

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS/FÍSICA

LOHANE TECH

**PROPRIEDADES DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO: INFLUÊNCIA DA
TEXTURA E DO TAMANHO DE AGREGADO DO SOLO**

PONTA GROSSA
2018

LOHANE TECH

**PROPRIEDADES DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO: INFLUÊNCIA DA
TEXTURA E TAMANHO DE AGREGADO DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências, área de concentração Física, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

Co-orientador: Prof. Dr. André Maurício Brinatti

PONTA GROSSA
2018

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

T255 Tech, Lohane
Propriedades de atenuação da radiação:
influência da textura e do tamanho de
agregado do solo/ Lohane Tech. Ponta
Grossa, 2018.
77f.

Dissertação (Mestrado em Ciências -
Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
Pires.

Coorientador: Prof. Dr. André Maurício
Brinatti.

1. Interação da radiação com a matéria.
2. Coeficiente de atenuação de massa do
solo. 3. Número atômico efetivo.
4. Densidade eletrônica. I. Pires, Luiz
Fernando. II. Brinatti, André Maurício.
III. Universidade Estadual de Ponta
Grossa. Mestrado em Ciências. IV. T.

CDD: 539.77

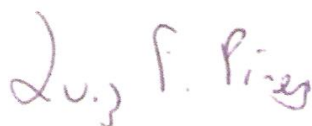
TERMO DE APROVAÇÃO

LOHANE TECH

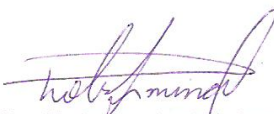
**"PROPRIEDADES DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO: INFLUÊNCIA DA
TEXTURA E DO TAMANHO DE AGREGADO DO SOLO".**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

Orientador:



Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
Departamento de Física, UEPG/PR



Prof. Dr. Robson André Armindo
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR



Prof. Dr. Gelson Biscaia de Souza
Departamento de Física, UEPG/PR

Ponta Grossa, 26 de fevereiro de 2018.

Dedico mais essa conquista

Aos meus exemplos de força,
Elizeu, Rosane, Maria, Arthur,
Vitória e Graciele.

Agradecimentos

Primeiramente, aos meus pais, pela vida, amor, carinho, compreensão e por serem meus exemplos de seres humanos e pais e por todo o apoio durante o decorrer do mestrado. Aos meus irmãos, Maria Eduarda e Arthur, por serem os anjos da guarda da minha vida. À minha avó por todas as orações e bênçãos e por também ser um exemplo de força e persistência. À toda minha família, que por mais maluca que seja, é uma das únicas que tenho para amar.

À minha família de melhores amigos, Layara, por me mostrar que a distância que nos separa não é motivo para ainda não sermos melhores amigos. À Ana Cláudia, por ser minha miga e me aturar todos os dias no nosso apartamento que a gente tornou um lar, onde ambas somos bem-vindas. À Janaína, por tantas chances dadas a nossa amizade, e por toda a paciência que tivemos que ter para chegarmos onde chegamos, somente nós sabemos por tudo que passamos. Ao André, por ser meu exemplo de profissional e de pessoa maravilhosa, que encanta e cativa a todos por onde passa, por todos os conselhos que me deu sobre homens e a vida, e por sempre elucidar com muita clareza minhas dúvidas e discussões sobre agronomia. Amo a todos e todas.

Aos amigos da família FASCA, o Prandel e Aline que me ajudaram muito nas medidas feitas na fluorescência de raios X. A Talita e a Jaque por sempre gostarem das minhas negas malucas e do meu cantinho do brigadeiro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, por todos os ensinamentos, discussões e puxões de orelha também, e por seu meu exemplo de Professor. Ao meu co-orientador, Prof. Dr. André Maurício Brinatti, pelos abraços, ensinamentos e discussões.

A todos os Professores que contribuíram para a minha formação durante toda minha vida escolar, desde que eu tinha três aninhos.

À minha psicóloga, que se tornou uma grande ajuda para que todo esse trabalho fosse concluído.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo auxílio.

“Hold still. I’ve never done this before, and there will be blood.”
Lisbeth Salander, *The girl with the dragon tattoo.*

Resumo

No presente trabalho foram analisadas 25 solos com diversas texturas, do estado do Paraná Brasil. Com o intuito de avaliar os parâmetros de interação da radiação com os solos, as amostras foram submetidas a análise semi-quantitativa por fluorescência de raios X (FRX) por dispersão de energia a fim de se obter os teores dos óxidos que compunham o solo. Dois tamanhos de partículas foram analisados, sendo eles: diâmetro de 45 μm , que é o padrão recomendado pelo fabricante do equipamento de FRX, e diâmetro de 2-1 mm. O teor dos óxidos, o coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ), a seção de choque molecular (σ_M), a seção de choque atômica (σ_A), a seção de choque eletrônica (σ_E), o número atômico efetivo (Z_{eff}) e a densidade eletrônica (N_{el}), foram analisadas para os 25 solos para os dois tamanhos de partículas. Os resultados mostraram diferenças nos teores de óxidos dos solos entre um tamanho de agregado e outro, constatando mudanças nas porcentagens dos óxidos de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 . Como consequência, houve alteração nos valores dos outros parâmetros analisados, as seções de choque, o número atômico efetivo e a densidade eletrônica. A seção de choque molecular e a densidade eletrônica mostrou dependência com o teor dos óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , que são encontrados em maior porcentagem nos solos arenosos e nos solos com textura franco, para os dois tamanhos de agregados. A seção de choque atômica mostrou dependência com o número total de unidades de fórmulas moleculares presentes na composição do solo. Já os parâmetros restantes, coeficiente de atenuação de massa, seção de choque eletrônica e número atômico efetivo mostraram dependência com o óxido Fe_2O_3 , que é encontrado em maior teor nas amostras com textura mais argilosa, para os dois tamanhos de agregados. Desta forma, observou-se dependência da textura e do tamanho de partículas ambas com a composição química elementar porque no primeiro caso, diferentes texturas são relacionadas a composição mineral e elementar nos diferentes solos e a segunda devido a conformação dos agregados nos dois conjuntos analisados.

Palavras-chave: Interação da radiação com a matéria. Coeficiente de atenuação de massa do solo. Número atômico efetivo. Densidade eletrônica.

ABSTRACT

This study analysed 25 soil samples from the State of Paraná, Brazil, with different textures. Aiming at evaluating the parameters of radiation interaction with the matter, the samples were submitted to the semi-quantitative analysis using energy dispersive X-ray (XRF) fluorescence, to obtain the content of oxides contained in the soil mixture. Two particle sizes were analysed, being: the 45 μm , which is the standard required by the manufacturer of the X-ray fluorescence equipment, and the 2-1mm. The oxide content, mass attenuation coefficient (μ/ρ), molecular cross section (σ_M), atomic cross section (σ_A), electronic cross section (σ_E), effective atomic number (Z_{eff}) and the electronic density (N_{el}) were analysed in the 25 samples and for the two particle sizes. The results showed differences in the soil oxide content between one aggregate size and the other, revealing changes in the percentage of the Al_2O_3 , SiO_2 and Fe_2O_3 oxides. With the difference observed, there was change in the values of other parameters under analysis, the cross sections, the effective atomic number and the electronic density. The molecular cross section and the effective electronic density showed dependence on the content of Al_2O_3 and SiO_2 oxides, which were found in higher percentages in sandy and loam soils, for both aggregate sizes. The atomic cross section was seen to present dependence on the total number of molecular formula units contained in the soil composition. While the remaining parameters, mass attenuation coefficient, electronic cross sections and the effective atomic number showed dependence on the Fe_2O_3 oxide, whose higher contents were found in the clay textured samples, for both aggregate sizes. In this way, it was observed texture and size dependency, both with the elementary chemical composition because in the first case, different textures are related to elementary and mineral composition in the different soils and the second due to the conformation of the aggregated in both analyzed arrays.

Key-words: radiation interaction with matter. Soil mass attenuation coefficient. Effective atomic number. Electronic density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: gráficos de variação do coeficiente de atenuação de massa parcial (efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares) e total em função da energia para o elemento Fe.	25
Figura 2.2: mapa do Paraná apresentando a localização aproximada das regiões onde foram coletadas as amostras de solo.	28
Figura 2.3: triângulo de classe textural indicando a distribuição de textura dos 25 solos estudados.	29
Figura 2.4: variação do coeficiente de atenuação de massa ($\mu\rho$) para os 25 solos estudados no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 μm	35
Figura 2.5: variação da seção de choque molecular (σM) para os 25 solos estudados no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm	36
Figura 2.6: variação da seção de choque atômica (σA) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm	37
Figura 2.7: variação da seção de choque eletrônica (σE) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm	38
Figura 2.8: variação do número atômico efetivo (Z_{eff}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm	39
Figura 2.9: variação da densidade eletrônica (N_{el}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm	41
Figura 3.1: variação do coeficiente de atenuação de massa ($\mu\rho$) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	63
Figura 3.2: variação da seção de choque molecular (σM) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	64
Figura 3.3: variação da seção de choque atômica (σA) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	66
Figura 3.4: variação da seção de choque eletrônica (σE) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	67
Figura 3.5: variação do número atômico efetivo (Z_{eff}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	68
Figura 3.6: variação da densidade eletrônica (N_{el}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: informações sobre os teores da fração argila, fração silte e fração areia para os 25 solos estudados e sua separação por classe textural.	29
Tabela 2.2: teores dos três óxidos mais abundantes em porcentagem, para os 25 solos, para o diâmetro de 45 µm com seus respectivos desvios padrão da média.	32
Tabela 2.3: valores dos coeficientes de atenuação de massa ($\mu\rho$) para os 25 solos, para o diâmetro de 45 µm com seus respectivos desvios padrão da média (Dpm) para as energias do ^{241}Am e do ^{137}Cs	33
Tabela 2.4: coeficientes de atenuação de massa ($\mu\rho$) para os 25 solos, para o diâmetro de 45 µm com seus respectivos desvios padrão da média (Dpm) para as duas energias do ^{60}Co	34
Tabela 2.5: valores máximos e mínimos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 µm.	42
Tabela 2.6: valores máximos e mínimos para as duas energias do ^{60}Co com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 µm.	43
Tabela 3.1: informações sobre os teores da fração argila, fração silte e fração areia para os 25 solos estudados e sua separação por classe textural.	52
Tabela 3.2: teores dos principais óxidos (%) para os solos do grupo das Argilosas 1, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.	56
Tabela 3.3: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das Argilosas 2, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.	57
Tabela 3.4: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das muito argilosas, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.	57
Tabela 3.5: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das Francos, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.	58
Tabela 3.6: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Argilosas 1 para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 µm e 2-1 mm.	59
Tabela 3.7: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Argilosas 2 para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 µm e 2-1 mm.	60
Tabela 3.8: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Muito argilosas para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 µm e 2-1 mm.	61

Tabela 3.9: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Francos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm e 2-1 mm.	62
Tabela 3.10: valores máximos e mínimos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.	70

LISTA DE SÍMBOLOS

μ/ρ : coeficiente de atenuação de massa.

σ_M : seção de choque molecular.

σ_A : seção de choque atômica.

σ_E : seção de choque eletrônica.

Z_{eff} : número atômico efetivo.

N_{el} : densidade eletrônica efetiva.

Sumário

1. Introdução	15
Objetivos gerais	17
Referências	17
2. Influência da textura nos parâmetros de interação da radiação com o solo	20
Resumo	20
2.1. INTRODUÇÃO	21
2.2. TEORIA	23
2.3. METODOLOGIA	27
2.3.1. Coleta de amostras e preparação	27
2.3.2. Análise elementar	30
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
Conclusão	43
Referências	44
3. Influência do tamanho de agregados de solo nas propriedades de atenuação de radiação	48
Resumo	48
3.1. INTRODUÇÃO	50
3.2. METODOLOGIA	51
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
Conclusão	72
Referências	72
4. Considerações finais e trabalhos futuros	76

1. Introdução

Os estudos da física aplicada a solos relacionando o uso da radiação ionizante e suas fontes possibilitaram o avanço de diversos métodos de análise desse meio poroso, aliado a outras técnicas já existentes. Tais tipos de análises oferecem vantagens, como por exemplo, o tempo de análise, análise simultânea e boa resolução. Possuem caráter não destrutivo e são sensíveis a pequenas mudanças de densidade e umidade (CRESTANA et al., 1986).

A absorção e o espalhamento de raios gama e raios X dependem do número atômico e da densidade do material absorvente. Técnicas como a tomografia computadorizada e a atenuação de raios gama baseiam-se no princípio da atenuação da radiação interagindo com a composição química de materiais heterogêneos ou homogêneos. Os principais efeitos de absorção são o efeito fotoelétrico, predominante na região de baixas energias, o efeito Compton, predominante nas energias intermediárias, e a produção de pares, predominante na região de altas energias (KAPLAN, 1962; KNOLL, 2010; COREY et al., 1971).

Geralmente os atributos físicos do solo que são extraídos da técnica de atenuação de raios gama são a densidade do solo e a umidade volumétrica. No entanto, a técnica tem sido utilizada para análises de curva de retenção da água no solo, no estudo de macro e microporosidade, condutividade hidráulica do solo, porosidade total, entre outras (BACCHI et al., 1998; ELLIOT et al., 2007; OLIVEIRA et al., 1998; PIRES et al., 2005; PIRES; MEDHAT, 2016; ROGASIK et al., 1999; VAZ et al., 1989; FERREIRA et al., 2017).

Para um melhor estudo da absorção e espalhamento de raios gama, ou raios X, pela matéria é necessária uma análise detalhada dos parâmetros de interação da radiação com a matéria. O coeficiente de atenuação de massa representa a probabilidade de um fóton interagir com a matéria por unidade de comprimento (UN et al., 2014).

Através da obtenção experimental do coeficiente de atenuação, que pode ser de massa ou linear, o último representado pela razão entre o coeficiente linear e a densidade, é possível a obtenção de diferentes parâmetros de

interesse na área de física aplicada a solos. A determinação experimental desse parâmetro nuclear requer uma série de cuidados (CESÁREO et al., 1994; APOLLONI & RIOS, 1994; CONNER et al., 1970). A obtenção do coeficiente de atenuação de massa pode também ser feita computacionalmente, por meio do programa XCOM, desenvolvido por Berger e Hubbell (1987, 1999), que calcula seções de choque e coeficientes de atenuação de massa total com espalhamento coerente e incoerente, para qualquer elemento, composto e mistura, a energias de 1 keV até 100 GeV (MEDHAT, 2011). Ainda existem outros métodos para a medida do coeficiente de atenuação de massa baseados em simulação de Monte Carlo, os quais não serão abordados neste trabalho.

Como não é possível associar um único número atômico e uma única densidade a compostos e misturas, Hine, em 1952, propôs o cálculo do número atômico efetivo e da densidade eletrônica. Para o cálculo dessas quantidades para misturas, como é o caso de solos, é comumente utilizado do coeficiente de atenuação de massa, que pode ser obtido experimentalmente ou teoricamente. De posse desse valor, é possível obter então as seções de choque molecular, atômica e eletrônica, que são essenciais nos cálculos da densidade eletrônica e do número atômico efetivo (MANOHARA et al., 2008; DEMIR et al., 2013; MEDHAT; PIRES, 2016).

O solo é um sistema trifásico, sendo a sua fase sólida o componente permanente do solo, ou seja, pode-se imaginar este meio sem ar, sem água, ou sem ambos, mas dificilmente sem a fase sólida. Essa fase consiste das partes mineral e orgânica possuindo diferentes tamanhos e formatos, assim como distintas composições químicas. É possível agrupar e classificar tais partículas do solo de acordo com o seu tamanho e caracterizar o meio poroso em termos das relativas proporções de tais grupos. São esses atributos físicos da fase sólida do solo que determinam a natureza e a deformação do solo, sua geometria interna e porosidade, sua interação com fluidos e solutos, assim como a compressibilidade, força e regime termal (HILLEL, 2004, LEPSCH, 2010).

O termo textura do solo se refere ao intervalo de partículas no solo, ou seja, se esse intervalo é diversificado ou não. O termo carrega duas conotações: qualitativa e quantitativa. Qualitativamente é como se sente o solo ao tato, áspero e arenoso ou suave ao toque. Quantitativamente, a porção relativa de

cada tamanho de partícula que o solo carrega em sua composição. Solos com diferentes texturas possuem diferentes quantidades dos tamanhos de agregados e esses possuem composições químicas diferentes, e, portanto irão atenuar a radiação incidente de maneira distinta (HILLEL, 2004; VITORINO et al., 2003).

Procurando relacionar os tamanhos das partículas, as texturas e as composições químicas dos diferentes solos analisados, o presente trabalho de dissertação está organizado em capítulos, nos quais são abordados os parâmetros de interação da radiação com os solos, relacionando seus valores com a composição química e a textura do solo.

Objetivos gerais

Os objetivos gerais no presente estudo foram:

- Analisar o conteúdo de óxidos de solos do Paraná;
- Calcular o coeficiente de atenuação de massa de todos os solos analisados utilizando a análise elementar;
- Determinar a partir do coeficiente de atenuação de massa a seção de choque molecular (σ_M), a seção de choque atômica (σ_A), a seção de choque eletrônica (σ_E), o número atômico efetivo (Z_{eff}) e a densidade eletrônica (N_{el});
- Verificar a variação destes parâmetros para as quatro energias de raios gama (~ 60 keV – ^{241}Am ; ~ 662 keV – ^{137}Cs ; $\sim 1,173$ e $\sim 1,332$ MeV – ^{60}Co) mais utilizadas em pesquisas na área de física aplicada a solos;
- Avaliar o efeito de dois tamanhos de agregados do solo no cálculo dos parâmetros de interação da radiação com os solos.

Referências

APPOLONI, C.R.; RIOS E. A. mass attenuation coefficients of Brazilian Soils in the range 10-1450 keV. **Applied Radioation and Isotopes**, v. 45, p. 287-291, 1994.

BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K ; OLIVEIRA, J. C. M. ; NIELSEN, D. R. . Gamma-Ray Beam Attenuation As An Auxiliary Technique For Evaluation Of The Soil Water Retention Curve. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n.3, p. 498-502, 1998.

CESAREO, R. et al. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10-300 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, n^o 5, p. 613-620, 1994.

CONNER, A. L. et al. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. **Physical review A general physics**, v.1, n^o 3, p. 539-544, 1970.

COREY, J. C. et al. Measurement of attenuation coefficients of ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am gamma rays for soil density and water content determinations. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v. 35, p. 251-219, 1971.

CRESTANA, S. et al. Using a computed tomography miniscanner in soil science. **Soil Science**, v. 142, n^o 1, p. 56-61, 1986.

DEMIR, D. et al. Measurement of the effective atomic number of Fe_xCr_{1-x} and Fe_xNi_x alloys using scattering of gamma rays. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 581, p. 213-216, 2013.

ELLIOT, T. R. et al. A comparison of optical and X-ray technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, v. 141, p. 60-70, 2007.

FERREIRA, T. R. et al. Surface liming effects on soil radiation attenuation properties. **Journal of Soils Sediments**. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1866-2>.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Copyright 2004, Elsevier Science (USA).

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1995.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. Copyright 1962, Addison – Wesley Publishing Company, Inc. (USA).

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. Copyright 2010, John Wiley & Sons, Inc. (USA).

MANOHARA, S. R. et al. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 266, p. 3906-3912, 2008.

MEDHAT, M. E. Studies of effective atomic numbers and electron densities in different solid state track detectors in the energy range 1 keV-100GeV. **Annals of Nuclear Energy**, v. 38, p. 1252-1263, 2011.

MEDHAT, M. E.; PIRES L. F. Importance of photo atomic cross section for studying physical properties of different types of soil. **X Ray Spectrometry**, v. 45, p. 202-206, 2016.

OLIVEIRA, J. C.M. et al. Soil Structure evaluated by gamma ray attenuation. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 127-133, 1998.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, Netherlands, v. 82, n.1, p. 89-97, 2005.

ROGASIK, H. et al. Discrimination of Soil Phases by Dual Energy X-ray Tomography. **Soil Science American Journal**, v. 63, p. 741-751, 1999.

UN, A. et al. The directed- Z_{eff} software for direct calculation of mass attenuation coefficient, effective atomic number and effective electron number. **Annals of Nuclear Energy**, v. 65, p. 158-165, 2014.

VAZ, C. M. P. et al. Using a Computed Tomography Miniscanner for Studying Tillage induced soil compactation. **Soil Technology**, v. 2, p. 313-321, 1989.

VITORINO, A. C. T. et al. mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, nº 1, p. 133-141, 2003.

2. Influência da textura nos parâmetros de interação da radiação com o solo

Resumo

O uso da radiação e suas fontes radioativas tem sido de grande importância para a resolução de problemas nas mais diversas áreas da ciência. Na física do solo ela tem sido empregada com o intuito de estudar de maneira qualitativa e quantitativa as propriedades físicas do solo. Com o uso crescente da radiação é importante o estudo de sua interação com a matéria. Neste trabalho foram analisados diferentes parâmetros de interação da radiação, obtidos teoricamente através do programa XCOM, como, coeficiente de atenuação massa, seções de choque, número atômico e densidade eletrônica efetiva. As análises foram feitas para 25 solos, do estado do Paraná, Brasil, dando ênfase nas energias dos raios gama das principais fontes radioativas utilizadas na física aplicada a solos, que foram as energias do ^{241}Am , ^{137}Cs e as duas energias do ^{60}Co . As análises mostram grande dependência dos parâmetros com a textura e logo, com a composição química dos solos estudados, principalmente dos óxidos Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , e com o conteúdo de argila e silte dos solos. Os parâmetros, μ/ρ , σ_E e Z_{eff} , mostraram dependência com o teor de Fe_2O_3 , contidos nos solos mais argilosos, devido ao elemento Fe possuir uma atenuação mais acentuada devido ao seu alto número atômico e peso atômico, em comparação com os demais elementos que constituem os óxidos restantes. A densidade eletrônica N_{el} mostrou dependência com os óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , contidos em solos francos, devido às suas concentrações excederem a densidade de outros elementos, como o Fe do óxido Fe_2O_3 . A seção de choque molecular mostrou dependência com o peso molecular dos elementos que constituem a composição química das texturas das amostras de solo, assim como a seção de choque atômica mostrou dependência com o número total de unidades de fórmulas moleculares dos compostos que compõe as amostras de solo.

Influence of texture on the interaction parameters of radiation with matter

Abstract

The use of radiation and its radioactive sources has been of great importance for the resolution of problems in the most diverse areas of sciences. In the soil physics, it has been employed with the purpose to study qualitatively and quantitatively the soil physical properties. With the increasing use of radiation, it is relevant to study its interaction with the matter. This study analyzed different radiation interaction parameters, obtained theoretically through the program XCom, such as mass attenuation coefficient, cross sections, effective atomic numbers and effective electronic densities). The analyses were carried out in 25 soils, from the State of Paraná, Brazil, with emphasis on gamma rays of the main radioactive sources used in physics applied to soils, which were the ^{241}Am , ^{137}Cs energies and the two ^{60}Co energies. The analyses revealed great dependence of the parameters on the texture and, therefore, with the chemical composition of the soils under study, mainly the Al_2O_3 , SiO_2 and Fe_2O_3 oxides and with the clay and silt contents in the soil. The parameters μ/ρ , σ_E and Z_{eff} showed dependence on the Fe_2O_3 content, contained in clayey soils, because Fe presented a more accentuated attenuation due to its high atomic number and atomic weight when compared with the other elements that are part of the remaining oxides. The electronic density N_{el} was seen to be dependent on the Al_2O_3 and SiO_2 oxides contained in loam soils, due to the fact that their concentrations exceeded that of the other elements density, such as Fe in the Fe_2O_3 oxide. The molecular cross section showed dependence on the molecular weight of the elements contained in the chemical composition of the soil sample textures, while the atomic cross section showed dependence on the total number of the molecular formula units of the compounds that made up the soil samples.

2.1. INTRODUÇÃO

O uso de radiação ionizante tem sido de extrema importância nas diversas áreas da ciência como na física aplicada a solos (CUNHA E SILVA et al.,2000),

no estudo de polímeros (KUCUK et al., 2013) e na indústria de materiais de construção (KURUDIREK et al., 2010). Na agricultura, as técnicas que utilizam atenuação da radiação têm sido empregadas visando estudar de maneira qualitativa e quantitativa as propriedades físicas do solo. Essas técnicas são interessantes por serem rápidas, possuírem boa resolução e caráter não destrutivo (COSTA et al., 2014; MEDHAT; PIRES, 2016; PIRES et al., 2005; PIRES et al., 2014; GOPAL, 1973; KUMAR et al., 1996; SAHOTA et al., 1988).

Comumente as propriedades físicas do solo obtidas utilizando a técnica de atenuação de raios gama são a densidade do solo e a umidade volumétrica. No entanto, a técnica tem sido usada também em determinações da condutividade hidráulica do solo, textura, porosidade total, curva de retenção, microporosidade e macroporosidade (BACCHI et al., 1998; ELLIOT et al., 2007; OLIVEIRA et al., 1998; PIRES et al., 2005; PIRES et al., 2016; ROGASIK et al., 1999; VAZ et al., 1989).

Para um melhor entendimento dos processos de espalhamento e absorção da radiação no solo é de grande importância o estudo dos parâmetros de interação da radiação com a matéria (SINGH et al., 2015; UN et al., 2012). O espalhamento e a absorção de fótons no material dependem da energia do fóton incidente, do número atômico e da densidade da amostra com a qual estão interagindo. Portanto, o coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ), o número atômico efetivo (Z_{eff}) e a densidade eletrônica (N_{el}) são parâmetros muito importantes quando se trata do estudo da interação da radiação com a matéria (DEMIR et al., 2013).

Além da estrutura do solo, a sua textura é uma das características mais importantes para o entendimento desse meio poroso. Ela está relacionada com a proporção de três grupos de partículas com tamanhos diferentes (fração argila, fração silte e fração areia), sendo que a fração argila é a menor das partículas e a areia, a maior delas (HILLEL, 2004). Solos possuindo diferentes texturas terão composições químicas diversificadas e irão atenuar a radiação incidente de maneira distinta. Por este motivo é importante um estudo detalhado dos parâmetros de interação da radiação para solos com diferentes texturas.

Tendo como base os diversos trabalhos publicados no estudo da interação da radiação com a matéria para diversos componentes, misturas e

elementos (AKKURT et al., 2005; BIRGANI et al., 2012; DEMIR et al., 2013; KUCUK et al., 2013; MANOHARA et al., 2007; TUROVTSEV et al., 2012), realizou-se uma análise dos principais parâmetros de interação da radiação com os solos, sendo eles: coeficiente de atenuação de massa, as seções de choque, o número atômico efetivo e a densidade eletrônica. Um total de 25 solos de diferentes cidades do estado do Paraná, Brasil, foram estudados, com ênfase na análise das energias das fontes de raios gama mais utilizadas nas pesquisas de física aplicada a solos, sendo elas, ~60 keV (^{241}Am), ~662 keV (^{137}Cs), ~1,27 e ~1,33 MeV, ambas do (^{60}Co). O objetivo foi obter um melhor entendimento dos processos de espalhamento e absorção de raios gama para solos possuindo diferentes texturas.

2.2. TEORIA

Os raios gamas interagem com detectores e materiais absorvedores por meio de três processos principais: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. O coeficiente de atenuação de massa e as seções de choque apresentam variação com a energia do fóton incidente, isto é devido a dependência do parâmetro com os efeitos citados. Estes apresentam dependência diferente com o número atômico do elemento estudado. Desta forma, a composição química do solo irá influenciar diretamente os parâmetros de interação da radiação.

No efeito fotoelétrico um raio gama pode interagir com um elétron ligado ao átomo de uma forma que ele perca toda a sua energia. Uma parte da energia é utilizada para superar a energia de ligação do átomo e outra parte é tida como energia cinética para o elétron ejetado. Esse processo é chamado de absorção fotoelétrica.

A probabilidade de que a absorção fotoelétrica ocorra depende da energia do raio gama, da energia de ligação do elétron e do número atômico do átomo. A equação a seguir traz a probabilidade com que este efeito pode ocorrer (KAPLAN, 1962).

$$\sigma_{EF} = \phi_0 Z^{4-5} \left(\frac{1}{137} \right)^4 4\sqrt{2} \left(\frac{m_0 c^2}{h\nu} \right)^{7/2} \quad (2.2.1)$$

Onde, ϕ_0 é uma unidade conveniente para medir a seção de choque e representa a seção de choque para o espalhamento de fótons de baixa energia por um elétron livre em repouso, Z^{4-5} é o número atômico do material estudado e o expoente pode variar de 4,0 a 4,8, $m_0 c^2$ é a energia de repouso do elétron e $h\nu$ é a energia do fóton incidente.

A equação é apenas aproximada, e com o aumento da energia a probabilidade com o que efeito ocorra diminui, pois o efeito é dominante nas regiões de baixas energias.

O efeito Compton interage com elétrons livres ou fracamente ligados aos átomos. O produto final da interação, ao colidir com um elétron, é um elétron livre e um raio gama espalhado com comprimento de onda menor. A probabilidade de interação para este efeito depende apenas da densidade do material com o qual está interagindo (KAPLAN, 1962). A equação a seguir traz a dependência do efeito com o número atômico do material estudado.

$$\sigma_{EC} = \rho N_A \frac{Z}{A} \tau \quad (2.2.2)$$

Onde, ρ é a densidade do material estudado, N_A é o número de Avogadro, Z é o número atômico, A é o peso atômico e τ é a seção de choque por elétron para a remoção dos fótons do feixe incidente por espalhamento.

Na produção de pares a quantidade mínima de energia de fóton de 1,02 MeV é requerida para a criação de um par elétron – pósitron. Se um fóton de energia maior colide com o átomo e forma o par, a energia remanescente é tida como cinética para o elétron e para o pósitron formado. A probabilidade com que o efeito ocorra e a sua dependência com o número atômico é mostrada na equação a seguir (KAPLAN, 1962):

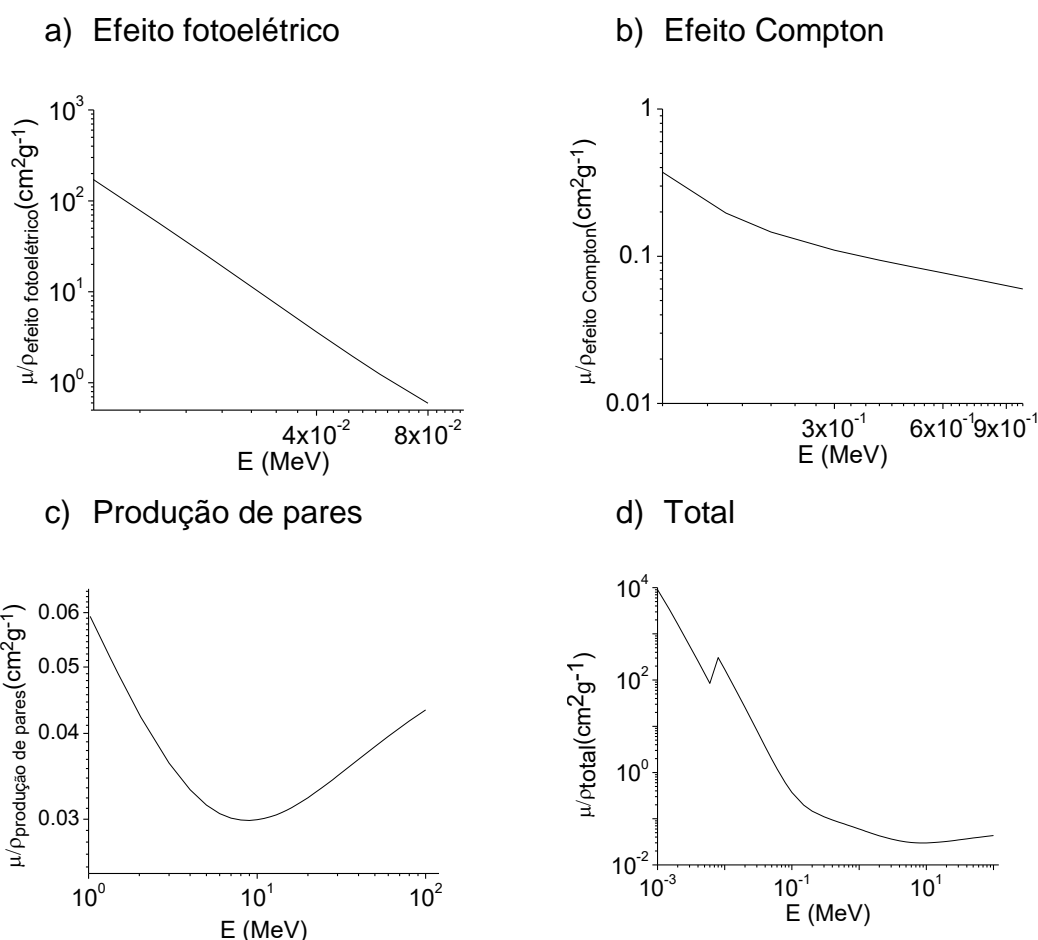
$$\sigma_{PP} = \frac{Z^2}{137} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \quad (2.2.3)$$

Onde, Z é o número atômico, m_0c^2 é a energia de repouso do elétron e e é a carga do elétron.

As probabilidades apresentadas anteriormente por meio das equações são chamadas seções de choque. Elas são uma maneira de expressar numericamente a probabilidade de que um certo tipo de átomo faça com que um fóton, com dada energia, sofra uma determinada interação. A seção de choque total é a soma de todos os efeitos realizados por um fóton com uma dada energia (EISBERG, 1994).

A figura 2.1 traz os gráficos de variação do coeficiente de atenuação de massa parcial (efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de pares) e total em função da energia para o elemento Fe. Os valores das seções de choque foram obtidas teoricamente pelo programa XCOM e simuladas no OriginPro 8.

Figura 2.1: gráficos de variação do coeficiente de atenuação de massa parcial (efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares) e total em função da energia para o elemento Fe.



Fonte: a autora.

Hine propôs em 1952 o cálculo do número atômico efetivo e da densidade eletrônica para compostos e misturas. Essas quantidades são obtidas, geralmente, a partir do conhecimento do coeficiente de atenuação de massa do material estudado.

Para o cálculo do número atômico efetivo e a densidade eletrônica de compostos e misturas, é preciso antes de tudo conhecer as seções de choque molecular, atômica e eletrônica. Nesse sentido, utiliza-se da seguinte equação para o cálculo da seção de choque de molecular:

$$\sigma_m = \frac{\mu M}{\rho N_A} \quad (2.2.4)$$

Onde μ/ρ é o coeficiente de atenuação de massa, N_A é o número de Avogadro e a quantidade, $M = \sum_i n_i A_i$ depende da soma do peso molecular do i – ésimo elemento do composto ou mistura, A_i , e da multiplicação com n_i , que é o número total de unidades de fórmulas moleculares do composto.

A seção de choque atômica é obtida dividindo a seção de choque molecular pelo número total de unidades de fórmulas moleculares do composto:

$$\sigma_a = \sigma_m \frac{1}{\sum_i n_i} \quad (2.2.5)$$

Onde a quantidade $\sum_i n_i$, que é a soma do número total de unidades de fórmulas moleculares do composto é ainda multiplicada pelo número de átomos que compõe a fórmula molecular.

Para a obtenção da seção de choque eletrônica utiliza-se da seguinte equação:

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu_i}{\rho} \right) \quad (2.2.6)$$

Onde f_i é a abundância fracional, ou fração atômica do i -ésimo elemento que compõe a mistura. É, geralmente, chamado de fração molar em relação ao número total de mol dos elementos no composto.

Combinando as equações (2.2.5) e (2.2.6) obtém-se a equação para o número atômico efetivo:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (2.2.7)$$

E para a densidade eletrônica:

$$N_e = \frac{\mu/\rho}{\sigma_e} \quad (2.2.8)$$

2.3. METODOLOGIA

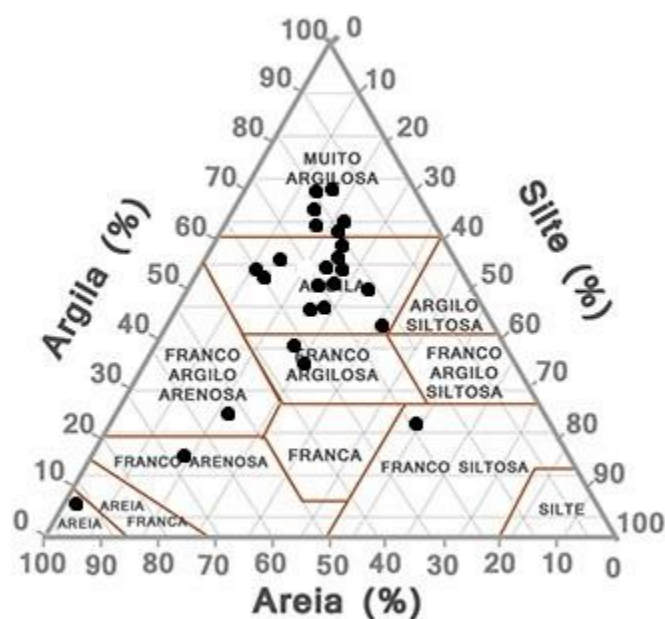
2.3.1. Coleta de amostras e preparação

As amostras de solo foram coletadas em diferentes estações experimentais do estado do Paraná, Brasil. O mapa na sequência traz os pontos localizando aproximadamente as regiões onde as amostras foram coletadas (Figura 2.1). O triângulo de classe textural traz a distribuição das diferentes texturas analisadas (Figura 2.2). As informações, dos teores da fração argila, fração silte e fração areia, de acordo com a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBSC), referentes a cada solo, estão contidos na Tabela 2.1.

Para a análise da granulometria destes solos foi utilizado o método da pipeta o qual foi efetuado no laboratório de solos no IAPAR (Ponta Grossa-PR). Este método se baseia na diferença da velocidade de queda das partículas que compõe o solo em uma solução dispersante. É realizada a dispersão do solo com agentes químicos, geralmente NaOH. Pode ser utilizada a dispersão mecânica também por agitação rápida, lenta ou ultra-som.

A separação da fração areia é feita, geralmente, por peneiramento e para as frações mais finas, silte e argila, é feita a decantação. Utilizando-se da lei de Stokes é estimado um tempo de sedimentação para a partícula de silte, pipetando-se um volume que sobra desta suspensão, e secando em estufa o restante que corresponde à fração argila. O silte é proporcional ao complemento dos percentuais para 100%, obtido por diferença entre as outras frações (EMBRAPA, 1997).

Figura 2.3: triângulo de classe textural indicando a distribuição de textura dos 25 solos estudados.



Fonte: Nutrição de Safras.²

Todos os solos foram secos ao ar e peneirados em malha de 45 µm (Bertel Indústria Metalúrgica LTDA) visando a análise de partículas menores que este diâmetro. Durante as análises as amostras foram mantidas numa estufa a 45°C para se evitar a absorção de umidade do meio.

Tabela 2.1: informações sobre os teores gravimétricos da fração argila, fração silte e fração areia para os 25 solos estudados e sua separação por classe textural.

Origem	Legenda	Textura	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Argilosas 1					
Ibiporã	EEl AO	Argilosa	59	17	24
Guarapuava	EEG A	Argilosa	53	17	30
Ibiporã	EEl CC	Argilosa	50	22	28
Mercedes	MSM	Argilosa	47	29	24
Ponta Grossa	PG	Argilosa	50	33	17
	PDMP				
Santa Helena	SH 0-20	Argilosa	51	22	27
Argilosas 2					
Ibiporã	EEl PB	Argilosa	54	20	26
Irati	EEl M	Argilosa	54	12	34
Ibiporã	EEl C	Argilosa	47	24	29
Palmas	EEl P	Argilosa	54	24	22
	PDM				
Rio Azul	CRAA	Argilosa	41	17	42

Continua na próxima página

² Disponível em: <http://www.nutricaoadesafras.com.br/ambientes-de-producao-como-ferramenta-de-productividade-para-cana-de-acucar-ambicana>. Acesso em setembro de 2017.

Origem	Legenda	Textura	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
São Mateus do Sul	SMS N	Argilosa	58	24	18
Muito argilosas					
Itaipulândia	I 02-0	Muito argilosa	70	17	13
Santa Tereza do Itaipu	STI	Muito argilosa	62	22	16
Continua na próxima página.					
Londrina	L T-S	Muito argilosa	66	16	18
Pato Bragado	PB 0-20	Muito argilosa	62	20	18
Pato Branco	EEPB PD	Muito argilosa	69	18	13
Ponta Grossa	PGC MP	Muito argilosa	61	22	17
Francos					
Cerro Azul	CA	Franco-siltosa	23	56	21
Joaquim Távora	EEJT	Franco-arenosa	18	18	64
Lapa	LP	Franco-argilo-arenosa	25	21	54
Paranavaí	PJ	Areia	8	1	91
Morretes	EEM MP	Franco-argilosa	38	27	35
Guaíra	G 0-20	Franco-argilosa	59	15	26
Rio Azul	CRAF	Franco-argilosa	36	34	30

2.3.2. Análise elementar

O equipamento empregado na análise elementar foi o espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia (Shimadzu, modelo EDX-720). As medidas foram realizadas no laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA). O equipamento tem um tubo de Ródio (Rh) e sua voltagem vai de 5 a 50 kV e o filamento opera com correntes de 1 a 1000 μ A. O detector é um semicondutor de Si(Li), que trabalha com resfriamento por nitrogênio líquido a -196°C .

As amostras de solo foram maceradas em pistilos e colocadas em um porta-amostra, fornecido pelo fabricante do equipamento e seladas com mylar (com espessura de 6 μm). O tempo gasto para obter o espectro foi de 100 s, nas bandas de energia de Sódio a Escândio (Na-Sc) (15 kV) e do Titânio a Urânio (Ti-U) (50 kV). Todas as medidas foram feitas com pressão de 30 Pa no modo semi-quantitativo em vácuo (PIRES et al., 2014).

Foram realizadas três medidas experimentais de todos os parâmetros analisados. Os resultados dessas análises elementares foram usados para

calcular os valores do coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) dos solos via programa XCOM (HUBBELL; SELTZER, 1995). O programa utiliza como entrada de dados a composição química das amostras. Com isso, ele gera as seções de choque para o efeito fotoelétrico, espalhamentos coerente e incoerente, assim como produção de pares e os coeficientes de atenuação de massa total, para qualquer elemento, composição e mistura, para energias que variam de 1keV a 100 GeV (MEDHAT et al., 2014).

No presente trabalho, o intervalo de energia estudado foi de 1 keV a 100 MeV, dando ênfase para quatro energias específicas de fótons, sendo elas: ~60 keV, que corresponde à energia do ^{241}Am , ~662 keV, correspondente à energia do ^{137}Cs e ~1,173 e ~1,332 MeV que correspondem às duas energias do ^{60}Co . Essas quatro energias representam as mais utilizadas em pesquisas científicas na área de física aplicada a solos.

Com a intenção de melhorar a apresentação dos resultados e discussão, os 25 solos foram separados em quatro grupos (Tabela 2.1), usando como critério de separação as suas classes texturais.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As porcentagens dos três óxidos mais comuns para os 25 solos, para o diâmetro de 45 μm , estão apresentadas na Tabela 2.2. Para os solos com textura argilosa e muito argilosa, o óxido mais abundante é o Al_2O_3 , seguidos pelos óxidos de SiO_2 e Fe_2O_3 . Já na amostra com textura arenosa e nas amostras franco, o óxido mais abundante é o SiO_2 , seguido pelos óxidos de Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Observou-se maior concentração do Fe_2O_3 nas amostras com textura argilosa e muito argilosa, com relação às outras texturas. Resultado similar foi observado em trabalhos com solos coesos. Na análise da amostra total foram encontradas menores porções do óxido SiO_2 , e maiores concentrações de Fe_2O_3 em solos mais argilosos (PRANDEL et al., 2014; LEPSCH, 2010).

Os coeficientes de atenuação de massa total contendo o efeito de espalhamento coerente, gerados pelo XCOM para as quatro energias de interesse estão apresentados na Tabela 2.3 e 2.4.

Tabela 2.2: teores dos três óxidos mais abundantes em porcentagem, para os 25 solos, para o diâmetro de 45 μm com seus respectivos desvios padrão da média.

Amostras			
	Al_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)
Argilosas 1			
EEI AO	33,25 (0,01)	32,89 (0,43)	27,22 (0,11)
EEG A	44,05 (0,32)	22,14 (0,17)	26,52 (0,16)
EEI CC	37,56 (0,48)	32,57 (0,46)	24,36 (0,01)
MSM	31,75 (0,67)	33,66 (1,02)	27,23 (0,18)
PG PDMP	58,11 (0,40)	22,02 (0,30)	14,60 (0,25)
SH 0-20	34,63 (0,71)	32,03 (0,15)	26,15 (0,41)
Argilosas 2			
EEI PB	35,39 (0,44)	31,66 (0,23)	26,27 (0,47)
EEI M	48,38 (0,21)	40,43 (0,50)	8,05 (0,16)
EEI C	36,07 (0,38)	32,08 (0,41)	25,84 (0,57)
EEP PDM	42,07 (0,82)	30,78 (0,32)	19,53 (0,25)
CRAA	40,84 (0,48)	31,47 (0,13)	22,06 (0,23)
SMS N	45,16 (0,32)	38,18 (0,21)	12,21 (0,10)
Muito Argilosas			
I 0-20	41,38 (0,24)	31,98 (0,10)	21,38 (0,35)
STI	40,10 (0,06)	35,28 (0,25)	18,30 (0,34)
L T-S	40,35 (0,13)	27,57 (0,12)	26,55 (0,06)
PB 0-20	38,28 (0,64)	30,95 (0,42)	24,58 (0,47)
EEPB PD	44,70 (0,68)	28,37 (0,41)	20,42 (0,60)
PGC MP	57,99 (0,37)	22,83 (0,46)	14,19 (0,02)
Francos			
CA	21,21 (0,09)	71,00 (0,05)	3,27 (0,02)
EEJT	24,18 (0,44)	66,72 (0,30)	4,29 (0,15)
LP	25,50 (0,36)	65,75 (0,30)	4,54 (0,18)
PJ	18,67 (1,04)	75,59 (1,03)	3,57 (0,08)
EEM MP	31,76 (0,34)	53,79 (0,35)	9,67 (0,17)
CRAF	40,35 (0,53)	47,94 (0,46)	7,32 (0,05)
G 0-20	30,61 (0,11)	60,98 (0,20)	4,29 (0,04)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média.

Nas regiões de baixas energias (10^{-3} MeV até $\sim 10^{-1}$ MeV), os valores de μ/ρ são maiores, onde o efeito foteletrônico é dominante e a seção de choque é proporcional a Z^{4-5} . Nas regiões de energia intermediária ($\sim 0,1$ MeV até ~ 1 MeV), o espalhamento incoerente é o efeito predominante. Há uma dependência linear de Z com a seção choque e μ/ρ é constante. Na região de altas energias (~ 1 MeV até 100 MeV), o coeficiente de atenuação de massa aumenta, onde o efeito dominante é a produção de pares e a atenuação de massa é proporcional a Z^2 (MEDHAT, 2011). Os valores dos coeficientes de atenuação de massa para os 25 solos estudados para as quatro energias de interesse estão listados na Tabela 2.3 e 2.4.

Tabela 2.3: valores dos coeficientes de atenuação de massa (μ/ρ) para os 25 solos, para o diâmetro de 45 μm com seus respectivos desvios padrão da média (Dpm) para as energias do ^{241}Am e do ^{137}Cs .

Energia do fóton (keV)	~60	~662
	μ/ρ (cm^2g^{-1})	
Argilosas 1		
EEl AO	0,492 (0,060)	0,075 (-)
EEG A	0,526 (0,012)	0,076 (-)
EEl CC	0,468 (0,027)	0,076 (-)
MSM	0,520 (0,044)	0,076 (-)
PG PDMP	0,380 (0,001)	0,076 (-)
SH 0-20	0,499 (0,001)	0,076 (-)
Argilosas 2		
EEl PB	0,532 (0,014)	0,076 (-)
EEl C	0,498 (0,025)	0,076 (-)
EEl M	0,308 (0,002)	0,076 (-)
EEl PDM	0,462 (0,030)	0,076 (-)
CRAA	0,444 (-)	0,076 (-)
SMS N	0,341 (0,040)	0,076 (-)
Muito argilosas		
I 0-20	0,469 (0,001)	0,076 (-)
STI	0,473 (0,002)	0,076 (-)
L T-S	0,514 (0,005)	0,076 (-)
PB 0-20	0,471 (0,005)	0,076 (-)
EEPB PD	0,425 (0,031)	0,076 (-)
PGC MP	0,390 (0,009)	0,076 (-)
Francos		
CA	0,288 (0,006)	0,077 (-)
EEJT	0,303 (0,079)	0,077 (-)
LP	0,294 (0,006)	0,077 (-)
PJ	0,282 (0,004)	0,077 (-)
EEM MP	0,336 (0,015)	0,077 (-)
G 0-20	0,288 (0,015)	0,077 (-)
CRAF	0,308 (0,024)	0,077 (-)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

O solo EEl PB apresentou o maior coeficiente de atenuação de massa para a energia do ^{241}Am , seguida pela amostra MSM e pela L T-S (Tabela 2.3), que são correspondentes às texturas argilosa e muito argilosa. O menor valor para o coeficiente de atenuação de massa foi para a amostra PJ (Tabela 2.3), que apresenta textura arenosa. Os altos valores dos μ/ρ podem ser explicados por meio dos dados apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2, e de alguns trabalhos realizados, mostrando que a maior abundância do Fe_2O_3 , em amostras de textura argilosa é o responsável pelo alto valor do coeficiente de atenuação. Isto se deve ao número atômico e a densidade eletrônica do Fe ser maior do que o

dos outros elementos encontrados nos demais óxidos presentes nos solos (PIRES; MEDHAT, 2016; PIRES et al., 2015). Da mesma forma que a alta concentração do óxido SiO_2 explica o baixo valor de atenuação da radiação da amostra de solo PJ, de textura arenosa, devido ao baixo número atômico e densidade do Si.

Tabela 2.4: coeficientes de atenuação de massa (μ/ρ) para os 25 solos, para o diâmetro de 45 μm com seus respectivos desvios padrão da média (Dpm) para as duas energias do ^{60}Co .

Energia do fóton (MeV)	1,173	1,332
	μ/ρ (cm^2g^{-1})	
Argilosas 1		
EEI AO	0,058 (-)	0,054 (-)
EEG A	0,058 (-)	0,054 (-)
EEI CC	0,058 (-)	0,054 (-)
MSM	0,058 (-)	0,054 (-)
PG PDMP	0,058 (-)	0,054 (-)
SH 0-20	0,058 (-)	0,054 (-)
Argilosas 2		
EEI PB	0,058 (-)	0,054 (-)
EEI M	0,058 (-)	0,054 (-)
EEI C	0,058 (-)	0,054 (-)
EEP PDM	0,058 (-)	0,054 (-)
CRAA	0,058 (-)	0,054 (-)
SMS N	0,058 (-)	0,054 (-)
Muito argilosas		
I 0-20	0,058 (-)	0,054 (-)
STI	0,058 (-)	0,054 (-)
L T-S	0,058 (-)	0,054 (-)
PB 0-20	0,058 (-)	0,054 (-)
EEPB PD	0,058 (-)	0,054 (-)
PGC MP	0,058 (-)	0,054 (-)
Francos		
CA	0,058 (-)	0,054 (-)
EEJT	0,058 (-)	0,054 (-)
LP	0,058 (-)	0,054 (-)
PJ	0,058 (-)	0,054 (-)
EEM MP	0,058 (-)	0,054 (-)
G 0-20	0,058 (-)	0,054 (-)
CRAF	0,058 (-)	0,054 (-)

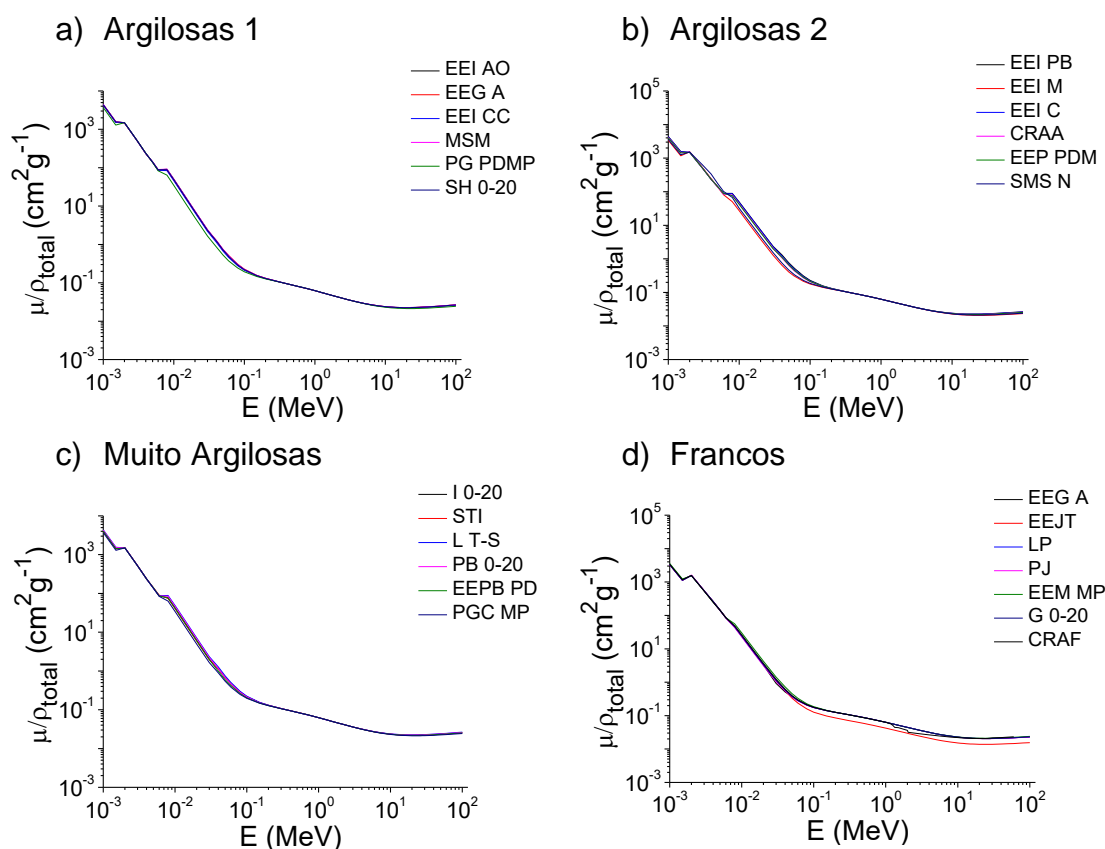
O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão da média é insignificante.

Para as energias do ^{137}Cs e do ^{60}Co não foram observadas grandes flutuações nos valores de μ/ρ (Tabela 2.3 e 2.4), o que está associado à baixa densidade do material estudado e a alta energia dos fótons (PIRES et al., 2015). Estudos feitos com vidros dopados com PbO mostram flutuações maiores para

a energia do ^{137}Cs , mostrando que o alvo para esta energia precisa ter maior densidade e maior número atômico para que possam ser verificadas variações nos valores de μ/ρ (EL-KHAYATT et al., 2014; ISSA 2016).

Os gráficos dos coeficientes de atenuação de massa total em função da energia são apresentados na Figura 2.4. Pode ser observado que μ/ρ decresce à medida que a energia do fóton aumenta. Fica evidente o decréscimo acentuado na região de baixas energias (1 keV até 10^{-1} MeV), devido à dependência da seção de choque com Z^{4-5} (efeito fotoelétrico predominante).

Figura 2.4: variação do coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) para os 25 solos estudados no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 μm .

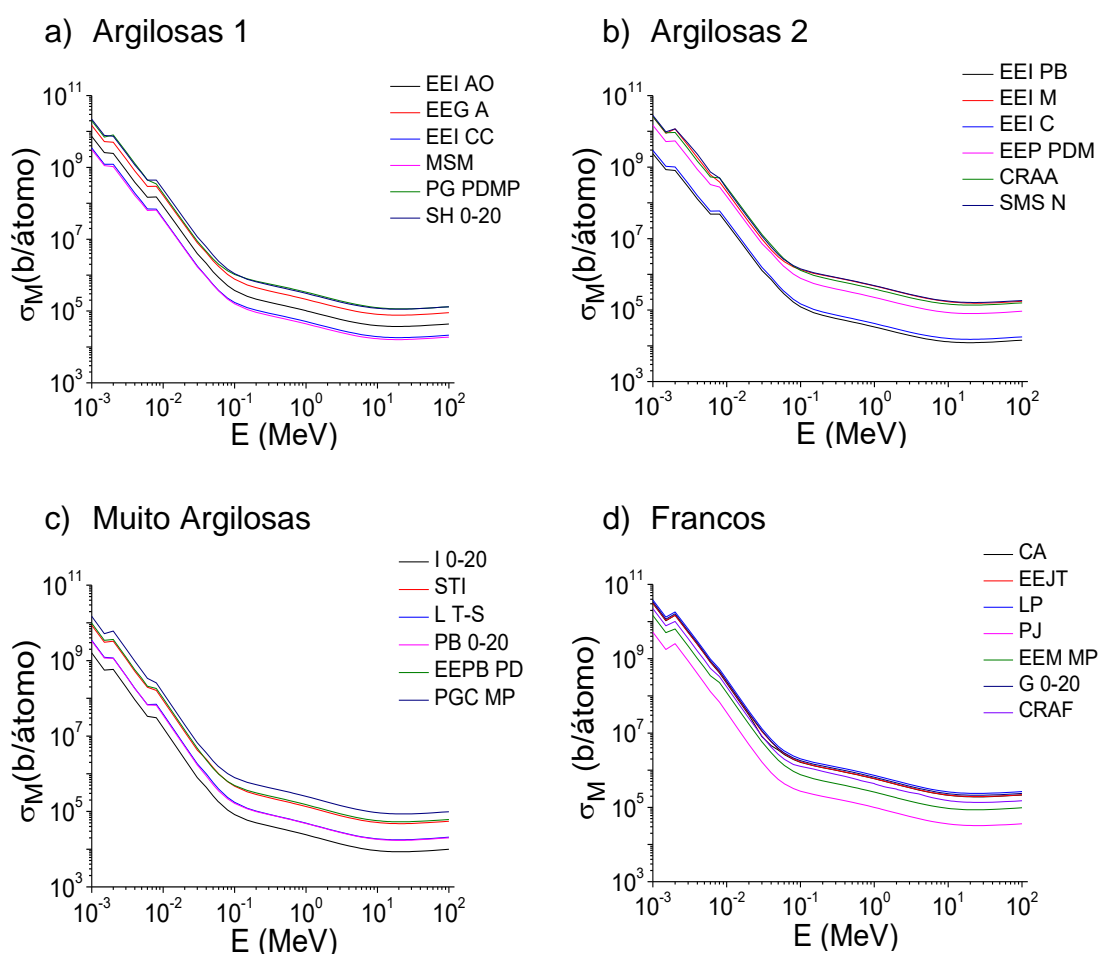


Fonte: a autora.

Na região de energias intermediárias ($\sim 10^{-1}$ MeV até ~ 1 MeV), a curva apresenta um decréscimo menos acentuado devido a dependência da seção de choque com Z (efeito Compton dominante). Na região de altas energias (1 MeV até 100 GeV), ocorre um crescimento a partir de ~ 1 MeV devido à ocorrência do efeito de produção de pares e a dependência da seção de choque com Z^2 (AKKURT, 2013; KAPLAN, 1962; KNOLL, 2010).

As Figuras 2.5 a 2.7 trazem as seções de choque molecular, atômica e eletrônica dos 25 solos estudados em função da energia. A Figura 2.5 traz os resultados para σ_M . Para a região de baixas energias, intermediárias e altas energias, o maior valor de seção de choque molecular é apresentado para o solo LP, de textura franco argilo-arenosa e o solo I 0-20, de textura muito argilosa, apresentou o menor valor para os diferentes intervalos de energia (Tabela 2.5 e 2.6)

Figura 2.5: variação da seção de choque molecular (σ_M) para os 25 solos estudados no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm .



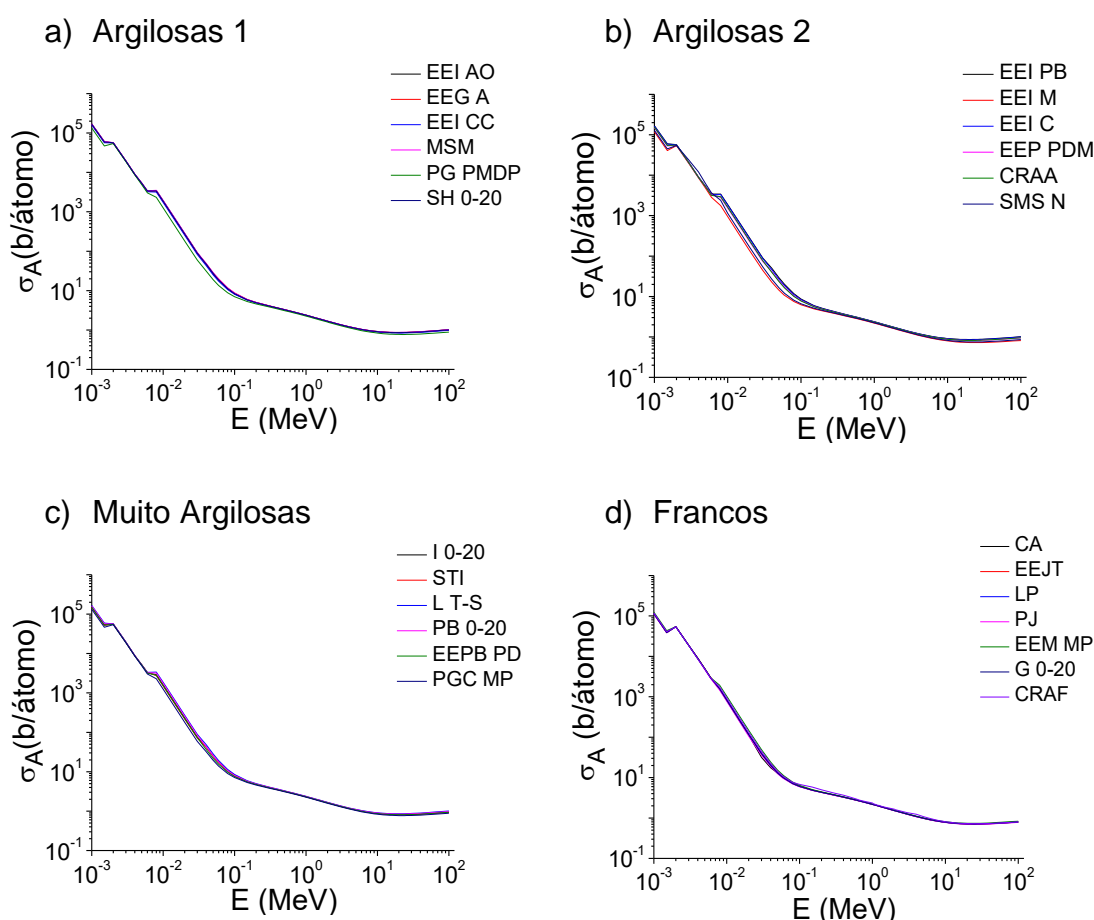
Fonte: a autora.

O agrupamento e a separação das curvas, assim como os altos e baixos valores da seção de choque molecular podem ser explicados pela Equação 2.2.4. A seção de choque em questão depende do seguinte fator, $M = \sum_i n_i A_i$, dos elementos que compõe o solo e do coeficiente de atenuação de massa da mistura. Foi observado maior valor deste fator para as amostras de solo do grupo

das franco. A amostra LP apresentou um valor de $(4,71 \times 10^5 \pm 0,25 \times 10^5) u_a$, enquanto que a amostra de solo I 0-20 apresentou um valor menor de $(2,32 \times 10^5 \pm 0,01 \times 10^5) u_a$.

A Figura 2.6 traz as curvas de σ_A em função do intervalo de energia investigado. De acordo com as tabelas utilizadas para o cálculo deste parâmetro, o solo PJ do grupo das franco, apresentou o menor valor para as quatro energias estudadas no presente trabalho. Para a energia do ^{241}Am , o solo EEI PB, de textura argilosa apresentou o maior valor. Para as energias do ^{137}Cs e as duas do ^{60}Co , o solo MSM, de textura argilosa apresentou os maiores valores.

Figura 2.6: variação da seção de choque atômica (σ_A) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm .



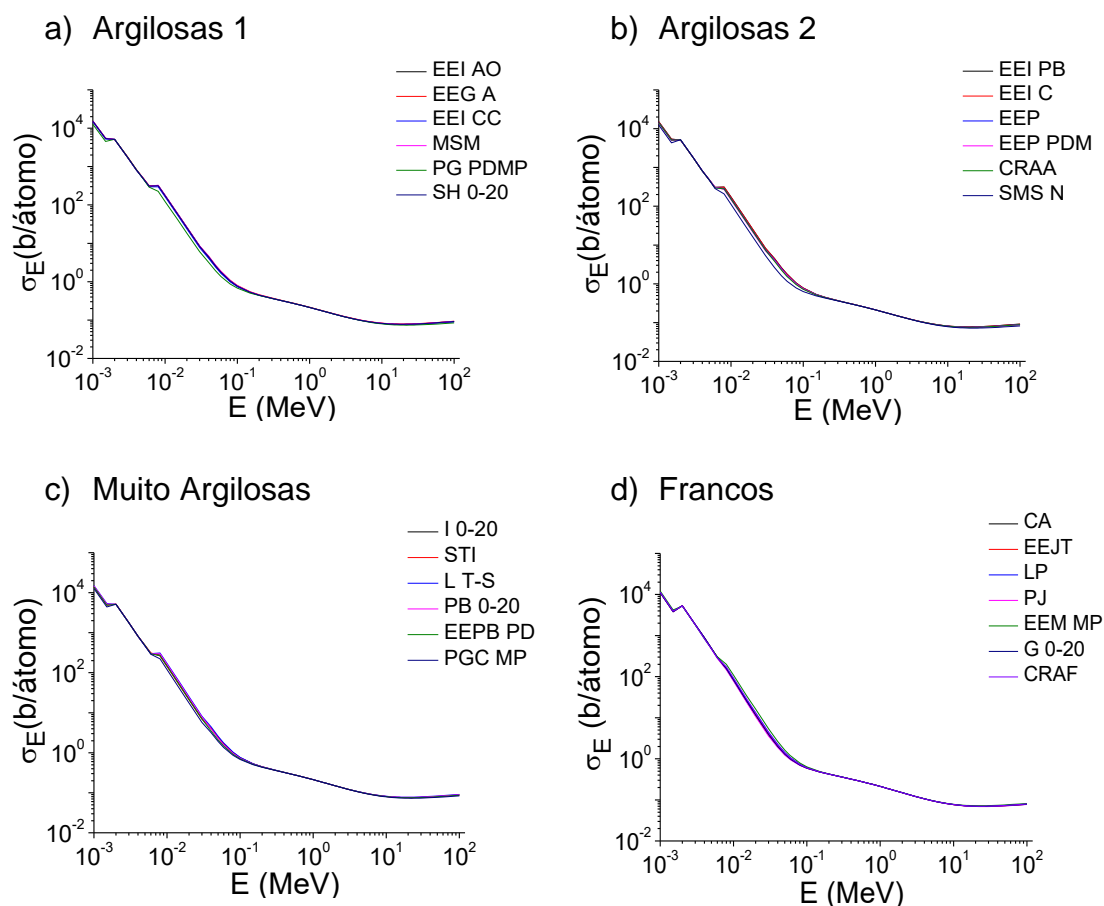
Fonte: a autora.

Uma explicação para os maiores valores para σ_A (Tabela 2.5 e 2.6) serem encontrados nos solos argilosos e muito argilosos, dá-se pela Equação 2.2.5, onde a seção de choque molecular é dividida pelo número total de unidades de fórmulas moleculares do composto ($\sum_i n_i$). Foi observado que os solos argilosos

citados no parágrafo acima possuíam $\sum_i n_i$. O solo PJ, de textura arenosa, apresentou um valor de $\sum_i n_i$ maior, $4,64 \times 10^4 \pm 2,62 \times 10^4$, enquanto as amostras de solo EEI PB e MSM, de texturas argilosas, apresentaram menores valores de $\sum_i n_i$, $1,31 \times 10^4 \pm 6,06 \times 10^3$ e $1,84 \times 10^4 \pm 9,55 \times 10^2$, respectivamente.

A Figura 2.7 apresenta as curva de σ_E em função do intervalo de energia estudado. A seção de choque eletrônica depende do μ/ρ dos elementos que compõe a mistura do solo. Portanto, quanto mais elementos pesados o solo possuir em sua composição, maior será o seu σ_E .

Figura 2.7: variação da seção de choque eletrônica (σ_E) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm .



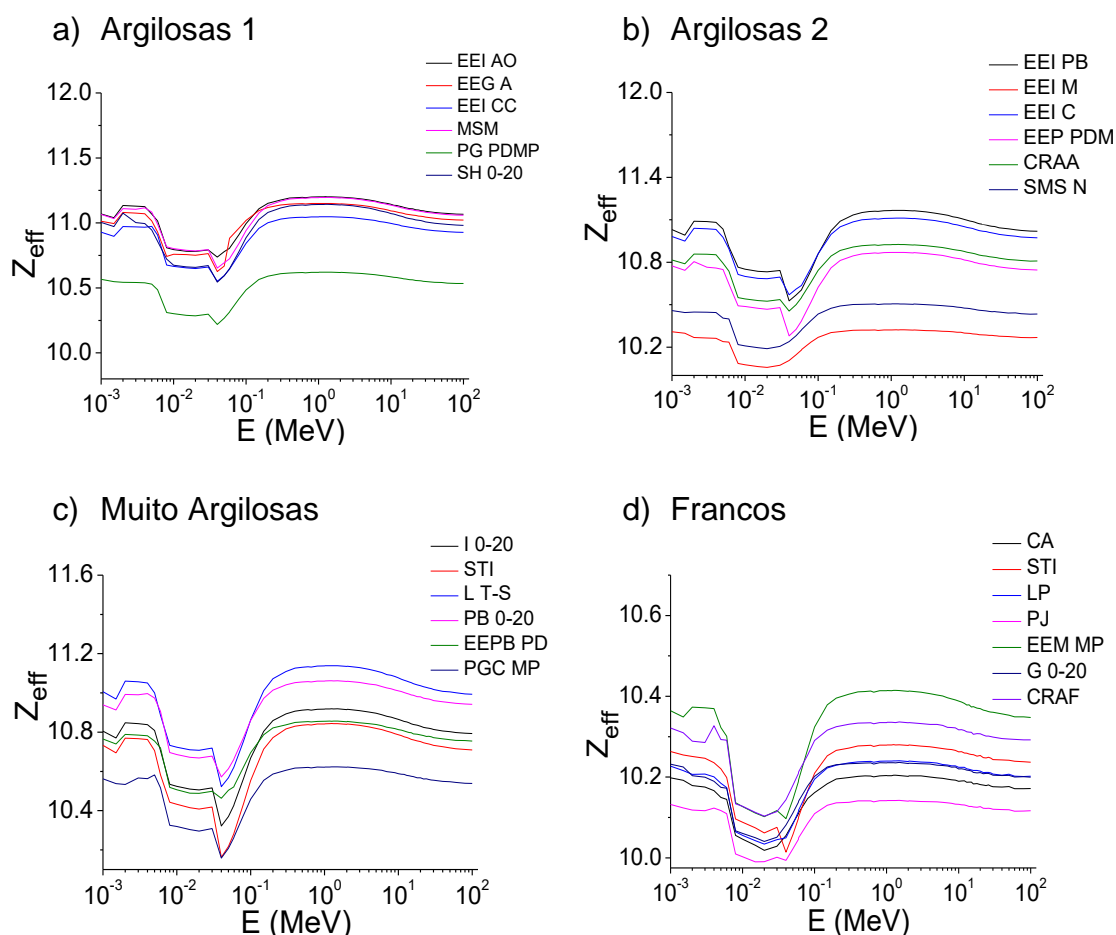
Fonte: a autora.

Por isso, o solo EEG A do grupo dos solos argilosos apresentou o maior valor para a seção em discussão (Tabela 2.5 e 2.6), para as quatro energias estudadas, enquanto que o menor valor apresentado foi pelo solo PJ, de textura arenosa, para as quatro energias estudadas. O que pode mostrar uma dependência da seção com a composição química dos solos, devido as maiores

concentrações de Fe_2O_3 , ser encontrado em solos mais argilosos (MELO et al., 2002; LESPCH, 2010).

O número atômico efetivo depende das seções de choque atômica e eletrônica. Quanto maior a porcentagem de elementos com número atômicos maiores, maior será o Z_{eff} do solo estudado (MEDHAT, 2011). O maior valor encontrado para a energia de fóton menor analisada (^{241}Am) foi para o solo EEI AO, que é pertencente ao grupo das argilosas. Para as energias correspondentes ao ^{137}Cs e as duas energias do ^{60}Co , o maior valor foi para o solo EEI PB. O menor valor para as quatro energias específicas foi para o solo arenoso PJ (Tabela 2.5 e 2.6).

Figura 2.8: variação do número atômico efetivo (Z_{eff}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras com partículas de diâmetro equivalente de 45 μm .



Fonte: a autora.

Como apresentado na Figura 2.8, o solo PG PDMP do grupo das argilosas 1 apresentou comportamento distinto das demais amostras de solo do seu grupo.

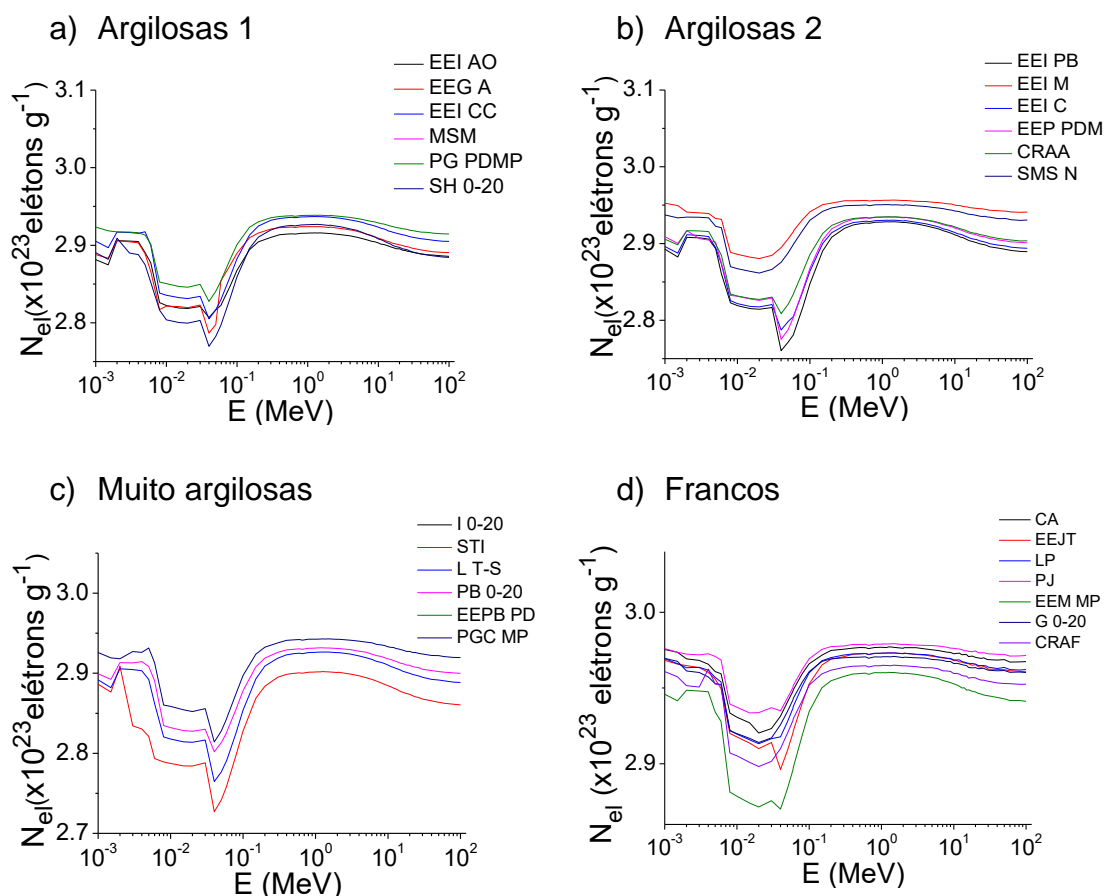
O que pode ser um critério para a separação, ou agrupamento, das curvas dos solos é a diferença nas porcentagens do óxido Fe_2O_3 . Esta amostra de solo apresentou menor teor do óxido (Tabela 2.2) com relação as demais do seu grupo, como mostrado na sequência: MSM> EEI AO> EEG A> SH 0-20> EEI CC> PG PDMP.

O mesmo pode ser observado para os solos EEI M e SMS N, do grupo das argilosas 2, os solos possuem os menores teores do óxido Fe_2O_3 em sua composição em comparação com as demais do seu grupo, como pode ser visto na sequência: EEI PB> EEI C> CRAA> EEP PDM> SMS N> EEI M.

Observou-se então que o teor de Fe_2O_3 contido nos solos determina o agrupamento ou a separação das curvas, observando que solos com menores porcentagens deste óxido apresentam menores valores de Z_{eff} e solos com maiores teores deste óxido apresentam maiores valores de Z_{eff} . No intervalo de ~100 keV a ~0,1 MeV o valor de Z_{eff} atinge um mínimo, onde é possível observar pelos gráficos que as amostras de solo do grupo das franco possuem valores menores do que as amostras dos grupos das argilosas e muito argilosas. Estes resultados de quedas em intervalos similares de energia também foram observados em alguns trabalhos com concreto de mármore (AKKURT et al., 2013), em óleos $\text{Fe}_x\text{Cr}_{x-1}$ e Fe_xNi_x (DEMIR et al., 2013), em polímeros (KUCUK et al., 2013) e também aminoácidos (MANOHARA et al., 2007). O comportamento da curva de Z_{eff} ao longo do intervalo investigado pode ser explicado pela mudança de predominância dos processos principais de interações (efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares) (MEDHAT, 2012).

As variações da densidade eletrônica com o intervalo de energia do fóton são similares às do número atômico efetivo (Figura 2.9) e seu comportamento pode ser explicado da mesma maneira. Tais resultados são confirmados pela correlação positiva entre o número atômico efetivo e a densidade eletrônica (MEDHAT; PIRES, 2014).

Figura 2.9: variação da densidade eletrônica (N_{el}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm .



Fonte: a autora.

Observa-se que o solo que possui um dos menores valores para Z_{eff} tem maior N_{el} para as quatro energias estudadas, como no caso do solo CA, de textura franco-siltosa. O menor valor para N_{el} foi observado pelo solo EEI AO, de textura argilosa, que apresentou um dos maiores valores para Z_{eff} . O que pode mostrar que a contribuição dos óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , excedem a contribuição da densidade eletrônica do óxido Fe_2O_3 , cujo número atômico é maior (Tabela 2.5 e 2.6).

Tabela 2.5: valores máximos e mínimos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 μm .

^{241}Am	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 3,37 \times 10^6$ ($0,35 \times 10^6$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 1,81 \times 10^5$ ($0,04 \times 10^5$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	EEl PB: $\sim 2,03 \times 10^1$ ($0,05 \times 10^1$)
Mínimo	PJ: $\sim 9,59$ (0,17)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 1,87$ (0,06)
Mínimo	PJ: $\sim 0,95$ (0,02)
Z_{eff}	
Máximo	EEl AO: $\sim 1,08 \times 10^1$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,00$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,95$ (0,01)
Mínimo	EEl PB: $\sim 2,78$ (0,01)
^{137}Cs	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 8,83 \times 10^6$ ($0,11 \times 10^6$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 2,94 \times 10^4$ ($0,08 \times 10^4$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	MSM: $\sim 29,1$ (0,01)
Menor	PJ: $\sim 2,62$ (-)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 0,25$ (0,01)
Mínimo	PJ: $\sim 0,25$ (-)
Z_{eff}	
Máximo	EEl PB: $\sim 11,2$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,1$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,98$ (-)
Mínimo	EEl AO: $\sim 2,91$ (0,02)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é zero.

Os valores máximos e mínimos com os desvios padrões da média dos parâmetros analisados para as duas energias do ^{60}Co encontram-se na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: valores máximos e mínimos para as duas energias do ^{60}Co com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 45 μm .

^{60}Co	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 6,71 \times 10^5$ (0,81 $\times 10^5$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 2,23 \times 10^4$ (0,06 $\times 10^4$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	MSM: $\sim 2,21$ (0,01)
Mínimo	PJ: $\sim 1,99$ (-)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 0,20$ (-)
Mínimo	PJ: $\sim 0,19$ (-)
Z_{eff}	
Máximo	EEl PB: $\sim 11,2$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,1$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,98$ (-)
Mínimo	EEl AO: $\sim 2,92$ (0,02)
^{60}Co	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 6,29 \times 10^5$ (0,76 $\times 10^5$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 2,09 \times 10^4$ (0,06 $\times 10^4$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	MSM: $\sim 2,07$ (0,01)
Mínimo	PJ: $\sim 1,87$ (-)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 0,19$ (-)
Mínimo	PJ: $\sim 0,18$ (-)
Z_{eff}	
Máximo	EEl PB: $\sim 11,2$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,1$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,98$ (-)
Mínimo	EEl AO: $\sim 2,92$ (0,02)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é zero.

Conclusão

O coeficiente de atenuação de massa, a seção de choque eletrônica e o número atômico efetivo apresentaram dependência com o óxido Fe_2O_3 . O fato se deve ao alto número atômico e densidade eletrônica que o elemento Fe possui, tendo assim, maior poder de atenuação de radiação e capacidade de aumentar o número atômico efetivo, pois, quanto maior for a concentração de Fe_2O_3 , maior o número atômico efetivo e maior a seção de choque eletrônica. A

seção de choque molecular e a densidade eletrônica efetiva mostraram dependência com a porcentagem dos óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , onde a contribuição destes dois óxidos excediam a contribuição da densidade eletrônica e da seção de choque molecular do Fe_2O_3 . A seção de choque atômica mostrou dependência com o número total de unidades de fórmulas moleculares do composto, onde foi observado menores valores desta quantidade para as amostras mais argilosas, e maior valor para as amostras do grupo das amostras com textura tipo francos.

Referências

AKKURT, I. et al. Effective Atomic number and electron density of marble concrete. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 295, p. 633-638, 2013.

AKKURT, I. et al. Study on the Z dependence of partial and total mass attenuation coefficients. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 94, p. 379-385, 2005.

APPOLONI, C.R.; RIOS E. A. mass attenuation coefficients of Brazilian Soils in the range 10-1450 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, p. 287-291, 1994.

APPOLONI, R. M. et al. Two media method for gamma ray attenuation coefficient measurement of archaeological ceramic samples. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 53, p. 1011-1016, 2000.

BIRGANI, M. J. T. et al. Determination of the effective atomic and mass numbers for mixture and compound materials in high energy photon interactions. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 292, p. 1367-1370, 2012.

BORGES, J. A. R. **Tamanhos Elementares Representativos de atributos do solo via atenuação de raios gama e tomografia computadorizada**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2015.

CONNER, A. L. et al. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. **Physical review A general physics**, v.1, nº 3, p. 539-544, 1970.

DEMIR, D. et al. Measurement of the effective atomic number of $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ and Fe_xNi_x alloys using scattering of gamma rays. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 581, p. 213-216, 2013.

EISBERG R. & RESNICK R. **Física quântica**. Elsevier.

ELLIOT, T. R. et al. A comparison of optical and X-ray technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, v. 141, p. 60-70, 2007.

EL-KHAYATT, A. M. et al. Photon attenuation coefficients of Heavy-Metal Oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: A comparison study. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 735, p. 207-212, 2014.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª edição, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

GOPAL, S. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. **Physical Review A**, v. 8, nº6, p. 2814-2818, 1973.

GUPTA, M. K. et al. Measurement of attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of oxides of lanthanides by using simplified ATM-method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 619, p. 356-360, 2015.

HANAGODIMATH et al. Studies on the effective atomic numbers and electron densities of essential amino acids in the energy range 1 keV-100GeV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 258, p. 321-328, 2007.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Copyright 2004, Elsevier Science (USA).

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1995.

ISSA, S. A. M. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO-BaO-B₂O₃ glass system. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 120, p. 33-37, 2016.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. Copyright 1962, Addison – Wesley Publishing Company, Inc. (USA).

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. Copyright 2010, John Wiley & Sons, Inc. (USA).

KUCUK, N. et al. Determining photon energy absorption parameters for different soil samples. **Journal of Radiation Research**, v. 54, p. 578-586, 2013.

KUCUK, N. et al. Mass attenuation coefficient, effective atomic numbers and effective electronic density for some polymers. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 153, p. 127-134, 2013.

KUMAR, T. K. et al. Effective atomic number studies in clay minerals for total photon interaction in the energy region 10 keV-10 MeV. **Radiation Physics Chemistry**, v. 48, p. 707-710, 1996.

KURUDIREK, M. et al. A study of chemical composition and radiation attenuation properties in clinoptilolite-rich natural zeolite from Turkey. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 79, p. 1120-1126, 2010.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Copyright 2010, 2^o edição, São Paulo: Oficina de textos.

MANOHARA, S. R. et al. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energy above 1 keV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 266, p. 3906-3912, 2008.

MEDHAT, M. E. Studies of effective atomic numbers and electron densities in different solid state track detectors in the energy range 1 keV-100GeV. **Annals of Nuclear Energy**, v. 38, p. 1252-1263, 2011.

MEDHAT, M. E. Study of the mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in some gemstones. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 293, p. 555-564, 2012.

MEDHAT, M. E.; PIRES L. F. Importance of photo atomic cross section for studying physical properties of different types of soil. **X Ray Spectrometry**, v. 45, p. 202-206, 2016.

MEDHAT, M. E. et al. Analysis of photon interaction parameters as function of soil composition. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 300, p. 1105-1112, 2014.

MELO, V. F. et al. Mineralogia das frações areia silte e argila de sedimentos do grupo barreira no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 29-41, 2002.

MELO, V. F. et al. Propriedades químicas e cristalográficas da caulita e dos óxidos de ferro em sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 53-64, 2002.

MUKAIDE, T. et al. Quantitative effective atomic number imaging using simultaneous x-ray absorption and phase shift measurement. **Applied Physics Letters**, v. 98, 2011.

OLIVEIRA, J. C.M. et al. Soil Structure evaluated by gamma ray attenuation. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 127-133, 1998.

PIRES, L. F. **Atenuação de Raios Gama como técnica auxiliar para a determinação da curva de retenção da água no solo**. Universidade de São Paulo, 2002.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo**. Universidade de São Paulo, 2006.

PIRES, L. F. et al. Soil mass attenuation coefficient: Analysis and evaluation. **Annals of Nuclear Energy**, v. 64, p. 206-211, fev. 2014.

PRANDEL, L. V. et al. Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 65-68, 2014.

ROGASIK, H. et al. Discrimination of Soil Phases by Dual Energy X-ray Tomography. **Soil Science American Journal**, v. 63, p. 741-751, 1999.

SAHOTA, H. S. et al. Effective atomic numbers studies in different soils for total photon interaction in the energy region 10-5000 keV. **Applied Radiation Isotopes**, v. 39, n^o 12, p. 1251-1254, 1988.

TUROVTSEV, V. V. et al. Distribution of Electronic Density in *n*-Mononitroalkanes. **Russian Journal of Physics Chemistry A**, v. 86, p. 1073-1078. 2012.

UN, A. et al. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, effective electron numbers and kermas for Earth and Martian soils. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 288, p. 42-47, 2012.

UN, A. et al. The directed- Z_{eff} software for direct calculation of mass attenuation coefficient, effective atomic number and effective electron number. **Annals of Nuclear Energy**, v. 65, p. 158-165, 2014.

VAZ, C. M. P. et al. Using a Computed Tomography Miniscanner for Studying Tillage induced soil compactation. **Soil Technology**, v. 2, p. 313-321, 1989.

3. Influência do tamanho de agregados de solo nas propriedades de atenuação de radiação

Resumo

Com o extensivo uso da radiação ionizante na área de física aplicada a solos, é importante a análise da interação dessas radiações com a matéria. Neste trabalho foram analisados diferentes parâmetros de interação da radiação (coeficiente de atenuação massa, seções do choque, número atômico e densidade eletrônica), obtidos teoricamente através do programa XCom, para 25 solos do estado do Paraná, Brasil. Especial ênfase foi dada para as energias das principais fontes radioativas utilizadas na área de física aplicada a solos, que foram as energias do ^{241}Am , ^{137}Cs . As análises feitas neste trabalho, para partículas com diâmetro entre 2-1 mm, foram comparadas com outro tamanho de partículas considerado padrão de 45 μm . Os resultados mostram grande dependência dos parâmetros com a textura e logo, com a composição química dos solos estudados, principalmente dos óxidos Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 , e o conteúdo de argila e silte dos solos. Foram observadas diferenças entre os teores dos óxidos de um tamanho de agregado para outro que afetaram diretamente o valor do coeficiente de atenuação de massa, que apresentou um aumento para os solos que apresentaram aumento no teor do óxido Fe_2O_3 . Alguns parâmetros como o coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ), a seção de choque eletrônica (σ_E) e número atômico efetivo (Z_{eff}), mostraram dependência com o teor de Fe_2O_3 , contidos nos solos mais argilosos, devido ao alto valor de número atômico e densidade eletrônica do elemento Fe. Entretanto, a densidade eletrônica (N_{el}) mostrou relação com os óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , devido à soma destas duas concentrações exceder a densidade eletrônica efetiva do Fe contida no óxido Fe_2O_3 . A seção de choque molecular mostrou dependência com o peso molecular total, apresentando maiores valores para os solos francos. A seção de choque atômica mostrou dependência com o número total de unidades de fórmulas moleculares do composto das amostras de solo. Os menores valores foram encontrados nos solos argilosos. As diferenças entre os teores dos óxidos de um tamanho de agregado para outro afetou os valores

máximos e mínimos dos parâmetros analisados, mas não foi observado mudança de predominância textural.

Influence of the soil aggregate size in the attenuation interaction properties

Abstract

With the extensive use of ionizing radiation in the physics applied to soils, it is important to analyze the interaction of these radiations with the matter. This study analyzed the radiation different parameters of interaction (mass attenuation coefficient, cross sections, atomic number and electronic density) obtained theoretically using the program XCom in 25 soils from the State of Paraná, Brazil. Special emphasis was given to the energies of the main radioactive sources used in the area of physics applied to soils, which are ^{241}Am , ^{137}Cs . The analyses performed in this study, for particles sized between 2-1mm, were compared to another particle size considered standard, which is 45 μm . The results revealed great dependence of the parameters on the texture and, therefore, the chemical composition of the soils under study, mainly the Al_2O_3 , SiO_2 and Fe_2O_3 oxides and the clay and silt contents in the soils. Differences were observed between the oxide content when aggregates of different sizes were compared which directly affected the mass attenuation coefficient value, which presented an increase in the soils that presented increase in the Fe_2O_3 oxide content. Some parameters such as mass attenuation (μ/ρ), electronic cross section (σ_E) and the effective atomic number (Z_{eff}), showed dependence on the Fe_2O_3 content contained in clayey soils, due to the Fe high atomic number and electronic density values. However, the electronic density (N_{el}) presented relation with the Al_2O_3 and SiO_2 oxides, because the sum of these two concentrations exceeded the Fe effective electronic density contained in the Fe_2O_3 oxide. The molecular cross section revealed dependence on the total molecular weight, presenting higher values in loam soils. The atomic cross section was seen to present dependence on the total number of the molecular formula units of the soil sample compound. The lowest values were found in clay soils. The difference between the oxide

contents in one aggregate size when compared to another size affected the maximum and minimum values of the parameters under analysis, but no difference was observed in the textural predominance.

3.1. INTRODUÇÃO

O uso da radiação ionizante e suas fontes proporcionaram à física aplicada a solos grandes avanços quando se trata do estudo das propriedades físicas deste meio poroso.

Através do uso desta ferramenta é possível se obter a densidade e a umidade do solo. Essas técnicas, como a espectrometria gama e a tomografia computadorizada, baseiam-se no princípio da atenuação dos raios gama e oferecem vantagens como boa resolução, tempo rápido de análise e mostram caráter não destrutivo (COSTA et al., 2014; MEDHAT; PIRES, 2016; PIRES et al., 2005; PIRES et al., 2014).

Com o aperfeiçoamento dessas técnicas é possível se obter outras características físicas do solo, como condutividade hidráulica, curva de retenção de água, macro, micro e porosidade total (BACCHI et al., 1998; ELLIOT et al., 2007; OLIVEIRA et al., 1998; PIRES et al., 2005; PIRES et al., 2016; ROGASIK et al., 1999; VAZ et al., 1989; MOREIRA et al., 2001).

A técnica de espectroscopia de raios gama se mostrou uma ferramenta prática e mais precisa do que o método convencional, câmara de Richards, para a obtenção da curva de retenção de água, evitando que as amostras de solo passem por ciclos de umedecimento e secamento, o que poderia causar danos à sua estrutura física, mostrando assim ser uma técnica sensível a mudanças na estrutura do solo (PIRES et al., 2014).

Visando um melhor estudo do espalhamento e absorção de raios gama a fim de auxiliar e aperfeiçoar as técnicas do estudo dos solos através da radiação, o presente trabalho traz um estudo detalhado sobre as seções de choque molecular, atômica e eletrônica, número atômico efetivo e densidade eletrônica.

Para a obtenção dos parâmetros de interação da radiação é utilizado do coeficiente de atenuação de massa do elemento, mistura ou composto estudado.

Para a obtenção deste há o método experimental, por espectroscopia gama, e o método teórico através do programa XCOM. Este programa utiliza da composição química do material estudado como entrada de dados e gera as seções de choque dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares para energias de 1 keV a 100 GeV. Para o presente trabalho o método de fluorescência de Raios X foi utilizado para a obtenção da composição química dos solos, sendo que para a análise o equipamento exige uma pequena quantidade de amostra deformada.

Estudos conduzidos em diversas áreas do conhecimento (AKKURT et al., 2005; BIRGANI et al., 2012; DEMIR et al., 2013; KUCUK et al., 2013; MANOHARA et al., 2007; TUROVTSEV et al., 2012) trazem uma caracterização de materiais compostos através dos estudos de seus números atômicos efetivos e densidades eletrônicas, entretanto há ainda uma escassez de trabalhos sobre as seções de choque. Neste sentido foi proposto a análise dos parâmetros de interação da radiação com o solo, como o coeficiente de atenuação de massa, as seções de choque, o número atômico efetivo e da densidade eletrônica para diferentes tamanhos de agregados do solo (<45 μm e 2-1 mm). Esses parâmetros foram calculados usando o programa XCOM para a faixa de energia de 1 keV – 100 MeV, em solos de diferentes texturas de diversas regiões do estado do Paraná, dando ênfase em duas energias específicas, sendo elas: ~60 keV (^{241}Am) e ~662 keV (^{137}Cs).

3.2 METODOLOGIA

As amostras de solo foram coletadas em diferentes estações experimentais do estado do Paraná, Brasil, com as mais variadas texturas. As informações, como os teores da fração argila, fração silte e fração areia, referentes a cada solo, estão contidas na Tabela 3.1.

Para a análise da granulometria dos solos foi utilizado o método da pipeta o qual foi efetuado no laboratório de solos no IAPAR (Ponta Grossa-PR).

Tabela 3.1: informações sobre os teores gravimétricos da fração argila, fração silte e fração areia para os 25 solos estudados e sua separação por classe textural.

Origem	Legenda	Textura	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Argilosas 1					
Ibiporã	EEI AO	Argilosa	59	17	24
Guarapuava	EEG A	Argilosa	53	17	30
Ibiporã	EEI CC	Argilosa	50	22	28
Mercedes	MSM	Argilosa	47	29	24
Origem	Legenda	Textura	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Ponta Grossa	PG PDMP	Argilosa	50	33	17
Santa Helena	SH 0-20	Argilosa	51	22	27
Argilosas 2					
Ibiporã	EEI PB	Argilosa	54	20	26
Irati	EEI M	Argilosa	54	12	34
Ibiporã	EEI C	Argilosa	47	24	29
Palmas	EEP PDM	Argilosa	54	24	22
Rio Azul	CRAA	Argilosa	41	17	42
São Mateus do Sul	SMS N	Argilosa	58	24	18
Muito argilosas					
Itaipulândia	I 02-0	Muito argilosa	70	17	13
Santa Tereza do Itaipu	STI	Muito argilosa	62	22	16
Londrina	L T-S	Muito argilosa	66	16	18
Pato Bragado	PB 0-20	Muito argilosa	62	20	18
Pato Branco	EEPB PD	Muito argilosa	69	18	13
Ponta Grossa	PGC MP	Muito argilosa	61	22	17
Francos					
Cerro Azul	CA	Franco-siltosa	23	56	21
Joaquim Távora	EEJT	Franco-arenosa	18	18	64
Lapa	LP	Franco-argilo-arenosa	25	21	54
Paranavaí	PJ	Areia	8	1	91
Morretes	EEM MP	Franco-argilosa	38	27	35
Guaíra	G 0-20	Franco-argilosa	59	15	26
Rio Azul	CRAF	Franco-argilosa	36	34	30

Todos os solos foram secos ao ar e peneirados em malha de 2-1 mm (Bertel Indústria Metalúrgica LTDA) visando a análise de partículas compreendidas neste intervalo de diâmetro. Durante as análises as amostras

foram mantidas numa estufa a 45°C para se evitar a absorção de umidade do meio.

O equipamento empregado na análise elementar foi o espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia (Shimadzu, modelo EDX-720). As medidas foram realizadas no laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA). O equipamento tem um tubo de Ródio (Rh) e sua voltagem vai de 5 a 50 kV e o filamento opera com correntes de 1 a 1000 μ A. O detector é um semicondutor de Si(Li), que trabalha com resfriamento por nitrogênio líquido a -196°C.

As amostras de solo foram maceradas em pistilos e colocadas em um porta-amostra, fornecido pelo fabricante do equipamento e seladas com mylar (com espessura de 6 μ m). O tempo gasto para obter o espectro foi de 100 s, nas bandas de energia de Sódio a Escândio (Na-Sc) (15 kV) e do Titânio a Urânio (Ti-U) (50 kV). Todas as medidas foram feitas com pressão de 30 Pa (vácuo) no modo semi-quantitativo (PIRES et al., 2014).

Foram realizadas três medidas experimentais de todos os parâmetros analisados. Os resultados dessas análises elementares foram usados para calcular os valores do coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) dos solos via programa XCOM (HUBBELL; SELTZER, 1995). Este programa utiliza como entrada de dados a composição química das amostras. Com isso, o programa gera as seções de choque para o efeito fotoelétrico, espalhamentos coerente e incoerente, assim como produção de pares e os coeficientes de atenuação de massa total, com espalhamento incoerente e coerente e produção de pares, para qualquer elemento, composição e mistura, para energias que variam de 1keV a 100 GeV (MEDHAT et al., 2014).

Para o presente trabalho, o intervalo de energia estudado foi de 1 keV a 100 MeV, dando ênfase para duas energias específicas de fótons, sendo elas: ~60 keV, que corresponde à energia do ^{241}Am , ~662 keV, correspondente à energia do ^{137}Cs . Estas duas energias representam as mais utilizadas em pesquisas científicas na área de física aplicada a solos.

Com a intenção de melhorar a apresentação dos resultados e discussão, os 25 solos foram separados em quatro grupos (Tabela 2.1), usando como critério de separação as suas classes texturais.

Hine propôs em 1952 o cálculo do número atômico efetivo e da densidade eletrônica para compostos e misturas. Essas quantidades são obtidas, geralmente, a partir do conhecimento do coeficiente de atenuação de massa do material estudado.

Para o cálculo do número atômico efetivo e a densidade eletrônica de compostos e misturas, é preciso antes de tudo conhecer as seções de choque molecular, atômica e eletrônica. Nesse sentido, utiliza-se da seguinte equação para o cálculo da seção de choque de molecular:

$$\sigma_m = \frac{\mu M}{\rho N_A} \quad (3.2.1)$$

Onde μ/ρ é o coeficiente de atenuação de massa, N_A é o número de Avogadro e a quantidade, $M = \sum_i n_i A_i$ depende da soma do peso molecular do i – ésimo elemento do composto ou mistura, A_i , e da multiplicação com n_i , que é o número total de unidades de fórmulas moleculares do composto.

A seção de choque atômica é obtida dividindo a seção de choque molecular pelo número total de unidades de fórmulas moleculares do composto:

$$\sigma_a = \sigma_m \frac{1}{\sum_i n_i} \quad (3.2.2)$$

Onde a quantidade $\sum_i n_i$, que é a soma do número total de formulares do composto, é ainda multiplicada pelo número de átomos que compõe a fórmula molecular.

Para a obtenção da seção de choque eletrônica utiliza-se da seguinte equação:

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu_i}{\rho} \right) \quad (3.2.3)$$

Onde f_i é a abundância fracional, ou fração atômica do i -ésimo elemento que compõe a mistura. É, geralmente, chamado de fração molar em relação ao número total de mol dos elementos no composto, A_i é o peso atômico do i -ésimo elemento da mistura, Z_i é o número atômico do i -ésimo elemento da mistura e μ_i/ρ é o coeficiente de atenuação de massa o i -ésimo elemento da mistura.

Combinando as equações (2.2.5) e (2.2.6) obtém-se a equação para o número atômico efetivo:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (3.2.4)$$

E para a densidade eletrônica:

$$N_e = \frac{\mu/\rho}{\sigma_e} \quad (3.2.5)$$

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As porcentagens dos óxidos mais comuns presentes nos 25 solos, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm, para os quatro grupos texturais, estão apresentadas nas Tabelas 3.2 - 3.5. Para os solos possuindo as texturas argilosa e muito argilosa, o óxido mais abundante é o Al_2O_3 , com os demais óxidos apresentando a seguinte sequência, na maior parte dos solos $Al_2O_3 > SiO_2 > Fe_2O_3 > TiO_2 > SO_3$. Por sua vez, nos solos com textura franco e o solo arenoso apresentaram maior porcentagem do óxido SiO_2 , com os demais óxidos seguindo a seguinte ordem, $SiO_2 > Al_2O_3 > Fe_2O_3 > TiO_2 > SO_3$.

Observou -se maior concentração do Fe_2O_3 nas amostras com texturas argilosas e muito argilosas, em relação às outras texturas. O mesmo resultado com o referente óxido foi encontrado em trabalhos com solos coesos. Na análise das amostras foram encontradas maiores porções dos óxidos Al_2O_3 e Fe_2O_3 , nos solos com textura argilosa em comparação com as outras texturas (PRANDEL et al., 2014; LEPSH, 2010).

Tabela 3.2: teores dos principais óxidos (%) para os solos do grupo das Argilosas 1, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.

Argilosas 1			
2-1 mm	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
EEI AO	31,26 (0,34)	31,27 (0,27)	30,02 (0,61)
EEG A	40,68 (0,34)	20,53 (0,31)	30,08 (0,57)
EEI CC	39,66 (0,98)	30,44 (0,47)	28,60 (0,27)
MSM	30,00 (0,06)	33,79 (0,31)	29,24 (0,16)
PG PDMP	51,37 (0,33)	27,78 (0,29)	15,38 (0,36)
SH 0-20	31,94 (0,13)	31,47 (0,27)	28,80 (0,23)
45 µm			
EEI AO	33,25 (0,01)	32,89 (0,43)	27,22 (0,11)
EEG A	44,05 (0,32)	22,14 (0,17)	26,52 (0,16)
EEI CC	37,56 (0,48)	32,57 (0,46)	24,36 (0,01)
MSM	31,75 (0,67)	33,66 (1,02)	27,23 (0,18)
PG PDMP	58,11 (0,40)	22,02 (0,30)	14,60 (0,25)
SH 0-20	34,63 (0,71)	32,03 (0,15)	26,15 (0,41)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média.

Comparando as porcentagens de óxidos do peneiramento de 2-1 mm com o peneiramento de 45 µm, para o grupos dos solos argilosos 1, constatou-se uma diminuição da concentração do Al₂O₃ na maior parte dos solos, apenas o solo EEI CC apresentou um aumento na concentração de Al₂O₃.

Para o óxido de SiO₂ observou-se uma diminuição do óxido de um peneiramento para outro, exceto para o solo PG PDM, que apresentou um aumento no óxido. Todos os solos deste grupo apresentaram um aumento em seu teor do óxido Fe₂O₃ do tamanho de agregado de 2-1 mm em relação ao de 45 µm.

Para o tamanho de agregado de 2-1 mm, o grupo argilosas 2 apresentou uma diminuição do óxido Al₂O₃ em todas as suas amostras de solos (Tabela 3.3). Para o óxido SiO₂, os solos EEI M, CRAA e SMS N apresentaram um aumento na sua concentração.

Os solos EEI M e CRAA apresentaram uma diminuição no que concerne a concentração do óxido Fe₂O₃, enquanto que o restante das amostras de solo apresentou aumento na concentração.

Tabela 3.3: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das Argilosas 2, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.

Argilosas 2			
2-1 mm	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
EEI PB	32,17 (0,28)	30,49 (0,38)	29,41 (0,24)
EEI M	42,00 (0,71)	46,43 (1,05)	7,95 (0,29)
EEI C	33,31 (0,42)	30,97 (0,58)	28,77 (0,62)
EEP PDM	39,11 (0,50)	29,35 (0,39)	23,02 (0,43)
CRAA	31,23 (0,04)	52,93 (0,40)	10,54 (0,06)
SMS N	39,20 (0,44)	41,42 (0,91)	13,75 (0,37)
45 µm			
EEI PB	35,39 (0,44)	31,66 (0,23)	26,27 (0,47)
EEI M	48,38 (0,21)	40,43 (0,50)	8,05 (0,16)
EEI C	36,07 (0,38)	32,08 (0,41)	25,84 (0,57)
EEP PDM	42,07 (0,82)	30,78 (0,32)	19,53 (0,25)
CRAA	40,84 (0,48)	31,47 (0,13)	22,06 (0,23)
SMS N	45,16 (0,32)	38,18 (0,21)	12,21 (0,10)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média.

Na comparação entre os dois tamanhos de agregados para o intervalo de 2-1 mm, as amostras de solo do grupo das muito argilosas apresentaram uma diminuição na concentração do óxido Al₂O₃ e um aumento na concentração do óxido Fe₂O₃. Já para o óxido SiO₂, alguns solos apresentaram aumento, I 0-20, STI e PGC MP, enquanto que outras amostras de solo apresentaram uma diminuição em seu teor, PB 0-20 e EEPB PD.

Tabela 3.4: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das muito argilosas, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.

Muito Argilosas			
2-1 mm	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
I 0-20	39,66 (0,89)	32,97 (0,32)	22,04 (0,66)
STI	35,27 (0,99)	37,69 (1,30)	20,24 (0,48)
L T-S	37,98 (0,23)	27,39 (0,45)	28,14 (0,36)
PB 0-20	33,99 (0,96)	29,10 (0,34)	29,80 (0,46)
EEPB PD	40,14 (0,66)	26,84 (0,51)	24,99 (0,42)
PGC MP	52,95 (0,33)	26,13 (0,28)	15,18 (0,31)
45 µm			
I 0-20	41,38 (0,24)	31,98 (0,10)	21,38 (0,35)
STI	40,10 (0,06)	35,28 (0,25)	18,30 (0,34)
L T-S	40,35 (0,13)	27,57 (0,12)	26,55 (0,06)
PB 0-20	38,28 (0,64)	30,95 (0,42)	24,58 (0,47)
EEPB PD	44,70 (0,68)	28,37 (0,41)	20,42 (0,60)
PGC MP	57,99 (0,37)	22,83 (0,46)	14,19 (0,02)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média.

Tabela 3.5: teores dos principais óxidos para os solos do grupo das Francos, com seus respectivos desvios médios para as amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 µm e 2-1 mm.

Francos			
2-1 mm	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
CA	20,45 (0,15)	69,42 (0,39)	4,26 (0,05)
EEJT	21,73 (0,46)	69,61 (1,21)	3,62 (0,42)
LP	22,90 (0,34)	67,27 (0,80)	4,54 (0,16)
PJ	26,97 (2,48)	65,30 (3,09)	3,99 (0,49)
EEM MP	29,18 (0,25)	53,57 (0,38)	11,29 (0,14)
G 0-20	26,83 (0,31)	63,32 (0,95)	4,56 (0,26)
CRAF	33,95 (0,59)	55,45 (0,87)	6,41 (0,35)
45 µm			
CA	21,21 (0,09)	71,00 (0,05)	3,27 (0,02)
EEJT	24,18 (0,44)	66,72 (0,30)	4,29 (0,15)
LP	25,50 (0,36)	65,75 (0,30)	4,54 (0,18)
PJ	18,67 (1,04)	75,59 (1,03)	3,57 (0,08)
EEM MP	31,76 (0,34)	53,79 (0,35)	9,67 (0,17)
G 0-20	30,61 (0,53)	60,97 (0,46)	4,29 (0,05)
CRAF	40,35 (0,11)	47,94 (0,20)	7,32 (0,04)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média.

No grupo dos solos com textura franco, para o tamanho de agregado de 2-1 mm, o solo PJ apresentou um aumento na concentração do óxido Al₂O₃ e no óxido Fe₂O₃, mas apresentou uma diminuição no óxido SiO₂, assim como a amostra CA. Os demais solos apresentaram aumento para a concentração do óxido Al₂O₃. A amostra de solo CA apresentou diminuição na concentração do óxido Fe₂O₃, enquanto que as demais amostras de solo do grupo apresentaram um aumento na sua concentração.

As causas do aumento e diminuição na proporção dos óxidos discutidos são ainda desconhecidas. Seria necessário medidas de difração de raios X para obtenção da mineralogia destes solos e análises das frações dos solos. Uma hipótese para a explicação do aumento do teor de Fe₂O₃ nas partículas com tamanho de 2-1 mm seria o maior intervalo e a diversificação dos tamanhos de partículas analisadas, compreendendo uma possível maior concentração da fração argila com relação as demais frações.

Os coeficientes de atenuação de massa gerados pelo XCOM para as duas energias de interesse e para os dois tamanhos de agregados estão separados pelos grupos texturais e estão apresentados nas Tabelas 3.6-3.9.

Para o grupo das argilosas 1 é observado uma diminuição no valor do coeficiente de atenuação de massa do solo MSM (Tabela 3.6), entretanto não é

observada nenhuma diminuição no óxido Fe_2O_3 e nem um aumento no óxido SiO_2 . Seus teores de óxido permanecem praticamente constantes (Tabela 3.2).

Tabela 3.6: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Argilosas 1 para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm e 2-1 mm.

Argilosas 1		
Energia do fóton (kev)	~60	~662
μ/ρ (cm^2g^{-1})		
2-1 mm		
EEl AO	0,482 (0,014)	0,077 (-)
EEG A	0,523 (0,030)	0,076 (-)
EEl CC	0,459 (0,003)	0,076 (-)
MSM	0,481 (0,014)	0,076 (-)
PG PDMP	0,366 (0,003)	0,076 (-)
SH 0-20	0,466 (0,002)	0,076 (-)
Máximo		
EEG A	0,523 (0,030)	0,077 (-)
Mínimo		
PG PDMP	0,366 (0,003)	0,076 (-)
45 μm		
EEl AO	0,492 (0,060)	0,075 (-)
EEG A	0,526 (0,012)	0,076 (-)
EEl CC	0,468 (0,027)	0,076 (-)
MSM	0,520 (0,044)	0,076 (-)
PG PDMP	0,380 (0,001)	0,076 (-)
SH 0-20	0,499 (0,001)	0,076 (-)
Máximo		
EEG A	0,526 (0,012)	0,076 (-)
Mínimo		
PG PDMP	0,380 (0,001)	0,075 (-)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

Para os solos do grupo das argilosas 2, observou-se uma diminuição no valor do coeficiente de atenuação de massa das amostras, EEl PB, EEP PDM e CRAA. A diminuição nesses valores pode estar associado ao aumento do óxido de SiO_2 (Tabela 3.3), visto que os solos que possuem maior quantidade deste óxido atenuam menos radiação incidente, em relação a solos com maior quantidade do óxido de Fe_2O_3 , e como consequência, possuem menor coeficiente de atenuação de massa.

Tabela 3.7: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Argilosas 2 para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm e 2-1 mm.

Argilosas 2		
Energia do fóton (keV)	~60	~662
μ/ρ (cm^2g^{-1})		
2-1 mm		
EEI PB	0,478 (0,015)	0,076 (-)
EEI M	0,310 (0,002)	0,076 (-)
EEI C	0,462 (0,005)	0,076 (-)
EEP PDM	0,428 (0,004)	0,076 (-)
CRAA	0,333 (0,001)	0,076 (-)
SMS N	0,355 (0,003)	0,076 (-)
Máximo		
EEI PB	0,478 (0,015)	0,076 (-)
Mínimo		
EEI M	0,310 (0,002)	0,076 (-)
45 μm		
EEI PB	0,532 (0,014)	0,076 (-)
EEI M	0,308 (0,005)	0,076 (-)
EEI C	0,498 (0,022)	0,076 (-)
EEP PDM	0,462 (0,030)	0,076 (-)
CRAA	0,444 (-)	0,076 (-)
SMS N	0,341 (0,040)	0,076 (-)
Máximo		
EEI PB	0,532 (0,014)	0,076 (-)
Mínimo		
EEI M	0,308 (0,005)	0,076 (-)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

Para o grupo das muito argilosas, para o tamanho de agregado de 2-1 mm, as amostras de solos, STI e L T-S apresentaram uma diminuição no valor do coeficiente de atenuação de massa (Tabela 3.8). O que pode estar relacionado com esse comportamento é o aumento do óxido SiO_2 (Tabela 3.4), onde o elevado teor deste óxido atenua menos a radiação incidente do que solos com maior concentração do óxido Fe_2O_3 , por exemplo (MELO et al., 2002; PRANDEL et al., 2014).

Tabela 3.8: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Muito argilosas para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm e 2-1 mm.

Muito Argilosas		
Energia do fóton (keV)	~60	~662
μ/ρ (cm^2g^{-1})		
2-1 mm		
I 0-20	0,417 (0,006)	0,076 (-)
STI	0,426 (0,028)	0,076 (-)
L T-S	0,463 (0,011)	0,076 (-)
PB 0-20	0,549 (0,005)	0,076 (-)
EEPB PD	0,502 (0,047)	0,076 (-)
PGC PDM	0,366 (0,023)	0,076 (-)
Máximo		
PB 0-20	0,549 (0,005)	0,076 (-)
Mínimo		
PGC PDM	0,366 (0,023)	0,076 (-)
45 μm		
I 0-20	0,469 (0,001)	0,076 (-)
STI	0,473 (0,002)	0,076 (-)
L T-S	0,514 (0,005)	0,076 (-)
PB 0-20	0,471 (0,005)	0,076 (-)
EEPB PD	0,425 (0,031)	0,076 (-)
PGC PDM	0,390 (0,009)	0,076 (-)
Máximo		
L T-S	0,514 (0,005)	0,076 (-)
Mínimo		
PGC PDM	0,390 (0,009)	0,076 (-)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

No caso das amostras PB 0-20 e EEPB PD, o que se observa é um aumento em seus valores para o coeficiente de atenuação de massa para o tamanho de agregado de 2-1 mm (Tabela 3.8). O que pode explicar este comportamento é o aumento do óxido Fe_2O_3 (Tabela 3.4), visto que solos que possuem maior concentração deste óxido atenuam mais a radiação incidente do que os solos com uma concentração maior do óxido SiO_2 .

As amostras de solos do grupos das francos não tiveram grandes flutuações em seus valores do coeficiente de atenuação de massa de um tamanho de partícula para outro (Tabela 3.9). Isto pode ser explicado pela análise da Tabela 3.5, onde se observa algumas diferenças nas amostras CRAF e PJ entre os óxidos Al_2O_3 e SiO_2 . A porcentagem diminuída de um óxido é compensada pelo aumento do outro e considerando que os dois elementos que

o constituem, Al e Si, possuem números atômicos próximos isto não terá grande impacto em seu valor do coeficiente de atenuação, visto que os elementos atenuam a radiação de forma semelhante.

Tabela 3.9: coeficientes de atenuação de massa para os solos do grupo das Francos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs , com seus respectivos desvios médios, para as amostras de partículas com diâmetro equivalente de 45 μm e 2-1 mm.

Franco		
Energia do fóton	~60	~662
μ/ρ (cm^2g^{-1})		
2-1 mm		
CA	0,298 (0,008)	0,077 (-)
EEJT	0,291 (0,009)	0,077 (-)
LP	0,292 (0,001)	0,077 (-)
PJ	0,283 (0,003)	0,077 (-)
EEM MP	0,340 (0,001)	0,077 (-)
G 0-20	0,296 (0,008)	0,077 (-)
CRAF	0,303 (0,003)	0,077 (-)
Máximo		
EEM MP	0,340 (0,001)	0,077 (-)
Mínimo		
PJ	0,283 (0,003)	0,077 (-)
45 μm		
CA	0,288 (0,006)	0,077 (-)
EEJT	0,304 (0,009)	0,077 (-)
LP	0,293 (0,006)	0,077 (-)
PJ	0,282 (0,004)	0,077 (-)
EEM MP	0,336 (0,015)	0,077 (-)
G 0-20	0,288 (0,015)	0,077 (-)
CRAF	0,308 (0,024)	0,077 (-)
Máximo		
EEM MP	0,336 (0,015)	0,077 (-)
Mínimo		
PJ	0,288 (0,006)	0,077 (-)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

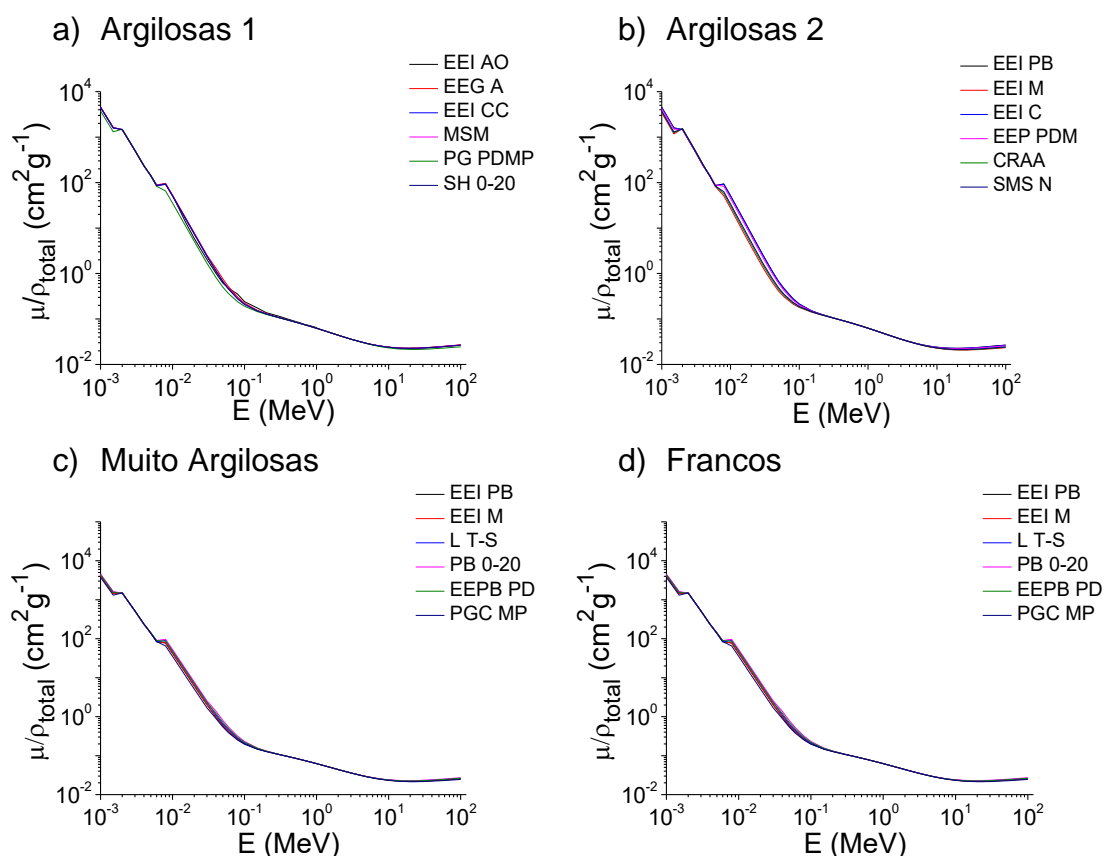
Os aumentos nos valores do coeficiente de atenuação de massa para o tamanho de agregado de 2-1 mm pode ser explicado então pelo aumento de teor do óxido Fe_2O_3 . Assim como a diminuição dos valores do coeficiente de atenuação de massa para o mesmo tamanho de agregado pode ser explicado pelo aumento do óxido SiO_2 .

Estudos feitos em solos coesos e na fração argila dos solos mostraram que a porcentagem do Fe_2O_3 é maior em solos argilosos e na fração argila (PRANDEL et al., 2014), mostrando que solos com maior porcentagem do óxido

em questão irão atenuar mais a radiação incidente na faixa de energias baixas (1 keV - $\sim 10^{-1}$ MeV), onde a seção de choque total de μ/ρ depende de Z^{4-5} , do que os óxidos com menores porcentagem do óxido Fe_2O_3 e maiores teores de Al_2O_3 e SiO_2 , devido aos baixos números atômicos de sua composição molecular.

Os gráficos dos quatro grupos dos 25 solos estão apresentados na Figura 3.1. Como esperado, μ/ρ decresce (MEDHAT, 2012) à medida que a energia dos fótons incidentes aumenta.

Figura 3.1: variação do coeficiente de atenuação de massa (μ/ρ) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.



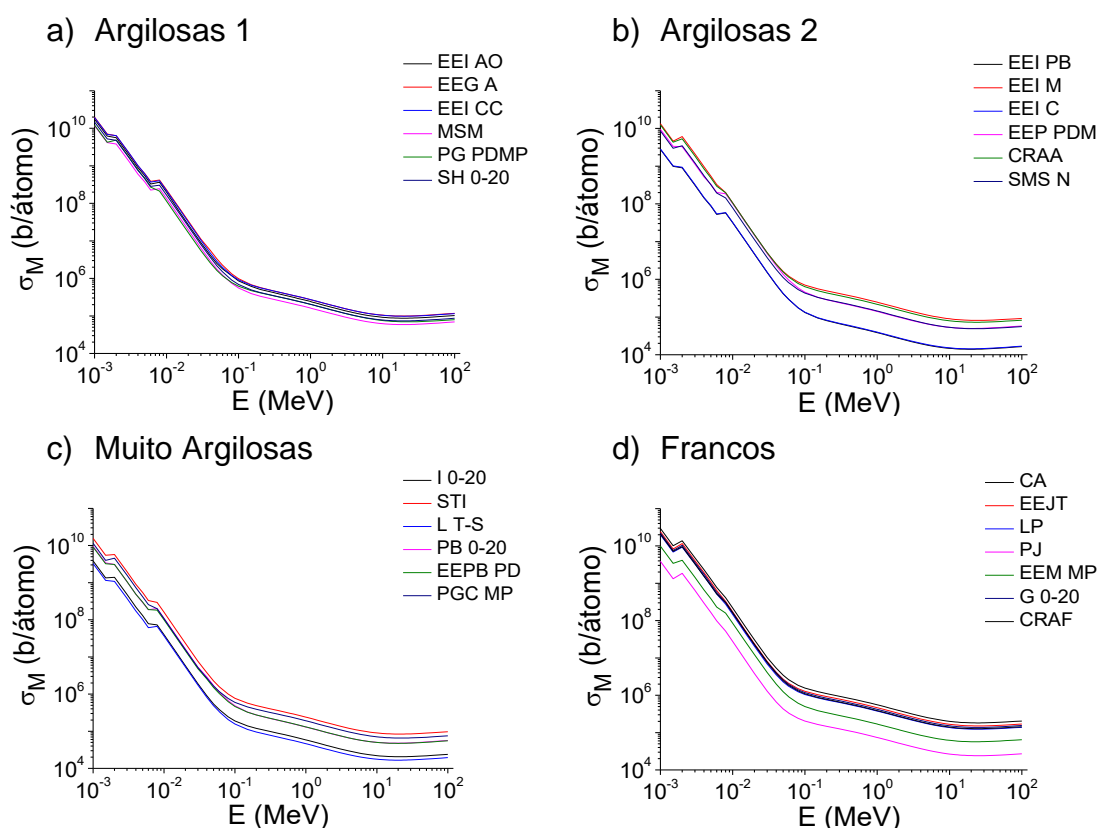
Fonte: a autora.

Na região de baixas energias (10^{-3} MeV - $\sim 10^{-1}$ MeV), o coeficiente de atenuação de massa mostra um decréscimo mais acentuado, pois a seção de choque do efeito fotoelétrico apresenta dependência com Z^4 (KAPLAN, 1962). Para a região de energia intermediária ($\sim 10^{-1}$ MeV - ~ 1 MeV), o decréscimo do coeficiente de atenuação de massa é menos acentuado devido a seção de choque do efeito Compton apresentar dependência com Z . Para a região de altas

energias (~1 MeV – 100 MeV), a curva do coeficiente de atenuação de massa mostra novamente um crescimento, pois o efeito dominante é a produção de pares cuja seção de choque apresenta dependência com Z^2 (KNOLL, 2010).

A Figura 3.2 mostra a seção de choque molecular para os 25 solos estudados. Para a região de baixas energias, especificamente para a energia do ^{241}Am , o solo CA, de textura franco siltosa, apresentou o maior valor para σ_M . O menor valor para o parâmetro em discussão, foi o solo EEI M, de textura argilosa. Para a região de energias intermediárias, especialmente para a energia do ^{137}Cs , a amostra EEJT, de textura franco arenosa, apresentou o maior valor para σ_M . O menor valor para o parâmetro em discussão, foi o solo EEI PB, de textura argilosa (Tabela 3.10).

Figura 3.2: variação da seção de choque molecular (σ_M) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.



Fonte: a autora.

A seção de choque em questão depende da quantidade $M = \sum_i n_i A_i$ (Equação 3.2.1). Logo, o agrupamento e a separação das curvas para a seção de choque em discussão pode ser explicada em função desta quantidade (Equação 3.2.1). Foi observado maior valor desta quantidade para as amostras

de solo do grupo das francos. A amostra CA apresentou um valor de $(5,27 \times 10^6 \pm 0,50 \times 10^6) u_a$, e a amostra EEJT apresentou valor de $(6,27 \times 10^6 \pm 0,84 \times 10^6) u_a$, enquanto que as amostras de solo do grupo das argilosas, EEI M, $(2,36 \times 10^6 \pm 0,24 \times 10^6) u_a$ e a amostra EEI PB, $(3,70 \times 10^5 \pm 0,33 \times 10^5) u_a$, apresentaram valores menores desta quantidade.

Comparando os resultados de σ_M do peneiramento de 45 μm com o peneiramento de 2-1 mm, observou-se que os solos responsáveis pelos valores mais alto da seção de choque molecular, apresentaram texturas do grupo das francos, e os menores valores são apresentados por solos de texturas argilosas, para os dois peneiramentos.

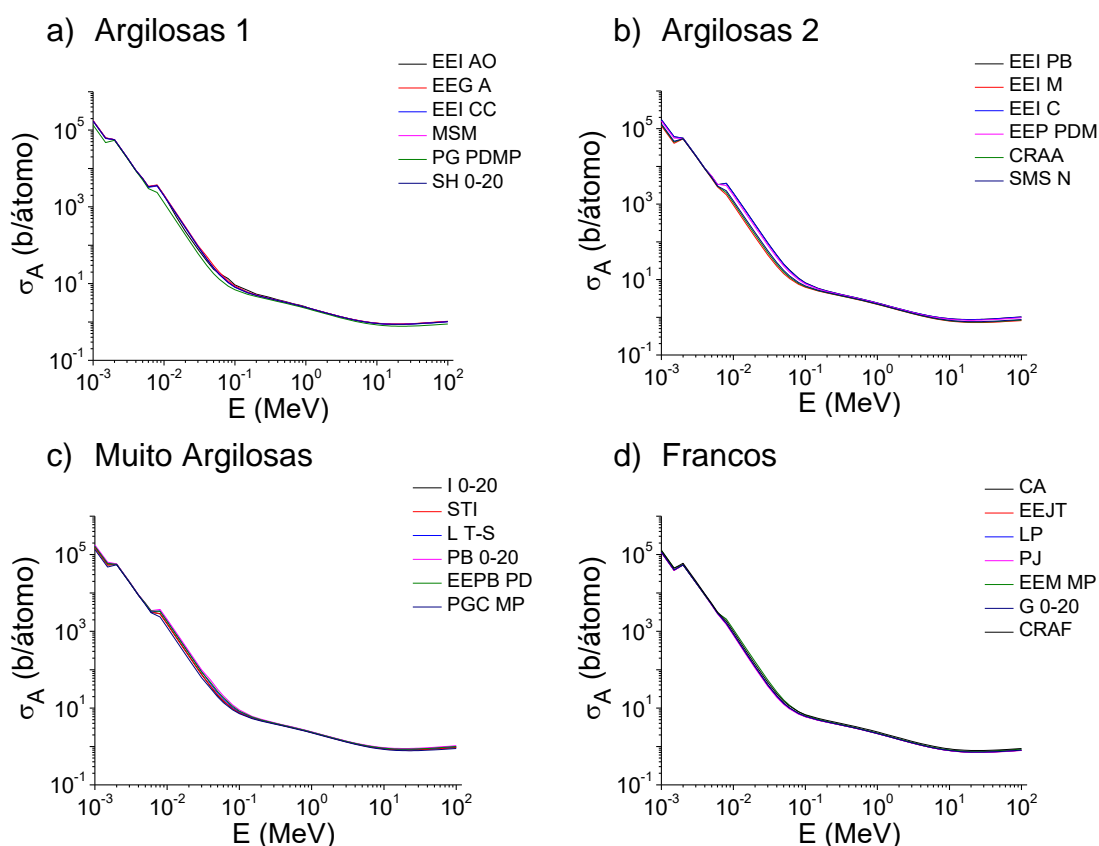
A Figura 3.3 traz os gráficos para a seção de choque atômica (σ_A). O maior valor para a energia do ^{241}Am , foi do solo PB 0-20, com textura muito argilosa, e o menor valor foi do solo PJ, com textura arenosa. Para a energia da região intermediária de interesse, do ^{137}Cs , o maior valor foi apresentado pelo solo EEI AO, com textura argilosa, e o menor ficou responsável pelo solo PJ, de textura arenosa (Tabela 3.10).

O comportamento da curva de σ_A é semelhante à curva de μ/ρ , apresentando um decaimento mais acentuado na região de baixas energias (1 keV - $\sim 10^{-1}$ MeV), onde o efeito dominante é o fotoelétrico e apresenta uma dependência de Z^4 , um decaimento menos acentuado na região de energias intermediárias ($\sim 10^{-1}$ MeV - ~ 1 MeV), onde o efeito dominante é o Compton e apresenta uma dependência com Z , e apresenta um crescimento na região de altas energias (~ 1 MeV - 100 MeV), onde o efeito dominante é o produção de pares e apresenta uma dependência com Z^2 (KAPLAN, 1962; PIRES; MEDHAT, 2016).

A seção de choque atômica é obtida pela divisão de σ_M pelo número total de unidades de fórmulas moleculares que compõe o composto ($\sum_i n_i$). Esta quantidade é ainda multiplicada pelo número total de átomos que compõe a molécula (3.2.2). A amostra de solo mais argilosa, PB 0-20, apresentou valor menor para $\sum_i n_i$, $2,00 \times 10^4 \pm 0,062 \times 10^4$, enquanto que a amostra de solo PJ apresentou um valor mais elevado de $\sum_i n_i$, $4,38 \times 10^4 \pm 1,87 \times 10^4$.

Na comparação entre os tamanhos de partículas estudados, não foi observado grandes flutuações entre os valores máximos e mínimos da seção de choque atômica para ambas as fontes estudadas. Os valores ficaram compreendidos dentro do erro encontrado nas medidas.

Figura 3.3: variação da seção de choque atômica (σ_A) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.

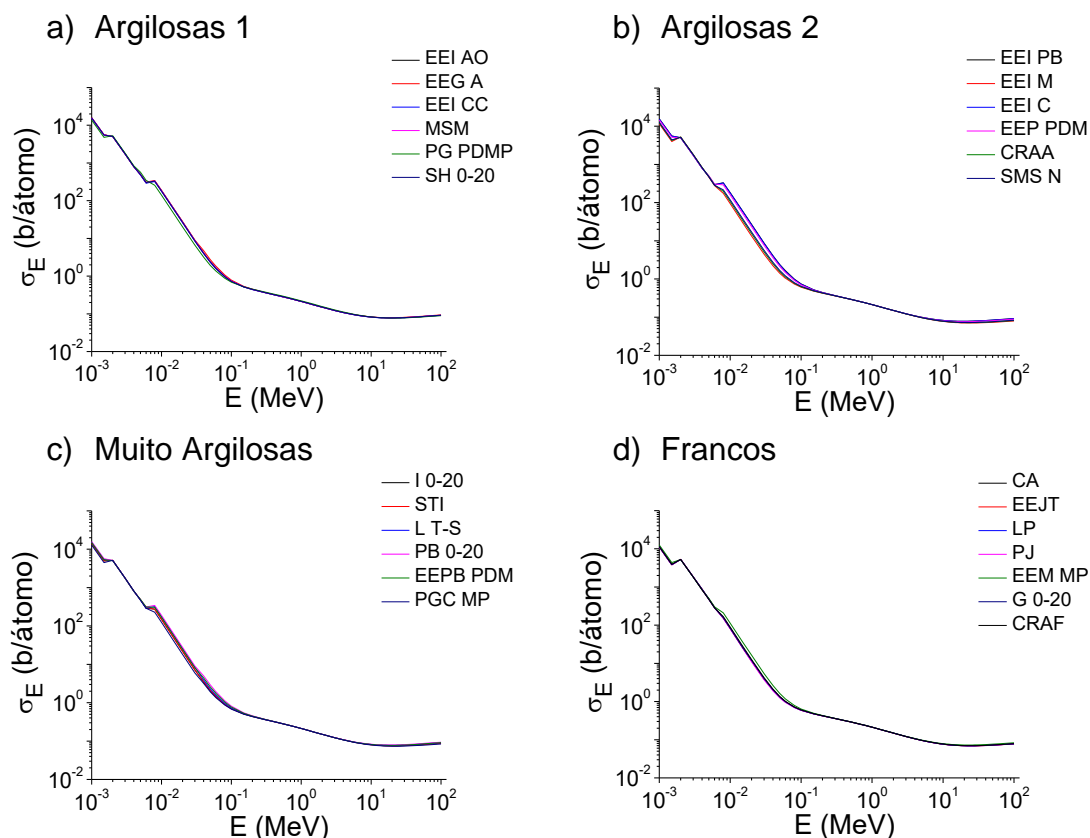


Fonte: a autora.

Na Figura 3.4 estão apresentados os gráficos para a seção de choque eletrônica. Ela depende de μ/ρ dos elementos que compõe a mistura estudada, como apresentado na Equação (3.2.3). Portanto, quanto mais elementos pesados, como por exemplo o Fe, o solo possuir, maior será seu σ_E . Para a energia do ^{241}Am , que fica compreendida na região de baixas energias, o solo PB 0-20 mostrou o maior valor para σ_E . Nas regiões de energias intermediárias, especificamente para a energia do ^{137}Cs , o solo PG PDMP, mostrou o maior valor para a seção de choque eletrônica. Ambos os solos correspondem à textura muito argilosa e argilosa. Os menores valores para as duas energias de interesse foram apresentados pelos solos PJ e CA, correspondendo às texturas arenosa e franco siltosa respectivamente (Tabela 3.10). Os altos valores podem ser

explicados devido a maior concentração do óxido Fe_2O_3 nos solos do grupo das argilosas, em comparação com os solos do grupo das francos.

Figura 3.4: variação da seção de choque eletrônica (σ_E) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.



Fonte: a autora.

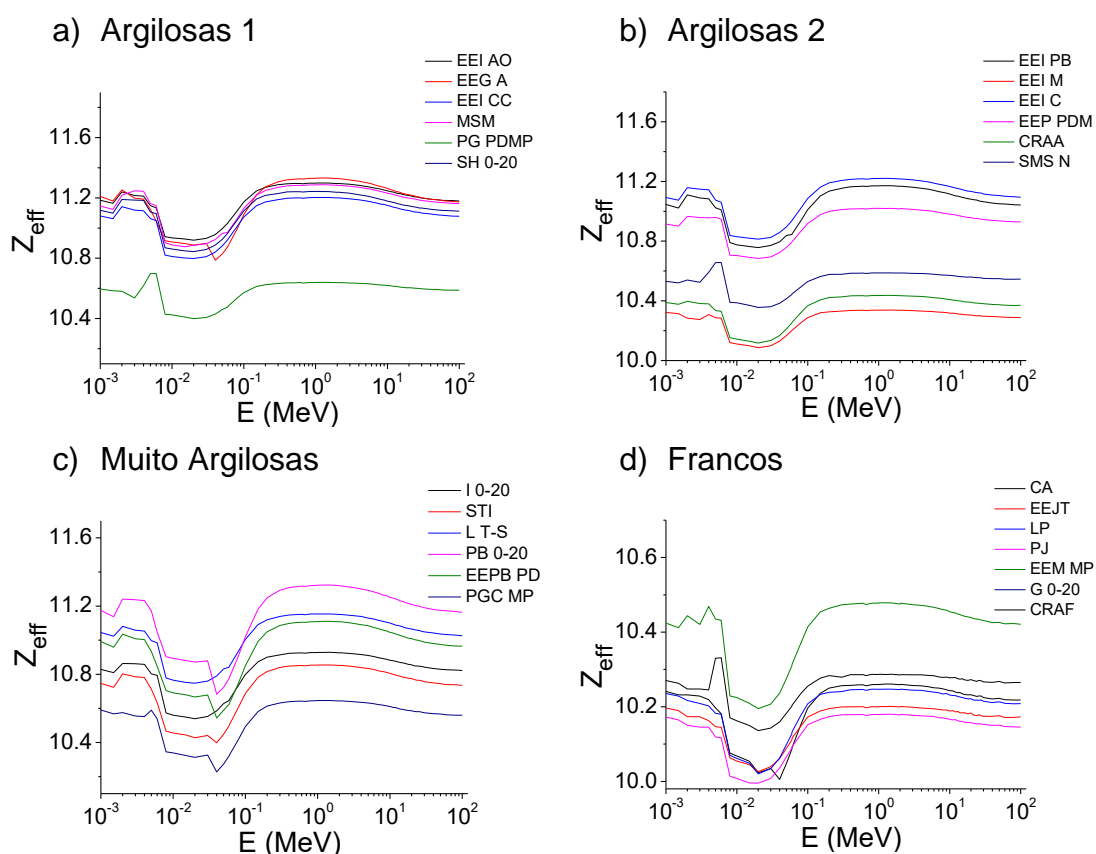
Comparando os peneiramentos de $45 \mu\text{m}$ e 2-1 mm para os valores de σ_E (Tabela 3.10), também não é observado grandes flutuações nos valores para ambas as fontes estudadas. Os valores obtidos estão compreendidos dentro do desvio padrão médio da medidas.

O número atômico efetivo depende das seções de choque atômica e eletrônica. Este também depende dos números atômicos dos elementos que constituem o componente ou mistura. Quanto maior o número atômico efetivo, maior é a concentração de elementos com um alto número atômico (SINGH et al., 2015). Estudos realizados da interação da radiação com a matéria em gemas naturais (MEDHAT, 2012) mostram que materiais tendo alto valor de Z_{eff} absorvem fótons de maior energia. O maior valor para Z_{eff} para as duas energias de interesse é apresentado pelo solo do grupo das argilosas, EEI AO,

enquanto que o menor valor para as mesmas energias, é exibido pelo solo do grupo das amostras franco no solo PJ (Tabela 3.10).

Como mostrado na Figura 3.5 os valores de Z_{eff} mostram um decaimento em seus valores para a região de energia entre ~ 100 keV até ~ 1 MeV, passando a ter então um aumento no Z_{eff} . Tal comportamento pode ser explicado pela mudança de predominância de absorção e espalhamento de fótons. O mesmo comportamento é também observado nos estudos de gemas naturais (MEDHAT, 2012), aminoácidos (MANOHARA et al., 2007), polímeros (NAYAK et al., 2001) e na indústria de construção civil (BHANDAL et al., 1993; AKKURT et al., 2013).

Figura 3.5: variação do número atômico efetivo (Z_{eff}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.



Fonte: a autora.

A curva do solo PG PDMP, do grupo das argilosas 1, apresentou comportamento distinto das demais do seu grupo. Isto se deve a porcentagem do Fe_2O_3 em sua composição, dado que o teor deste óxido é menor neste solo. Os solos deste grupo de amostras argilosas apresentam a seguinte sequência

com relação ao teor de Fe_2O_3 : EEI AO > EEG A > MSM > SH 0-20 > EEI CC > PG PDMP.

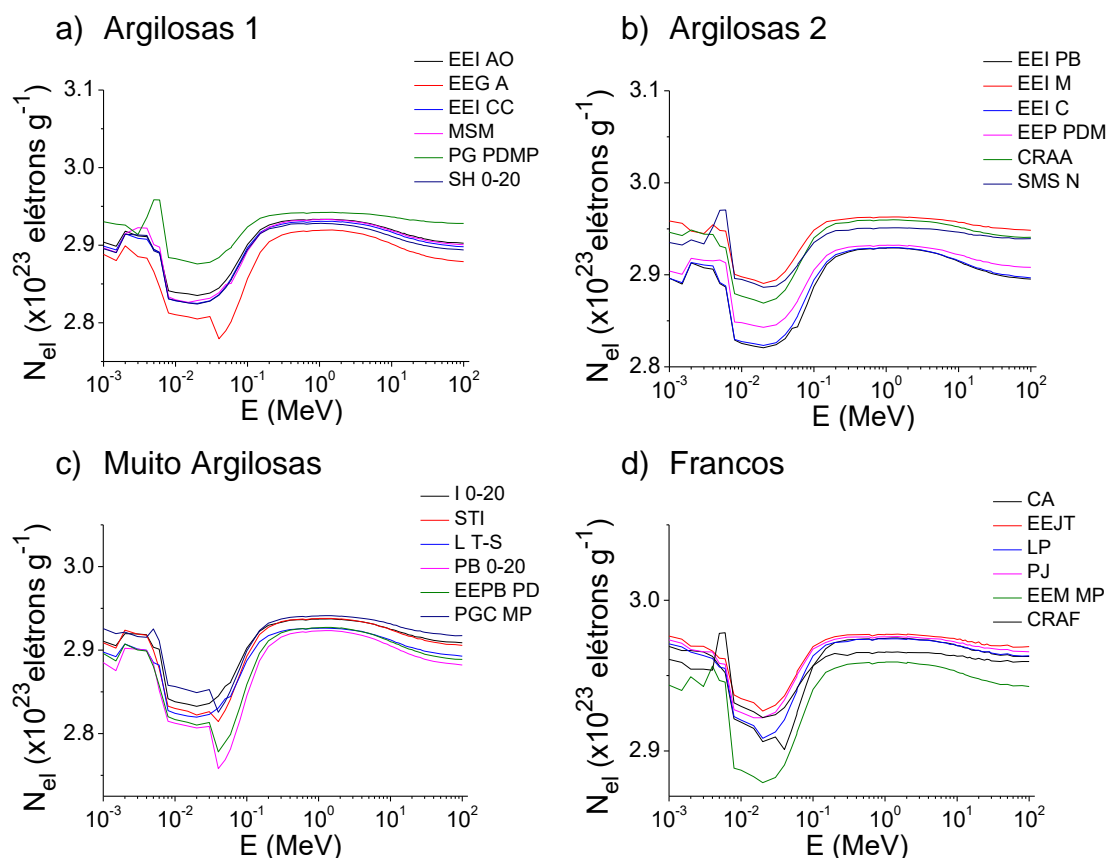
Para o grupo das argilosas 2, os solos SMS N, CRAA e EEI M apresentaram comportamento distinto das demais curvas do seu grupo. Estes solos também apresentaram os menores teores do óxido de Fe_2O_3 na seguinte sequência: EEI PB > EEI C > EEP > EEP PDM > SMS N > CRAA > EEI M. Observou-se, assim como nas amostras de partículas com diâmetro equivalente a 45 μm , que a porcentagem do Fe_2O_3 pode ser usado como critério de separação e de agrupamento das curvas do Z_{eff} (KUCUK et al., 2013), onde os solos com menores teores do óxido possuem os menores valores de Z_{eff} , assim como os solos com maiores teores do óxido possuem os maiores valores do número atômico efetivo.

Comparando as curvas do número atômico efetivo do peneiramento de 2-1 mm com o de 45 μm observamos que a amostra de solo CRAA apresentou comportamento distinto entre um tamanho de agregado e outro. O que pode estar associado a esse comportamento é o aumento que este apresentou no óxido SiO_2 e na diminuição do óxido Fe_2O_3 , dado que as curvas do Z_{eff} apresentam forte relação com o conteúdo do óxido de ferro presente nas amostras de solo.

O mesmo comportamento de curva pode ser observado nos gráficos para N_{el} (Figura 3.6), onde na região de ~ 100 keV e ~ 1 MeV, pode ser observado um decaimento e um crescimento da curva, mostrando mudança na predominância de efeitos de acordo com a energia dos fótons incidentes (AKKURT et al., 2013). O maior valor para N_{el} , para as duas energias de interesse, foi apresentado pelo solo CA, com textura franco siltosa. O menor valor para N_{el} para a energia do ^{241}Am foi apresentado pelo solo EEI PB, com textura argilosa, e para a energia do ^{137}Cs , foi apresentado pelo solo EEI AO, de textura argilosa.

O que pode mostrar que a contribuição dos óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , excedem a contribuição da densidade eletrônica do óxido Fe_2O_3 , cujo número atômico é maior.

Figura 3.6: variação da densidade eletrônica (N_{el}) para os 25 solos estudados, no intervalo de energia de 1 keV a 100 MeV, para amostras de partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.



Fonte: a autora.

Tabela 3.10: valores máximos e mínimos para as energias do ^{241}Am e ^{137}Cs com os respectivos desvios padrões da média para as amostras com partículas com diâmetro equivalente de 2-1 mm.

2-1 mm	Am^{241}
σ_M (b/átomo)	
Máximo	CA: $\sim 2,62 \times 10^6$ ($0,29 \times 10^6$)
Mínimo	EEI M; $\sim 1,22 \times 10^6$ ($0,12 \times 10^6$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	PB 0-20: $\sim 21,3$ (0,21)
Mínimo	PJ: $\sim 9,67$ (0,15)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	PB 0-20: $\sim 1,97$ (0,023)
Mínimo	PJ: $\sim 0,96$ (0,01)
Z_{eff}	
Máximo	EEI AO: $\sim 11,0$ (-)
Mínimo	PJ: $\sim 10,1$ (0,03)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	G 0-20: $\sim 2,96$ (0,02)
Mínimo	PB 0-20: $\sim 2,78$ (-)
σ_M (b/átomo)	

Continua na próxima página.

^{137}Cs	
Máximo	EEJT $\sim 5,65 \times 10^5$ ($3,72 \times 10^5$)
Mínimo	EEl PB $\sim 4,68 \times 10^4$ (-)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	EEl AO $\sim 2,97$ (0,06)
Mínimo	PJ $\sim 2,63$ (-)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	PG PDMP $\sim 0,27$ (0,01)
Mínimo	CA $\sim 0,26$ (-)
Z_{eff}	
Máximo	EEl AO $\sim 11,3$ (0,01)
Mínimo	PJ $\sim 10,2$ (0,02)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	G 0-20 $\sim 2,97$ (-)
Mínimo	PB 0-20 $\sim 2,78$ (-)
45 μm ^{241}Am	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 3,37 \times 10^6$ ($0,35 \times 10^6$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 1,81 \times 10^5$ ($0,04 \times 10^5$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	EEl PB: $\sim 20,3$ (0,50)
Mínimo	PJ: $\sim 9,59$ (0,17)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 1,87$ (0,06)
Mínimo	PJ: $\sim 0,95$ (0,02)
Z_{eff}	
Máximo	EEl AO: $\sim 10,8$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,00$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,95$ (0,01)
Mínimo	EEl PB: $\sim 2,78$ (0,01)
^{137}Cs	
σ_M (b/átomo)	
Máximo	LP: $\sim 8,83 \times 10^6$ ($0,11 \times 10^6$)
Mínimo	I 0-20: $\sim 2,94 \times 10^4$ ($0,08 \times 10^4$)
σ_A (b/átomo)	
Máximo	MSM: $\sim 2,91$ (0,01)
Menor	PJ: $\sim 2,62$ (-)
σ_E (b/átomo)	
Máximo	EEG A: $\sim 0,25$ (0,01)
Mínimo	PJ: $\sim 0,25$ (-)
Z_{eff}	
Máximo	EEl PB: $\sim 11,2$ (0,02)
Mínimo	PJ: $\sim 10,1$ (-)
N_{el} ($\times 10^{23}$ elétrons g^{-1})	
Máximo	CA: $\sim 2,98$ (-)
Mínimo	EEl AO: $\sim 2,91$ (0,02)

O valor compreendido entre parênteses é o desvio padrão da média e o símbolo (-) significa que o desvio padrão médio é insignificante.

Conclusão

Os óxidos Al_2O_3 e SiO_2 , do tamanho de partículas com diâmetro de 2-1 mm, apresentaram diminuição em sua porcentagem na maior parte dos solos, já o óxido Fe_2O_3 apresentou um aumento na maior parte dos solos.

Tais diferenças entre os teores dos óxidos afetaram diretamente o valor do coeficiente de atenuação de massa, para a energia do ^{241}Am , que apresentou aumento para as amostras de solos onde houve diminuição do óxido SiO_2 e aumento do Fe_2O_3 , e diminuição nas amostras onde houve aumento do óxido SiO_2 e diminuição do Fe_2O_3 , devido ao número atômico e a densidade do elemento Fe ser maior em comparação com o Al e Si, possuindo assim maior poder de atenuação da radiação. Para a energia do ^{137}Cs não foram observadas grandes flutuações em seus valores de μ/ρ .

A seção de choque molecular σ_M , mostrou disparidades entre os valores do tamanho de agregado de 45 μm com relação ao de 2-1 mm, para as duas energias estudadas, tanto para as amostras mais argilosas quanto para as amostras pertencentes ao grupo das francos. Para a análise deste parâmetro, individualmente, seria indicado o tamanho de partícula exigido pelo fabricante do equipamento de fluorescência de Raios X, quer seria o diâmetro de 45 μm .

Com relação aos demais parâmetros, σ_A , σ_E , Z_{eff} e N_{el} , não foram observadas diferenças em seus valores com relação à mudança de um diâmetro de partícula para outro para as duas energias estudadas, tanto para as amostras mais argilosas quanto para as amostras pertencentes ao grupo das francos, mesmo que os cálculos desses parâmetros citados dependam da seção de choque molecular. Portanto, para a análise destes parâmetros os dois tamanhos de partículas podem ser utilizados para as análises.

Referências

ABDEL-RAHMAN, M. A. et al. Effect on sample thickness on the measured mass attenuation coefficients of some compounds and elements for 59.54, 661.6 e 1332.5 keV γ -rays. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A**, v. 447, p. 432-436, 2000.

AKKURT, I. et al. Effective Atomic number and electron density of marble concrete. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 295, p. 633-638, 2013.

AKKURT, I. et al. Study on Z dependence of partial and total mass attenuation coefficients. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v. 94, p. 379-385, 2005.

AKMAN, F. et al. study on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients near the K edge in some samarium compounds. **Applied Radiation and Isotopes**, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.04.001>.

APPOLONI, C.R.; RIOS E. A. mass attenuation coefficients of Brazilian Soils in the range 10-1450 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, p. 287-291, 1994.

APPOLONI, R. M. et al. Two media method for gamma ray attenuation coefficient measurement of archaeological ceramic samples. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 53, p. 1011-1016, 2000.

BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K ; OLIVEIRA, J. C. M. ; NIELSEN, D. R. . Gamma-Ray Beam Attenuation As An Auxiliary Technique For Evaluation Of The Soil Water Retention Curve. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n.3, p. 498-502, 1998.

BHANDAL, G. S. et al. Photon attenuation coefficient and effective atomic number study of cements. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 44, n° 9, p. 1231-1243, 1993.

BRAR, G. S. et al. Variation of build up factors of soils with weight fractions of iron and silicon. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 49, n° 8, p. 977-980, 1998.

BORGES, J. A. R. **Tamanhos Elementares Representativos de atributos do solo via atenuação de raios gama e tomografia computadorizada**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2015.

CESAREO, R. et al. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10-300 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, n° 5, p. 613-620, 1994.

COSTA, J.C.; BORGES, J.A.R.; Pires, L.F. Effect of collimator size and absorber thickness on soil bulk density evaluation by gamma-ray attenuation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 333-335, 2014.

CONNER, A. L. et al. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. **Physical review A general physics**, v.1, n° 3, p. 539-544, 1970.

COREY, J. C. et al. Measurement of attenuation coefficients of ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am gamma rays for soil density and water content determinations. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v. 35, p. 251-219, 1971.

DEMIR, D. et al. Measurement of the effective atomic number of Fe_xCr_{1-x} and Fe_xNi_x alloys using scattering of gamma rays. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 581, p. 213-216, 2013.

ELLIOT, T. R. et al. A comparison of optical and X-ray technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, v. 141, p. 60-70, 2007.

EL-KHAYATT, A. M. et al. Photon attenuation coefficients of Heavy-Metal Oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: A comparison study. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 735, p. 207-212, 2014.

FERREIRA, T. R. et al. Surface liming effects on soil radiation attenuation properties. **Journal of Soils Sediments**. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1866-2>.

GOPAL, S. Gamma-ray attenuation coefficient measurements. **Physical Review A**, v. 8, n^o6, p. 2814-2818, 1973.

GUPTA, M. K. et al. Measurement of attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of oxides of lanthanides by using simplified ATM-method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 619, p. 356-360, 2015.

HANAGODIMATH et al. Studies on the effective atomic numbers and electron densities of essential amino acids in the energy range 1 keV-100GeV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 258, p. 321-328, 2007.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Copyright 2004, Elsevier Science (USA).

HINE, G. J. The effective atomic numbers of materials for various gamma ray interaction. **Physics Review**, v. 85, p. 725, 1952.

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1995.

ISSA, S. A. M. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO-BaO-B₂O₃ glass system. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 120, p. 33-37, 2016.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. Copyright 1962, Addison – Wesley Publishing Company, Inc. (USA).

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. Copyright 2010, John Wiley & Sons, Inc. (USA).

KUCUK, N. et al. Determining photon energy absorption parameters for different soil samples. **Journal of Radiation Research**, v. 54, p. 578-586, 2013.

KURUDIREK, M. A study of chemical composition and radiation attenuation properties in clinoptilolite-rich natural zeolite from Turkey. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 79, p. 1120-1126, 2010.

KURUDIREK, M. et al. A study of total mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for various organic and inorganic compounds at 59.54 keV. **Annals of Nuclear Energy**, v. 36, p. 1769-1773, 2009.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. Copyright 2010, 2^o edição, São Paulo: Oficina de textos.

MANOHARA, S. R. et al. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 266, p. 3906-3912, 2008.

MEDHAT, M. E. Studies of effective atomic numbers and electron densities in different solid state track detectors in the energy range 1 keV-100GeV. **Annals of Nuclear Energy**, v. 38, p. 1252-1263, 2011.

MEDHAT, M. E. Study of the mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in some gemstones. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 293, p. 555-564, 2012.

MEDHAT, M. E.; PIRES L. F. Importance of photo atomic cross section for studying physical properties of different types of soil. **X Ray Spectrometry**, v. 45, p. 202-206, 2016.

MEDHAT, M. E. et al. Analysis of photon interaction parameters as function of soil composition. **Journal Radioanal Nuclear Chemistry**, v. 300, p. 1105-1112, 2014.

MELO, V. F. et al. Mineralogia das frações areia silte e argila de sedimentos do grupo barreira no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 29-41, 2002.

MELO, V. F. et al. Propriedades químicas e cristalográficas da caulita e dos óxidos de ferro em sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz , estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 53-64, 2002.

MOREIRA, A. C. et al. Hydraulic conductivity of underformed soil columns by gamma ray transmission. **Radiation physics and chemistry**, v. 61, p.693-695, 2001.

MUDAHAR, G. S. et al. Effective atomic number studies in different soils for total photon interaction in the energy region 10-5000 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 39, p. 1251-1254, 1988.

MUDAHAR, G. S. et al. Total and partial mass attenuation coefficients of soil as a function of chemical composition. **Applied Radiation Isotopes**, v. 42, n^o1, p. 13-18, 1991.

OLIVEIRA, J. C.M. et al. Soil Structure evaluated by gamma ray attenuation. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 127-133, 1998.

PIRES, L.F. **Atenuação de Rios Gama como técnica auxiliar para a determinação da curva de retenção da água no solo.** Universidade de São Paulo, 2002.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção do solo.** Universidade de São Paulo, 2006.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, Netherlands, v. 82, n.1, p. 89-97, 2005.

PIRES, L. F.; SAAB, S.C.; PRANDEL, L.V. The effect of wetting and drying cycles on soil chemical composition and their impact on bulk density evaluation: An analysis by using XCOM data and gamma-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 213, p. 512-520, 2014.

PRANDEL, L. V. et al. Mineralogical analysis of clays in hardsetting soil horizons, by X-ray fluorescence and X-ray diffraction using Rietveld method. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 65-68, 2014.

ROGASIK, H. et al. Discrimination of Soil Phases by Dual Energy X-ray Tomography. **Soil Science American Journal**, v. 63, p. 741-751, 1999.

SAHOTA, H. S. et al. Effective atomic numbers studies in different soils for total photon interaction in the energy region 10-5000 keV. **Applied Radiation Isotopes**, v. 39, nº 12, p. 1251-1254, 1988.

UN, A. et al. The directed- Z_{eff} software for direct calculation of mass attenuation coefficient, effective atomic number and effective electron number. **Annals of Nuclear Energy**, v. 65, p. 158-165, 2014.

VAZ, C. M. P. et al. Using a Computed Tomography Miniscanner for Studying Tillage induced soil compactation. **Soil Technology**, v. 2, p. 313-321, 1989.

4. Considerações finais e trabalhos futuros

O conjunto de análises realizadas no presente trabalho mostra o potencial dos estudos com os parâmetros de interação da radiação com a matéria. Ele possibilitou a análise da composição química do solo e juntamente com a textura foi possível uma análise minuciosa dos parâmetros envolvidos. Associado a isso também foi possível constatar como a mudança no tamanho das partículas afeta a composição química, e como isso reflete nos parâmetros estudados, para as energias das fontes mais utilizadas na pesquisa.

Como base no que foi estudado, é possível propor alguns trabalhos que podem ser realizados futuramente para aperfeiçoar as análises dos solos estudados.

Para comparar os métodos de obtenção de teor de óxidos dos solos, é proposto a utilização de outra metodologia para a obtenção da porcentagem de óxidos, para os dois tamanhos de partículas analisadas no presente trabalho, como o uso da fluorescência de raios X por comprimento de onda (WDX), utilizando curvas de calibração com padrões minerais.

Comparação de mais um tamanho de partículas entre os extremos já estudados, fazendo análise da composição química e dos parâmetros de interação da radiação, a fim de se obter mais informações sobre como os tamanhos dos agregados afetam os estudos já realizados.

Análise da composição mineralógica dos solos por Difração de Raios X, a fim de analisar as diferenças entre os teores dos óxidos entre as frações do solo visando obter maiores informações sobre os parâmetros de interação da radiação com os solos.