

# Refinamento da medida do coeficiente de atenuação do chumbo em atividades de laboratório de Física Moderna

Refining the measurement of the attenuation coefficient of lead in modern physics laboratory activities

Luiz A.A. Pereira<sup>1</sup>, Fábio A.M. Cássaro<sup>1</sup>, Luiz F. Pires<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Física, 84.030-900, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Recebido em 09 de agosto de 2023. Revisado em 17 de novembro de 2023. Aceito em 23 de novembro de 2023.

Conteúdos relacionados à área de Física Moderna envolvem o conhecimento da produção e interação da radiação com a matéria. A manifestação macroscópica dessa interação se evidencia pela atenuação da radiação incidente no material. Neste estudo, apresenta-se o uso de um aparato experimental destinado a práticas de ensino visando a determinação do coeficiente de atenuação do chumbo para fótons de raios gama provenientes de uma fonte de <sup>137</sup>Cs (fótons com energia de aproximadamente 662 keV). Tradicionalmente, essa determinação é realizada utilizando-se como material absorvedor placas de chumbo de espessuras conhecidas. Entretanto, em geral, esse enfoque leva a resultados discrepantes em relação ao valor do coeficiente de atenuação teórico para o chumbo, com desvios em torno de 15%. No método aqui apresentado, sugere-se a substituição das placas por esferas ou pó de chumbo. Os resultados obtidos mostram que o método proposto reduziu sensivelmente os desvios do coeficiente de atenuação medido em relação aos valores teóricos (simulados). Na melhor condição experimental os erros ficaram entre 2 e 4%. Entre as grandes vantagens do método abordado estão à possibilidade de variações contínuas na espessura e na geometria do material absorvedor e análise da influência de sistemas porosos na medida da atenuação da radiação.

**Palavras-chave:** Laboratório de Física Moderna, Radiação gama, Coeficiente de atenuação de massa, XCOM.

Contents related to the modern physics field involve the knowledge of the production and interaction of radiation with matter. The attenuation of the radiation evidences the macroscopic manifestation of this interaction. This study presents an apparatus intended for teaching practices to determine the lead mass attenuation coefficient for gamma-ray photons from a source of <sup>137</sup>Cs (photons with energy of approximately 662 keV). Traditionally, this determination is performed using lead plates of known thicknesses. However, this focus generally produces discrepant results related to the mass attenuation coefficient adopted values, with deviations around 15%. In the approach presented here, which is innovative, the plates were replaced by small spheres or powders of the analyzed material (lead). The results show that this substitution significantly reduced the deviations from the theoretical values. In the best experimental condition, the errors were between 2% and 4% for the spheres and the powder, respectively. Among the advantages of the proposed method are the possibility of continuous variations in the thickness and the geometry of the attenuating material, and the analysis of the influence of porous systems on the measurement of radiation attenuation.

**Keywords:** Modern Physics Laboratory, Gamma radiation, Mass attenuation coefficient, XCOM.

## 1. Introdução

Disciplinas englobando conceitos de Física Moderna são comuns nas grades curriculares dos cursos de graduação em Física no Brasil. Comumente os discentes cursam uma disciplina envolvendo tópicos de Física Moderna para na sequência aplicarem os conhecimentos teóricos estudados em atividades laboratoriais de Física Moderna. No laboratório de Física Moderna, os discentes têm contato com inúmeros experimentos envolvendo tópicos variados, tais como: medidas da relação carga-massa do elétron, efeito fotoelétrico, difração de elétrons, lei de Planck, experimentos de física nuclear, para citar apenas alguns [1].

Os experimentos de física nuclear normalmente abrangem análises estatísticas do processo de emissão de fótons por fontes radioativas, fator *build-up*, funcionamento do contador Geiger-Müller (G-M), medidas do coeficiente de atenuação, variação das contagens de fótons em função da espessura da amostra, entre outros [2–4]. Um dos experimentos que exige cuidados experimentais adicionais e que usualmente apresenta erros consideráveis nas medidas é a determinação dos coeficientes de atenuação linear ( $\kappa$ ) e de massa ( $\mu$ ) [4]. Como potenciais fontes de erro têm-se a não colimação dos fótons de raios gama oriundos da fonte radioativa (geralmente <sup>137</sup>Cs e <sup>60</sup>Co), o uso de sistema de detecção com baixa eficiência (geralmente contadores do tipo G-M), fontes radioativas com baixa atividade (questão de proteção radiológica em atividades experimentais voltadas para o ensino)

\*Endereço de correspondência: [lfpires@uepg.br](mailto:lfpires@uepg.br)

e materiais absorvedores com espessuras inadequadas (geralmente placas com espessuras pré-fixadas) [5–7].

O coeficiente de atenuação é uma das propriedades mais importantes na área de física das radiações. O coeficiente de atenuação linear fornece uma medida da probabilidade de que um fóton de raios X ou gama seja absorvido ou espalhado por unidade de comprimento do material absorvedor [8]. Desta forma, a medida do coeficiente de atenuação é de grande relevância na área de blindagem e proteção radiológica, uma vez que inúmeros outros parâmetros físicos podem ser derivados com base em medidas de  $\kappa$  e  $\mu$ , tais como: seções de choque, número atômico efetivo, densidade eletrônica, camada semi-redutora, entre outros [9, 10]. O coeficiente de atenuação linear é função da energia do fóton incidente, da composição química e da densidade do material absorvedor [8, 11]. Por exemplo, quando ocorre aumento da densidade do material absorvedor uma menor quantidade de fótons de uma determinada energia será transmitida pela amostra [12].

Os principais processos responsáveis pela atenuação dos fótons de raios X e gama são o efeito fotoelétrico, os espalhamentos coerente e incoerente (efeito Compton) e a produção de pares [13]. O coeficiente de atenuação de massa total é obtido quando consideramos cada um dos efeitos parciais (efeito fotoelétrico, espalhamentos coerente e incoerente e produção de pares) de atenuação da radiação [14]. No efeito fotoelétrico, os fótons transferem toda a energia para os elétrons do material, ao passo que no efeito Compton, os fótons são espalhados pelos elétrons do absorvedor compartilhando parte de seus momentos com esses elétrons que se tornam livres [8]. Na produção de pares é formado um par elétron-pósitron; processo que necessita de fótons de ao menos 1,02 MeV (duas vezes a massa de repouso do elétron) para que ocorra [8]. Para fótons de menores energias (e.g. fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$ ) os processos de absorção (efeitos fotoelétrico e Compton) podem sofrer influência da geometria do sistema experimental, principalmente com relação às características do material absorvedor. Desta forma, podem ocorrer erros nas medidas experimentais de  $\kappa$  e  $\mu$  em função da detecção de fótons espalhados (secundários) como se fossem transmitidos [6].

Neste estudo, apresentamos uma proposta de medida experimental de  $\mu$  utilizando como absorvedor materiais granulados de diferentes diâmetros (pó de chumbo e esferas de chumbo), em contraste com o uso de placas de espessuras fixas, geralmente empregadas em laboratórios de ensino de Física Moderna. Neste sentido, além da determinação de  $\mu$ , pretendemos verificar se a utilização de materiais que permitem a variação contínua da espessura do material absorvedor (chumbo) possibilita aprimorar as medidas experimentais de  $\mu$ . Também analisaremos como meios porosos constituídos de materiais granulares influenciam nas medidas de  $\mu$ , uma vez que permitem maior flexibilidade nas variações das áreas de seção e volumes do material absorvedor,

por se adaptarem às características do porta-amostra (recipiente) no qual estão acondicionados. Desta forma, nosso principal objetivo é propor um experimento alternativo, a ser conduzido em aulas experimentais de Física Moderna, tendo em vista uma determinação mais acurada de  $\mu$ .

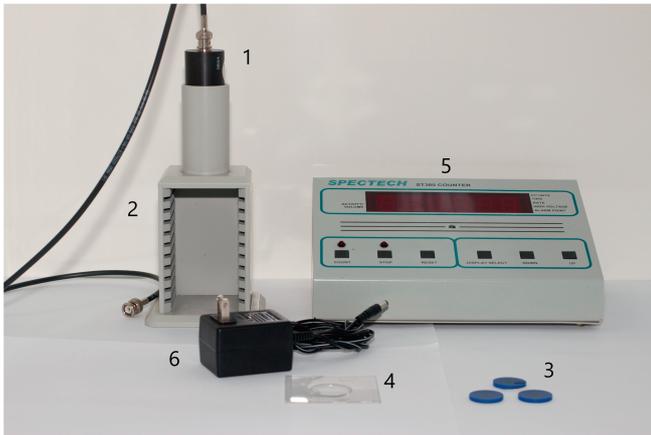
## 2. Materiais

Os materiais utilizados para a realização do experimento fazem parte de um kit da PASCO direcionado para experimentos na área de física das radiações, além de material granulado (esferas e pó) composto majoritariamente de chumbo [15]. Para nos certificarmos da composição do material granulado (Tabela 1), o qual foi comprado em sites da internet, realizamos a análise elementar desses materiais com um sistema de fluorescência de raios X por dispersão de energia (FRX). No entanto, não entraremos em detalhes a respeito dessas medidas, uma vez que elas foram efetuadas com o intuito de nos certificarmos das composições das esferas e do pó. As placas de chumbo, normalmente usadas nas medidas do coeficiente de atenuação no laboratório de ensino, fazem parte do kit da PASCO e possuem alto grau de pureza.

O kit para as medidas experimentais possui os seguintes componentes: 1) fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$  (referência do fabricante SN-7972A) com atividade aproximada de 3,4  $\mu\text{Ci}$ . A fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$  emite fótons de raios gama com energia de aproximadamente 662 keV, com um período de meia vida (tempo para redução de metade de sua atividade) de 30,2 anos; 2) detector do tipo Geiger-Müller (G-M) (referência do fabricante SN-7970A). O detector G-M usado possui janela de mica ( $\leq 2 \text{ mg cm}^{-2}$ ) com diâmetro de 35 mm e boa eficiência para fontes de baixa atividade. O tempo morto no tubo detector é de aproximadamente 200  $\mu\text{s}$ ; 3) sistema eletrônico composto de fonte de alta tensão para alimentar o detector G-M, contador de fótons e temporizador (referência do fabricante SN-7907); e 4) suporte da amostra (torre), o qual é composto de uma estrutura confeccionada em plástico duro que permite encaixar o detector G-M, inserir as pastilhas contendo o

**Tabela 1:** Composição elementar (óxidos) dos meios porosos analisados (pó, esferas de diâmetro pequeno – EDP e esferas de diâmetro médio – EDM) obtida pela técnica de fluorescência de raios X (FRX) por dispersão de energia.

Óxido	Amostra/Porcentagem (%)		
	Pó	EDP	EDM
PbO	93,67	98,54	99,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,38	0,19	0,34
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46	0,96	–
ZnO	0,34	–	–
NiO	0,09	–	–
CuO	0,07	0,12	–
CaO	–	0,05	0,45
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	0,13	–



**Figura 1:** Equipamento didático de física nuclear da PASCO: 1) Detector do tipo Geiger-Müller (G-M), 2) torre para acondicionar as fontes radioativas, detector G-M e materiais absorvedores, 3) fontes radioativas, 4) suporte da fonte radioativa, 5) sistema eletrônico e 6) fonte de alimentação.

material radioativo e as placas de chumbo. A Figura 1 traz uma foto dos materiais necessários para a realização do experimento.

### 3. Montagem Experimental

Para a montagem do experimento selecionamos três fontes radioativas de  $^{137}\text{Cs}$  colocadas uma acima da outra e fixadas com fita adesiva. Cada fonte radioativa se encontra localizada no centro de uma cápsula de plástico que possui um diâmetro de 2,5 cm. Desta forma, quando a fonte é manuseada, o operador não tem contato direto com o material radioativo, uma vez que a fonte se encontra selada. Nós optamos por utilizar três fontes radioativas a fim de aumentar o fluxo de fótons e reduzir o tempo de realização do experimento [3], tendo em vista a condução da atividade experimental ao longo de duas horas/aula.

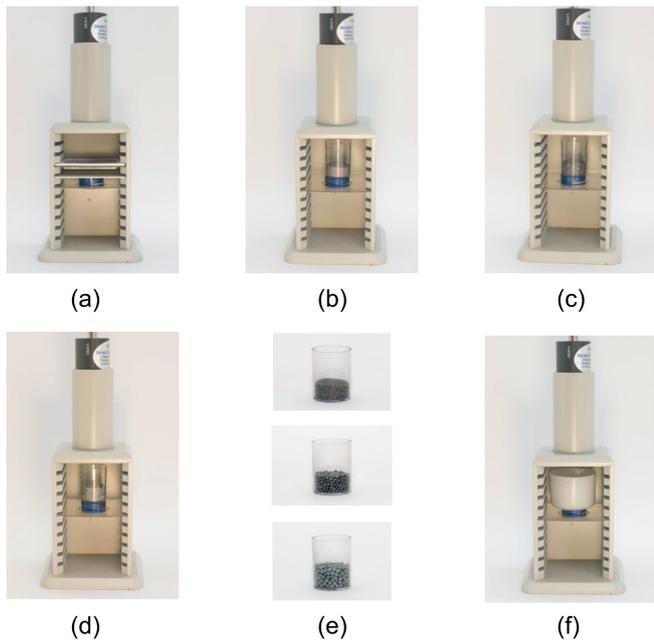
Após a montagem das fontes radioativas, as mesmas foram acondicionadas no suporte da amostra (Figura 1). Para isto, uma placa de plástico contendo uma reentrância na parte central (4), usada para acomodar a cápsula com o material radioativo (3), foi inserida em uma das dez prateleiras localizadas na parte inferior do suporte de amostra (2). O detector G-M (1) foi encaixado na parte superior do suporte da amostra, de modo que somente os fótons emitidos na direção vertical fossem detectados. Para a realização do experimento de medida do coeficiente de atenuação, as placas de chumbo e os materiais granulados foram inseridos entre a fonte radioativa e o detector G-M. Na sequência, o detector G-M foi alimentado por meio de cabo coaxial ligado ao sistema eletrônico de contagem (5), no qual é possível ajustar a tensão que irá alimentar o detector G-M, o tempo de contagem e registrar as contagens dos fótons detectados.

Para minimizar o contato dos discentes com o material radioativo e a radiação emitida, inserimos placas de chumbo de espessura aproximada de 3 mm ao redor da fonte radioativa. Como o cabo coaxial que alimenta o detector G-M é relativamente longo, o sistema eletrônico de contagem, que geralmente é manuseado pelos discentes, foi posicionado a uma distância de aproximadamente dois metros das fontes radioativas. É válido ressaltar que a intensidade dos fótons emitidos pela fonte sofre redução com o quadrado da distância [8], de modo que a distância adotada constitui um importante mecanismo de proteção radiológica. Além disso, a cápsula contendo o material radioativo possui uma janela estreita, indicando que a maior quantidade dos fótons será emitida na direção vertical, quando posicionada nesta direção.

### 4. Procedimento Experimental

Para a realização das medidas experimentais foi aplicada uma tensão no detector G-M de 980 V, a qual se encontra no intervalo do *plateau* para esse tipo de detector. Um experimento prévio, cujos detalhes não serão discutidos neste estudo, foi realizado para definir o *plateau* do detector G-M, cujo valor está compreendido entre 760 e 1000 V. O tempo de contagem para cada uma das medições foi fixado em 300 s. A escolha deste tempo foi ajustada para manter uma boa estatística de contagem. Antes de cada medida, foi determinada a radiação de fundo (*background*), a qual foi posteriormente descontada dos valores de contagem obtidos. Na determinação do coeficiente de atenuação, as fontes radioativas foram inseridas na quinta prateleira.

As placas de chumbo, selecionadas para o experimento, apresentam as seguintes dimensões em termos de ordem crescente de espessura: 0,079, 0,159, 0,317 e 0,635 cm ou: 0,89, 1,80, 3,59 e 7,18 em unidades de  $\text{g cm}^{-2}$  (valores informados no kit experimental). Foi inserida uma placa de plástico (polietileno) de 0,1 cm de espessura, na quarta bandeja, entre as fontes radioativas e as placas de chumbo, com a finalidade de blindar as partículas beta e uniformizar as medidas, uma vez que as amostras granuladas (pó e esferas de chumbo) foram acondicionadas em recipientes plásticos. As placas de chumbo foram substituídas para cada contagem de fótons transmitidos, a fim de verificarmos a variação de contagem em função da espessura do material absorvedor. Com relação ao pó e as esferas de chumbo, essas amostras foram acondicionadas em dois recipientes plásticos com as seguintes características: 1) altura de 3,50 cm, diâmetro interno de 2,50 cm e espessura da parede de 0,10 cm (recipiente 1) e 2) altura de 3,10 cm, diâmetro interno de 4,45 cm e espessura da parede de 0,25 cm (recipiente 2). Essas amostras foram cuidadosamente despejadas nos recipientes e acondicionadas por meio de pequenas vibrações com o intuito de permitir uma melhor distribuição das partículas. Foram determinadas as massas das amostras com uma balança



**Figura 2:** Montagem experimental para: a) placa de chumbo, b) pó de chumbo (recipiente 1), c) amostra EDP (recipiente 1), d) amostra EDM (recipiente 1), e) visão detalhada do: i) pó de chumbo, ii) amostra EDP e iii) amostra EDM e f) montagem experimental para o pó de chumbo e material granulado (EDP e EDM) utilizando o recipiente 2. EDP: esferas de diâmetro de 1,5 mm. EDM: esferas de diâmetro de 2,5 mm.

analítica com precisão de miligramas, descontando a massa do recipiente. A vantagem do emprego do material granulado em relação às placas de chumbo, como descrito anteriormente, está na possibilidade de podermos variar “continuamente” a espessura do meio absorvedor através da variação da massa contida no recipiente.

Com a finalidade de verificarmos a reprodutibilidade do experimento com as esferas e o pó de chumbo, cada recipiente foi preenchido três vezes com o material granular. Desta forma, as medidas de contagem dos fótons foram realizadas em triplicata para cada uma das espessuras distintas do material absorvedor estudado. Após as medidas experimentais, foi calculada a dispersão (coeficiente de variação) dos dados a fim de verificarmos a precisão dos dados obtidos.

As montagens experimentais para as medidas com as placas de chumbo, chumbo em pó e esferas de chumbo, acondicionadas nos recipientes 1 e 2, são mostradas na Figura 2.

Após as medidas das contagens dos fótons incidentes (placa de plástico + ar: no caso das placas de chumbo; recipiente vazio + ar: no caso dos materiais granulares) e dos fótons transmitidos pelos materiais absorvedores, foi possível calcularmos o coeficiente de atenuação do chumbo com base na equação de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{-\kappa x} \quad (1)$$

onde  $I$  e  $I_0$  representam a quantidade de fótons transmitidos e incidentes,  $\kappa$  o coeficiente de atenuação linear e  $x$  a espessura do material absorvedor. A equação (1) ainda pode ser escrita em termos do coeficiente de atenuação de massa:

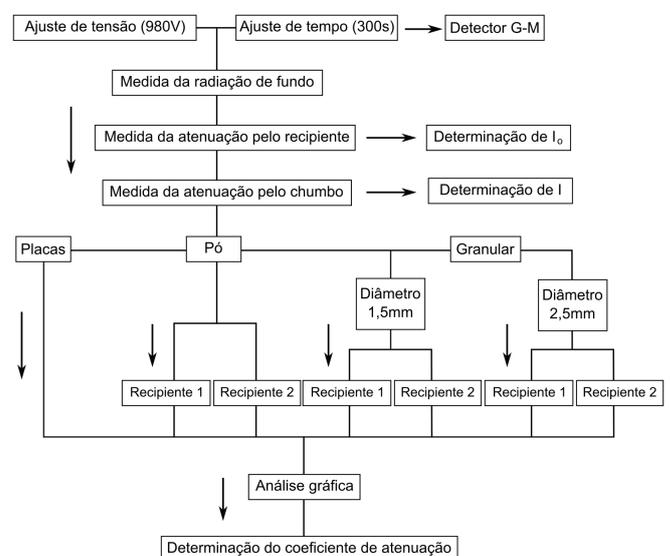
$$I = I_0 e^{-\mu \rho x} \quad (2)$$

onde  $\rho$  representa a densidade do material absorvedor e  $\mu$ , calculado pela razão entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade do absorvedor, o coeficiente de atenuação de massa. No caso do nosso estudo, optamos ainda por utilizar uma variação da equação (2), uma vez que para garantir uma maior precisão nas medidas, as espessuras do material granulado foram variadas com base em medidas de massa (balança com precisão de miligramas) e não em função de medidas de espessura:

$$I = I_0 e^{-\mu(m/A)} \quad (3)$$

onde  $m$  e  $A$  representam, respectivamente, a massa e área ocupada pelo material absorvedor. A área do material absorvedor, no caso dos materiais granulares, foi calculada com base na área de seção de um cilindro ( $A = \pi r^2$ , onde  $r$  representa o raio), uma vez que o recipiente possui formato cilíndrico. Para este cálculo foi considerado o diâmetro interno do recipiente.

Com base na equação (3) foram construídos gráficos do  $\ln(I/I_0)$  versus  $m/A$  ( $\rho x$ ), os quais foram ajustados com base em funções lineares. Para verificar a qualidade dos ajustes foram utilizados os valores do coeficiente de correlação ( $r$ ). A inclinação da reta (coeficiente angular) forneceu o valor do coeficiente de atenuação de massa para o material absorvedor. Na Figura 3 apresentamos um fluxograma contendo as etapas do experimento proposto.



**Figura 3:** Fluxograma representando as etapas da proposta experimental para a medida do coeficiente de atenuação de massa.

Por fim, para verificar se os valores experimentais determinados estavam coerentes com os valores teóricos, calculamos (teoricamente) o coeficiente de atenuação de massa para as esferas e para o pó de chumbo. Esse cálculo foi realizado com base na composição elementar dos materiais obtida pela técnica de fluorescência de raios X (Tabela 1). O código computacional XCOM, o qual é baseado na regra da mistura, foi empregado na simulação dos valores teóricos [16]. No entanto, optamos por não apresentar maiores detalhes relacionados a essas medidas por não ser o objetivo deste estudo. Como descrito anteriormente, esses cálculos foram conduzidos com o intuito de somente verificar a qualidade das medidas experimentais, uma vez que os materiais granulares não eram compostos exclusivamente de chumbo.

## 5. Análise dos Dados

Nas Figuras 4 a 7 apresentamos o comportamento da atenuação dos fótons gama para as placas de chumbo, chumbo na forma de pó e chumbo na forma de material granular (esferas de 1,5 mm e 2,5 mm de diâmetro). O coeficiente de atenuação de massa foi obtido a partir do coeficiente angular do ajuste linear dos dados de  $\ln(I/I_0)$  versus  $\rho x$  conforme previamente descrito.

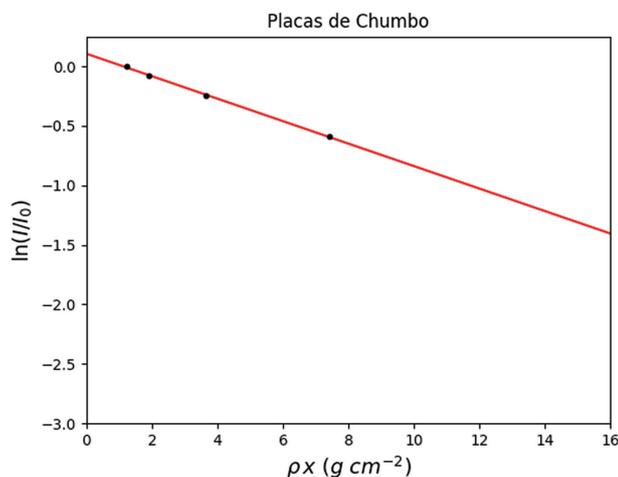
Para as placas de chumbo o  $\mu$  obtido foi de  $0,094 \pm 0,002 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . A reta de ajuste apresentou correlação forte ( $r = 0,99$ ) indicando que as medidas experimentais estão condizentes com o esperado.

Quando são analisadas as amostras de chumbo na forma de pó (Figura 5), observamos uma correlação forte ( $r = 0,99$ ) entre os dados experimentais e a equação de ajuste linear. Neste caso foram analisados os resultados para as amostras acondicionadas nos dois tipos de recipientes utilizados. Os valores de  $\mu$  obtidos foram praticamente os mesmos, sendo  $0,111 \pm 0,003 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (recipiente 1) e  $0,115 \pm 0,002 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (recipiente 2),

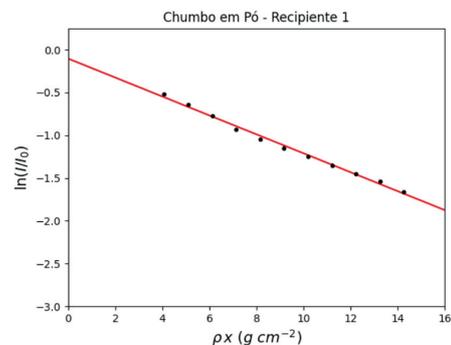
representando um aumento de aproximadamente 4% para o recipiente 2.

Para as amostras de chumbo na forma de material granular (esferas de menor diâmetro), observamos uma correlação linear forte ( $r = 0,99$ ) entre os dados experimentais e a reta de ajuste linear para ambos os recipientes, similar aos demais resultados experimentais (Figura 6). Os valores de  $\mu$  encontrados foram, respectivamente,  $0,109 \pm 0,002 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (recipiente 1) e  $0,110 \pm 0,004 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (recipiente 2). Quando comparamos os dois recipientes, praticamente não foram observadas diferenças ( $<1\%$ ) entre os resultados de  $\mu$ .

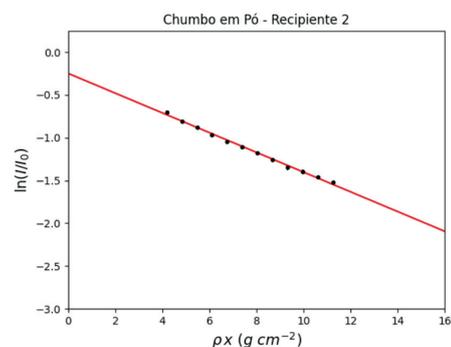
Quando analisamos as amostras de chumbo do material granular de maior diâmetro (Figura 7), observamos correlação linear forte ( $r = 0,99$ ) entre os dados experimentais e o ajuste linear para ambos os recipientes utilizados. Os valores de  $\mu$  apresentaram a mesma tendência observada para as demais amostras entre os recipientes, ou seja, menores valores para o recipiente 1 ( $0,112 \pm 0,002 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) em comparação ao recipiente 2 ( $0,121 \pm 0,003 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Para este tamanho de partículas, verificou-se um aumento de aproximadamente 8% no valor de  $\mu$  para o recipiente 2. Também observamos uma maior dispersão nos pontos experimentais em relação à reta de ajuste (Tabela 3).



**Figura 4:** Medidas experimentais de atenuação para as placas de chumbo. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha contínua ao ajuste linear.

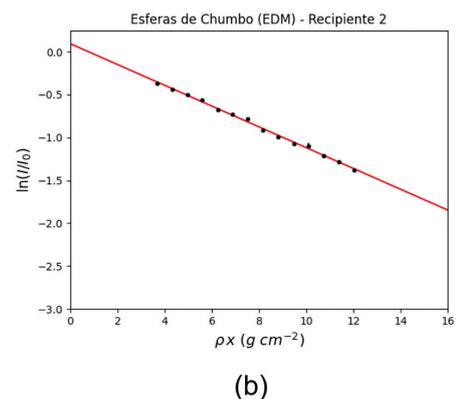
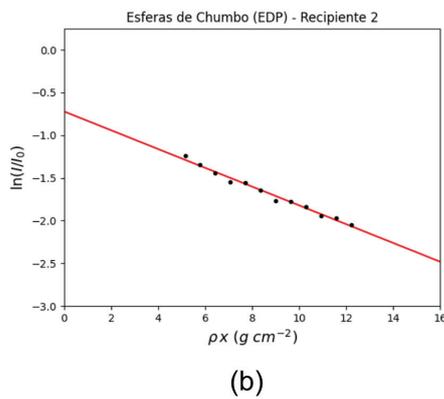
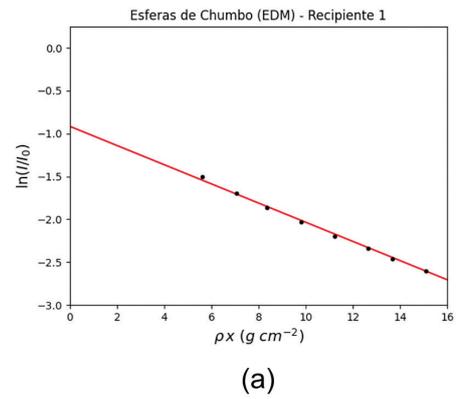
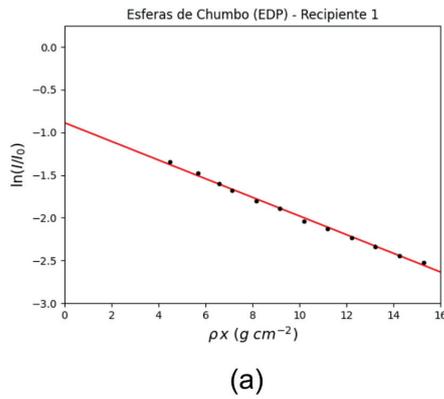


(a)



(b)

**Figura 5:** Medidas experimentais de atenuação para o chumbo em pó. a) Recipiente 1 e b) Recipiente 2. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha contínua ao ajuste linear.



**Figura 6:** Medidas experimentais de atenuação para as esferas de chumbo com 1,5 mm de diâmetro (EDP). a) Recipiente 1 e b) Recipiente 2. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha contínua ao ajuste linear.

**Figura 7:** Medidas experimentais de atenuação para as esferas de chumbo de 2,5 mm de diâmetro (EDM). a) Recipiente 1 e b) Recipiente 2. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha contínua ao ajuste linear.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de  $\mu$  teórico simulado pelo código computacional XCOM para o chumbo em pó e para os materiais granulados com diferentes diâmetros. Os dados simulados foram obtidos com base na composição elementar das amostras como mencionado anteriormente (Tabela 1). As amostras com a maior concentração de PbO foram também aquelas que apresentaram os maiores valores de  $\mu$ . Por fim, também simulamos o valor teórico de  $\mu$  para as placas de chumbo fornecidas pelo fabricante do kit nuclear. Para essa simulação consideramos um grau de pureza de 100%, sendo obtido o valor de coeficiente de atenuação de massa de  $0,1102 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  para os fótons gama de aproximadamente 662 keV.

Na Tabela 3 apresentamos um resumo dos resultados de  $\mu$  para os diferentes materiais analisados com os respectivos erros percentuais e dispersão dos dados. Para o cálculo dos erros (desvio relativo) foram utilizados os valores de  $\mu$  obtidos teoricamente por meio do programa XCOM (Tabela 2), os quais foram comparados com os valores experimentais obtidos. O maior erro ocorreu para as placas de chumbo, ao passo que os menores foram observados para o recipiente de menor diâmetro (recipiente 1) seguido do resultado obtido para o recipiente de

**Tabela 2:** Coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ) teórico calculado pelo código computacional XCOM para o chumbo em pó e para as esferas de chumbo de 1,5 mm de diâmetro (EDP) e 2,5 mm de diâmetro (EDM) para os fótons de raios gama da fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$ .

Parâmetro	Amostra		
	Pó	EDP	EDM
$\mu \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$	0,1058	0,1074	0,1076

maior diâmetro (recipiente 2). No entanto, os resultados obtidos para os dois recipientes, para as amostras em pó e as esferas de diferentes diâmetros, apresentaram os menores erros quando comparados com os resultados para as placas de chumbo.

## 6. Análise dos Resultados

Neste estudo apresentamos de forma detalhada uma proposta alternativa de medida do coeficiente de atenuação de massa do chumbo utilizando material granular (pó e partículas de diferentes diâmetros). O objetivo principal foi o de verificar se amostras que possibilitam variações

**Tabela 3:** Valores dos coeficientes de atenuação de massa ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) obtidos a partir dos gráficos apresentados nas Figuras 4 a 7, respectivos erros percentuais (desvio relativo) calculados com base nos valores teóricos de  $\mu$  e dispersão dos resultados obtidos a partir das regressões lineares para os diferentes materiais analisados (pó, esferas de diâmetro pequeno – EDP e esferas de diâmetro médio – EDM).

Material	$(\mu \pm \sigma_\mu)$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )	Erro percentual (%)	Dispersão (%) ( $\sigma_\mu/\mu$ )	
Placa	$(0,094 \pm 0,002)$	14,43	2,13	
Pó	Recipiente 1	$(0,111 \pm 0,003)$	4,44	2,70
	Recipiente 2	$(0,115 \pm 0,002)$	8,79	1,73
EDP	Recipiente 1	$(0,109 \pm 0,002)$	1,58	1,83
	Recipiente 2	$(0,110 \pm 0,004)$	2,23	3,63
EDM	Recipiente 1	$(0,112 \pm 0,002)$	3,90	1,78
	Recipiente 2	$(0,121 \pm 0,003)$	12,55	2,48

contínuas na espessura do meio absorvedor poderiam fornecer medidas mais precisas de  $\mu$ . Os resultados obtidos visam principalmente auxiliar docentes que atuam em cursos experimentais de Física Moderna na proposição de experimentos que possibilitem medidas mais acuradas de  $\mu$ . Usualmente, os kits nucleares possuem um número limitado de placas de chumbo de diferentes espessuras, influenciando nas possíveis escolhas de espessura do material absorvedor. No caso do estudo aqui apresentado, obtivemos somente quatro medidas de contagem dos fótons para as diferentes placas de chumbo fornecidas pelo fabricante do kit (Figura 4). Consequentemente, o número reduzido de medidas afetou o ajuste linear dos dados experimentais, influenciando negativamente a determinação de  $\mu$ . No caso do pó e do material granular conseguimos um maior número de medidas de contagens (de 8 a 14 pontos) em função da maior flexibilidade na montagem do experimento (Figuras 5–7). Tal fato faz com que o ajuste dos dados experimentais pelo modelo matemático não seja tão influenciado por variações nos valores das contagens, como ocorre quando poucos pontos são ajustados no gráfico.

Os resultados do estudo permitiram verificar que a utilização de material em pó ou granular possibilita uma variação mais gradual de espessuras do absorvedor resultando na obtenção de valores mais acurados de  $\mu$  em relação às placas de chumbo (Tabela 3). Quando as medidas estão sendo realizadas, um parâmetro importante é a relação existente entre as dimensões (espessura) do material granular e a área de seção reta do recipiente, principalmente para as primeiras camadas do material absorvedor. Nas medidas experimentais verificamos que no caso do material em pó e granular, as primeiras camadas são suscetíveis a erros nas medidas das contagens. Tal fato decorre da pequena quantidade de material no recipiente e influência do ar existente entre os grãos/partículas de chumbo. Por este motivo, decidimos eliminar os resultados de contagens para as menores espessuras do material absorvedor (Figuras 5–7). Com base nos resultados medidos, verificamos que os menores erros na determinação de  $\mu$  experimental ocorreram a partir de valores de espessura de  $4 \text{ g cm}^{-2}$ . Além disso, observamos que o aumento no diâmetro do recipiente, no qual o material granular está acondicionado, tende a

influenciar negativamente (aumento do erro experimental) nas medidas de  $\mu$  (Tabela 3). Uma possível hipótese para este resultado é que o aumento no diâmetro do recipiente pode gerar um incremento no espalhamento dos fótons gama fazendo com que fótons secundários sejam detectados [8]. Desta forma, como o equipamento utilizado não possui módulos para discriminar os fótons em termos de energia, os fótons espalhados podem ser contabilizados como se fossem os transmitidos [17].

Como descrito anteriormente, basicamente são três os processos mais importantes responsáveis pela atenuação dos fótons gama, sendo eles: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. No caso da fonte de  $^{137}\text{Cs}$  empregada neste estudo, a contribuição da produção de pares para o coeficiente de atenuação total é inexistente, uma vez que este efeito ocorre somente para fótons com energias maiores que 1022 keV [18]. No caso do chumbo, para a energia dos fótons de  $^{137}\text{Cs}$ , o efeito Compton é o principal processo responsável pela atenuação da radiação, correspondendo a 55% da atenuação total. Usualmente, em pesquisas de atenuação de raios gama, são utilizadas geometrias consideradas ideais (feixe estreito) para determinar  $\mu$  [19]. Essas pesquisas envolvem o emprego de feixes colimados de raios gama, cujo objetivo é prevenir que os fótons espalhados pelo efeito Compton sejam detectados. Porém, quando o feixe não é colimado, como ocorre no presente estudo, existe uma maior probabilidade de que fótons secundários sejam detectados como se fossem transmitidos. Neste sentido, a equação de Beer-Lambert requer correções (fator *build-up*) devido à detecção dos fótons espalhados [20]. No caso do nosso estudo não foi possível calcular o fator *build-up*, uma vez que esse parâmetro é obtido pela razão entre as contagens de fótons na geometria considerada não ideal (sem colimação) e a geometria ideal (feixe colimado) [18]. Desta forma, os maiores erros experimentais nos valores de  $\mu$ , para os maiores diâmetros das amostras (diferentes recipientes), podem ser explicados pela detecção de fótons secundários [21, 22].

O maior erro observado para as placas de chumbo (Tabela 3) ainda pode ser explicado pelo fato de que para fótons gama com a energia do  $^{137}\text{Cs}$  existem intervalos considerados ótimos de espessura do absorvedor [19].

Embora o chumbo seja um material denso e de alto número atômico, se a espessura do absorvedor for muito pequena, os fótons gama poderão atravessá-lo sem que ocorra muita interação. No entanto, se a espessura do absorvedor for muito grande, os fótons serão significativamente atenuados pelo material [23]. Desta forma, existem intervalos de espessura considerados ideais quando se trabalha com fótons de diferentes energias [24]. Neste sentido, o emprego de placas de chumbo contendo uma maior gama de espessuras poderia ser uma alternativa para melhorar os resultados experimentais obtidos em nosso estudo.

O maior erro obtido para o material em pó em relação ao material granular EDP (diâmetro de 1,5 mm), contrariando o que seria esperado, se deve ao fato do material não ser totalmente puro, como pôde ser comprovado pelas análises de FRX. Uma alternativa seria adquirir chumbo em pó de empresas especializadas em fornecer produtos químicos de elevada pureza, o que consequentemente acarretaria num custo mais elevado do produto. As análises de FRX dos materiais granulares comprados em vendedores on-line mostraram que estes possuem uma melhor pureza, em relação ao material em pó, sendo mais adequados para serem empregados no experimento proposto (Tabela 1). Esse é outro aspecto que poderia ser abordado em aulas práticas, ou seja, discutir a influência de materiais compósitos na absorção da radiação e suas aplicações em blindagens, considerando aspectos como custo e peso, por exemplo. No entanto, os baixos erros observados entre os valores experimentais e simulados (Tabela 3), principalmente para o recipiente de menor diâmetro, evidenciam que os materiais selecionados para as análises, mesmo não sendo puros, se mostraram adequados para os objetivos do experimento. Neste sentido, a utilização de materiais com pequenos graus de impureza ainda possibilita medidas representativas do coeficiente de atenuação, quando são empregados materiais granulares.

Com relação à reprodutibilidade do enfoque aqui proposto, esta dependerá do currículo adotado pelos cursos de Física e pela existência de equipamento similar ao kit utilizado em nossa proposta. O equipamento usado nas medidas se trata de uma versão bastante simplificada de uma cadeia nuclear, a qual é empregada na detecção e contagem de fótons de radiação gama provenientes de uma fonte emissora. A cadeia nuclear, geralmente é utilizada em laboratórios de pesquisa e, principalmente, devido ao seu alto nível de sofisticação e custo fazem com que não seja um equipamento acessível em um laboratório de ensino. Neste sentido, o enfoque aqui apresentado visa apenas apresentar uma metodologia alternativa à tradicionalmente utilizada para a determinação do coeficiente de atenuação de massa do chumbo. Tal metodologia pode ser adaptada para a investigação de outros materiais, desde que se tenha em mente todas as limitações e precauções para a detecção do feixe transmitido através de uma amostra, tais como as que

foram aqui apresentadas. Além disso, em havendo a possibilidade, pode-se optar por fontes de mais baixa energia para a investigação de materiais de menor poder de atenuação (menor coeficiente de atenuação de massa). Cabe ao docente que ministra a disciplina fazer ou não opção por essa estratégia. O que foi mostrado em nosso estudo é que o coeficiente de atenuação obtido pela metodologia proposta é muito mais próximo ao valor simulado (Tabela 3) quando comparado ao modo tradicional de realização de um experimento deste tipo (com placas de chumbo de espessuras pré-definidas). Além disso, mostrou-se que a dispersão das medidas (abaixo de 4%) é bastante pequena, indicando que o experimento, além de ser de fácil execução, apresenta reprodutibilidade. Cada medida experimental foi realizada em triplicata para as mesmas espessuras do material absorvedor. O erro percentual indica que a substituição das placas pelas esferas e pelo pó de chumbo tornou os resultados mais próximos do que é esperado (exatidão dos resultados). No melhor dos casos, 1,58% (EDP – Recipiente 1) e no pior 12,55% (EDM – Recipiente 2) contra 14,43% utilizando-se as placas de chumbo, como já descrito anteriormente.

## 7. Considerações Finais

Os mecanismos de produção de radiação ionizante e sua atenuação são assuntos importantes e tratados como conteúdos obrigatórios em cursos de Física Moderna. O método alternativo proposto neste estudo permitiu a obtenção do coeficiente de atenuação de massa do chumbo, um material amplamente utilizado como material atenuador, com resultados muito melhores do que os obtidos pelo enfoque tradicionalmente empregado nesse tipo de experimento. Desvios de aproximadamente 2% para as melhores condições experimentais do experimento apresentado se contrapõem a desvios de aproximadamente 15%, facilmente obtidos quando determinados pela metodologia tradicional, a qual emprega um conjunto de placas de espessuras conhecidas. Entre as vantagens do método apresentado aqui estão: 1) a facilidade de variação da geometria experimental pela modificação do porta-amostra (recipientes), 2) a possibilidade de variação “contínua” da espessura do material absorvedor, o que permite um número maior de medidas de atenuação, melhorando o ajuste dos dados experimentais e 3) a análise da influência de sistemas porosos nas medidas do coeficiente de atenuação de massa. Desta forma, com o experimento aqui proposto amplia-se o leque de possibilidades de análise dos dados experimentais, além dos conceitos já tradicionalmente trabalhados, relacionados ao coeficiente de atenuação de massa.

## Agradecimentos

LFP gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela

bolsa de produtividade em pesquisa (Processo No. 304925/2019-5). Gostaríamos ainda de agradecer a Gabrielli W. Pietralla pelo auxílio nas medidas de fluorescência de raios X.

## Referências

- [1] A.C. Melissinos e J. Napolitano, *Experiments in Modern Physics* (Academic Press, Cambridge, Massachusetts, 2003), 2 ed.
- [2] J.R. Sá, R.M. Anjos, R.P. Cardoso, M.C. Muniz, A.S. Cid e T.C. Lacerda, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e1503 (2017).
- [3] L.F. Pires, F.A.M. Cássaro, L. Tech, L.A.A. Pereira e J.A.T. de Oliveira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190340 (2019).
- [4] E. Adamides, S.K. Koutroubas, N. Moshonas e K. Yiasemides, *Physics Education* **46**, 398 (2011).
- [5] M. Pilakouta, arXiv:1111.4056 (2011).
- [6] H.M. Qadr, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology* **13**, 61 (2019).
- [7] L.F. Pires e F.A.M. Cássaro, *AgriEngineering* **5**, 1079 (2023).
- [8] I. Kaplan, *Nuclear Physics* (Addison-Wesley Publishing Company, Boston, 1963).
- [9] M.A. Camargo, K.S. Kodum e L.F. Pires, *Brazilian Journal of Physics* **52**, 154 (2022).
- [10] P. Limkitjaroenporn, J. Kaewkhao, P. Limsuwan e W. Chewpraditkul, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **72**, 245 (2011).
- [11] N.C. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 1206 (2012).
- [12] E. Paiva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 3311 (2014).
- [13] M.A. Camargo, K.S. Kodum e L.F. Pires, *Brazilian Journal of Physics* **51**, 1775 (2021).
- [14] M.S. Beni, H. Watabe, D. Krstic, D. Nikezic e K.N. Yu, *PLoS ONE* **16**, e0257638 (2021).
- [15] *PASCO*, disponível em: <https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/atomic-and-nuclear/sn-7900#desc-panel>, acessado em 31/05/2023.
- [16] M.J. Berger, J.H. Hubbel, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker e K. Olsen, *XCOM: Photon Cross Section Database*, disponível em: <http://physics.nist.gov/xcom>, acesso em: 09/06/2023.
- [17] G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (Wiley, Hoboken, 2010).
- [18] G.C. Lowenthal e P.L. Airey, *Practical Applications of Radioactivity and Nuclear Radiations* (Cambridge University Press, Cambridge, 2001).
- [19] J.C. Costa, J.A.R. Borges e L.F. Pires, *Radiation Physics and Chemistry* **95**, 333 (2014).
- [20] K.S. Mann, J. Singla, V. Kumar e G.S. Sidhu, *Annals of Nuclear Energy* **43**, 157 (2012).
- [21] G.S. Sidhu, K. Singh, P.S. Singh e G.S. Mudahar, *Pramana Journal of Physics* **53**, 851 (1999).
- [22] M.A. Abdel-Rahman, E.A. Badawi, Y.L. Abdel-Hady e N. Kamel, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **447**, 432 (2000).
- [23] A.A. Oglat, *Radiation Physics and Chemistry* **176**, 109072 (2020).
- [24] T. Kaur, J. Sharma e T. Singh, *Nuclear Energy and Technology* **3**, 1 (2017).