



Ministério da Saúde
Instituto Nacional de Câncer
Cordenação de ensino
Programa de Residência em Física Médica em Oncologia

Stéfani Aparecida Machado Nogueira

**Análise da eficiência dos visores blindados utilizados
em serviços de medicina nuclear**

Rio de Janeiro
2025

Stéfani Aparecida Machado Nogueira

Análise da eficiência dos visores blindados utilizados em serviços de medicina nuclear

Trabalho de conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Nacional de Câncer, como requi-
sito parcial para a conclusão do Programa de
Residência Multiprofissional em Oncologia e
Programa de Residência em Física Médica
em Oncologia.

Orientador: Jorge Wagner Esteves da Silva, DSc.

Rio de Janeiro

2025

Stéfani Aparecida Machado Nogueira

Análise da eficiência dos visores blindados utilizados em serviços de medicina nuclear

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao Instituto Nacional de Câncer como requisito parcial para a conclusão do Programa de Resid cia Multiprofissional em Oncologia e Programa de Resid cia em Física Médica em Oncologia.

Aprovado em: 27 / 02 / 2025

BANCA EXAMINADORA



Jorge Wagner Esteves da Silva, DSc.
Instituto Nacional de Câncer



Fernando Mecca Augusto, MSc.
Instituto Nacional de Câncer



Delano Valdivino Santos Batista, MSc.
Instituto de Radioprote o e Dosimetria

Rio de Janeiro
2025

Resumo

A medicina nuclear é uma especialidade médica que utiliza radiofármacos para diagnosticar e tratar diversas doenças. O uso de radiação ionizante requer medidas de proteção radiológica para otimizar a proteção e reduzir as doses recebidas por indivíduos ocupacionalmente expostos ou mesmo pelo público, de forma a maximizar os benefícios dessa prática médica em comparação com os riscos associados ao uso da radiação ionizante. Dentre as técnicas de limitação de dose, o uso de blindagem contra radiação é uma das principais para atingir tal objetivo. Em diversas atividades de rotina na medicina nuclear, existe a necessidade associada de fornecer blindagem adequada. No entanto, a capacidade de visualizar fontes radioativas também é necessária, como na dispensação de radiofármacos ou na administração aos pacientes. O uso de uma janela "blindada" é importante para tais atividades. O conhecimento das capacidades de atenuação do vidro usado para construir a blindagem é importante para a correta definição da espessura equivalente ao chumbo (mmPb) a ser utilizada. Este trabalho teve como objetivo estudar dois vidros atenuadores que estão comercialmente disponíveis no território nacional. Foram avaliadas a homogeneidade dos fatores de transmissão de radiação para energias de interesse na medicina nuclear e a relação entre a espessura equivalente das barreiras produzidas com tais materiais. Os resultados mostram que ambos os vidros avaliados apresentam homogeneidade nos fatores de transmissão para as energias estudadas e desempenho comparável a uma liga de chumbo utilizada como padrão de comparação. Há necessidade de um estudo mais aprofundado desses materiais, uma vez que alguns dos resultados foram inesperados. No entanto, a falta de condições para uma avaliação metalúrgica, ou mesmo sob boas condições de geometria, impediu uma investigação mais aprofundada das possíveis disparidades entre os três grupos experimentais. Tais disparidades devem ser objeto de estudo futuro.

Abstract

Nuclear medicine is a medical specialty that uses radiopharmaceuticals to diagnose and treat several diseases. Using ionizing radiation requires radiation protection measures to optimize protection and reduce the doses received by occupationally exposed individuals or even the public to maximize the benefits of this medical practice compared to the risks associated with ionizing radiation use. Radiation shielding is vital to achieving such objectives among the dose limitation techniques. In various routine activities in nuclear medicine, there is the associated need to provide adequate shielding. However, the ability to visualize radioactive sources is also required, such as in the radiopharmaceutical dispensing or the administration to patients. The use of a "shielded" window is important for such activities. Knowledge of the attenuating capabilities of the glass used to build the shield is important for the correct definition of the equivalent lead thickness (mmPb) to be used. This work aimed to study two attenuating glasses that are commercially available in the national territory. The homogeneity of the radiation transmission factors for energies of interest in nuclear medicine and the relationship between the equivalent thickness of the barriers produced with such materials were evaluated. The results show that both glasses evaluated show homogeneity in the transmission factors for the energies studied and performance comparable to a lead alloy used as a comparison basis. Some results were unexpected; however, the lack of conditions for a metallurgical evaluation, or even under good geometry conditions, prevented further investigation of the possible disparities between the three experimental groups. Such disparities should be the subject of further study in the future.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	JUSTIFICATIVA E OBJETIVO	3
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1.	Medicina Nuclear e proteção radiológica	4
3.2.	Mecanismos de atenuação da radiação ionizante e características de blindagem dos visores “blindados”	8
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	15
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
6.	CONCLUSÃO	38
	Referências	39
Anexo I	Análises Estatísticas	49

Listas de ilustrações

Figura 1 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{99}Mo	5
Figura 2 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{131}I	6
Figura 3 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{18}F	7
Figura 4 – Curva de atenuação para feixe estreito de intensidade I_0	11
Figura 5 – Micrômetro utilizado para medir as espessuras das placas de chumbo .	16
Figura 6 – Exemplo da fonte utilizada no experimento	16
Figura 7 – Ativímetro utilizado para a aferição da atividade das fontes	17
Figura 8 – Detector utilizado para coleta de dados Atomtex AT6102A	17
Figura 9 – Aparato experimental	18
Figura 10 – Placas de chumbo utilizadas no experimento	19
Figura 11 – Placas de vidro do fornecedor 1	20
Figura 12 – Placas de vidro do fornecedor 2	20
Figura 13 – Gráfico das espessuras medidas para as 12 placas de chumbo	23
Figura 14 – Comportamento dos fatores de transmissão na analise individual das placas de chumbo	25
Figura 15 – Comportamento dos fatores de transmissão na analise individual dos visores F1 (2,3 mmPb)	26
Figura 16 – Comportamento dos fatores de transmissão na analise individual dos visores F2 (2,1 mmPb)	27
Figura 17 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{99m}Tc	28
Figura 18 – Fatores de transmissão para ^{99m}Tc , para diferentes materiais	29
Figura 19 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{99m}Tc	30
Figura 20 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{99m}Tc	31
Figura 21 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{131}I	32

Figura 22 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{131}I	33
Figura 23 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{131}I	33
Figura 24 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 2 para ^{131}I	34
Figura 25 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{18}F	35
Figura 26 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{18}F	36
Figura 27 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{18}F	36
Figura 28 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 2 para ^{18}F	37

1. Introdução

A medicina nuclear é uma especialidade médica que emprega radiofármacos, que são fármacos específicos marcados com radionuclídeos, tanto em aplicações diagnósticas quanto terapêuticas [1–5]. Os principais radionuclídeos empregados pela medicina nuclear atualmente são o ^{99m}Tc (diagnóstico), o ^{131}I (teranóstico) e o ^{18}F (diagnóstico), ainda que existam outros radionuclídeos aumentando em importância nas aplicações teranósticas [6], tal como o ^{177}Lu [7–9].

O tecnécio-99m (^{99m}Tc) é um radionuclídeo emissor de radiação γ (140 keV) com meia-vida igual a 6,01 h, sendo o principal radionuclídeo utilizado para o imageamento de diversos órgãos e sistemas [10–12]. O flúor-18 (^{18}F) é um radionuclídeo que decai por emissão β^+ ($E_{max} = 635$ keV), que ao se aniquilar com um elétron, emite dois fótons com energia de 511 keV cada [13, 14], sendo utilizado em imageamento através da tomografia por emissão de pósitrons [15–18]. O iodo-131 (^{131}I) é um radionuclídeo que possui características que permitem o seu uso tanto para tratamento, devido à emissão de partículas β^- ($E_{max} = 606$ keV), quanto para diagnóstico em função da emissão γ (384 keV), sendo muito utilizado ao longo da história da medicina nuclear para tais fins [3–5, 19, 20].

O uso de emissores de radiações ionizantes pela medicina nuclear resulta na necessidade de cuidados especiais que garantam a proteção radiológica de todo o pessoal envolvido, e igualmente de indivíduos do público. Entre as diversas técnicas de redução da exposição às radiações ionizantes [21], é comum o emprego de barreiras físicas de proteção, tais como equipamentos confeccionados em chumbo ou tungstênio (protetores de seringa, capela de manipulação, porta frascos, etc.) durante a manipulação de materiais radioativos, ou o emprego de blindagem em paredes e portas.

Contudo, em muitas das atividades desempenhadas na rotina de uma unidade de medicina nuclear, torna-se necessário o acesso visual aos elementos envolvidos em determinado procedimento, como durante o processo de fracionamento de radiofármacos, onde se torna necessário ajustar o volume numa seringa. Nesses casos são empregados os denominados vidros (visores) “blindados” [22–25]. Os vidros “blindados” são materiais

sólidos amorfos [26], que podem ser fabricados com diferentes composições, tais como: B_2O_3 - Bi_2O_3 - ZnO - Li_2O [27], PbO - BaO - B_2O_3 [28], 50 BaO - Bi_2O_3 [29], PbO - SiO_2 [30], PbO - GeO_2 [31]. A composição de um vidro “blindado” fornece uma maior capacidade de atenuação da radiação devido ao seu maior número atômico e densidade, mantendo a transparência necessária para permitir a visualização do outro lado da barreira, tornando-o uma opção como blindagem para fontes de radiação ionizantes (γ e raio-X) [22, 25, 32, 33], em determinadas aplicações em medicina nuclear.

Ainda que sejam considerados importantes elementos de blindagem, a escolha do vidro “blindado” a ser utilizado num visor deve levar em consideração se a sua espessura equivalente a outro material de referência, notadamente ao chumbo (Pb), sendo importante observar que a energia das emissões e a sua composição implicarão nos modos de interação dos fótons com o vidro “blindado”.

Diversos estudos têm demonstrado a importância dos vidros “blindados” em medicina nuclear [34–38], mas a aplicação de um elemento de blindagem como meio de proteção contra a exposição às radiações ionizantes impõe que a sua eficiência seja testada [36]. Visores “blindados” são normalmente comercializados em âmbito nacional, sendo em sua maioria especificados em sua espessura equivalente em chumbo (mmPb), sem que sejam informadas a sua composição (elementos e proporções). A ausência de tais informações faz com que, dependendo da energia dos fótons envolvidos, se torne complexo determinar a correta espessura de vidro “blindado” a se utilizar na confecção do visor, sobretudo em sua aplicação em medicina nuclear.

2. Justificativa e objetivo

A especificação de um visor “blindado” é uma tarefa complexa que demanda conhecimento por parte dos profissionais envolvidos na definição dos sistemas de proteção radiológica de um serviço de medicina nuclear. A falta de informações mais detalhadas sobre os vidros “blindados” comercialmente disponíveis torna tal tarefa ainda mais desafiadora. A simples informação de espessura equivalente em chumbo, sem a indicação da faixa energética aplicável para tal equivalência, pode introduzir grandes incertezas no resultado final alcançado pelo elemento de blindagem na prática da medicina nuclear.

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de vidros “blindados” disponíveis comercialmente em território nacional, normalmente utilizados como blindagem em serviços de medicina nuclear, comparando os fatores de transmissão da radiação em energias de interesse (para os radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{18}F e ^{131}I) com aqueles obtidos para o chumbo. Sobretudo em medicina nuclear.

—

3. Fundamentação Teórica

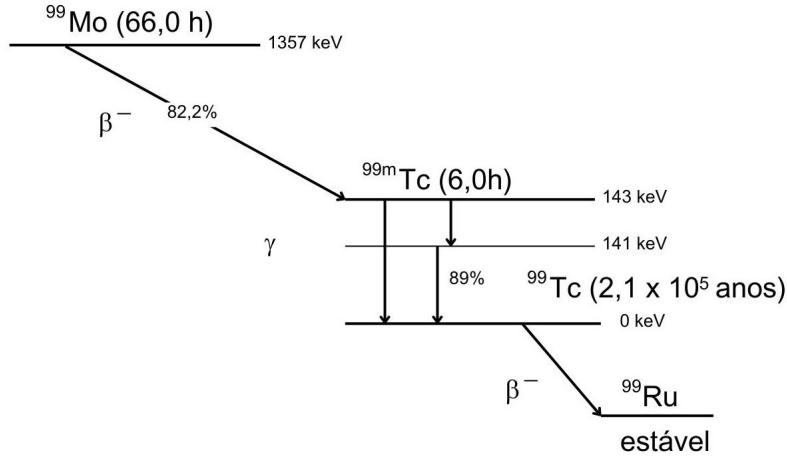
3.1. Medicina Nuclear e proteção radiológica

Medicina Nuclear é uma especialidade médica que utiliza radionuclídeos em associação a determinados fármacos para o diagnóstico e tratamentos de doenças [1]. Ainda que em geral o maior espectro de aplicações da medicina nuclear seja voltado ao diagnóstico [1, 39], a mesma tem se mostrado como uma importante ferramenta terapêutica ao longo dos anos [1, 3–5, 39]. Atualmente, as práticas em medicina nuclear evoluíram para o que se denominou Teranóstica [6], termo cunhado para se referir às aplicações duplas da medicina nuclear, sobretudo nos casos de aplicações de radiofármacos com emissões particuladas e fotônicas. Ao longo de décadas, os dois principais radionuclídeos empregados na rotina clínica da medicina nuclear foram o tecnécio-99m (^{99m}Tc) e o iodo-131 (^{131}I) [1, 39], ainda que, com o passar dos anos, outros radionuclídeos tenham sido incorporados ao arsenal da medicina nuclear, o seu uso foi consideravelmente menor. Atualmente, o flúor-18 (^{18}F) se apresenta cada vez mais como uma importante ferramenta diagnóstica para a medicina nuclear, fato esse decorrente de um incremento nos processos de marcação de fármacos com esse radionuclídeo, e dos avanços consideráveis na instrumentação para imageamento. Igualmente, outros radionuclídeos têm aumentado em importância nas aplicações teranósticas, sobretudo o lutécio-177 (^{177}Lu), tendo sido principalmente empregado para o tratamento de cânceres com excelentes resultados [6–9].

O ^{99m}Tc [40] de longe pode ser considerado o principal radionuclídeo de uso diagnóstico em medicina nuclear [41] é um radionuclídeo emissor de radiação γ (140 keV) com meia-vida ($T_{1/2}$) igual a 6,01 h, sendo o principal radionuclídeo utilizado para o imageamento de diversos órgãos e sistemas [10–12]. De forma prática, o emprego de geradores de molibdênio-99 (^{99}Mo), radionuclídeo que decai por emissão β^- , com $T_{1/2}$ de aproximadamente 66 horas, produzindo o ^{99m}Tc (figura 1), permite que tal radionuclídeo seja diariamente obtido através de um processo de separação (eluição) do radionuclídeo filho (^{99m}Tc) da coluna química onde o radionuclídeo pai (^{99}Mo) se encontra adsorvido [39–41].

O ^{131}I é um dos mais antigos e longevos radionuclídeos empregados em medicina

Figura 1 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{99}Mo



Adaptado de: Grurin et al. [42]

nuclear, com o seu uso em terapias datando dos anos 40 do século XX [3, 5, 39], tendo sido um dos primeiros a ser empregados em aplicações terapêuticas. Esse radionuclídeo apresenta uma meia-vida de aproximadamente 8 dias, decaindo pela emissão de uma partícula β^- , para um dos estados excitados do xenônio-131 (^{131}Xe) (figura 2).

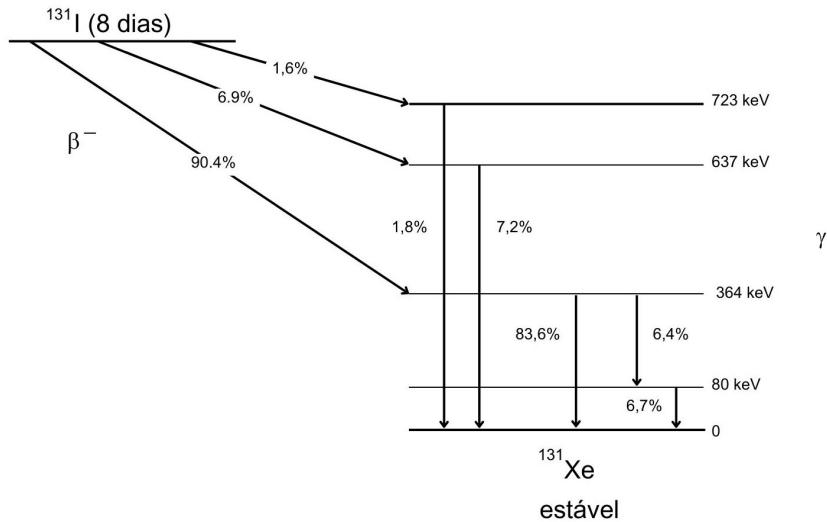
O fato de ser um emissor β^- [43, 44] de baixa penetração nos tecidos (0,6 a 2,3 mm) [43, 44], faz com que o ^{131}I produza deposição de energia restrita em sua maioria às células que captam o iodo. Tais características do ^{131}I fazem com que o mesmo seja um importante agente terapêutico para o tratamento de hipertireoidismo e para a eliminação de células remanescentes após a ressecção de câncer de tireoide.

As emissões γ resultantes do decaimento do $^{131\text{m}}\text{Xe}$ permite o emprego de técnicas de imageamento para melhor avaliar a distribuição dos radiofármacos marcados com o ^{131}I , seja para aplicações diagnósticas ou no acompanhamento da eficácia dos tratamentos.

Uma aplicação da medicina nuclear que vem se tornando cada vez mais importante, e presente na prática médica, é o emprego de radiofármacos marcados com emissores de pósitrons (β^+) para o diagnóstico de doenças, e o acompanhamento evolutivo de diversos tratamentos, sobretudo na oncologia. Diversos radionuclídeos emissores β^+ tem sido utilizados em medicina nuclear a nível mundial. Contudo o flúor-18 (^{18}F) têm sobressaído como um dos mais importantes radionuclídeos, sobretudo pelas suas características físicas e químicas [13, 14].

O ^{18}F decai por emissão β^+ ($E_{max} = 635$ keV), com $T_{1/2} = 109,7$ min (1,83h),

Figura 2 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{131}I



Adaptado de: Starovoitova [45]

sendo produzido em aceleradores de partículas carregadas, principalmente os ciclotrons [46, 47], através do bombardeamento de oxigênio-8 (^{18}O) com prótons, ainda que reações de bombardeamento de neônio-20 (^{20}Ne) por dêuterons igualmente possam ser empregadas [13, 47].

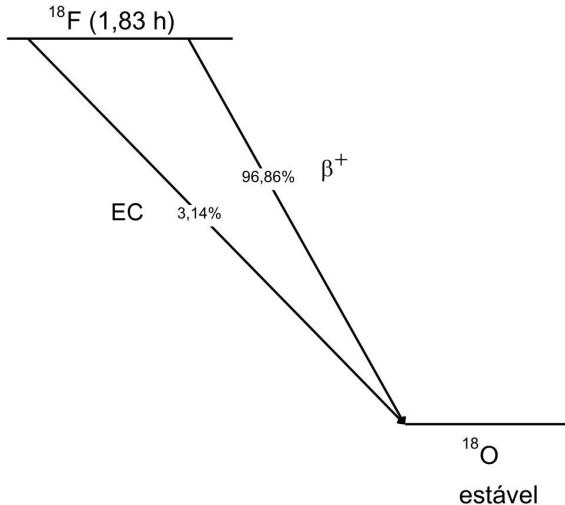
Partículas β^+ sofrem o aniquilação com elétrons (e^-) do meio, resultando em dois fôtons, aproximadamente contrapostos, com energias de 511 keV [13, 14], esse comportamento dos fôtons emitidos no evento de aniquilação é a base do imageamento através do usos de sistemas de detectores contrapostos, sincronizados temporalmente (janela de coincidência), nos equipamentos de tomografia por emissão de pósitrons (PET) [15, 48, 49]. Por se utilizar de dupla informação, através dos fôtons que são detectados em coincidência temporal, a resolução espacial das imagens produzidas pela técnica PET é superior àquelas obtidas por outros métodos de imageamento em medicina nuclear [39, 48].

Ainda que o uso de radionuclídeos (emissores de radiação ionizantes) tenha se provado útil em diversos campos de aplicação, sobretudo em medicina, essa apresenta a capacidade de causar danos a células e tecidos, fazendo com que sejam necessários cuidados em seu uso. Tais cuidados fazem parte do escopo do que se denomina proteção radiológica.

Conforme definido na norma CNEN NN 3.01: [51]:

“LXXXV - Radioproteção ou Proteção radiológica - conjunto de princípios e medidas que visam evitar exposições desnecessárias à radiação com o objetivo de proteger o ser

Figura 3 – Esquema simplificado de decaimento radioativo do ^{18}F



Adaptado de: Bergeron, [50]

humano e seus descendentes, assim como o meio ambiente dos possíveis efeitos indesejados causados pela radiação ionizante;”

Historicamente, o conceito ALARA (As Low As Reasonably Achievable) foi o princípio operacional de base para a definição dos padrões e normas em proteção radiológica, onde critérios de otimização e limitação das doses recebidas em função do uso das radiações ionizantes devem ser limitados aos menores níveis atingíveis, levando-se em consideração fatores econômicos e sociais, e que devem ser definidos limites de dose equivalente para indivíduos, de forma a garantir o correto emprego das radiações ionizantes em benefício da sociedade [52].

A diminuição do tempo de exposição, o aumento da distância com relação às fontes de exposição e a aplicação de elementos de blindagem às radiações são considerados pilares para a definição dos procedimentos operacionais a serem empregados nas práticas envolvendo radiações ionizantes [53]. A proteção radiológica tem sido um campo em evolução desde a descoberta dos raios-X e da radioatividade, existindo atualmente um maior nível de preocupação à exposição às radiações ionizantes, sobretudo sendo dada maior atenção às doses recebidas no cristalino [53].

Como apresentado anteriormente, há uma maior imposição na proteção aos olhos fazendo com que um maior cuidado na determinação dos elementos de blindagem utilizados na prática da medicina nuclear seja mandatório. Visores “blindados” são elementos

importantes na rotina de proteção radiológica para a redução de dose nos olhos, sendo empregados em diversas atividades, dentre as quais na manipulação de radiofármacos (porta-frascos blindados, nas capelas de manipulação, etc.), durante o processo de administração dos radiofármacos nos pacientes (protetores de seringa), nas salas de exame (janelas de observação) [29].

Visores “blindados” são construídos utilizando-se vidros [26] dopados com elementos pesados, tais como o chumbo (Pb), o bário (Ba) e o bismuto (Bi), de forma a aumentar a sua capacidade de blindagem às radiações [25, 29]. Contudo, a aplicação de elementos de blindagem exige não somente o conhecimento dos níveis de proteção (redução de dose) desejados, nas também das características e processos de interação das radiações com o elemento de blindagem em si [54]. Um maior detalhamento sobre os processos envolvidos na atenuação das radiações será apresentado na próxima seção.

3.2. Mecanismos de atenuação da radiação ionizante e características de blindagem dos visores “blindados”

Ao atravessar a matéria, as radiações ionizantes tem o poder de produzir excitações atômicas ou moleculares, a ionização dos átomos constituintes do meio onde se propagam, ou ainda ativar os núcleos de tais átomos [54]. O conhecimento desses processos é de relevância para um melhor entendimento de como se determinar adequadamente um elemento de blindagem a ser aplicado na cadeia de proteção radiológica.

Nos processos de excitação atômica ou molecular, elétrons são temporariamente deslocados de seus orbitais, com o posterior retorno, num processo em que ocorre a emissão de energia na forma de luz ou raios-X característicos, ao passo que na ionização os elétrons são removidos de seus orbitais e passam a se tornar livres, podendo quebrar ligações químicas ou produzir radicais livres no meio. Em geral nos processos de ionização, os íons podem posteriormente emitir outras radiações em função de um rearranjo orbital dos elétrons constituintes [54].

Um maior detalhamento sobre os diferentes mecanismos de interação das radiações ionizantes com a matéria não se enquadra nos objetivos desse trabalho, mas se encontram disponíveis na literatura, sendo indicados Tauhata *et al.* [54] e Dance *et al.* [55]. Entretanto,

serão aqui, rapidamente, apresentados os três mecanismos mais relevantes de interação para fótons: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares.

O efeito fotoelétrico é a forma predominante de interação para fótons de baixa energia e materiais de alto número atômico efetivo, com o fóton transferindo toda sua energia a um elétron fortemente ligado do material, que será ejetado (fotoelétron) com energia cinética definida [25, 54, 55], sendo esse o modo predominante para elementos pesados como o chumbo e fótons de mais baixa energia como àqueles emitidos pelo ^{99m}Tc . Com a probabilidade de interação apresentando uma dependência com relação ao número atômico igual a Z^n , com n assumindo valores entre 4 e 5 [25, 56], e com a energia do fóton igual a $E^{-3,5}$ [25]. A energia cinética dos fotoelétrons é dada por:

$$E_c = h\nu - B_e \quad (3.1)$$

com E_c sendo a energia do fotoelétron ejetado, h a constante de Planck, ν a frequência do fóton incidente e B_e a energia de ligação do elétron.

O espalhamento Compton é um processo inelástico, onde o fóton incidente transfere parcialmente sua energia a um elétron fracamente ligado, que será ejetado do átomo (elétron Compton), sendo desviado de sua trajetória inicial em um ângulo de espalhamento θ e com menor energia [25, 54, 55]. Sendo a energia do fóton espalhado (E'_γ) dada em função da energia do fóton incidente (E_γ), do ângulo de espalhamento θ , e da massa de repouso do elétron (m_0) por:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (3.2)$$

com

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \quad (3.3)$$

e a energia cinética do elétron ejetado dada por:

$$E_{e_{Compton}} = \frac{E_\gamma}{1 + 2\alpha} \quad (3.4)$$

O efeito Compton é menos dependente do número atômico e diminui com o aumento da energia dos fótons incidentes, sendo predominante para fótons de energias intermediárias [25, 54].

A produção de pares é o fenômeno em que o fóton incidente ao interagir com o campo elétrico do núcleo de elementos pesados, desaparece dado origem a um par elétron-pósitron ($e^- - e^+$). Esse é um processo que ocorre a partir de determinado limiar energético

dos fótons envolvidos na interação igual a 1,022 MeV, que corresponde à massa equivalente à soma das massas de repouso dos componentes do par [25, 54, 55]. A probabilidade de ocorrência da produção de pares aumenta com relação ao número atômico do meio (Z^2). O excesso de energia do fóton incidente é transferido como energia cinética ao par elétron-pósitron. Esse é um processo que prevalece para elementos pesados e fótons de mais alta energia [25].

As interações fóton-átomo podem ser levadas ao nível macroscópico através do estudo da passagem de feixes de radiação através da matéria. O conhecimento sobre a capacidade de absorção, espalhamento e produção de radiação secundária (oriunda dos processos de interação) dos materiais é importante em nível prático, porque traduz as propriedades atenuadoras do meio empregado como elemento de blindagem. O conhecimento de parâmetros tais como o *coeficiente de atenuação linear total* (μ), o *livre caminho médio* (mpf), a *camada semirredutora* (HVL), o *número atômico efetivo* (Z_{eff}) e a *densidade eletrônica* (N_e), permitem uma melhor definição do material e da espessura necessária para se atingir o nível de proteção de uma barreira de blindagem [25].

Ao se incidir um feixe estreito e monocromático de radiação γ com intensidade I_0 sobre um meio homogêneo de espessura x , observa-se que a intensidade do feixe emergente pode ser matematicamente determinada através da expressão:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.5)$$

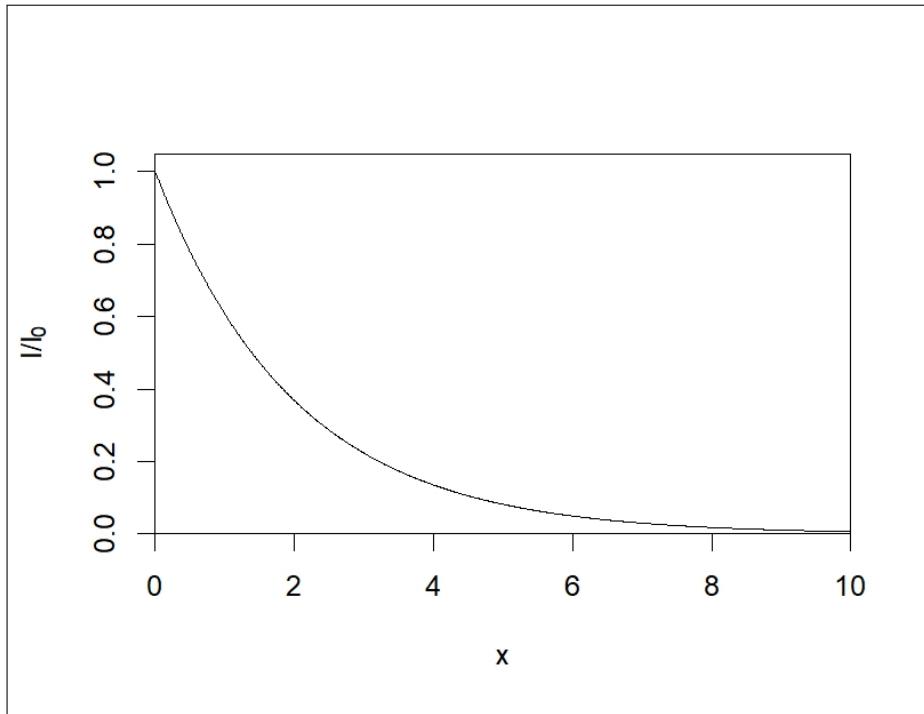
onde: $I(x)$ é a intensidade do feixe que emerge da barreira, I_0 é a intensidade inicial do feixe incidente, μ é o coeficiente de atenuação linear do material e x é a espessura aplicada do mesmo.

O coeficiente de atenuação linear (μ) é a probabilidade de atenuação do feixe pelo meio atenuador, devido aos possíveis eventos de interação, sendo muitas vezes denominado *coeficiente de atenuação linear total* [54]. Esse comportamento é graficamente apresentado na figura 4

A dependência do coeficiente de atenuação linear com a densidade do material em função de seu estado físico é corrigida adotando-se o parâmetro coeficiente mássico de atenuação linear (μ/ρ) [25, 54, 55], de forma que a equação 3.6 toma a forma:

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x} \quad (3.6)$$

Figura 4 – Curva de atenuação para feixe estreito de intensidade I_0



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Os valores do coeficiente são normalmente tabelados para diversos materiais ou calculados através de softwares específicos [24, 25, 29, 54, 57].

O *livre caminho médio* (mfp) é outro importante conceito aplicado ao processo de atenuação de feixes de radiação, sendo a distância média que um fóton viaja no meio antes de sofrer uma interação. O mesmo corresponde ao recíproco do coeficiente de atenuação linear [25]:

$$mfp = \frac{1}{\mu} \quad (3.7)$$

Outro conceito de grande valia na prática do cálculo de blindagem é a denominada camada semirredutora (HVL ou $x_{\frac{1}{2}}$). A camada semirredutora representa a espessura de material necessária para reduzir a intensidade do feixe de saída à metade do feixe incidente. A relação entre a camada semirredutora e o coeficiente de atenuação linear é dada pela equação 3.8 [25, 54]:

$$\mu = \frac{\ln 2}{HVL} \approx \frac{0,693}{HVL} \quad (3.8)$$

No caso de materiais compostos por mais de um elemento, o número atômico efetivo (Z_{eff}) [56] é de importância, visto que diferentes materiais apresentam diferentes componentes de interação com as radiações, de forma que o comportamento do material

composto é diferente daquele apresentado por cada um de seus componentes separadamente. Murty [56] propôs que para materiais heterogêneos para propósitos de atenuação de raios γ fosse considerado um material fictício de número atômico Z_{eff} .

Como apresentado em Kaur et. al [25], o número atômico efetivo pode ser calculado à partir das seções de choques, da massa molar dos elementos constituintes do material:

$$\sigma_m = (\mu_m)_{material} \frac{M}{N_A} \quad (3.9)$$

onde $M = \sum_i n_i A_i$ sendo a massa molar, N_A o número de Avogadro, n_i o número de fórmulas e A_i o peso atômico do i-ésimo elemento do material.

Usando a equação 3.9 pode-se obter a seção de choque atômica do material:

$$\sigma_a = \sigma_m \frac{1}{\sum_i n_i} \quad (3.10)$$

Por conseguinte a seção de choque eletrônica pode ser igualmente obtida:

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_{material} \quad (3.11)$$

onde $f_i = \frac{n_i}{\sum_j n_j}$ a abundância fracional do i-ésimo elemento em relação ao número total de átomos.

De forma que o número atômico efetivo assume a forma:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (3.12)$$

Ao passo que a densidade eletrônica pode ser definida como o número de elétrons por unidade de massa do material. Dado que a probabilidade de interação dos fótons com os elétrons orbitais cresce com o número desses elétrons, quanto maior a densidade eletrônica (N_e), maior a probabilidade de interação do fóton como o meio. A densidade eletrônica pode ser calculada por intermédio da expressão abaixo:

$$N_e = \frac{\mu_m}{\sigma_e} \quad (3.13)$$

A partir da equação 3.6 é possível encontrar o fator de transmissão ($I(x)/I_0$) para uma dada espessura (x) de material, representando a eficácia de blindagem da barreira:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (3.14)$$

Como apresentados anteriormente, *visores “blindados”* são elementos úteis em medicina nuclear sendo empregados em protetores para a contenção de frascos contendo radionuclídeos [38], em unidades de terapia com radiofármacos [37], entre outras. Visores “blindados” são construídos com a utilização de vidro dopado com óxidos de elementos pesados, no intuito de permitir a transmissão da luz visível, mas de forma a fornecer um elemento de interação mais potente com as radiações ionizantes. A sua estrutura e efetividade como elemento de blindagem têm sido avaliadas [24, 25, 27–34, 57, 58]. Os elementos químicos bário (Ba), bismuto (Bi) e chumbo (Pb) são os mais utilizados na confecção de vidros destinados à blindagem das radiações [24, 25].

A expressão 3.6 é adequada para condições de boa geometria (feixes estreitos) e para pequenas espessuras de material absorvedor. Entretanto, em muitos casos é necessário o emprego de espessuras maiores de material atenuador, e os feixes de radiação não são altamente colimados (geometria pobre), sendo denominados feixes largos. Em tais casos, uma parcela significativa de fôtons espalhados atinge o detector, alterando assim a forma como o feixe é atenuado, fazendo com que a curva de atenuação se desvie do esperado. De forma a corrigir tal disparidade é introduzido um *fator de crescimento (fator de buildup)* [54], de forma que a expressão se torna:

$$I(x) = B(\mu x) I_0 e^{-\mu x} \quad (3.15)$$

onde $B(\mu x)$ é o fator de buildup.

Observa-se pela expressão 3.15, que B é dependente não somente do coeficiente de atenuação linear do material, mas também da espessura empregada do mesmo. O fator de buildup pode ser obtido de forma experimental, obtendo-se a curva de atenuação para feixe estreito e a comparando com a curva obtida com o uso de feixe largo. Contudo, é estimar o fator de buildup, desde que sejam conhecidas as seções de choque de atenuação e de espalhamento dos materiais constituintes [59], existindo diversos modelos de cálculo para tal fim, com grandes variações de valores sendo obtidas para os diferentes modelos [60].

Estudos envolvendo parâmetros de atenuação de diversos vidros dopados com óxidos de materiais pesados têm sido conduzidos [22, 24, 25, 27–31, 33, 34, 57, 58, 61–63]. Entretanto, em sua grande maioria para faixas energéticas superiores àquelas empregadas em medicina nuclear, sendo desejável a realização de maiores estudos envolvendo as faixas

energéticas envolvidas nesse campo de prática com as radiações ionizantes.

4. Materiais e métodos

Para a determinação da eficiência de blindagem dos visores “blindados”, foram realizados experimentos com três radionuclídeos (^{99m}Tc , ^{131}I e ^{18}F) e amostras de vidro “blindados” de dois diferentes fornecedores, doravante denominados *F1* (sete amostras) e *F2* (cinco amostras). Foram igualmente realizados experimentos com um conjunto de amostras de chumbo (doze amostras), confeccionadas a partir de um mesmo “lençol” oriundo de *F1*, como base comparativa para os resultados obtidos a partir das amostras de vidro, portanto, funcionando como um grupo controle (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos experimentos realizados para diferentes materiais e radionuclídeos.

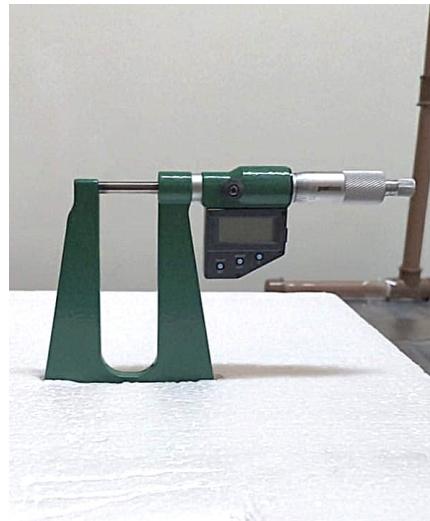
Radionuclídeo	Material		
	Chumbo	Vidro (F1)	Vidro (F2)
^{99m}Tc	Individuais ($n = 12$)	Individuais ($n = 7$)	Individuais ($n = 5$)
	Combinadas ($n = 12$)	Combinadas ($n = 7$)	Combinadas ($n = 5$)
^{131}I	Individuais ($n = 12$)	Individuais ($n = 7$)	Individuais ($n = 5$)
	Combinadas ($n = 12$)	Combinadas ($n = 7$)	Combinadas ($n = 5$)
^{18}F	Individuais ($n = 12$)	Individuais ($n = 7$)	Individuais ($n = 5$)
	Combinadas ($n = 12$)	Combinadas ($n = 7$)	Combinadas ($n = 5$)

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A espessura (mm) de cada uma das placas de chumbo (controle) foi mensurada em 10 pontos diferentes utilizando-se um micrômetro digital Pantec 13139-252-A (P.A. Control Comércio de Máquinas e Equipamentos de Medição Ltda, Campinas, SP), dotado de resolução igual a 0,001 mm (figura 5). A informação referente à espessura equivalente (mmPb) das amostras de vidro foram obtidas, verbalmente, de *F1* ($e_{eq_1} = 2,3$ mmPb) e se encontravam gravadas nas amostras de *F2* ($e_{eq_2} = 2,1$ mmPb). Todas as amostras de vidro de *F2* eram do mesmo lote, ao passo que nas amostras de *F1* não foi possível determinar tal informação.

Todas as fontes empregadas nos experimentos foram preparadas no Serviço de Medicina Nuclear (SEMENUC) do Hospital de Câncer I/INCA. As fontes foram confeccionadas utilizando-se frascos de vidro, do tipo penicilina (IPEN/CNEN, São Paulo). Para as fontes de ^{99m}Tc foi realizada a retirada de alíquotas de eluatos obtidos a partir de geradores de

Figura 5 – Micrômetro utilizado para medir as espessuras das placas de chumbo



Fonte: Acervo próprio

$^{99}Mo - ^{99m}Tc$ (IPEN/CNEN, São Paulo) utilizados no SEMENUC. Para o preparo das fontes de ^{18}F e ^{131}I , foram retiradas alíquotas do material fornecido, respectivamente, pela R2 Soluções em Radiofarmácia LTDA e IPEN/CNEN-SP.

A cada alíquota líquida, foi adicionado corante (azul de metileno), de forma a facilitar a visualização da fonte contida no frasco, e os volumes finais das alíquotas foram ajustados para 1,5 mL, sendo posteriormente seladas com parafina, conforme figura 6.

Figura 6 – Exemplo da fonte utilizada no experimento



Fonte: Acervo próprio

A atividade das fontes foi determinada com o emprego de um ativímetro Capintec CRC-25R (Capintec Inc, New Jersey, USA), número de série 252318 (figura 7). Antes do início dos experimentos, o equipamento foi submetido aos testes de controle de qualidade preconizados em CNEN NN 3.05 [64], de forma a garantir o seu correto funcionamento.

Figura 7 – Ativímetro utilizado para a aferição da atividade das fontes



Fonte: Acervo da autora

O equipamento de medição utilizado em todos os experimentos foi o detector de radiação Atomtex AT6102A (Atomtex SPE, Minsk, BY), número de série 61074 (figura 8, operando no modo de taxa de equivalente de dose ambiente ($H^*(10)$)), sendo a sua faixa operacional igual a $0,01 \mu\text{Sv}/\text{h} - 100,00 \text{ mSv}/\text{h}$. O equipamento se encontrava calibrado (laboratório: Metrobrás Metrologia das Radiações Ionizantes LTDA, certificado 24-0401 R1, data de calibração: 11 de março de 2024).

Figura 8 – Detector utilizado para coleta de dados Atomtex AT6102A



Fonte: Acervo próprio

De forma a reduzir a exposição pessoal durante a coleta dos dados, foi utilizada uma câmera de vídeo acoplada a um suporte confeccionado em policloreto de vinila (PVC) direcionada diretamente para o monitor do detector utilizado, durante todos os experimentos. Foi utilizada uma blindagem cilíndrica com 75 mm de espessura em chumbo para o acondicionamento das fontes, sendo tal blindagem dotada de abertura na parte

frontal, que foi alinhada em direção ao eixo central do detector. Foi utilizado um suporte confeccionado em aço inoxidável para manter a blindagem suspensa no ar, e utilizados blocos de poliestireno expandido (*EPS*) de forma a sustentar as amostras estudadas, assim como o próprio equipamento de medição. Todo o conjunto experimental se encontrava posicionado sobre uma mesa de madeira, de forma a reduzir os efeitos de retroespalhamento na mesa e no ambiente, a primeira foi coberta com um lençol de chumbo (espessura = 1,1 mm), e foram ainda utilizados protetores (biombos) blindados com 6,00 mm de chumbo, posicionados em forma de U em torno de todo o aparato experimental. A sala onde o experimento foi realizado era igualmente blindada com concreto de alta densidade. Todo o aparato experimental pode ser observado na figura 9.

Figura 9 – Aparato experimental

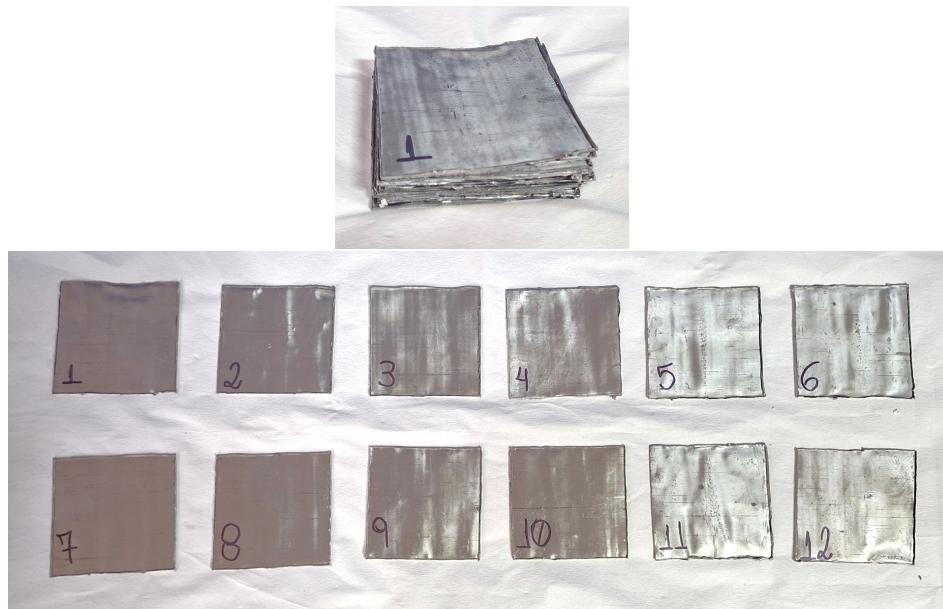


Fonte: Acervo da autora

As amostras utilizadas nos experimentos são abaixo descritas:

1. Conjunto com 12 placas de chumbo medindo 10 x 10 cm, numeradas de 1 a 12 (figura 10);
2. Conjunto com 6 placas de vidro com equivalência de 2,3 mmPb (F1) medindo 10 x 10 cm, mais um 1 placa de vidro de 10 x 20 cm de mesma equivalência, enumeradas de 1 a 7 (figura 11);
3. Conjunto com 5 placas de vidro com equivalência de 2,1 mmPb (F2) medindo 19,8 x 30 cm, numerados de 1 a 5 (figura 12).

Figura 10 – Placas de chumbo utilizadas no experimento



Fonte: Acervo próprio

No início de cada experimento, foi obtido o valor da taxa de dose no ambiente ($\mu\text{Sv/h}$), sem a presença de fontes (BG), com o detector posicionado a 30 cm do ponto onde a amostra seria posteriormente montada, durante 5 minutos.

Para a determinação da taxa de dose inicial (I_0), a respectiva fonte foi posicionada na blindagem cilíndrica e realizada uma medição sem a presença de blindagem intermediária entre a fonte e o detector por um tempo determinado ($t = 2$ minutos).

Posteriormente, foram realizadas medições da forma abaixo descrita:

Figura 11 – Placas de vidro do fornecedor 1



Fonte: Acervo próprio

Figura 12 – Placas de vidro do fornecedor 2



Fonte: Acervo próprio

1. Placas individuais: cada blindagem de um determinado conjunto foi posicionada entre a fonte e o detector, mantendo o detector a 30 cm do início da barreira, fazendo-se a coleta de dados por 2 minutos;
2. Placas combinadas sequencialmente: o procedimento de coleta de dados por 2 minutos com a placa de número 1. Posteriormente se adicionavam sucessivamente as demais placas do conjunto, com uma nova coleta de dados a cada adição de placa, mantendo-se o tempo de aquisição igual a 2 minutos.

Em função do decaimento da atividade das fontes, o I_0 foi corrigido tomando-se por base a diferença temporal entre a medição realizada e a inicial (sem a presença do material atenuador), sendo subtraído o valor médio obtido a partir da radiação de fundo

do ambiente (subtração do BG). As meias-vidas físicas ($T_{\frac{1}{2}}$) utilizadas para os cálculos teóricos foram:

1. ^{99m}Tc : 360,6 minutos;
2. ^{18}F : 109,771 minutos;
3. ^{131}I : 11.548,80 minutos.

Todos os resultados corrigidos pelo decaimento obtidos nas medições foram convertidos em *fatores de transmissão* (I/I_0). Os dados foram tabulados em planilhas no formato Excel para o posterior tratamento dos dados. Todas as análises estatísticas e gráficos foram realizados com a linguagem R [65], através do ambiente de desenvolvimento integrado RStudio [66].

Foram realizadas dez (10) medições de espessura (mm) nas placas de chumbo que foram utilizadas como base de comparação (controle), de forma a determinar a sua homogeneidade de espessura das mesmas e comparar os valores obtidos com o que foi informado pelo fabricante (espessura igual a 1,1 mm). Para tanto, foi obtida a estatística descritiva dos dados das doze placas utilizadas, com os parâmetros média, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo, quartis (1º, 2º e 3º), amplitude, assimetria, curtose e erro padrão. Os resultados foram tabulados (Anexo) e apresentados na forma de gráfico de caixa (boxplot de Tukey).

De forma a avaliar a homogeneidade dos fatores de transmissão para cada conjunto de materiais, foi feita uma comparação entre as amostras de um mesmo conjunto e realizada a análise descritiva. Os resultados foram tabulados (Anexo) e apresentados graficamente (boxplot de Tukey) para cada conjunto de amostras.

Dado que as espessuras equivalentes (mmPB) de todas as amostras eram superiores à camada decimorredutora (TVL) para o radionuclídeo ^{99m}Tc a aquisição de dados foi prejudicada, já que era esperado que os resultados estivessem situados na "*cauda longa*" da curva, aliado ao fato que o sistema de detecção empregado não tinha acurácia e precisão suficientes para mensurar diferenças tão pequenas. Optou-se então pela apresentação dos resultados obtidos para o ^{99m}Tc apenas na forma de um gráfico de dispersão, ao qual se adicionou a curva de decaimento esperado para o chumbo, em condição de boa geometria (feixe estreito), ainda que essa não fosse a correta condição experimental.

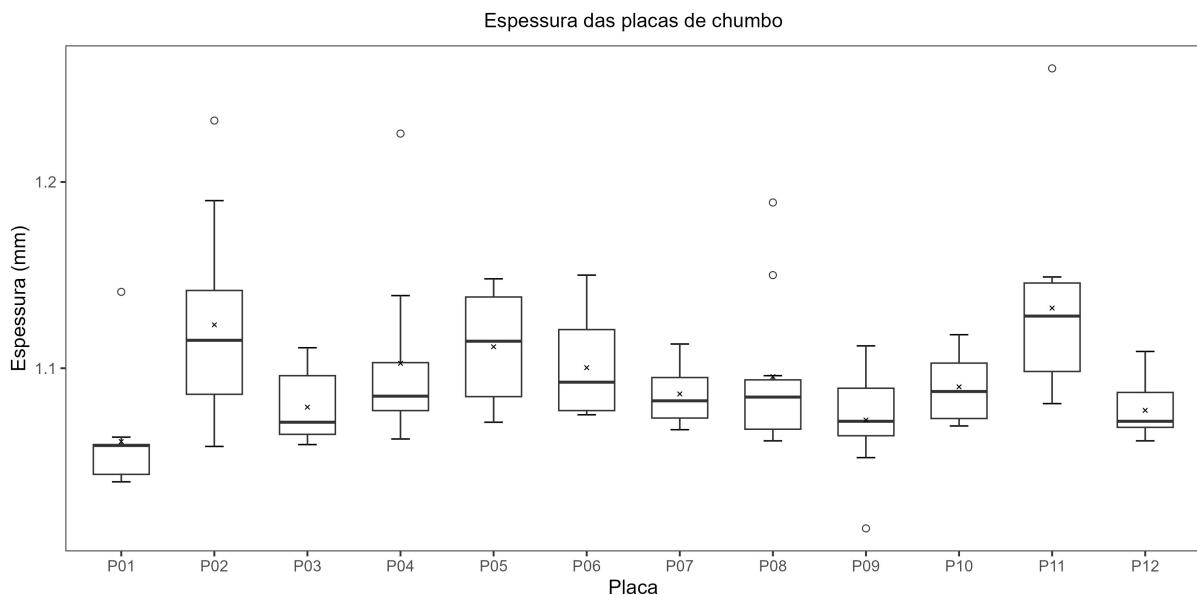
O estudo do efeito da espessura equivalente de cada material (mmPb) sobre o fator de transmissão (I/I_0) para os radionuclídeos ^{131}I e ^{18}F , foi realizado por estatística descritiva (Anexo) e com o emprego do método de regressão linear simples. Para tanto, todos os valores dos *fatores de transmissão* foram linearizados, tomando-se logaritmo natural ($\ln(\frac{I}{I_0})$) de seus valores, com a posterior aplicação do método estatístico de análise.

Foi realizada a análise *a priori* de pressupostos para a aplicação da regressão linear simples [67], tais como *linearidade, independência dos erros, variância dos erros (homocedasticidade), normalidade dos erros, presença de outliers e pontos de alavancagem* e os resultados dessas análises foram apresentados graficamente. Do mesmo modo, foram apresentados os resultados das regressões para os diferentes materiais e para cada radionuclídeo, nos quais foram se encontram ainda grafadas as equações obtidas e os *coeficientes de determinação (R^2)* nos respectivos gráficos.

5. Resultados e discussões

A homogeneidade de espessura das diferentes placas de chumbo empregadas como controle pode ser verificada no gráfico 13, dados da estatística descritiva se encontram disponíveis na tabela 2 (Anexo).

Figura 13 – Gráfico das espessuras medidas para as 12 placas de chumbo



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

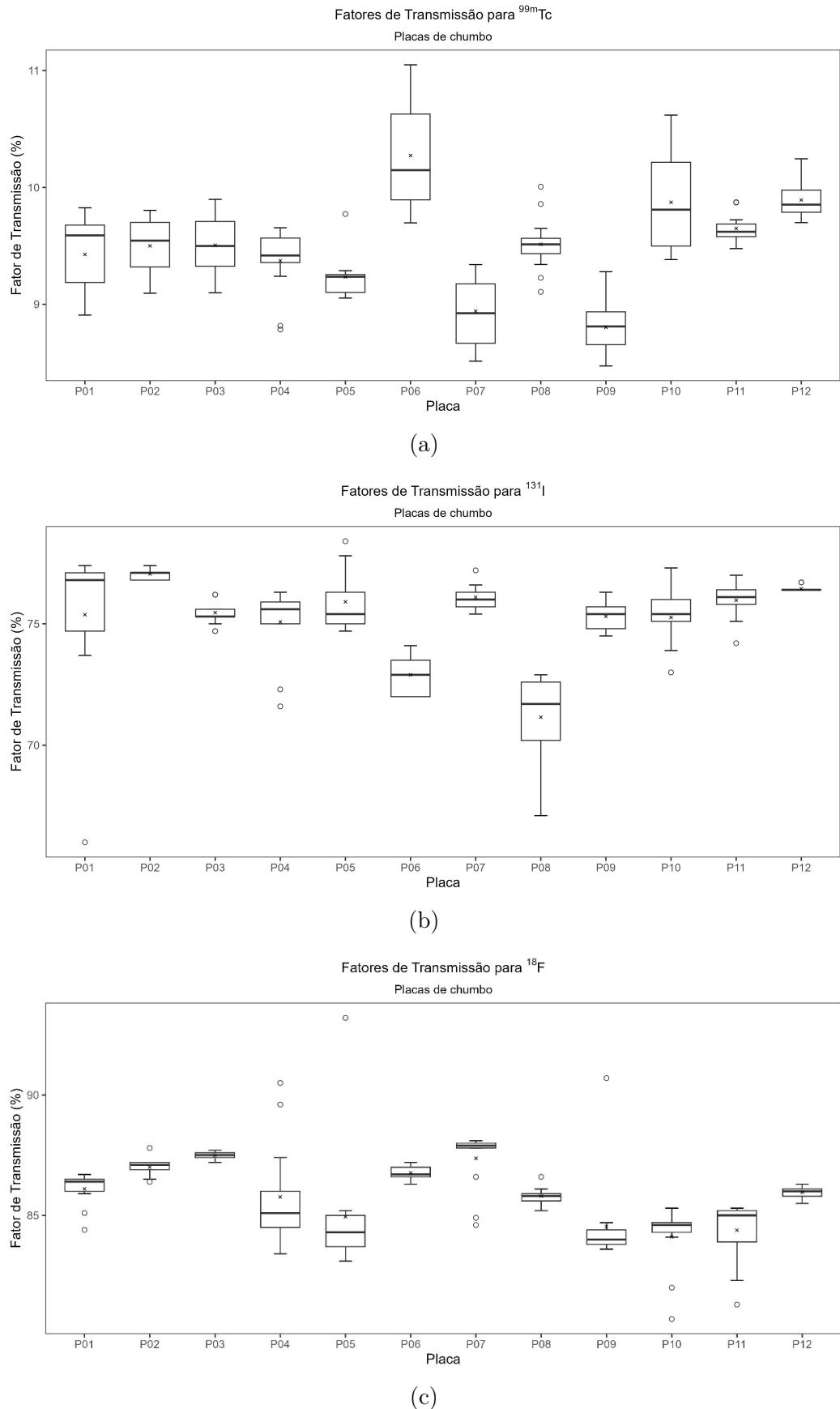
A média de espessura para as placas de chumbo foi igual a $1,09 \pm 0,06$ mm. A espessura indicada pelo fabricante é de 1,1 mm, sendo aceitável considerar que os resultados obtidos são compatíveis com as especificações do fabricante, e o seu uso como grupo de controle para efeitos de comparação para a espessura equivalente em chumbo (mmPb) foi adequado.

Entretanto, a mera espessura física não garante que a composição física da placa seja homogênea, sobretudo para efeitos de blindagem, visto que variações de deposição do material podem ocorrer no processo de manufatura, dessa forma os resultados obtidos para os fatores de transmissão das placas individualmente apresentados no anexo para o ^{99m}Tc (tabela 3), para o ^{131}I (tabela 4) e para o ^{18}F (tabela 5), e são apresentados para todos os radionuclídeos na figura 14. As médias dos fatores de transmissão das placas de chumbo variaram entre 9% - 10% para o ^{99m}Tc , 71% - 77% para o ^{131}I e 84%

- 87% para o ^{18}F . Tal variação pode ser explicada pela própria natureza do processo de emissão e detecção das radiações ionizantes, sobretudo, considerando-se que o instrumento de medição pode apresentar uma incerteza de até 20%, conforme suas especificações técnicas. O comportamento dos fatores de transmissão das placas de chumbo pode ser considerado homogêneo, e essas foram adequadas para efeito de comparação com os fatores de transmissão obtidos com as placas de vidro. A presença de alguns pontos extremos (*outliers*) para o fator de transmissão do chumbo pode ser devido a falha de coleta do dado, ou por um comportamento espúrio momentâneo do sistema de detecção.

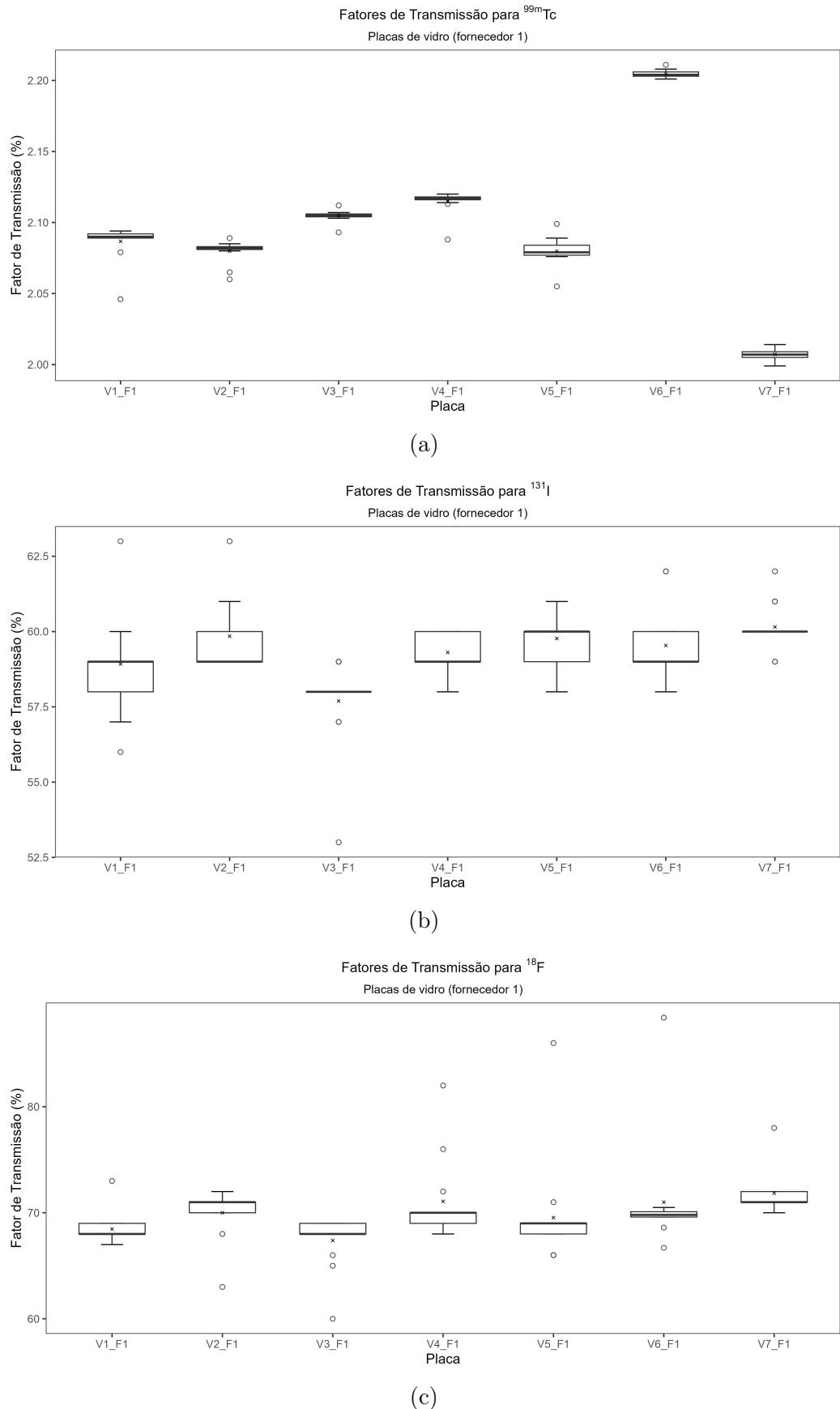
Os resultados obtidos com as diferentes placas de vidro de ambos os fornecedores são apresentados no Anexo, para o ^{99m}Tc (tabela 6), para o ^{131}I (tabela 7), e para o ^{18}F (tabela 8). Observa-se na figura 15 que existe uma boa homogeneidade nos fatores de transmissão para as placas de vidro do fornecedor 1 (F1) para todos os radionuclídeos, e uma variação menor que 20% para as placas V6_F1 e V7_F1 para o radionuclídeo ^{99m}Tc . Tais variações podem ser devidas ao processo de medição, como por variações na constituição física da própria placa. Uma vez que todos os resultados obtidos com as placas de F1 apresentaram uma variação do fator de transmissão menor que 20%, as mesmas foram consideradas homogêneas para efeito de blindagem. Na figura 16 verifica-se que os vidros do fornecedor 2 (F2) para o ^{99m}Tc tiveram uma variação máxima de $\pm 20\%$ com relação ao valor central obtido (V3_F2). Já para os radionuclídeos ^{131}I e ^{18}F houve variações entre 2,0% - 4,0%, e 2,9% - 7,4% ao redor dos valores da média, respectivamente. Contudo, observa-se que existe uma maior variabilidade no fator de transmissão das placas de vidro do fornecedor 2 (F2), ainda que garantidamente as mesmas sejam provenientes de um mesmo lote. Ainda que haja tal variação, as placas podem ser consideradas homogêneas para efeito de blindagem em todos os casos. Ainda que para o caso do ^{99m}Tc a homogeneidade tenha sido menor que a apresentada para os outros radionuclídeos.

Figura 14 – Comportamento dos fatores de transmissão na análise individual das placas de chumbo



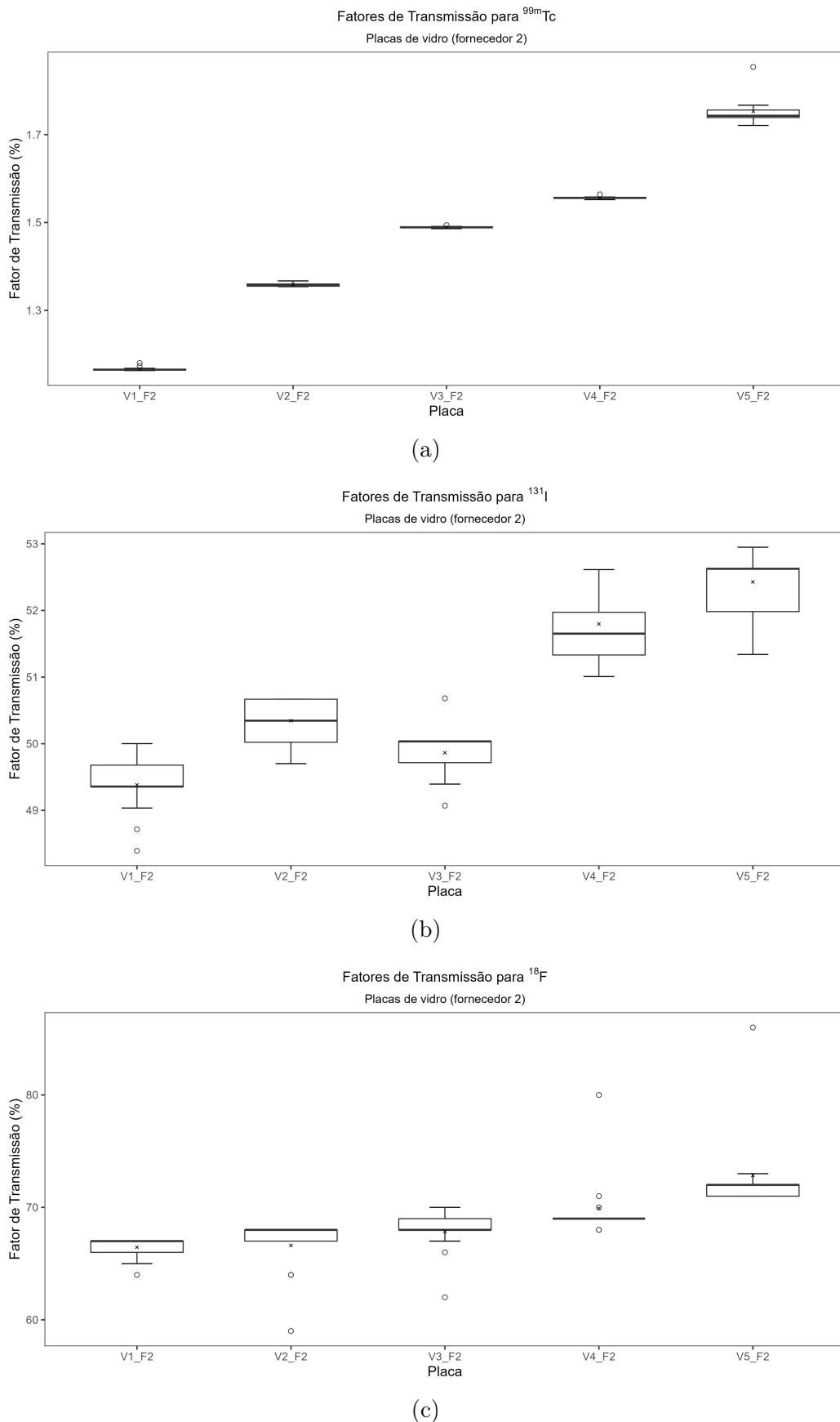
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 15 – Comportamento dos fatores de transmissão na análise individual dos visores F1 (2,3 mmPb)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 16 – Comportamento dos fatores de transmissão na análise individual dos visores F2 (2,1 mmPb)



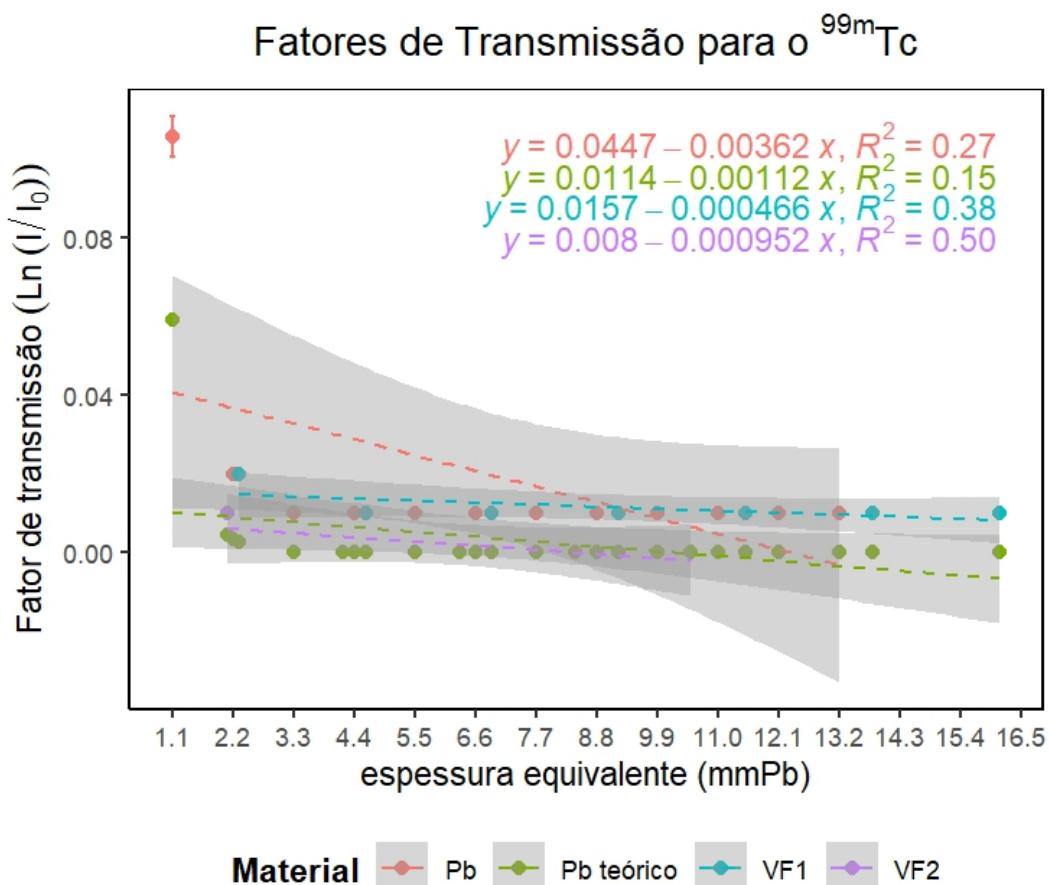
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Uma vez que os fatores de transmissão individual de cada uma das amostras foram considerados aceitáveis, os resultados das combinações aditivas de um mesmo material serão abaixo apresentados.

Foi realizada a análise de estatística descritiva para as combinações aditivas das placas de chumbo, e os resultados para os diferentes radionuclídeo-material, se encontram tabulados no Anexo, para o ^{99m}Tc -Pb (tabela 9), para o ^{131}I -Pb (tabela 10), e para o ^{18}F -Pb (tabela 11).

Igualmente se encontram tabulados os resultados para os materiais do fornecedor F1, para o ^{99m}Tc -Vidro (tabela 12), para o ^{131}I -Vidro (tabela 13), para o ^{18}F -Vidro (tabela 14). Finalmente, para os materiais fornecidos por F2, para o ^{99m}Tc -Vidro (tabela 15), para o ^{131}I -Vidro (tabela 16), e para o ^{18}F -Vidro (tabela 17).

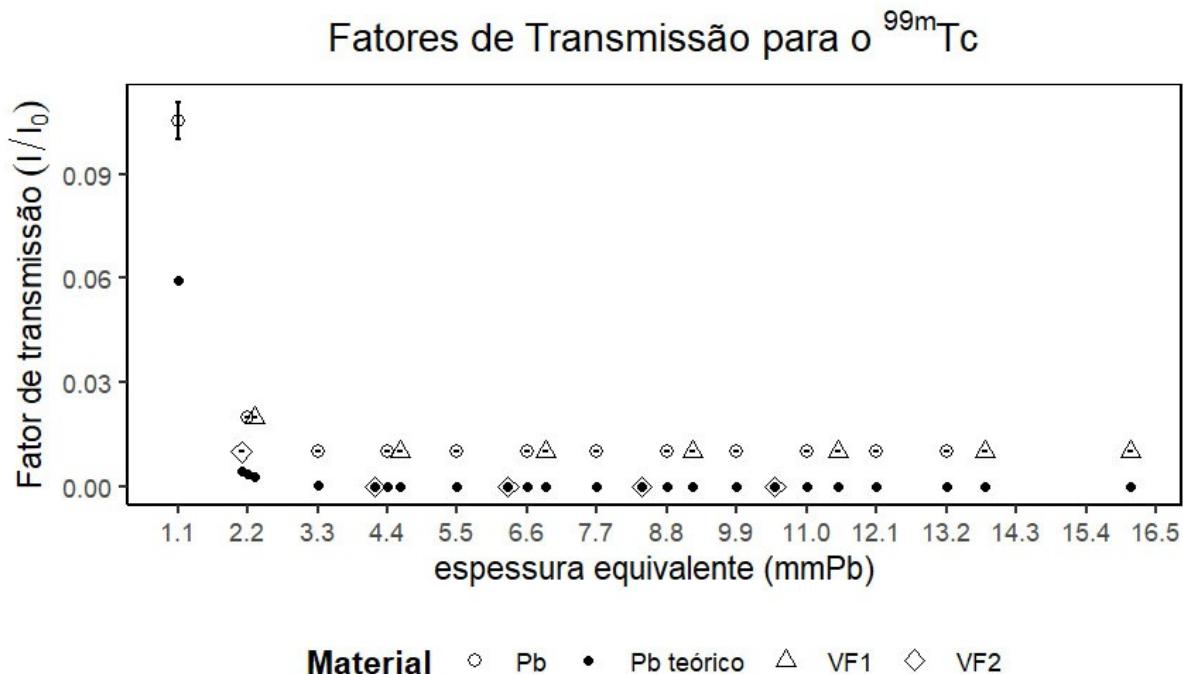
Figura 17 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{99m}Tc



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A análise por regressão linear dos fatores de transmissão linearizados para o ^{99m}Tc não foi satisfatória para nenhum dos materiais (figura 17), visto que a espessura das placas de chumbo era igual a 1,1 mm, o que corresponde à 1^a camada decimorredutora para as emissões γ do radionuclídeo, e se comportando de forma aproximadamente igual para os demais materiais. Dessa forma não foi possível obter os valores de atenuação antes da “cauda” da curva de atenuação. Dessa forma, optou-se por um gráfico de dispersão, sem a linearização dos fatores de transmissão $\frac{I}{I_0}$ diretamente para todos os materiais (figura 18). A esse gráfico foi ainda adicionada a curva teórica de atenuação para o chumbo em condição de feixe estreito ($\mu = 2,57 \text{ mm}^{-1}$), como forma de comparação para os demais materiais.

Figura 18 – Fatores de transmissão para ^{99m}Tc , para diferentes materiais



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

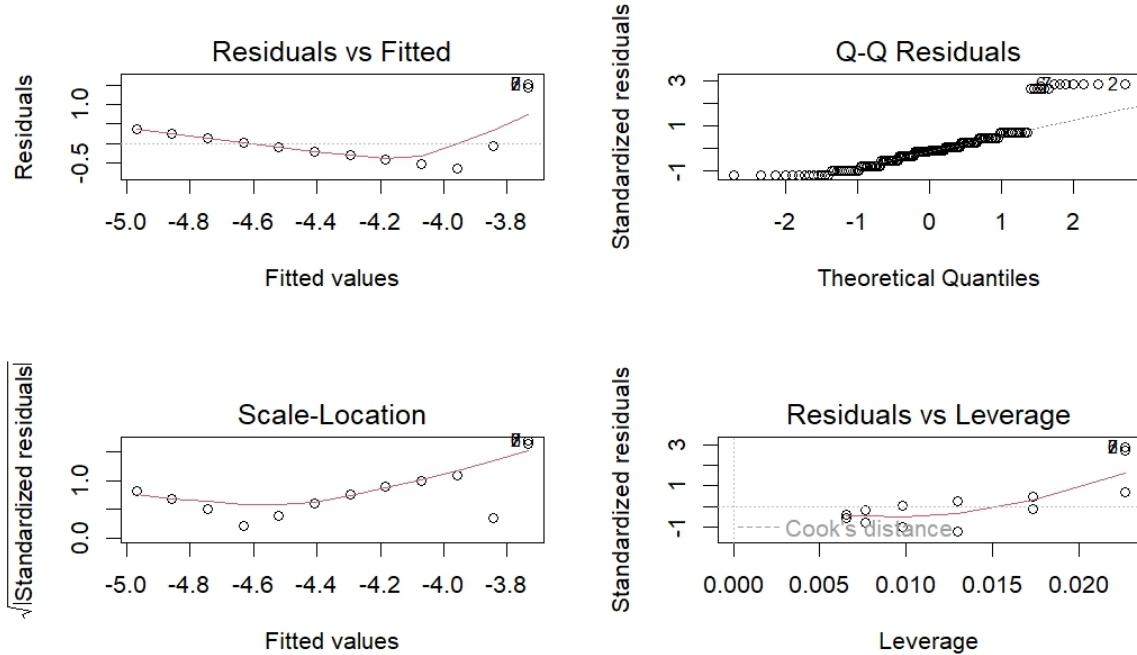
Observa-se que para as placas de chumbo e para o vidro do fornecedor 1, os valores de transmissão são superiores à curva teórica, ao passo que os fatores de transmissão do vidro fornecido pelo fornecedor 2 apresentam valores praticamente semelhantes aos da curva teórica.

Os gráficos correspondentes às análises de pressupostos para a regressão linear são apresentados nas figuras 19 e 20, para o chumbo e o vidro do fornecedor 1, sendo essa

análise não aplicável ao caso do vidro oriundo do fornecedor 2, visto que todos os fatores de transmissão foram praticamente iguais. Ainda que os resultados sejam aqui apresentados na forma de regressões lineares, a discussão usando essa técnica fica prejudicada em função do anteriormente exposto.

Contudo, a análise da figura 18 mostra que, tanto para as placas de chumbo, quanto para a amostra de F1, os fatores de transmissão foram levemente maiores que aqueles obtidos tanto para a amostra de F2, quanto para o valor teórico para o chumbo. Uma possível, ainda que especulativa, explicação para tal fato pode ser relativa ao efeito de crescimento (*buildup*). A análise dos efeitos de buildup em diferentes materiais pode ser encontrada na literatura [24, 68–70], Hoff e Costa [69] apresentam que para o chumbo existem pequenas diferenças entre os fatores de transmissão para feixe largo e feixe estreito para energias da ordem de 511 keV. Contudo, dado que nesse estudo não foi realizada avaliação para as diferentes geometrias de feixe, não é possível fazer tal afirmação para a energia do ^{99m}Tc .

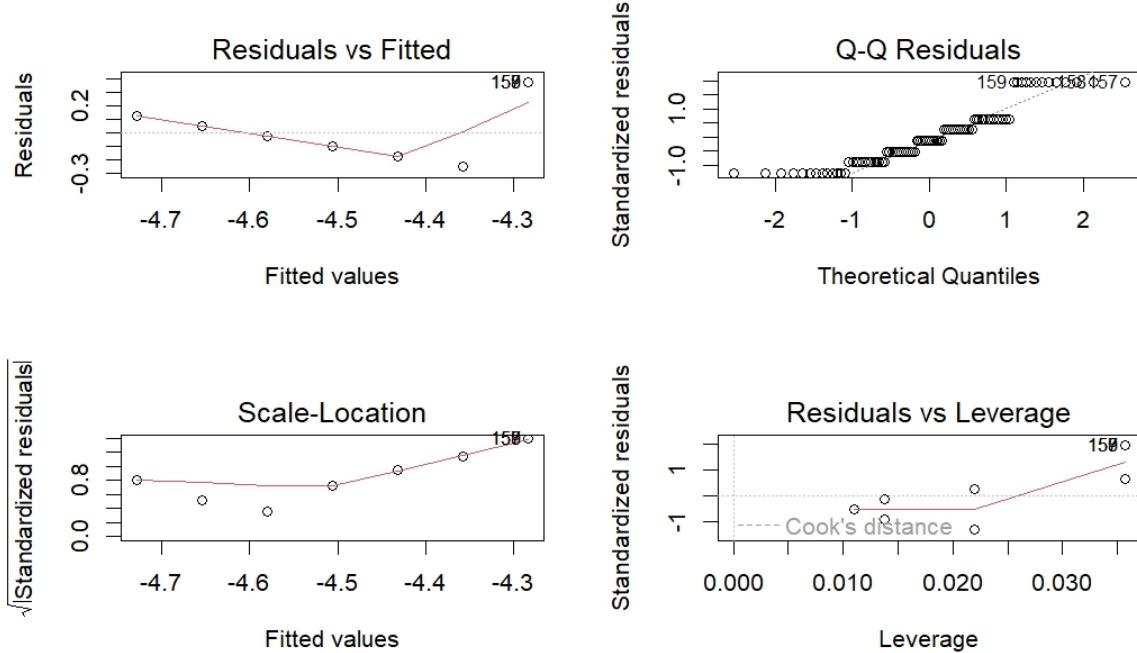
Figura 19 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{99m}Tc



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

As estatísticas descritivas para os fatores de transmissão para as energias relativas ao ^{131}I são tabuladas no Anexo, em tabela 10 para o chumbo, tabela 13 para a amostra

Figura 20 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{99m}Tc



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

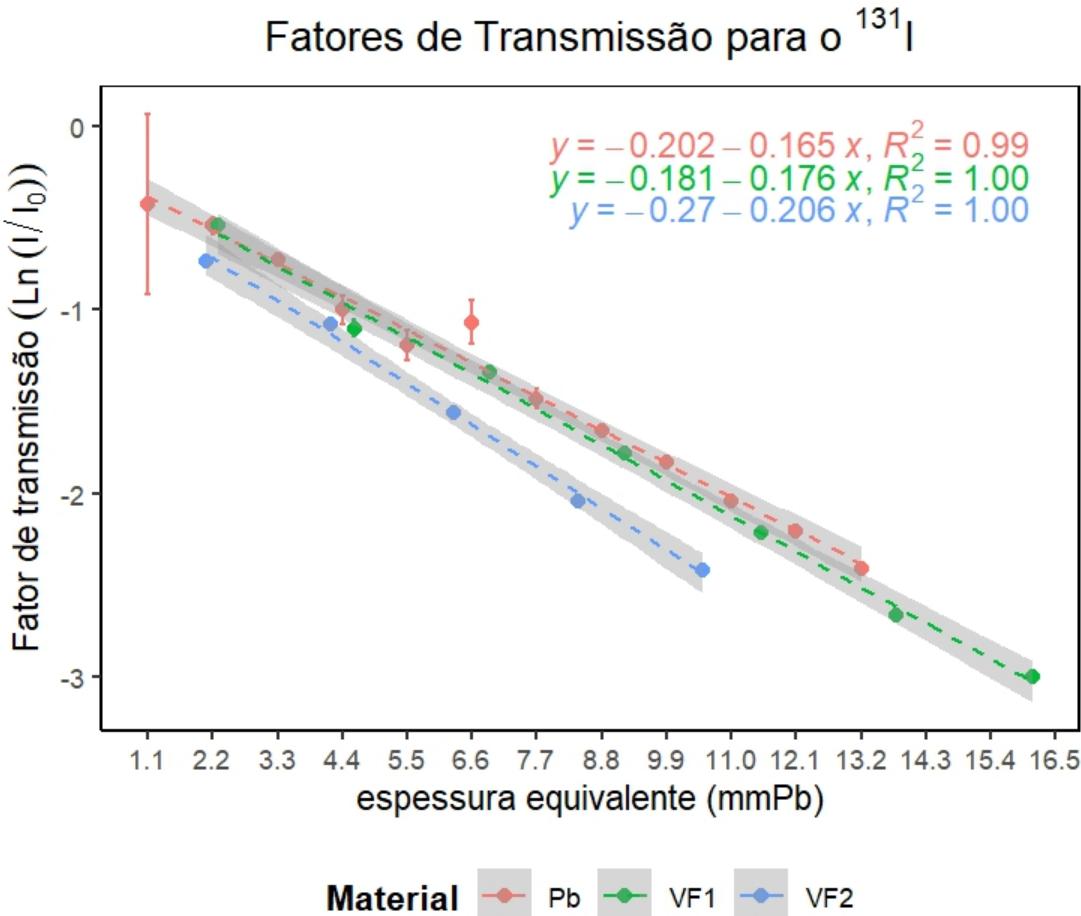
do fornecedor 1 e tabela 16 para a amostra do fornecedor 2. As retas de regressão para os três materiais são apresentadas na figura 21.

Observa-se que existe um maior desvio da reta relacionada à amostra do fornecedor 2 (VF2), tanto com relação ao fornecedor 1 (VF1), quanto para o chumbo. Apesar de as espessuras equivalentes das placas VF2 serem declaradas equivalentes a 2,1 mmPb e as placas VF1 serem declaradas com 2,3 mmPb.

O comportamento desses materiais deveria ser melhor avaliado, através da obtenção de seu coeficiente de atenuação linear, utilizando-se feixe estreito, de forma a que se possa determinar possíveis efeitos de buildup sobre os dados obtidos nesse estudo, que tenham levado tanto o chumbo, quanto VF1 a apresentar um fator de transmissão maior, ainda que as diferenças não sejam grandes, e que possam advir de interferência devidas ao instrumento de medição. Os gráficos de análise de pressupostos para as regressões lineares em todos os casos são apresentados nas figuras 22, 23 e 24 respectivamente para o chumbo (Pb), e as placas de vidro do fornecedor 1 (VF1) e do fornecedor 2 (VF2).

Finalmente, as estatísticas descritivas relativas ao radionuclídeo ^{18}F são apresenta-

Figura 21 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{131}I



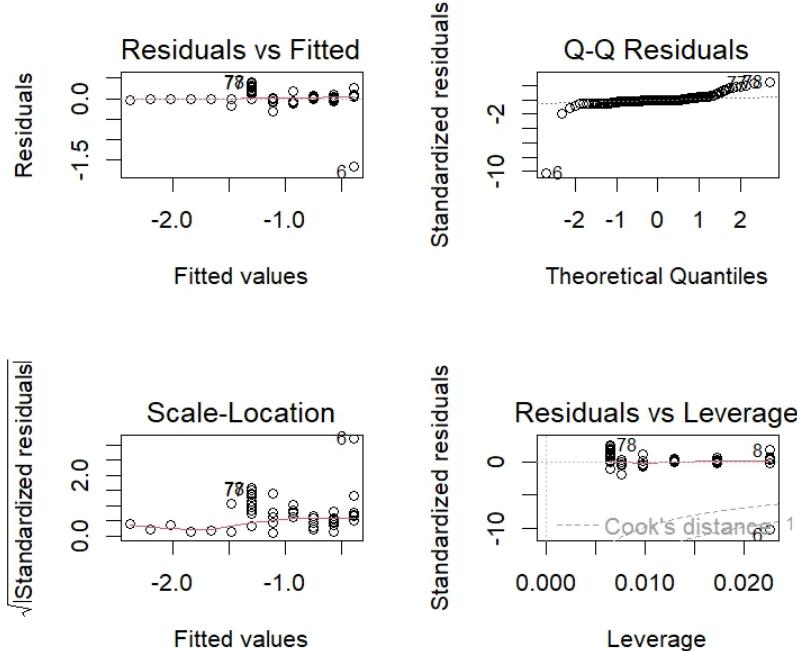
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

das nas tabelas 11, 14 e 17 do Anexo. O comportamento dos coeficientes de transmissão indica haver uma capacidade semelhante para ambas as amostras VF1 e VF2, ao passo que a reta de regressão (figura 25) apresenta maior distanciamento do chumbo para espessuras acima de 5.0 mm.

Ainda que Hoff e Costa [69] afirmem que existem poucas diferenças para os fatores de transmissão para o chumbo, seja para boa geometria de feixe (feixe estreito) ou para geometrias de feixe largo, o comportamento apresentado na amostra, demonstrou que ainda que o coeficiente de determinação da regressão tenha sido alto, existe um desvio das médias acima de 8,5 mm. Esse desvio poderia ser creditado ao fenômeno de buildup, em contraposição ao afirmado por Hoff e Costa [69].

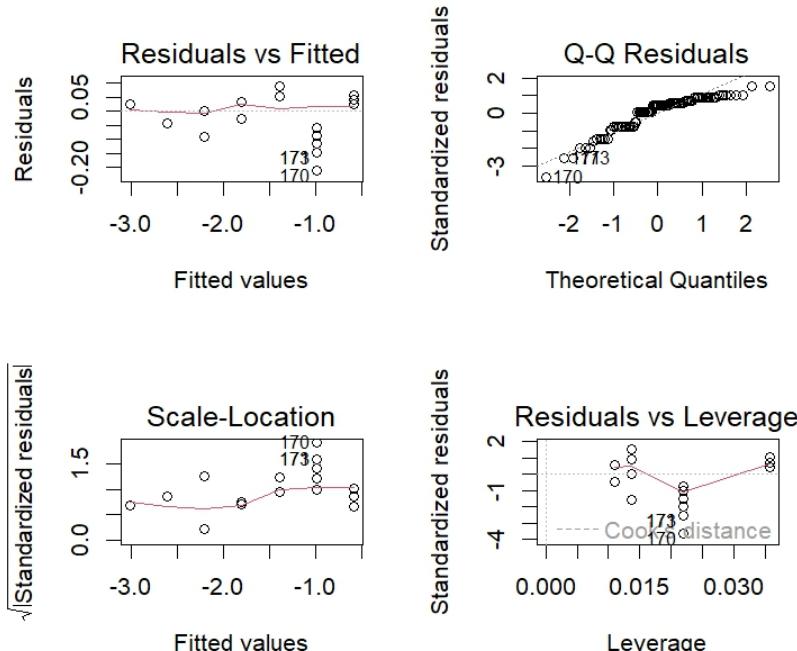
Contudo, na composição das placas de chumbo pode haver a presença de outros metais, o que pode ocasionar num maior efeito de buildup. Como exemplo, podemos citar

Figura 22 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{131}I



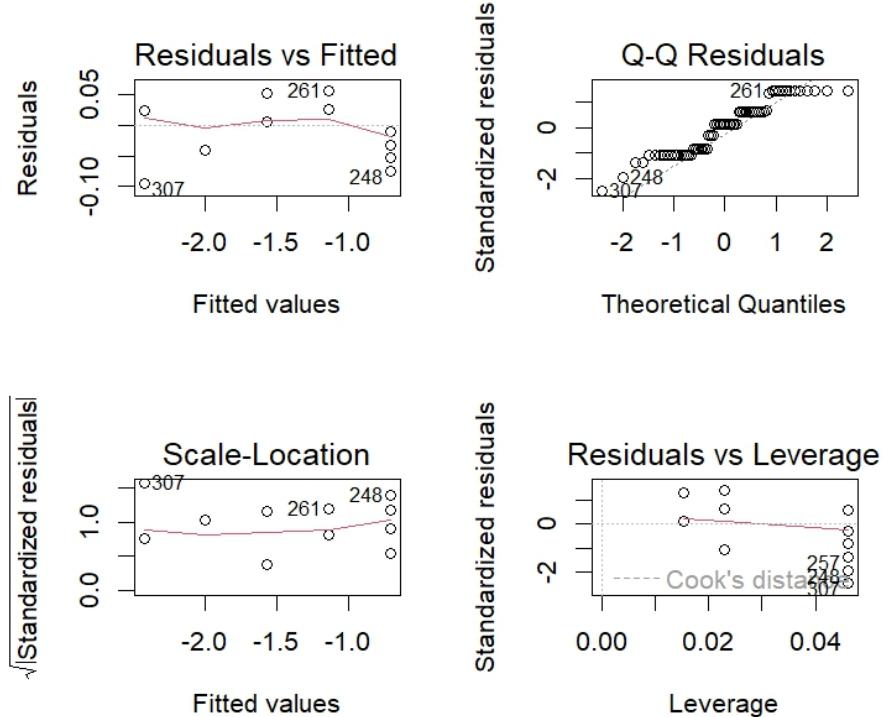
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 23 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{131}I



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 24 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 2 para ^{131}I



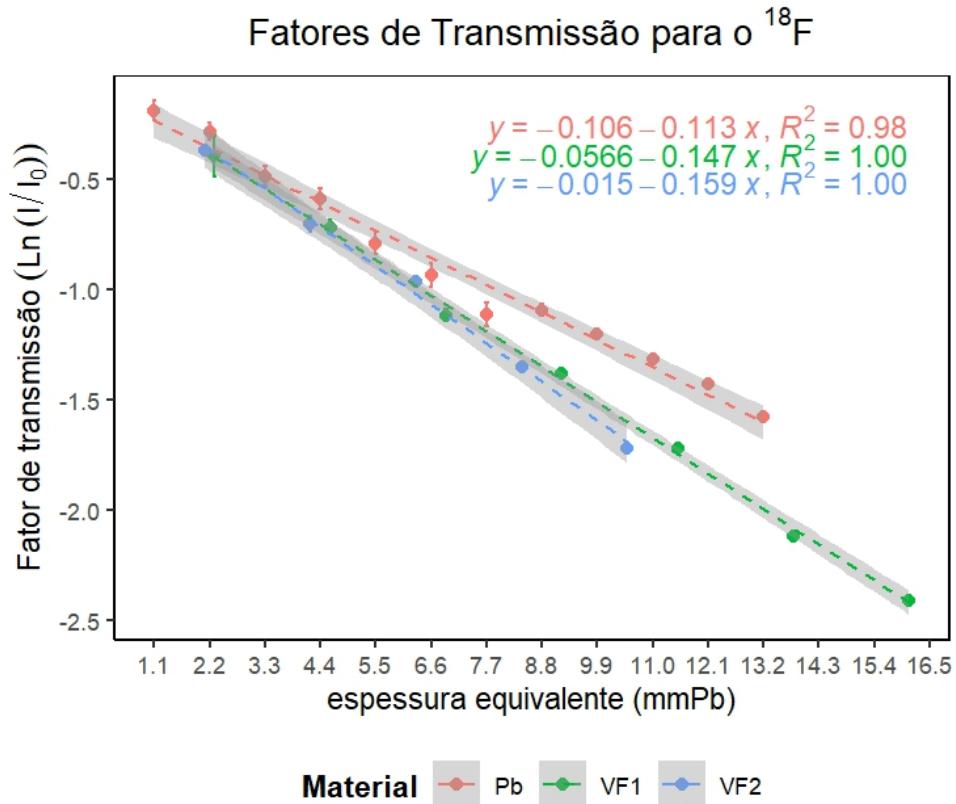
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

que o aço apresenta uma grande diferença de comportamento em condições de feixe largo e estreito, para espessuras a partir de 5 mm [69]. Seria desejável a realização de uma análise metalúrgica para a determinação das corretas frações de chumbo e outros metais pesados como o ferro, ou mesmo a presença de aço na liga de composição das placas.

Os resultados obtidos indicam que as amostras de vidro apresentam o comportamento esperado para a blindagem das radiações. Contudo, um estudo mais apurado sobre as condições de feixe estreito seria desejável, de forma a que se pudesse obter o coeficiente de atenuação linear de ambos os materiais. O conhecimento do coeficiente de atenuação linear para os referidos materiais permitiria a determinação mais apurada dos efeitos de buildup para as condições aqui estudadas.

Visto que a composição química tanto das placas de chumbo, quanto das amostras de vidro de ambos os fornecedores é desconhecida, não foi possível estimar teoricamente os referidos coeficientes por intermédio das tabelas do National Institute of Standards and Technology (NIST), ou com o uso de programas, tais como o XCOM

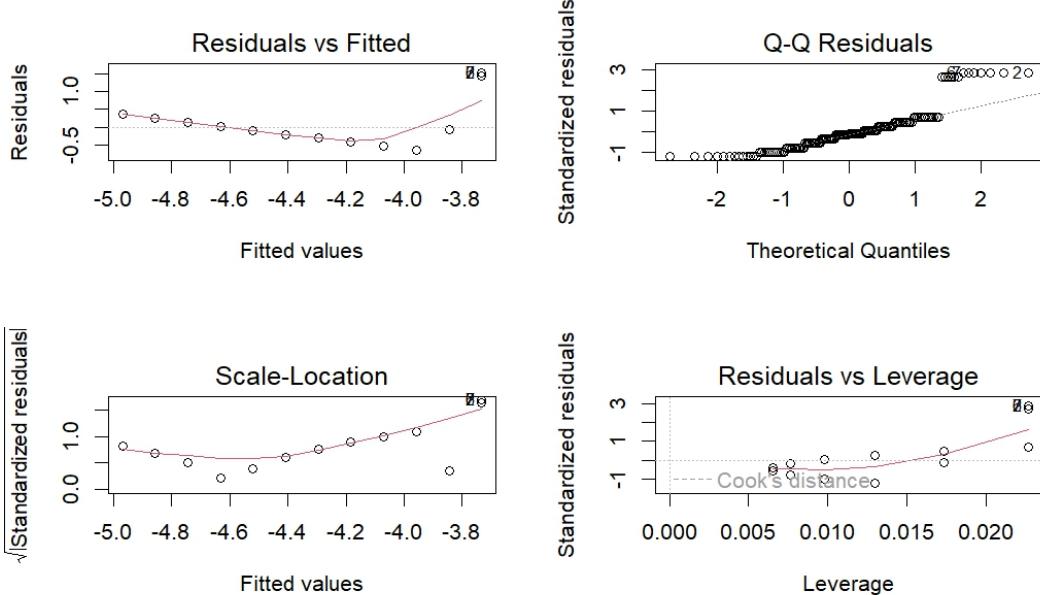
Figura 25 – Curva de regressão linear para os diferentes materiais, para radionuclídeo ^{18}F



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

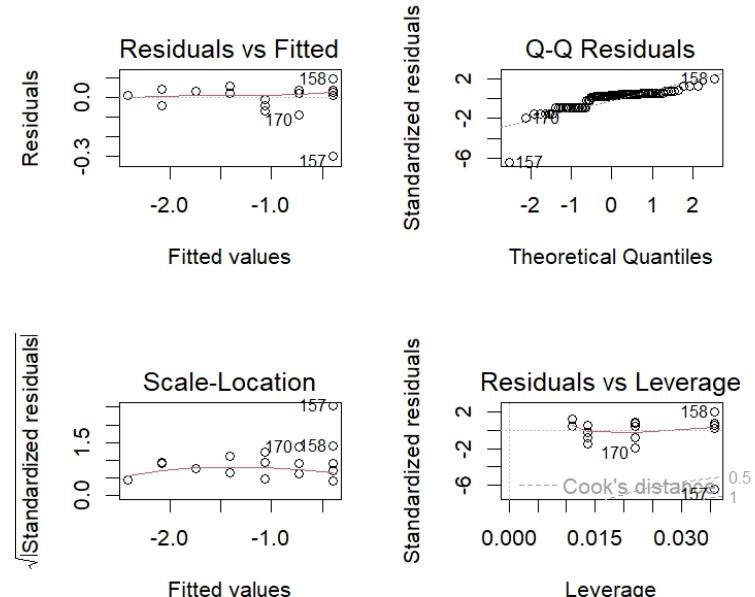
(<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>) ou o Rad Pro Calculator (<http://www.radprocalculator.com/>),

Figura 26 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de chumbo para ^{18}F



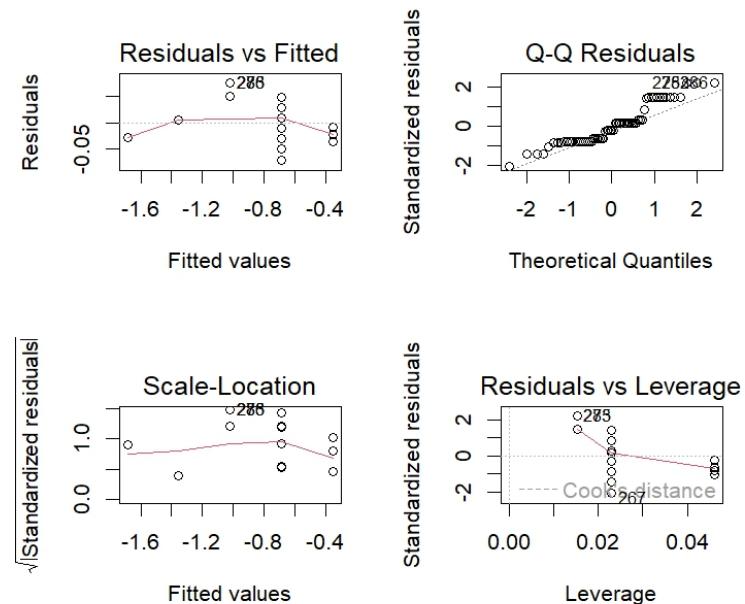
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 27 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 1 para ^{18}F



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Figura 28 – Resultados da análise de pressupostos para a aplicação da regressão linear para as placas de vidro do fornecedor 2 para ^{18}F



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

6. Conclusão

Os resultados obtidos nesse estudo demonstram que de forma geral os visores tanto do fornecedor 1, como do fornecedor 2, possuem um poder de atenuação da radiação ionizante compatível com suas equivalências em chumbo, para as faixas de energia de interesse em medicina nuclear. Os resultados indicam haver uma disparidade entre as equivalências em mmPb apresentadas entre os fornecedores, com os fatores de transmissão da amostra do fornecedor 2 serem inferiores aos da amostra do fornecedor 1, ao passo que a espessura equivalente (mmPb) declarada pelo fornecedor 1 é maior do que a declarada pelo fornecedor 2. Futuras avaliações sob o ponto de vista metalúrgico ou experimental envolvendo feixes estreitos são desejáveis de forma a melhor avaliar o comportamento das amostras, tanto de chumbo, quanto dos vidros avaliados, de forma a se propiciar um melhor entendimento do comportamento de tais materiais.

Referências

- 1 CARLSON, S. A glance at the history of nuclear medicine. **Acta oncologica**, Taylor & Francis, v. 34, n. 8, p. 1095–1102, 1995.
- 2 CICONE, F.; LOHMANN, P. “Nuclear medicine in cancer diagnosis”. v. 9. [S.l.]: Frontiers Media SA, 2022. P. 1035994.
- 3 DANIELS, G. H.; ROSS, D. S. Radioactive iodine: a living history. **Thyroid**, Mary Ann Liebert, Inc., publishers 140 Huguenot Street, 3rd Floor New . . ., v. 33, n. 6, p. 666–673, 2023.
- 4 HOEFNAGEL, C. A. Radionuclide therapy revisited. **European journal of nuclear medicine**, Springer, v. 18, p. 408–431, 1991.
- 5 FAHEY, F. H.; GRANT, F. D. **Celebrating eighty years of radionuclide therapy and the work of Saul Hertz**. v. 22. [S.l.]: Wiley Online Library, 2021. P. 4–10.
- 6 BURKETT, B. J. et al. A review of theranostics: perspectives on emerging approaches and clinical advancements. **Radiology: Imaging Cancer**, Radiological Society of North America, v. 5, n. 4, e220157, 2023.
- 7 KWEKKEBOOM, D. J. et al. Treatment with the radiolabeled somatostatin analog [177Lu-DOTA0, Tyr3] octreotate: toxicity, efficacy, and survival. **Journal of Clinical Oncology**, American Society of Clinical Oncology, v. 26, n. 13, p. 2124–2130, 2008.
- 8 STROSBERG, J. et al. Phase 3 Trial of ¹⁷⁷Lu-Dotatate for Midgut Neuroendocrine Tumors. **New England Journal of Medicine**, v. 376, n. 2, p. 125–135, 2017. DOI: 10.1056/NEJMoa1607427.
- 9 VAN DER ZWAN, W. A. et al. GEP-NETs UPDATE: radionuclide therapy in neuroendocrine tumors. **European Journal of Endocrinology**, Oxford University Press, v. 172, n. 1, r1–r8, 2015.
- 10 PAPAGIANNOPOLOU, D. Technetium-99m radiochemistry for pharmaceutical applications. **Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals**, Wiley Online Library, v. 60, n. 11, p. 502–520, 2017.

- 11 RICHARDS, P.; TUCKER, W. D.; SRIVASTAVA, S. C. Technetium-99m: an historical perspective. **Int. J. Appl. Radiat. Isot.**;(United Kingdom), v. 33, n. 10, 1982.
- 12 ECKELMAN, W. C. Unparalleled contribution of technetium-99m to medicine over 5 decades. **JACC: Cardiovascular Imaging**, American College of Cardiology Foundation Washington, DC, v. 2, n. 3, p. 364–368, 2009.
- 13 JACOBSON, O.; KIESEWETTER, D. O.; CHEN, X. Fluorine-18 radiochemistry, labeling strategies and synthetic routes. **Bioconjugate chemistry**, ACS Publications, v. 26, n. 1, p. 1–18, 2015.
- 14 L COLE, E. et al. Radiosyntheses using fluorine-18: the art and science of late stage fluorination. **Current topics in medicinal chemistry**, Bentham Science Publishers, v. 14, n. 7, p. 875–900, 2014.
- 15 WALRAND, S.; HESSE, M.; JAMAR, F. Update on novel trends in PET/CT technology and its clinical applications. **The British journal of radiology**, The British Institute of Radiology., v. 91, n. 1081, p. 20160534, 2018.
- 16 KARP, J. S.; FREIFELDER, R. Current and future technological trends in positron emission tomography. **Journal of Neuroimaging**, Wiley Online Library, v. 2, n. 2, p. 102–110, 1992.
- 17 PHELPS, M. E. Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 97, n. 16, p. 9226–9233, 2000.
- 18 NUTT, R. The history of positron emission tomography. **Molecular Imaging & Biology**, Elsevier, v. 4, n. 1, p. 11–26, 2002.
- 19 AL-JUBEH, W.; SHAHEEN, A.; ZALLOUM, O. Radioiodine I-131 for diagnosing and treatment of thyroid diseases. **Conference paper**, 2012.
- 20 ROBBINS, R. J.; SCHLUMBERGER, M. J. The evolving role of 131I for the treatment of differentiated thyroid carcinoma. **Journal of Nuclear Medicine**, Soc Nuclear Med, v. 46, 1 suppl, 28s–37s, 2005.

- 21 SALVATORI, M.; LUCIGNANI, G. Radiation exposure, protection and risk from nuclear medicine procedures. **European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging**, v. 37, p. 1225–1231, 6 2010. ISSN 1619-7089. DOI: 10.1007/s00259-010-1474-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00259-010-1474-5>>.
- 22 TSUDA, K. et al. The evaluation of the radiation shielding ability of lead glass. In: 12. International congress of the International Radiation Protection Association (IRPA): Strengthening radiation protection worldwide. Buenos Aires, AR: Sociedad Argentina de Radioprotección (SAR), out. 2008. Disponível em: <<https://inis.iaea.org/records/41tqf-dqw68>>.
- 23 KURUDIREK, M. et al. Effect of Bi₂O₃ on gamma ray shielding and structural properties of borosilicate glasses recycled from high pressure sodium lamp glass. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 745, p. 355–364, 2018. ISSN 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.158>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838818306030>>.
- 24 WALY, E.-S. A.; FUSCO, M. A.; BOURHAM, M. A. Gamma-ray mass attenuation coefficient and half value layer factor of some oxide glass shielding materials. **Annals of Nuclear Energy**, v. 96, p. 26–30, 2016. ISSN 0306-4549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.05.028>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454916303395>>.
- 25 KAUR, P.; SINGH, D.; SINGH, T. Heavy metal oxide glasses as gamma rays shielding material. **Nuclear Engineering and Design**, v. 307, p. 364–376, 2016. ISSN 0029-5493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.07.029>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549316302539>>.
- 26 RAJARAMAKRISHNA, R.; KAEWKHAO, J. Glass material and their advanced applications. **KnE Social Sciences**, v. 3, n. 18, p. 796–807, jul. 2019. DOI: 10.18502/kss.v3i18.4769. Disponível em: <<https://knepublishing.com/index.php/KnE-Social/article/view/4769>>.

- 27 ASADI, A.; HOSSEINI, S. A. Investigation of the gamma-ray shielding performance of the B₂O₃-Bi₂O₃-ZnO-Li₂O glasses based on the Monte Carlo approach. **Radiation Physics and Chemistry**, Elsevier, v. 189, p. 109784, 2021.
- 28 ISSA, S. A. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO-BaO-B₂O₃ glass system. **Radiation Physics and Chemistry**, Elsevier, v. 120, p. 33–37, 2016.
- 29 AL-HADEETHI, Y.; TIJANI, S. The use of lead-free transparent 50 BaO-(50-x) borosilicate-xBi₂O₃ glass system as radiation shields in nuclear medicine. **Journal of Alloys and Compounds**, Elsevier, v. 803, p. 625–630, 2019.
- 30 SINGH, K. et al. Gamma-ray shielding and structural properties of PbO-SiO₂ glasses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, Elsevier, v. 266, n. 6, p. 944–948, 2008.
- 31 KUMAR, A. et al. Tailoring bismuth borate glasses by incorporating PbO/GeO₂ for protection against nuclear radiation. **Scientific reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 11, n. 1, p. 7784, 2021.
- 32 BEN KACEM, I. et al. Structure and properties of lead silicate glasses and melts. **Chemical Geology**, v. 461, p. 104–114, 2017. 10th Silicate Melt Workshop. ISSN 0009-2541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.03.030>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254117301717>>.
- 33 SRIWUNKUM, C.; NUTARO, T. Study on gamma-ray shielding properties of lead tellurite glass systems using PHITS. **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, v. 1380, n. 1, p. 012138, nov. 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1380/1/012138](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012138). Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012138>>.
- 34 ZUBAIR, M. et al. Operator Protection from Gamma Rays Using Ordinary Glass and Glass Doped with Nanoparticles. **Sustainability**, v. 15, n. 2, 2023. ISSN 2071-1050. DOI: [10.3390/su15021375](https://doi.org/10.3390/su15021375). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1375>>.

- 35 ALFADHLI, S. et al. Gamma ray interaction studies of the PbCl₂–SnCl₂–P2O₅ bioactive glass system for applications in nuclear medicine. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 57, p. 635–642, 2 2021. ISSN 2510-1579. DOI: 10.1007/s41779-021-00564-7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41779-021-00564-7>>.
- 36 NATHURAM, R. Radiation shielding application of lead glass. **Journal of Medical Physics**, v. 42, suppl. 1, p. 147–148, 2017.
- 37 AL AAMRI, M.; RAVICHANDRAN, R.; NAIMA, A. B. Radioactive iodine (I-131) therapy isolation rooms: Introduction of lead glass window on the wall for patient comfort and better ambience. **World Journal of Nuclear Medicine**, Thieme Medical e Scientific Publishers Pvt. Ltd., v. 18, p. 42–44, 01 2019. ISSN 1450-1147. DOI: 10.4103/wjnm.WJNM_18_18. Disponível em: <http://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.4103/wjnm.WJNM_18_18>.
- 38 UGARTE, L. et al. Radiation exposure assessment of tungsten vial shields vs. lead glass vial shields. **Journal of Nuclear Medicine**, Society of Nuclear Medicine, v. 59, supplement 1, p. 2159–2159, 2018. ISSN 0161-5505. eprint: <https://jnm.snmjournals.org/content>. Disponível em: <https://jnm.snmjournals.org/content/59/supplement_1/2159>.
- 39 MCCREADY, V. R. Milestones in nuclear medicine. **European Journal of Nuclear Medicine**, v. 27, s049–s079, 1 2000. ISSN 1619-7089. DOI: 10.1007/s002590050518. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s002590050518>>.
- 40 HARPER, P. V. et al. Technetium 99m as a Scanning Agent. **Radiology**, v. 85, n. 1, p. 101–109, 1965. PMID: 14303054. DOI: 10.1148/85.1.101. eprint: <https://doi.org/10.1148/85.1.101>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1148/85.1.101>>.
- 41 RIONDATO, M. et al. Oldie but Goodie: Is Technetium-99m Still a Treasure Trove of Innovation for Medicine? A Patents Analysis (2000–2022). **Journal of Medicinal Chemistry**, American Chemical Society, v. 66, p. 4532–4547, 7 abr. 2023. doi: 10.1021/acs.jmedchem.3c00148. ISSN 0022-2623. DOI:

- 10.1021/acs.jmedchem.3c00148. Disponível em:
[<https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c00148>](https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c00148).
- 42 GURIN, A. et al. Analysis of molybdenum-99 production at the WWR-K research reactor. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 333, p. 1719–1724, 4 2024. ISSN 1588-2780. DOI: 10.1007/s10967-024-09410-z.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10967-024-09410-z>>.
- 43 WYSZOMIRSKA, A. Iodine-131 for therapy of thyroid diseases. Physical and biological basis. **Nuclear Medicine Review**, v. 15, n. 2, p. 120–123, 2012. ISSN 1644-4345. Disponível em: <[https://journals.viamedica.pl/nuclear_medicine_review/article/view/19586](http://journals.viamedica.pl/nuclear_medicine_review/article/view/19586)>.
- 44 EVANS-AXELSSON, S. et al. Radioimmunotherapy for Prostate Cancer—Current Status and Future Possibilities. **Seminars in Nuclear Medicine**, v. 46, n. 2, p. 165–179, 2016. Radiolabeled Agents in Cancer Therapy (Part I). ISSN 0001-2998. DOI: <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2015.10.005>. Disponível em:
<[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299815001282](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299815001282)>.
- 45 STAROVOITOVA, V. Radioisotopes. In: KIRK-OTHMER Encyclopedia of Chemical Technology. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. P. 1–42. ISBN 9780471238966. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471238961.1801040908051213.a01.pub3>. eprint:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0471238961.1801040908051213.a01.pub3>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471238961.1801040908051213.a01.pub3>>.
- 46 LIVINGSTON, M. S. The Cyclotron. I. **Journal of Applied Physics**, v. 15, n. 1, p. 2–19, jan. 1944. ISSN 0021-8979. DOI: 10.1063/1.1707364. eprint: [https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/15/1/2/18305888/2_1_online.pdf](http://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/15/1/2/18305888/2_1_online.pdf).
Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1707364>>.
- 47 SAHA, G. B.; MACINTYRE, W. J.; GO, R. T. Cyclotrons and positron emission tomography radiopharmaceuticals for clinical imaging. **Seminars in Nuclear Medicine**, v. 22, n. 3, p. 150–161, 1992. Positron Emission Tomography: Part I. ISSN 0001-2998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(05\)80143-6](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(05)80143-6).

- Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299805801436>>.
- 48 ESPALLARDO, I. T. PET/CT: underlying physics, instrumentation, and advances. **Radiologia**, v. 59, p. 431–445, 5 2017. ISSN 0033-8338. DOI: 10.1016/j.rx.2016.10.010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rx.2016.10.010>>.
- 49 SCHAART, D. R. Physics and technology of time-of-flight PET detectors. **Physics in Medicine & Biology**, IOP Publishing, v. 66, 09tr01, 9 abr. 2021. DOI: 10.1088/1361-6560/abee56. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/abee56>>.
- 50 BERGERON, D. E. et al. A Review of NIST Primary Activity Standards for 18F: 1982 to 2013. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 119, p. 371–396, 2014. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14316766>>.
- 51 CNEN. **Norma NN 3.01 - Requisitos básicos de radioproteção e segurança de fontes de radiação**. Brasil, 2024.
- 52 HENDEE, W. R.; MARC EDWARDS, F. ALARA and an integrated approach to radiation protection. **Seminars in Nuclear Medicine**, v. 16, n. 2, p. 142–150, 1986. Nuclear Medicine and the Environment—Part I. ISSN 0001-2998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(86\)80027-7](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(86)80027-7). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001299886800277>>.
- 53 BOICE JOHN, J. et al. Evolution of radiation protection for medical workers. **British Journal of Radiology**, v. 93, n. 1112, p. 20200282, jul. 2020. ISSN 0007-1285. DOI: 10.1259/bjr.20200282. eprint: <https://academic.oup.com/bjr/article-pdf/93/1112/20200282/57378358/bjr.20200282.pdf>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1259/bjr.20200282>>.
- 54 TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10a. revisão. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto de Radioproteção e Dosimetria/Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014.

- 55 DANCE, D. R. et al. **Diagnostic Radiology Physics**. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2014. (Non-serial Publications). ISBN 978-92-0-131010-1. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/8841/diagnostic-radiology-physics>>.
- 56 MURTY, R. C. Effective Atomic Numbers of Heterogeneous Materials. **Nature**, v. 207, p. 398–399, 4995 1965. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/207398a0. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/207398a0>>.
- 57 BOOTJOMCHAI, C. et al. Gamma-ray shielding and structural properties of barium–bismuth–borosilicate glasses. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 81, n. 7, p. 785–790, 2012. ISSN 0969-806X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.01.049>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X12001296>>.
- 58 AL-BURIAHI, M. S. et al. Effects of reducing PbO content on the elastic and radiation attenuation properties of germanate glasses: a new non-toxic candidate for shielding applications. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 32, p. 15080–15094, 11 2021. ISSN 1573-482X. DOI: 10.1007/s10854-021-06060-9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10854-021-06060-9>>.
- 59 HARIMA, Y. An historical review and current status of buildup factor calculations and applications. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 41, n. 4, p. 631–672, 1993. ISSN 0969-806X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90317-N](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90317-N). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0969806X9390317N>>.
- 60 BASU, P.; SARANGAPANI, R.; VENKATRAMAN, B. An improvement to the Kalos' formula for double layer gamma ray exposure buildup factors for shielding materials of nuclear and radiological facilities. **Annals of Nuclear Energy**, v. 151, p. 107944, 2021. ISSN 0306-4549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107944>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030645492030640X>>.
- 61 SHARMA, A. et al. Simulation of shielding parameters for TeO₂-WO₃-GeO₂ glasses using FLUKA code. **Results in Physics**, v. 13, p. 102199, 2019. ISSN 2211-3797.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102199>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379719305650>>.
- 62 ŞEN BAYKAL, D.; TEKİN, H. O.; ÇAKIRLI MUTLU, R. B. An Investigation on Radiation Shielding Properties of Borosilicate Glass Systems. **International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering**, v. 7, n. 2, p. 99–108, jul. 2021. Disponível em: <<https://www.ijcesen.com/index.php/ijcesen/article/view/154>>.
- 63 VADAVATHI, A. M. et al. Physical properties and gamma radiation shielding capability of highly dense binary bismuth borate glasses. **Ceramics International**, v. 47, 7, Part A, p. 9791–9805, 2021. ISSN 0272-8842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.120>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220337214>>.
- 64 CNEN. **Norma CNEN NN 3.05 - Requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de medicina nuclear**. Brasil, 2013.
- 65 R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2024. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- 66 RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston, MA, 2020. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>.
- 67 LEVINE, D. M.; STEPHAN, D. F. Estatística: teoria e aplicações: Usando o Microsoft Excel em Portugês. In: 7.ed. -. Rio de Janeiro : LTC, 2016. Regressão Linear Simples.
- 68 MANOHARA, S. R. et al. Exposure buildup factors for heavy metal oxide glass: A radiation shield. **Journal of the Korean Physical Society**, v. 59, p. 2039–2042, 2011. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12079249>>.
- 69 HOFF, G.; COSTA, P. R. A comparative study for different shielding material composition and beam geometry applied to PET facilities: simulated transmission curves. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, SBEB - Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica, v. 29, n. 1, p. 86–96, jan. 2013. ISSN 1517-3151. DOI: 10.4322/rbeb.2013.006. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/rbeb.2013.006>>.

- 70 AL-BURIAHI, M. S.; TONGUC, B. T. Study on gamma-ray buildup factors of bismuth borate glasses. **Applied Physics A**, v. 125, p. 482, 7 2019. ISSN 1432-0630. DOI: 10.1007/s00339-019-2777-4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00339-019-2777-4>>.

Anexo I Análises Estatísticas

Tabela 2 – Estatísticas descritivas das espessuras das placas de chumbo

Placa	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Erro Padrão
P01	10	1,06	0,03	1,04	1,14	1,04	1,06	1,06	0,10	1,81	2,26	0,01
P02	10	1,12	0,05	1,06	1,23	1,08	1,12	1,14	0,17	0,57	-0,93	0,02
P03	10	1,08	0,02	1,06	1,11	1,06	1,07	1,10	0,05	0,56	-1,54	0,01
P04	10	1,10	0,05	1,06	1,23	1,08	1,08	1,10	0,17	1,57	1,31	0,02
P05	10	1,11	0,03	1,07	1,15	1,08	1,11	1,14	0,08	0,00	-1,84	0,01
P06	10	1,10	0,03	1,08	1,15	1,08	1,09	1,12	0,07	0,62	-1,23	0,01
P07	10	1,09	0,02	1,07	1,11	1,07	1,08	1,10	0,04	0,31	-1,69	0,01
P08	10	1,09	0,04	1,06	1,19	1,06	1,08	1,10	0,13	1,10	-0,21	0,01
P09	10	1,07	0,03	1,01	1,11	1,06	1,07	1,09	0,10	-0,66	-0,23	0,01
P10	10	1,09	0,02	1,07	1,12	1,07	1,09	1,10	0,05	0,30	-1,48	0,01
P11	10	1,13	0,05	1,08	1,26	1,10	1,13	1,15	0,18	1,24	0,83	0,02
P12	10	1,08	0,02	1,06	1,11	1,07	1,07	1,09	0,05	0,76	-0,65	0,00

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 3 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo individuais para o ^{99m}Tc

Placa	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Ero Padrão	
												Padrão	Padrão
P01	13	0,09	0,003	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,01	-0,28	-1,68	0,0009
P02	13	0,10	0,002	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,01	-0,24	-1,47	0,0006
P03	13	0,10	0,003	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	-1,37	0,0007
P04	13	0,09	0,003	0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,01	-1,10	-0,13	0,0008
P05	13	0,09	0,002	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,01	1,78	3,04	0,0005
P06	13	0,10	0,005	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,01	0,35	-1,52	0,0013
P07	13	0,09	0,003	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00	-0,10	-1,54	0,0008
P08	13	0,10	0,002	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,01	0,39	-0,34	0,0007
P09	13	0,09	0,002	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,01	0,47	-1,03	0,0007
P10	13	0,10	0,004	0,09	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,02	0,34	-1,60	0,0012
P11	13	0,10	0,001	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	0,66	-0,65	0,0003
P12	13	0,10	0,002	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,62	-0,59	0,0004

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 4 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo individuais para o ^{131}I

Placa	<i>n</i>	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Erro Padrão	
												Padrão	Padrão
P01	13	0,75	0,031	0,66	0,77	0,75	0,77	0,77	0,11	-2,12	3,76	0,0085	
P02	13	0,77	0,002	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,00	0,24	-1,52	0,0007	
P03	13	0,75	0,005	0,75	0,76	0,75	0,75	0,76	0,01	0,12	-1,22	0,0014	
P04	13	0,75	0,015	0,72	0,76	0,75	0,76	0,76	0,04	-1,46	0,66	0,0040	
P05	13	0,76	0,012	0,75	0,78	0,75	0,75	0,76	0,03	0,94	-0,65	0,0033	
P06	13	0,73	0,008	0,72	0,74	0,72	0,73	0,74	0,02	0,05	-1,66	0,0021	
P07	13	0,76	0,005	0,75	0,77	0,76	0,76	0,76	0,02	0,49	-0,57	0,0014	
P08	13	0,71	0,018	0,67	0,73	0,70	0,72	0,73	0,06	-0,82	-0,62	0,0051	
P09	13	0,75	0,005	0,75	0,76	0,75	0,75	0,76	0,02	0,15	-0,88	0,0014	
P10	13	0,75	0,011	0,73	0,77	0,75	0,75	0,76	0,04	-0,35	-0,54	0,0031	
P11	13	0,76	0,008	0,74	0,77	0,76	0,76	0,76	0,03	-0,78	-0,02	0,0021	
P12	13	0,76	0,001	0,76	0,77	0,76	0,76	0,76	0,01	1,70	0,99	0,0003	

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 5 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo individuais para o ^{18}F

Placa	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Ero		
												Padrão	Padrão	
P01	13	0,86	0,007	0,84	0,87	0,86	0,86	0,87	0,03	-1,45	0,97	0,0018		
P02	13	0,87	0,004	0,86	0,88	0,87	0,87	0,87	0,02	0,11	-0,37	0,0010		
P03	13	0,87	0,002	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88	0,01	-0,57	-1,07	0,0004		
P04	13	0,86	0,021	0,83	0,90	0,85	0,85	0,86	0,07	1,11	-0,15	0,0059		
P05	13	0,85	0,026	0,83	0,93	0,84	0,84	0,85	0,05	0,10	2,50	5,29	0,0071	
P06	13	0,87	0,003	0,86	0,87	0,87	0,87	0,87	0,01	0,04	-1,27	0,0007		
P07	13	0,87	0,012	0,85	0,88	0,88	0,88	0,88	0,03	-1,44	0,33	0,0034		
P08	13	0,86	0,003	0,85	0,87	0,86	0,86	0,86	0,02	0,68	0,86	0,0009		
P09	13	0,85	0,019	0,84	0,91	0,84	0,84	0,84	0,07	2,67	5,89	0,0052		
P10	13	0,84	0,013	0,81	0,85	0,84	0,85	0,85	0,04	-1,66	1,42	0,0036		
P11	13	0,84	0,013	0,81	0,85	0,84	0,85	0,85	0,04	-1,27	0,18	0,0036		
P12	13	0,86	0,002	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,01	-0,48	-0,66	0,0006		

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 6 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 e F2 individuais para o ^{99m}Tc

Fornecedor n° Amostra	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	3°		Assimetria	Curtose	Erro Padrão
								1°	Quartil			
V1_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-2,46	4,99
V2_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-1,46	0,84
V3_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-1,47	2,91
V4_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-2,56	5,47
V5_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-0,58	1,27
V6_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,73	-0,29
V7_F1	13	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	-0,05	-0,32
V1_F2	13	0,012	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	1,84	2,36
V2_F2	13	0,014	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,84	-0,15
V3_F2	13	0,015	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,33	-0,56
V4_F2	13	0,016	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	1,52	2,43
V5_F2	13	0,018	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	2,17	4,11
											0,0001	

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 7 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 e F2 individuais para o ^{131}I

Fornecedor n° Amostra	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	3°		Assimetria	Curtose	Erro Padrão
								1°	Quartil			
V1_F1	13	0,59	0,017	0,56	0,63	0,58	0,59	0,59	0,59	0,07	0,62	0,75
V2_F1	13	0,60	0,012	0,59	0,63	0,59	0,59	0,60	0,60	0,04	1,30	0,75
V3_F1	13	0,58	0,016	0,53	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,06	-2,01	3,61
V4_F1	13	0,59	0,008	0,58	0,60	0,59	0,59	0,60	0,60	0,02	-0,48	-1,24
V5_F1	13	0,60	0,009	0,58	0,61	0,59	0,60	0,60	0,60	0,03	-0,16	-1,11
V6_F1	13	0,60	0,012	0,58	0,62	0,59	0,59	0,60	0,60	0,04	1,12	-0,02
V7_F1	13	0,60	0,008	0,59	0,62	0,60	0,60	0,60	0,60	0,03	0,66	0,03
V1_F2	13	0,49	0,005	0,48	0,50	0,49	0,49	0,49	0,50	0,02	-0,58	-0,52
V2_F2	13	0,50	0,004	0,50	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,01	-0,60	-1,27
V3_F2	13	0,50	0,004	0,49	0,51	0,50	0,50	0,50	0,50	0,02	-0,15	-0,36
V4_F2	13	0,52	0,005	0,51	0,53	0,51	0,52	0,52	0,52	0,02	0,25	-1,19
V5_F2	13	0,52	0,005	0,51	0,53	0,52	0,53	0,53	0,53	0,02	-0,75	-0,54

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 8 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 e F2 individuais para o ^{18}F

Fornecedor n° Amostra	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Erro Padrão
V2_F1	13	0.68	0.016	0.67	0.73	0.68	0.69	0.69	0.06	1.70	2.68	0.0043
V3_F1	13	0.70	0.024	0.63	0.72	0.70	0.71	0.71	0.09	-1.97	3.24	0.0065
V4_F1	13	0.67	0.025	0.60	0.69	0.68	0.69	0.69	0.09	-1.87	2.68	0.0070
V5_F1	13	0.71	0.038	0.68	0.82	0.69	0.70	0.70	0.14	1.84	2.31	0.0106
V6_F1	13	0.70	0.052	0.66	0.86	0.68	0.69	0.69	0.20	2.42	5.04	0.0143
V7_F1	13	0.71	0.053	0.67	0.88	0.70	0.70	0.70	0.21	2.64	5.86	0.0147
V1_F2	13	0.72	0.020	0.70	0.78	0.71	0.71	0.72	0.08	2.31	4.69	0.0054
V2_F2	13	0.66	0.010	0.64	0.67	0.66	0.67	0.67	0.03	-1.43	0.70	0.0027
V3_F2	13	0.67	0.027	0.59	0.68	0.67	0.68	0.68	0.09	-1.72	1.87	0.0076
V4_F2	13	0.68	0.020	0.62	0.70	0.68	0.69	0.69	0.08	-1.73	2.43	0.0056
V5_F2	13	0.70	0.031	0.68	0.80	0.69	0.69	0.69	0.12	2.54	5.38	0.0087
V6_F2	13	0.73	0.040	0.71	0.86	0.71	0.72	0.72	0.15	2.66	5.86	0.0111

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo combinadas para o ^{99m}Tc

Espessura (mm)	n	Média	Desv. Padrão	1°				3°				Curtose	Erro Padrão
				Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	Quartil	Amplitude	Assimetria	Curtose		
0	13	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	-	-	0.0000	
1.1	13	0.105	0.003	0.098	0.110	0.104	0.105	0.107	0.010	-1.55	2.33	0.0007	
2.2	13	0.020	0.000	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.000	2.12	3.23	0.0001	
3.3	13	0.011	0.000	0.011	0.010	0.011	0.011	0.011	0.000	-0.72	-0.62	0.0000	
4.4	13	0.011	0.000	0.011	0.010	0.011	0.011	0.011	0.000	2.24	4.32	0.0000	
5.5	13	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	0.55	-0.21	0.0000	
6.6	13	0.011	0.000	0.011	0.010	0.011	0.011	0.011	0.000	0.33	-0.98	0.0000	
7.7	13	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	2.51	5.31	0.0000	
8.8	13	0.009	0.000	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009	0.000	1.23	0.22	0.0000	
9.9	13	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	-0.90	0.34	0.0000	
11	13	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	1.39	1.40	0.0000	
12.1	13	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000	-0.15	-0.64	0.0000	
13.2	13	0.009	0.000	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009	0.000	0.57	-0.40	0.0000	

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 10 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo combinadas para o ^{131}I

Espessura (mm)	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Q_3 Quartil	Amplitude	Assimetria	Curtose	Erro Padrão
0	13	1.00	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	-	-	0.000
1.1	13	0.70	0.177	0.13	0.90	0.73	0.74	0.74	0.77	-2.42	5.28	0.049
2.2	13	0.58	0.024	0.54	0.63	0.57	0.59	0.60	0.09	-0.17	-1.13	0.007
3.3	13	0.48	0.011	0.47	0.51	0.48	0.48	0.49	0.04	0.87	0.13	0.003
4.4	13	0.37	0.029	0.35	0.47	0.36	0.36	0.36	0.12	2.71	6.05	0.008
5.5	13	0.30	0.024	0.24	0.34	0.30	0.30	0.31	0.10	-1.06	1.88	0.007
6.6	13	0.35	0.041	0.27	0.41	0.32	0.34	0.37	0.14	-0.07	-1.30	0.011
7.7	13	0.23	0.010	0.19	0.23	0.23	0.23	0.23	0.04	-2.76	6.23	0.003
8.8	13	0.19	0.001	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	-0.71	-0.64	0.000
9.9	13	0.16	0.000	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	-1.00	1.15	0.000
11	13	0.13	0.001	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	-2.50	5.23	0.000
12.1	13	0.11	0.000	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	1.51	2.29	0.000
13.2	13	0.09	0.001	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	-2.22	4.30	0.000

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 11 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão das placas de chumbo combinadas para o ^{18}F

Espessura (mm)	n	Média	Desv. Padrão	1°				3°				Curtose	Erro Padrão
				Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	Quartil	Amplitude	Assimetria	Curtose		
0	13	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	-	0.0000	
1.1	13	0.83	0.04	0.72	0.85	0.83	0.84	0.85	0.13	-2.26	4.29	0.0099	
2.2	13	0.76	0.03	0.74	0.85	0.74	0.75	0.75	0.11	2.55	5.37	0.0081	
3.3	13	0.62	0.02	0.54	0.65	0.62	0.62	0.62	0.11	-2.06	4.40	0.0068	
4.4	13	0.56	0.03	0.51	0.63	0.55	0.56	0.56	0.12	1.30	2.64	0.0069	
5.5	13	0.46	0.02	0.42	0.52	0.44	0.46	0.46	0.10	1.53	2.81	0.0063	
6.6	13	0.39	0.02	0.36	0.45	0.38	0.40	0.40	0.09	1.09	1.64	0.0056	
7.7	13	0.33	0.02	0.30	0.36	0.32	0.33	0.34	0.06	-0.12	-1.50	0.0050	
8.8	13	0.34	0.01	0.33	0.36	0.33	0.33	0.34	0.03	2.10	4.03	0.0021	
9.9	13	0.30	0.00	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.01	-0.76	-0.71	0.0011	
11	13	0.27	0.00	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.01	-1.36	1.20	0.0009	
12.1	13	0.24	0.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.01	1.57	2.36	0.0004	
13.2	13	0.21	0.00	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.01	-0.72	-0.77	0.0004	

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 12 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 combinadas para o ^{99m}Tc

Espessura (mmPb)	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Ero Padrão	
												Padrão	Estatística
0	13	1.00	0.0000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0000	-	-	0.0000	-
2.3	13	0.02	0.0004	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0000	2.64	5.81	0.0001	5.81
4.6	13	0.01	0.0002	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	-2.35	4.57	0.0000	4.57
6.9	13	0.01	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	-1.64	3.45	0.0000	3.45
9.2	13	0.01	0.0002	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	2.31	4.55	0.0001	4.55
11.5	13	0.01	0.0011	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	2.36	4.42	0.0003	4.42
13.8	13	0.01	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	2.68	5.98	0.0000	5.98
16.1	13	0.01	0.0000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000	0.13	-1.06	0.0000	-1.06

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 13 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 combinadas para o ^{131}I

Espessura (mmPb)	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil 1°	Mediana	Quartil 3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Ero Padrão	
												-	-
0	13	1.00	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	-	-	0	0.0021
2.3	13	0.58	0.008	0.57	0.59	0.58	0.58	0.59	0.03	-0.70	0.01	0.0021	0.0036
4.6	13	0.33	0.013	0.30	0.35	0.33	0.34	0.34	0.05	-1.25	0.99	0.0003	-0.22
6.9	13	0.26	0.001	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	0.10	0.63	0.0001	0.63
9.2	13	0.16	0.001	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.01	-0.20	0.20	0.0001	0.63
11.5	13	0.11	0.001	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.01	0.01	0.20	0.0001	0.63
13.8	13	0.07	0.000	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	-2.82	6.44	0.0001	0.0001
16.1	13	0.05	0.000	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	2.54	0.0001	0.0001

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 14 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F1 combinadas para o ^{18}F

Espessura (mmPb)	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	1°		3°		Assimetria	Curtose	Erro Padrão
								1°	3°	Amplitude	Quartil			
0	13	1.00	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	-	0.00
2.3	13	0.68	0.056	0.50	0.74	0.68	0.69	0.69	0.69	0.24	-2.40	5.18	0.02	5.18
4.6	13	0.49	0.015	0.44	0.50	0.49	0.49	0.49	0.49	0.06	-2.40	5.04	0.00	5.04
6.9	13	0.33	0.008	0.32	0.34	0.32	0.33	0.33	0.33	0.02	0.24	-1.52	0.00	-1.52
9.2	13	0.25	0.004	0.25	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.01	1.13	-0.76	0.00	-0.76
11.5	13	0.18	0.001	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	-2.17	3.90	0.00	3.90
13.8	13	0.12	0.001	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	0.87	-0.67	0.00	-0.67
16.1	13	0.09	0.001	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	-0.20	0.63	0.00	0.63

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 15 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F2 combinadas para o ^{99m}Tc

Espessura (mmPb)	n	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	Quartil	Mediana	1°	3°	Amplitude	Assimetria	Curtose	Erro Padrão	
0	13	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	-	-	-	0,0000
2.1	13	0,0116	0,0004	0,0114	0,0114	0,0100	0,0115	0,0115	0,0115	0,0000	2,55	5,35	0,0001	
4.2	13	0,0036	0,0000	0,0035	0,0000	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0000	-0,51	1,54	0,0000	
6.3	13	0,0032	0,0000	0,0032	0,0000	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0000	0,90	-0,76	0,0000	
8.4	13	0,0030	0,0000	0,0030	0,0000	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0000	0,12	-0,95	0,0000	
10.5	13	0,0029	0,0000	0,0028	0,0000	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029	0,0000	0,65	-1,23	0,0000	

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 16 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F2 combinadas para o ^{131}I

Espessura (mmPb)	<i>n</i>	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	1°			3°			Curtose	Erro Padrão
						Quartil	Mediana	Quartil	Amplitude	Assimetria			
0.0	13	1.00	0.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	-	-	0.000
2.1	13	0.48	0.009	0.46	0.49	0.48	0.48	0.48	0.03	-0.78	0.30	0.002	
4.2	13	0.34	0.002	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.01	-0.92	-0.47	0.001	
6.3	13	0.21	0.003	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21	0.01	-1.79	1.86	0.001	
8.4	13	0.13	0.000	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	1.13	-0.76	0.000	
10.5	13	0.09	0.000	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.01	0.12	-0.31	0.000

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 17 – Estatísticas descritivas dos fatores de transmissão dos visores F2 combinadas para o ^{18}F

Espessura (mmPb)	<i>n</i>	Média	Desv. Padrão	Mínimo	Máximo	1° Quartil	Mediana	3°		Assimetria	Curtose	Erro Padrão
								Quartil	Amplitude			
0	13	1,00	0,000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	-	-	0,000
2.1	13	0,69	0,006	0,68	0,70	0,69	0,69	0,70	0,02	-0,24	-0,99	0,0017
4.2	13	0,50	0,018	0,47	0,53	0,48	0,49	0,51	0,06	0,27	-1,27	0,005
6.3	13	0,38	0,004	0,38	0,39	0,38	0,38	0,38	0,01	1,13	-0,76	0,0012
8.4	13	0,26	0,001	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,00	-0,46	-1,15	0,0003
10.5	13	0,18	0,001	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,00	-0,31	-1,23	0,0002

Fonte: Elaborado pela autora (2025)