoria própria

**Tabela 11: Valores atribuídos às matérias de referência em estudo.**

Substância, S		Formula	Valor, V
Ar atmosférico	I	–	100
Água	II	H <sub>2</sub> O	210
Hematita	III	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	820
Coríndon	IV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	830
Quartzo	V	SiO <sub>2</sub>	840

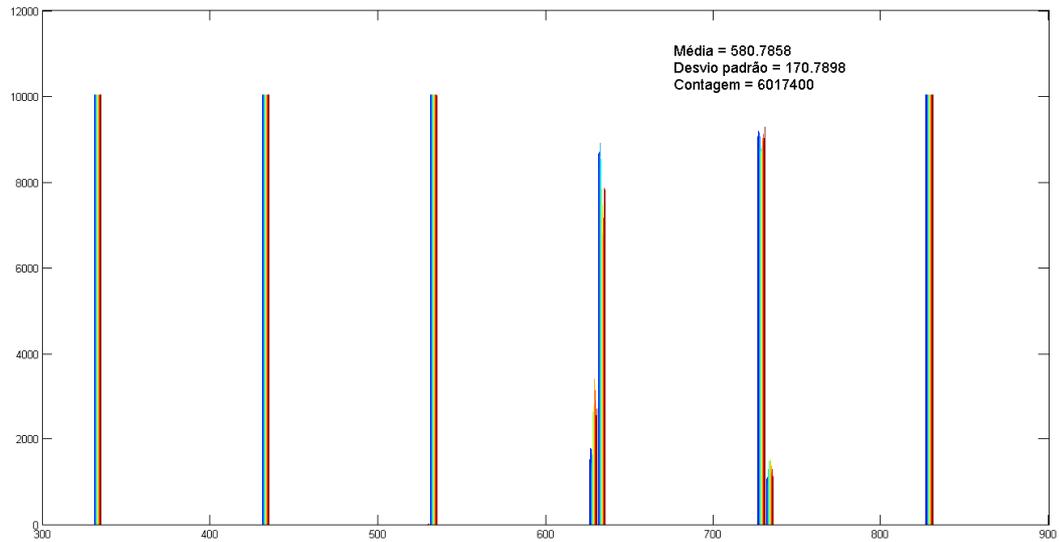
Fonte: Autoria própria

**Figura 48: Localização dos materiais conforme o processo de cluster (ver Tabela 9)**

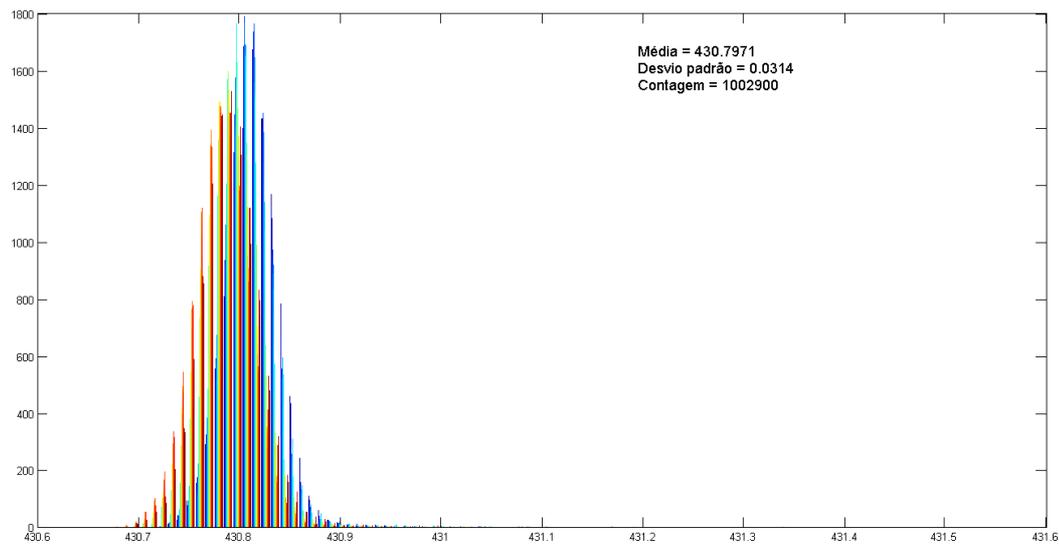


Fonte: Autoria própria

A quantificação dos níveis de cinza de cada tubo do fantom do solo, foi realizada a partir de seus histogramas, que representam graficamente quantos pixels possuem um determinado nível de cinza. O histograma dá uma impressão da ocupação dos níveis de cinza, o mesmo é utilizado para verificar ajustes de captação de imagem. Na Figura 49, pode-se observar histogramas da faixa de cada elemento nas respectivas proporções, ou seja, os histogramas de cada proporção, representam a radiodensidade média da imagem em cada fatia do mesmo.

**Figura 49: Histograma dos materiais que compõem o fantom solo tropical.**

Fonte: Autoria própria

**Figura 50: Histograma do material  $M_{B,VII}$  (Tabela 10).**

Fonte: Autoria própria

#### 3.1.4.4 Pós-processamento

A segunda etapa é da uniformização de todas as imagens na escala de Hounsfield, que é uma escala quantitativa que descreve a radiodensidade ou radiopacidade. A Radiodensidade é um termo que se refere à habilidade da radiação eletromagnética, particularmente dos Raios-X, de passar por um determinado material. Quando esses materiais inibem a passagem da radiação eletromagnética, os mesmos são chamados radiodensos. Ou seja, o termo refere-se à aparência relativamente branca e opaca de substâncias ou materiais densos em estudos de

imageamento radiográfico, quando comparada à aparência relativamente mais escura de materiais menos densos. Como já foi mencionado anteriormente, a escala de Hounsfield (HU) ou como usualmente é chamada de unidade de Hounsfield é uma transformação da medida original do coeficiente de atenuação linear para uma escala adimensional. Nessa escala, a radiodensidade da água destilada sob condições-padrão de temperatura e pressão (CPTP) é definida como 1000 na unidade Hounsfield (HU), enquanto a radiodensidade do ar nas CPTP é definida como zero HU. A escala é comumente utilizada entre 0 HU e 6500 HU.

A atenuação de Hounsfield (HU) de um dado material é determinada por:

$$HU = 1000 \times \frac{\mu - \mu_{ar}}{\mu_{\acute{a}gua} - \mu_{ar}} \quad (23)$$

em que  $\mu_{ar}$  e  $\mu_{\acute{a}gua}$  são os coeficiente de atenuação linear do ar atmosférico e da água, respectivamente. E  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material em estudo.

Observa – se que uma mudança em uma unidade na atenuação de Hounsfield (HU) representa uma mudança de 0,1% do coeficiente de atenuação linear em relação à água. A unidade da atenuação de Hounsfield é a unidade Hounsfield (HU).

### 3.1.5 Tomógrafo de Raios Gama

Os estudos experimentais para determinação da densidade e coeficiente de atenuação em amostra de solo são realizados no Tomógrafo gama computadorizado de primeira geração (TGCI – 1ªG), que se encontra no Laboratório Prof. Dr. Cornelius Keller do Departamento de Energia Nuclear (DEN), do Centro de Tecnologia e Geociências – Escola de Engenharia de Pernambuco (CTG – EEP), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

#### 3.1.5.1 Tomógrafo Gama Computadorizado Industrial de 1ª Geração (TGCI – 1ªG)

As intensidades da radiação gama com tubo nas condições sem material (recipiente vazio),  $I_v$ , e com material (recipiente com material a ser analisado),  $I$ , respectivamente, são utilizadas na determinação da atenuação produzida pelas amostras de meios particulados e são determinadas através do TGCI – 1ªG, conforme apresentado na Figura 51.

**Figura 51: Esquema do arranjo fonte, amostra e detector, respectivamente (TGCi – 1<sup>a</sup>G).**



Fonte: Autoria própria

Neste trabalho é utilizada fonte de  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV), que tem meia vida de 30,1 anos e atividade  $3,70 \times 10^9 \text{ Bq}$ , e o detector de cristal cintilador de NaI(Tl) acoplado diretamente a uma fotomultiplicadora que está ligada ao Analisador Multicanal – MCA (modelo Osprey fabricado pela Canberra Inc), ambos blindados com colimador de chumbo com orifício circular de 5,5 mm de diâmetro e comprimento 73 mm. Portanto, constituído assim o arranjo detector e fonte de radiação do TGCi – 1<sup>a</sup>G (Figura 51). A partir do MCA os dados são enviados para o computador onde o usuário pode observar todo o espectro e controlar o equipamento é apresentado na Figura 52.

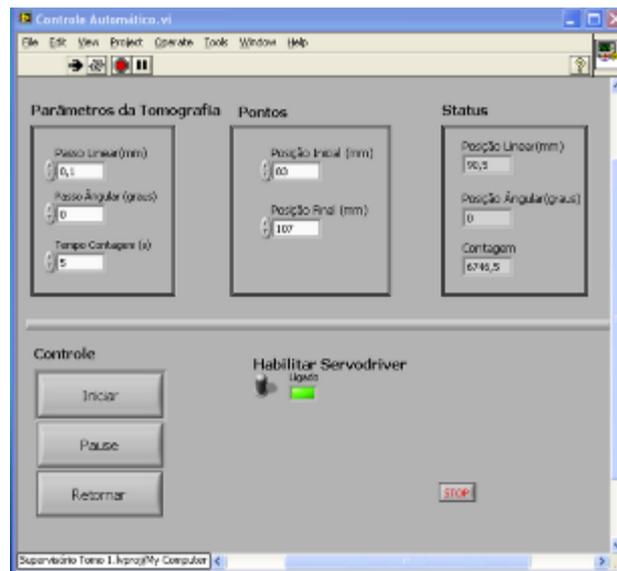
**Figura 52: Sistema de controle TGCi – 1<sup>a</sup>G do mecanismo de varredura.**



Fonte: Autoria própria

O algoritmo de controle é baseado numa máquina que aciona o sistema de detecção em seguida o sistema de translado da mesa, seguindo numa sequência de movimento e contagem até o final da varredura. A tela do programa de gerencialmente TGCi – 1<sup>a</sup>G está ilustrado na Figura 53.

**Figura 53: Interface dos programas de controle TGCi – 1<sup>a</sup>G.**



Fonte: Autoria própria

O programa de controle do sistema TGCi – 1<sup>a</sup>G foi desenvolvido através do *software LabVIEW* (Moura, 2015). O qual interage com o sistema de detecção e movimento da mesa. A interface gráfica do programa de controle apresenta os seguintes parâmetros (Figura 53):

✓ Entrada

- Parâmetros da tomografia: passo linear; passo angular e tempo de contagem para o intervalo de medidas;
- Pontos: posições inicial e final do escaneamento da transmissão de raios – gama;
- Habilitar Servodriver: Habilita a comunicação entre o computador e o sistema TGCi – 1<sup>a</sup>G por intermédio de placas de interface com comunicação via porta paralela e USB (*Universal Serial Bus*);
- Controle: botões iniciar; pause e retorna.

✓ Saída

- Status são exibidos às posições atual linear e angular do sistema em relação à origem como também à última contagem da radiação.

Uma vez definida as condições do experimento (Figura 53), o sistema TGCi – 1<sup>a</sup>G faz a varredura completa da região definida pelo usuário e retorna com um arquivo contendo todos os dados do número de contagens da radiação dos raios – gama.

Os parâmetros de varredura tomográfica utilizados no experimento foram: intervalo de escaneamento; passo linear; tempo de contagem e as posições inicial e final do escaneamento. Os valores utilizados no presente trabalho estão apresentados na Tabela 12. O tempo total de escaneamento tomográfico foi de aproximadamente cinco horas para cada amostra.

**Tabela 12: Parâmetros do sistema de controle do TGCi – 1<sup>a</sup>G.**

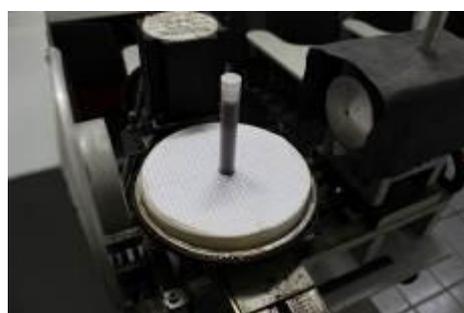
Variável de processo	Unidade	Valor
Intervalo de escaneamento, $x$	<i>mm (milímetros)</i>	24
Passo linear, $\Delta x$	<i>mm (milímetros)</i>	0,1
Tempo de contagem, $t_c$	<i>s (segundos)</i>	60
Posição inicial, $L_i$	<i>mm (milímetros)</i>	82
Posição final, $L_f$	<i>mm (milímetros)</i>	106

Fonte: Autoria própria

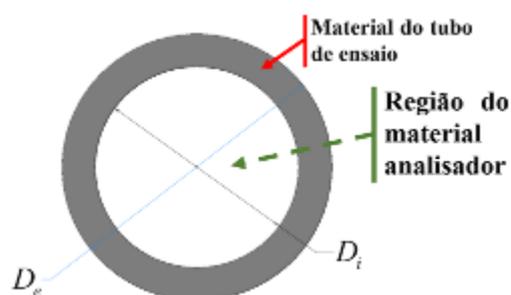
### 3.1.5.4 Técnica de atenuação de radiação gama: Modelagem Matemática

Na Figura 54 são mostrados a amostra no tubo de ensaio no TGCi – 1<sup>a</sup>G a ser realizados os experimentos (Figura 54(a)) e o esquema da seção transversal do tubo de ensaio (Figura 54(b)).

**Figura 54: Região de escaneamento da amostra no presente trabalho.**



(a) Amostra no TGCi – 1<sup>a</sup>G



(b) Esquema da seção transversal do tubo de ensaio

Fonte: Autoria própria

O sistema analisado é formado pelos materiais do tubo de ensaio ( $t$ ) e o que encontra – se confinado no tubo de ensaio ( $a$ ), conforme apresentado na Figura 54. Portanto,

reescrevendo a Equação 10, tem – se que a intensidade do feixe que atravessa o material confinado no tubo ensaio (feixe de radiação emergente) é expresso por:

$$I(x) = I_0 e^{-(\mu_t e_t(x) + \mu_a e_a(x))}, \text{ para } -R_e \leq x \leq R_e \quad (24a)$$

em que  $\mu_t$  e  $\mu_a$  são respectivamente, os coeficiente de atenuação linear do tubo de ensaio e do material a ser analisado [ $cm^{-1}$ ];  $I_0$  é a intensidade da radiação incidente [*números de fótons*];  $R_e$  é o raio externo do tubo de ensaio (recipiente para a amostra);  $x$  é o intervalo de varredura radial na região de escaneamento [ $cm$ ], e  $e_t$  é a espessura da parede do tubo ensaio que o feixe de raios gama atravessar [ $cm$ ], dado por:

$$e_t(x) = 2 \cdot \begin{cases} \sqrt{R_e^2 - x^2}, & \text{para } -R_e \leq x \leq -R_i \\ \left( \sqrt{R_e^2 - x^2} \right) - \left( \sqrt{R_i^2 - x^2} \right), & \text{para } -R_i < x < R_i \\ \sqrt{R_e^2 - x^2}, & \text{para } R_i \leq x \leq R_e \end{cases} \quad (24b)$$

no qual,  $R_i$  é o raio interno do tubo de ensaio, e  $e_a$  é a espessura da amostra confinada no tubo ensaio [ $cm$ ], que é definido por:

$$e_a(x) = 2 \cdot \begin{cases} 0, & \text{para } -R_e \leq x \leq -R_i \\ \left( \sqrt{R_i^2 - x^2} \right), & \text{para } -R_i < x < R_i \\ 0, & \text{para } R_i \leq x \leq R_e \end{cases} \quad (24c)$$

Simplificando – se a Equação 24a para a região correspondente ao material confinado ao tubo de ensaio, chega – se:

$$I(x) = I_v e^{-\mu_a e_a(x)}, \text{ para } -R_i \leq x \leq R_i \quad (25a)$$

sendo que  $\mu_a$  é o coeficiente de atenuação linear do material a ser analisado [ $cm^{-1}$ ];  $x$  é o intervalo de varredura radial na região de escaneamento [ $cm$ ];  $e_a$  é a espessura da amostra confinada no tubo ensaio [ $cm$ ] calculado por:

$$e_a(x) = 2\sqrt{R_i^2 - x^2} \quad (25b)$$

em que  $R_i$  é o raio interno do tubo de ensaio. E a intensidade do feixe que atravessa o tubo de ensaio na condição vazio,  $I_v$ , é determinado por:

$$I_v = I_0 e^{-\mu_t e_t(x)} \quad (25c)$$

em que,  $\mu_t$  é o coeficiente de atenuação linear do material do tubo de ensaio [ $cm^{-1}$ ];  $I_0$  é a intensidade da radiação incidente (*números de fótons*); e a espessura da parede do tubo ensaio que o feixe de raios gama atravessou,  $e_t$  [ $cm$ ], definida por:

$$e_t(x) = 2\left(\sqrt{R_e^2 - x^2}\right) - e_a(x) \quad (25d)$$

tendo que,  $R_e$  é o raio externo do tubo de ensaio (recipiente para a amostra).

Ao invés de calcular a intensidade do feixe de radiação emergente,  $I_v$  [*números de fótons*], definidos pelas Equações (25c) e (25d), basta realizar um escaneamento com o tubo de ensaio sem material (tubo vazio) nas mesmas condições dos experimentos.

#### 3.1.5.4.1 Técnica de determinação de parâmetros

Utilizando a Equação 25a descrita na Seção 3.1.5.4 e reorganizando os termos da equação, chega – se:

$$\frac{I_v}{I} = e^{\mu_a e_a(x)}, \text{ para } -R_i \leq x \leq R_i \quad (26)$$

sendo que  $I_v/I$  é intensidade relativa;  $\mu_a$  é o coeficiente de atenuação linear do material a ser analisado [ $cm^{-1}$ ];  $e_a(x)$  é a espessura da amostra confinada no tubo ensaio que o feixe de raios gama atravessar [ $cm$ ] e  $R_i$  é o raio interno do recipiente.

Recrevendo a Equação 26 na forma fundamental, tem – se que:

$$y_{\text{modelo}} = a_0 e^{a_1 x}, \text{ para } -R_i \leq x \leq R_i \quad (27)$$

em que  $y = I_v/I$ ;  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = \mu_a$  é o coeficiente de atenuação linear do material a ser analisado [ $cm^{-1}$ ] e  $x = e_a(x)$  é a espessura da amostra confinada no tubo ensaio que o feixe de raios gama atravessar [ $cm$ ] determinada pela Equação 24b. Esta equação representa o modelo exponencial proposto no presente trabalho.

Também, a Equação 26 pode ser expressa da seguinte forma:

$$y_{\text{modelo}} = a_0 e^{a_1 t}, \text{ para } -t_i \leq t \leq t_i \quad (28a)$$

sendo que  $y = I_v/I$ ;  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = \rho_a$  é a densidade do meio em estudo [ $g/cm^3$ ] e  $t$  é o volume específico do material, [ $cm^3/g$ ], calculado pela equação:

$$t = \mu_{m,a} e(x), \text{ para } -R_i \leq x \leq R_i \quad (28b)$$

na qual  $\mu_{m,a}$  [ $cm^2/g$ ] é o coeficiente de atenuação mássico do material analisado e  $e_a(x)$  é a espessura da amostra confinada no tubo ensaio [ $cm$ ] calculada pela Equação 25b.

#### 3.1.5.4.2 Curva de calibração

Reescrevendo a Equação 25a para  $e(x) = D$  e aplicando o logaritmo natural em ambos os membros da equação, tem – se que a atenuação para cada material calculada por:

$$\ln\left(\frac{I_v}{I}\right)_a = \mu_{m,a} \rho_a D \quad (29)$$

sendo que  $I_v$  e  $I$  são intensidade do feixe que atravessa o tubo de ensaio na condição vazio e intensidade transmitida, respectivamente. E o coeficiente de atenuação mássico do material analisador,  $\mu_{m,a}$  ( $cm^2/g$ );  $\rho_a$  a densidade do meio em estudo ( $g/cm^3$ ) e  $D$  é o diâmetro interno do tubo ensaio ( $cm$ ).

Utilizando a Equação 29 com os valores das Tabelas 12 e 15, e mais os valores das densidades dos material obtidos pela Equação 12, obtem – se os pares ordenados  $(\rho_a \mu_{m,a} D$ ;  $\ln(I_v/I)_a$ ) são fixos para cada material. Portanto, organizando os pares de valores  $(\rho_a \mu_{m,a} D$ ;

$\ln(I_v/I_a)$  nos eixos das ordenadas e abscissas, monta – se o diagrama de dispersão. O modelo mais simples que relaciona as variáveis  $x$  ( $\rho_a \mu_{m,a} D$ ) e  $y$  ( $\ln(I_v/I_a)$ ) é dada pela equação de uma reta expressa por:

$$y_{\text{modelo}} = a_1 x + a_0 \quad (30)$$

em que  $a_0$  e  $a_1$  são os parâmetros do modelo. A Equação 23 é chamada de curva de calibração.

#### 3.1.5.4.3 Regressão por Mínimos Quadrados

Um modo de estimar os valores de  $a_0$  e  $a_1$  é minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores  $y$  medidos e os valores  $y$  calculados com o modelo proposto pelas Equações 27, 28 e 30 nas Subseções 3.1.4.1 e 3.1.4.2:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_{i,\text{medido}} - y_{i,\text{modelo}})^2 \quad (31)$$

Os valores  $a_0$  e  $a_1$  são calculados utilizando as seguintes expressões:

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (32a)$$

e

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (32b)$$

sendo que  $\bar{y}$  e  $\bar{x}$  são as médias de  $y$  e  $x$ , respectivamente.

Para este processo de ajuste pelo método mínimo quadrados na determinação dos valores  $a_0$  e  $a_1$  recorreu-se a uma função *lsqcurvefit* (*least squares curve fit*) de ajuste do programa MATLAB, este método se baseia no método dos mínimos quadrados e que permite encontrar os parâmetros que melhor ajustam – se as curvas determinadas pelas Equações 27, 28 e 30.

#### 3.1.5.4.4 Qualidade do ajuste

A qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos expressos pelas Equações 27, 28 e 30 aos dados dos valores teóricos ou experimental, serão avaliados pelo coeficiente de determinação  $R^2$  dado por:

$$R^2 = 1 - \frac{SQRes}{SQTot}, \text{ com } 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (33)$$

em que  $SQRes$  é a soma de quadrados residual, calculador por:

$$SQRes = \sum_{i=1}^N \left( y_i - y_{i,\text{modelo}} \right)^2 \quad (34)$$

e a soma de quadrados total é definida pela expressão

$$SQTot = \sum_{i=1}^N \left( y_i - \bar{y} \right)^2 \quad (35)$$

sendo que  $y_{i,\text{modelo}}$  é o modelo matemático definido pelas Equações 1, e  $\bar{y}$  é a média dos valores teóricos ou experimental obtidos no presente trabalho, expresso por

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (36)$$

Sendo que  $N$  é o número de pontos.

O coeficiente de determinação  $R^2$ , definido pela Equação 16, representa a proporção total dos dados em torno da média ( $\bar{y}$ ) que é explicada pelos modelos de regressão não linear definido pelas Equações 27 e 28, e o modelo de regressão linear expresso pela Equação 30.

Outro parâmetro utilizado para aferir a qualidade do ajuste é a variância residual  $\sigma^2$  definida por

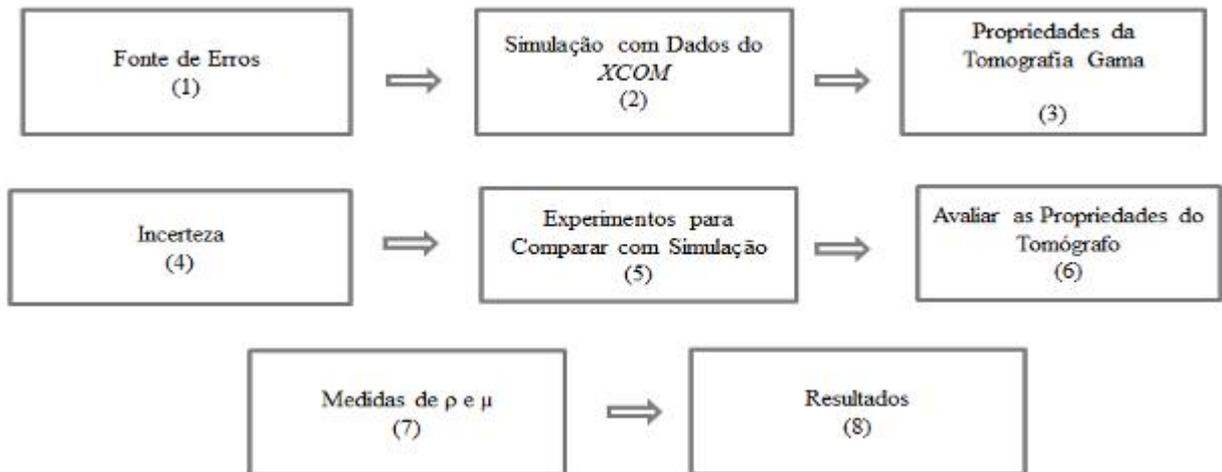
$$\sigma^2 = \frac{SQRes}{n - p} \quad (37)$$

em que  $n$  é o número de pontos e  $p$  é número de parâmetros estimados no modelo matemático proposto pelas Equações 27, 28 e 30 ( $p = 2$ ).

### 3.1.5.5 Medidas com Tomógrafo de Raios Gama

Na Figura 55, apresenta-se uma visão geral do processo de medidas com tomógrafo de Raios Gama.

**Figura 55:** Planejamento da Tomografia Gama



Fonte: Autoria própria.

O objetivo dessa fase é a definição de um procedimento experimental para realizar medidas dos coeficientes de atenuação de amostras de solo e fazer uma avaliação dos resultados quanto à precisão e incerteza. Inicialmente utiliza-se a Equação 38.

Essa equação foi utilizada para medidas com e sem amostras, para definir as condições do tomógrafo quanto à distância fonte detector e colimadores. Segundo Dantas et al (2008), o diâmetro do feixe gama colimado está equacionado na resolução espacial do tomógrafo, e representa um compromisso com a eficiência de contagens.

$$I_f = I_v e^{-\mu \rho x} \quad (38)$$

A Equação 10 adaptada da lei de Beer – Lambert por Casagrande (1957), para as medidas num cilindro com fluxo, aqui será aplicada a experimento estático do tubo de ensaio, assim tem-se as intensidades  $I_v$  e  $I_f$ , para o tubo vazio e com amostra de solo.

Com amostras cuja densidade e coeficiente de atenuação sejam conhecidos, pode-se fazer uma estimativa das medidas que serão realizadas nas amostras por meio dos valores do *XCOM* e com a Equação 29. Será obtida uma reta de calibração, que será comparada com os

dados experimentais (ajustados pelos mínimos quadrados). Segundo Barker R. M., (2004) com o modelo do ajuste dos dados experimentais avalia-se a incerteza. Os valores da calibração simulada foram comparados com as medidas experimentais, colocando a densidade do lado esquerdo da Equação (339):

$$\rho = \frac{1}{\mu\chi} \log \frac{I_v}{I_f} \quad (39)$$

Deve – se recuperar o valor tabelado da intensidade ou do coeficiente de atenuação, os erros experimentais são devidos ao termo relacionado com as intensidades.

#### 3.1.5.5.1 Fonte de Erros

Preliminarmente deve-se avaliar a taxa de contagem, erro relativo de Poisson, posicionamento fonte/detector para realizar novos experimentos (esse posicionamento pode causar erros significativos). Considerando que fonte e detector estão fixos dentro das blindagens. Verificação e controle das medidas do  $I_0$ , antes de iniciar o experimento.

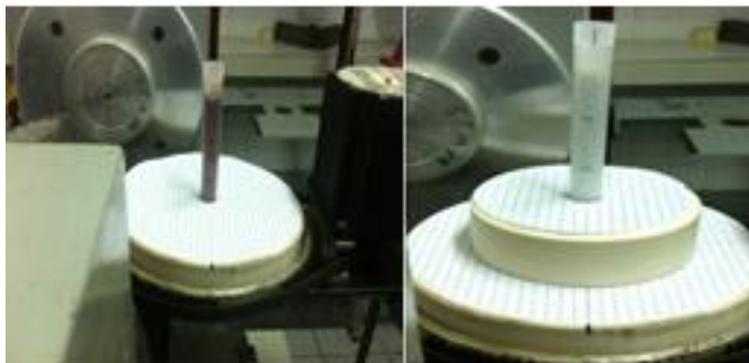
Definidos o posicionamento das amostras no tomógrafo (com posições definidas para realizar a varredura), de forma reprodutível e com suporte adequado. Avalia-se um outro importante efeito: o das paredes durante a varredura, aplicando-se a:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (40)$$

Esta equação está descrita em Dantas et al (2008). Além de levar em consideração, a necessidade de avaliar a precisão na medida de  $x$ , e do diâmetro interno do tubo; e que o tubo não é um cilindro é ligeiramente cônico, tem-se variação de diâmetro. Além de que algumas amostras têm dois tipos de solos no mesmo tubo. Nesse caso, tem-se dois intervalos de varredura para medidas da transmissão gama em duas alturas para analisar os solos condicionados num mesmo tubo.

Para as medidas de transmissão foram confeccionadas peças para medir os dois materiais na amostra, como pode ser observado na Figura 56.

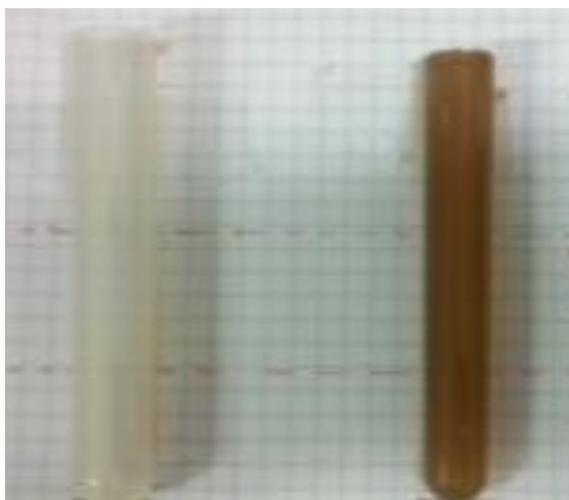
**Figura 56:** Tubo com Amostras no Suporte



Fonte: A autoria própria.

Como já foi mencionado, o diâmetro interno varia com a forma do tubo de ensaio, estão para medir o fantom do solo, precisa-se calcular os diâmetros internos nas duas posições definidas para a varredura com o feixe gama. Por isso foi confeccionado um tarugo de resina, pode-se observar na Figura 57.

**Figura 57:** Tarugo de Resina



Fonte: A autoria própria.

Foi realizada a análise da influência do diâmetro do tubo de ensaio e para isso foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo, do modelo Digimatic, com alcance de até 150mm, resolução do display de 0,01 mm, série 030/354, código 500-133. Uma forma de avaliar a precisão dos valores do diâmetro do tarugo com paquímetro é avaliando a variação das médias, com o teste *t-Student* ou somente teste t. O mesmo averigua se a média da amostra é diferente de um valor de referência ou da média da população.

- As hipóteses a serem testadas são:

H0: a média da amostra é igual à média da referência (ou população).

H1: a média da amostra é diferente à média da referência (ou população).

Os graus de liberdade são calculados assim:  $gl = n_1 + n_2 - 2$

Escolher a significância do teste: 0.01 e 0.05.

Para essa análise serão utilizados os valores dos diâmetros do tarugo de  $x_1$  e  $x_2$ , com  $n_1=10$  e  $n_2=10$ , encontrados na Tabela 13.

**Tabela 13: valores dos diâmetros do tarugo para  $n=10$  em  $x_1$  e  $x_2$**

$X_{1=}$	12,73	12,75	12,78	12,75	12,73	12,73	12,73	12,71	12,72	12,73
$X_{2=}$	12,28	12,30	12,30	12,32	12,30	12,32	12,29	12,28	12,28	12,31

Fonte: Autoria própria.

A partir das medidas dos diâmetros internos do tarugo obtêm-se valores das médias e desvio - padrão, Tabela 14.

**Tabela 14: valores das médias e desvio padrão**

<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
$\bar{X}_1=12,51$	$\sigma_{x1}=0.45$
$\bar{X}_2=12,30$	$\sigma_{x2}=0.02$

Fonte: Autoria própria.

Em que, H0: $\mu_1 = \mu_2$  e H1: $\mu_1 \neq \mu_2$ .

Com os valores do desvio padrão agrupado e do  $t_0$ , obteve-se o resultado, que pode ser observado na Tabela 15:

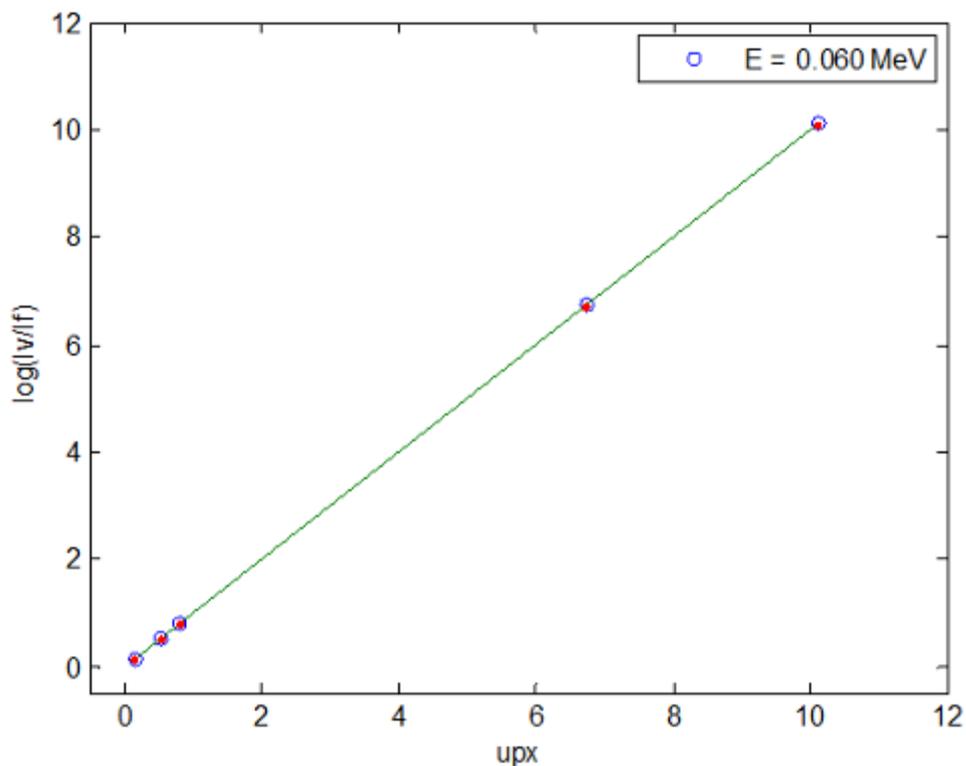
**Tabela 15: Valores do  $X_{\text{tabelado}}$  e do  $X_{\text{calculado}}$  para os níveis de significância de 0.01 e 0.05**

<b>Nível de significância de 0.01</b>	<b>Nível de significância de 0.05</b>
$X_{\text{tabelado}}=2.878$	$X_{\text{tabelado}}=2.101$
$X_{\text{calculado}}=3.273$	$X_{\text{calculado}}=3.273$
$X_{\text{calculado}} > X_{\text{tabelado}}$	$X_{\text{calculado}} > X_{\text{tabelado}}$

Fonte: Autoria própria

Como o  $X_{\text{calculado}} > X_{\text{tabelado}}$ : rejeita-se a hipótese nula, ou seja, estatisticamente as médias não são iguais. Então, para as condições adotadas (níveis de significância) o  $t$  calculado ( $t_c=39.26$ ) é maior. No entanto, antes da análise da variação dos materiais pelos valores de  $X_1$  e  $X_2$ , dados de materiais cujas densidades e coeficientes de atenuação são tabelados, ou seja, que não envolvem erro de composição, foram utilizados para avaliar a resolução do sistema. São seis dados e aparecem cinco porque os círculos no gráfico de silício e alumínio estão superpostos. Na Figura 58, pode-se observar o comportamento da intensidade relativa para fonte de amerício e o 34 para o cézio. Os pontos representam os dados com os valores de  $x = 1.4\text{mm}$  para o diâmetro interno do tubo.

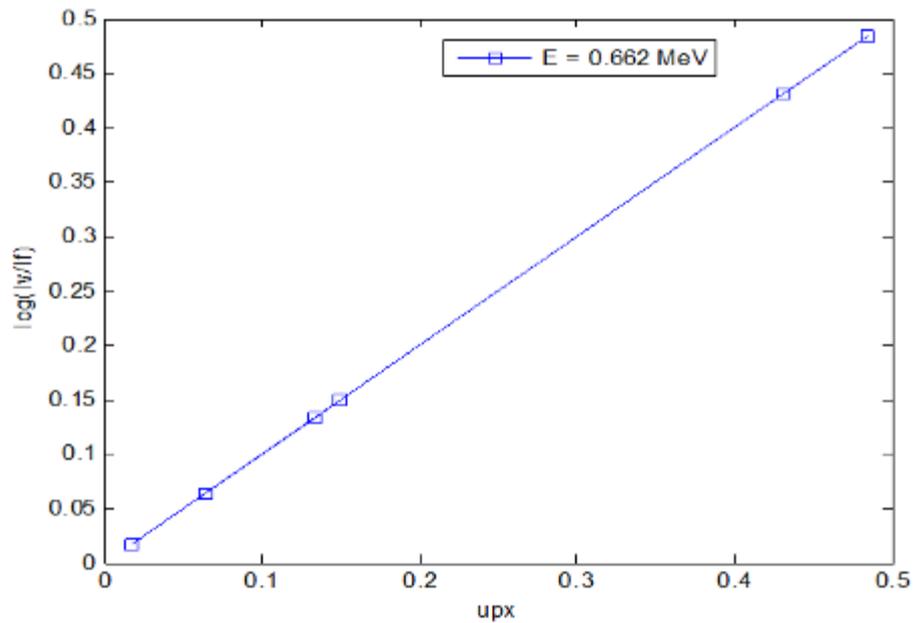
**Figura 58: Simulação do logaritmo da intensidade relativa versus o produto  $\mu x$  para água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro e cobre, para a energia do gama do  $^{241}\text{Am}$ .**



Fonte: Autoria própria.

A simulação foi obtida com os dados do *XCOM*

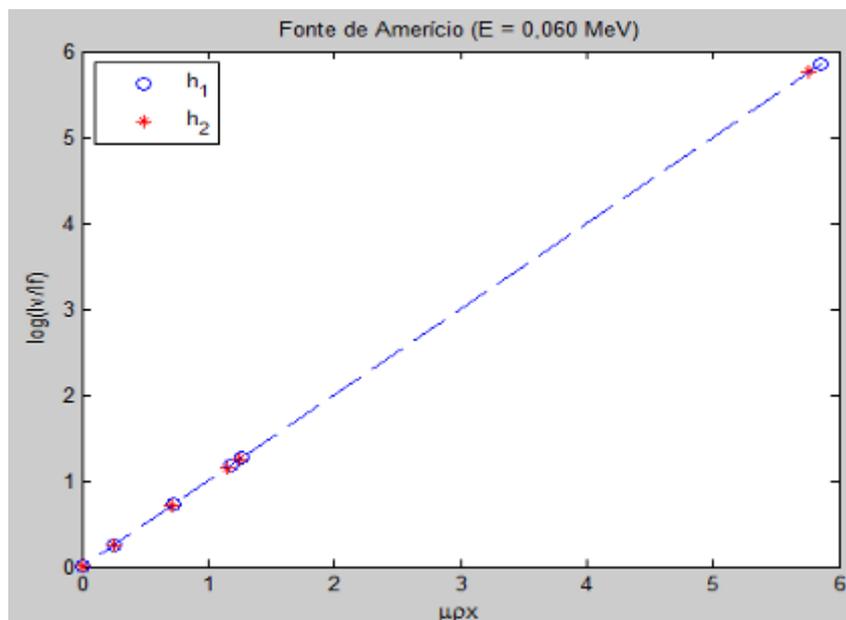
**Figura 59:** Simulação do logaritmo da intensidade relativa versus o produto  $\mu x$  para água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro e cobre, para a energia do gama do  $^{137}\text{Cs}$ .



Fonte: Autoria própria.

Os experimentos das Figuras Figura 60 e Figura 61, apresentam  $\log Iv/If$  versus  $\mu x$ , com dados do  $\rho\mu$  obtido com o software *XCOM*: para  $x$  utilizam-se valores de  $x_1$  e  $x_2$  obtidos pela análise da altura.

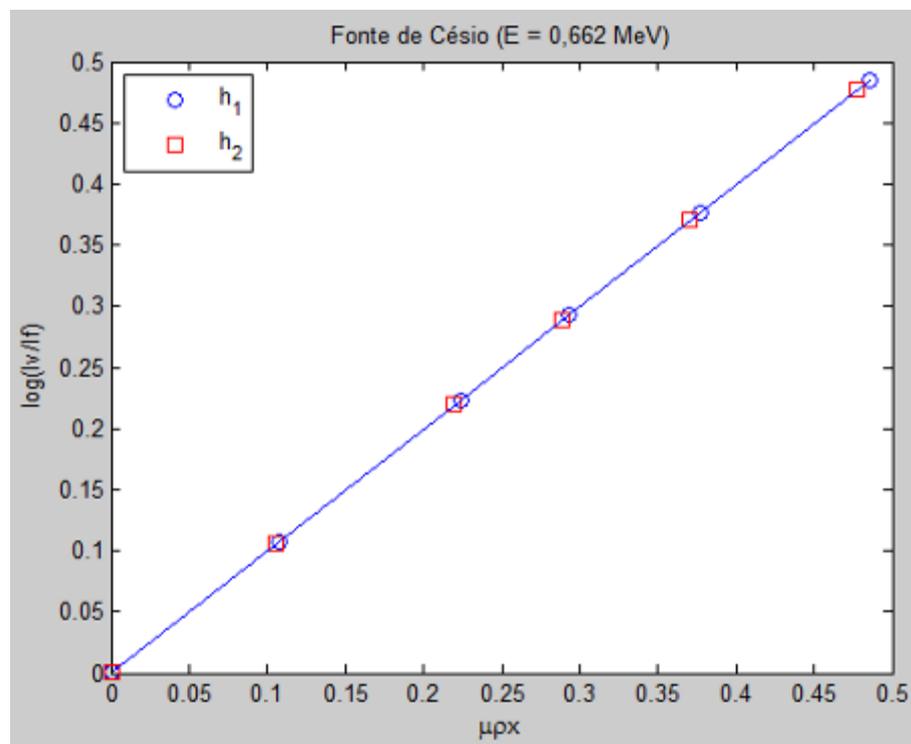
**Figura 60:** Logaritmo da intensidade relativa simulada contra o produto  $\mu\rho$  obtidos no *XCOM* da água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro, para a energia do gama do  $^{241}\text{Am}$  e valores de  $x_1$  e  $x_2$ .



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 60, observa-se o logaritmo da intensidade para fonte de amerício para os materiais: óxido de ferro, óxido de alumínio, gesso, quartzo, água e ar atmosférico, cujas densidades e coeficientes de atenuação são tabelados. A figura corrobora com resultado do teste t, que existe uma diferença significativa na análise dos materiais para as duas alturas. A Figura 61 apresenta o logaritmo da intensidade para a fonte de céσιο, nela observa-se que também existe uma diferença significativa dos materiais nas alturas  $x_1$  e  $x_2$ .

**Figura 61: Logaritmo da intensidade relativa simulada contra o produto  $\mu\rho$  obtidos no XCOM da água, silício, sulfato de cálcio, alumínio, ferro, para a energia do gama do  $^{137}\text{CS}$  e valores de  $x_1$  e  $x_2$ .**



Fonte: Autoria própria.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

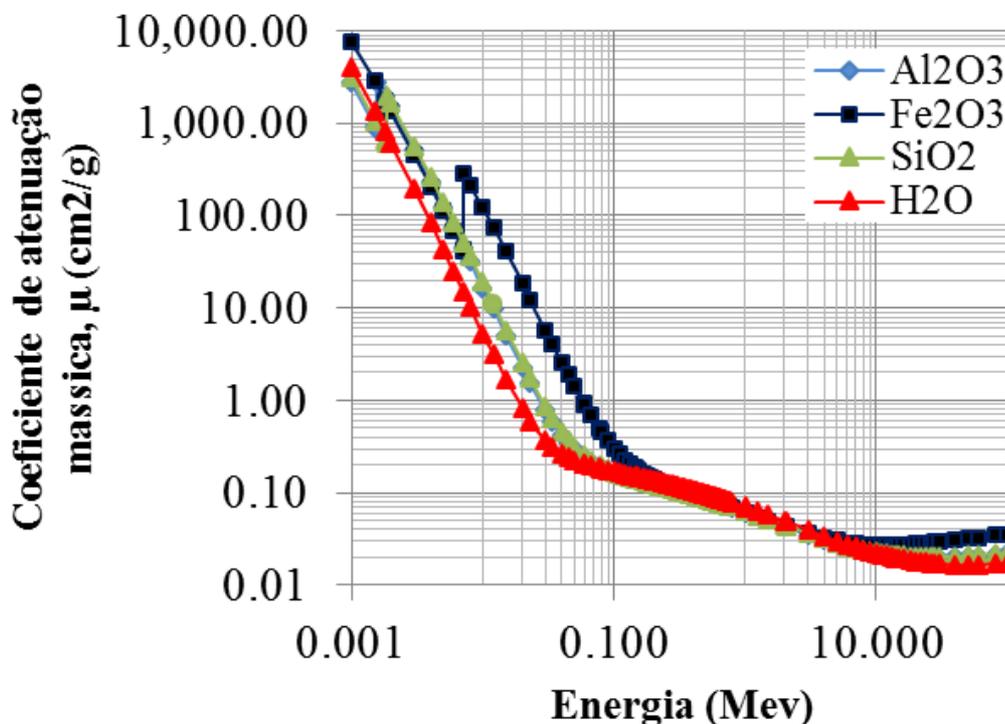
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na implementação da metodologia de análise de um fantom de solo, a partir de duas técnicas tomográficas, a tomografia computadorizada gama de primeira geração e a tomografia computadorizada de Raios – X de terceira geração.

### 4.1 Coeficiente de atenuação dos materiais Puros com Tomografia

Com a composição química dos materiais foi possível prever teoricamente, através do software *XCOM*, os valores do coeficiente de atenuação para os três óxidos que o compõem o fantom do solo. É importante ressaltar que os óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram escolhidos por serem os elementos mais comuns de solos tropicais. De acordo com Sposito (2008), os solos tropicais têm composição química caracterizada pela principal presença desses compostos em percentuais de  $\text{SiO}_2$  (40-90%), o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5-20%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2-20%), além de compostos menores tais como  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , etc. O estudo desse autor mostra que tanto os minerais escolhidos, quanto suas proporções são bastantes representativos quanto à finalidade de representar um solo tropical, Capítulo 2 na Seção 2.1.

Através do software *XCOM*, determinaram-se os valores do coeficiente de atenuação de massa ( $\mu_m$ ) dos materiais com a Equação (5), da Seção 2.4, com isso foi possível determinar o coeficiente de atenuação linear. O mesmo procedimento de previsão de valores teóricos do ( $\mu_m$ ) foi feito para água, que por ser uma substância homogênea e de composição química bem conhecida (Costa, 2011), além de possuir uma complexidade de determinação teórica do ( $\mu_m$ ) relativamente mais simples, principalmente se comparada com amostras dos outros materiais que compõem o fantom. Os dados obtidos dessa análise são apresentados na Figura 62.

**Figura 62: Variação do coeficiente de atenuação de massa dos óxidos versus a energia do fóton incidente para fonte de  $^{137}\text{Cs}$**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 62, mostra a variação dos coeficientes de atenuação de massa ( $\mu_m$ ), para os óxidos e a água na energia do césio. Pode-se observar a dependência do coeficiente de atenuação de massa, com a energia e com a composição química de cada óxido. Também observa-se que o valor do ( $\mu_m$ ) para o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é ligeiramente mais elevado que dos outros materiais, já para os materiais  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$  é quase idêntica. A dependência do ( $\mu_m$ ), em função do fóton incidente pode ser explicada pelo domínio dos processos parciais da interação com a matéria (efeito fotoelétrico, Compton e pares), essa mesma noção teórica de comportamento de materiais em função da energia do fóton também pode ser observada no estudo de Elmahroug et al. (2015). O gráfico também mostra que há variação dos processos de interação em função da energia em: abaixo de 0,1 MeV, entre ( $0,1 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$ ) e nas energias mais elevadas ( $E > 10^3$ ). Tendo os resultados dos parâmetros simulados, foi possível comparar com os resultados experimentais, obtidos com a tomografia gama.

A eletrônica foi ligada no mínimo meia hora antes da realização das medidas com a tomografia gama, esse procedimento foi adotado para haver maior confiabilidade e estabilidade do equipamento. Os resultados das medidas de contagem, foram tomadas a 60 segundos e realizadas com passos de 0,1mm, para alcançar uma resolução espacial ótima para

o tipo de material, com os quais foram confeccionadas as amostras, e o tempo de duração de cada experimento foi de aproximadamente 5 horas.

Para determinação do coeficiente de atenuação tanto da água, quanto para os outros materiais, foi realizada a tomografia gama para obtenção da intensidade do feixe incidente ( $I_0$ ) e intensidade do feixe transmitido pelos materiais ( $I$ ), na energia de fóton 662keV, juntamente com a espessura ( $x$ ) e densidade ( $\rho$ ) de cada amostra utilizando a lei de Lambert – Beer, pela equação (4) do item 2.4. O valor do coeficiente de atenuação linear obtido, está dentro do intervalo de confiança de 95% e comparado com os obtidos com o software *XCOM*, foi observada boa concordância entre os métodos que são apresentados na Tabela 16. Outro resultado importante é o da atenuação dos materiais. De acordo com os resultados observou-se uma diferença muito pequena entre os valores encontrados no *XCOM* e o Experimental, tanto para coeficiente de atenuação quanto para a atenuação, revelando que não existe diferença substancial entre os métodos.

**Tabela 16: Valor de coeficiente de atenuação linear e da atenuação via *XCOM* e Tomografia Gama**

Material	Composto químico, c	$\mu_m$ (cm <sup>2</sup> /g)	Coeficiente de Atenuação linear, $\mu$ (cm <sup>-1</sup> )		Atenuação, $\ln(I_0/I) = \mu x$	
			<i>XCOM</i>	TG	<i>XCOM</i>	TG
			Água	H <sub>2</sub> O	0,0857	0,0913±0,0002
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0746	0,0899±0,0002	0,0718±0,0002	0,1043±0,0002	0,0833±0,0002
Óxido de sílica	SiO <sub>2</sub>	0,0773	0,1456±0,0002	0,1243±0,0002	0,1689±0,0004	0,1442±0,0004
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0759	0,1526±0,0002	0,1369±0,0002	0,1770±0,0004	0,1588±0,0004

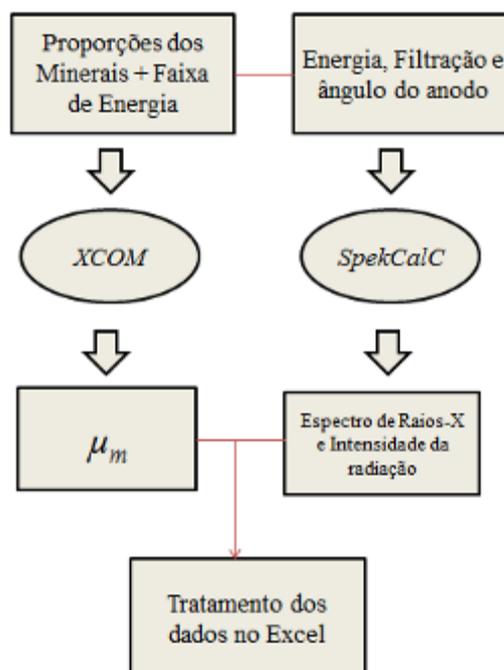
Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Simulações determinísticas

Para a modelagem simulada seguiu-se o fluxograma do processo, descrito na Figura 63. Uma característica importante nessa modelagem está relacionada aos parâmetros de entrada utilizados na mesma, todos são os mesmos utilizados na metodologia do Tomógrafo de Raios – X industrial. Os valores das proporções dos minerais utilizados no *XCOM* para estimar o coeficiente de atenuação de massa são os mesmos utilizados na preparação das amostras (item 3 do Material e Métodos) e posteriormente dos escaneados nos tomógrafos de Raios-x e Raios Gama na fase experimental, seção 4 e 5. Os parâmetros energia, filtração é

ângulo do ânodo também são representativos da fase experimental. Uma ressalva importante é para o ângulo do ânodo ( $18^\circ$ ), que é um parâmetro de suma importância para o cálculo da radiação produzida pelo tubo de Raios – X, a escolha do valor desse parâmetro, está associado ao ângulo do ânodo do Tomógrafo de Raios – X (Plagnard, 2014).

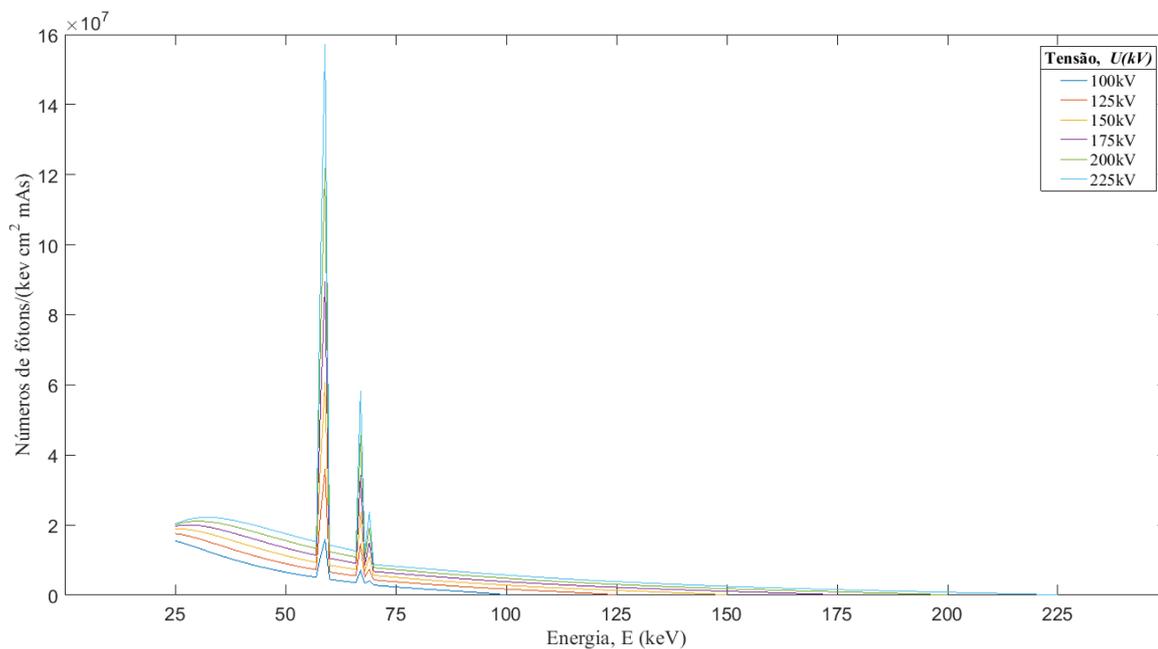
**Figura 63: Processo para determinação da intensidade Relativa e do Coeficiente de Atenuação de massa**



Fonte: Autoria própria.

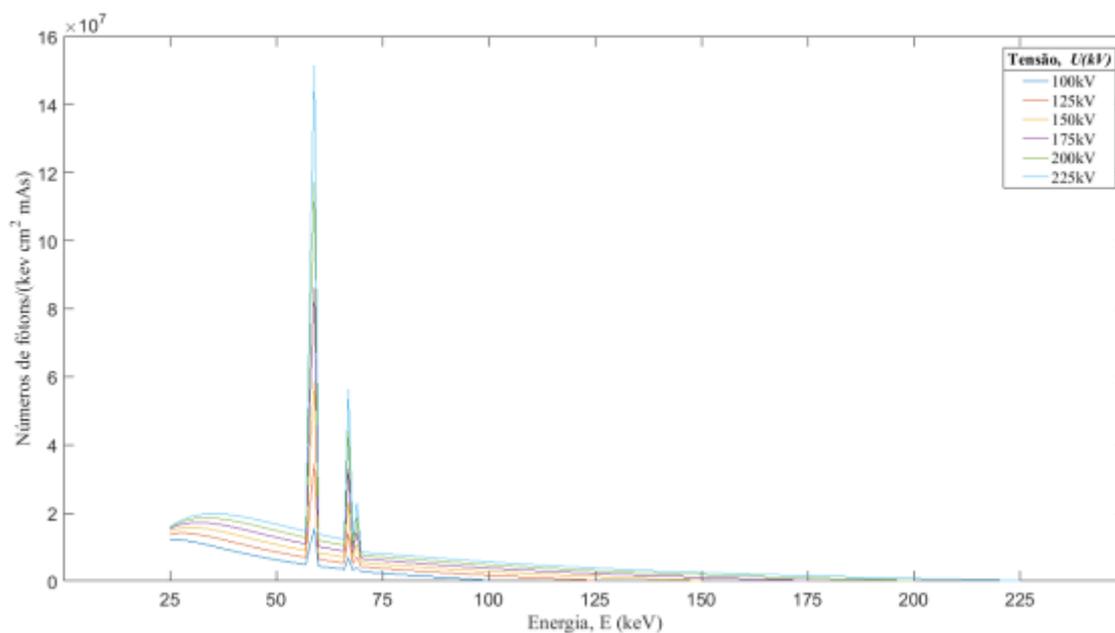
Nas Figura 64 a Figura 67 pode-se observar alguns dos resultados da fase simulada, que são os espectros de Raios – X, obtidos no software *SpekCalC* para os filtros de alumínio, cobre e estanho na espessura de 0.5mm. Nos espectros de Raios – X abaixo, pode-se observar a variação dos fótons por faixa de energia até o valor máximo ajustado, além das presenças dos componentes contínuos e discretos do espectro. Os espectros foram gerados para todas as configurações de tensão aplicada ao tubo, neles foi possível observar as diferentes formas dos espectros para a filtração adicional de 0,5 mm dos filtros. Plagnard (2014) observou em seu estudo de comparação de espectro medido e simulado pelos softwares *XCOM* e *SpekCalC* que essa técnica é uma boa forma de avaliar a qualidade do feixe emitidos por tubos de Raios – X. O mesmo também observou que os espectros medidos também podem ser distorcidos por artefatos associados ao processo de detecção. Ou seja, quando se aplica a técnica de comparação de espectros simulados com medidos, também pode se obter uma análise do sistema de detecção do equipamento.

**Figura 64: Espectro de Raios - X simulado a partir do software SpekCalc, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de  $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



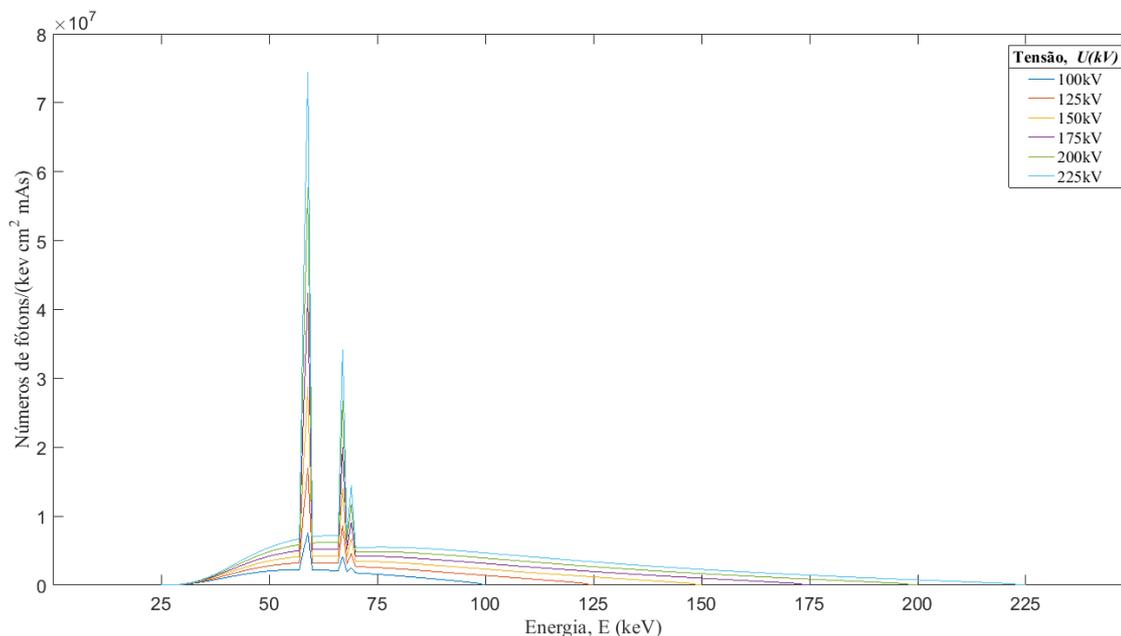
Fonte: Autoria própria

**Figura 65: Espectro de Raios – X simulado a partir do software SpekCalc, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de  $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125; 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando – se filtração adicional de 0,50 mm de Al.**



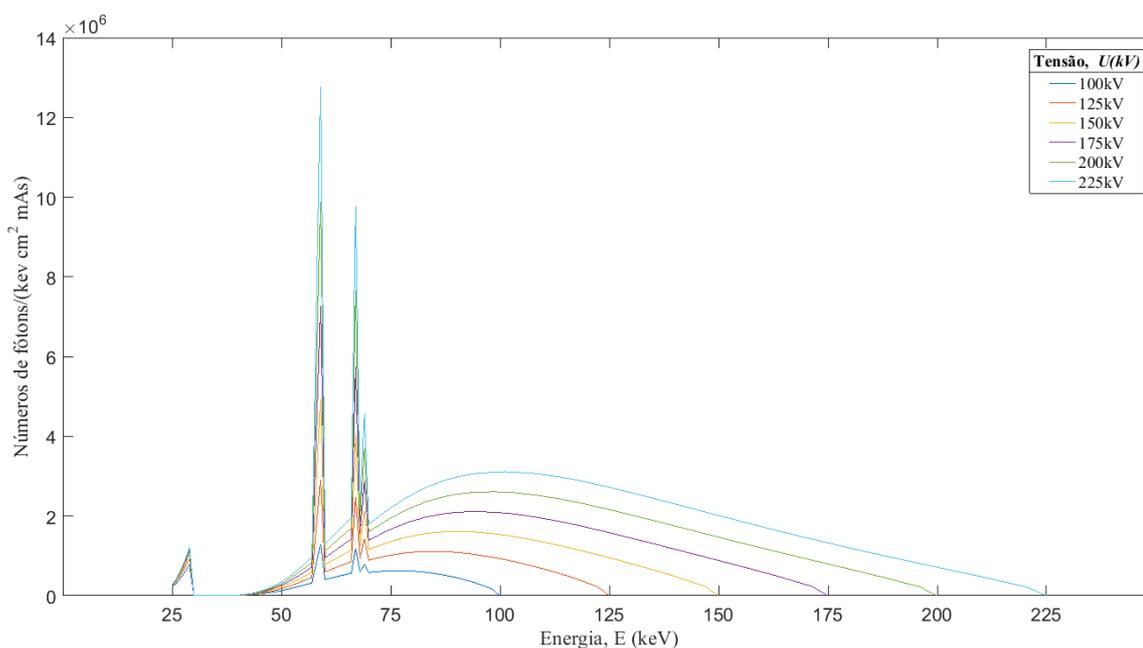
Fonte: Autoria própria

**Figura 66: Espectro de Raios – X simulado a partir do *software SpekCalc*, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de  $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando – se filtração adicional de 0,50 mm de Cu.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 67: Espectro de Raios – X simulado a partir do *software SpekCalc*, para um tubo com ângulo do anodo de tungstênio de  $18^\circ$ , filtração inerente de 0,5 mm de Be, tensões aplicadas ao tubo de Raios X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV, utilizando-se filtração adicional de 0,50 mm de Sn.**

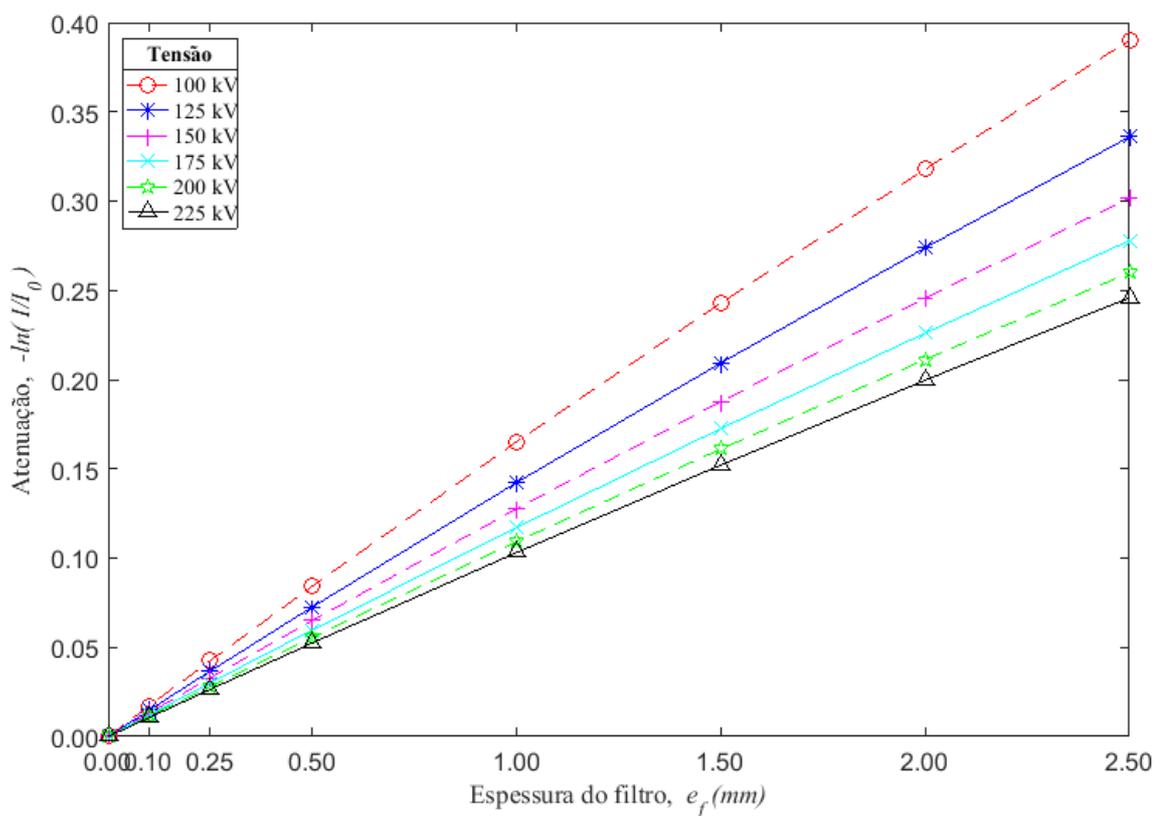


Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1 Avaliação da atenuação ( $I/I_0$ ) e do Número atômico

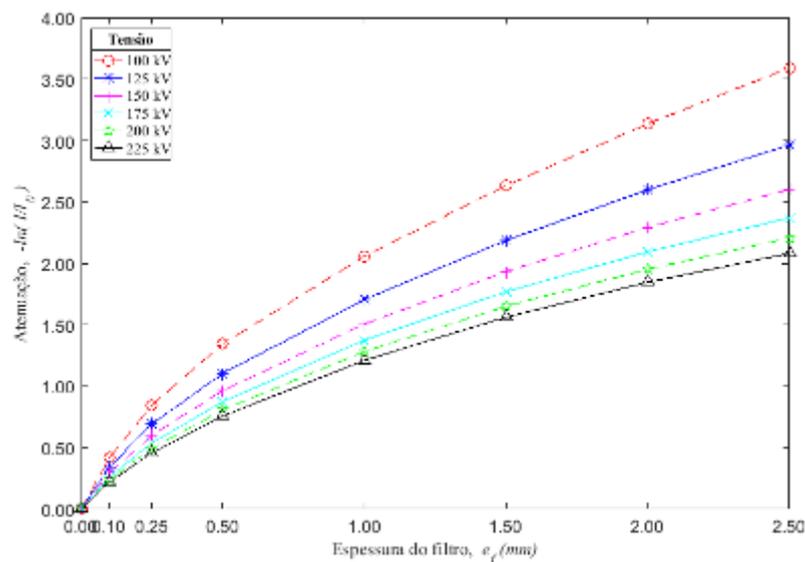
A atenuação do feixe de Raios - X apresentou uma tendência crescente e não linear com o aumento da espessura do filtro adicional e uma tendência decrescente com o aumento da tensão aplicada ao tubo, como pode ser observado nas Figura 68 a Figura 70. Quando um feixe de Raios - X atravessa a matéria, sua intensidade é reduzida (atenuada). Este comportamento é resultante da perda de fótons individuais, principalmente por interações. A redução de intensidade do feixe é previsível, visto que depende das características físicas do feixe e do objeto. As Figuras citadas acima evidenciam o comportamento da atenuação para diferentes tipos de matérias que são feitos os filtros adicionais, tais como: alumínio ( $^{13}Al$ ), cobre ( $^{29}Cu$ ) e estanho ( $^{50}Sn$ ), e espessura dos filtros, submetidos as variações das tensões aplicada ao tubo de Raios - X.

**Figura 68: Atenuação do filtro adicional de alumínio para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios - X.**



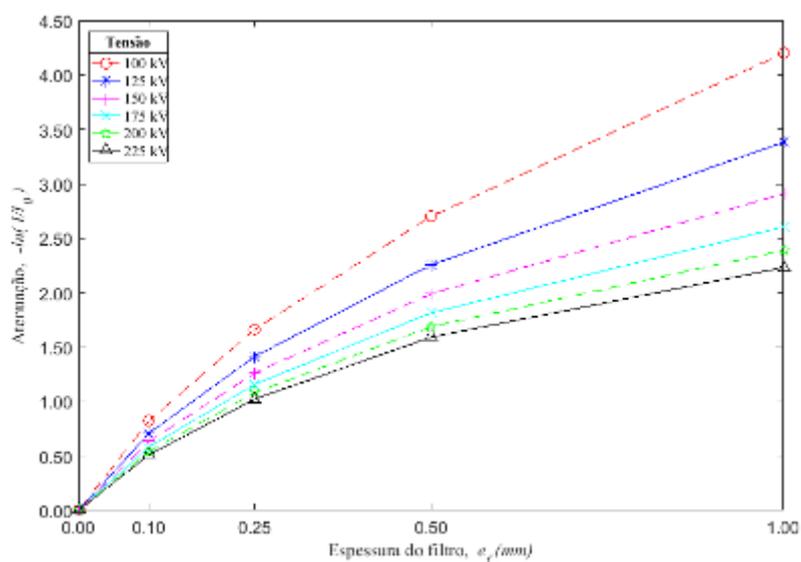
Fonte: Autoria própria

**Figura 69: Atenuação do filtro adicional de cobre para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 70: Atenuação do filtro adicional de estanho para diferentes espessuras e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X.**



Fonte: Autoria própria

As Figura 68 a Figura 70 mostram a variação da atenuação em função dos diferentes materiais e espessuras dos filtros adicionais para as tensões aplicadas ao tubo de Raios – x. Nota-se que o valor da atenuação de Raios – X apresenta maiores valores para o filtro de estanho, seguido do filtro de cobre, devido ao número atômico do material que compõe os filtros adicionais. Já o filtro de alumínio apresentou valores menores de atenuação de Raios – X. Este comportamento se manteve mesmo com o aumento da tensão aplicada ao tubo de

Raios – X. Para o cálculo de  $-\ln(I/I_0)$  utilizou-se a equação de atenuação (6). Nesse contexto o fator de relevância observado foi a influência do número atômico do material de cada filtro, ver Tabela 17. O parâmetro atenuação foi estimado a partir de resultados simulados com os softwares *XCOM* e *SpekCalc* como já foi mencionado anteriormente, com essa metodologia estimou – se esse parâmetro de transmissão da radiação de forma otimizada

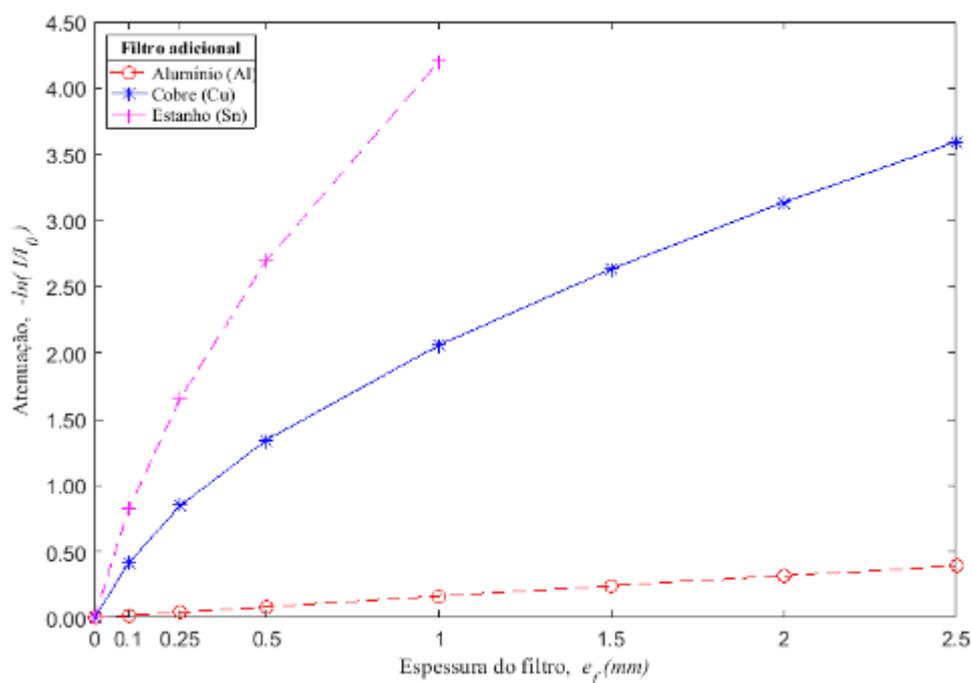
**Tabela 17: Material do filtro versus N° Atômico**

Material do Filtro	N° Atômico
Alumínio	13
Cobre	29
Estanho	50

Fonte: Autoria própria.

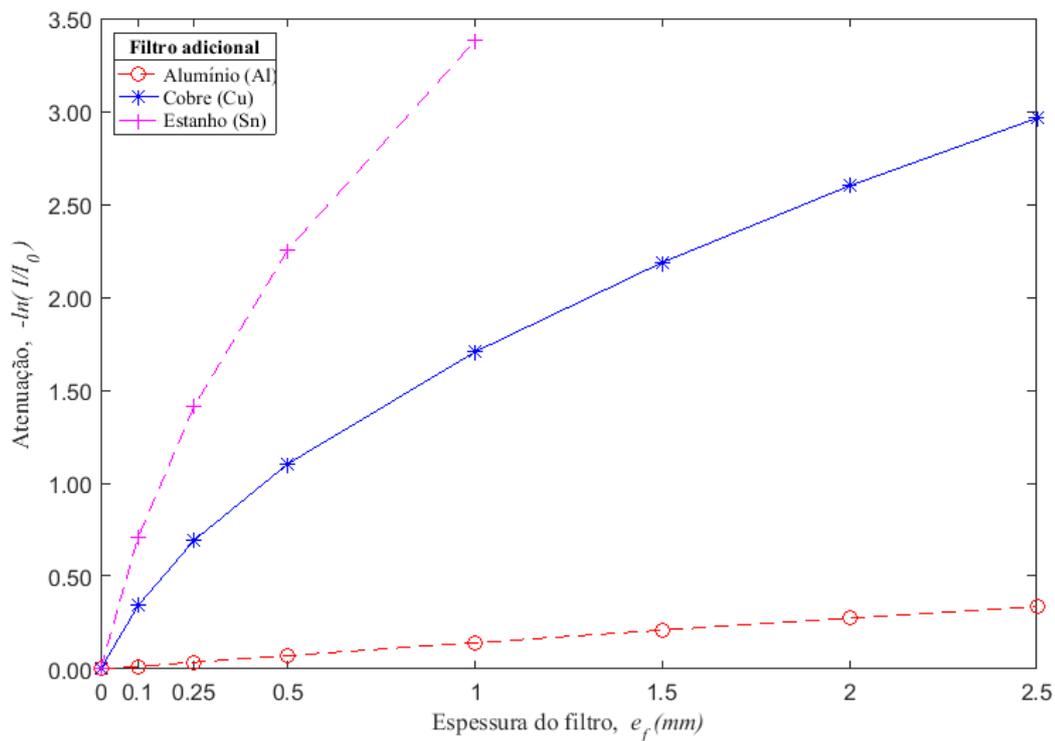
Nas Figura 71 a Figura 76 pode-se observar o comportamento da atenuação de Raios – X, para todos os valores de tensão aplicada ao tubo, às mesmas apresentaram maiores valores para o filtro de estanho, seguido do filtro de cobre, devido ao maior número atômico do material que compõe os filtros adicionais. Já o filtro de alumínio apresentou valores menores de atenuação de Raios – X. Este comportamento se manteve mesmo com o aumento da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, conforme se pode ser visto nas Figuras abaixo.

**Figura 71: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 100 kV.**



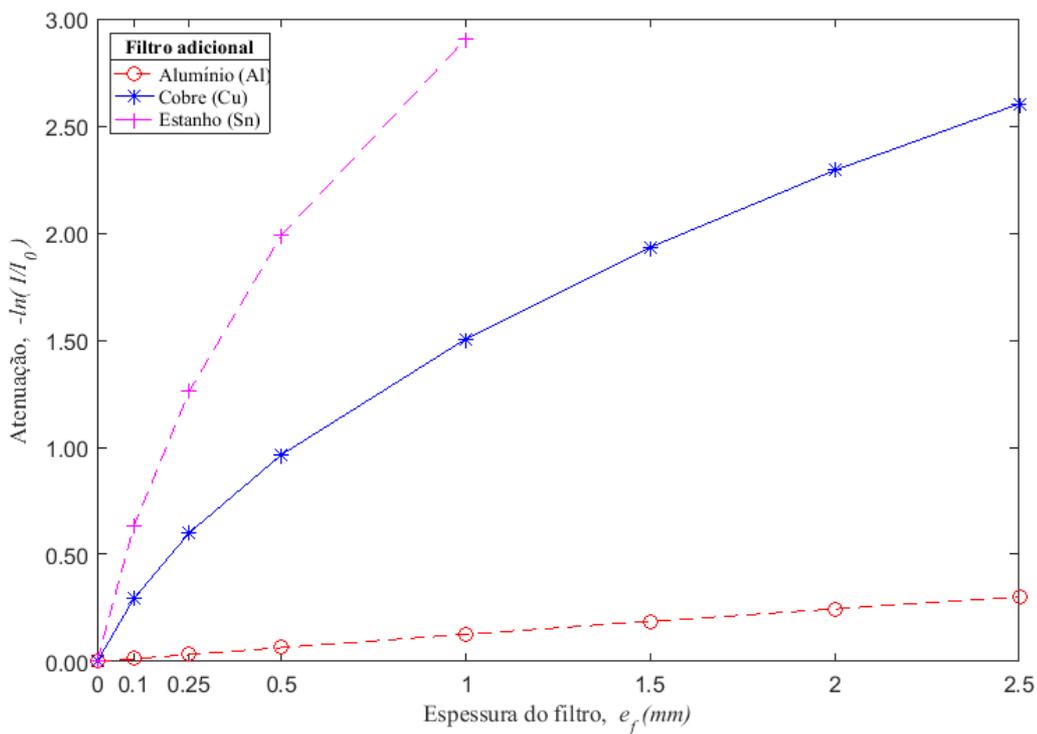
Fonte: Autoria própria.

**Figura 72: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 125 kV**



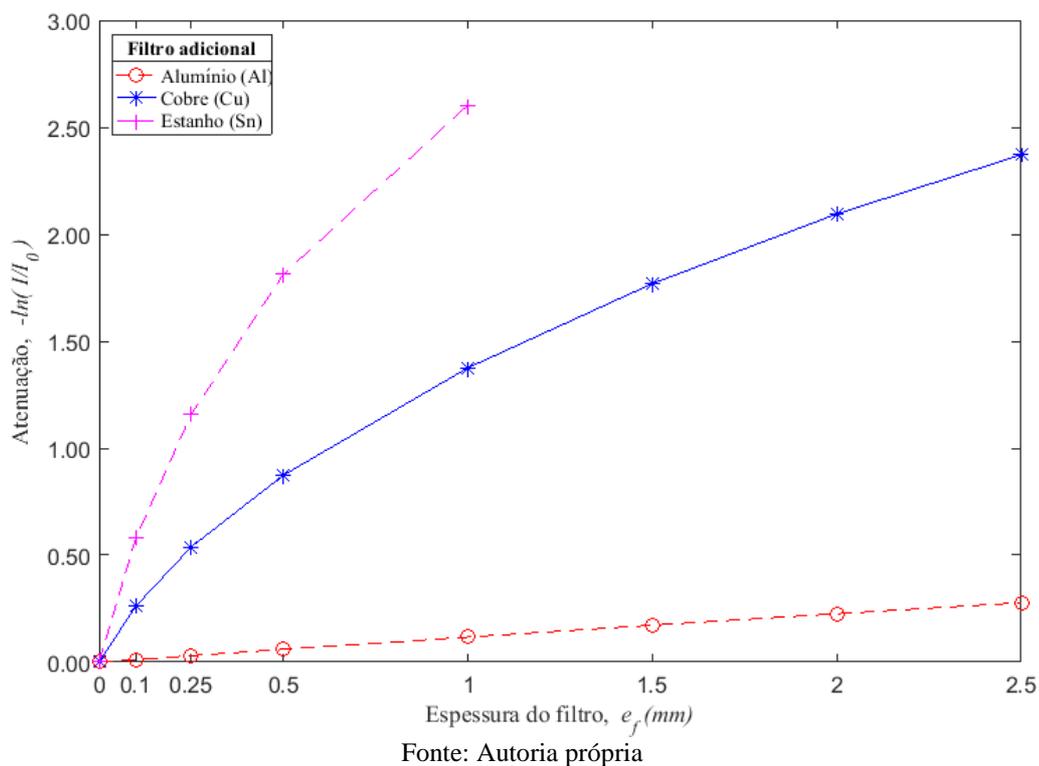
Fonte: Autoria própria.

**Figura 73: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 150 kV.**

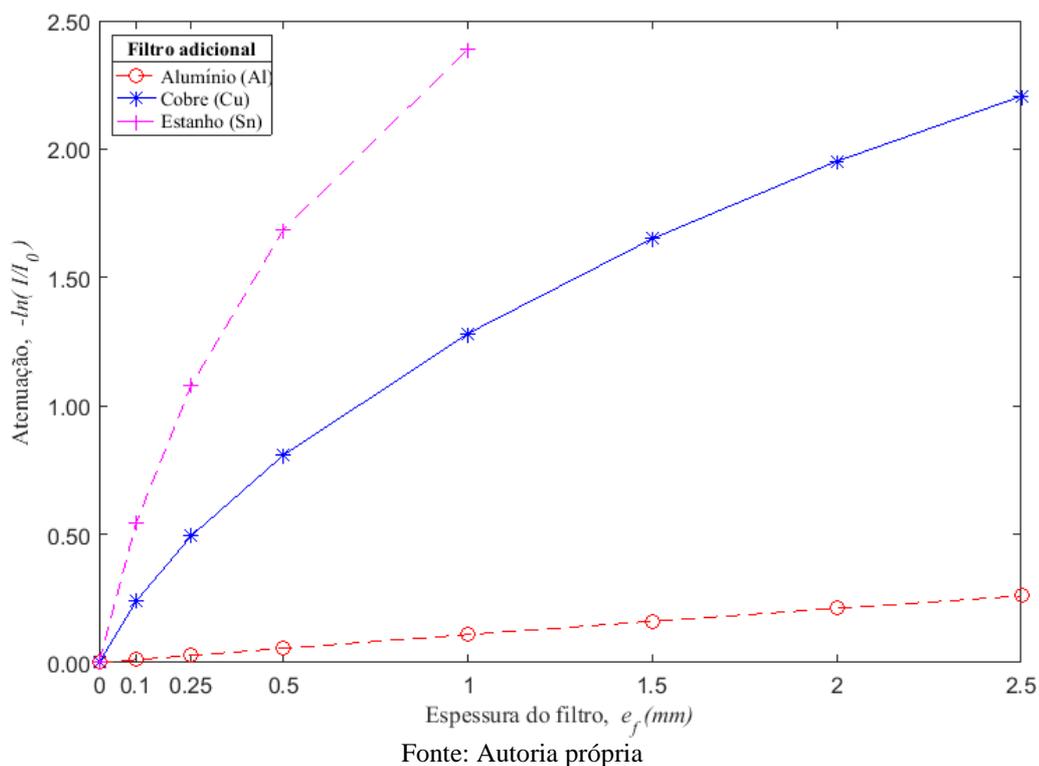


Fonte: Autoria própria

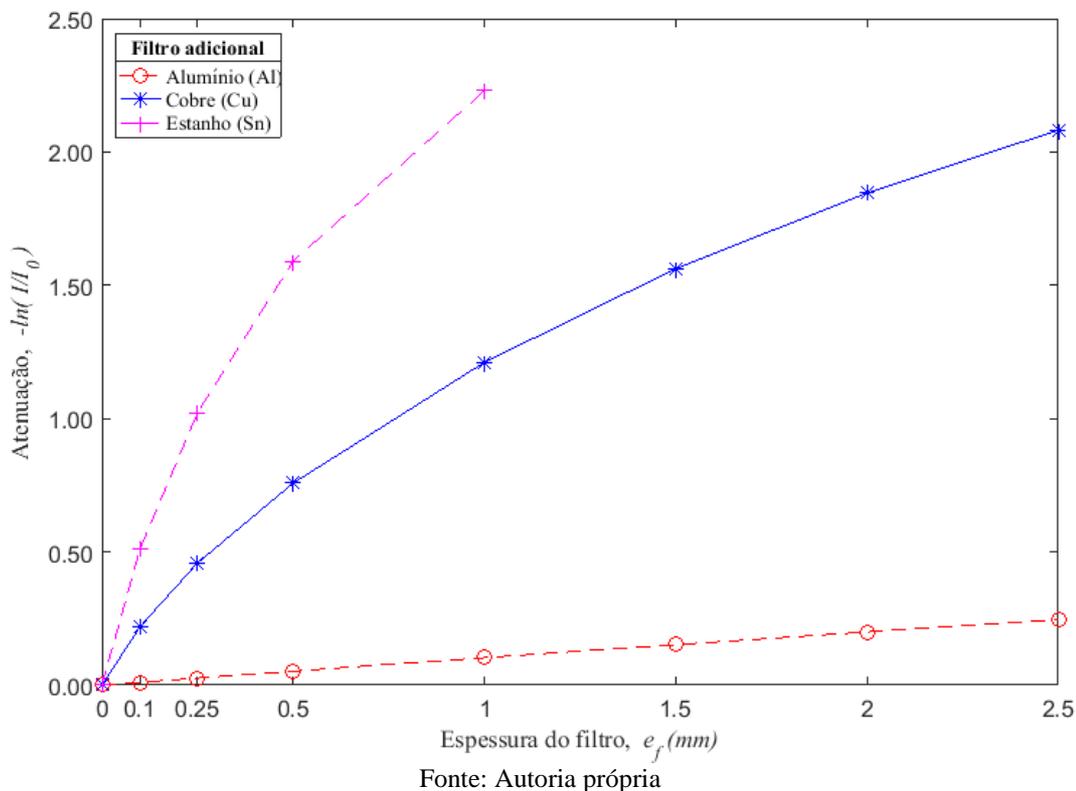
**Figura 74: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 175 kV.**



**Figura 75: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 200 kV.**



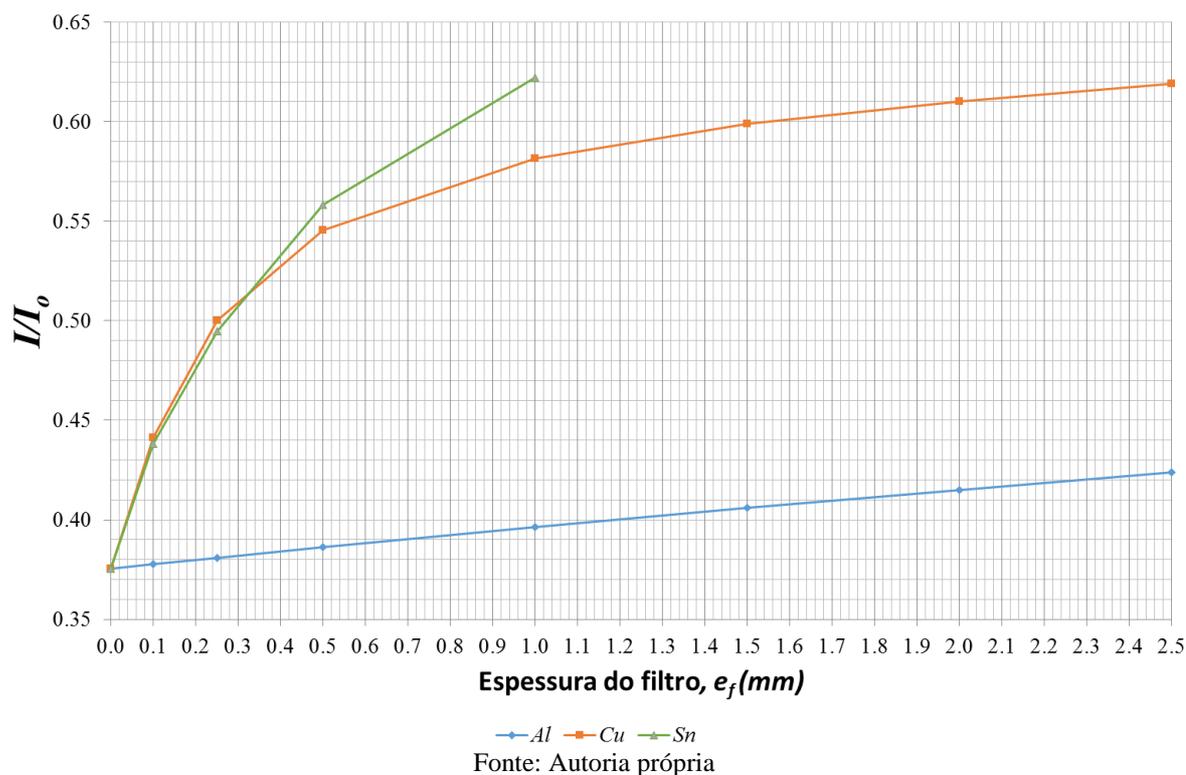
**Figura 76: Comparações das atenuações para diferentes materiais e espessuras de filtro adicional, como Al; Cu e Sn, para a tensão de 225 kV.**



De forma geral, os filtros metálicos são usados para absorver e atenuar os fótons de baixa energia, aumentando a energia efetiva do espectro de Raios – X, os filtros metálicos, ao eliminar as baixas energias, também diminuem efeitos de espalhamento e endurecimento do feixe da radiação de Raios – X, e a redução na intensidade dos fótons incidentes.

Na Figura 77 pode-se observar o perfil de atenuação para o quartzo puro em função do aumento da filtração, para a tensão de 100 kV. Também foi observado uma tendência crescente de seus valores em função do crescimento da espessura do filtro. O aumento na espessura do filtro acarreta não só no aumento da atenuação, mas também a diminuição na energia depositada, que é considerada um importante parâmetro quando se qualifica o feixe transmitido para utilização ou escaneamento em seres humanos. Outra observação é que aumentando-se a filtração adicional ocorre uma maior atenuação dos fótons emitidos pela fonte (é importante ressaltar que preferencialmente os fótons de baixa energia, sofrem essa atenuação antes dos de maior energia), esse resultado é o esperado para filtrações adicionais.

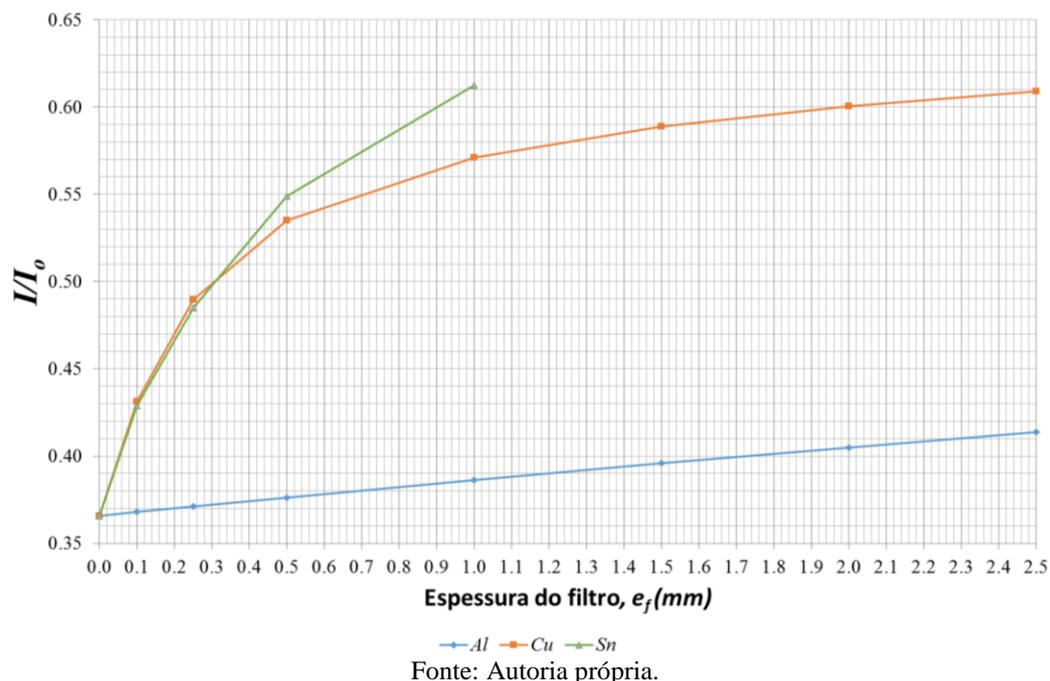
**Figura 77: Perfil da atenuação ( $I/I_0$ ) para o material puro 100% de  $\text{SiO}_2$  para uma tensão de 100 kV.**



Como já foi mencionado os valores das intensidades relativas também obedeceram a ordem de crescimento de atenuação pelo valor dos números atômicos dos materiais, com os maiores valores para o filtro de estanho e os menores valores para o filtro de alumínio. Também se infere do gráfico, que para os filtros de cobre e alumínio, a partir da espessura de 1,0 mm, que a filtração adicional, passa a não afetar de forma significativa a atenuação, o que pode ser observado nos valores de  $I/I_0$ .

Na Figura 78, observa-se a variação da atenuação para uma mistura de quartzo com óxido de alumínio, nesse resultado também foi observado o mesmo comportamento dos obtidos para materiais puros como o quartzo, ou seja, um crescimento do valor da intensidade relativa, com o aumento da filtração adicional. Kucuk et al. (2013), em seu estudo para determinação da energia de absorção em diferentes solos, observou que além da influência do número atômico do material, a composição e o tamanho de grãos (partículas), também influenciava diretamente na atenuação da radiação.

**Figura 78: Perfil da atenuação ( $I/I_0$ ) para a mistura V (5% de  $Al_2O_3$  e 95% de  $SiO_2$ ) para uma tensão de 100 kV.**

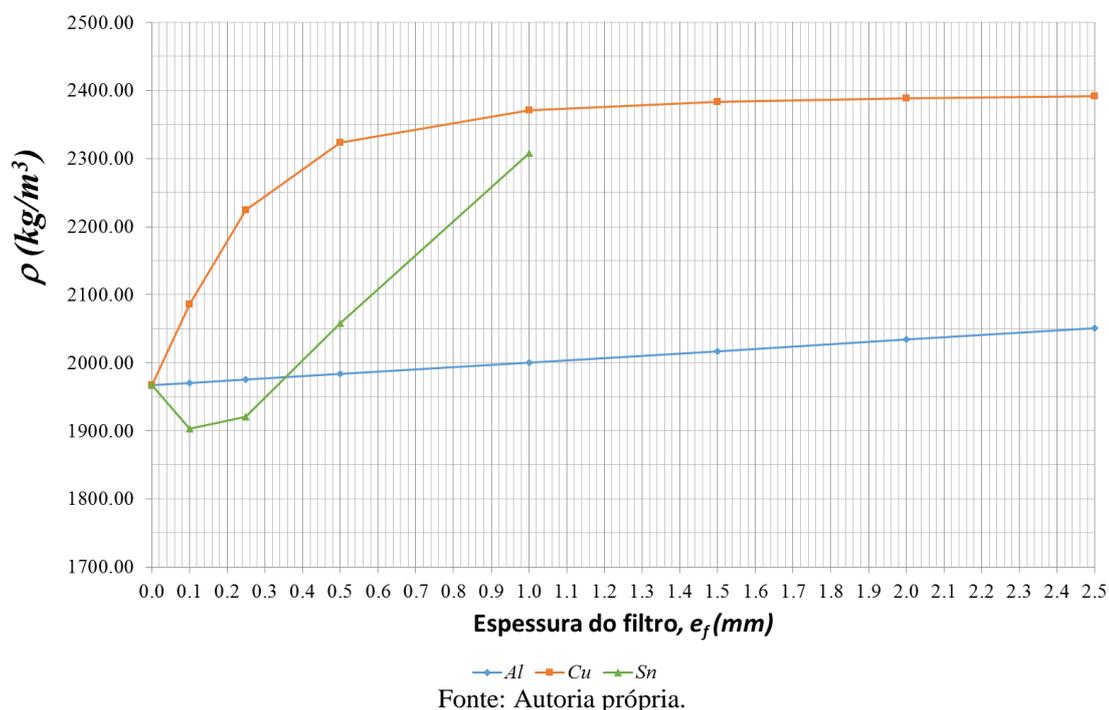


#### 4.2.2 Medidas da Densidade Radiométrica

De posse do valor do coeficiente de atenuação linear calculado com o software *XCOM* e da atenuação calculada com software *SpekCalc*, pode-se efetuar o cálculo da densidade dos materiais das proporções das amostras através da equação (6). O resultado da densidade é bastante satisfatório para a configuração energia/filtração, mostrando resultados próximos entre o valor de referência do material e o simulado pelos programas.

Na **Figura 79**, observa-se que o filtro que obteve o resultado da densidade mais próximo do quartzo é o filtro de cobre de espessura de 2.5.

**Figura 79: Densidade do quartzo: valor simulado versus valor de referência.**



#### 4.2.3 Resultados dos parâmetros qualificadores do feixe

Ao serem efetuadas as simulações do espectro de Raios – X para determinação de valores de atenuação, para as mesmas condições experimentais realizadas no tomógrafo de Raios – X de terceira geração, outros dados de saída também foram obtidos, como por exemplo, os valores simulados de CSR. Foram realizadas 108 simulações para avaliar o número de fótons transmitidos, com o simulador *SpekCalc*. Com esses resultados preliminares pode-se realizar uma análise previa da qualidade do feixe, porque para uma análise mais refinada, seria necessário análises experimentais para a determinação do parâmetro CSR com o equipamento, além de um tratamento estatístico nos dados, o que fugiria da proposta original do trabalho. No entanto, a análise desses parâmetros foram realizadas, porque os mesmos fornecerem informações interessantes sobre a qualidade do feixe. Na Tabela 18 observa-se que à medida que a tensão aumenta há um aumento da energia média do espectro, esse comportamento é o esperado, de acordo com a literatura (Soares, 2012).

**Tabela 18: Análise da Qualidade da Radiação**

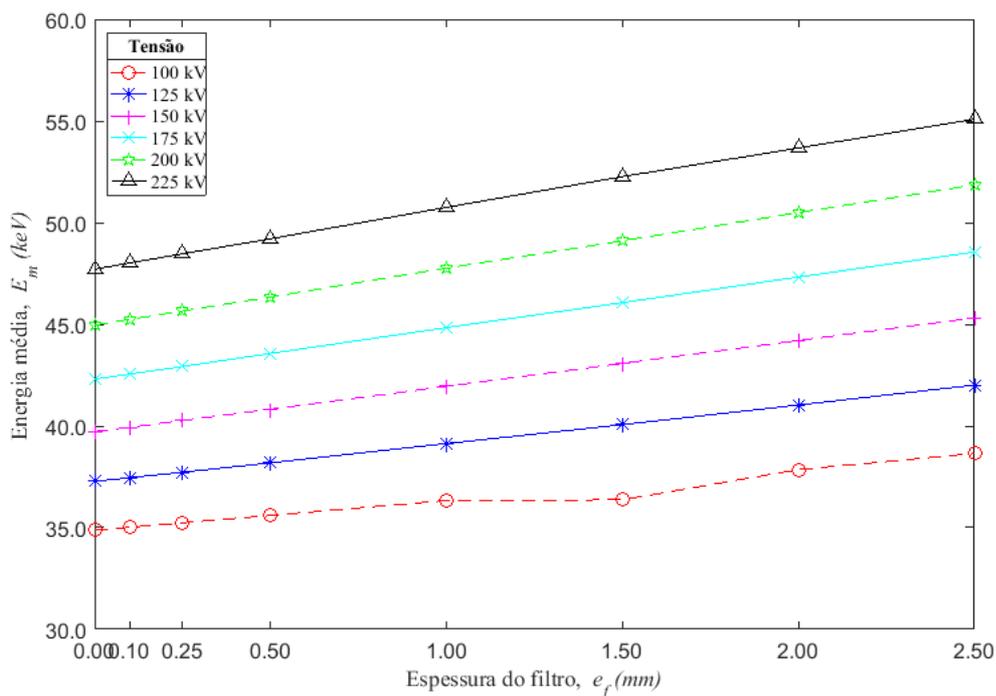
Espectro	Tensão (kV)	Filtração Adicional* (mm)	Energia Média (keV)	Energia Efetiva (keV)	Primeira CSR (mm Al)	Segunda CSR (mm Al)
$\Omega_1$	100	0	46.19810	34.88260	0.33063	0.44907
$\Omega_2$	125	0	51.80880	37.27430	0.38603	0.56450
$\Omega_3$	150	0	6.77640	39.72840	0.44495	0.68344
$\Omega_4$	175	0	61.33680	42.29960	0.50754	0.80067
$\Omega_5$	200	0	65.62130	44.95970	0.57329	0.91242
$\Omega_6$	225	0	69.70010	47.70610	0.64115	1.01648

\*Filtração inerente: 0,5 mm Be.

A energia efetiva (É a estimativa para avaliar a capacidade de penetração do feixe de Raios – X) é um parâmetro que avalia o feixe como se o mesmo tivesse a CSR de um feixe monocromático, o mesmo também tendeu a aumentar, com o aumento da tensão aplicada ao tubo. Este mesmo comportamento também foi evidenciado em Soares (2012). Outra análise que também pode ser obtida é que a energia efetiva é considerada a energia mais provável do espectro de Raios – X, porque a mesma é 1/3 da energia máxima e aumenta à medida que se acrescenta a filtração adicional.

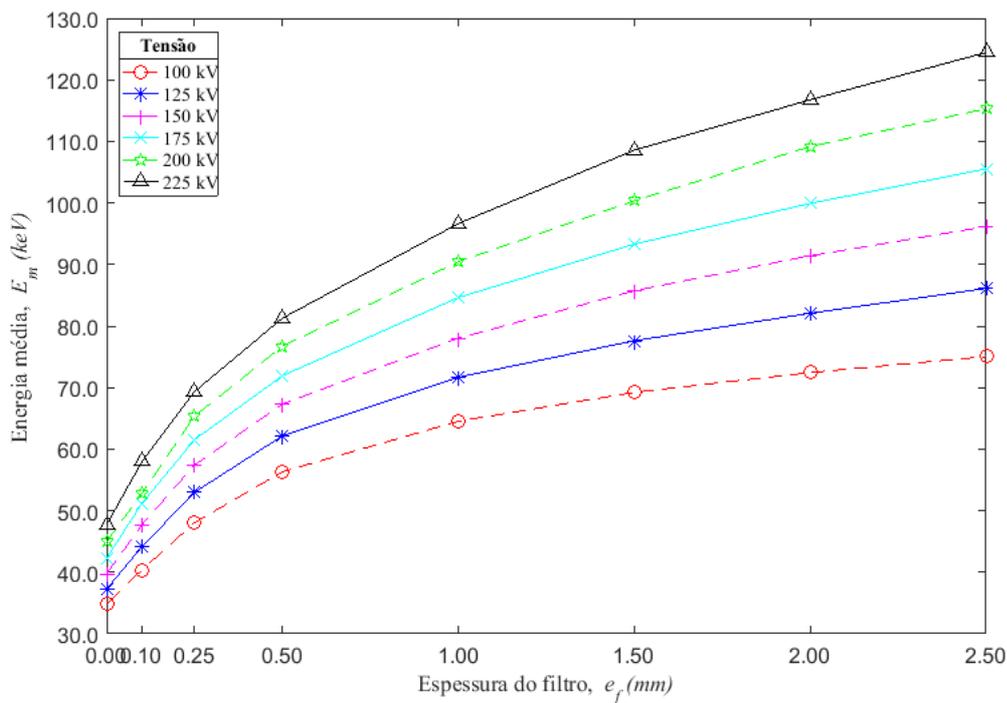
As Figura 80 a Figura 83 apresentam o perfil das energias médias do feixe de Raios – X em função da espessura do filtro adicional dos materiais nas tensões aplicada ao tubo de Raios – X de 100; 125; 150; 175; 200 e 225 kV. Observa – se com o aumento na tensão aplicada ao tubo de Raios – X, também há um aumento na energia média do feixe de Raios – X. Nota – se conforme há um aumento na espessura do filtro adicional corresponde a uma acréscimo na energia média do feixe de Raios – X.

**Figura 80: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio ( $^{13}\text{Al}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



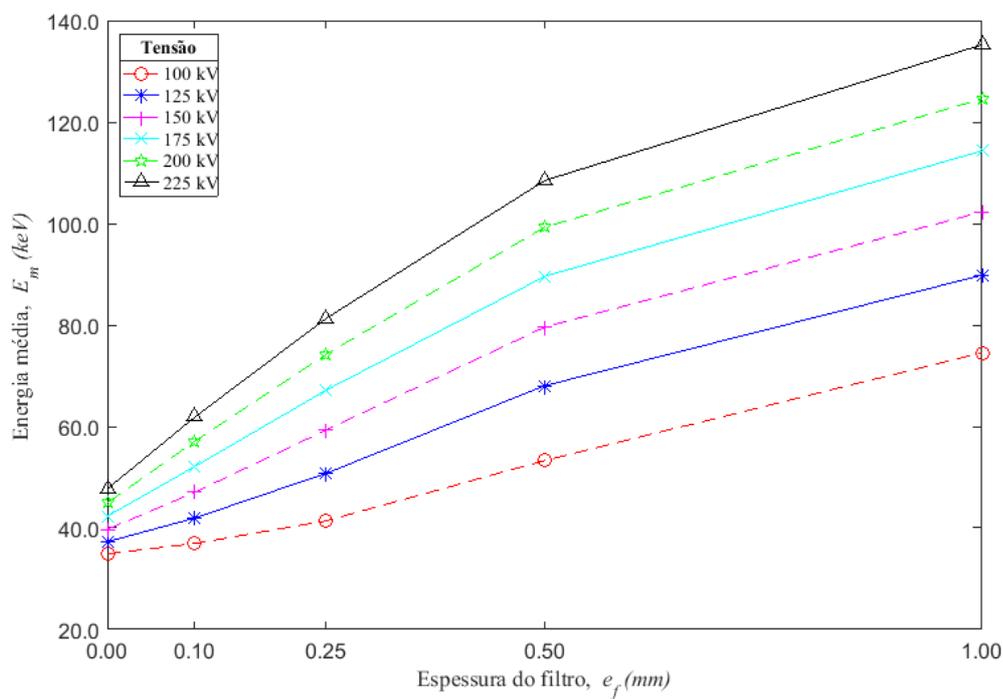
Fonte: Autoria própria.

**Figura 81: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de cobre ( $^{29}\text{Cu}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 82: Perfil da energia média do feixe de Raios – X em função da espessura da filtração adicional de estanho ( $^{50}\text{Sn}$ ) nas tensões 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**

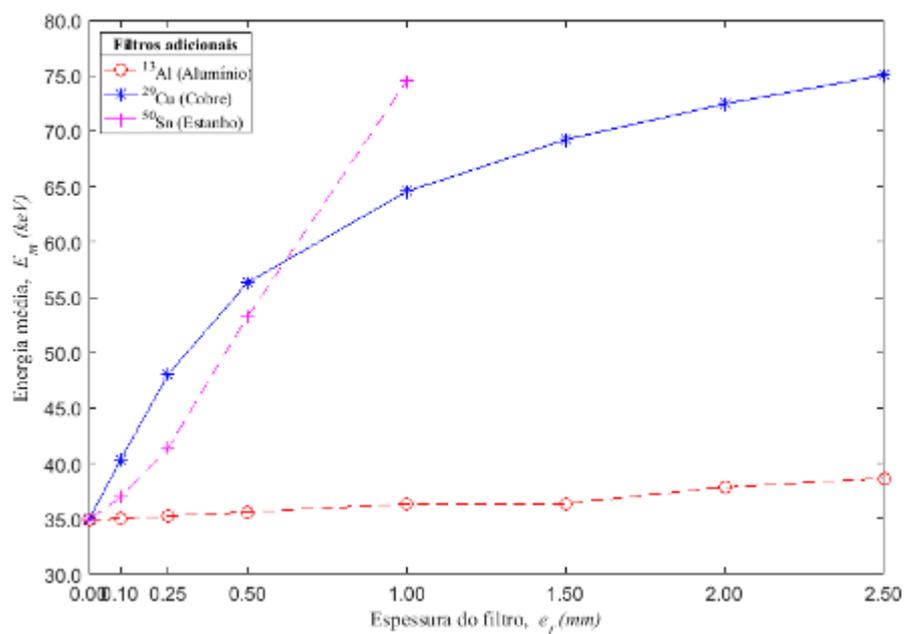


Fonte: Autoria própria

A faixa de energia dos fótons de um feixe polienergético (Raios – X) é ampla, pois tem-se fótons de diferentes energias, em quantidades diferentes. Fótons de baixa energia têm maior probabilidade de serem absorvidos do que fótons de alta energia, como já mencionado. Como consequência, as camadas superficiais de um objeto tendem a remover os fótons de baixa energia e permitir a passagem dos fótons de alta energia. Então quando um feixe de Raios – X atravessam a matéria, a intensidade do feixe diminui, mas aumenta a energia média do feixe resultante.

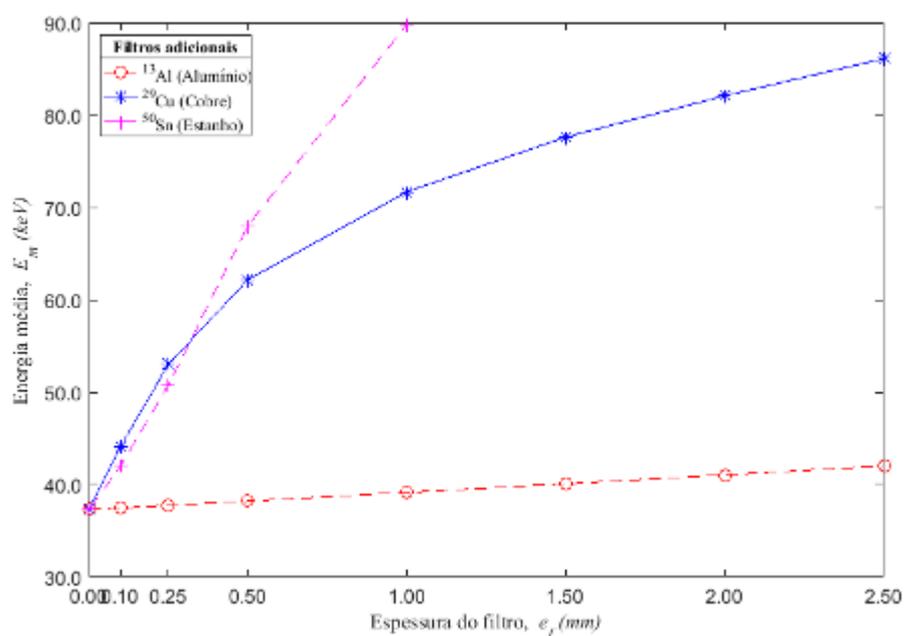
Nas Figura 83 a Figura 88 apresentam a influência dos materiais da filtração adicional nas curvas de energia média do feixe de Raios – X em função da espessura da filtração.

**Figura 83: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 100 kV.**



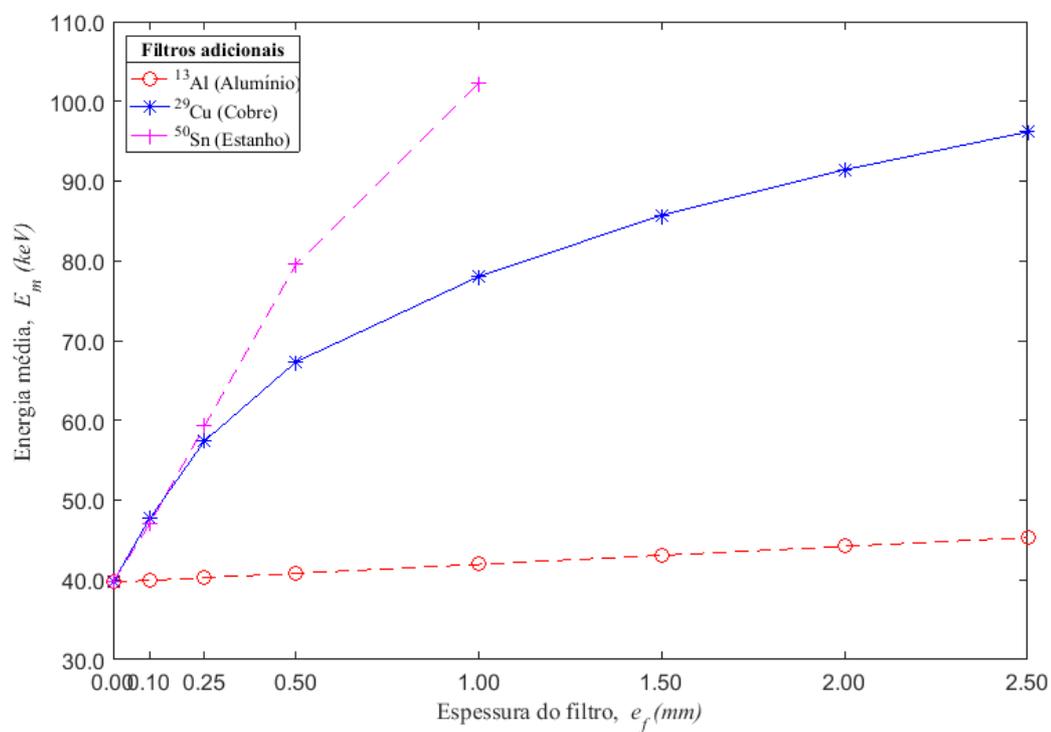
Fonte: Autoria própria

**Figura 84: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 125 kV.**



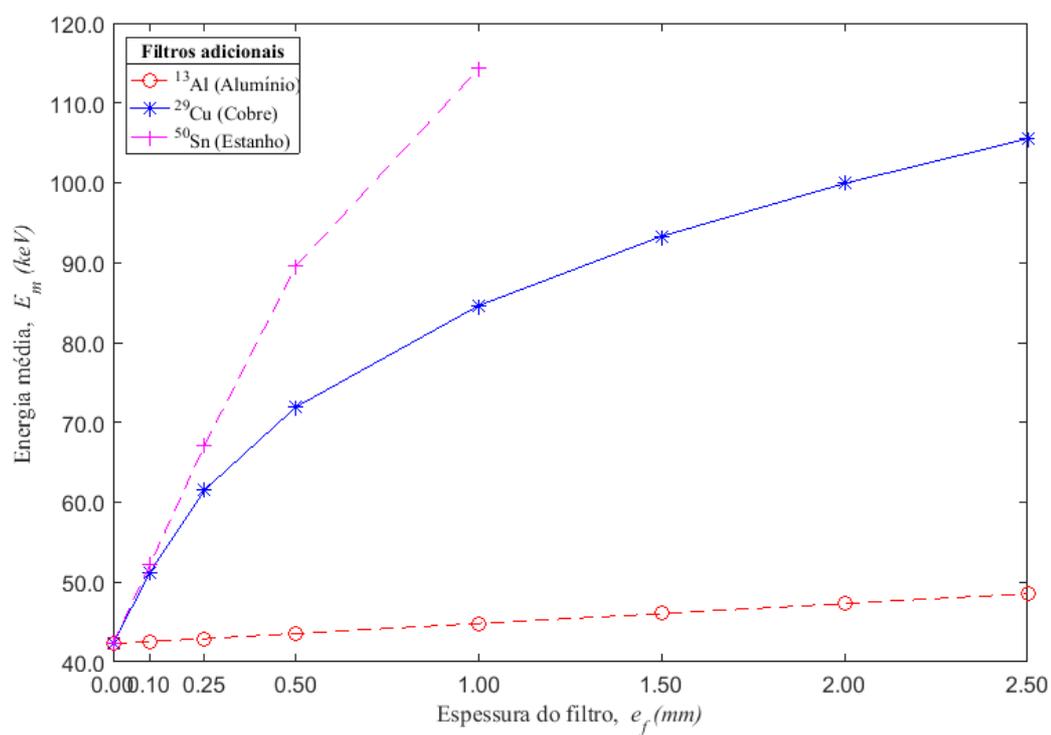
Fonte: Autoria própria

**Figura 85: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 150 kV.**



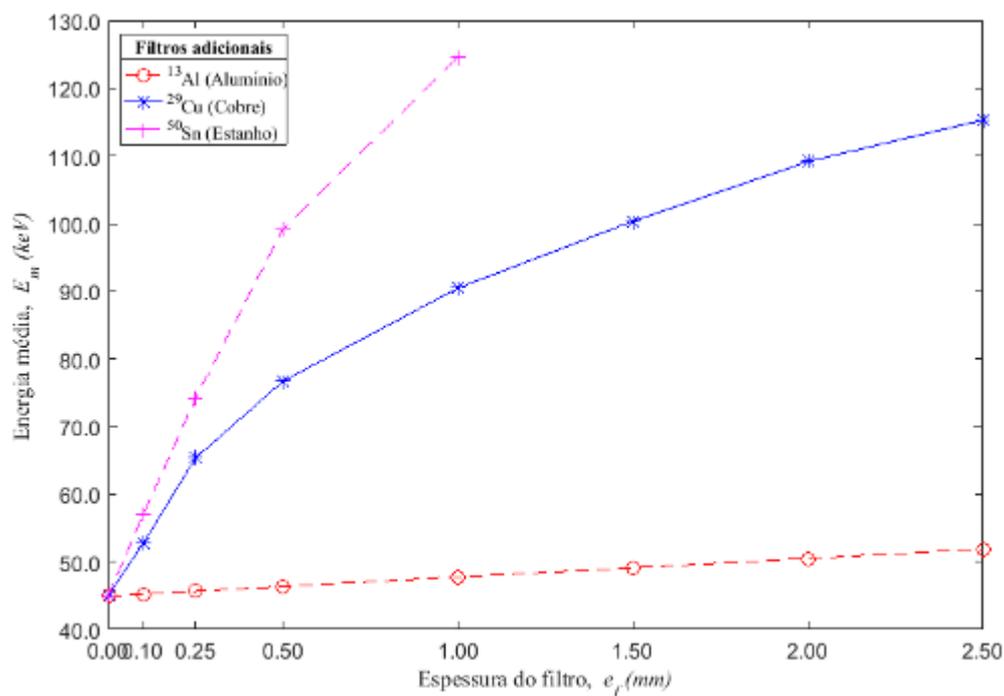
Fonte: Autoria própria

**Figura 86: Perfil da energia média do feixe de raios X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 175 kV.**



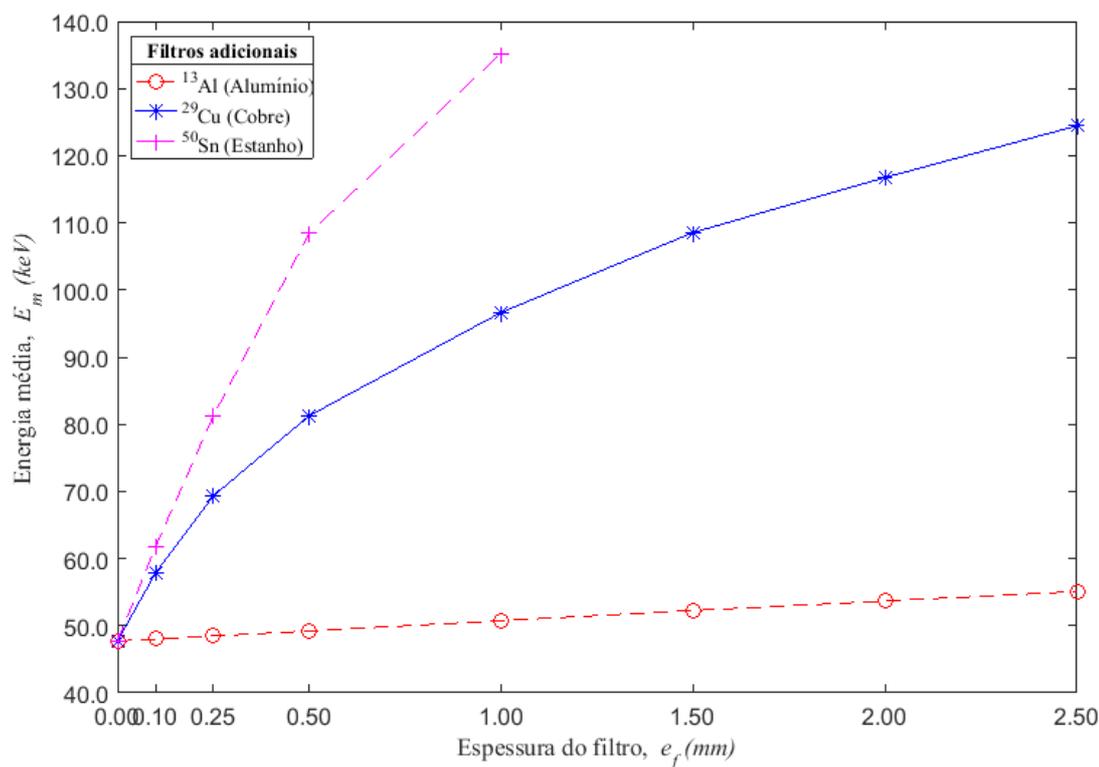
Fonte: Autoria própria

**Figura 87: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 200 kV.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 88: Perfil da energia média do feixe de Raios - X em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão de 225 kV.**



Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos nas simulações com o software *SpekCalc* na avaliação da camada semi - redutora (*HVL*), são apresentados na Tabela 19. Essa tabela mostra que os resultados da simulação de *HVL* vai aumentando em função do aumento da tensão e da filtração. Com o aumento da filtração adicional o feixe torna-se endurecido e como consequência a sua capacidade de penetração aumenta (isto faz com que o material tenha mais dificuldade de atenuá-lo). No estudo de Tavares (2013), para aumentar a capacidade de um material atenuar um feixe, utiliza-se um material com um maior coeficiente de atenuação. Caso essa possibilidade não seja possível, o autor sugere o aumento da espessura do material, principalmente quando o feixe torna-se endurecido.

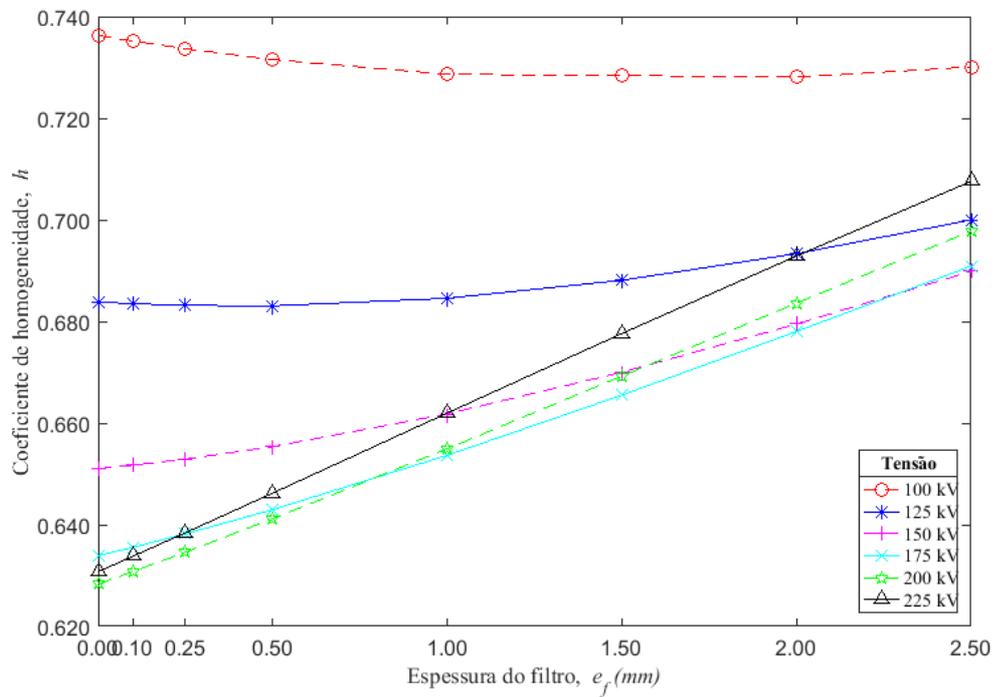
**Tabela 19: Análise de HVL do filtro de alumínio**

Energia (kV)	Espessura (mm)	
	0,10	0,25
	HVL (mm)	HVL (mm)
100	3,34	3,39
125	3,90	3,97
150	5,50	4,58
175	5,14	5,23
200	5,80	5,91
225	6,49	6,60

Fonte: Autoria própria.

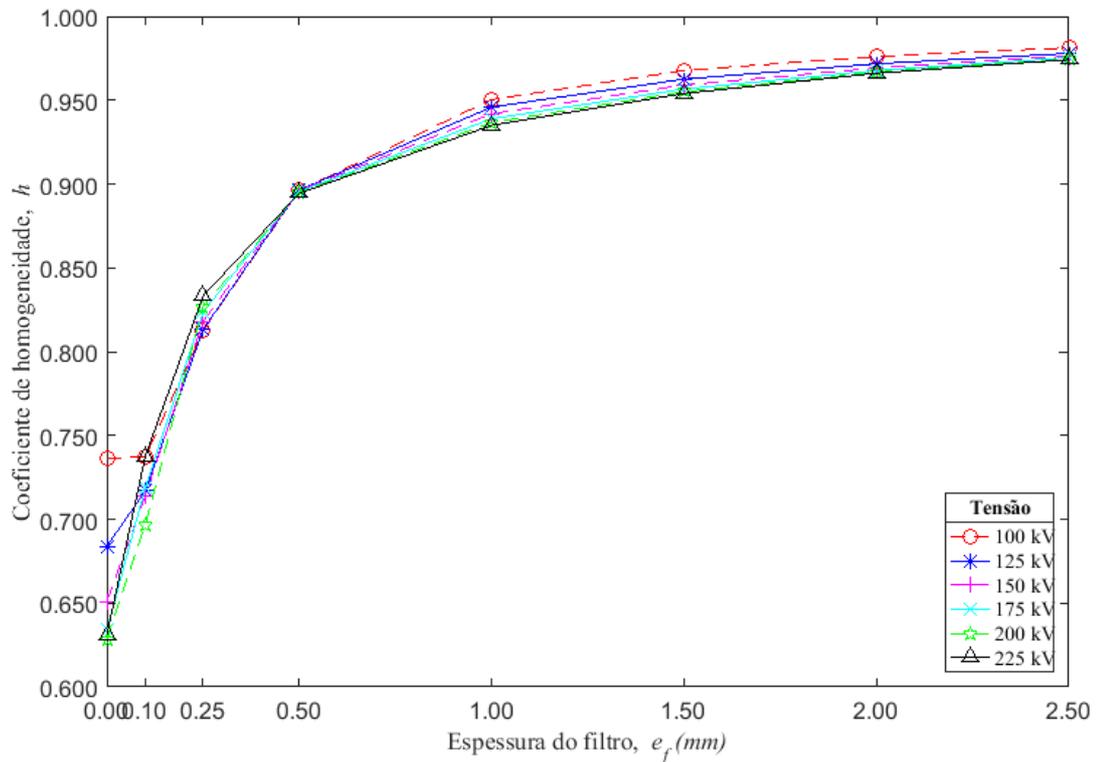
Uma análise dependente da CSR é a do coeficiente de Homogeneidade (*ch*), que também pode ser utilizado para verificação das características do feixe de Raios-X. Quando o valor do coeficiente de homogeneidade aproxima-se de 1, diz-se que mais homogêneo é o feixe ou mais próximo da homogeneidade está o feixe de radiação. Por isso, o valor (*ch*) é sempre menor que um, e o seu valor fornece o indicativo de quão próximo de um feixe monoenergético se encontra o feixe de Raios – X (Santos, 2009). Nas Figura 89 a Figura 92 pode-se observar o comportamento do coeficiente de homogeneidade em função da filtração adicional para as tensões aplicada ao tubo.

**Figura 89: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de alumínio nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



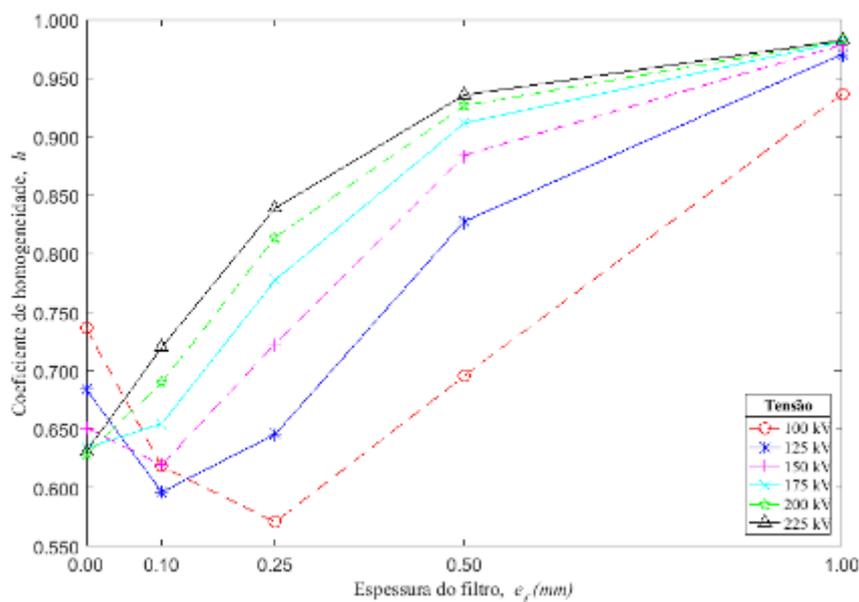
Fonte: Autoria própria

**Figura 90: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de cobre nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



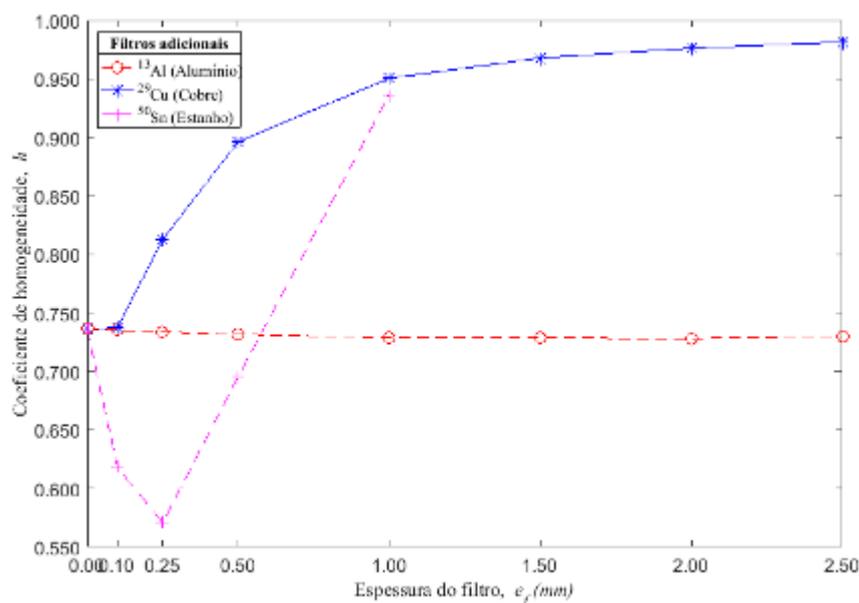
Fonte: Autoria própria

**Figura 91: Coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de estanho nas tensões aplicada ao tubo de Raios - X de 100, 125, 150, 175, 200 e 225 kV.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 92: Comparação dos perfis dos coeficientes de homogeneidade em função da espessura da filtração adicional de alumínio, cobre e estanho na tensão aplicada ao tubo de Raios X de 100kV.**



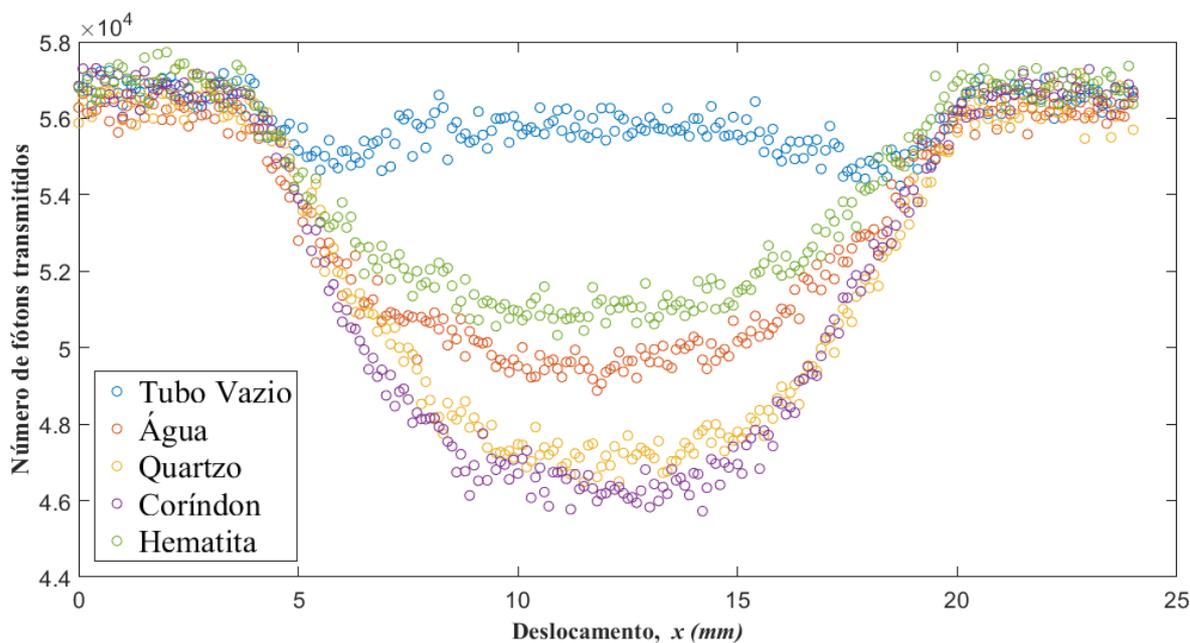
Fonte: Autoria própria

Nas Figura 89 a Figura 92 observa-se que para todas as situações o valor do coeficiente de homogeneidade é abaixo de um. Indicando uma tendência do feixe de torna – se mais monoenergético devido a filtração adicional. (IEC, 2007).

### 4.3 Transmissão gama dos óxidos em estudo

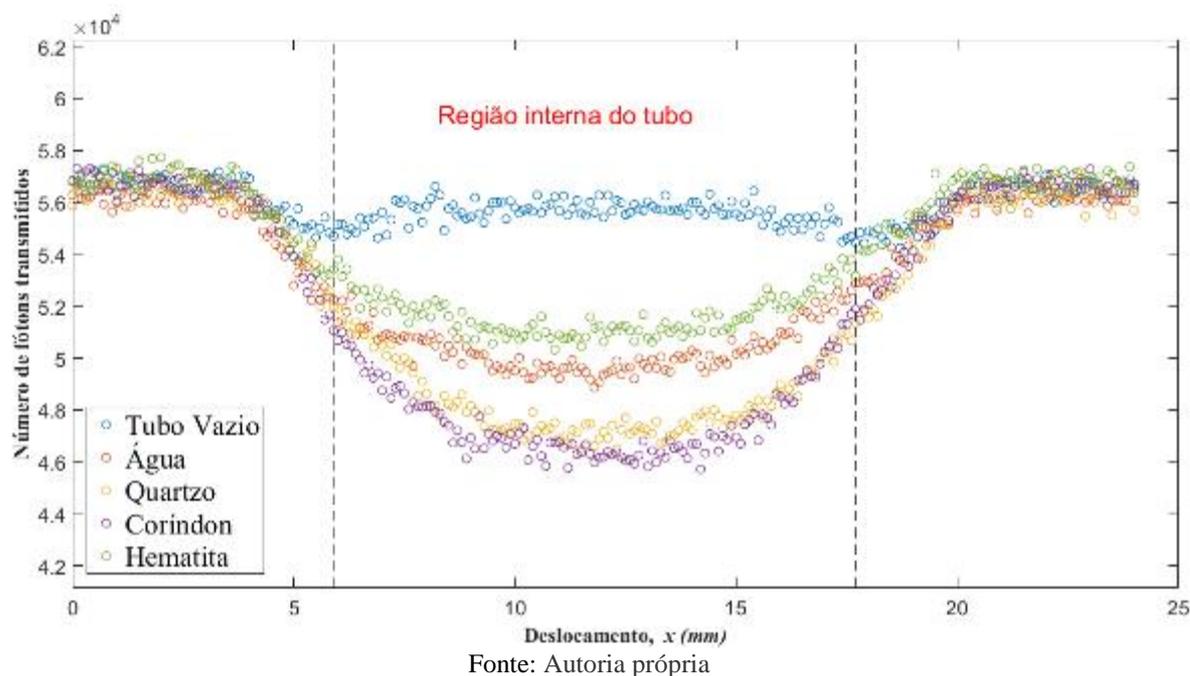
Na Figura 93, pode-se observar o comportamento da intensidade dos números de fótons nos tubos de ensaios nas condições de vazio e com materiais, conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e as condições experimentais TGCi – 1ªG definida na Tabela 12.

**Figura 93: Número de fótons transmitidos nas condições de tubo vazio e com materiais.**



Observa – se na Figura 93 que o valor do número de contagem de fótons transmitidos para o tubo de ensaio nas condições de vazio, quando comparado com o número de contagem de fótons transmitidos na condição com material, por exemplo, a água, o maior valor do número de contagem de fótons no tubo vazio, pois, praticamente não há absorção de radiação gama. Também nota – se que o valor do número de contagem de fótons na região interna do tubo na condição de vazio é menor do que o valor do número de contagem de fótons na região externa à seção de teste (região interna ao tubo), devido à absorção da radiação pelas paredes do tubo de ensaio, conforme poder ser visto na Figura 94.

Figura 94: Número de fótons transmitidos nas condições de tubo vazio e com materiais



#### 4.3.1 Determinação da densidade aparente do meio

As amostras dos materiais analisados no presente trabalho (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) ocuparam um volume de  $(8,97 \pm 0,10) \text{ cm}^3$  do tubo de ensaio, conforme apresentado na Seção 3.1.5.1.1 utilizando a Equação 11. E as respectivas massas foram pesadas (dados da Tabela 20) ver Seção 3.1.1.2 e as densidades aparentes são determinadas pela Equação 2 da Seção 3.1.1.3, cujos valores estão apresentados na Tabela 20.

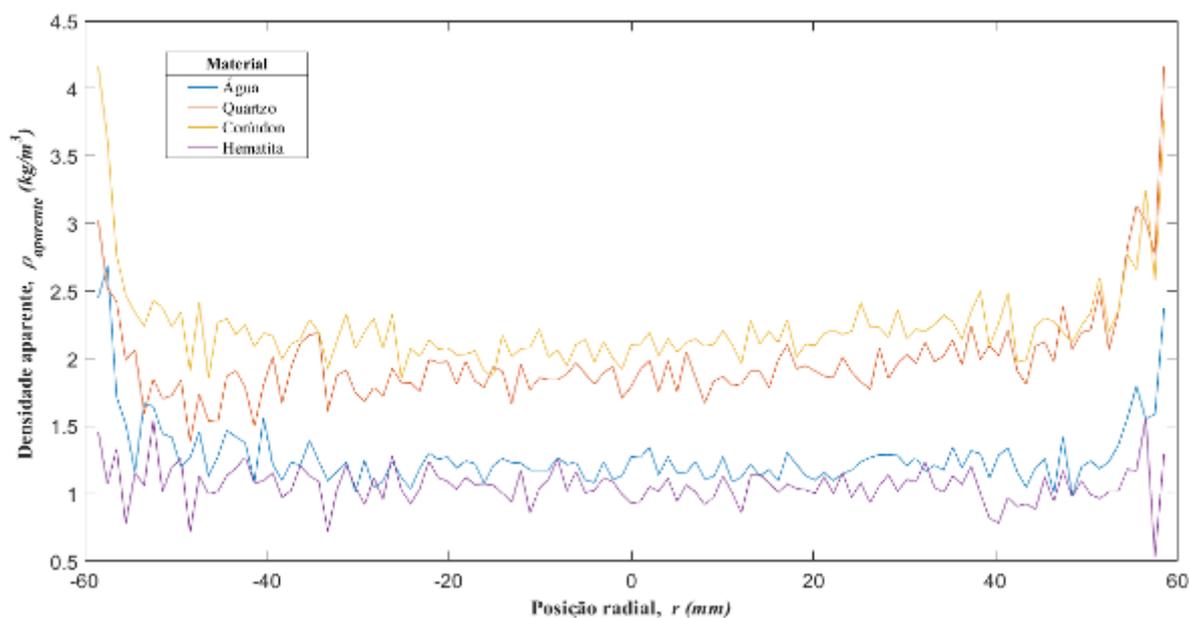
Tabela 20: Densidade aparente dos materiais utilizando os métodos da balança e Tomografia

Material	Formula, c	Massa, (g)	Gama	
			Densidade, $\rho_c$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
			Método balança	Método TG
Água	H <sub>2</sub> O	9,5031	1,0650±0,1065	1,2296±0,0850
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,7574	1,2055±0,1206	1,0840±0,1141
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	16,8115	1,8840±0,1884	1,9619±0,1273
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,9439	2,0109±0,2011	2,1967±0,1252

Fonte: O Autor

Os valores da densidade aparente dos quatro materiais nos tubo de ensaios considerados para o planejamento da tomografia gama (Seção 3.1.4) estão apresentados na Tabela 20. E na Figura 95 estão representados os perfis de densidade aparente empregando o modelo matemático definido pela Equação 11 da Seção 3.1.4.1.

**Figura 95: Densidade aparente da água, quartzo, coríndon e hematita numa seção transversal do tubo de ensaio.**



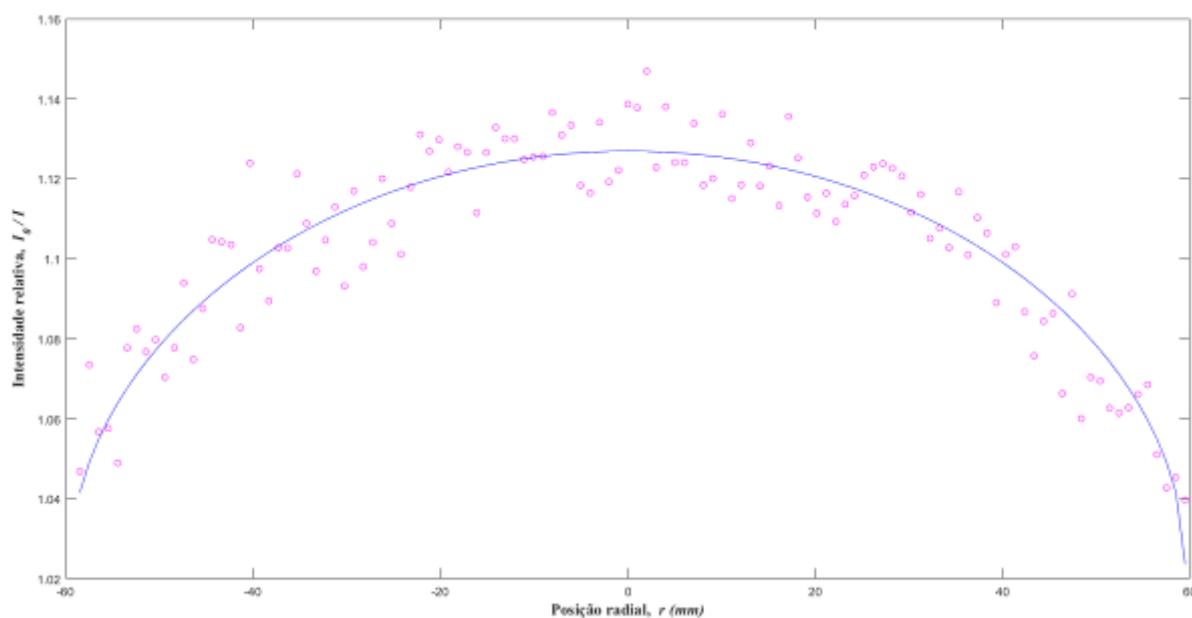
Fonte: Autoria própria

#### 4.3.2 Cálculo do coeficiente de atenuação linear e atenuação

Nesta seção apresenta – se uma comparação entre os resultados teóricos (Seção 3.1.3) utilizando o *software NIST XCOM* o os resultados experimentais do presente trabalho (Seção 3.1.4). Os resultados experimentais estão apresentados nas Figura 96 a Figura 99 na forma de diagramas de dispersão da intensidade relativa em função da posição radial para os materiais: água, quartzo, coríndon e hematita.

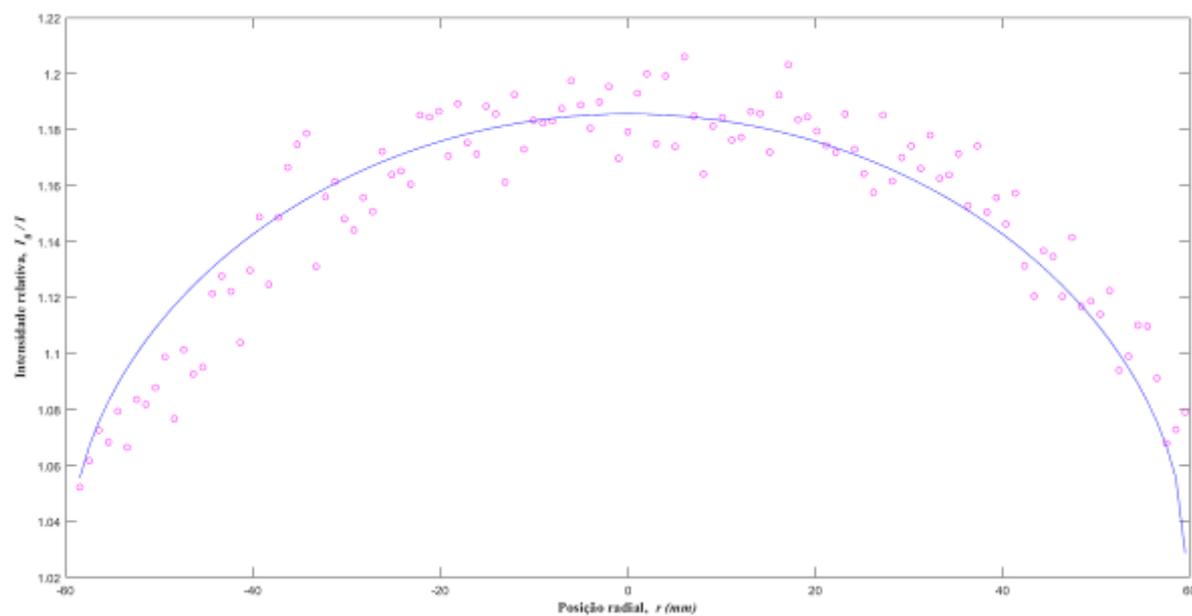
Nas Figura 96 a Figura 99, encontram – se os resultados experimental e o desenvolvido no presente trabalho definido pela Equação 10. Os resultados obtidos no presente trabalho com o modelo matemático proposto na Seção 3.1.4.1 se ajustam satisfatoriamente ao resultados experimentais da intensidade relativa da água, quartzo, coríndon e hematita, respectivamente.

**Figura 96: Intensidade relativa da água**



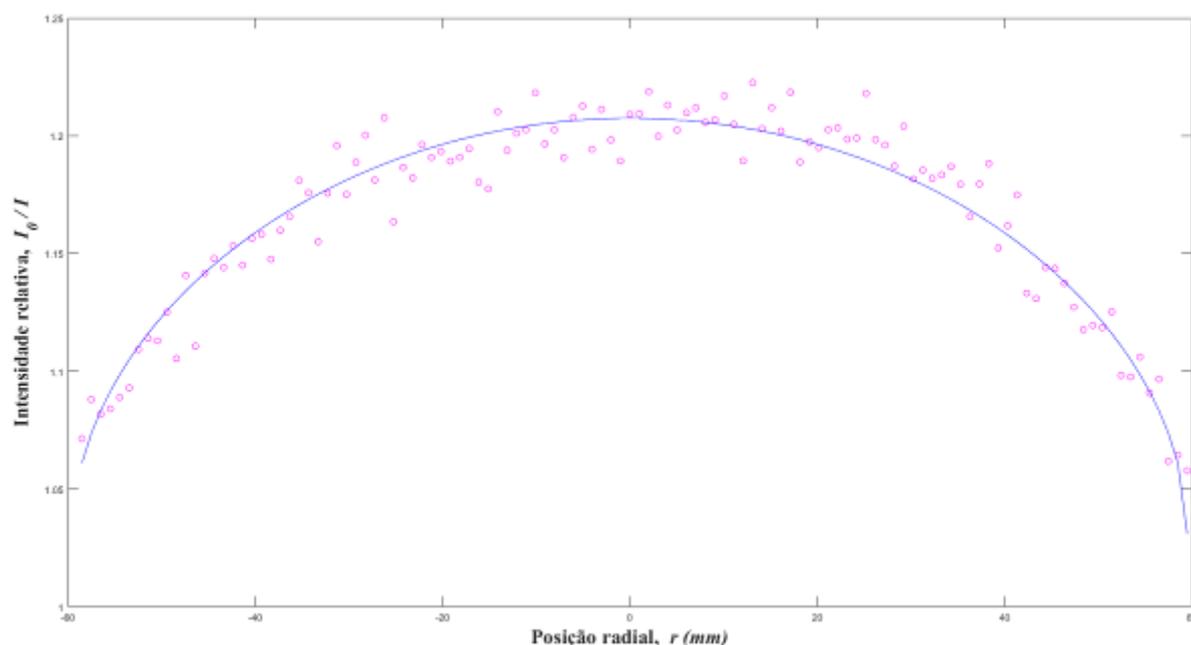
Fonte: Autoria própria

**Figura 97: Intensidade relativa do quartzo**



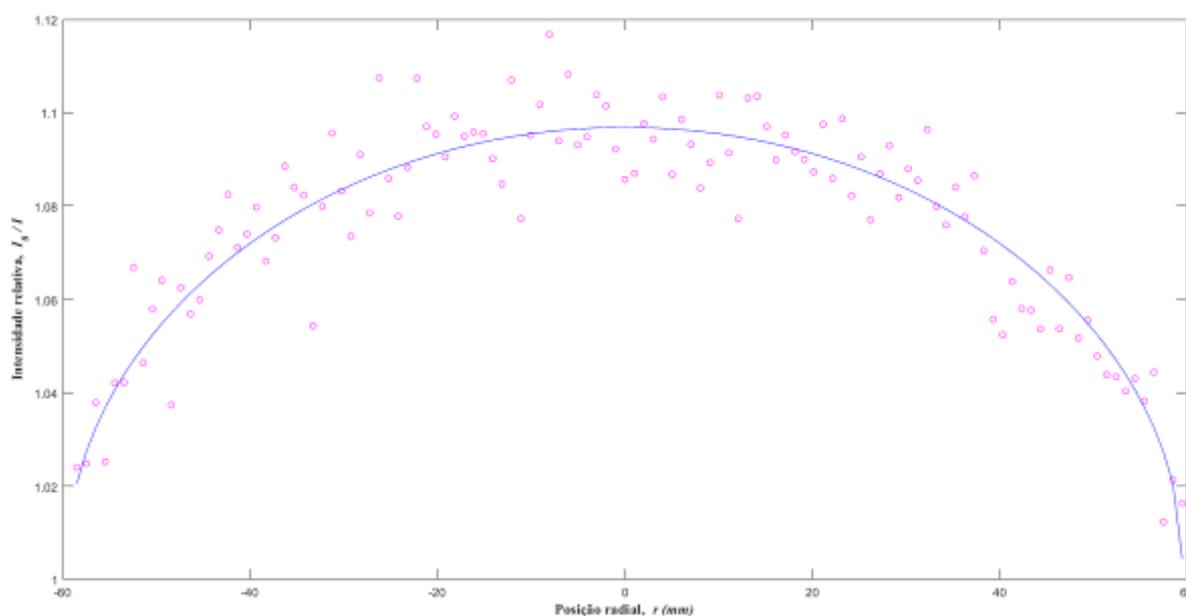
Fonte: Autoria própria

**Figura 98: Intensidade relativa do coríndon.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 99: Intensidade relativa da hematita**



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 21 são apresentados os valores teóricos dos coeficientes de atenuação linear e atenuação dos materiais utilizados no presente trabalho, estes valores foram calculados pela Equação 3 (Seção 3.1.1) com os valores da densidade aparente, obtidos pelo método da balança (Seção VV na Tabela 5). E os valores experimentais dos coeficientes de atenuação linear para os materiais (Tabela 21) são obtidos pelo o ajuste pelo método mínimos quadrados

(Seção 3.1.4.3) do modelo matemático proposto, definido pela Equação 10 da Seção 3.1.4.1 e os dados experimentais utilizando a técnica de tomografia gama (Seção 3.1.4.1).

**Tabela 21: Valores teórico e experimental do coeficiente de atenuação linear e atenuação.**

Material	Formula, c	Coeficiente de Atenuação linear, $\mu$ ( $cm^{-1}$ )		Atenuação, $ln(I_0/I) = \mu x$	
		<i>XCOM</i>	TG	<i>XCOM</i>	TG
		Água	H <sub>2</sub> O	0.0913±0.0002	0.0832±0.0002
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0899±0.0002	0.0718±0.0002	0.1043±0.0002	0.0833±0.0002
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	0.1456±0.0002	0.1243±0.0002	0.1689±0.0004	0.1442±0.0004
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1526±0.0002	0.1369±0.0002	0.1770±0.0004	0.1588±0.0004

Fonte: O Autor

#### 4.4 Atenuação de Hounsfield da composição da fase sólida mineral

Nas Tabelas Tabela 22 a Tabela 24 estão os valores desejados (*set – point*) da corrente elétrica necessária para verificar a relação entre as variáveis tensão, quantidade de fótons do feixe de Raios – X e números de pixel (detector) utilizados. Estes valores foram obtidos ajustando o valor da intensidade da corrente elétrica até observar, que no histograma do nível de cinza das imagens do presente trabalho, tem um valor máximo aproximadamente na escala de tons de cinza (*Gray Level Max.*) de 50000, correspondendo aproximadamente a 80% do total de 65536 níveis de cinza, este procedimento é um pré-requisito de escaneamento.

**Tabela 22: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de alumínio.**

Filtração adicional do tubo, $e_f$ (mm Al).	Tensões, $U$ (kV),					
	100	125	150	175	200	225
0,10	172	153	162	202	150	59
0,25	185	146	159	180	134	85
0,50	196	153	151	147	126	62
1,00	214	149	151	134	73	59
1,50	–	–	630	566	425	247
2,00	–	–	219	676	535	310
2,50	–	–	–	903	558	85

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 23: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de cobre.**

Filtração adicional do tubo, $e_f$ (mm Cu).	Tensões, U (kV),					
	100	125	150	175	200	225
0,10	299	194	162	200	169	90
0,25	444	265	213	235	216	123
0,50	729	389	325	308	240	156
1,00	–	652	472	426	374	215
1,50	–	–	688	649	536	330
2,00	–	–	–	740	587	368
2,50	–	–	–	–	728	484

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 24: Corrente elétrica ( $\mu A$ ) em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X e da espessura do filtro de estanho.**

Filtração adicional do tubo, $e_f$ (mm Sn),	Tensões, U (kV),					
	100	125	150	175	200	225
0,10	379	273	267	269	181	101
0,25	–	472	452	427	321	141
0,50	–	–	727	668	491	329
1,00	–	–	–	–	–	568

Fonte: Autoria própria.

Nota – se nas Tabelas Tabela 22 a Tabela 24, que alguns valores de intensidade da corrente elétrica não foram possíveis de serem determinadas, devido a não satisfazer o pré-requisito de escaneamento. Observa – se que para o filtro de alumínio as maiores correntes foram encontradas para a tensão de 175 kV. No filtro de cobre para as tensões a partir de 0,5mm da espessura do filtro, conferindo a essa condição de escaneamento um caráter satisfatório, devido ao maior rendimento, devido às altas correntes. Para o filtro de estanho, as maiores correntes foram encontradas a partir da espessura de 0,25 mm do mesmo, mas também foi observado que de uma forma geral, esse filtro teve valores de correntes elevadas, o que conferiu a esse filtro um bom rendimento, para discriminar os materiais (Malheiros et al, 2016)

4.4.1 Influência da tensão aplicada no tubo de Raios – X na determinação da atenuação de Hounsfield.

A aplicação da metodologia forneceu informações exclusivas e de importância geológica sobre os óxidos do solo, principalmente sobre o comportamento dos mesmos quando se refere a atenuação de Hounsfield (HU) após a filtração adicional. A diferenciação

entre os óxidos metálicos de pequenas diferenças em composição (proporção do material), requereram um maior refino da análise da imagem, por isso os parâmetros corrente e potência aplicadas ao tubo também foram inseridos, a fim de demonstrar suas contribuições na modificação de cada material em função da tensão.

Os Raios – X policromáticos foram filtrados para modificar os espectros, proporcionando percepções baseadas na atenuação (HU). Nesta experiência, a imagem de Raios-X foi conduzida sob 74 configurações de feixe, consistindo em espectros de Raios – X em seis níveis de energia (tensões de 100kV, 125kV, 150kV, 175kV, 200kV e 225kV), a influência dos materiais filtrantes nos espectros de Raios – X foi detectada por filtros no fantom do solo, com a finalidade de avaliar a radiodensidade dos óxidos que fazem parte de sua composição. Um tubo com água foi inserido durante a varredura como referência para a conversão de valores de TC para unidades de Hounsfield. Antes da análise da imagem, os componentes do fantom foram isolados em imagens de CT (aplicada somente na região sólida) pela análise de histograma (obtida da região sólida e da área de ar e água). A máscara foi usada para excluir as áreas de não interesse, usando, com base no valor de thresholding visualmente encontrado para separar a região sólida, como resultado, apenas a região sólida de interesse permaneceu. Da mesma forma, a máscara foi utilizada na área de ar e água, selecionando a área de água e ar no tubo inserido para varredura, esse processo foi realizado no software MatLab.

Para as análises radiométricas das imagens de Raios – X 3D e para comparar o desempenho do feixe de Raios – X em várias configurações diferentes, a análise do histograma foi utilizada para detectar e comparar a variabilidade radiométrica de diferentes espectros de Raios – X. Os histogramas foram gerados e tratados através MatLab (MATLAB), para comparar a influência de diferentes níveis de energia, filtração e os valores de HU.

A filtração teve um papel de suma importância no resultado final, porque a partir da análise da mesma, observou-se as melhores configurações para cada mineral do fantom do solo. O princípio básico seguido foi que quando um feixe policromático ou polienergético, passou pelo material atenuador (filtração inerente – filtração adicional), o mesmo foi ficando ‘empobrecido’ de radiações de baixa energia, e em contra partida, o mesmo tornou-se mais energético (mais ‘difícil’ de ser atenuado), até passar pelo fantom (Wildenschild et al., 2013) e atingir o detector (malha de detectores), como o feixe tornou-se mais penetrante, foram esperado resultados com menores valores calculados para unidade Hounsfield (Barbosa, 2012)

Como os valores da unidade Hounsfield são representativos da imagem, ou seja, demonstram a variação da radiodensidade do objeto de interesse em função da sua composição. As (HU) foram medidas nas regiões da amostra (delimitada pelo sub-volume de reconstrução) diretamente das imagens geradas, e armazenadas com o auxílio do programa de domínio público *imageJ* e/ou pelo software MATLAB. Esse tratamento com TC de Raios – X utiliza informações da imagem a partir das fatias, porque cada uma das fatias representa uma determinada espessura do objeto digitalizado, e, assim, uma imagem da fatia CT é composta de elementos de volume (voxels). Como a atenuação de Raios – X é primariamente uma função da energia de Raios – X, da densidade e do número atômico do material que está sendo trabalhada, a imagem CT é criada após as passagens dos Raios – X através do objeto de múltiplas orientações é medida à sua diminuição resultante em intensidade. Após a reconstrução foi obtida a atenuação de Raios – X de uma série de planos de corte. É importante frisar que a partir da série das imagens é que foram descritos os dados do volume inteiro da imagem.

Após o levantamento dos valores das potências aplicadas ao tubo de Raios – X em função das tensões e das filtrações adicionais, ficou evidenciada a importância desses parâmetros para análise dos minerais em proporções de composição muito próximas, pois esses parâmetros combinados definem a qualidade da imagem. Ou seja, a combinação correta, desses fatores definiu o grau de satisfação da imagem gerada (De Paula et al., 2015). Porque a intensidade da energia do sistema é frequentemente citada como uma função da potência máxima. A potência (voltagem versus corrente), regula o volume e o tipo de materiais que podem ser penetrados de forma adequada pelo feixe. No entanto, esse ajuste pode fornecer algumas imprecisões, porque é bastante dependente do operador, o mesmo ajusta a tensão (em kV) e a corrente em (mA), para produzir a potência desejada (Baveye et al., 2010).

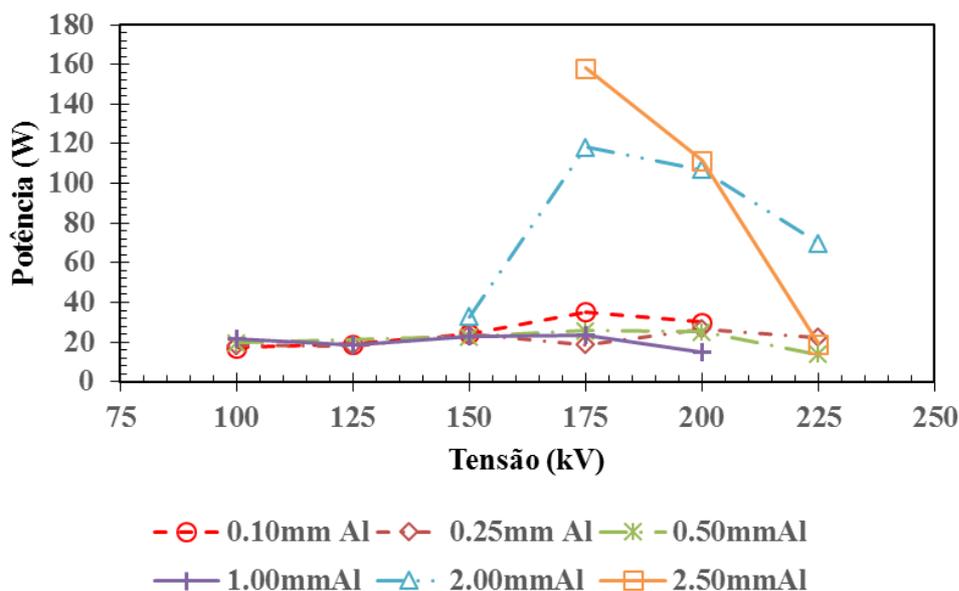
Foi observado que a tensão do tubo de Raios – X, é um parâmetro particularmente importante para a medida por três razões: (1) à medida que o kV é aumentado, os elétrons emitidos do filamento são acelerados até uma velocidade maior antes de alcançar o anodo produzindo, dessa forma, Raios X mais energéticos. Em energias mais altas, o feixe Raios – X é capaz de penetrar em diferentes tipos de materiais, afetando a escala de HU, (2) a variação na tensão gera um efeito na densidade da imagem muito maior que uma variação igual das grandezas corrente (mA), e tempo, (3) As operações com potências inferiores (redução da tensão ou corrente), podem até permitir um feixe mais localizado, e imagem mais nítida, mas vão proporcionar mais ruído devido à menor intensidade.

As configurações para obter as imagens são particulares e definidas em cada estudo, e são regidas principalmente pelo tamanho e composição da amostra, bem como os objetivos da imagem (Hanna et al., 2017). Para fins práticos, a intensidade de corrente (mA) pode ser relacionada ao nível preto e a diferença de potencial (kV), ao nível branco. Por esta razão, quando há maior ou menor opacidade da imagem radiológica em análise, ajustes de kV e mA permitem melhorias da nitidez.

#### 4.4.1.1 Análise da espessura do filtro adicional de alumínio

A Figura 100 ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, para diferentes espessuras do filtro adicional de alumínio iguais a 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 2,50mm.

**Figura 100: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de raios – X, com filtro adicional de alumínio de espessuras 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 2,50mm.**

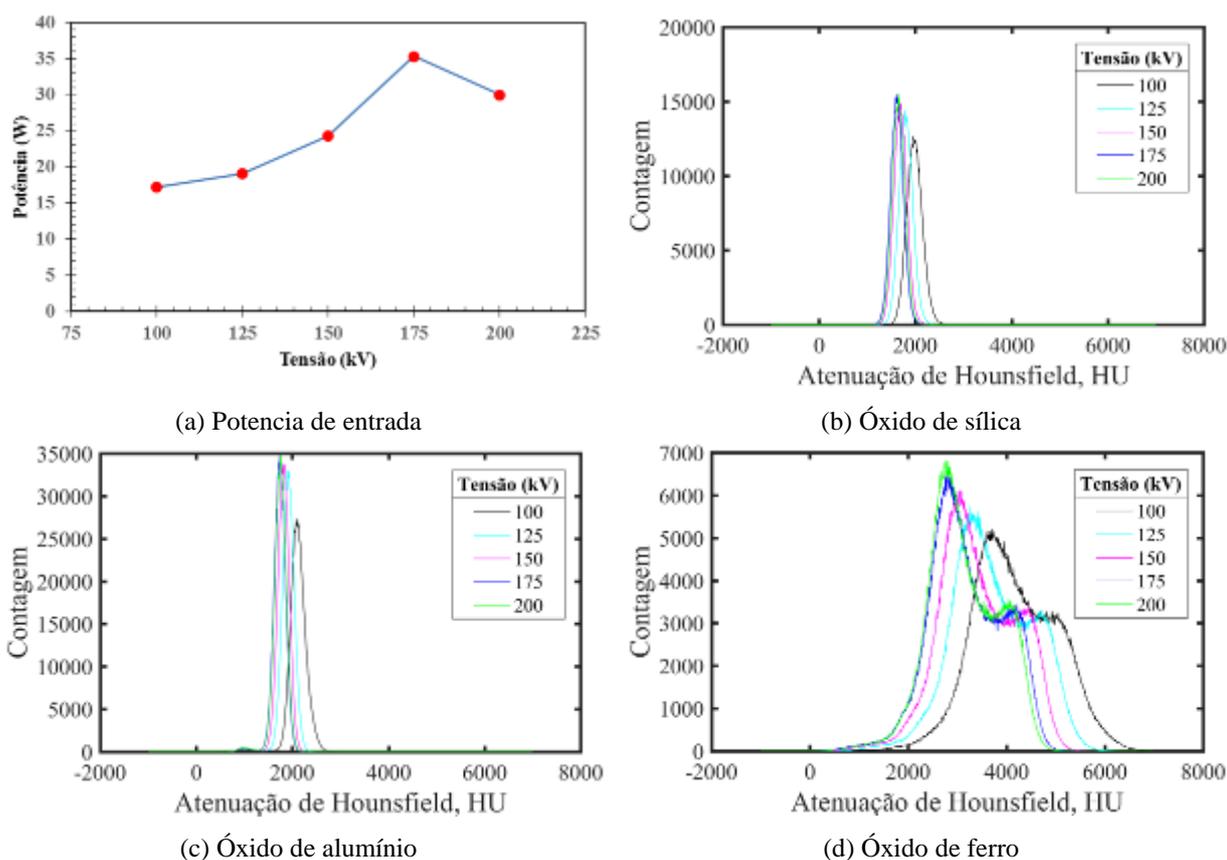


Fonte: Autoria própria.

Infer-se da Figura 100, que os valores das potências são maiores a partir do filtro de 0,5mm de alumínio, conferindo a essas configurações um feixe com maior rendimento, o que influenciou na caracterização dos materiais.

Como já mencionado, os feixes de Raios – X foram filtrados com várias configurações, nas Figura 101 e Figura 103, foi utilizado à filtração de 0,1mm e 0,25mm de alumínio, mostrou não ser uma configuração eficiente para determinação dos óxidos de sílica e de alumínio, essa resposta em função da atenuação está relacionada, a baixos valores de tensão aplicadas ao tubo. Já para o óxido de ferro na Figura 101(d), para as tensões de 100kV a 150kV que apresentam elevados valores de corrente, diferencia-se o material, como mostrado nos valores de contagem.

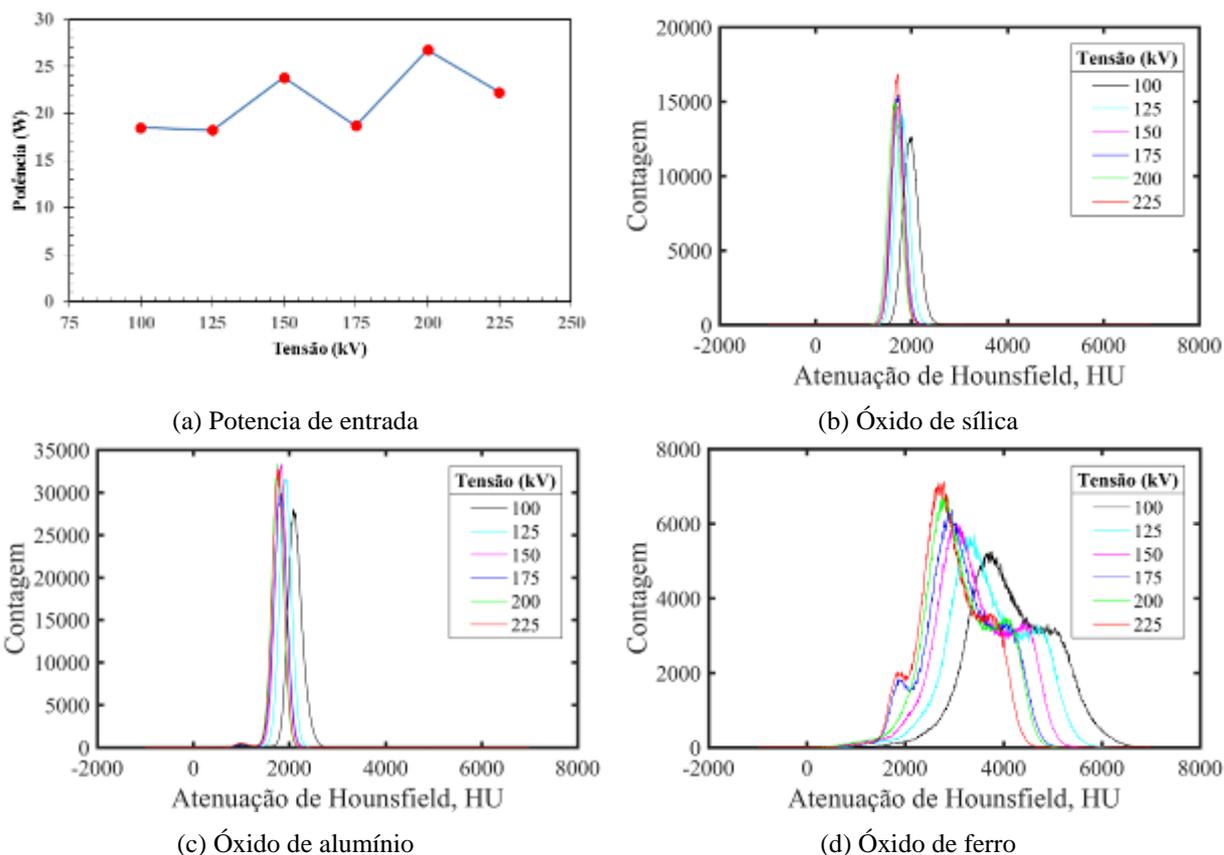
**Figura 101: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175 e 200kV.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 102 (d) foi observado um aumento do valor da contagem, para as energias de 100kV e 175kV devido à associação com maiores valores de corrente pode-se visualizar o histograma dos materiais de forma bastante diferenciada.

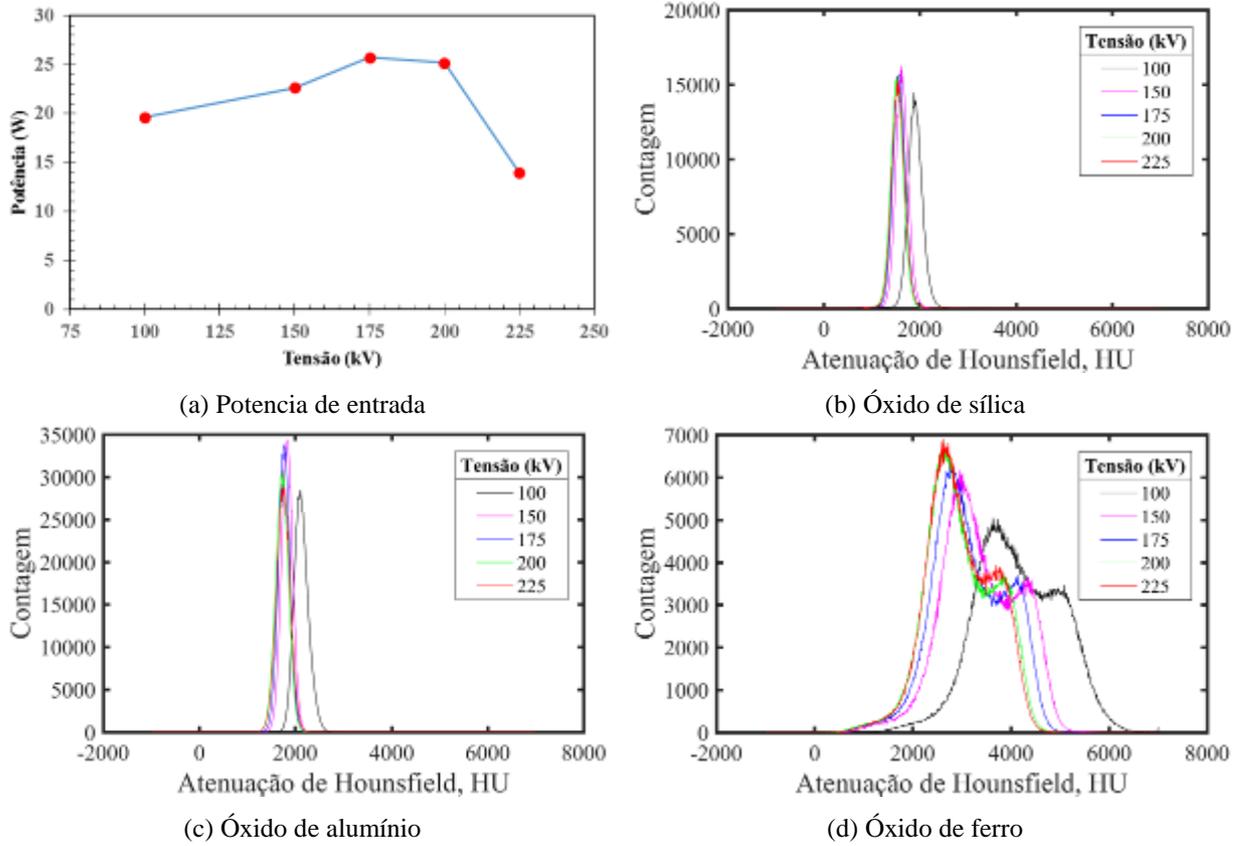
**Figura 102: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

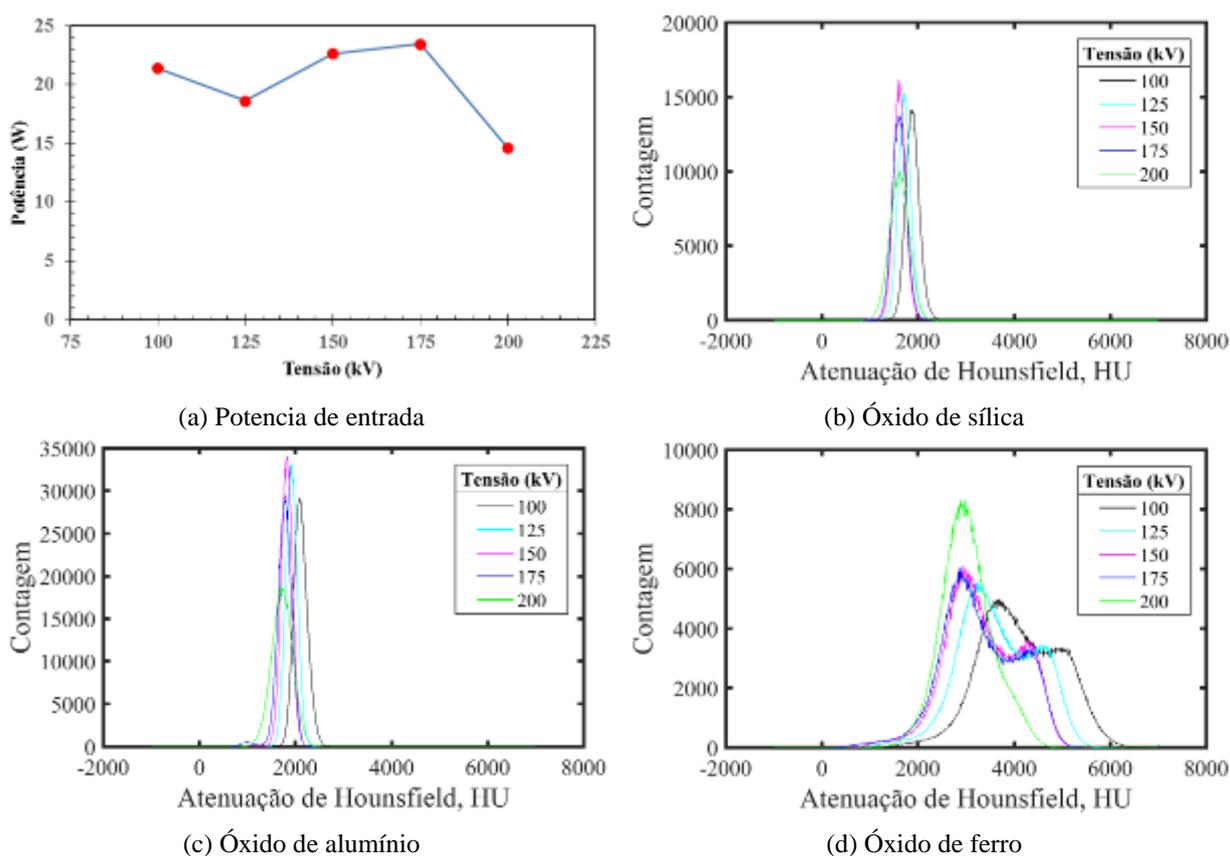
Na Figura 103(a) as maiores potências estão relacionadas às tensões de 175kV e 200 kV; espera – se uma ao diferenciação dos materiais para essas tensões, devido à associação com valores elevados de corrente, a ressalva fica por conta da tensão de 100kV, que teve o pico deslocado devido à associação ao maior valor de tensão nesse bloco de informações, para todos os materiais. Nas Figuras 103(b) e 103(c) as amplitudes dos picos (contagem) ficam aproximadas para os óxidos de sílica e óxidos de alumínio, demonstrando a necessidade de maior filtração para avaliar os materiais. Na Figura 103(d) foi observado que para as tensões de 100 até 175kV o óxido de ferro pode ser caracterizado, pelo filtro de 0.5mm de alumínio.

**Figura 103: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 0,50mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 150, 175, 200 e 225kV.**



Na Figura Figura 104(a) as maiores potencias foram encontradas para 100kV, 150kV e 175 kV, mostrando pelos valores de HU que nessas configurações os materiais foram distintamente caracterizados, essas condições também estão associadas a maiores valores de corrente. Figuras Figura 104(a) para o óxido de sílica a melhor tensão foi a de 150kV, Figura Figura 104(c), recomendam-se as tensões de 150kV ou 175kV. Para o oxido de ferro teve o deslocamento dos histogramas para as altas energia nas condições de tensão de 125kV até 175kV, indicando a faixa a ser utilizada nesse material, para a configuração de 1,00mm de filtração de alumínio.

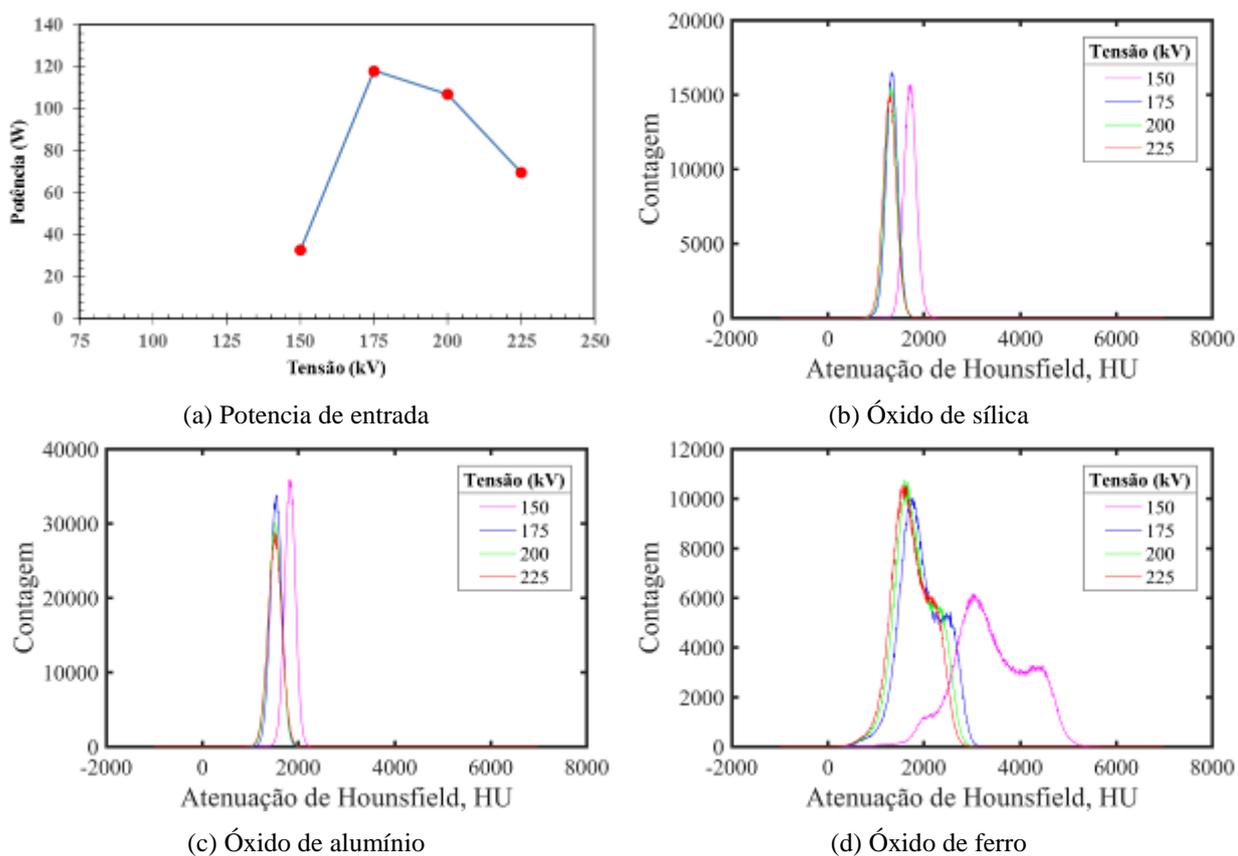
**Figura 104: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 1,00mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175 e 200.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 105(a), a melhor configuração é de 175kV, porque além de ser uma tensão elevada está associada a valor de corrente elevado.

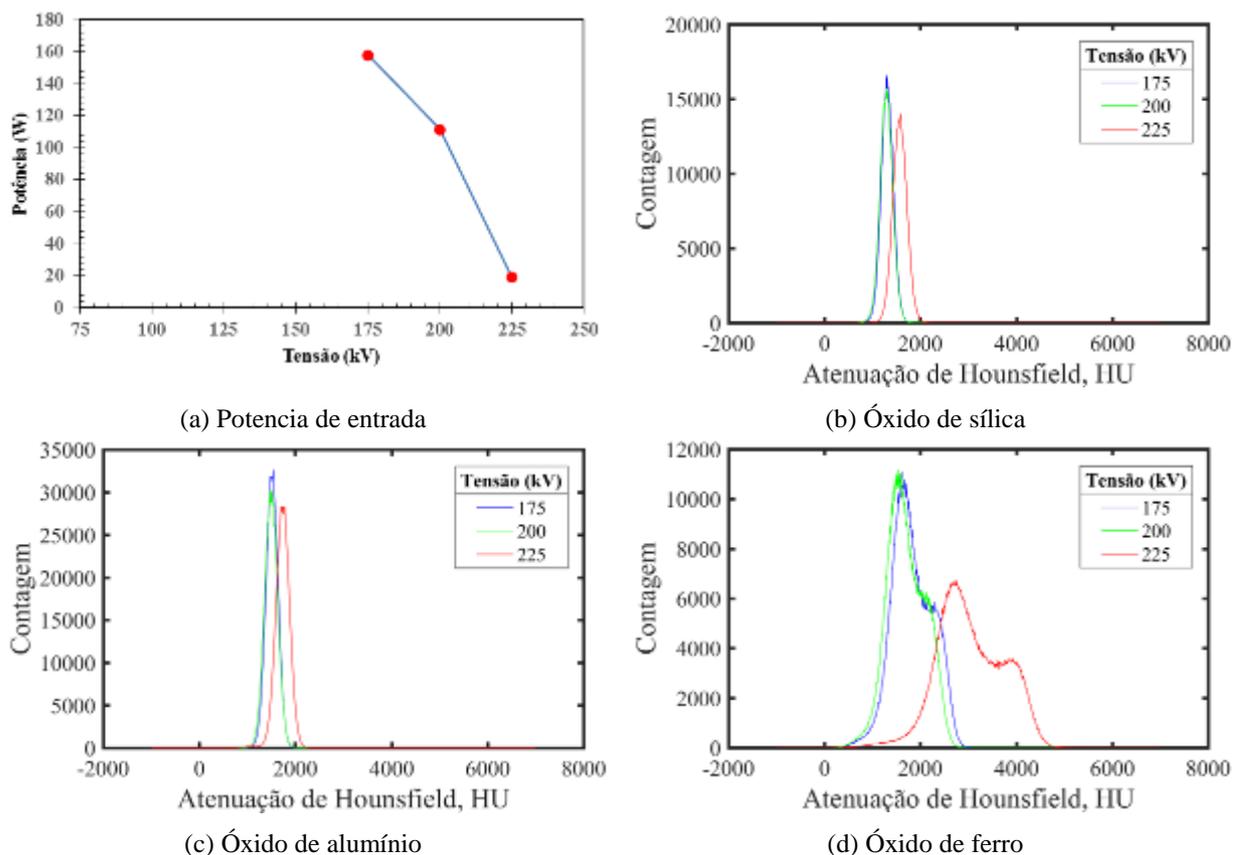
**Figura 105: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 2,00mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 106(a), ficou evidente que a configuração mais adequada, devido à associação tensão/corrente é 175kV, esse comportamento é observado para os materiais em seus histogramas.

**Figura 106: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de alumínio de 2,50mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

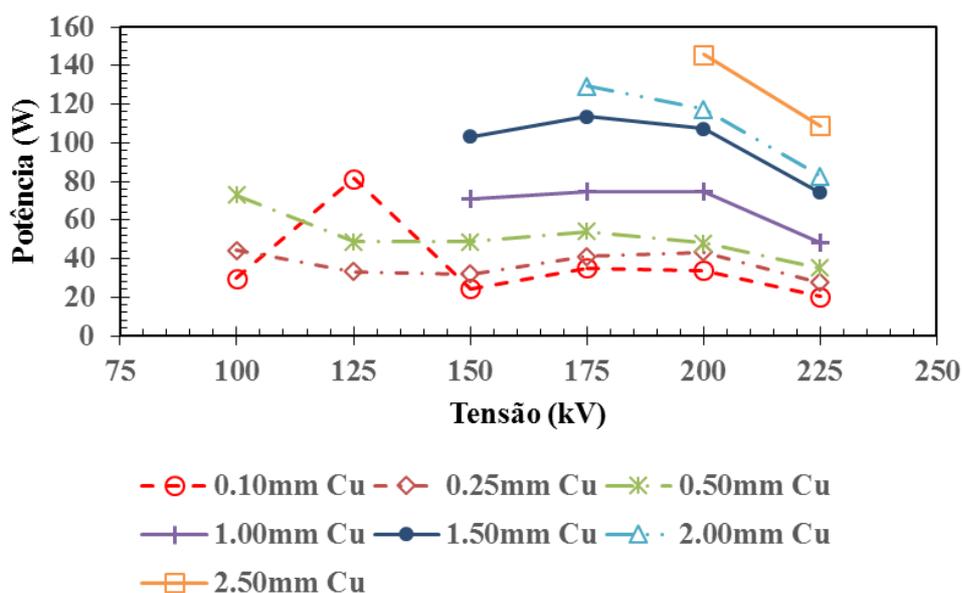
Na avaliação de HU para o filtro de alumínio, ficou evidente que variações radiométricas nos materiais, associadas a moderadas filtrações do feixe de Raios – X, ou seja, filtrações adicionais com filtros de espessura menor, causam variações modestas no feixe e, como consequência, pequenas variações no valor de HU (Monteni, 2013), que não são eficientes na caracterização de minerais do solo. Mas a ressalva é para o óxido de ferro, que já tem um valor de radiodensidade maior, e que por isso apresenta valores mais elevados de HU e de contagem, como é esperado. Nessa análise foi observado também que o grau de adensamento das amostras é diretamente proporcional e valores de (HU). Como o fluxo de fótons é determinado pela tensão aplicada e pela corrente elétrica no tubo, pelo filtro físico,

espessura e composição da região do material, os valores de HU foram melhores nas filtrações intermediárias (0.5mm até 1.00mm) e nas tensões de 150kV e 175kV.

#### 4.4.1.2 Análise da espessura do filtro adicional de cobre

A Figura 107, ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, para diferentes espessuras do filtro adicional de cobre iguais a 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 e 2,50mm. Observa-se que os valores maiores das potências estão associados aos valores mais altos de tensão 150kV até 200kV. De uma forma geral o filtro de cobre é eficiente quando trata-se da representação radiométrica dos materiais

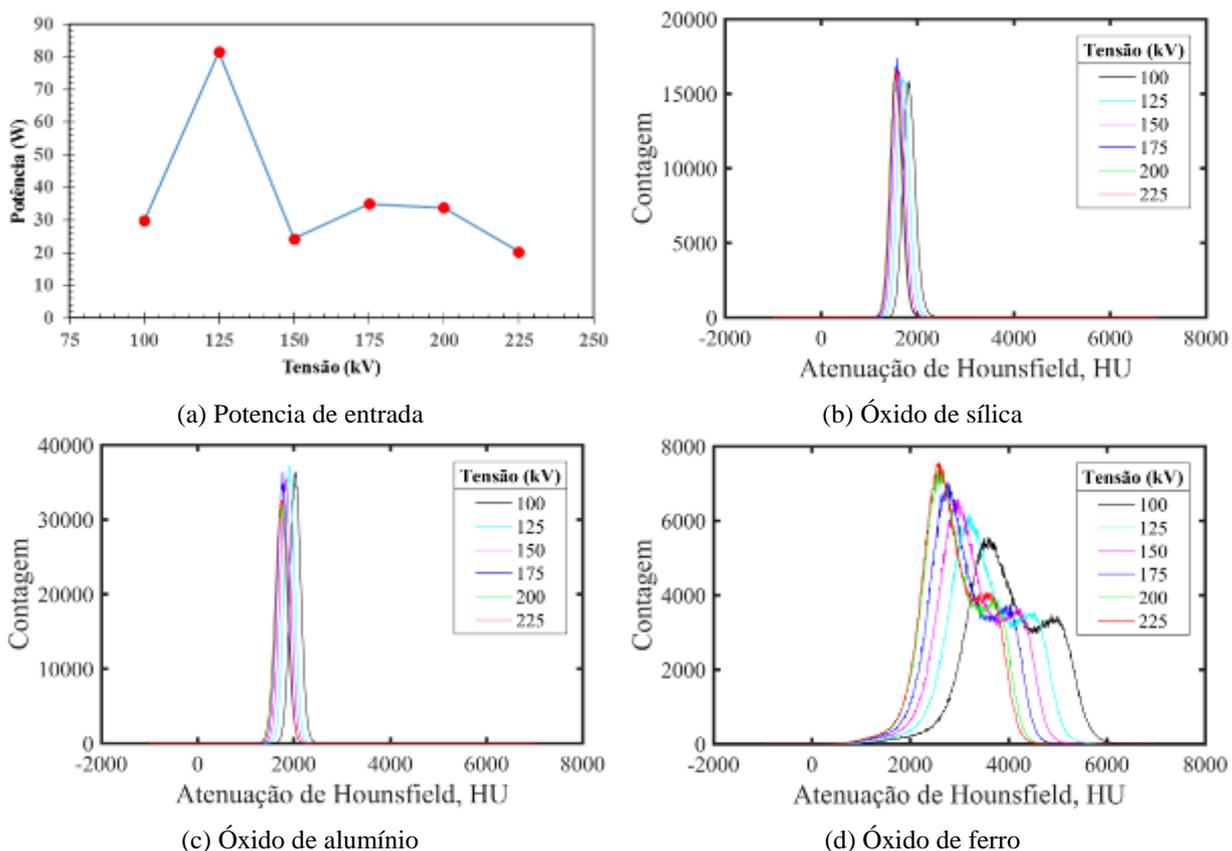
**Figura 107: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, com filtro adicional de cobre de espessuras 0,10; 0,25; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 e 2,50mm.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 108 (a) observa-se que o maior valor da potência está associado ao valor da tensão de 125kV, portanto espera-se que para essa condição tenha-se um maior número de fótons, com maior intensidade, fazendo com que o espectro tenha uma maior amplitude. Na Figura 108(b) e 108(c), que a filtração adicional de 0,1mm de cobre não mostrou boa diferenciação dos histogramas dos materiais quartzo e óxido de alumínio, porque nesse bloco essa condição apresentou os menores valores de corrente aplicada ao tubo. Já para o óxido de ferro (Figura 108(d)), a limitação de caracterização do material fica para a tensão de 225kV, porque apresenta menor corrente.

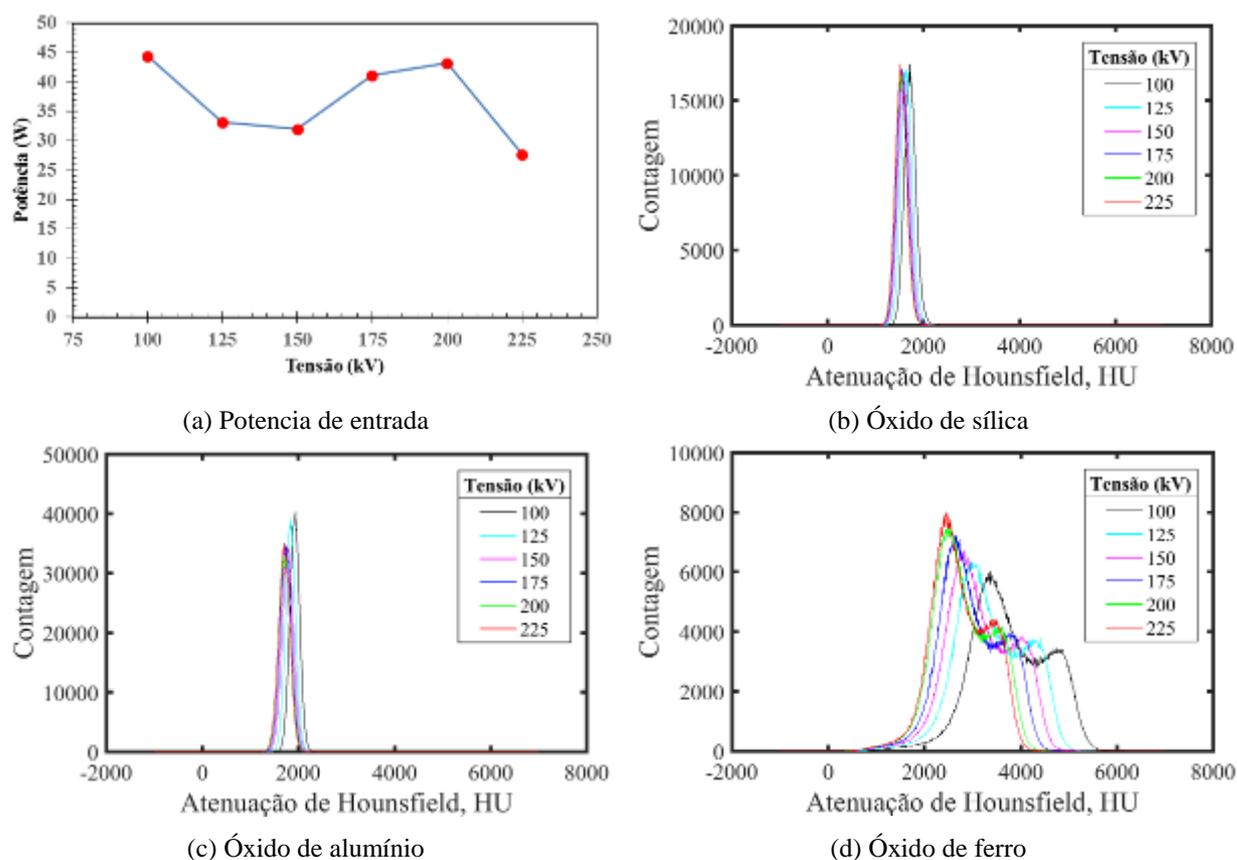
**Figura 108: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 109(a), mostra uma variação muito grande nos valores das potências, o que refletiu diretamente nas amplitudes dos materiais, o óxido de sílica (Figura 109(b)) e de alumínio (Figura 109(c)). A ressalva fica por conta do óxido de ferro nas tensões de 100kV, 125kV e 175kV, que tiveram elevados valores de corrente elétrica. Mas no geral, a configuração de 0,25mm de cobre não foi eficiente para avaliar o material na variação das tensões.

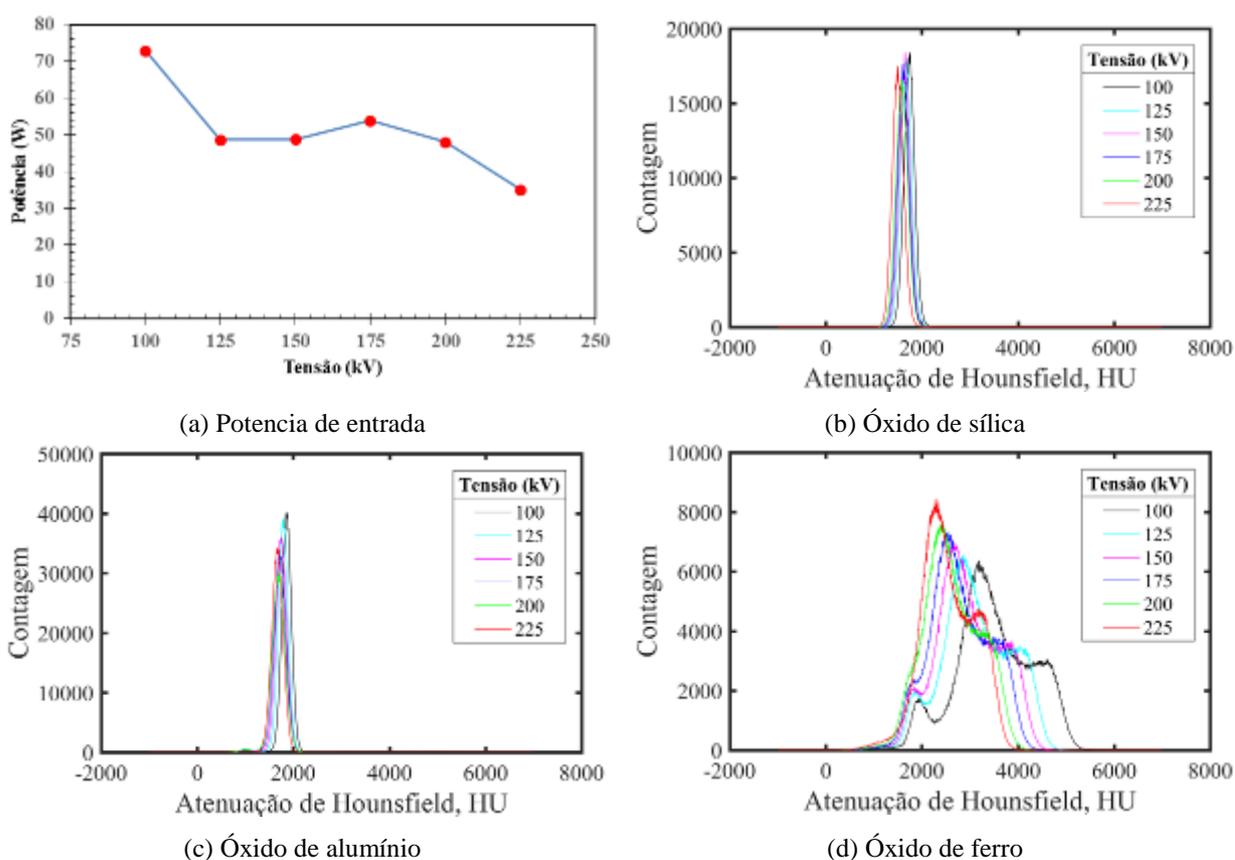
**Figura 109: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

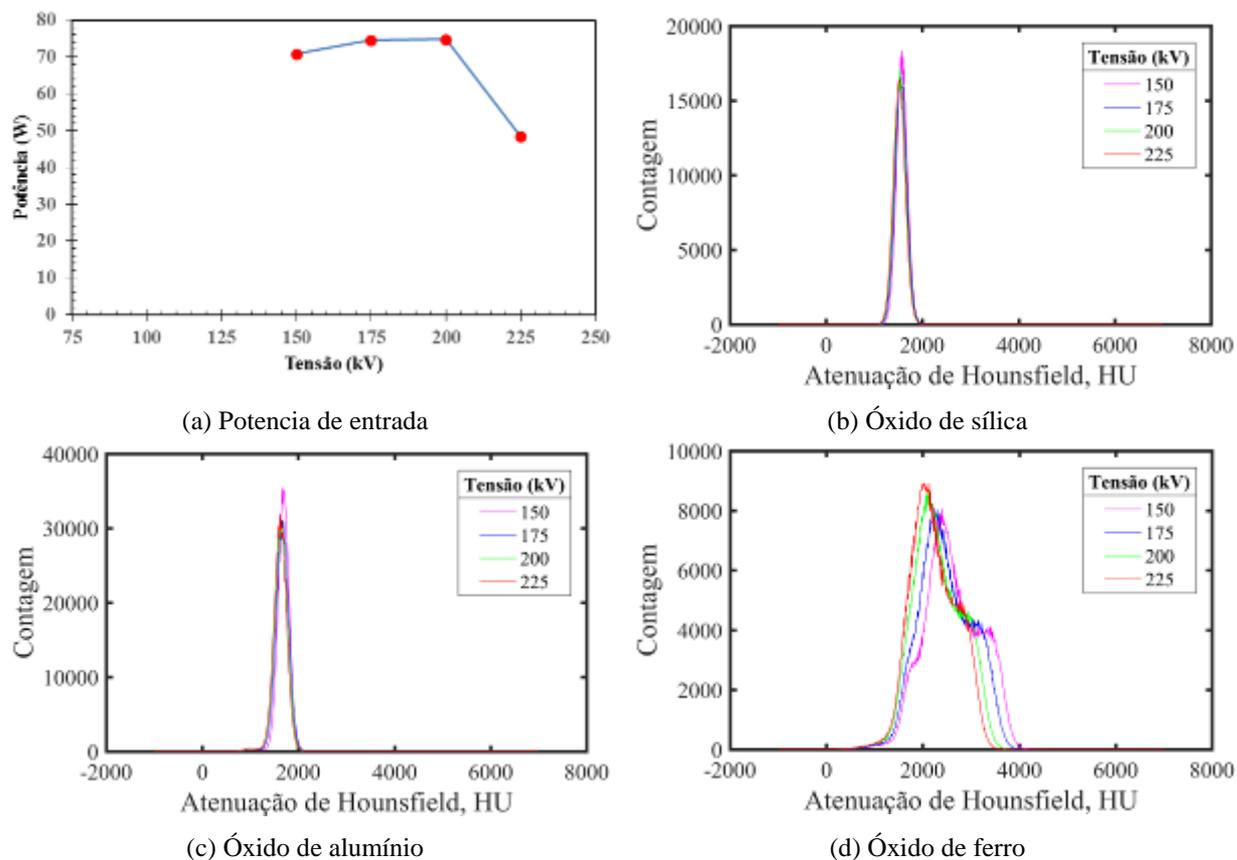
Nas Figuras 110(a), 111(a) e 112(a), mostram elevados valores de potência para as tensões de uma forma geral, a ressalva fica nas configurações de 1mm para tensão de 100kV, 1,5 mm para a tensão de 100kV e 1,5mm para 150kV que apresentaram valores elevados de corrente. A ressalva do filtro de cobre de 0,5mm é para a tensão de 100kV, que apresentou um valor muito elevado de corrente, por isso que seu histograma foi deslocado para o óxido de ferro.

**Figura 110: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 0,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 175, 200 e 225kV.**



Na Figura 111(a), observou-se que a melhor configuração do bloco de histogramas ficou para tensão de 150kV, essa tensão está associada à segunda maior corrente aplicada ao tubo, como evidenciado no deslocamento do histograma dos materiais.

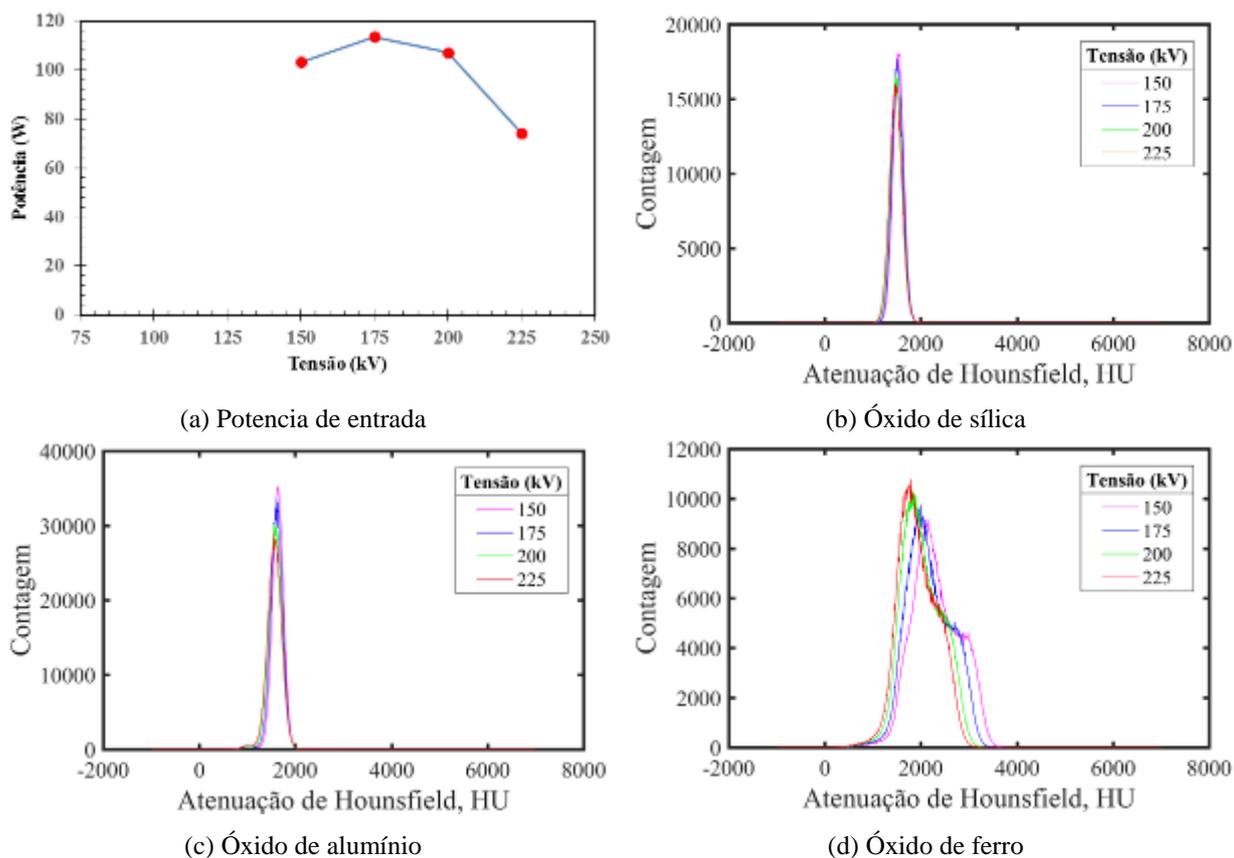
**Figura 111: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 1,0mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

Na figura 112(a), os maiores valores de corrente estão associados às tensões de 125kV, 150kV e 175kV, conferindo a essas configurações, um bom desempenho em função do fluxo de fótons, na atenuação dos materiais.

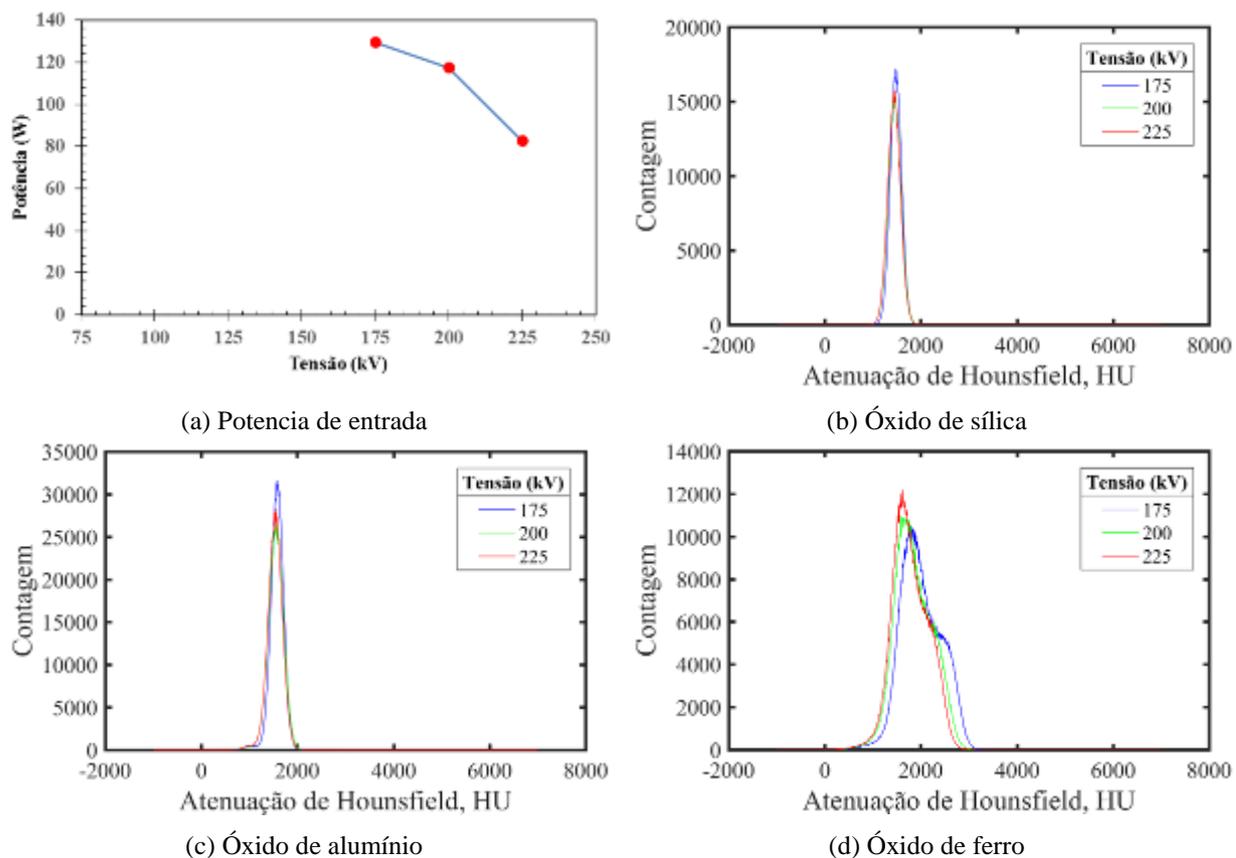
**Figura 112: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 1,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

As Figura 113(a), 113(b), 113(c) e 113(d), mesmo apresentando boas configurações de tensão e filtração, ambos elevados, não se mostrou boa na caracterização dos materiais, indicando um feixe muito energético ou endurecido, para esse tipo de amostra mineral.

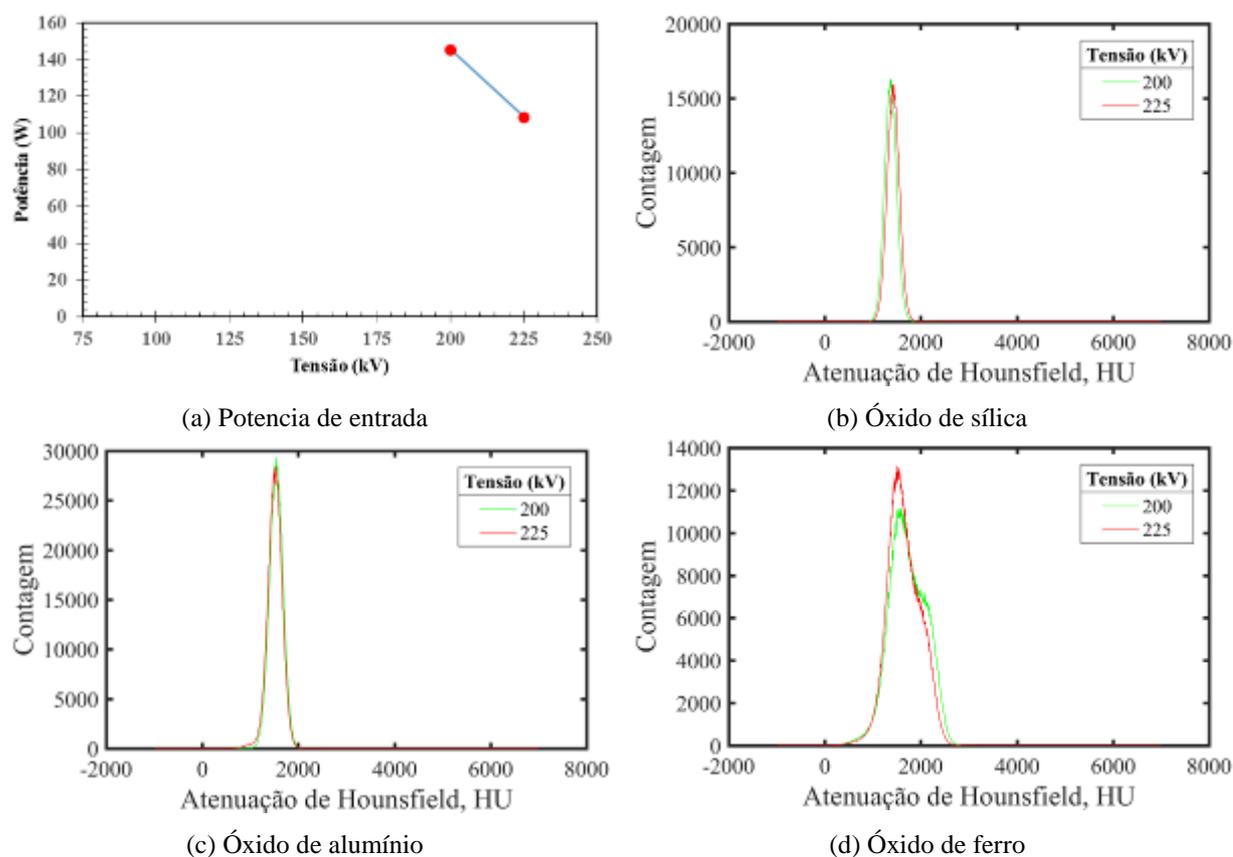
**Figura 113: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 2,0mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 175, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 114(a) a Figura(d), mesmo apresentando boas configurações de tensão e filtração, como observado na Figura 114, não se mostrou boa na caracterização dos materiais, indicando um feixe muito energético ou endurecido, para esse tipo de amostra mineral.

**Figura 114: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de cobre de 2,5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 200 e 225kV.**

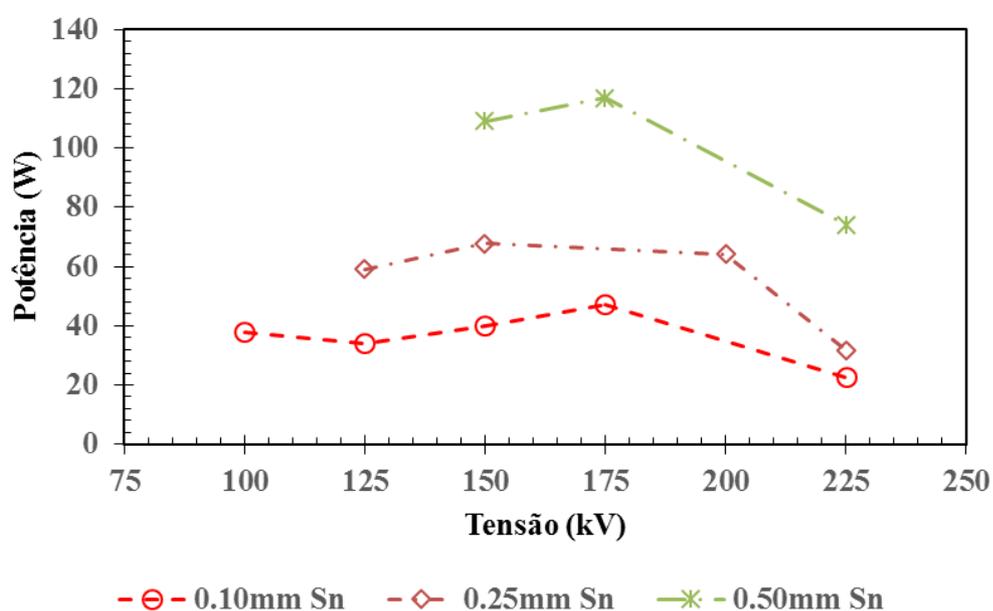


Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.1.3 Análise da espessura do filtro adicional de estanho

A Figura 115, ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, para diferentes espessuras do filtro adicional de estanho iguais a 0,10; 0,25 e 0,50mm, os maiores valores da potência estão associados às tensões de 150kV até 200kV.

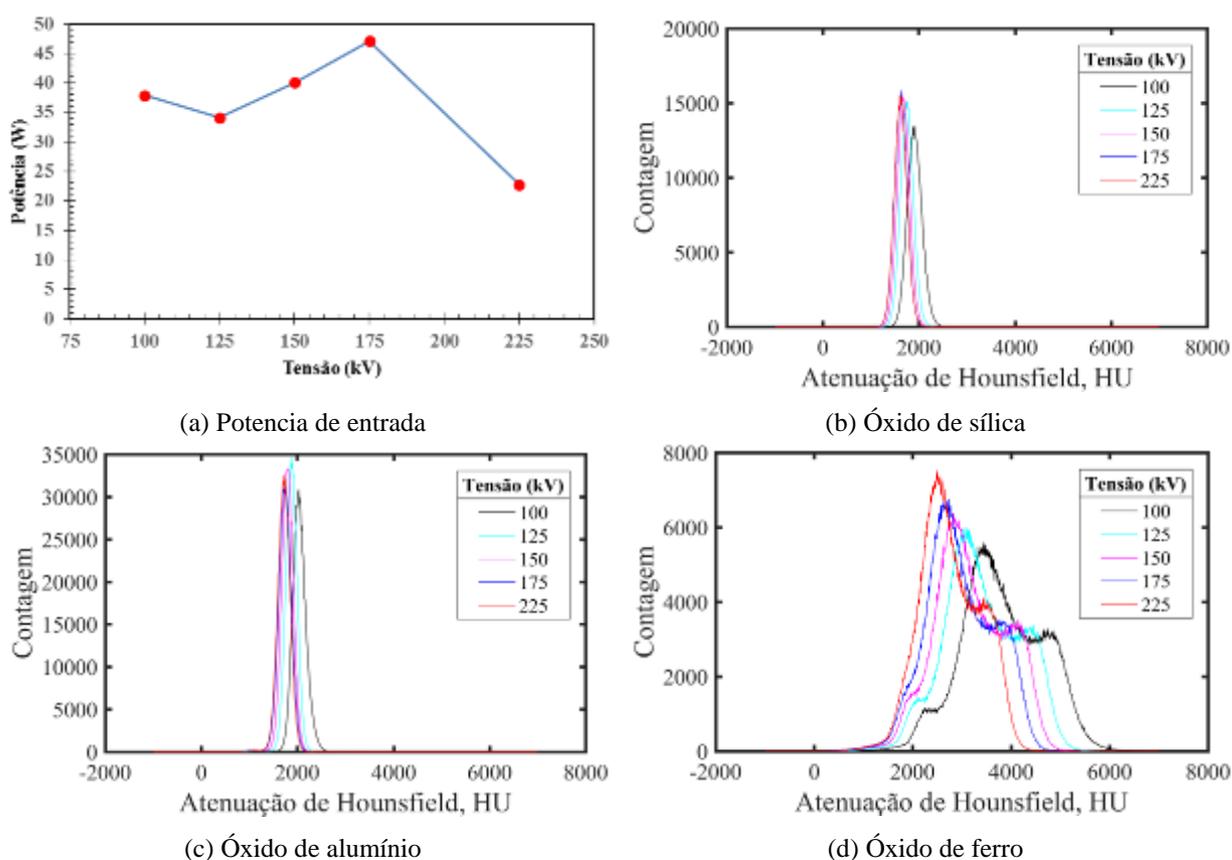
**Figura 115: Potência de entrada em função da tensão aplicada ao tubo de Raios – X, com filtro adicional de estanho de espessuras 0,10; 0,25 e 0,50mm.**



Fonte: Autoria própria.

Infere-se das Figura 116(a) que o valor da tensão de 175 kV, apresentou a melhor configuração tensão/corrente aplicada ao tubo, que ficou evidenciado no deslocamento dos histogramas dos materiais. Uma ressalva para esse bloco de configurações é da tensão de 100kV, que apresentou um valor muito elevado de corrente, por isso o histograma dessa associação corrente/tensão também ficou deslocado

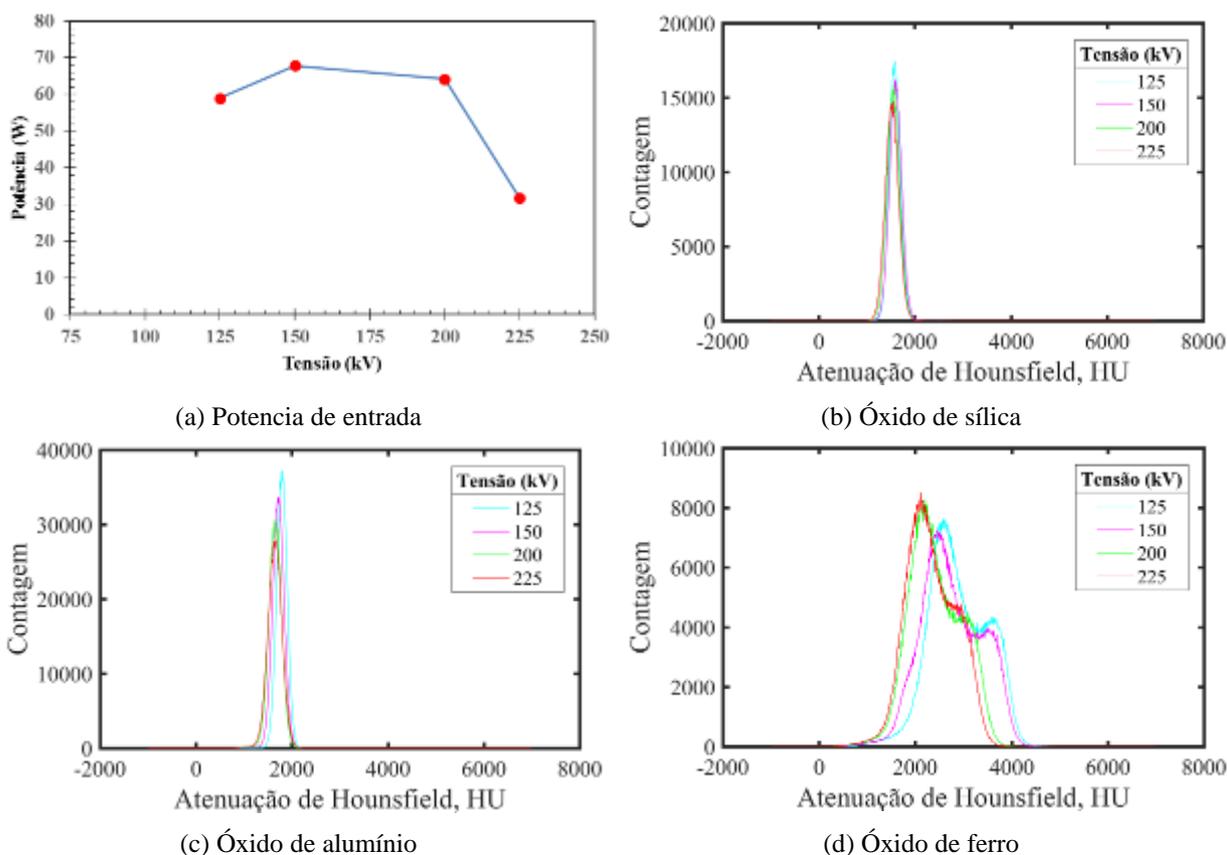
**Figura 116: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0,10mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 100, 125, 150, 175 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 117, teve um comportamento semelhante à configuração da Figura 112, a ressalva da filtração 0,25 mm de estanho, foi para o óxido de ferro nas tensões de 125kV e 200kV, porque obtiveram maiores valores de corrente, por isso a amplitude dos materiais se diferenciaram.

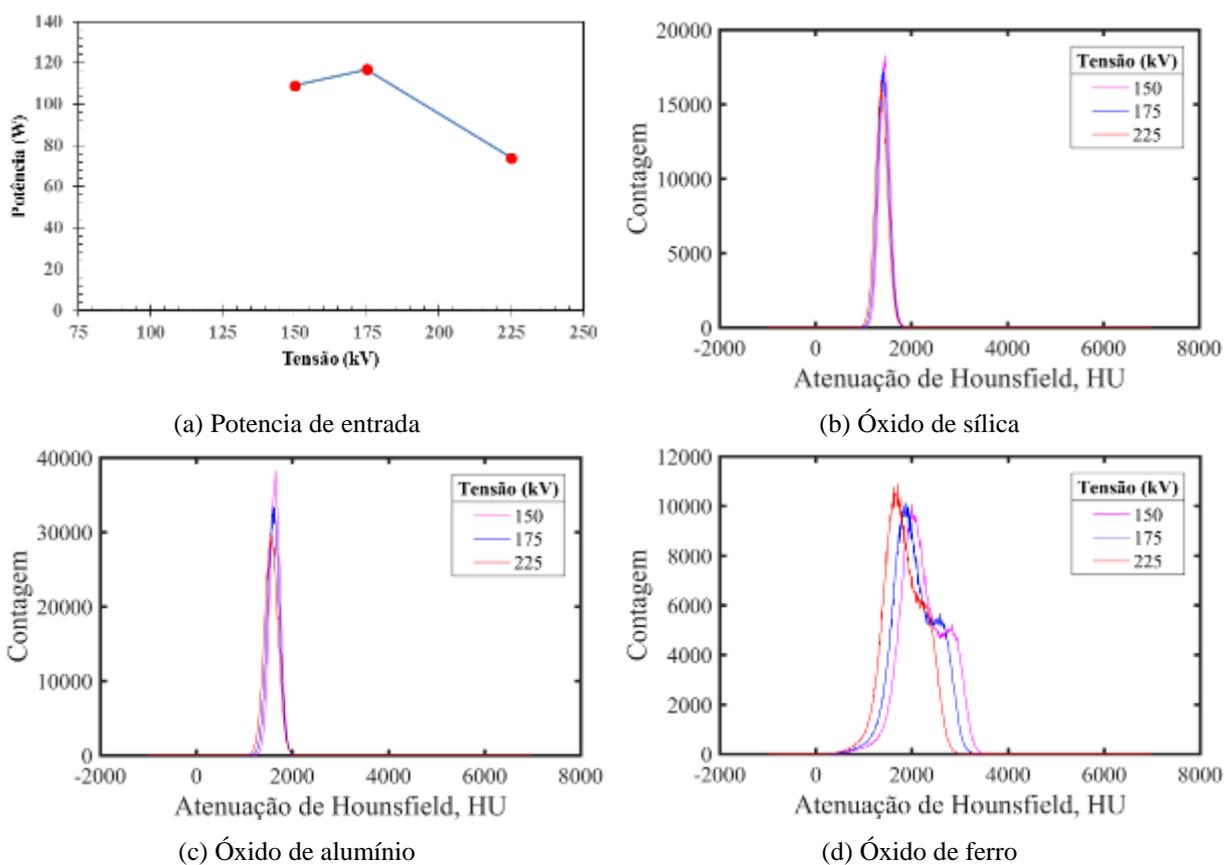
**Figura 117: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0,25mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 125, 150, 200 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 118, as tensões de 150 kV e 175kV, se destacaram para todos os materiais, porque obtiveram valores muito altos de corrente elétrica (quando comparado a todo bloco do filtro de estanho), seus histogramas mostraram estar bastante definidos, permitindo a diferenciação dos materiais nessa condição de filtração/tensão.

**Figura 118: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para o filtro de estanho de 0.5mm e tensões aplicadas ao tubo de Raios – X iguais a 150, 175 e 225kV.**



Fonte: Autoria própria.

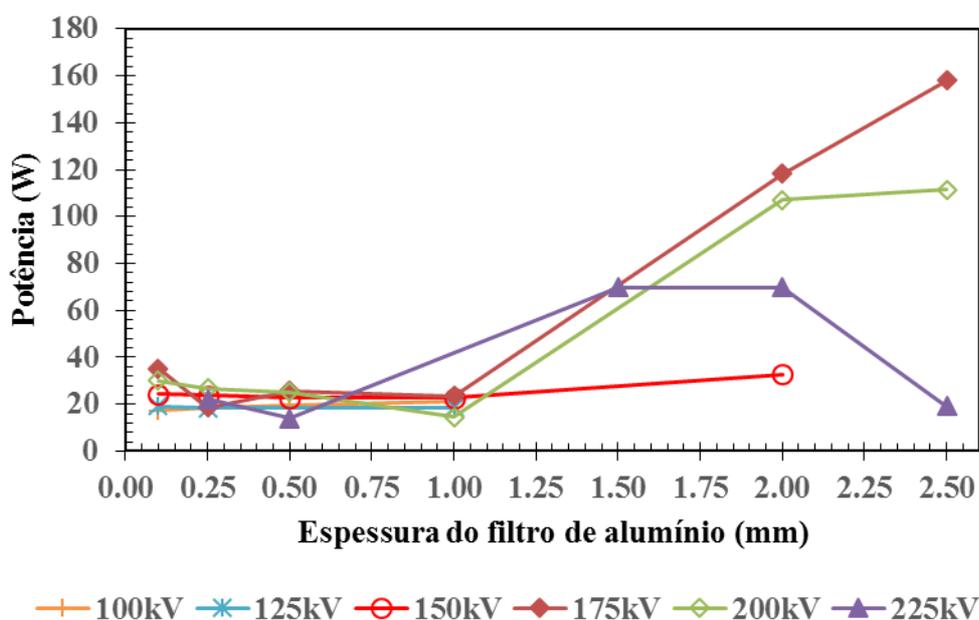
De uma forma geral, o filtro adicional de estanho é um bom atenuador e um bom caracterizador dos materiais, as indicações de espessura de filtro indicada e de 0,25mm do mesmo.

#### 4.4.2 Influência da espessura do filtro de alumínio na determinação da atenuação Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica

##### 4.4.2.1 Análise da tensão aplicada no tubo de Raios – X, com filtro adicional de alumínio.

A Figura 119 ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da espessura do filtro adicional de alumínio para as diferenças de potenciais entre o ânodo e o cátodo iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV.

**Figura 119: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de alumínio, para as tensões aplicadas ao tubo de Raios – X igual a 100; 125; 150; 175; 200 e 225kV.**

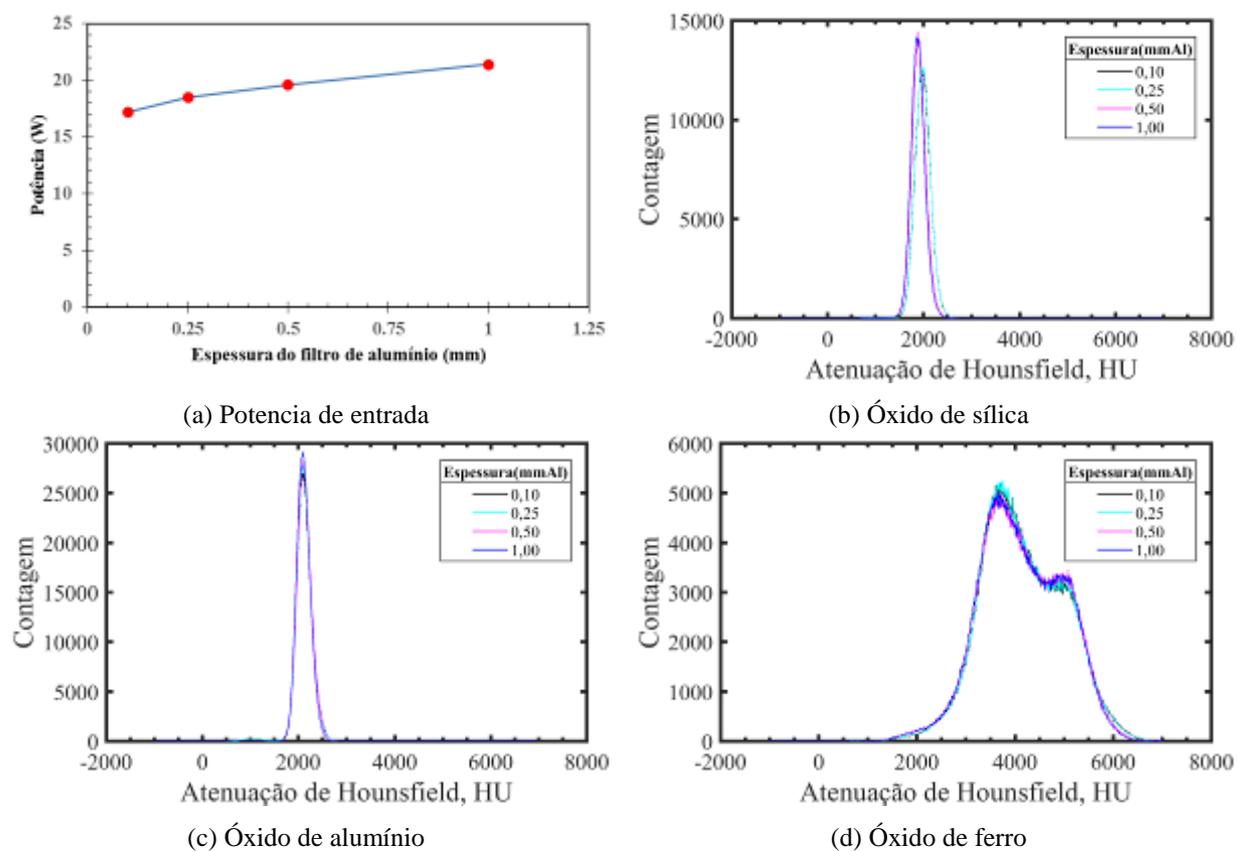


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 119, ficou evidenciado que os maiores valores de potência estão associados às tensões de 175kV a 225kV, no entanto foi observado que valores de corrente elétrica são menores para maiores tensões. Nessa fase será avaliada as condições de filtração proposta em função das espessuras do filtro. Observa-se a eliminação de fótons de Raios – X de baixas energias, e conseqüentemente o processo do endurecimento do feixe (deslocamento do pico do espectro para energias maiores, de maior penetração). Todas as filtrações que foram adicionadas ao sistema produziram modificações na escala de Hounsfield (HU). Os feixes tornaram-se endurecidos (mais energéticos), nas tensões de 175kV, 200 kV e 225kV.

Nas Figuras 120(a), observa-se pouca variação da potência, como consequência dos valores aproximados de corrente, para esse bloco de filtros. O que refletiu em uma pequena variação da filtração adicional para tensão de 100kV. Esse comportamento é bastante evidente no óxido de ferro (Figura 120(d)).

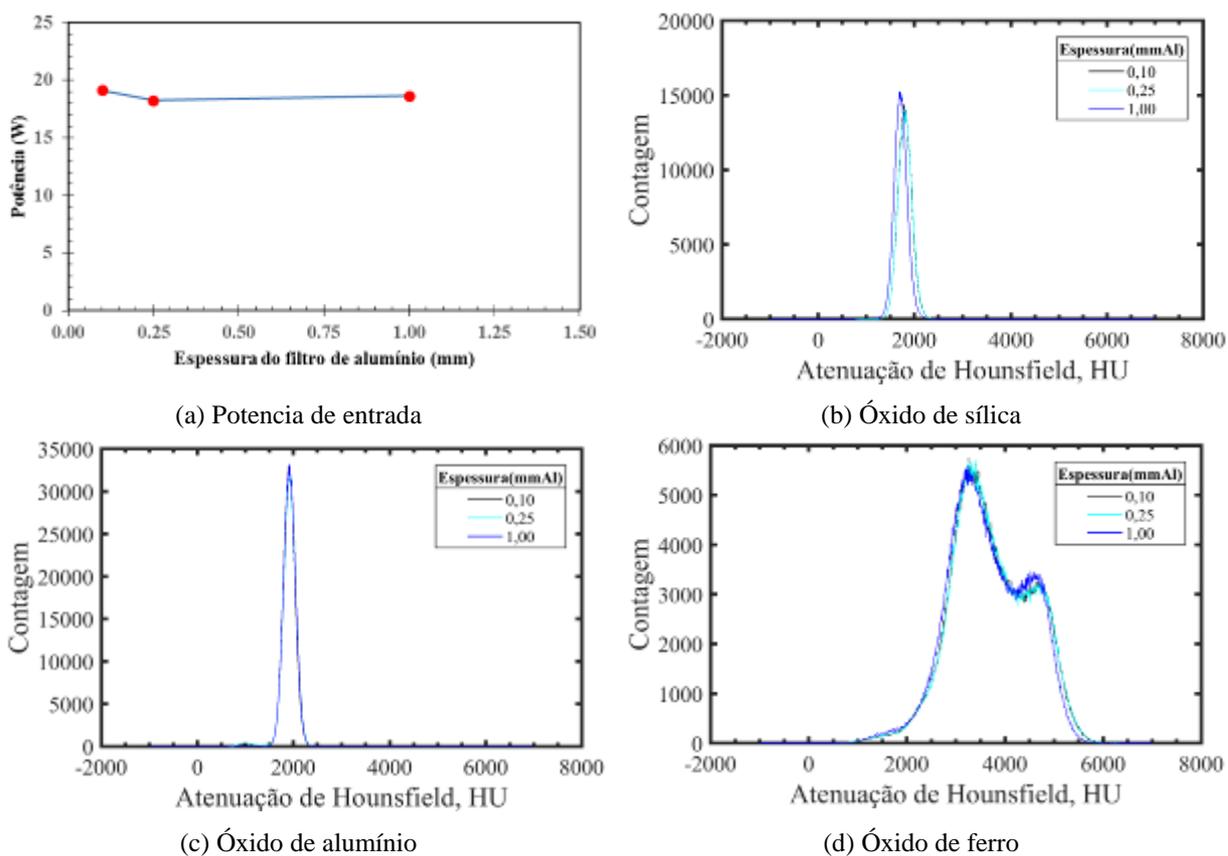
**Figura 120: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100kV e filtro de alumínio.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 121, observa-se pouca variação da potência, como consequência dos valores aproximados de corrente, para esse bloco de filtros.

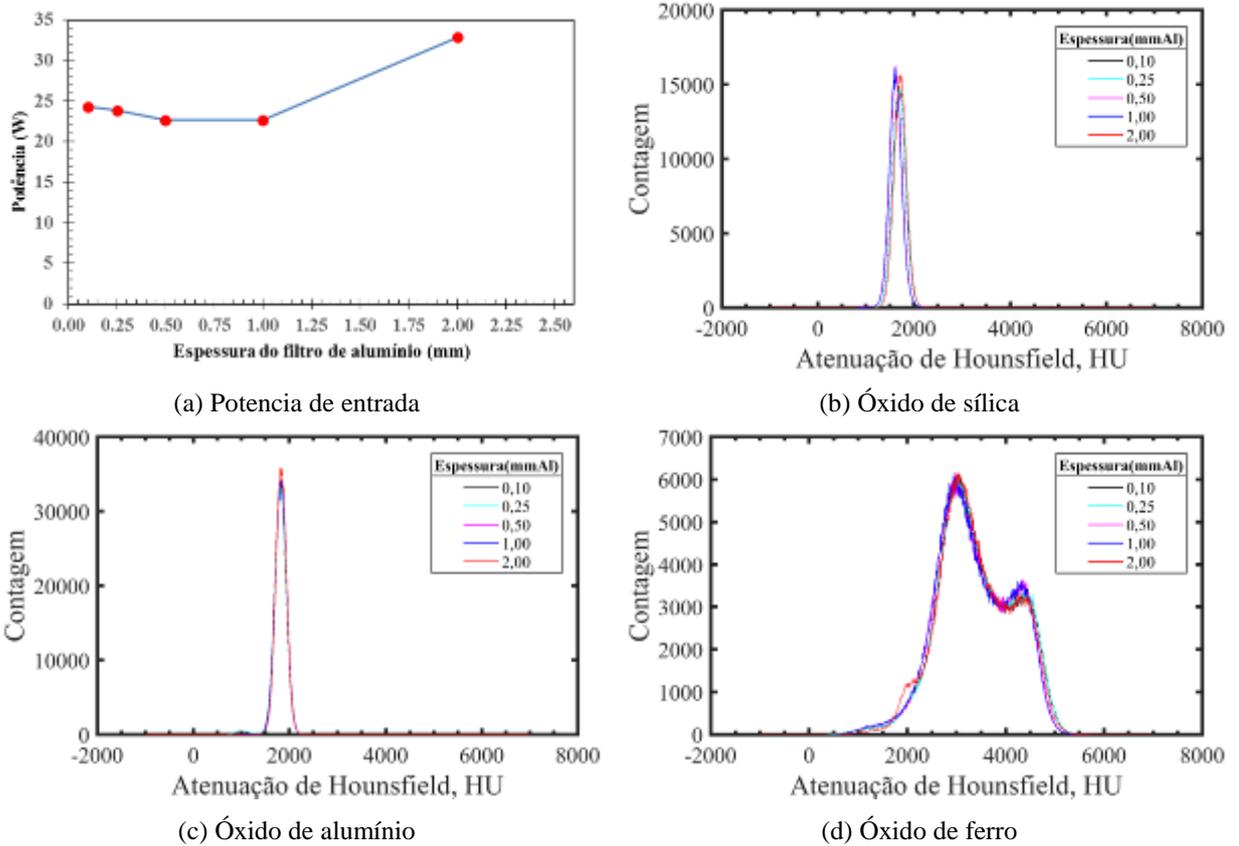
**Figura 121: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de alumínio.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 122, observa-se pouca variação da potência, como consequência dos valores aproximados de corrente, para esse bloco de filtros.

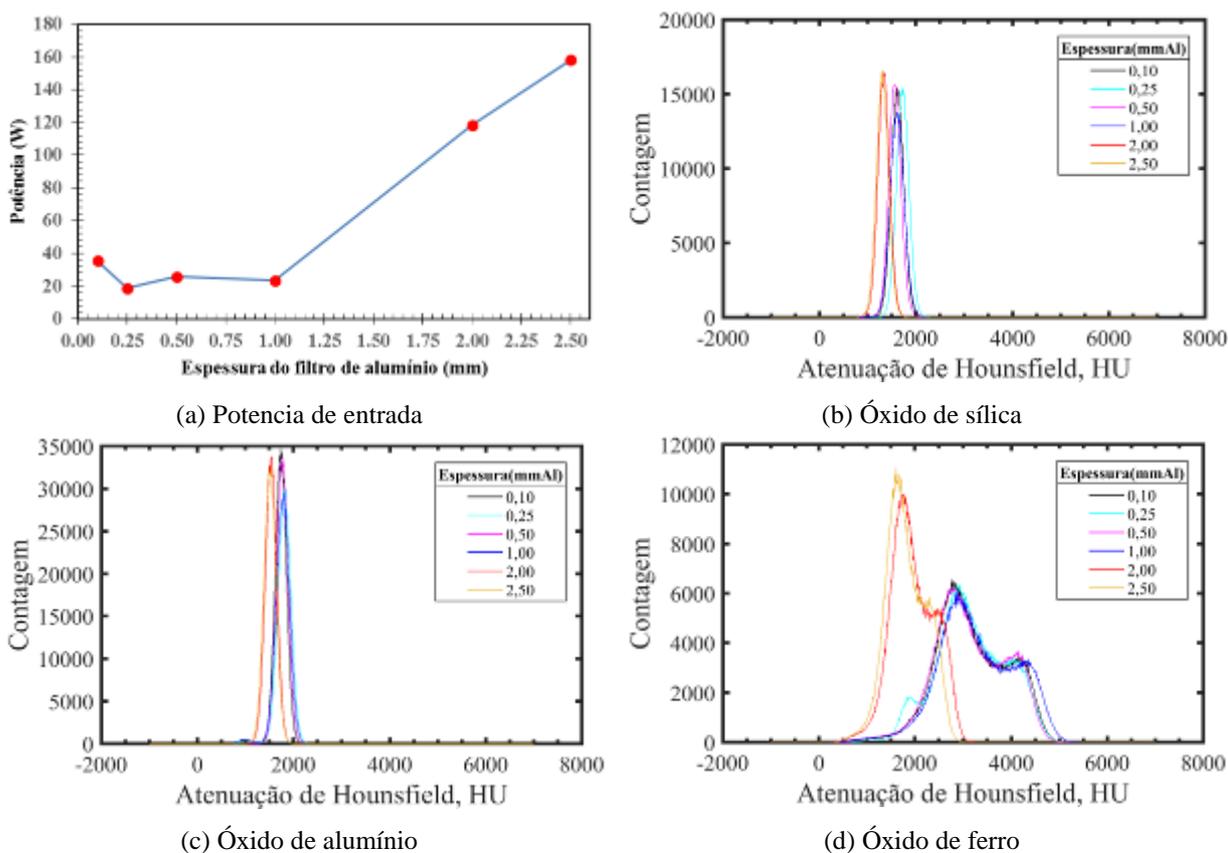
**Figura 122: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de alumínio.**



Fonte: Autoria própria.

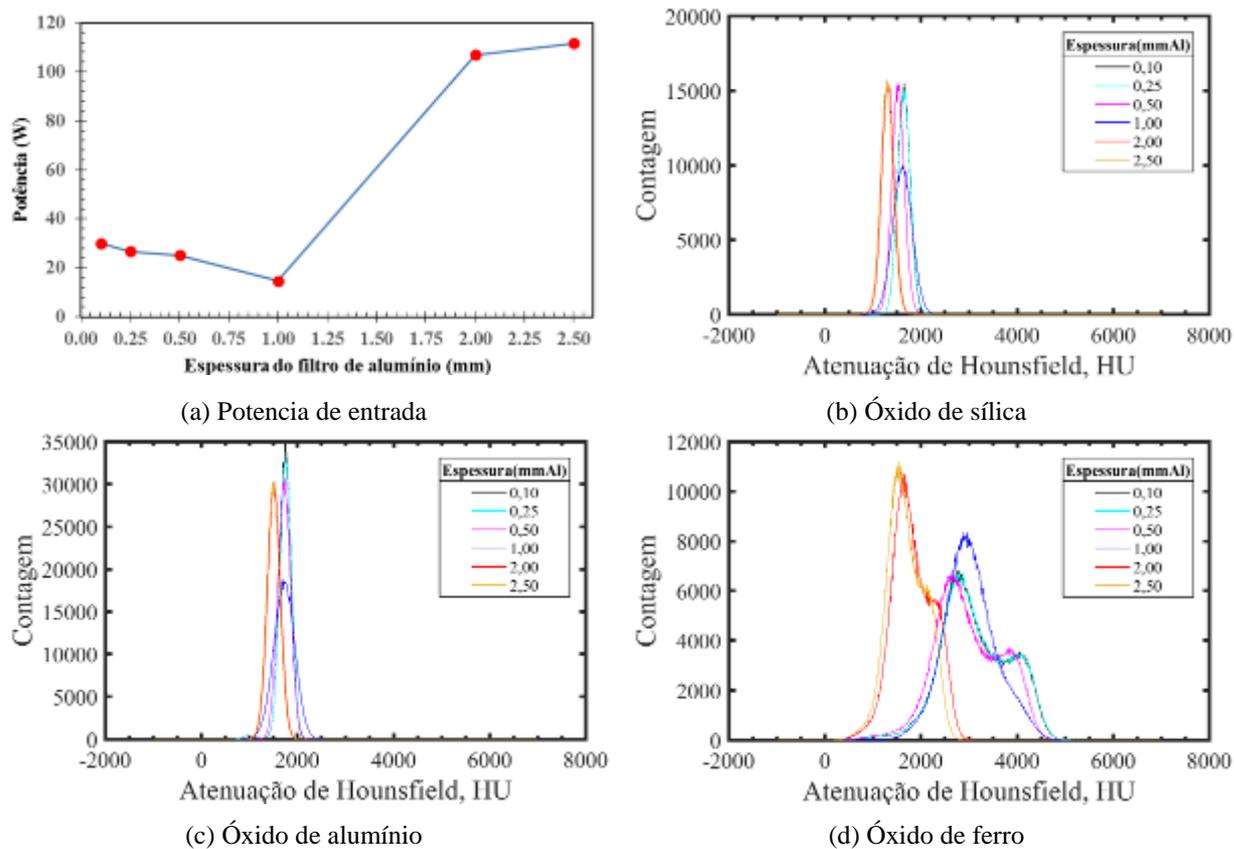
Nas Figuras 123, 124 e 125, ficou evidenciado que para as tensões de 175kV, 200kV e 225kV o filtro de alumínio contribui mais para a expansão dos histogramas de HU, como pode ser observado pelo deslocamento dos histogramas dos materiais, que são indicadoras que o feixe tornou-se mais penetrante.

**Figura 123: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de alumínio.**



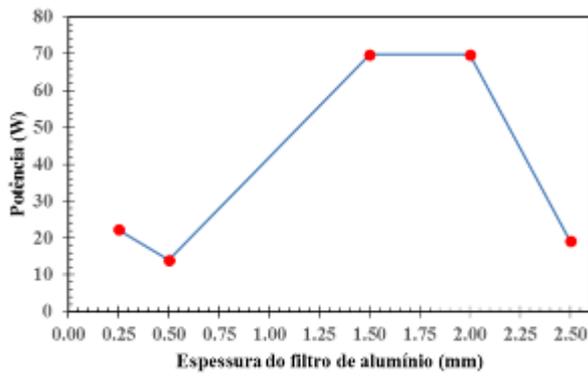
Fonte: Autoria própria.

**Figura 124: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 200kV e filtro de alumínio.**

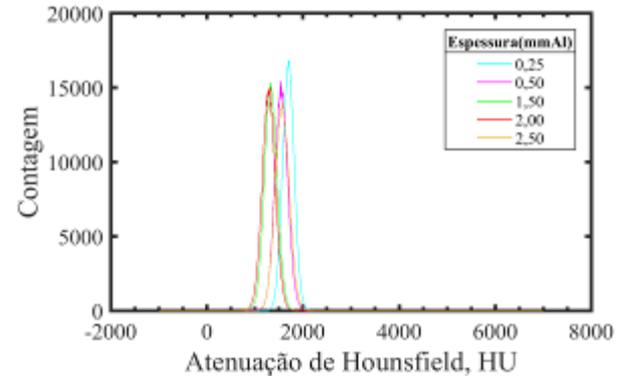


Fonte: Autoria própria.

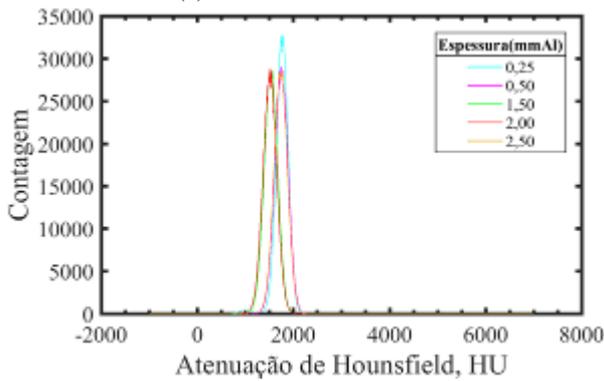
**Figura 125: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de alumínio.**



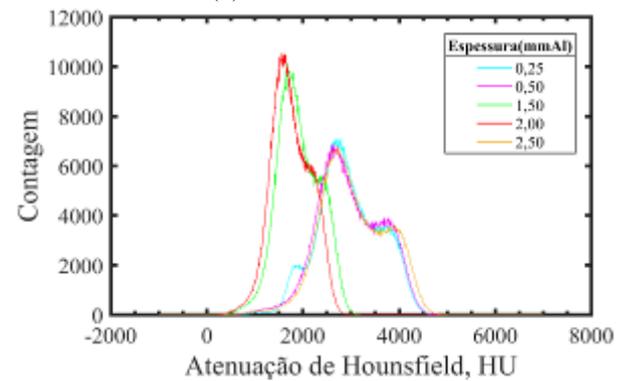
(a) Potencia de entrada



(b) Óxido de sílica



(c) Óxido de alumínio



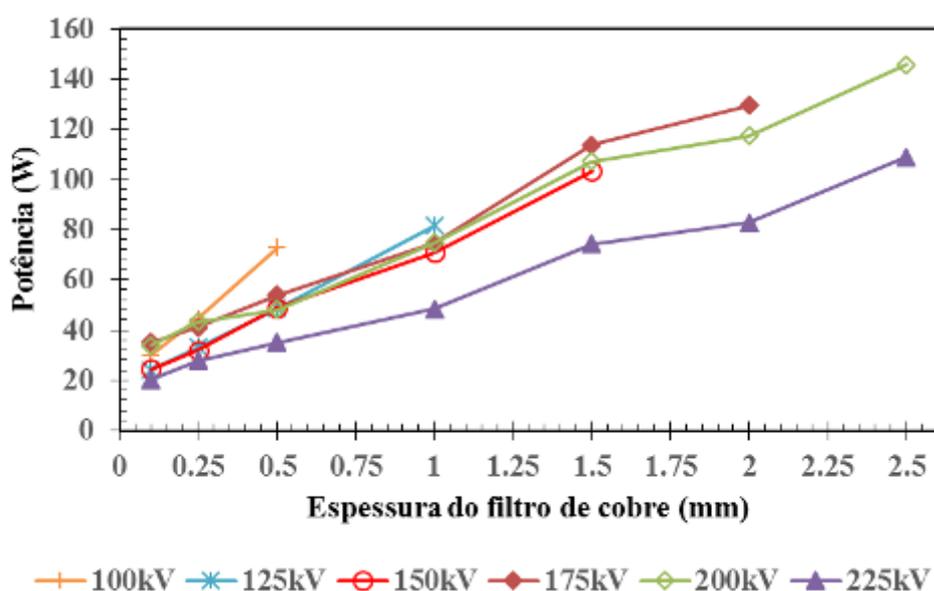
(d) Óxido de ferro

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.2.2 Análise da tensão aplicada no tubo de raios – X, com filtro adicional de cobre

A Figura 126, ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da espessura do filtro adicional de cobre para as diferenças de potenciais entre o ânodo e o cátodo iguais a 100, 125, 150, 175, 200 e 225kV, ocorrendo um aumento no valor da potência de entrada no tubo de Raios – X.

**Figura 126: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de cobre, para as tensões aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100; 125; 150; 175; 200 e 225kV.**

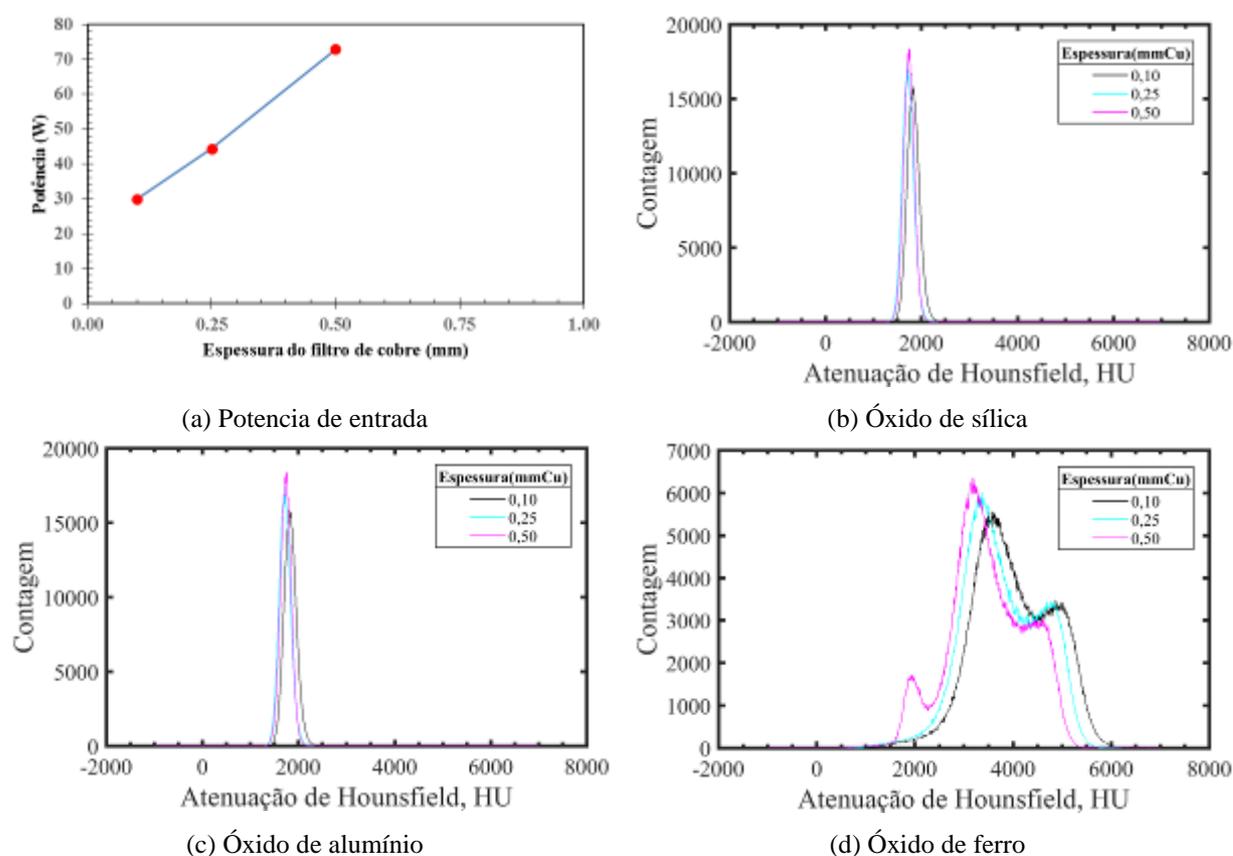


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 126 observa-se que para o filtro de cobre, as maiores potencias estão associadas a partir da espessura de filtro de 1.0mm até 2.5mm de cobre.

Na Figura 127(d), observa-se que o deslocamento do pico para as maiores filtrações, ocorre a partir da espessura de 0.5mm, para todos os materiais. Comparativamente, para os materiais sílica (127(b)) e alumínio (127(c)), houve pouca variação de amplitude (contagem) e sem deslocamento do histograma. Mas para o óxido de ferro, o deslocamento para regiões de alta energia, esta evidenciada.

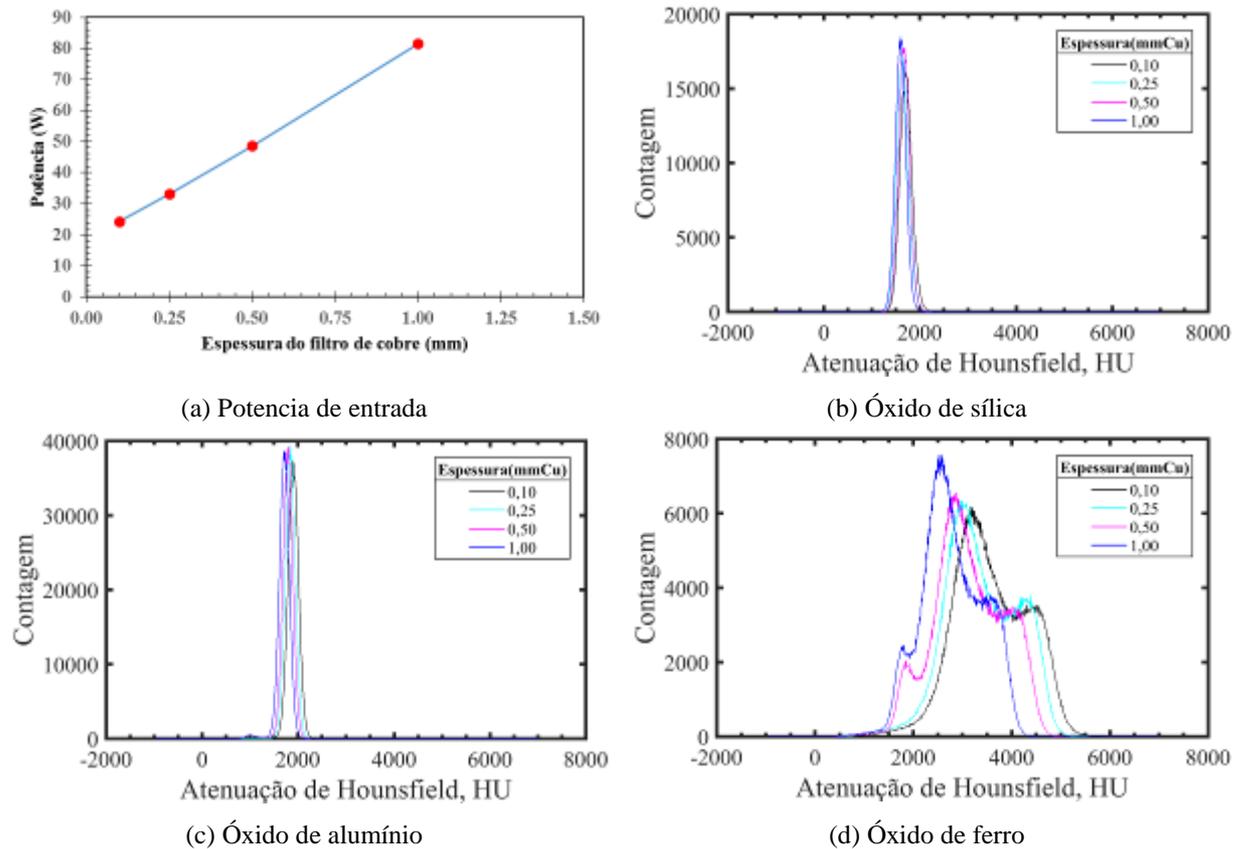
**Figura 127: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 100kV e filtro de cobre.**



Fonte: Autoria própria.

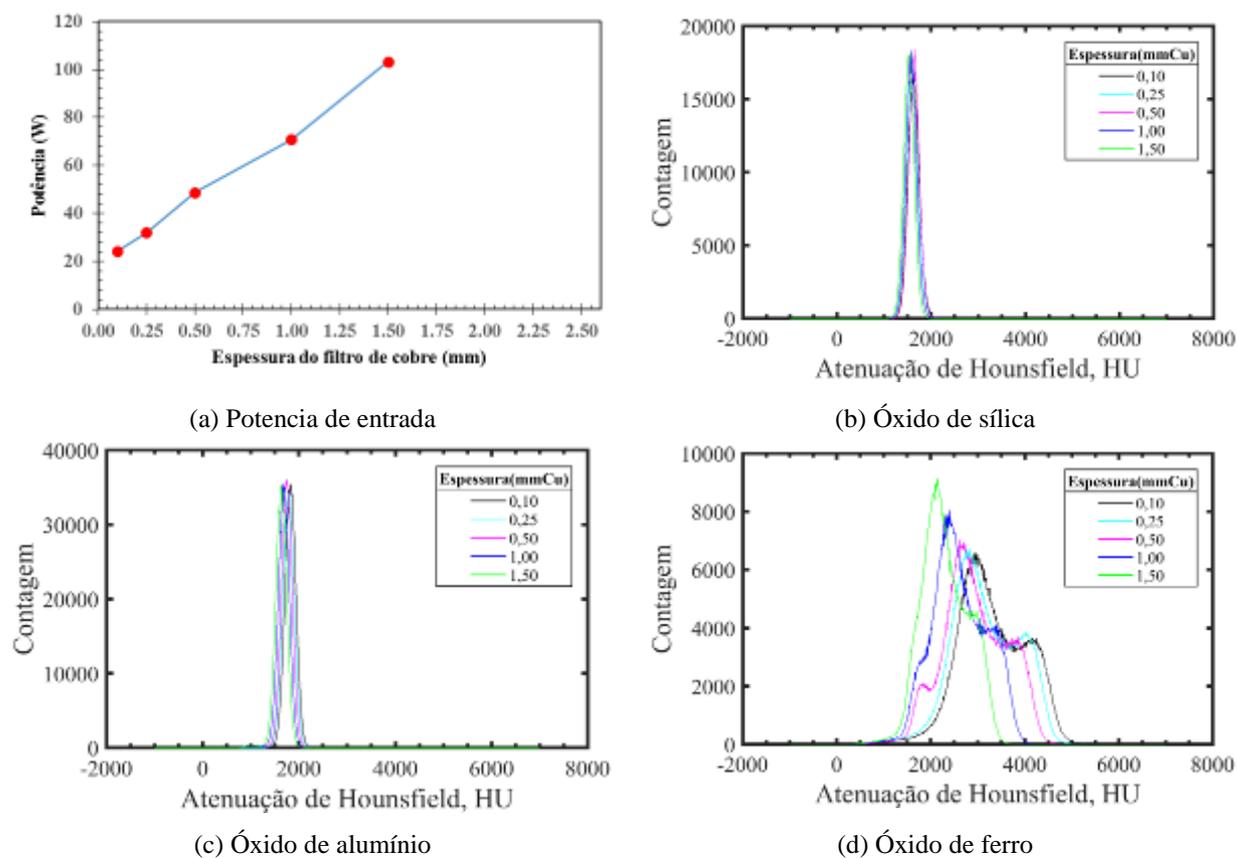
Na Figura 128, esse comportamento é repetido, mesmo a tensão tendo sido aumentada.

**Figura 128: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de cobre.**



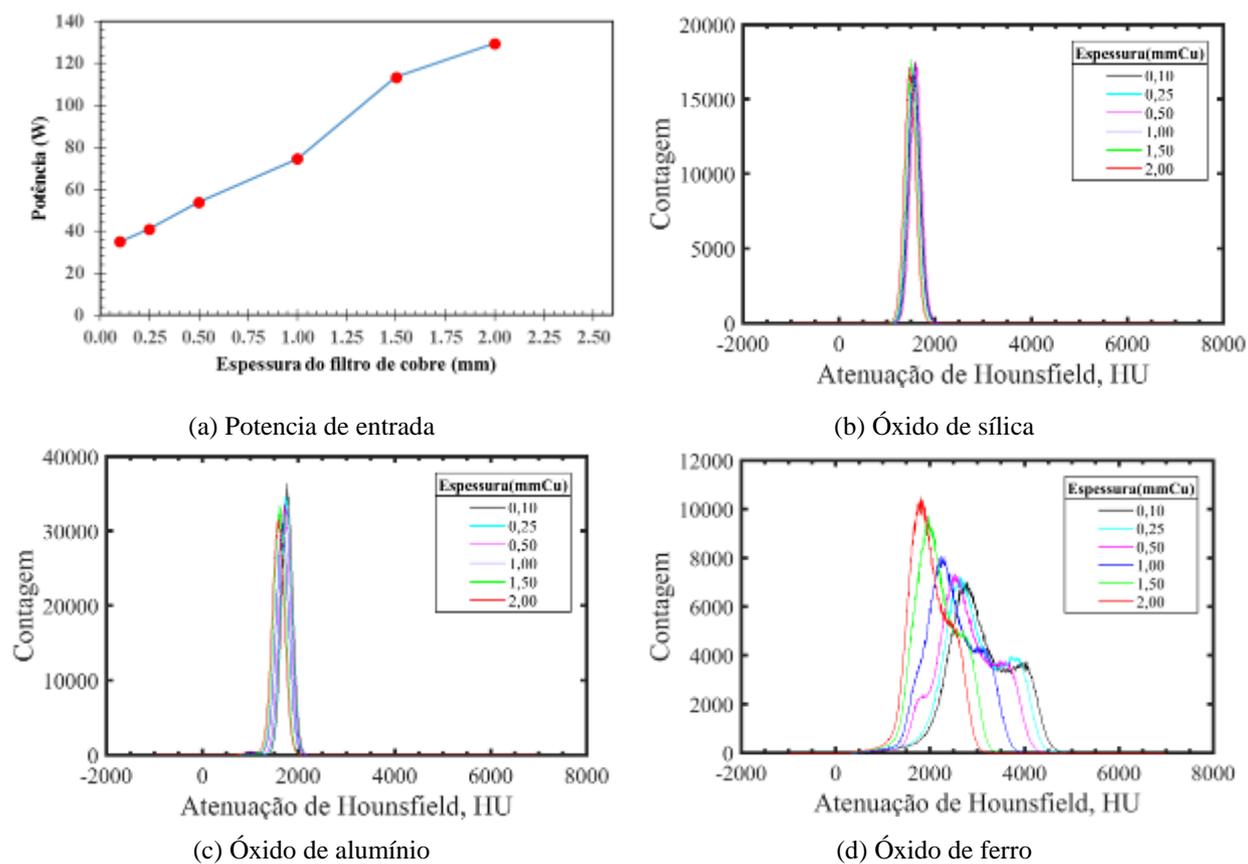
Nas Figuras 129 e 130, que representam as tensões de 150 e 175 já se observa que o acréscimo das filtrações, proporciona um aumento da contagem e um discreto deslocamento dos histogramas. Esse comportamento também foi influenciado pelos valores elevados de corrente.

**Figura 129: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de cobre.**



Fonte: Autoria própria.

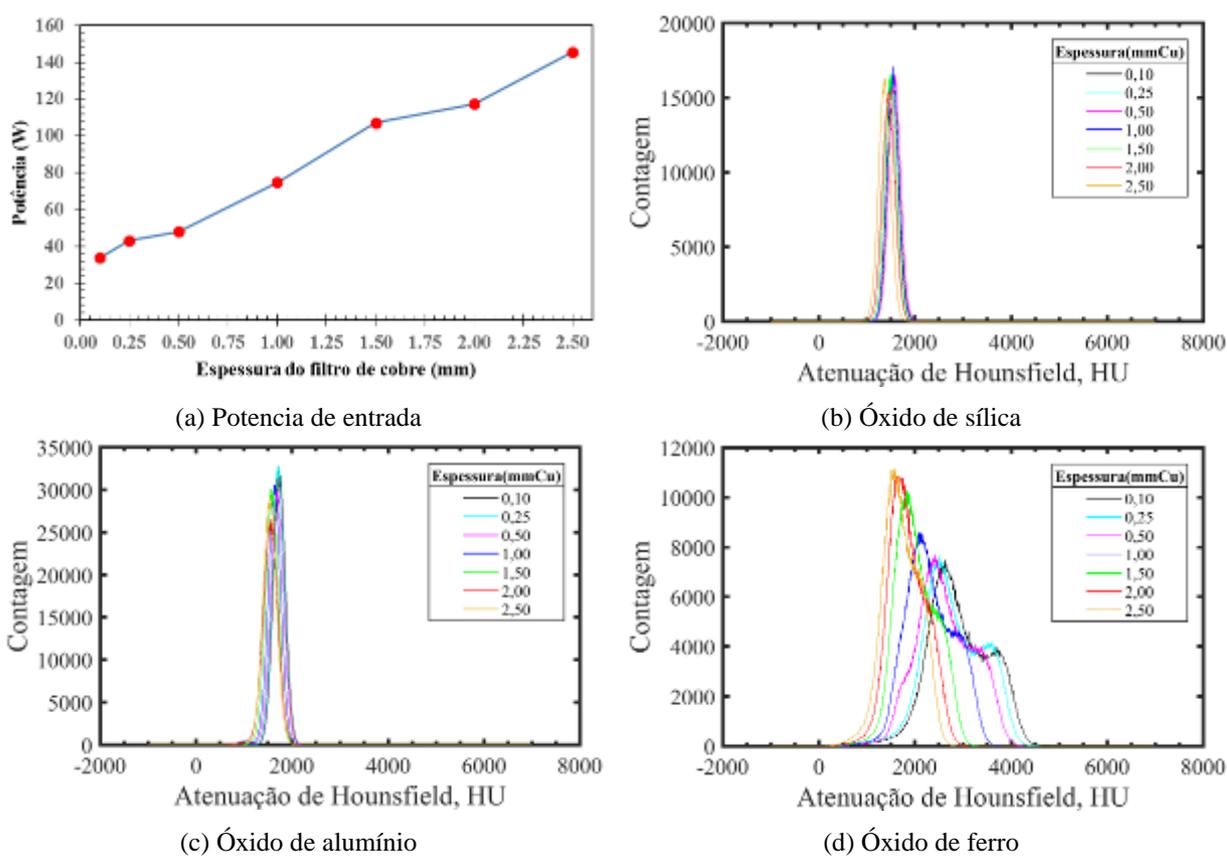
**Figura 130: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de cobre.**



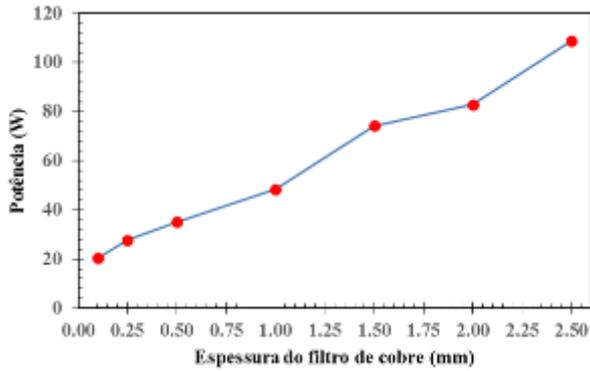
Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 131 e 132 foi observado que as curvas de distribuição de energia obtidas permitiram observar um deslocamento para a direita dos histogramas, significando que, à medida que se aumentou o conjunto a filtração/ tensão e corrente os materiais puderam ser identificados mais eficientemente. A partir da análise da filtração do filtro de cobre nos materiais, ficou evidenciado que o mesmo apresenta uma eficiente atenuação das radiações de baixa energia, e como consequência uma boa representatividade dos valores de HU.

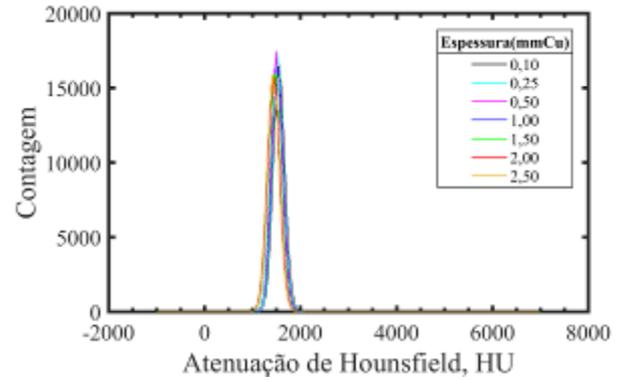
**Figura 131: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 200kV e filtro de cobre.**



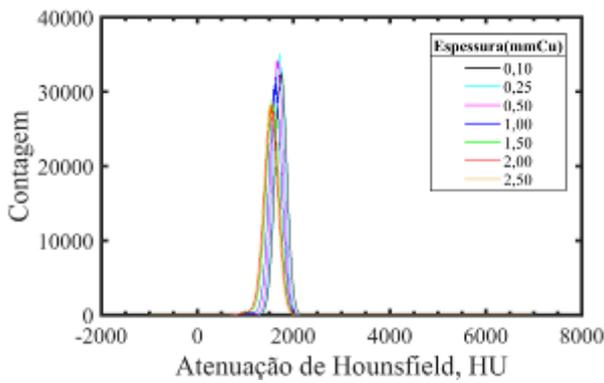
**Figura 132: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de sílica, alumínio e ferro para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de cobre.**



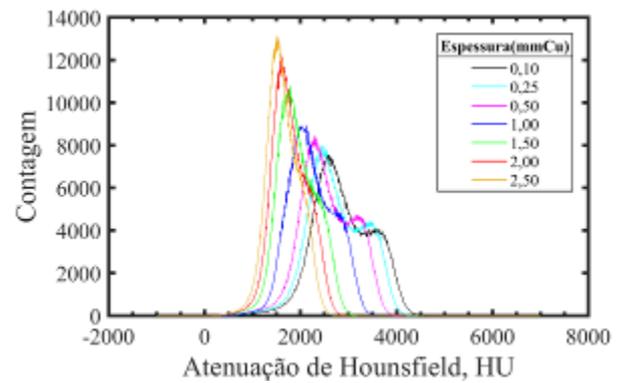
(a) Potencia de entrada



(b) Óxido de sílica



(c) Óxido de alumínio



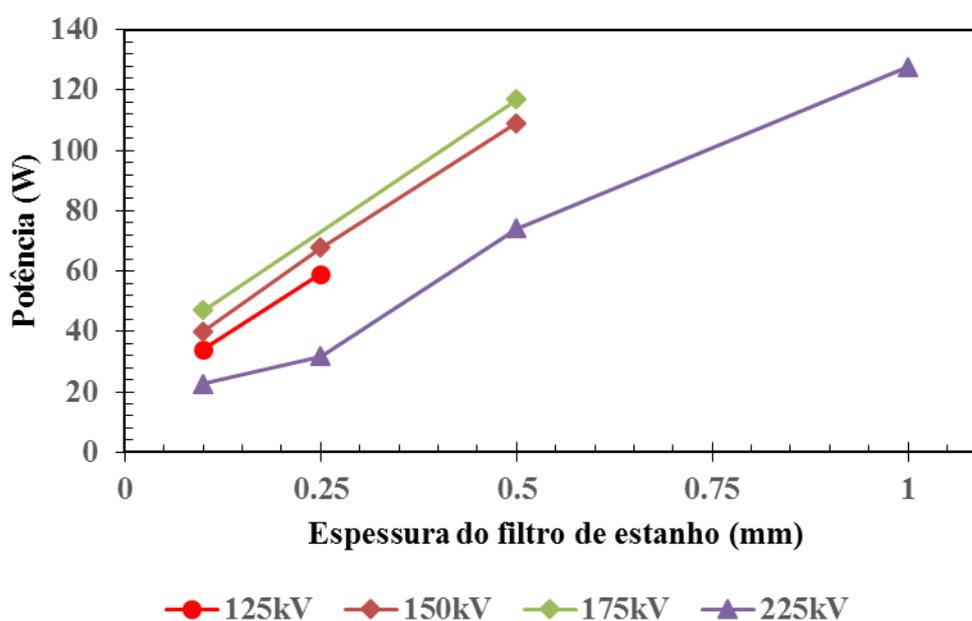
(d) Óxido de ferro

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.2.3 Análise da tensão aplicada no tubo de raios – X, com filtro adicional de estanho

A Figura 133, ilustra a influência da potência de entrada no tubo de Raios – X com o aumento da espessura do filtro adicional de estanho para as diferenças de potenciais entre o ânodo e o cátodo iguais a 125, 150, 175 e 225kV, ocorrendo um aumento no valor da potência de entrada no tubo de Raios – X.

**Figura 133: Potência de entrada no tubo de Raios – X em função da espessura do filtro de estanho, para as tensões aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125; 150; 175 e 225kV.**

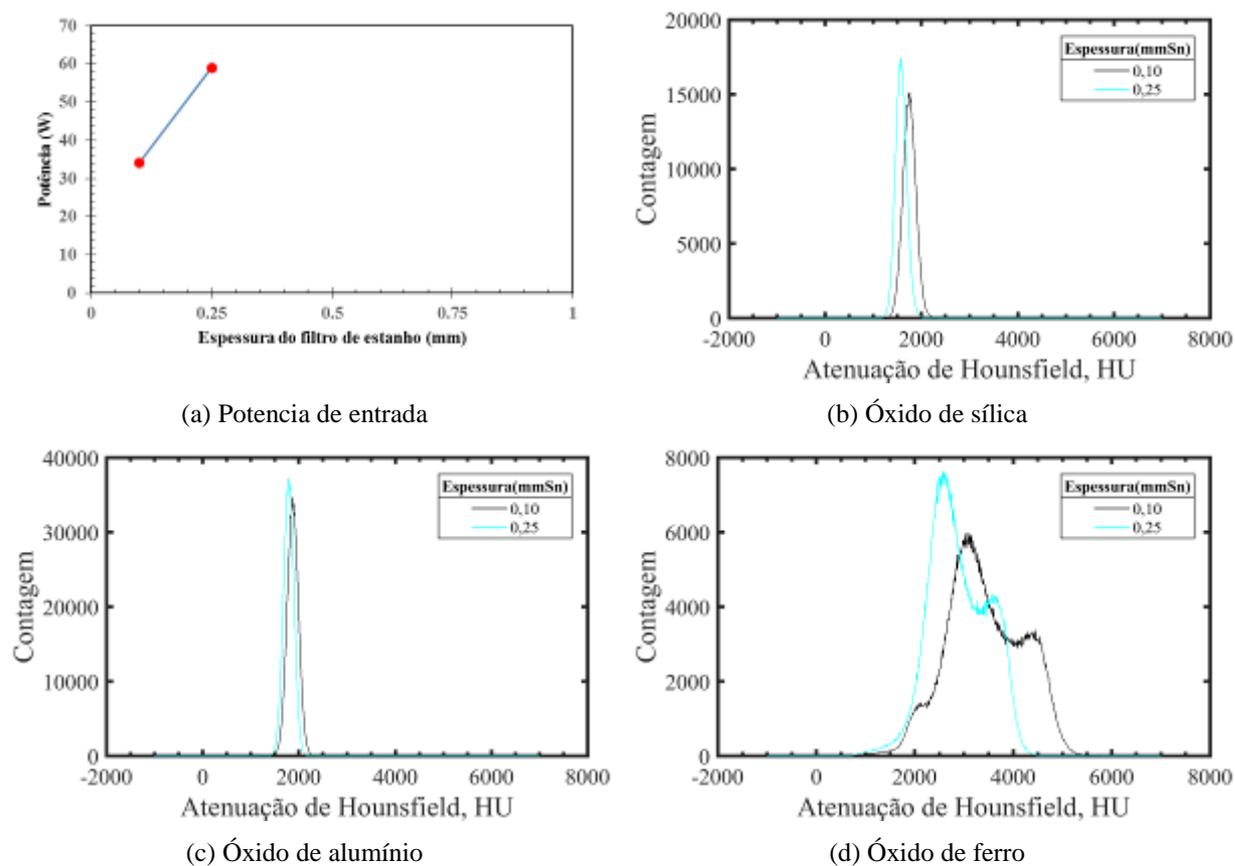


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 133 observa-se a influência da filtração adicional do estanho nas tensões aplicadas ao tubo, ficando evidenciado que a partir de 0,25mm de filtração adicional os valores da potência são aumentados.

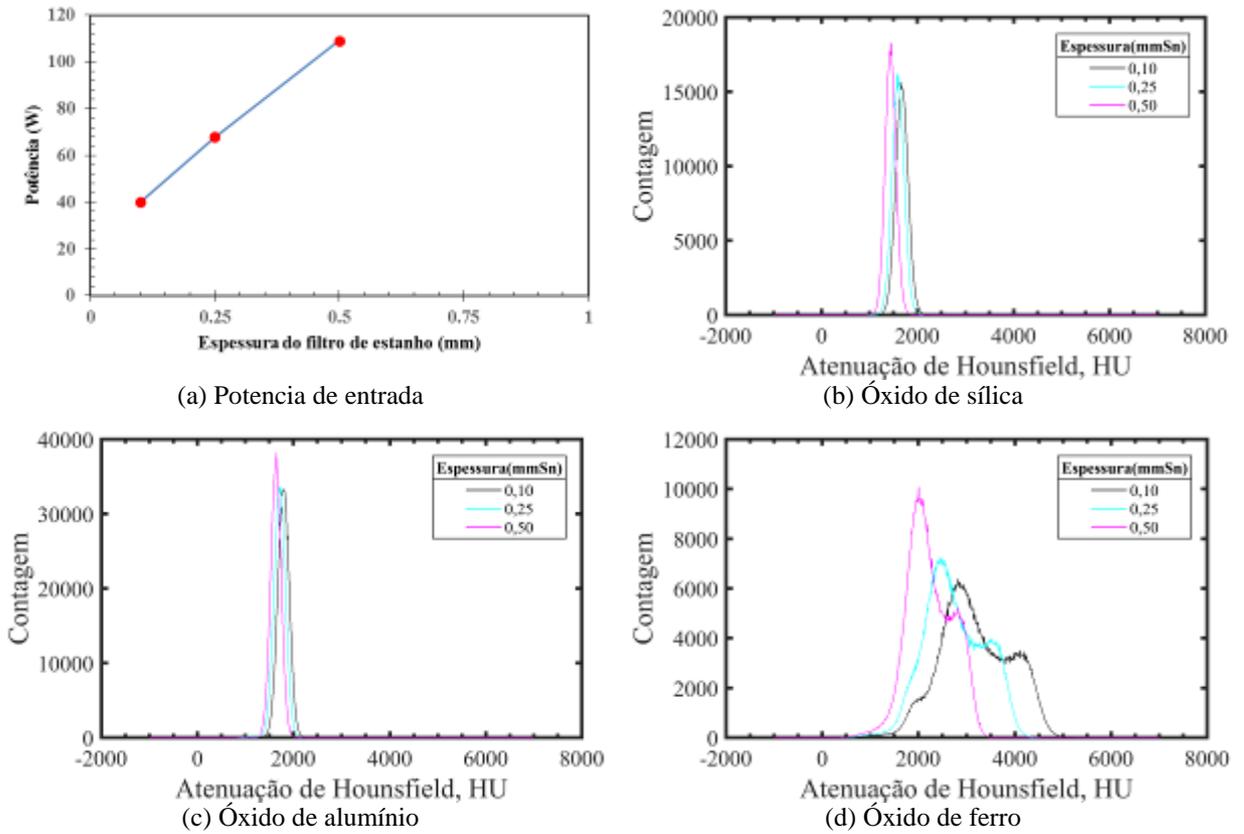
Nas Figuras 134, 135, 136 e 137 fica evidenciado a filtração adicional do estanho é bastante positiva na caracterização dos materiais. O filtro de estanho apresentou uma das melhores configuração de tensão/filtração e corrente.

**Figura 134: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 125kV e filtro de estanho.**



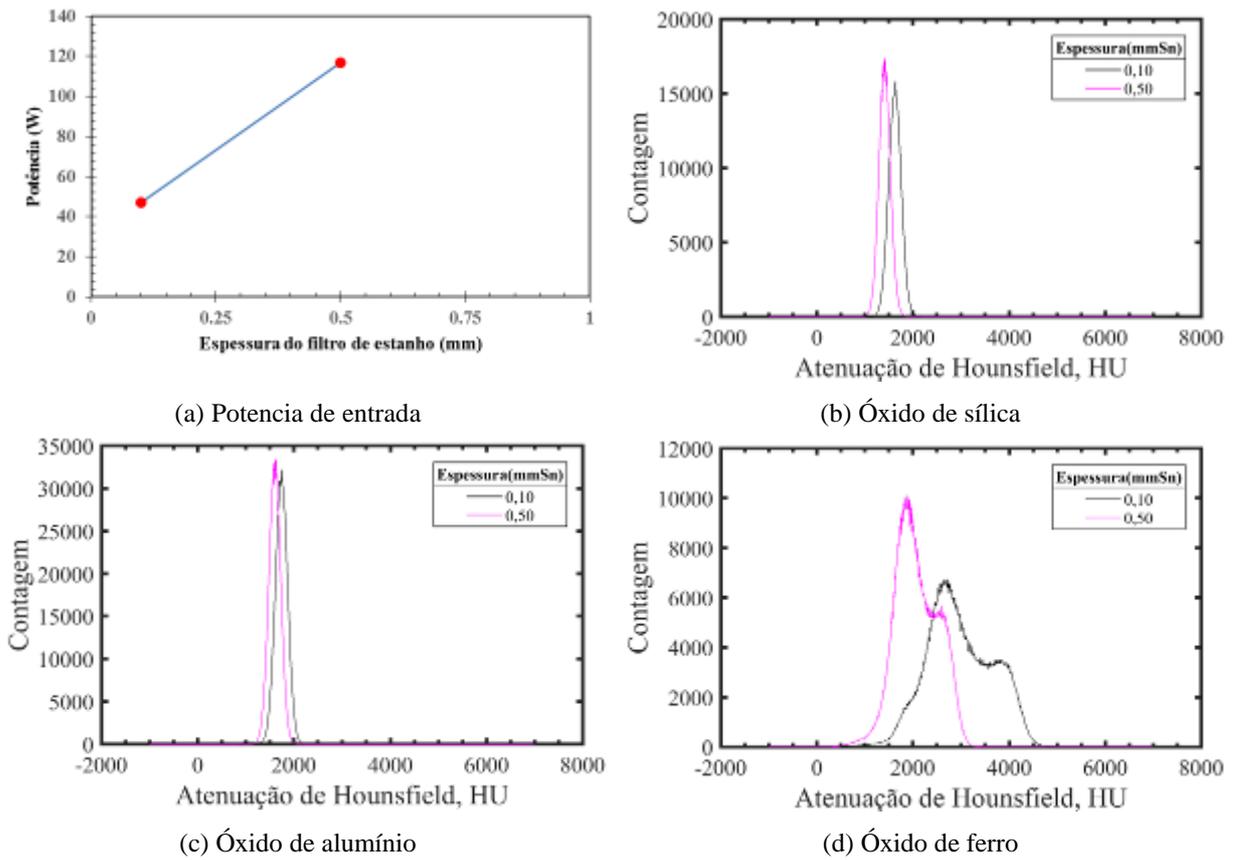
Fonte: Autoria própria.

**Figura 135: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 150kV e filtro de estanho.**



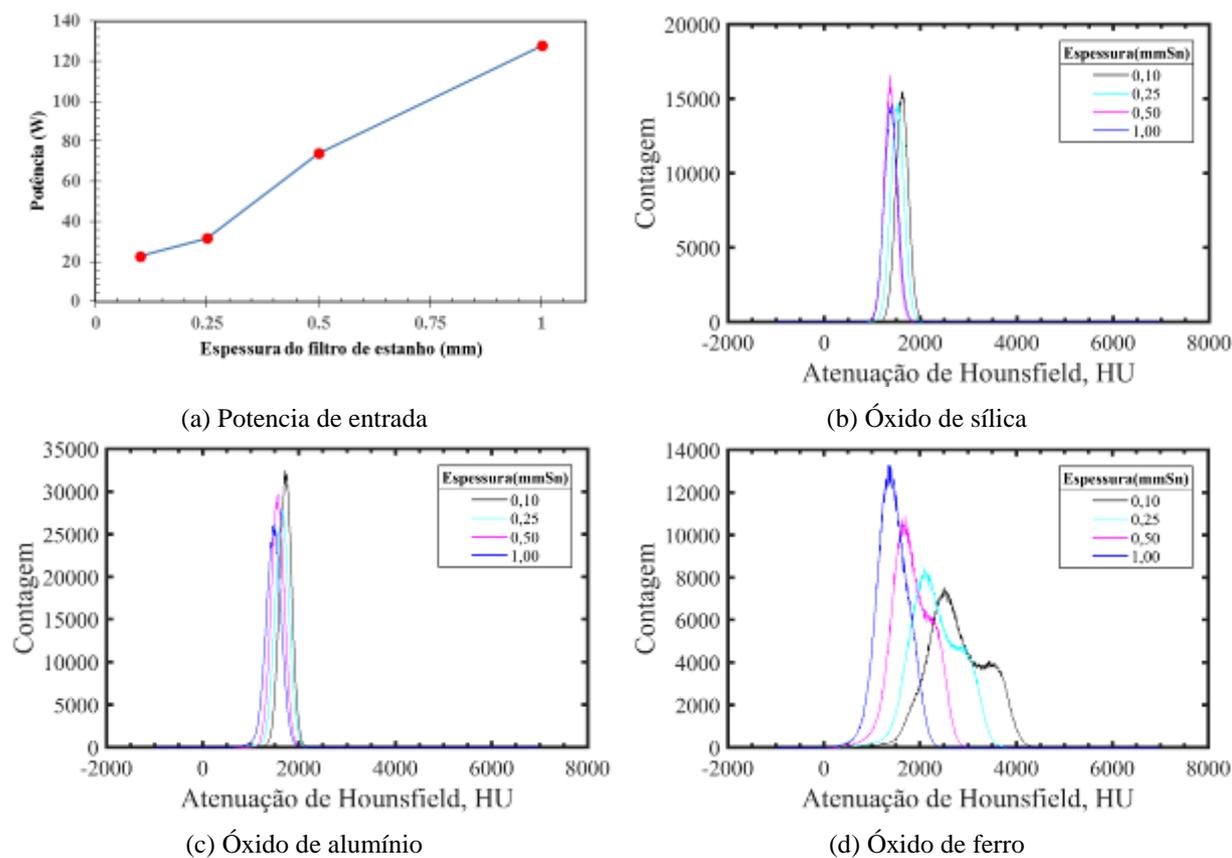
Fonte: Autoria própria.

**Figura 136: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 175kV e filtro de estanho.**



Fonte: Autoria própria.

Figura 137: Potência de entrada no tubo de Raios – X e atenuação de Hounsfield dos óxidos de ferro, alumínio e sílica para uma tensão aplicada ao tubo de Raios – X igual a 225kV e filtro de estanho.



No presente estudo nenhuma das configurações de tensão (kV) e corrente elétrica geraram uma potência superior ao limite do equipamento. Entretanto, foi observado que, para as tensões de 175 kV e 150kV, foram encontrados maiores valores de potência, já para a tensão de 225kV foram encontradas os menores valores para o filtro de alumínio de espessura 2.00 e 2.50mmAl. Já para o filtro de cobre os maiores valores foram para as tensões acima de 175 kV, para os filtros de espessura superior a 1.50mmCu. Para a filtração adicional de estanho, para todas as energias os maiores valores de potência foram a partir da espessura de 0.5mm de estanho. Uma informação importante, no estudo desses parâmetros, é que para as maiores tensões aplicadas ao tubo, os valores das correntes elétricas são menores, conferindo ao feixe um menor número de elétrons, mas devido à alta tensão, um maior rendimento (Malheiros et al, 2016). Já para análise das maiores correntes nas tensões de 175kV (filtro de alumínio e cobre) e 150kV, 175kV para o estanho, conferem a característica de terem maiores números de elétrons.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O constante desenvolvimento tecnológico possibilitou a expansão do campo de aplicação da CT para avaliação das fases do solo. A possibilidade de uma análise da fase mineral, ou seja, na discriminação das fases minerais é de suma importância para que as pesquisas em ciência do solo tenham um novo avanço, visto que os estudos atuais têm como objetivo principal a detecção e a análise do espaço poroso do solo. Na literatura especializada os autores mostram a dificuldade de obtenção e do tratamento dos dados quando o assunto é referente aos sólidos do solo, seus estudos limitam-se a observação das imagens e em alguns raros casos a aplicação da técnica de segmentação (quando a amostra analisada é um mineral ou fragmento do mesmo). Por isso a confecção de um fantom do solo foi bastante satisfatória e necessária para um estudo desses minerais. As proporções desses minerais tiveram como objetivo simular cinco tipos de solo, além de avaliar o quanto se consegue discriminar essas fases pela atenuação de Hounsfield. Além da discriminação dos minerais do solo outro estudo importante foi a avaliação do comportamento do feixe após a utilização de filtros metálicos em variadas configurações de tensão e material de filtro, mostrando que os filtros de cobre são bastante eficientes na discriminação dos materiais. A escolha dos parâmetros de entrada para a medição por tomografia de Raios X influenciaram significativamente os resultados. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa, além de recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÃO

Neste estudo foram investigados parâmetros físicos que estão relacionados com a qualidade das imagens obtidas em dois equipamentos de Tomografia Computadorizada. O estudo realizado baseou-se nas avaliações dos parâmetros de entrada tensão e filtração adicional em um fantom de solo tropical. Com essa finalidade foram utilizadas duas metodologias bastante robustas, que unidas formaram uma única com finalidade de se utilizar dois equipamentos de tomografia, um com fonte de Raios-X e outro com fonte de Raios gama. As duas tomografias mostram-se complementares quando se observa a boa resolução de densidade do tomógrafo de Raios gama em contrapartida das boas resoluções espacial e de densidade dos Raios X. Outro resultado importante obtido com as duas técnicas foi o quão eficientes são esses equipamentos para a diferenciação de materiais sólidos do solo em

proporções pequenas. Foi observado nos histogramas dos materiais que para o quartzo e o óxido de alumínio a variação em algumas situações de tensão é filtração é muito pequena. Em contrapartida o óxido de ferro mostrou-se um elemento mineral de fácil diferenciação, resultado também encontrado em alguns estudos de amostras minerais. O fantom desenvolvido para essa finalidade mostrou ser eficiente na caracterização dos materiais, no entanto, os tubos de ensaio que as amostras foram acondicionadas, mostraram irregularidades nas paredes, indicando que os tubos devam ser substituídos por outro de material mais uniforme, como o acrílico, a fim de diminuir erros de medidas.

Os resultados obtidos em relação ao desempenho do equipamento na determinação de HU apresentaram concordância com os valores previstos pela fase simulada. Em relação aos resultados sobre o nível de ruído apresentado pelas aquisições tomográficas com as filtrações adicionais dos filtros de alumínio, cobre e estanho não se pôde concluir sobre concordância em relação aos valores previstos pelo manual de desempenho de equipamentos, pois os fabricantes não informaram os valores de ruídos referentes a gama de filtração e tensão apresentadas nesse estudo. Entretanto, dado o leque de situações avaliadas por meio de histogramas de avaliação tons de cinza, infere-se que as filtrações atenuaram de forma eficiente as radiações de baixa energia, tornando o feixe mais energético, o que garantiu uma avaliação das melhores condições de filtração para a caracterização dos materiais.

As análises com tomógrafo gama foram muito relevantes na avaliação dos materiais e na análise de melhorias nas metodologias, porque apontaram ao longo do trabalho, as variadas modificações que seriam necessárias para mostrar a complementaridade dos equipamentos, como por exemplo, a utilização de uma fonte menos energética como a de amerício, a modificação dos tubos que as amostras foram acondicionadas e apontaram o caminho para a determinação correta das densidades e coeficientes de atenuação dos materiais.

## REFERÊNCIAS

ATTIX, F. E. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry: In\_\_\_\_\_. New York: John Wiley and Sons, 1986.

Anderson, S. H., Wang, H., Peyton, R. L., Gantzer, C. J. Estimation of porosity and hydraulic conductivity from x-ray CT-measured solute breakthrough. Geological Society, v. 215, n. , p. ° 2175-2186, jun. 4, 2003. Disponível em: °< <http://sp.lyellcollection.org/>>°. Acesso em: 16 set 2015.

ALOIAN, M. Different Kinds of Soil: In:\_\_\_\_\_. Crabtree Publishing, USA. 2010.

Amaral, G. F. B. Utilização de Compostos elastoméricos à base de SBR carregados com barita em aventais isolantes de Raios-X. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Presbiteriana Mackenzi.

Alam, M. N., Miah, M. M. H., Chowdhury, M. I., Kamal, M., Ghose, S., Rahman, Rumi. Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. Applied Radiation and Isotopes. v.54. n. 6, p. 973–976. June. 2001. Disponível em:°< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804300003547>>°. Acesso em: 20 maio. 2015.

Alves, H. D. L. Análise da porosidade de sedimentos geológicos usando a técnica de microtomografia computadorizada. Rio de Janeiro, 2012. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear- Escola de Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Al-Saadiand, A. J., Saadon, A. K. Using Gamma Ray Transmission for Determination of Porosity in Doped Alumina Samples. Ibn Al-Haitham Journal for pure and Applied Science. V. 25, n. 1, P. 174-179, Baghdad University. 2012.

Al-Saadi, A., Saadon, A. K. Gamma Ray Attenuation Coefficients for Lead Oxide and Iron Oxide Reinforced in Silicate Glasses as Radiation Shielding Windows. ibn Al-Haitham Jour. For Pure & Appl. Sci. V. 27 (3), n. 3, p. 201-214, 2014.

Alikhani, B., Büermann, L. Non-invasive experimental determination of a CT source model. Physica Médica, V. 32, n. 1, P. 59 - 66, 2016. Disponível em: °<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1120179715009060>>°. Acesso em: 23 maio. 2015.

Brandsma, R. T., Fullen, M. A., Hocking, T. J., Allen, J. R. An X-ray scanning technique to determine soil macroporosity by chemical mapping. Soil Till, v. 50, n. 1, p. 95-98, fevereiro 1999. Disponível em: °< [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00198-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00198-6)>°. Acesso em: 23 maio. 2015.

Baveye, P., Rogasik, H., Wendroth, O., Onasch, I., Crawford, J.W. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with X-ray tomography

data. Meas. Sci. Technol, v. 13, n. 5, p. 775–784, abril. 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/.../230922530\\_Effect\\_of\\_sampling\\_..](https://www.researchgate.net/.../230922530_Effect_of_sampling_..) Acesso em 16 set. 2015.

Blair, J., Falconer, R. E., Milne, A., Young, I. M., Crawford, J. W. Modeling three-dimensional microstructure in heterogeneous media. Soil Science Society of America Journal, v. 71, n.6, p.1807e1812, 2007.

Disponível em: < <https://repository.abertay.ac.uk/jspui/handle/10373/317> >. Acesso em: Dezembro 2015.

Cesareo, R.; Giannini, M. Elemental analysis by means of X-ray attenuation measurements. Nuclear Instruments and Methods. Oxford, v. 169, p.551-555. 1980.

Cruvinel, P.E. Minitomografo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares (Gamma and X-ray computed minitomography for multidisciplinary applications). Campinas, 1987. 329f. Tese. Universidade de Campinas. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-18082014-102009/>>°

Cruvinel, P. E.; Cesareo, R.; Crestana, S.; Mascarenãs, S. X- and Y Ray Computerized Minitomograph Scanner For Soil Science. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Albuquerque, v.39, p.745-750, outubro, 1990.

Cesareo, R., Assis, J. T., Crestana, S. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10–300 keV. Appl. Radiat. Isot. V. 45,n.5, p. 613–620.1994. Disponível em: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:25048487](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25048487). Acesso em: 20 set. 2015.

Cortina-Januchs, M. G., Quintanilla-Dominguez, J., Vega-Corona, A., Tarquis, A. M., & Andina, D. Detection of pore space in CT soil images using artificial neural networks. Biogeosciences, v. 8, p. 279e288. Jan. 2011. Disponível em: °<<http://www.biogeosciences.net/8/279/2011/>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

Carvalho, D.V.S. Efeitos do Colimador na Qualidade da Imagem em Tomografia Industrial de Terceira Geração. São Paulo, 2014. Dissertação (Mestre em ciências na área de tecnologia nuclear-Aplicações). IPEN-Universidade de São Paulo.

Chicati, M. L., Nanni, M. R., Cezar, E. Oliveira, R. B., Chicati, M. S. Spectral classification of soils: A case study of Brazilian flooded soils. Remote Sensing Applications: Society and Environment, V. 6, p. 39-45, April 2017. ISSN 2352-9385. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235293851630091X>

Dantas, C. C.; Melo, S. B .; Oliveira, E. F.; Simões, F. P. M.; Santos, M. G.; Santos, V. A. Measurement of density distribution of a cracking catalyst in experimental riser with a sampling procedure for gamma ray tomography. Elsevier, V. 266, n. 5, Pages 841–848, March 2008.

Dewulf, W., Tan, Ye., Kiekens, K. Sense and non-sense of beam hardening correction in CT metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology, V. 61, n. 1, P.° 495-498, 2012. ISSN 0007-8506

EVANS, R. D. The Atomic Nucleus. In:\_\_\_\_\_. New York: McGraw-Hill; 1976.

Ferraz, E. S. B. Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$  (Simultaneous determination of soil density and moisture by  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  gamma-ray attenuation). São Paulo, 1974. 120f. Tese. Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Gibson, J. R., Lin, H., Bruns, M. A. A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates. *Geoderma*, v. 134, n. 3-4, p. 335e 348, outubro 2006.

Garbout, A., Munkholm, L. J., Hansen, S. B., Petersen, B. M., Munk, O. L., Pajor, R. The use of PET/CT scanning technique for 3d visualization and quantification of real-time soil/plant interactions. *Plant Soil*, v. 352, p. 113 – 127, março - 2012

Garbout, A., Munkholm, L. J., Hansen, S. B. Temporal dynamics for soil aggregates determined using x-ray CTscanning. *Geoderma*, V. 204–205, Pages 15-22, August 2013. ISSN 0016-7061.

Hubbell, J.H. Review of Photon Interaction Cross Section Data in The Medical and Biological Context. *Phys Med Biol*, n. 1, p. 44, jan. 1999.

Hu, X., Li, Z. C., Li, Z. C., Li, X. Y., Liu, L. Y. Quantification of Soil Macropores Under Alpine Vegetation Using Computed Tomography in the Qinghai Lake Watershed, Ne qinghai–tibet Plateau. *Geoderma*, V. 264, Part A, P. 244-251, 15 February 2016

Hanna, R. D., Ketcham, R. A. X-ray computed tomography of planetary materials: A primer and review of recent studies. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 21 January 2017.

KAPLAN, I. Física Nuclear. . In:\_\_\_\_\_. Raios X e a Estrutura Atômica. 2a. ed. Rio de janeiro: Guanabara Dois, 1978. cap. 4, p. 54 – 65.

Kile, J. R., Ketcham, R. A. Application of high resolution X-Ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing. *Ore Geology Reviews*. V.65, Part 4, P. 729-1142, março 2015.

LIMA, J. P: Física dos métodos de imagem com Raios X. In:\_\_\_\_\_. Edições ASA, first edition, 1995.

Lucena, R. F. Implantação de um Programa de Qualidade em Equipamento de Raios-X por Meio de Medidores Não Invasivos. São Paulo, 2010. 112f. Dissertação (Mestrado em ciências na área de tecnologia Nuclear -aplicações). IPEN-Universidade de São Paulo.

Macedo, A., Crestana, S., Vaz, C. M. P. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. *Soil and Tillage Research*, V. 49, n.3, P. 249-253, December 1998. ISSN 0167-1987.

Macedo, A., Crestana, S. Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios-X (Macroporosity and soil particle density evaluation using X-ray microtomography). V. 23, n. 4, p.º 763–771, Dec. 1999.

Mathias, P., Michael, G. Aart . J. M., Cornelia S. P: Spiral and Multislice Computed Tomography of the Body. In:\_\_\_\_\_. Georg Thieme Verlag .2003.

Marconato, J. A. Redução de Dose de Radiação e Aumento na Vida útil do Tubo de Raios-X em um Equipamento de Tomografia Computadorizada. Rio de Janeiro, 2005. 102f. Dissertação (Área de Concentração: Radiologia. Linha de Pesquisa: Física das Radiações na Área Médica.). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Monga., O., Ngom., F. N., Delerue, J. F. Representing geometric structures in 3D tomography soil images: Application to pore-space modeling. Computers & Geosciences, V. 33, n. 9, Pages 1140-1161, 2007.

Marques, F. J. M. O. Controlo de Qualidade em Tomografia Computadorizada. Lisboa, 2009. Dissertação (Mestrado em Biofísica – Física Médica e Engenharia Biomédica). Universidade de Lisboa.

Marques, L. C. Estudo da porosidade de arenitos sintéticos portécnicas nucleares não destrutivas. Londrina, 2008. 127f. Dissertação (Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Física). Universidade Estadual de Londrina.

Mendes, R. A Tomografia Computadorizada de Raios-X Como Método Não Destrutivo de Análise Volumétrica de Concreto: Estudo de Caso em Testemunho de Concreto da Usina Hidrelétrica de Mourão. Curitiba, 2010. 95f. Dissertação (Engenharia e Ciência dos Materiais-Programa de Pós Graduação em Ciências dos Materiais-PIPE). Universidade Federal do Paraná.

M. E. Medhat. Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil, Annals of Nuclear Energy. V. 40, n. 1, Pages 53-59, February 2012.

Manzatto, C. V., Junior, E. F., Peres, J. R. R. Uso Agrícola dos Solos Brasileiros, Rio de Janeiro, v.1,n. 1, p. 174, 2012.

Meng, C., Niu 1, J., Li 1, X., Luo 1, Z., Du 1, X., Du 2., J., Yu1, X; Lin 1, X. Quantifying Soil Macropore Networks in Different Forest Communities Using Industrial Computed Tomography in a Mountainous Area of North China. Journal of Soils and Sediments, v. 2, p. 1-14, May. 2016.

Nascimento, J. R. Estudo Comparativo de Sistemas de Radiografia Digital na Inspeção de Solda. 2012. Dissertação de Mestrado (Engenharia Nuclear-COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Oliveira, M. S. F. Avaliação de Meios Geológicos Porosos Por Técnicas Atômicas e Nucleares. Rio de Janeiro, 2012. 159f. Tese de Doutorado (Programa de Pos-Graduação em Engenharia Nuclear COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Pierret, A., Capowiez, Y., Belzunces, L., Moran, C. J. 3D reconstruction and quantification of macropores using x-ray computed tomography and image analysis. Geoderma, V. 106, n. 3–4, Pages 247-271, April 2002.

Pires, L. F.; Macedo, J. R.; Souza, M. D.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v. 57, n. 3, p.375-380, 2002.

Pires, L. F.; Macedo, J. R.; Souza, M. D.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K. Gamma ray computed tomography to investigate compaction on sewage-sludge-treated soil. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v. 59, n.1, p.17-25, jul. 2003.

Pedrotti, A.; Pauletto, E. A.; Crestana, S.; Cruvinel, P. E.; Vaz, C. M. P.; Naime, J. M.; DA Silva, A. M. Planossolo Soil Sample Size for Computerized Tomography Measurement of Physical Parameters. *Scientia Agricola (Piracicaba)*, v.60, n. 4, p.735-740, out. 2003.

Pires, L. F.; Arthur, R. C.; R. P.; Correchel, V.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. *Brazilian Journal of Physics*, São Paulo, v.34, n. 3a, p.728-731, set. 2004a.

Pires, L. F.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K. Damage to soil physical caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.42, n. 3b, p.857-863, 2004b.

Pires, L. F. Tomografia Computadorizada, Atenuação de Raios Gama e Análise Micromorfologia na Avaliação de alteração na Estrutura e Retenção de Água pelo Solo. Piracicaba, 2006. 229f. Tese de Doutorado (Centro de Energia Nuclear na Agricultura). Universidade de São Paulo.

POLUDNIOWSKI, G. G. Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets, *Medical Physics*, v. 34, n. 6, p. 2175-2186, jun. 2007. ISSN 0094-2405.

Pires, L.F., Borges, J. A. R., Bacchi, O. O.S., Reichardt, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. *Soil and Tillage Research*. V. 110, In. 2, P. 197-210, Novemb. 2010.

Pires, L. F.P.; Cássaro, F.A.M.; Bacchi, O.O.S.; Reichardt, K. Gamma ray computed tomography in soil science: Some Application Computer Tomography Special Resolution Application. Piracicaba. 2011.

Pires, L. F., Medhat, M. E. Different Methods of mass attenuation coefficient evaluation: Influences in the measurement of some soil physical properties. *Applied Radiation and Isotopes*, V. 111, Pages 66-74, May 2016.

Reichardt, K. Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo (The use of gamma radiation for determination of soil density and moisture). Piracicaba, 1965. 34f. Tese. Universidade de São Paulo.

Rogasik, H., Onasch, I., Brunotte, J., Jegou, D., Wendroth, O. Assessment of soil structure using X-ray computed tomography.

Mees, F., Swennen, R., van Geet, M., Jacobs, P. Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. *Geological Society*, London, p. 151-165, 2003.

Richardt, K., Timm, L. C. Solo, Planta, Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações. Editora Manole LTDA. 1ª edição, 2004.

Rachman, A., Anderson, S. H., Gantzer, C. J. Computed tomographic measurement of soil macroporosity parameters as affected by stiff-stemmed grass hedges. American Society of Agronomy, V. 69, N. 5, p. 1609-1616, Received: Sept – 2004.

Soares, C. S. Caracterização Experimental em Geometria de Feixe Direto de Um Tubo Típico de Radiologia Diagnóstica. Ilhéus Bahia, 2012. 111f. Dissertação (Área de concentração – Física Nuclear). Universidade Estadual de Santa Cruz-UESC.

Tauhata, L.; Salati, I. P. A.; Di Prinzio, R.; Di Prinzio, A. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. 5ª revisão. Rio de Janeiro, IRD/CDTN, 2003.

Tarquis, A., Gimenez, D., Saa, A., Díaz, M., Gasco, J. Scaling and multiscaling of soil pore systems determined by image analysis. In Scaling methods in soil physics. 2003. (pp. 19e34).

Taina, I. A., Heck, R. J., Elliot, T. R. Application of x-ray computed tomography to soil science: A literature review. Canadian Journal of Soil Science, V. 88, P. 1-19, fevereiro 2008.

Tippkötter, R., Eickhorst, T., Taubner, H., Gredner, B., Rademaker, G. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (mCT). Soil Till. V. 105, P.1, September 2009, Pages 12-20, ISSN 0167-1987

Tian, T. Characterization of Multispectral Visible and X-Ray CT Imagery of Hydromorphic Soil. Guelph-Canada, 2016. 165f. Tese (Master of Science in Environmental Sciences). University of Guelph.

Torre, I. G., Losada, J. C., Tarquis, A. M. Multiscaling properties of soil images. Biosystems Engineering, Available online 21 December 2016, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.006>.

Vaz, C. M. P.; Crestana, S.; Mascarenhas, S.; Cruvinel, P. E.; Reichardt, K.; Stolf, R. Computed tomography Quantification of soil structural changes induced by cereal anchorage failure: Image analysis of thin sections. Division of Agricultural and Environmental Science, v 170, p. 363–372, Agosto 2007.

Wildenschild, D., Hopmans, J. W., Vaz, C. M. P., Rivers, M. L., Rikard, D., Christensen, B. S. B. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. Journal of Hydrology, V. 267, P. 285-297, n. 3–4, 15 October 2002.

Young, I. M., Crawford, I. M. Interactions and self-organization in the soil microbe complex. Science, v. 304, n.304, jun-2004, p. 1634 - 1637.

Yoshimura, E. M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. Radiation Physics. Revista Brasileira de Física Médica. V.3, n.1, p. 57-67, São Paulo (SP)- 2009.

## APÊNDICE A – RESULTADOS SIMULADOS DO SOFTWARE SPEKCALC

**Tabela A1: Filtro de Estanho**

Espectro	Tensão (kV)	Filtração Adicional* (mm Sn)	Energia Média (keV)	Energia Efetiva (keV)	Primeira CSR (mm Al)	Segunda CSR (mm Al)
$\Omega_{1, Sn}$	100	0,10	53,08190	36,94840	0,37850	0,61222
$\Omega_{2, Sn}$	125	0,10	60,93610	41,96650	0,49958	0,83779
$\Omega_{3, Sn}$	150	0,10	67,52870	47,03510	0,62543	1,00982
$\Omega_{4, Sn}$	175	0,10	73,38680	52,12710	0,74715	1,14119
$\Omega_{5, Sn}$	200	0,10	78,76620	57,05560	0,85988	1,24704
$\Omega_{6, Sn}$	225	0,10	83,80000	61,85910	0,96206	1,33657
$\Omega_{7, Sn}$	100	0,25	60,41020	41,39570	0,48556	0,85097
$\Omega_{8, Sn}$	125	0,25	70,35570	50,75740	0,71528	1,10782
$\Omega_{9, Sn}$	150	0,25	78,54600	59,29450	0,90961	1,25779
$\Omega_{10, Sn}$	175	0,25	85,77690	67,14040	1,06330	1,36781
$\Omega_{11, Sn}$	200	0,25	92,39190	74,23170	1,18685	1,45832
$\Omega_{12, Sn}$	225	0,25	98,56290	81,27830	1,28899	1,53657
$\Omega_{13, Sn}$	100	0,50	69,53110	53,29400	0,77545	1,11496
$\Omega_{14, Sn}$	125	0,50	81,39840	68,03190	1,07924	1,30424
$\Omega_{15, Sn}$	150	0,50	91,31450	79,58380	1,26568	1,43167
$\Omega_{16, Sn}$	175	0,50	100,13300	89,57490	1,39636	1,53210
$\Omega_{17, Sn}$	200	0,50	108,21600	99,26190	1,49712	1,61606
$\Omega_{18, Sn}$	225	0,50	115,75100	108,46600	1,57949	1,68852
$\Omega_{19, Sn}$	100	1,00	79,76610	74,54150	1,19197	1,27299
$\Omega_{20, Sn}$	125	1,00	93,34160	89,80900	1,39993	1,44257
$\Omega_{21, Sn}$	150	1,00	105,09200	102,28800	1,53073	1,56461
$\Omega_{22, Sn}$	175	1,00	115,60300	114,31300	1,62805	1,65960
$\Omega_{23, Sn}$	200	1,00	125,21500	124,58500	1,70675	1,73812
$\Omega_{24, Sn}$	225	1,00	134,13000	135,23200	1,77333	1,80538

\*Filtração inerente: 0,5 mm Be.

Tabela A2: Filtro de Alumínio

Espectro	Tensão (kV)	Filtração Adicional* (mm Al)	Energia Média (keV)	Energia Efetiva (keV)	Primeira CSR (mm Al)	Segunda CSR (mm Al)
$\Omega_{1, Al}$	100	0,10	46,37200	35,01980	0,33383	0,45409
$\Omega_{2, Al}$	125	0,10	52,00590	37,45690	0,39032	0,57106
$\Omega_{3, Al}$	150	0,10	56,98800	39,93430	0,45025	0,69087
$\Omega_{4, Al}$	175	0,10	61,55840	42,55410	0,51375	0,80835
$\Omega_{5, Al}$	200	0,10	65,85040	45,24040	0,58025	0,91989
$\Omega_{6, Al}$	225	0,10	69,93520	48,01640	0,64869	1,02349
$\Omega_{7, Al}$	100	0,25	46,63070	35,24070	0,33870	1,03372
$\Omega_{8, Al}$	125	0,25	52,29860	37,72610	0,39681	1,03372
$\Omega_{9, Al}$	150	0,25	57,30160	40,26880	0,45826	1,03372
$\Omega_{10, Al}$	175	0,25	61,88660	42,92600	0,52309	1,03372
$\Omega_{11, Al}$	200	0,25	66,18960	45,65190	0,59069	1,03372
$\Omega_{12, Al}$	225	0,25	70,28330	48,46680	0,65996	1,03372
$\Omega_{13, Al}$	100	0,50	47,05620	35,60170	0,34696	0,47429
$\Omega_{14, Al}$	125	0,50	52,77810	38,18540	0,40781	0,59703
$\Omega_{15, Al}$	150	0,50	57,81440	40,82120	0,47175	0,71985
$\Omega_{16, Al}$	175	0,50	62,42260	43,56690	0,53873	0,83788
$\Omega_{17, Al}$	200	0,50	66,74340	46,34100	0,60805	0,94835
$\Omega_{18, Al}$	225	0,50	70,85150	49,20600	0,67858	1,05006
$\Omega_{19, Al}$	100	1,00	47,88490	36,33570	0,36403	0,49960
$\Omega_{20, Al}$	125	1,00	53,70590	39,13560	0,43036	0,62866
$\Omega_{21, Al}$	150	1,00	58,80330	41,94860	0,49913	0,75418
$\Omega_{22, Al}$	175	1,00	63,45440	44,83460	0,57010	0,87215
$\Omega_{23, Al}$	200	1,00	67,80850	47,76120	0,64247	0,98093
$\Omega_{24, Al}$	225	1,00	71,94440	50,74990	0,71510	1,08024
$\Omega_{25, Al}$	100	1,50	47,92870	36,36940	0,36479	0,50081
$\Omega_{26, Al}$	125	1,50	54,59210	40,06550	0,45349	0,65905
$\Omega_{27, Al}$	150	1,50	59,74400	43,07640	0,52680	0,78627
$\Omega_{28, Al}$	175	1,50	64,43430	46,06300	0,60132	0,90355
$\Omega_{29, Al}$	200	1,50	68,81960	49,10440	0,67622	1,01043
$\Omega_{30, Al}$	225	1,50	72,98250	52,26320	0,75042	1,10741
$\Omega_{31, Al}$	100	2,00	49,44880	37,85290	0,39995	0,54934
$\Omega_{32, Al}$	125	2,00	55,43720	41,03060	0,47700	0,68797
$\Omega_{33, Al}$	150	2,00	60,63840	44,20120	0,55450	0,81607
$\Omega_{34, Al}$	175	2,00	65,36490	47,32370	0,63209	0,93224
$\Omega_{35, Al}$	200	2,00	69,78020	50,49300	0,70901	1,03715
$\Omega_{36, Al}$	225	2,00	73,96950	53,66850	0,78432	1,13196
$\Omega_{37, Al}$	100	2,50	50,18310	38,64740	0,41856	0,57330
$\Omega_{38, Al}$	125	2,50	56,24230	42,01050	0,50068	0,71528
$\Omega_{39, Al}$	150	2,50	61,48830	45,30970	0,58198	0,84361
$\Omega_{40, Al}$	175	2,50	66,24900	48,55360	0,66217	0,95843
$\Omega_{41, Al}$	200	2,50	70,69330	51,85310	0,74065	1,06141
$\Omega_{42, Al}$	225	2,50	74,90910	55,08210	0,81669	1,15423

\*Filtração Inerente: 0,5 mm Be.

Tabela A3: Filtro de Cobre

Espectro	Tensão (kV)	Filtração Adicional* (mm Cu)	Energia Média (keV)	Energia Efetiva (keV)	Primeira CSR (mm Al)	Segunda CSR (mm Al)
$\Omega_{1, Cu}$	100	0,10	51,72710	40,34030	0,45996	0,62376
$\Omega_{2, Cu}$	125	0,10	57,91520	44,11700	0,55249	0,77066
$\Omega_{3, Cu}$	150	0,10	63,22710	47,68790	0,64071	0,89765
$\Omega_{4, Cu}$	175	0,10	68,02270	51,16660	0,72486	1,00842
$\Omega_{5, Cu}$	200	0,10	72,03640	52,79160	0,76339	1,09548
$\Omega_{6, Cu}$	225	0,10	76,70270	57,94820	0,88095	1,19458
$\Omega_{7, Cu}$	100	0,25	57,34140	48,05670	0,64968	0,79969
$\Omega_{8, Cu}$	125	0,25	63,92780	52,99480	0,76850	0,94512
$\Omega_{9, Cu}$	150	0,25	69,54600	57,41260	0,86818	1,06125
$\Omega_{10, Cu}$	175	0,25	74,61390	61,53650	0,95513	1,15977
$\Omega_{11, Cu}$	200	0,25	79,29950	65,36070	1,03020	1,24617
$\Omega_{12, Cu}$	225	0,25	83,78670	69,35350	1,10377	1,32473
$\Omega_{13, Cu}$	100	0,50	62,71900	56,32480	0,84336	0,94106
$\Omega_{14, Cu}$	125	0,50	69,84370	62,16200	0,96807	1,07995
$\Omega_{15, Cu}$	150	0,50	76,01890	67,33130	1,06667	1,19034
$\Omega_{16, Cu}$	175	0,50	81,63830	71,94320	1,15005	1,28418
$\Omega_{17, Cu}$	200	0,50	86,88660	76,71550	1,22334	1,36694
$\Omega_{18, Cu}$	225	0,50	91,86050	81,29390	1,28929	1,44139
$\Omega_{19, Cu}$	100	1,00	68,51280	64,53480	1,01527	1,06829
$\Omega_{20, Cu}$	125	1,00	76,84440	71,68170	1,14468	1,21017
$\Omega_{21, Cu}$	150	1,00	84,26580	78,03590	1,24665	1,32352
$\Omega_{22, Cu}$	175	1,00	91,08080	84,64030	1,33210	1,41878
$\Omega_{23, Cu}$	200	1,00	97,45940	90,46590	1,40643	1,50157
$\Omega_{24, Cu}$	225	1,00	103,49900	96,65960	1,47253	1,57496
$\Omega_{25, Cu}$	100	1,50	72,15280	69,22810	1,10139	1,13813
$\Omega_{26, Cu}$	125	1,50	81,69630	77,61410	1,23926	1,28746
$\Omega_{27, Cu}$	150	1,50	90,27930	85,73500	1,34741	1,40502
$\Omega_{28, Cu}$	175	1,50	98,15630	93,31220	1,43670	1,50179
$\Omega_{29, Cu}$	200	1,50	105,50700	100,35400	1,51327	1,58446
$\Omega_{30, Cu}$	225	1,50	112,44400	108,57000	1,58051	1,65677
$\Omega_{31, Cu}$	100	2,00	74,89200	72,44240	1,15811	1,18644
$\Omega_{32, Cu}$	125	2,00	85,51960	82,08390	1,30427	1,34222
$\Omega_{33, Cu}$	150	2,00	95,07330	91,42360	1,41715	1,46218
$\Omega_{34, Cu}$	175	2,00	103,80300	99,92280	1,50875	1,55907
$\Omega_{35, Cu}$	200	2,00	111,91500	109,15900	1,58626	1,64080
$\Omega_{36, Cu}$	225	2,00	119,54000	116,75300	1,65363	1,71169
$\Omega_{37, Cu}$	100	2,50	77,09550	75,03760	1,20005	1,22295
$\Omega_{38, Cu}$	125	2,50	88,63720	86,11040	1,35274	1,38328
$\Omega_{39, Cu}$	150	2,50	98,96510	96,17200	1,46842	1,50413
$\Omega_{40, Cu}$	175	2,50	108,35600	105,52800	1,56088	1,60036
$\Omega_{41, Cu}$	200	2,50	117,04600	115,30400	1,63833	1,68089
$\Omega_{42, Cu}$	225	2,50	125,18700	124,44900	1,70522	1,75042

\*Filtração inerente: 0,5 mm Be.