



Determinação dos fatores de transmissão para fótons em blindagens multilaminadas utilizando 4 materiais

Silva¹ J. V. M., Cardoso² D. O., Gavazza³ S., Medeiros⁴ M. P. C., Gomes⁵ R. G.,
Morales⁶ R. K., Fonseca⁷ C. J., Silva⁸ M. M

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} Instituto Militar de Engenharia / Seção de Engenharia Nuclear (SE/7)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Urca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

¹engjoavitor@ime.eb.br; ²domingos.oliveiralvr71@gmail.com; ³sergiogavazza@yahoo.com.br;

⁴eng.cavaliere@ime.eb.br; ⁵ggrprojetos@gmail.com; ⁶d7karam@ime.eb.br; ⁷cjfonseca16@gmail.com;

⁸marcio.magalhaes.br@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar os fatores de transmissão (FT) para fótons em blindagens multilaminadas usando 4 materiais diferentes, através de métodos de cálculo analítico. As espessuras e materiais considerados são os seguintes: 1,00 cm de concreto, 1,00 cm de alumínio, 1,00 cm de ferro e 1,00 cm de chumbo. As camadas foram permutadas em 24 arranjos sequenciais diferentes. Considerou-se uma fonte pontual isotrópica emitindo fótons monoenergéticos de energia 0,661657 MeV para interações com a matéria. Analiticamente, foram calculadas as atenuações exponenciais (AE), os fatores de *build-up* de Taylor (B_T) para o meio infinito e os fatores de *build-up* de Broder (Br) para a determinação dos FT nos diferentes arranjos. Sendo as intensidades de radiação com e sem os arranjos de blindagens, respectivamente, I e I_0 , o FT é determinado pela razão I/I_0 . Os FT das 24 permutações possíveis mostraram boa concordância entre a metodologia analítica e a esperada. Em relação à atenuação, a ordem mais apropriada de materiais na direção da fonte-detector é a seguinte: concreto, alumínio, ferro e chumbo.

Palavras-chave: fatores de transmissão, *build-up* de Taylor, fórmula de Broder.

ABSTRACT

The aim of this paper is to determine the Transmission Factors (FT) for photons in multilayered shieldings using 4 different materials, through analytical calculation methods. The thicknesses and materials considered are as follows: 1.00 cm of ordinary concrete, 1.00 cm of aluminum, 1.00 cm of iron and 1.00 cm of lead. The layers were permuted in 24 different sequential arrangements. An isotropic point source emitting monoenergetic photons of energy 0.661657 MeV was considered for interactions with matter. Analytically, the exponential attenuations (AE), the Taylor's buildup factors (B_T) for infinite medium and the Broder's buildup factors (Br) were calculated to determine the FT for different arrangements. Being the radiation intensities with and without the use of shielding arrangements, respectively, I and I_0 , the FT is determined by the ratio I/I_0 . Regarding attenuation, the most appropriate order of materials in the source-detector direction is as follows: ordinary concrete, aluminum, iron and lead.

Keywords: transmission factors, Taylor's buildup, Broder's formula.

1. INTRODUÇÃO

A verticalização de construções como clínicas de radiodiagnóstico, hospitais, instalações produtoras de radiofármacos, entre outras, constitui uma tendência mundial. Portanto, entende-se que, futuramente, existirá a necessidade de construir prédios altos contendo salas de radioterapia, máquinas de raios-X, aceleradores lineares, etc. Segundo as normas internacionais e recomendações nacionais, a blindagem constitui um parâmetro fundamental da radioproteção, sendo o Chumbo o material mais comumente utilizado, entre outras razões, por ser um material de alta densidade e por ser mais barato e mais fácil de obter entre os materiais de alta densidade. Todavia, o mesmo é muito pesado em termos construtivos, inviabilizando a verticalização das instalações supracitadas, portanto, há necessidade de aperfeiçoar a relação entre a atenuação da radiação eletromagnética e o respectivo peso do material de blindagem, bem como, otimizar a relação entre a atenuação da radiação eletromagnética e seu respectivo custo.

Sendo o fator de *build-up* um parâmetro multiplicativo utilizado para levar em consideração o aumento da radiação primária, no ponto de interesse, provocado pelos múltiplos espalhamentos Compton sofridos quando a radiação passa através de um material, mesmo com todo o avanço tecnológico existente atualmente, ainda não se identificou a determinação precisa desses fatores, sendo alvo de diversos estudos as comparações entre metodologias analíticas lineares e não-lineares. Portanto, ao invés de métodos computacionais precisos, o método que se baseia no uso desses fatores continua a desempenhar um dos papéis mais importantes no estudo de blindagens, pois otimizar a configuração de um arranjo permite a atenuação dos fótons com redução do peso e do custo.

O presente trabalho visa identificar a melhor disposição de materiais em uma blindagem multilaminada e, para isso, determinam-se os Fatores de Transmissão (FT), para fótons, nas referidas blindagens, constituídas de 4 camadas de diferentes materiais, através de métodos analíticos lineares. O parâmetro FT foi utilizado para comparação quanto à eficiência de um arranjo de materiais, em relação à atenuação da intensidade de um feixe de radiação. As espessuras e os materiais considerados são: 1,00 cm de concreto, 1,00 cm de alumínio, 1,00 cm de ferro e 1,00 cm de chumbo. Sendo 4 materiais, as camadas foram permutadas em 24 arranjos sequenciais, pois o número de arranjos é determinado conforme o fatorial do número de materiais considerados na

blindagem. Considerou-se uma fonte pontual e isotrópica emitindo fótons monoenergéticos de 0,661657 MeV nas interações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, determinou-se por interpolação de energias, para cada material, os seus respectivos coeficientes de atenuação linear (μ), em cm^{-1} , de acordo com Foderaro [1]. De posse desses coeficientes, das espessuras e da energia, foram calculadas as atenuações exponenciais (AE) dos materiais, através da lei de atenuação exponencial conforme Knoll [2], para situação de má geometria, isto é, feixe de radiação colimado, conseqüentemente, pequeno ângulo sólido. Os valores das AE dos 24 arranjos foram calculadas através da extrapolação, para quatro materiais, da lei supracitada, utilizando a Equação 1, onde I é a intensidade do feixe de radiação com os arranjos de blindagem, I_0 é a intensidade do feixe de radiação sem os arranjos de blindagem, μ é o coeficiente de atenuação linear e x é a espessura do arranjo da blindagem multilaminada.

$$AE (\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_3 + \mu_4 \cdot x_4) = \frac{I}{I_0} = e^{-\sum_{i=1}^4 (\mu_i \cdot x_i)} \quad (1)$$

Em seguida foram calculados os fatores de *build-up* das lâminas individuais (B_T), para meio infinito que, segundo Koo [3], é quando a fonte e o detector se localizam dentro da blindagem. Segundo Chilton *et al.* [4], os fatores B_T podem ser determinados através da Equação 2, a fórmula de Taylor, onde os parâmetros α , β e A_1 são denominados como parâmetros de Taylor, os quais foram determinados por interpolações de dados utilizando a energia da radiação incidente e o tipo de material como argumentos de entrada nas tabelas constantes em Foderaro [1], $\mu_i \cdot x_i$ é a distância ótica de cada lâmina de blindagem.

$$B_T(\mu \cdot x) = A_1 \cdot e^{-\alpha \cdot \mu \cdot x} + (1 - A_1) \cdot e^{-\beta \cdot \mu \cdot x} \quad (2)$$

Após isso, foram calculados os fatores de *build-up* das blindagens multilaminadas (B_r) utilizando a fórmula de Broder, segundo Broder *et al.* [5]. Este método leva em consideração todas

as camadas de blindagem e parte do pressuposto que o fator de *build-up* no limite de cada camada é a soma das diferenças individuais no decorrer do *build-up*.

A referida fórmula, para quatro materiais está apresentada na equação 3, onde B_r é o fator de *build-up* de Broder da blindagem multilaminada, B_1 , B_2 , B_3 e B_4 são, respectivamente, o fator de *build-up* da primeira, segunda, terceira e da quarta lâmina de blindagem e $\mu_i \cdot x_i$ é a distância ótica de cada respectiva lâmina i . Ressalta-se que os componentes “1₁”, “1₂”, “1₃” e “1₄” são apenas outra maneira de expressar as respectivas distâncias óticas, “ $\mu_1 \cdot x_1$ ”, “ $\mu_2 \cdot x_2$ ”, “ $\mu_3 \cdot x_3$ ” e “ $\mu_4 \cdot x_4$ ”. Expansões de fórmula como esta, também, podem ser identificadas nos trabalhos de Valenta e Smutný [6].

$$B_r (\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_3 + \mu_4 \cdot x_4) = [B_1(l_1) + B_2(l_1 + l_2) + B_3(l_1 + l_2 + l_3) + B_4(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)] - [B_2(l_1) + B_3(l_1 + l_2) + B_4(l_1 + l_2 + l_3)] \quad (3)$$

Determinados os valores de AE e os fatores B_r , para situação de má geometria, modo análogo ao processo real da natureza, determinou-se os valores dos FT por meio da Equação 4. Acrescenta-se que o parâmetro I e I_0 consistem, respectivamente, na intensidade de radiação com e sem os arranjos de blindagem, B_r é ambos representam quaisquer grandezas radiológicas.

$$FT = \frac{I}{I_0} = AE (\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_3 + \mu_4 \cdot x_4) \cdot B_r (\mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_3 + \mu_4 \cdot x_4) \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, os valores grafados em vermelho são os que foram utilizados nas rotinas de cálculo. Os valores dos coeficientes de atenuação linear (μ) para a energia de 0,661657 MeV, em cm^{-1} , para cada material de blindagem estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de atenuação linear (μ), em cm^{-1} , para cada material.

Energia (MeV)	Materiais	μ (cm^{-1})
0,661657	Chumbo	1,434
	Alumínio	0,207
	Concreto	0,186
	Ferro	0,592

De posse dos μ , das espessuras e da energia, calculou-se a atenuação exponencial dos 24 arranjos que, matematicamente, são iguais e de valor 0,09. Este cálculo se deu por meio da Equação 1, uma expansão para 4 materiais proveniente da lei de atenuação exponencial. Na Tabela 2 são apresentadas as distâncias óticas e seu somatório, de acordo com cada material.

Tabela 2: Distâncias óticas para cada material e o somatório das distâncias óticas.

Materiais	$\mu \cdot x$ (adimensional)
Chumbo	1,434
Alumínio	0,207
Concreto	0,186
Ferro	0,592
Somatório das distâncias óticas	2,420

Em seguida, foram determinados os fatores de *build-up* de cada lâmina (B_T), na forma de Taylor, individualmente e para meio infinito. Os parâmetros α , β e A_1 são denominados parâmetros de Taylor e foram determinados por interpolação de energias utilizando as tabelas de Foderaro [1]. Os valores dos parâmetros de Taylor, para cada material, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Os parâmetros de Taylor: α , β e A_1 .

Parâmetros de Taylor				
Materiais	A_1	$1 - A_1$	A	β
Chumbo	2,099	-1,099	-0,032	0,253
Alumínio	35,636	-34,636	-0,089	-0,052
Concreto	34,113	-33,113	-0,123	-0,077
Ferro	29,302	-28,302	-0,066	-0,033

Os valores dos B_T para cada material estão apresentados na Tabela 4, onde os l_i representam as respectivas distâncias óticas ($\mu_i \cdot x_i$) e os B_i os respectivos fatores de *build-up* para a lâmina i .

Tabela 4: Os valores de B_T para cada material componente dos arranjos multilaminados.

Materiais	Distâncias óticas ($\mu_i \cdot x_i$)		B_T	
Chumbo	l_1	1,434	$B_1 (l_1)$	1,434
Alumínio	l_2	0,207	$B_2 (l_2)$	1,292
Concreto	l_3	0,186	$B_3 (l_3)$	1,313
Ferro	l_4	0,592	$B_4 (l_4)$	1,604

Posteriormente, foram calculados os fatores de *build-up* das blindagens multilaminadas (B_r), conforme Broder *et al.* [5], após os fótons terem sofrido todas as interações com os respectivos materiais componentes de cada blindagem. Os valores das AE, dos B_r e dos FT do arranjo de número 1 ao 6 estão apresentados na Tabela 5, do arranjo de número 7 ao 12 estão apresentados na Tabela 6, do arranjo de número 13 ao 18 estão apresentados na Tabela 7 e do arranjo de número 19 ao 24 estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 5: Valores das AE, dos Br e dos FT para os arranjos de número 1 a 6.

Nº do arranjo	Arranjo	AE	Br	FT
1	Chumbo	0,089	2,934	0,261
	Alumínio			
	Concreto			
	Ferro			
2	Chumbo	0,089	2,969	0,264
	Alumínio			
	Ferro			
	Concreto			
3	Chumbo	0,089	2,927	0,260
	Concreto			
	Alumínio			
	Ferro			
4	Chumbo	0,089	2,942	0,261
	Concreto			
	Ferro			
	Alumínio			
5	Chumbo	0,089	2,977	0,264
	Ferro			
	Concreto			
	Alumínio			
6	Chumbo	0,089	2,985	0,265
	Ferro			
	Alumínio			
	Concreto			

Tabela 6: Valores das AE, dos Br e dos FT para os arranjos de número 7 a 12.

Nº do arranjo	Arranjo	AE	Br	FT
7	Alumínio	0,089	2,855	0,254
	Chumbo			
	Concreto			
	Ferro			
8	Alumínio	0,089	2,891	0,257
	Chumbo			
	Ferro			
	Concreto			
9	Alumínio	0,089	2,609	0,232
	Concreto			
	Ferro			
	Chumbo			
10	Alumínio	0,089	2,740	0,243
	Concreto			
	Chumbo			
	Ferro			
11	Alumínio	0,089	2,759	0,245
	Ferro			
	Chumbo			
	Concreto			
12	Alumínio	0,089	2,637	0,234
	Ferro			
	Concreto			
	Chumbo			

Tabela 7: Valores das AE, dos Br e dos FT para os arranjos de número 13 a 18.

Nº do arranjo	Arranjo	AE	Br	FT
13	Concreto	0,089	2,830	0,251
	Chumbo			
	Ferro			
	Alumínio			
14	Concreto	0,089	2,814	0,250
	Chumbo			
	Alumínio			
	Ferro			
15	Concreto	0,089	2,697	0,239
	Ferro			
	Chumbo			
	Alumínio			
16	Concreto	0,089	2,616	0,232
	Ferro			
	Alumínio			
	Chumbo			
17	Concreto	0,089	2,604	0,231
	Alumínio			
	Ferro			
	Chumbo			
18	Concreto	0,089	2,735	0,243
	Alumínio			
	Chumbo			
	Ferro			

Tabela 8: Valores das AE, dos Br e dos FT para os arranjos de número 19 a 24.

Nº do arranjo	Arranjo	AE	Br	FT
19	Ferro	0,089	2,643	0,235
	Concreto			
	Alumínio			
	Chumbo			
20	Ferro	0,089	2,725	0,242
	Concreto			
	Chumbo			
	Alumínio			
21	Ferro	0,089	2,649	0,235
	Alumínio			
	Concreto			
	Chumbo			
22	Ferro	0,089	2,771	0,246
	Alumínio			
	Chumbo			
	Concreto			
23	Ferro	0,089	2,852	0,253
	Chumbo			
	Alumínio			
	Concreto			
24	Ferro	0,089	2,844	0,253
	Chumbo			
	Concreto			
	Alumínio			

A partir das informações apresentadas nas Tabelas de 5 a 8, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 1 que correlaciona os valores dos Br com seus respectivos arranjos de materiais. O mesmo foi elaborado para possibilitar uma melhor análise e compreensão do comportamento dos Br conforme ocorre a permuta de lâminas de blindagem.

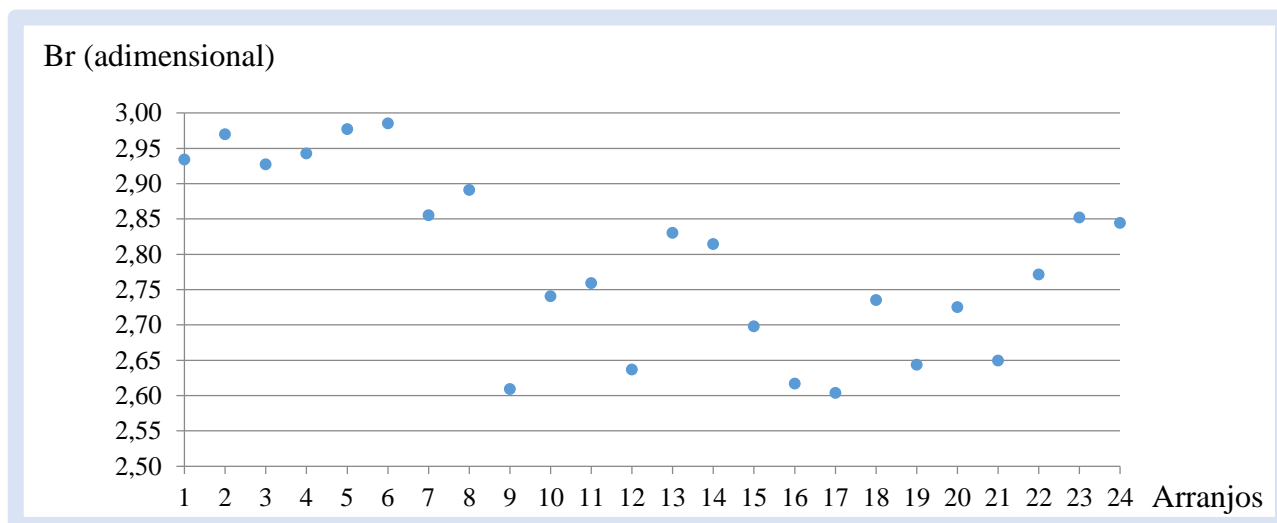


Figura 1: Valores dos Br dos 24 arranjos de materiais de blindagem, em escala reduzida.

Para melhor visualização e análise dos resultados dos FT, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 2, que apresenta o comportamento dos FT nos 24 arranjos de blindagem.

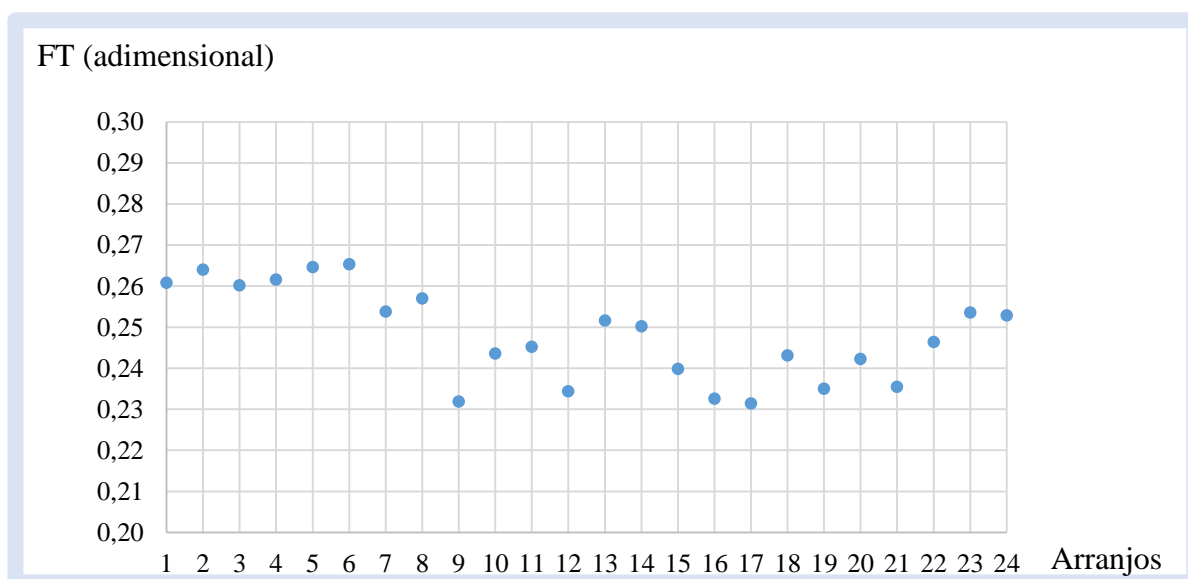


Figura 2: Valores dos FT dos 24 arranjos de materiais de blindagem, em escala reduzida.

Tanto na Figura 1 quanto na Figura 2, verifica-se que o desvio máximo entre o maior e o menor parâmetro é de, aproximadamente, 12,78%. O menor FT determinado, 0,231, foi para o arranjo 17, no sentido fonte-detector, concreto, alumínio, ferro e chumbo, já o maior FT, 0,265, foi para o

arranjo 6, também no sentido fonte-detector, chumbo, ferro, alumínio e concreto. Portanto, verifica-se proporcionalidade nos valores dos FT conforme ocorre a permutação dos materiais, isto se deve em razão das espessuras dos materiais serem iguais.

Os resultados demonstram que existe uma correlação entre as densidades de cada material e as eficiências de atenuação para cada arranjo. Quando os materiais estão dispostos do mais leve para o mais pesado, obtém-se o menor FT e, quando os materiais estão dispostos do mais pesado para o mais leve, obtém-se o maior FT. Há de se levar em consideração que os resultados apresentados, possivelmente, tiveram um percentual de desvio quanto à realidade, uma vez que os fatores de *build-up* empregados são para meio infinito, portanto, necessitam ser corrigidos por um fator de correção.

Percebe-se que o trabalho de Valenta e Smutný [6] corrobora com os resultados obtidos, mostrando a ordem de desvios esperados quando se trabalha com o método de Broder.

Os fatores supracitados não foram corrigidos, pois não foram identificadas as curvas de correção do alumínio na literatura. Portanto, com relação à identificação da melhor disposição de materiais na blindagem, no que se refere à eficiência de atenuação dos arranjos, encontrou-se a seguinte ordem, no sentido fonte-detector: concreto, alumínio, ferro e chumbo. Salienta-se que, no meio experimental, normalmente, quando se deseja a menor dose possível, utilizam-se os materiais dispostos do mais pesado para o mais leve, ou seja, arranjos pesados-leves, em virtude de uma blindagem mais efetiva.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que os resultados obtidos corroboram com a assertiva de Chilton *et al.* [4], “o uso do conceito de fatores de *build-up* para meios heterogêneos é de mérito dúbio, em sua maioria, as combinações possíveis são muito numerosas para calcular.”

Conclui-se que a metodologia de cálculo apresentada pode ser aplicada em apoio a projetos básicos de blindagem das radiações, pois permite a identificação das melhores e das piores disposições de materiais em um arranjo multilaminado, facilitando, inclusive, a escolha de possíveis

materiais componentes bem como o conhecimento da magnitude de grandezas radiológicas após a blindagem.

Conclui-se que o presente trabalho permite calcular, através de uma rotina de cálculo pré-determinada, o FT aproximado de um arranjo multilaminado, com baixa demanda de tempo e recursos.

AGRADECIMENTOS

O projeto teve origem, como um todo, a partir de uma cooperação entre os professores Sergio Gavazza e Domingos D'Oliveira Cardoso, ambos titulares da Seção de Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia (IME), tendo como um suporte material a contribuição de outros professores.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Professor Sergio Gavazza, meu orientador principal, inicialmente, quem propôs este projeto de artigo, acreditando na minha capacidade e na minha determinação para cumprir mais uma tarefa.

Agradeço a colaboração do meu Professor Domingos D'Oliveira Cardoso pela sua colaboração, disponibilidade, paciência para ensinar e muitas contribuições que me enriqueceram, academicamente e profissionalmente.

Sou muito feliz e grato por ter conhecido e trabalhado com o Professor Marcos Paulo Cavaliere de Medeiros, aprecio profundamente suas cuidadosas revisões, sua amizade e sua valiosa capacidade de pesquisa interdisciplinar.

Gostaria de reconhecer e agradecer, também, as colaborações e o apoio que recebemos durante esta jornada, especialmente, dos Professores Rudnei Karam Morales e Renato Guedes Gomes.

Também gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, permitindo-me participar deste estudo e desenvolver esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Foderaro, A. **The photon shielding manual**, 2^a edition, Pennsylvania State University, Penn State Bookstore, April 1976.
- [2] KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**, 4^a edição, Editora: John Wiley & Sons, New York/EUA, 2012.
- [3] KOO, N. H. **Evaluation of build-up factors by the transmission matrix method**, Iowa State University, Retrospective Theses and Dissertations, Iowa/USA, 1971.
- [4] CHILTON, A. B.; SHULTIS, J. K.; FAW, R. E. **Principles of radiation shielding**, Editora: Prentice-Hall, New Jersey/USA, 1984.
- [5] BRODER, D. L.; KAYURIN, Y. P.; KUTREZOV A. A. **Soviet Journal of Atomic Energy** **12**, 26-31, 1962.
- [6] VALENTA, V.; SMUTNÝ, V. **A contribution to engineering calculation of gamma ray distribution in heterogeneous shielding**, Skoda Works, Nuclear Power Construction Department, Plzeň/República Tcheca, 1981.