

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
INSTITUTO DE FÍSICA – INFIS
GRADUAÇÃO EM FÍSICA MÉDICA

José Humberto Lira Pontes

**Desenvolvimento de blindagem para uma pedra
de pechblenda do Laboratório de Ensino em
Física das Radiações da UFU**

UBERLÂNDIA

2021

José Humberto Lira Pontes

**Desenvolvimento de blindagem para uma pedra
pechblenda do Laboratório de Ensino em Física
das Radiações da UFU**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Física da Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito parcial à obtenção
do título de Bacharel em Física Médica

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

UBERLÂNDIA

Junho – 2021

José Humberto Lira Pontes

Desenvolvimento de blindagem para uma pedra pechblenda do Laboratório de Ensino em Física das Radiações da UFU

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Física da Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito parcial a obtenção
do título de Bacharel em Física Médica.

Banca de avaliação:

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves– Orientador

Pâmela Zati Ferreira

Dalila Souza Costa Mendonça

Uberlândia (MG), 18 de Junho de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Aparecida Lira Pontes, por ter combinado tão bem suas palavras e exemplos, ensinando-me desde criança, a sonhar por um mundo melhor, reconhecer minhas fraquezas, direcionar meus esforços, acreditar e perseverar nos objetivos que me motivariam durante a minha existência.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus do meu coração, que me propiciou força física, mental e emocional para iniciar mais esta etapa.

Aos Grandes Mestres da Física, que com grande esforço e dedicação traçaram a estrada que explica, motiva e conduz a novos conhecimentos, propiciando uma vida melhor para a humanidade.

Ao professor-orientador pelo interesse e paciência na discussão dos assuntos tratados e a maneira amigável de me encaminhar no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do Instituto de Física pelos exemplos de dedicação às suas aulas, às quais, tive oportunidade de vivenciar durante esses anos de estudo.

RESUMO

Desde 1565, minerais de pechblenda têm sido empregados na fabricação de cristais e cerâmicas da Bohemia, os quais, devido a atividade radiológica ganham brilho e cor, maravilhando as pessoas por séculos. Isto também chamou a atenção de cientistas que passaram a estudar e entender a radioatividade realizando experiências há várias décadas. Os esforços de Dirac, Compton, Einstein, Rayleigh e outros, sobre a interrelação da matéria e radiação permitiram o controle da energia de átomos, partículas, fótons e partículas subatômicas a favor das necessidades da humanidade.

Por outro lado, os benefícios, malefícios, fatores de importância e riscos exigiram a criação de normas de controle e monitoramento de proteção radiológica por órgãos internacionais e nacionais.

Esta combinação de conhecimentos sobre a radioatividade, Interação da radiação ionizante com a matéria e proteção radiológica possibilitou a construção de reatores nucleares que ajudam em tratamento radioterapêutico de cânceres, geração de eletricidade através de usinas termo nucleares além de equipamentos sofisticados, como por exemplo, o motor Stirling a plutônio que fornece energia para naves na exploração do sistema solar. Todos estes equipamentos têm em comum uma parede que separa o ambiente radioativo das pessoas à sua volta, tornando os resultados positivos superiores aos negativos da radiação e que somados aos cuidados com o meio ambiente levam a humanidade a um novo estado da arte.

Neste TCC2, aplicando conhecimentos adquiridos no curso de Física Médica, foi desenvolvido para a pedra pechblenda uma cápsula para blindagem, a qual, semelhantemente às paredes de um reator nuclear separa uma fonte de energia nuclear natural das pessoas garantindo segurança contra os riscos da radiação.

Palavras chave: Pechblenda, radiação ionizante, interação da radiação ionizante com a matéria, blindagem de radiação, proteção radiológica.

Abstract

Since 1565, pitchblende minerals have been used in the manufacture of Bohemian crystals and ceramics, which, due to radiological activity, gain shine and color, dazzling people for centuries. This has also caught the attention of scientists who began to study and understand radioactivity by carrying out experiments several decades ago. The efforts of Dirac, Compton, Einstein, Rayleigh and others on the interrelation of matter and radiation allowed the energy of atoms, particles, photons and subatomic particles to be controlled in favor of the needs of humanity.

On the other hand, the benefits, harms, factors of importance and risks required the creation of standards for controls and monitoring of radiological protection by international and national bodies.

This combination of knowledge about the radioactivity, Interaction of ionizing radiation with matter and radiological protection enabled the construction of nuclear reactors that help in radiotherapeutic treatment of cancers, electricity generation through thermal nuclear power plants, as well as sophisticated machine, such as the Stirling engine to plutonium that supplies energy for spaceships exploring the solar system. All these equipment have in common a wall that separates the radioactive environment from the people around them, making the positive results superior to the radiation negative ones and which, added to the care for the environment, take humanity to a new state of art.

In this TCC2, applying knowledge acquired in the Medical Physics course, a shielding capsule was developed for a pitchblende stone, which, similarly to the walls of a nuclear reactor, separates a source of natural nuclear energy from people, ensuring safety against radiation risks.

Key words: pitchblende, ionizing radiation, ionizing radiation and matter interaction, radiation shield, radiological protection.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Radiação.....	4
3.2	Radiação ionizante.....	5
3.2.1	<i>Poder de freamento para partículas</i>	6
3.2.2	<i>Atenuação para feixes de raios-X e gama</i>	9
3.3	Grandezas e unidades dosimétricas.....	13
3.3.1	<i>Exposição</i>	13
3.3.2	<i>Dose Absorvida</i>	13
3.4	Grandezas usadas na Proteção Radiológica.....	14
3.4.1	<i>Dose equivalente no tecido ou órgão</i>	14
3.4.2	<i>Dose efetiva</i>	15
3.5	Normas de proteção, monitoração e controle para radiação ionizante..	16
4	MATERIAIS E MÉTODOS	17
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
6	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso pretende mostrar a aplicação dos aprendizados em aulas teóricas e práticas sobre interação da radiação com a matéria, tendo como resultado a blindagem para uma fonte radioativa, originada de uma pedra pechblenda.

Pechblenda é um nome germânico, da área de mineralogia, proveniente da combinação das palavras *pech* + *blende*, sendo *pech* = viscoso, pegajoso e *blende* = falso, enganoso. Foi transcrito para a língua inglesa como *pitchblende*, podendo ser entendido em português como, mistura asfáltica [TU et al, 2017].

Conhecida desde 1565, como uma substância para colorir vidros e cerâmicas na cor amarela esverdeada, a pedra de pechblenda é uma variedade impura de uraninita, uma mistura de vários óxidos, inclusive os de urânio (UO_2 , UO_3 , ThO_2 , CeO_2 , etc). Desse composto é extraído um sal de urânio, conhecido como *yellowcake* que após calcinado se transforma em U_3O_8 ($\text{UO}_2 \cdot 2\text{UO}_3$). Sendo essa a fonte que após vários processos se obtém componentes de urânio viáveis para uso pelo ser humano. Em 1789 o óxido de urânio, confundido como um elemento químico, foi descoberto pelo químico germânico Martin Heinrich Klaproth, que lhe deu o nome *Uranus*. Em 1841, o químico francês Eugène-Melchior Péligot, isolou o urânio puro. Em 1896, o físico francês, Antoine Henri Becquerel, durante pesquisa com chapas fotográficas usando sais de urânio, descobriu a radioatividade. Em 1898, Marie e Pierre Curie processaram amostras de pechblenda, provenientes da mina de *Jáchimstahl* situada na antiga Tchecoslováquia, isolaram o Polônio e o Rádio, o que fez com que em 1903, dividissem o prêmio Nobel com Becquerel [RENÉ et al, 2017].

A pechblenda contém altos teores de substâncias radioativas, como por exemplo os óxidos de urânio, os quais a fazem apresentar atividade radiológica. Veja na Tabela 1, a análise de porcentagem em massa dos compostos em pechblendas.

Tabela 1 – Análise de porcentagem em massa dos compostos em pechblendas.

Substâncias compostas	Pechblenda 1	Pechblenda 2
CaO	0,84	1,00
MnO	0,16	0,09
PbO	0,70	6,39
MgO	-	0,17
(Y, Er) ₂ O ₃	-	traços
La ₂ O ₃	-	traços
Ce ₂ O ₃	0,22	traços
UO ₂	58,51	59,30
UO ₃	25,26	22,33
ThO ₂	-	traços
SiO ₂	2,79	0,50
Al ₂ O ₃	-	0,20
Fe ₂ O ₃	-	0,21
H ₂ O	1,96	3,17
Resíduos	1,92	4,59
Total	99,95	97,95

Pechblenda 1 – Veio próximo a Black Hawk/Gilpin, Colorado – EUA.

Pechblenda 2 - Mina de Johanngeorgestadt, Saxonia- Alemanha.

Fonte – inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/077/23077956.pdf

A descoberta da radioatividade gerou inúmeros benefícios ao ser humano, tais como: extermínio de bactérias e fungos; desinfestação de insetos; medidores de espessuras; radiografia; gamagrafia; radioterapia; braquiterapia; radiologia e outros. Isto fez nascer a necessidade do estabelecimento de medidas de controle e monitoração, regulamentando o uso da radiação ionizante. Assim, obedecendo aos princípios de: Justificação, Limitação de dose individual e Otimização da proteção, foram criadas as normas de Proteção Radiológica pela Comissão Internacional para Proteção Radiológica (ICRP), posteriormente adaptadas e aprovadas no Brasil pela CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. [OKUNO & YOSHIMURA,2010; TAUHATA et al., 2014; CNEN NN 3.01, 2014]. Estas normas, aliadas aos conhecimentos teóricos descritos na seção “revisão bibliográfica” foram as bases que permitiram o desenvolvimento e consolidação deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Construção de blindagem para uma pedra pechblenda existente no Laboratório de Ensino em Física de Radiações (LERAD).

2.2 Objetivos Específicos

- 1 - Entendimento do diagrama de decaimento dos elementos radioativos que compõem a amostra de pechblenda do laboratório LERAD, para determinar os tipos de radiações emitidos e suas intensidades;
- 2 - Exercício do manuseio dos instrumentos e levantamento de medidas de taxa de dose da pechblenda;
- 3 - Aplicação das orientações das normas nacionais e internacionais que regulamentam as doses permitidas;
- 4 - Decisão sobre a utilização de material adequado para a blindagem, em função dos tipos de radiação emitidos;
- 5 - Cálculo da espessura da blindagem, cuja atenuação atenda às normas regulamentadoras;
- 6 - Otimização dos custos, conjugando os possíveis tipos de materiais com as espessuras de atenuação de radiação;
- 7 - Elaboração de desenho final da blindagem;
- 8 - Controle do processo de fabricação da blindagem para garantir o armazenamento, transporte e manuseio seguros, da pedra pechblenda.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Radiação

Radiação é energia em trânsito, que se apresenta em forma de partículas atômicas e subatômicas como núcleos de átomos de hélio (α); elétrons (β^-), (pósitrons (β^+), prótons, nêutrons e outros ou como onda eletromagnética, constituída de campos elétricos e magnéticos recebendo denominações diferentes em função da frequência da onda, tais com os raios X ou gama. A radiação pode ser emitida espontaneamente de núcleos instáveis de átomos ou produzida em aceleradores de partículas e reatores nucleares [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

Os núcleos são sistemas ligados de prótons(Z) e nêutrons(N), chamados núcleons, de massa (A) igual a $Z + N$. Um núcleo arbitrário tem como uma das notações, o termo (Z, A). A palavra “núcleo” se refere ao elemento químico, enquanto que “nuclídeo” é a caracterização de cada núcleo em função do número de prótons, nêutrons e estado energético. A Figura 2 relacionando o número atômico com o número de nêutrons mostra uma área possível de combinações, apresentando uma linha central de estabilidade (local onde o elemento químico atinge um estado de energia mínima), representada pela cor preta, em degrau [CHUNG, 2001].

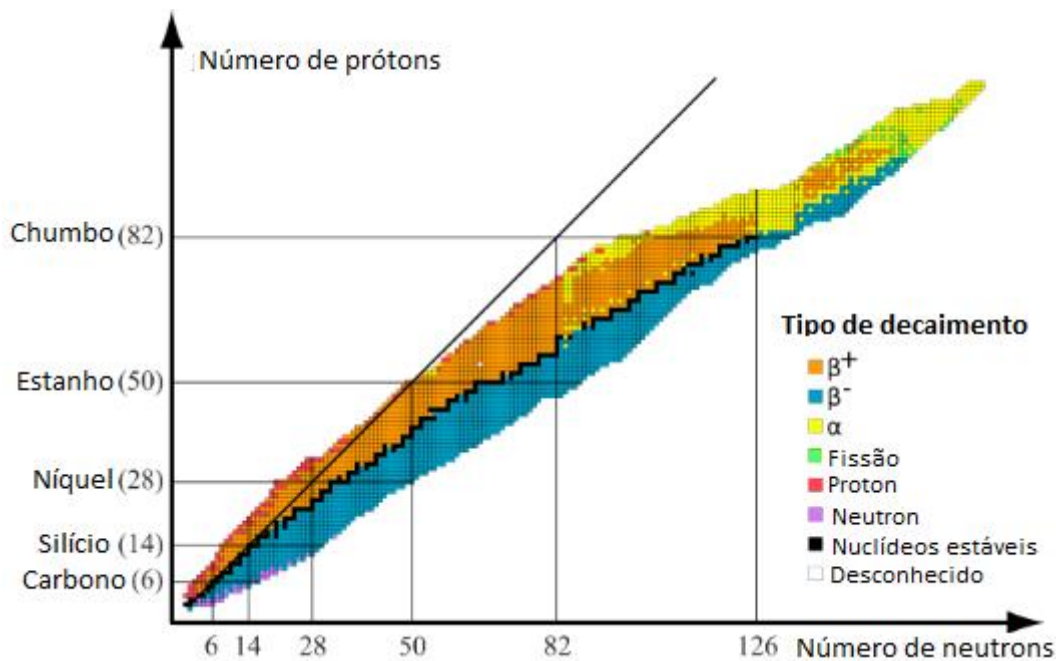


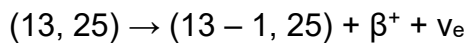
Figura 2 - Carta de nuclídeos adaptada de Karlsruhe-nuklidkarte – portal.mcd.com.

O núcleo do elemento químico ao se formar, caso não esteja num estado de ligação com energia mínima, é radioativo. Neste caso, se rearranja, transformando-se em

outros núclídeos por emissão ou absorção de partículas até que atinja a linha central de estabilidade. Essa transformação nuclear é chamada de decaimento ou desintegração nuclear. Como exemplo, cita-se a desintegração do núclídeo radioativo alumínio Al (Z=13) para magnésio Mg (Z=12), emitindo as partículas β^+ e neutrino ν_e , conforme a equação [CHUNG, 2001; OKUNO & YOSHIMURA, 2010]:



Ou:



A grandeza que mede as desintegrações por segundo, que ocorrem nestes decaimentos, chama-se Atividade(A). Sendo:

$$N_0 - N = \Delta N \quad (2)$$

$$A_0 = - \Delta N / \Delta t = \lambda \cdot N_0 \quad (3)$$

onde:

A_0 = atividade inicial da amostra;

N_0 = número de núcleos radioativos contidos inicialmente na amostra;

N = número de núcleos radioativos na amostra decorrido um tempo Δt ;

ΔN = é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas em um tempo Δt e

λ = constante de decaimento.

Após decorrido o tempo Δt , a nova atividade (A), será:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4)$$

Atividade tem unidade medida em Becquerel (número de desintegrações/segundo), provenientes da antiga unidade Curie (C_i). A relação entre elas é: $1 C_i = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$ [OKUNO & YOSHIMURA, 2010; TAUHATA et al., 2014].

3.2 Radiação ionizante

São as radiações que possuem energia suficiente para arrancar um ou mais elétrons de um átomo ou molécula, formando pares de íons positivos e negativos. As radiações ionizantes referem-se, portanto a partículas ou ondas eletromagnéticas capazes de produzirem ionização em um meio, sendo: diretamente ionizante as

partículas carregadas como: alfa, prótons, elétrons, pósitrons; e indiretamente ionizantes aquelas sem carga, como nêutrons e fótons [ATTIX, 2004; OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

3.2.1 Poder de freamento para partículas

Essas ionizações que ocorrem durante a passagem da radiação ionizante pela matéria são devidas a perda média de energia (dT) da partícula em um determinado meio, por unidade de caminho (dx) e é simbolizada por S (*stopping power*), onde:

$$S = dT/dx \quad (5)$$

Com unidades em MeV/cm, ou MeV.cm²/g (poder de freamento mássico), considerando a densidade do meio (ρ):

$$s = dT/\rho dx \quad (6)$$

Em termos práticos, conhecida a energia cinética ou a velocidade das partículas que incidem em um meio, é possível obter a energia perdida em uma espessura pequena Δx , onde $\Delta x \ll$ alcance, pela aproximação:

$$\Delta T \approx \Delta x dT/dx = \Delta x \rho dT/\rho dx \quad (7)$$

[ATTIX, 2004; OKUNO & YOSHIMURA, 2010; TAUHATA et al., 2014].

O alcance de uma partícula carregada em um meio, pode ser definido traçando curvas de incidência perpendicular de um feixe monoenergético de partículas idênticas em um material absorvedor homogêneo com espessuras crescentes. A Figura 3 mostra a curva 1 numa situação ideal em que o alcance obtido pela intersecção da parte final da curva com o eixo das abcissas ou com nível de fundo é facilmente identificado e todas as partículas atravessam distâncias até esse valor de t_{\max} sem que nenhuma o ultrapasse. Os experimentos reais, porém, assemelham-se mais às curvas 2 e 3, respectivamente para partículas pesadas e leves, que permitem definir os alcances: máximo (t_{\max}) no cruzamento com a abcissa e o extrapolado (t_{ext}), obtido pela intersecção entre a tangente à curva de penetração com o eixo x. Para partículas leves, a curva dificilmente alcança o eixo das abcissas, por que há radiação de freamento produzida nos absorvedores, que contribui com um valor constante para o

número de contagens, que se soma às contagens de fundo obtidas sem feixe (sem fonte). Além disso o alcance é bem menor que o comprimento da trajetória, principalmente para energias altas e números atômicos mais elevados, devidos a ocorrência, com frequência do espalhamento elástico com núcleos, produzindo grande desvios de trajetória [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

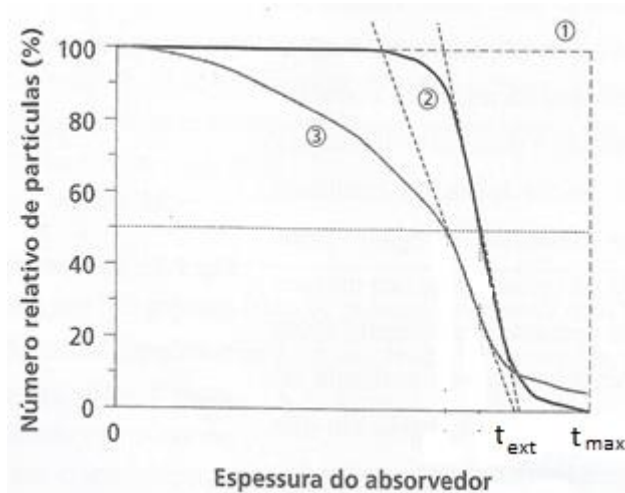


Figura 3- Exemplos de curvas de penetração de partículas carregadas. Adaptado de Física das Radiações - Okuno & Yoshimura – pág. 132

Além dos alcances citados, através de fórmulas empíricas, obtêm-se dois outros:

- **alcance R** - valor médio dos comprimentos dos percursos das partículas carregadas até seu repouso. Tanto para partículas carregadas pesadas quanto para leves faz-se uma aproximação segundo a qual a perda de energia é contínua em todo o percurso, recebendo o nome CSDA correspondente a *Continuous Slowind Down Approximation*. Uma vez conhecido o poder de freamento e sua variação com a energia obtêm-se uma estimativa de alcance na condição CSDA (R_{CSDA}), pela integral [ATTIX, 2004]:

$$R_{\text{CSDA}} = \int_0^{T_0} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)^{-1} dT \quad (8)$$

R_{CSDA} é o percurso médio das partículas no meio, sendo uma estimativa superior ao alcance obtido experimentalmente. A unidade de R_{CSDA} é g/cm^2 [ATTIX, 2004].

- **alcance projetado $\langle t \rangle$** - definido como o valor médio das profundidades máximas de penetração no material que cada uma das partículas do feixe atravessa de acordo com a equação [ATTIX, 2004]:

$$\langle t \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot t_f(t) dt}{\int_0^{\infty} t_f(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN(t)}{dt} dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN(t)}{dt} dt} = - \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \cdot t_f(t) dt \quad (9)$$

Onde:

t = espessura da placa;

t_f = profundidades máximas;

N_0 = número de partículas incidentes perpendicularmente a uma placa fina e

N = número de partículas que permaneceram no bloco de espessura t .

A Figura 4 mostra as comparações dos tipos de alcances:

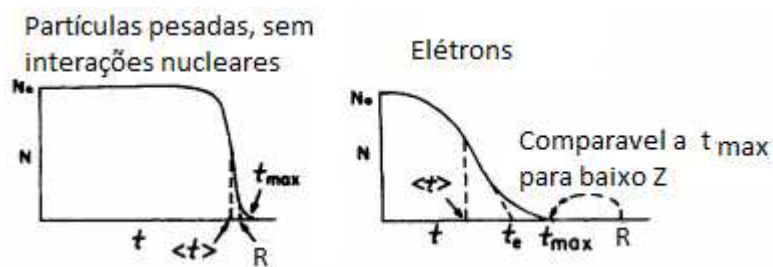


Figura 4 – Gráficos comparativos de alcances para partículas carregadas e elétrons. Adaptada de ATTIX, 2004 - pg. 183.

O alcance $\langle t \rangle$ é bastante próximo do comprimento da trajetória para partículas pesadas, pois tendem a uma linha reta.

Estas curvas chamadas de alcance-energia e estes cálculos, normalmente apresentados em tabelas, podem ser usados tanto para prever uma espessura de material que garanta a blindagem de uma fonte emissora de partículas carregadas, como para obter espessuras de materiais que reduzam a energia inicial de um feixe de energia radiante [ATTIX, 2004; OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

No caso de misturas e compostos, não havendo valores específicos teóricos ou experimentais, calcula-se o poder de freamento para partículas carregadas pesadas e leves a partir da combinação dos elementos químicos que formam o composto:

$$(dE/pdx)_{\text{mist}} = w_1 \cdot (dE/pdx)_1 + w_2 \cdot (dE/pdx)_2 + \dots$$

Onde os w_i são as frações em massa de cada elemento químico i presente no composto [OKUNO & YOSHIMURA, 2010].

3.2.2 Atenuação para feixes de raios-X e gama

No caso de fótons, o que ocorre é a atenuação de feixes de raios X e gama na interação com a matéria. Considerando um feixe paralelo de um grande número N_0 de fótons com incidência perpendicular em uma placa plana e fina de espessura L , assume-se que cada partícula seja completamente absorvida numa interação sem radiação secundária, ou atravesse a placa sem trocar energia ou mudar de direção. Nesse caso, a probabilidade de que cada partícula interaja com uma espessura infinitesimal dl do meio é $\mu \cdot dl$. Se N partículas incidem sobre dl , a variação dN no número N devido a absorção é dada por [ATTIX, 2004; OKUNO & YOSHIMURA, 2010; TAUHATA et al., 2014]:

$$dN = - \mu \cdot N \cdot dl \quad (10)$$

Que desenvolvida algebricamente, fornece a equação:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (11)$$

Onde x é a espessura do material e o fator μ , chamado de coeficiente de atenuação linear, a contribuição dos modos pelos quais ocorrem as interações dos fótons com o meio, sendo o espalhamento Rayleigh (σ_{coe}) e os efeitos causadores de ionização fotoelétrico (T), Compton (σ) e criação de pares elétron-pósitron (K). Logo:

$$\mu = \sigma_{\text{coe}} + \sigma + T + K \quad (12)$$

μ tem a unidade em (comprimento)⁻¹. Exemplo: cm⁻¹.

Os valores apresentados em tabelas do coeficiente de atenuação linear μ geralmente são apresentados divididos pela densidade do meio ficando independente do estado físico da matéria (fases), passando a ser chamado de coeficiente mássico μ/ρ , com unidades em cm². g⁻¹. A quantidade $1/\mu$, nomeada como livre caminho médio ou comprimento de relaxação das partículas primárias, representa a distância média que a partícula viaja através de um meio atenuante antes da interação e também a profundidade considerada para a qual a fração 1/e de toda a população homogênea

das partículas do feixe pode penetrar [ATTIX, 2004; TAUHATA et al., 2014].

A transferência de energia do fóton para o meio (E_{tr}), se dá pela aquisição de energia cinética por partículas carregadas nos quatro modos de interação citados. Assim em média para cada caso:

- a) No espalhamento coerente ou Rayleigh, a interação do fóton com o átomo como um todo, não ocorre transferência de energia para o meio, exceto a pequena parcela necessária para o recuo do átomo;
- b) No efeito fotoelétrico, ocorre uma grande penetração do fóton incidente no meio, atingindo os elétrons ligados pertencentes a camadas atômicas internas K e L, gerando os fotoelétrons;
- c) No efeito Compton ou espalhamento incoerente, como consequência da interação, a energia do fóton incidente é dividida entre o elétron e o fóton espalhado que se propaga em outra direção. Ambas as partículas elétron-Compton e fóton espalhado são ionizantes;
- d) Para a criação de par elétron-pósitron, na interação com o meio, a alta energia do fóton incidente, com no mínimo 1,022 MeV, é convertida em massa de repouso e energia cinética respectivamente para o elétron e o pósitron criados.

[ATTIX, 2004; TAUHATA et al., 2014].

A ocorrência desses processos é probabilística e varia com a energia do fóton, o número atômico e a densidade do meio. A Figura 5 mostra as faixas de número atômico do meio e energia dos fótons incidentes, onde predomina cada um desses processos [ATTIX, 2004; TAUHATA et al., 2014].

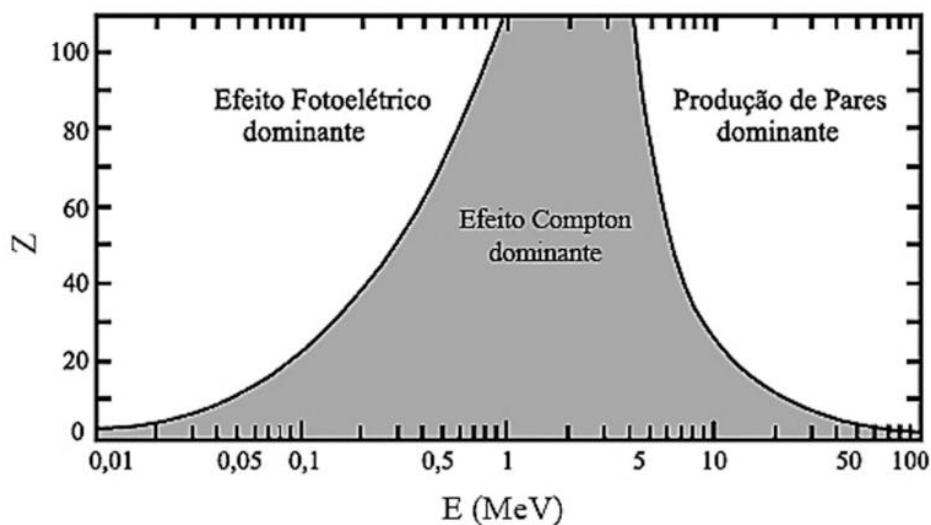


Figura 5 - Curvas de importância relativa dos principais tipos de interação por fótons. Adaptado de Attix F.H.- Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, pg 125.

A fração média de energia ($h\nu$) do fóton incidente que é transferida ao meio é obtida pela composição dessas três parcelas ponderadas pela probabilidade de cada interação:

$$\hat{E}_{tr} = (\rho/\mu) \cdot [(\sigma/\rho) \cdot E_{trCompton} + (T/\rho) \cdot E_{trFotoelt} + (K/\rho) \cdot E_{trpar}] \quad (13)$$

Ou,

$$\mu_{tr} / \rho = (\mu / \rho) \cdot (\hat{E}_{tr} / h\nu) \quad (14)$$

que define o coeficiente mássico de transferência de energia, μ_{tr}/ρ . Ele se aproxima do coeficiente de atenuação se uma grande fração de energia do fóton é transferida ao meio. Como nem toda a energia cinética do elétron se converte em ionizações do meio, devido a processos de *bremsstrahlung*, fluorescência ou aniquilação de pósitron em voo, a energia média absorvida por interação (\hat{E}_{ab}) fica menor que a energia média transferida por interação (\hat{E}_{tr}). E sua equação é:

$$\hat{E}_{ab} = (\rho/\mu) \cdot [(\sigma/\rho) \cdot E_{abCompton} + (T/\rho) \cdot E_{abFotoelt} + (K/\rho) \cdot E_{abpar}] \quad (15)$$

Ou,

$$\mu_{ab} / \rho = (\mu / \rho) \cdot (\bar{E}_{ab} / hv) \quad (16)$$

Em uma forma mais concisa, o coeficiente mássico de absorção de energia (μ_{ab}/ρ) relaciona-se com o coeficiente de transferência de energia por:

$$\mu_{ab}/\rho = (1-g) \cdot \mu_{tr}/\rho \quad (17)$$

Sendo g , a fração de energia transferida por fótons a elétrons e pósitrons que é irradiada e não convertida em ionização do meio. Para fótons de energia muito baixa, g se aproxima de zero igualando os coeficientes, como apresentado na Figura 6 [OKUNO & YOSHIMURA, 2010; TAUHATA et al., 2014]:

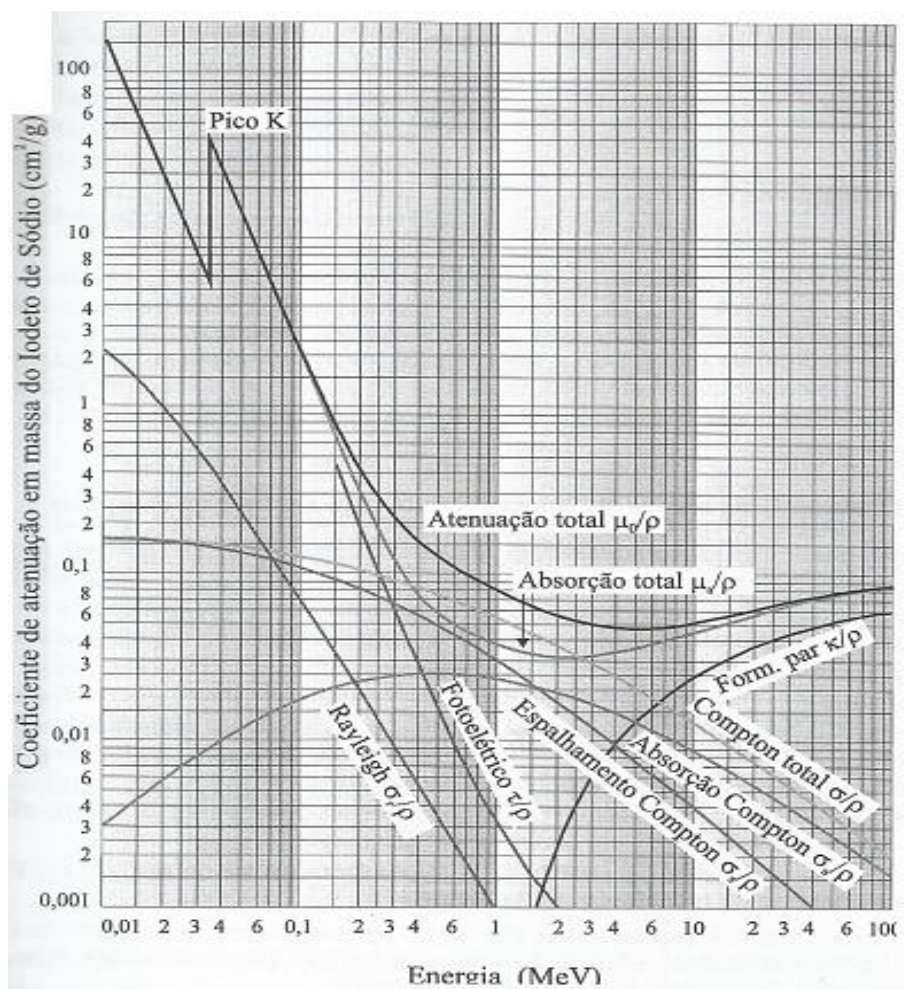


Figura 6 – Contribuição relativa de diversos efeitos produzidos pela interação da radiação num material para o coeficiente de atenuação linear total. Adaptado de Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos – Tauhata et al., pág. 87.

No caso de misturas e compostos, calcula-se o coeficiente de atenuação total, considerando a porcentagem de atenuação de cada elemento químico (C_i):

$$(\mu/\rho)_{\text{mist}} = \%C_1.(\mu_{C_1}/\rho_{C_1}) + \%C_2.(\mu_{C_2}/\rho_{C_2}) + \%C_3.(\mu_{C_3}/\rho_{C_3}) + \dots \quad (18)$$

onde os C_i são os elementos químicos [TAUHATA et al., 2014].

3.3 Grandezas e unidades dosimétricas

3.3.1 Exposição – mede a capacidade dos raios-X ou gama ionizarem o ar. Tendo a fórmula. [OKUNO & YOSHIMURA, 2010]:

$$X = dQ/dm \quad (19)$$

Onde:

dQ é o valor absoluto da carga total de íons de mesmo sinal, produzidos quando todos os elétrons e pósitrons criados na incidência de fótons, num elemento de volume de ar forem completamente freados na correspondente massa dm .

A exposição X tem como unidade o Roentgen = $R = 2,58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$. É uma grandeza definida só para raios X e gama, limitada a fótons com energia de até 3MeV.

Há uma relação entre a exposição (X) e a atividade (A) de uma fonte de raios X ou gama, conforme [TAUHATA et al., 2014]:

$$X = \Gamma \cdot A \cdot t / r^2 \quad (20)$$

Onde:

Γ = constante de taxa de exposição, de um radionuclídeo que emite fótons, É função da energia e abundância de fótons emitidos e do coeficiente mássico de absorção de energia do ar;

t é o tempo de exposição e

r é a distância até a fonte.

3.3.2 Dose Absorvida D – é uma grandeza física relacionada à transferência de energia ionizante para os materiais. É conceitualmente dada pela energia que o meio recebeu de radiação dE_{ab} por unidade de massa de um pequeno volume dm atingido pela radiação ionizante. Tem como fórmula a equação [ATTIX, 2004; OKUNO & YOSHIMURA, 2010]:

$$D = dE_{ab} / dm = [(E_{\text{rad}})_{\text{entra}} - (E_{\text{rad}})_{\text{sai}} + (E_m \rightarrow E) - (E_E \rightarrow m)] / dm \quad (21)$$

Onde:

- $(E_{\text{rad}})_{\text{entra}}$ – energia radiante que entra no volume de interesse – corresponde à soma das energias cinéticas das partículas carregadas e/ou nêutrons e energia de fótons;
- $(E_{\text{rad}})_{\text{sai}}$ – energia radiante que sai do volume de interesse;
- $E_m \rightarrow E$ – energia radiante criada no volume de interesse por transformações de massa em energia e
- $E_E \rightarrow m$ – energia radiante convertida em massa de repouso.

A dose D, teve inicialmente, como unidade o rad = 10^{-2} J/kg. Mais tarde alterada para Gray = Gy. Sendo a relação, Gy = 1 J/kg = 100 rad. Essa equação é válida para qualquer meio, e para qualquer tipo ou geometria de radiação [TAUHATA et al., 2014].

A dose no ar, também pode ser calculada conhecendo-se o coeficiente mássico de absorção de energia no ar $(\mu_{\text{ab}}/\rho)_{\text{ar}}$ e a fluência de energia Ψ , que é a energia transportada por um feixe monoenergético N, por unidade de área S, ou um espectro de energia. No primeiro caso, sendo $\Psi = hvN/S$ e têm-se:

$$D_{\text{ar}} = (\mu_{\text{ab}}/\rho)_{\text{ar}} \cdot \Psi \quad (22)$$

[TAUHATA et al., 2014].

3.4 Grandezas usadas na Proteção Radiológica

São usadas nas recomendações para limitar as doses no tecido ou órgão e no corpo todo [TAUHATA et al., 2014].

3.4.1 Dose equivalente no tecido ou órgão (H_T) - é definida para qualquer tipo de radiação e obtida a partir da dose absorvida média ($D_{T,R}$) no tecido ou órgão (T) exposto à radiação (R) [TAUHATA et al., 2014]:

$$H_T = W_R \cdot D_{T,R} \quad (23)$$

onde W_R é o fator de ponderação da radiação R, escolhido para cada tipo de partícula e energia, tendo como unidade o sievert (Sv). A Tabela 2 mostra os fatores de ponderação.

Tabela 2 – Fatores de ponderação da radiação (W_R)

Tipo de radiação e intervalos de energia	W_R
fótons de todas as energias	1
elétrons e múons de todas as energias	1
Neutrons com energias	
< 10 keV	5
10-100 V	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 Mev a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
prótons	5
Partículas alfa, elementos de fissão, núcleos pesados	20

[a] Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[b] Valores para outras radiações podem ser obtidos da Tabela 3 (ver também Anexo A da ICRP-60).

[c] Excluindo elétrons Auger emitidos por radionuclídeos ligados ao DNA, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria. [d] Para consistência nos cálculos, pode-se usar a seguinte expressão para a estimativa de w_R para nêutrons, em função da energia: $w_R = 5 + 17 \exp[-(\ln 2\varepsilon)^2 / 6]$, onde ε é a energia em MeV.

Fonte - CNEN NN-3.01, 2011; ICRP-60, 1991.

3.4.2 Dose efetiva (E) - definida por [TAUHATA et al., 2014]:

$$E = \sum_T (H_T \cdot W_T) \quad (24)$$

Serve para estabelecer limites de exposição do corpo todo à radiação a fim de evitar a ocorrência de efeitos cancerígenos e hereditários. É a soma das doses equivalentes nos tecidos ou órgãos (H_T) multiplicada pelo fator de ponderação de tecido ou órgão (W_T), tendo como unidade o sievert.

Os fatores de ponderação de tecido ou órgão são relacionados com a sensibilidade de um dado tecido ou órgão à radiação no que concerne à indução de câncer e a efeitos hereditários. Foram baseados em risco de morte por câncer, doenças hereditárias em todas as gerações futuras e o detrimento, conceito complexo que considera a gravidade da doença, a qualidade e anos de vida perdidos por efeitos danosos da radiação [OKUNO & YOSHIMURA, 2010; TAUHATA et al., 2014, p. 194].

A Tabela 3 mostra os fatores de ponderação.

Tabela 3 – Fatores de ponderação para tecidos e órgãos (W_T)

Tecido ou Órgão	W_T (1990)	W_T (2007)
Gônadas	0,20	0,08
Medula óssea (vermelha)	0,12	0,12
Cólon[b]	0,12	0,12
Pulmão[c]	0,12	0,12
Estômago	0,12	0,12
Mama	0,05	0,12
Bexiga	0,05	0,04
Esôfago	0,05	0,04
Fígado	0,05	0,04
Tireoide	0,05	0,04
Superfície óssea	0,01	0,01
Cérebro	-	0,01
Glândulas Salivares	-	0,01
Pele	0,01	0,01
Restante	0,05*	0,12**
Soma total	1,00	1,00

* Inclui glândula suprarrenal, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, músculo, pâncreas, baço, timo e útero.

** Inclui glândula suprarrenal, tecido extra torácico, vesícula biliar, parede do coração, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, próstata ou útero/colo de útero, intestino delgado, baço, timo.

Fonte – CNEN–NN-3.01; IAEA-ICRP 60,1991 e 2007.

3.5 Normas de proteção, monitoração e controle para radiação ionizante

Os trabalhos com radioisótopos devem obedecer às normas que orientam os cuidados e controles a serem tomados para que os limites de dose não sejam superados, e que os trabalhadores estejam sob a menor exposição possível. O desenvolvimento deste TCC, teve como referências as normas que versam sobre blindagem de fontes para proteção de pessoas durante o seu manuseio, transporte e armazenamento. Foram escolhidas as publicações da ICRP e CNEN: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica - CNEN NN 3.01 e suas resoluções: 114 de 24/08/2011 e 164/14 de Março / 2014; resolução CNEN N° 130, de 31/05/2012; ICRP-60 de 1991; ICRP-103 de 2007 e a NR 32 de segurança do trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como material para construção da blindagem foram analisados aqueles cujas propriedades reduzem a radiação ao máximo, gerem o mínimo de novas fontes radioativas, que tenham fácil disponibilidade de aquisição no mercado e que sejam mais baratos, como os listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Materiais para blindagem de raios gama

Energia (MeV)	Valores aproximados das camadas semirredutoras (CSR) em cm.			
	Chumbo	Ferro	Concreto	Água
0,5	0,51	1,0	3,3	7,62
1,0	0,76	1,52	4,57	9,91
1,5	1,27	1,78	5,84	12,19
2,0	1,52	2,03	6,60	13,97

Fonte - U.S.NRC - United States Nuclear regulatory Commission
<https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11229A721.pdf>

Para segurança nos trabalhos desenvolvidos no laboratório, aplicou-se as Normas de Proteção Radiológica utilizando os equipamentos de proteção individual (EPI): avental, calça, luvas, sapato e óculos de proteção, seguindo as orientações conforme à seção 3.5, observando os itens de segurança que devem atender à base e estrutura do sistema de proteção radiológica:

- 1) As paredes da blindagem tenham espessura suficiente para garantir a proteção contra a radiação primária e a radiação espalhada;
- 2) O local de armazenagem da pechblenda seja uma área controlada;
- 3) Considerado o professor como IOE (Individuo ocupacionalmente exposto);
- 4) Observação de aviso na entrada e dentro do laboratório sobre utilização dos equipamentos de proteção individual e coletiva, tais como: avental, calça, luvas, sapato, óculos de proteção, biombos e outras blindagens existentes;
- 5) Existência do livro de anotação de presença do IOE, técnico do laboratório e alunos que desenvolverem trabalho no LERAD para controle de tempo de exposição e de Níveis de Registros, conforme Posição Regulatória 3.01/004:2011 da CNEN para Monitoração Individual “Registro Corpo Inteiro Dose Efetiva $\geq 0,20$ mSv/mês”;
- 6) O laboratório tenha um dosímetro para o IOE e outro para o ambiente laboratorial;
- 7) A blindagem deverá possuir o símbolo oficial de radiação ionizante;

8) Kit de primeiros socorros, na área do laboratório;

9) Tenha orientação escrita e de fácil acesso sobre:

- Utilização de equipamentos de proteção individual;
- Proibição de comida e bebida, fumar e/ou mascar chicletes no laboratório, manuseio de lentes de contato, aplicação de cosméticos e ou produtos de higiene pessoal ou armazenamento de alimentos para consumo no laboratório;
- Lavar as mãos antes e após a manuseio de materiais radioativos, antes e após a remoção das luvas e antes de saírem do laboratório;
- Não uso de calçados que deixem os arnelhos à vista;
- Não uso de anéis, pulseiras, relógios e cordões longos, durante as atividades laboratoriais;
- Não inserção de objetos na boca;
- Não utilização da pia do laboratório como lavatório e
- Uso de roupa de proteção (uniforme) durante o trabalho. Essas peças de vestuário não devem ser usadas em outros espaços que não sejam do laboratório.

[CNEN-NE.3.01]-https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073472.pdf].

O desenvolvimento do projeto da blindagem teve como base, os conceitos:

- a) Conhecimento da taxa da exposição sobre a superfície da pechblenda, seu volume; formato, peso e tipos de radiações emitidas;
- b) Determinação da taxa de radiação de fundo, no laboratório;
- c) Familiarização sobre taxas de doses em minerais de pechblendas, estabelecendo valores teóricos, devido à pandemia de COVID-19;
- d) Manutenção das taxas de dose efetiva e equivalente para corpo inteiro, cristalino, pele e mãos/pés dos IOE e público dentro dos limites indicados nas referências: CNEN-NE.3.01, Resolução CNEN 164/2014 e NR 32 de 19/10/2020. Veja Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de doses ocupacionais anuais

Limites de Dose Anuais ^[a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv ^[b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)	15 mSv
	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-----

[a] Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano. (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)

[c] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada. Os valores de dose efetiva se aplicam à soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano.

Indivíduos com idade inferior a 18 anos não podem estar sujeitos a exposições ocupacionais.

Fonte: Adaptado de CNEN-NN-3.01 de 03/2014, incluso resolução 114/2011.

Pesquisas para o caso de estudantes forneceram as informações: “não exceder o limite para indivíduo do público ou 1/10 em uma única exposição” [CNEN-NE.3.01, julho/1988]; “10% dos limites do IOE por ano” [Stanford University] e “6/50/150 mSv/ano, respectivamente para corpo inteiro(6 mSv/ano), cristalino (50 mSv/ano) e pele, mãos e pés (150 mSv/ano)” [IAEA-BSS-115].

e) Estabelecimento do tempo de ocupação e frequência de pessoal em pesquisas com a pechblenda, no laboratório;

f) Utilização de tabelas e diagramas de decaimento do urânio 238 para conhecimento dos tipos de radiações emitidas, tomando os valores de maior frequência e intensidade. Ver Tabelas 6 e 7, representadas na Figura 7;

Tabela 6 - Série de decaimento do U-238 - Energia dos raios gama

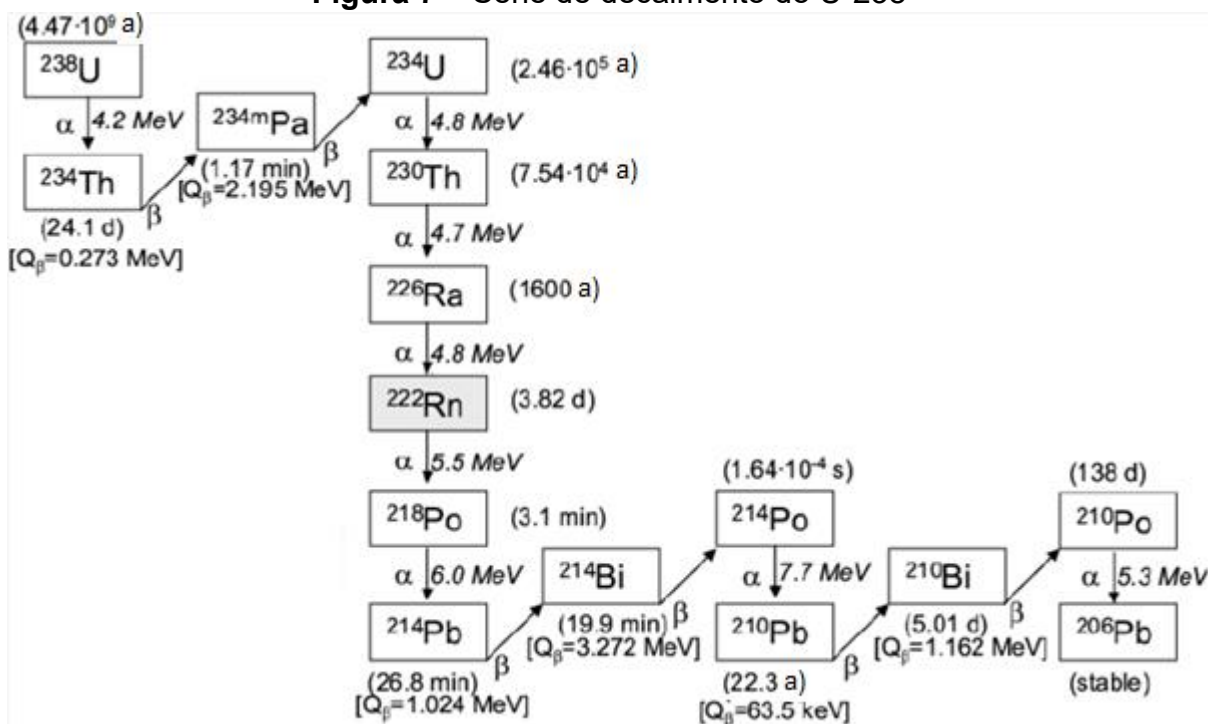
Isótopo	Meia-Vida	Energia - Gama (KeV)
U238	4.468 x 10 ⁹ anos	----
Th234	24.1 dias	63.3 (4.47%) 92.38 (2.60%) 92.80 (2.56%)
Pa234m	1.17 minutos	765 (0.207%) 1001 (0.59%)
99.8%	0.13% Pa234	6.75 horas 100 (50%) 700 (24%) 900 (70%)
U234	2.47 x 10 ⁵ anos	53.2 (0.123%)
Th230	8.0 x 10 ⁴ anos	67.7 (0.373%)
Ra226	1602 anos	186.2 (3.50%)
Rn222	3.823 dias	510 (0.076%)
Po218	3.05 minutos	-----
99.98%	0.02%	
Pb214	26.8 minutos	53.2 (1.1%) 242.0 (7.46%) 295.2 (19.2%) 351.9 (37.1%) 785.9 (1.09%)
	At218	2 segundos
Bi214	19.7 minutos	609.3 (46.1%) 768.4 (4.89%) 806.2 (1.23%) 934.1 (3.16%) 1120.3 (15.0%) 1238.1 (5.92%) 1377.7 (4.02%) 1408.0 (2.48%) 1509.2 (2.19%) 1764.5 (15.9%)
99.98%	0.02%	
Po214	164 microseg	799 (0.014%)
	Tl210	1.3 minutos
		296 (80%) 795 (100%) 1310 (21%)
Pb210	21 anos	46.5 (4.05%)
Bi210	5.01 dias	-----
Po210	138.4 dias	803 (0.0011%)
Pb206	Estável	-----

Fonte: Adaptado de <https://www.cpp.edu/~pbsiegel/decaychain>

Tabela 7 - Série de decaimento do U-238 - Energia dos raios alfa e beta

Nuclídeo	Modo de decaimento	Meia-vida	MeV	Produto do decaimento
Urânio-238	α	4,5 bilhões a	4,270	^{234}Th
Tório-234	β^-	24,6 d	0,273	$^{234\text{m}}\text{Pa}$
Protactínio-234m	β^- 99,84 %	1,4 min	2,271 0,074	^{234}U ^{234}Pa
Protactínio-234	β^-	6,70 h	2,197	^{234}U
Urânio-234	α	245 500 a	4,859	^{230}Th
Tório-230	α	75 380 a	4,770	^{226}Ra
Radio-226	α	1 602 a	4,871	^{222}Rn
Radônio-222	α	3,8235 d	5,590	^{218}Po
Polônio-218	α 99,98 % β^- 0,02 %	3,10 min	6,115 0,265	^{214}Pb ^{218}At
Astato-218	α 99,90 % β^- 0,10 %	1,5 s	6,874 2,883	^{214}Bi ^{218}Rn
Radônio-218	α	35 ms	7,263	^{214}Pb
Chumbo-214	β^-	26,8 min	1,024	^{214}Bi
Bismuto-214	β^- 99,98 % α 0,02 %	19,9 min	3,272 5,617	^{214}Po ^{210}Tl
Polônio-214	α	0,1643 ms	7,883	^{210}Pb
Tálio-210	β^-	1,30 min	5,484	^{210}Pb
Chumbo-210	β^-	22,3 a	0,064	^{210}Bi
Bismuto-210	β^- 99,99987% α 0,00013%	5,013 d	1,426 5,982	^{210}Po ^{206}Tl
Polônio-210	α	138,376 d	5,407	^{206}Pb
Tálio-206	β^-	4,199 min	1,533	^{206}Pb
Chumbo-206	–	estável	–	–

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ur%C3%A2nio>

Figura 7 – Série de decaimento do U-238

Fonte - https://www.researchgate.net/figure/Decay-chain-of-the-radioactive-family-of-238-U-The-half-lives-and-decay-fig2_24164287/download

- g) Otimização na escolha de espessuras da blindagem para diferentes materiais, através do emprego das equações de atenuação para raios gama e poder de freamento para as radiações alfa e beta, acrescentando a utilização de material de baixo peso atômico, por exemplo plástico, para reduzir a formação dos raios X produzidos por partículas alfa incidentes, bem como a radiação X gerada através de *bremstrahlung* por radiação beta [ATTIX, 2004; GOLDSTEIN, 1957; PAIVA 2014; SCHAEFFER, 1973]. Esta otimização deve obedecer ao princípio ALARA (os níveis de radiação para os IOE devem ser mantidos tão baixos quanto razoavelmente possíveis);
- h) Negligenciamento de espalhamento *Rayleigh*; reações fotonucleares e *build up*.
- i) Elaboração dos desenhos e
- j) Fundição, torneamento mecânico, marcação e identificação da blindagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em função das condições impostas pela pandemia foi estabelecido pelo professor orientador, Dr. Lucio Pereira Neves a **taxa de dose** na superfície da pechblenda em **10 vezes o valor dos limites de doses anuais da norma CNEN NN 3.01**. Aplicando o princípio ALARA tomou-se os menores dos limites admissíveis, sendo para IOE de 20 mSv/ano e indivíduo do público de 1mSv/ano. Assumindo o ano com 365 dias 5h 48 min e 48 s, e supondo ser a radiação de fundo do laboratório de **0,2 μ Sv/h**, obteve-se um valor inteiro de taxa de dose efetiva $H_E = 23 \mu\text{Sv/h}$.

Os valores para as radiações alfa, beta e gama, emitidas pela pechblenda, extraídos após análise de tabelas e diagramas foram [CAL POLY; IAEA-TECDOC - 1363; INIS; KINSEY et al.; U.S. DHEW; WIKIPEDIA]:

Alfa – **7,83 MeV** na transição $\text{Po}^{214} - \text{Pb}^{210}$ - Alcance – aprox. 8 cm no ar;

Beta - **3,272 MeV** na transição $\text{Bi}^{214} - \text{Po}^{214}$ - Alcance – aprox. 15 m no ar e

Gama – **0,609 MeV** na transição $\text{Bi}^{214} - \text{Po}^{214}$ - Alcance – aprox. 100 metros no ar.

As Tabelas 8 e 9, mostram o resumo dos cálculos das espessuras L da primeira blindagem para as radiações alfa e beta, utilizando os materiais PVC, Nylon e Teflon.

Tabela 8 – Alcances da partícula alfa

Partícula alfa	T	S	R_{CSDA}	$\langle t \rangle$	ρ	L	R\$/kg
	MeV	MeV.cm ² /g	g/cm ²	g/cm ²	g/cm ³	cm	
Nylon	7,5	6.790E+02	6.773E-03	6.756E-03	1,14	6,4E-3	40
	8,0	6.474E+02	7.527E-03	7.509E-03			
Polivinil	7,5	5.556E+02	8.525E-03	8.474E-03	1,30	7,0E-3	114
	8,0	5.303E+02	9.446E-03	9.394E-03			
Teflon	7,5	5.283E+02	9.196E-03	9.137E-03	2,20	4,5E-3	157
	8,0	5.046E+02	1.016E-02	1.010E-02			

Fonte - dados: T,S, R_{CSDA} e $\langle t \rangle$ retirados das tabelas NIST, alfa. National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>.

Tabela 9 – Profundidades de penetração da partícula beta

Partícula beta	T	S_c	S_{total}	R_{csda}	ρ	L	R\$/kg
	MeV	MeV . cm ² /g	MeV . cm ² /g	g/cm ²	g/cm ³	cm	
Nylon	3	1.823E+00	1.859E+00	1.530E+00	1,14	1,5	47
	3,5	1.836E+00	1.879E+00	1.797E+00			
Polivinil	3	1.653E+00	1.718E+00	1.692E+00	1,30	1,4	114
	3,5	1.669E+00	1.746E+00	1.981E+00			
Teflon	3	1.546E+00	1.592E+00	1.806E+00	2,20	0,9	157
	3,5	1.558E+00	1.612E+00	2.118E+00			

Fonte - dados: T, S_c , S_{total} , R_{csda} e ρ retirados das tabelas NIST, beta. National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/method.html>.

Analisando as espessuras e o preço dos materiais nas tabelas 8 e 9, optou-se por descartar o uso do Teflon. O cálculo da atenuação de raios gama nesta primeira camada de blindagem, para as espessuras L, resultou nos fatores de relação das intensidades I/I_0 vistos na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes de atenuação linear para Nylon e Polivinil

Fótons Gama	L	T	μ	I/I_0
	cm	MeV	cm ⁻¹	MeV
Nylon	1,5	0,609	10,49E-02	0,85
Polivinil	1,4		10,18E-02	0,87

Fonte - Dados de coeficientes de atenuação retirados em: MORE, Chaitali V; RAMESHWAR R. BHOSALE & PRAVINA P. PAWAR. Detection of new polimer materials as gamma-ray-shielding materials. Marathwada University, India, Aurangabad, 2017.; NIST, Gama. National Institute of Standards and Technology . Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

Como o Nylon e o Polivinil apresentaram redução da radiação gama praticamente na mesma proporção, escolheu-se como primeira camada o Nylon, por ter o menor custo e ser mais fácil para ser trabalhado.

A espessura de atenuação da segunda camada, nas comparações do chumbo, ferro e a liga de Lipowitz (Cerrobend), de modo semelhante aos cálculos anteriores, forneceram os coeficientes de atenuação linear:

$$\mu_{chumbo} = 1,31 \text{ cm}^{-1} \quad \mu_{ferro} = 0,60 \text{ cm}^{-1} \quad \mu_{cerrobend} = 1,07 \text{ cm}^{-1}$$

No caso do Cerrobend, liga de composição: 50% Bi, 27% Pb, 13% Sn, 10% Cd, a determinação do coeficiente linear de atenuação, passou pelos seguintes estágios: Obtenção dos coeficientes de atenuação mássicos μ , suas densidades e o coeficiente de atenuação linear para os componentes da liga:

$\mu_{\text{Bi}}/\rho = 1,194\text{E-}1 \text{ cm}^2/\text{g}$	$\rho = 9,75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{Bi}} = 1,15 \text{ cm}^{-1}$
$\mu_{\text{Pb}}/\rho = 1,153\text{E-}1 \text{ cm}^2/\text{g}$	$\rho = 11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{Pb}} = 1,31 \text{ cm}^{-1}$
$\mu_{\text{Sn}}/\rho = 7,71\text{E-}2 \text{ cm}^2/\text{g}$	$\rho = 7,31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{Sn}} = 0,59 \text{ cm}^{-1}$
$\mu_{\text{Cd}}/\rho = 8,06\text{E-}2 \text{ cm}^2/\text{g}$	$\rho = 8,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\mu_{\text{Cd}} = 0,56 \text{ cm}^{-1}$

Aplicação da equação 18, para misturas:

$$(\mu/\rho)_{\text{mist}} = \% \text{Bi} \cdot (\mu_{\text{Bi}}/\rho_{\text{Bi}}) + \% \text{Pb} \cdot (\mu_{\text{Pb}}/\rho_{\text{Pb}}) + \% \text{Sn} \cdot (\mu_{\text{Sn}}/\rho_{\text{Sn}}) + \% \text{Cd} \cdot (\mu_{\text{Cd}}/\rho_{\text{Cd}})$$

Que forneceu o coeficiente de atenuação mássico $(\mu/\rho)_{\text{mist}} = 1,07\text{E-}1 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Sendo a densidade da liga Lipowitz igual a $9,4 \text{ g/cm}^3$, obteve-se $\mu_{\text{mist}} = 1,01 \text{ cm}^{-1}$.

Para o cálculo da espessura da segunda camada, tomou-se como requisitos para atenuação da radiação gama: o segundo parágrafo da seção 5; a seção 4.2.1, item 5 e o primeiro parágrafo da seção 4.2.2, itens (d) e (e), os quais respectivamente se resumem nos seguintes dados:

- . Taxa de dose na superfície da pechblenda - $23 \mu\text{Sv/h}$;
- . Limite de exposição IOE até 20 mSv/ano e indivíduos do público até 1 mSv/ano ;
- . Níveis de Registros de corpo inteiro da dose efetiva para IOE $\geq 0,20 \text{ mSv/mês}$ e
- . Considerando um tempo de exposição superestimado para o IOE em área controlada (laboratório), estipulado pela grade horária do curso de Física Médica em aulas de 4 horas por semana, durante 52 semanas, num total de 208 horas por ano.

Para o atendimento dos requisitos obteve-se as seguintes exposições máximas:

- 1 - IOE no ano = $208 \text{ h} \times 23 \mu\text{Sv/h} = 4,8 \text{ mSv}$;
- 2 - IOE no mês para Registro = $5 \text{ d} \times 4\text{h} \times 23 \mu\text{Sv/h} = 0,46 \text{ mSv}$;
- 3 - Aluno no ano = $208 \text{ h} \times 23 \mu\text{Sv/h} = 4,8 \text{ mSv}$;
- 4 - Aluno em uma única exposição = $4 \text{ h} \times 23 \mu\text{Sv/h} = 92 \mu\text{Sv}$.

Estes resultados revelaram que as exposições máximas 2 e 3 deveriam ser reduzidas nas proporções de 0,46 para 0,20 e 4,8 para 1 ou 1/2,3 e 1/4,8. A redução de 4,8 vezes a taxa de dose inicial satisfaz todas as condições.

Chamando a taxa de dose inicial $H_{E0} = 23 \mu\text{Sv/h}$,

após atenuação pela camada de Nylon de 13% $\rightarrow H_{E1} = H_{E0} \cdot 0,87 = 20 \mu\text{Sv/h}$.

Com aplicação da equação (11), obteve-se a espessura x , da segunda camada:

$$H_{E2}/H_{E1} = e^{-\mu x} \rightarrow \ln(H_{E2}/H_{E1}) = -\mu x \rightarrow \ln(H_{E1}/H_{E2}) = \mu x \rightarrow \ln(20/4,8) = \mu x$$

Onde: $x = 1,43/\mu$

Substituindo pelos valores de μ nos materiais analisados, obteve-se:

Chumbo – $\mu = 1,31 \rightarrow x = 1,09 \text{ cm};$

Ferro – $\mu = 0,60 \rightarrow x = 2,38 \text{ cm};$

Cerrobend – $\mu = 1,01 \rightarrow x = 1,42 \text{ cm}.$

Escolheu-se com arredondamento a espessura de 1,5 cm de Cerrobend, pois embora sua espessura tenha ficado um pouco maior do que o chumbo, é um material facilmente moldável e torneável com ponto de fusão a 70° C, além de estar disponível sem custo, aproveitando aparas de torneamento de projetos anteriores.

A cápsula de blindagem para a pechblenda ficou otimizada utilizando duas camadas, sendo a primeira de Nylon e a segunda de Cerrobend, com uma tampa dotada de borda que reveste a parte lateral da cápsula. O esquema é apresentado na Figura 8.

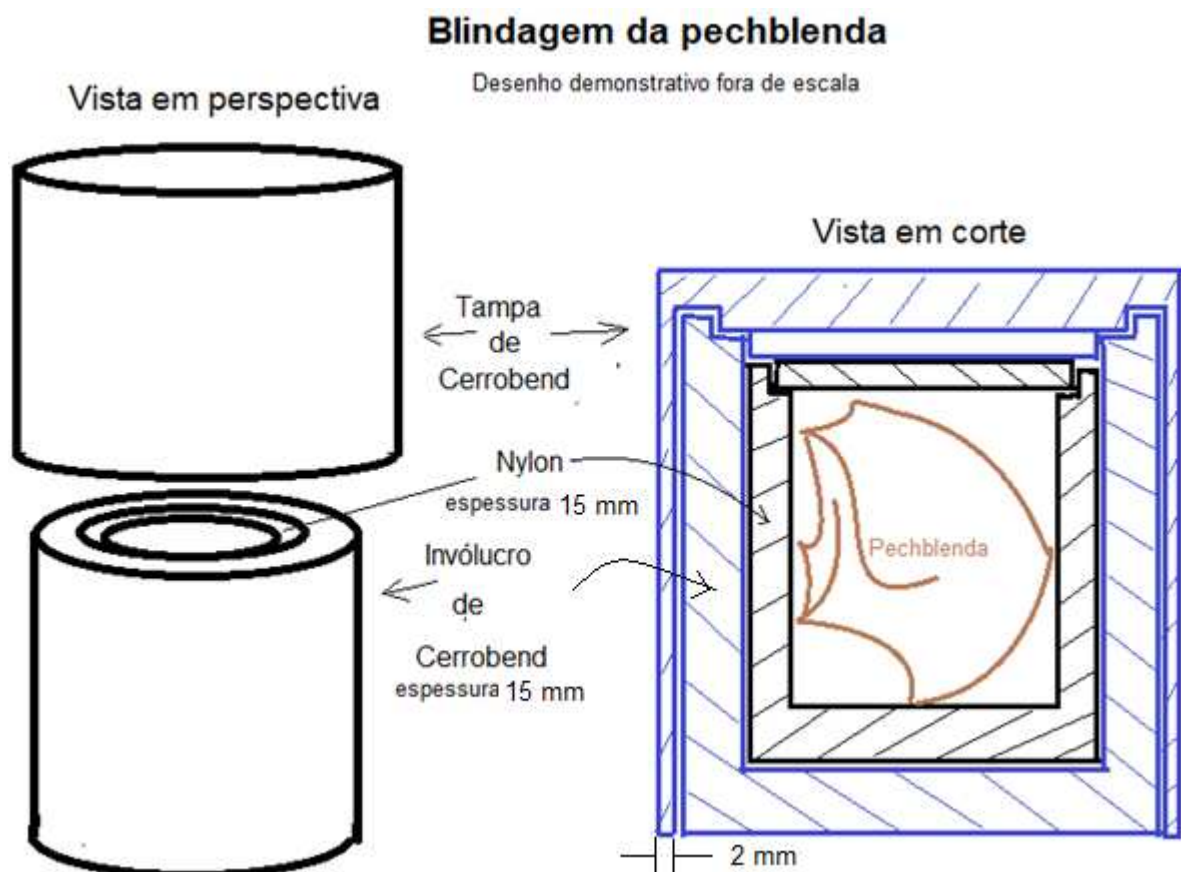


Figura 8 – Cápsula para blindagem da pechblenda do laboratório. Fonte autor

6 CONCLUSÃO

As espessuras e materiais finais para a blindagem devem ter 15 mm de Nylon na primeira camada e 15 mm de Cerrobend, sendo esperado uma dose menor que 4,4 $\mu\text{Sv/h}$ na face externa, quando portar uma pedra pechblenda de 23 $\mu\text{Sv/h}$.

Devido ao advento da pandemia o trabalho teórico e prático foi transformado em trabalho teórico, não sendo possível a confecção da blindagem conforme inicialmente traçado.

Espera-se que futuramente, pós pandemia, que, com o desenho traçado e as espessuras do Nylon e Cerrobend definidas seja possível realizar a construção da cápsula, permitindo medir a radiação na superfície externa da blindagem, com a pedra de pechblenda em seu interior, para verificar a exatidão dos cálculos teóricos efetuados neste trabalho de conclusão do curso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ATTIX, F.H.; **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2004.

CALPOLY, California State Polytechnic University. **Decay Chain**. Pomona. Disponível em: <https://www.cpp.edu/~pbsiegel/decaychain>.

CARDOSO, Elieser de Moura. **Radioatividade**: Apostila educativa. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1999.

CNEN NN 3.01. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**, Agosto / 2011.

CNEN NN 3.01. **Diretrizes Básicas de Proteção**, julho/1988. Disponível em: <https://silo.tips/download/objetivo-das-normas-limites-de-doses-ocupacionais-norma-cnen-ne301-de-julho-de-l>.

CNEN NN 3.01, Resolução 114/11. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica de proteção radiológica**, Agosto/2011.

CNEN NN 3.01, Resolução 130/14. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica de proteção radiológica**, Março/2014.

CNEN NN 3.01, Resolução 164/14. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica de proteção radiológica**, Março/2014.

CHUNG, K. C. **Introdução à física nuclear**. Edit. UERJ, Rio de Janeiro, 2001, 286p. ISBN85-7511-015-2.

FIOCRUZ, **Radiação**. Disponível em: <http://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/labvirtua/radiacao.html>

FOGAÇA, J. R. V. **Rádio: Um elemento radioativo**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/radio-um-elemento-radioativo.htm>.

FRENCH, T. E., **Desenho Técnico**. Porto Alegre, Editora Globo 1967.

GOLDSTEIN, H. **The attenuation of gamma rays and neutrons in reactor shields.**, Report, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, DC., 1957.

IAEA, **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources**, Safety Series 115, 1996.

IAEA, TECDOC-1363, **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**. Vienna, Austria, 2003.

INIS, International Nuclear Information System. **Nocões de Proteção Radiológica**:

CNEN NN 3.01 (2011) e BSS 115. Cap. 7, IAEA. https://inis.iaea.org/collection/NCL-CollectionStore/_Public/45/073/45073472.pdf.

ICRP 60, Internacional Commission on radiological protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Pergamon Press, 1991.

ICRP 103, Internacional Commission on radiological protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, 2007.

KINSEY et al., R. **THE NUDAT/PCNUDAT**: Program for Nuclear Data, paper submitted to the th International Symposium of Capture-Gamma_ray Spectroscopy and Related Topics. Budapest, Hungary, 1996.

LENNTECH. **Chemical elements list by density**. Disponível em :<https://www.lenn-tech.com/periodic-chart-elements/density.htm>.

MTE, Ministério do Trabalho. **NR 32: Segurança e saúde no Trabalho em Serviços de Saúde**. Brasília. 2011.

MORE, Chaitali V; RAMESHWAR R. BHOSALE & PRAVINA P. PAWAR. **Detection of new polimer materials as gamma-ray-shielding materials**. Marathwada University, India, Aurangabad, 2017.

NIST, alfa. **National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>.

NIST, beta. National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/method.html>.

NIST, Gama. **National Institute of Standards and Technology** . Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>.

NIST, Compostos. **National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.

OKUNO, Emico; Elisabeth Yoshimura, **Física das Radiações**. Edit. Oficina de textos, S. Paulo, 2010.

PAIVA, Eduardo de Paiva. **Princípios do cálculo de blindagem em radioterapia**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria: Revista Brasileira de Ensino de Física. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. Disponível em: www.sbfisica.org.br.

PDF, Tools. Ferramentas de PDF. Disponível em: <https://tools.pdf24.org/pt/creator>.

PHYWE – Systeme GmbH & Co.KG. **Sources catalogues**: Americium-241, 370 kBq-09090.11 & Ra-226, 4,0 kBq-09041.00, 2010.

RENÉ, MILOŠ. **History of Uranium Mining in Central Europe**: Published: December 20th 2017. DOI: 10.5772/intechopen.71962.

RESEARCHGATE, GmbH. **Mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and effective electron densities for some polymers.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225074489_Mass_attenuation_coefficients_effective_atomic_numbers_and_effective_electron_densities_for_some_polymer..

RESEARCHGATE, GmbH. **Decay chain.** Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Decay-chain-of-the-radioactive-family-of-238-U-The-half-lives-and-decay_fig2_24164287-/download.

STANFORD, University - **Standards for Protection Against Radiation.** <https://ehs.stanford.edu/manual/radiation-safety-manual/10-cfr-part-20%E2%80%90E2%80%90standards-protection-against-radiation>.

SCHAEFFER, N. M., Reactor shielding for nuclear engineer, US-AEC, Natl. Tech. Inform. Service, Springfield, 1973.

TAUHATA, L.; SALATI, I; DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 10ª revisão, Abril/2014. ISBN-978-85-67870-02-1.

TU, Technische Universität Chemnitz. **Beolingus-Deutsch-English wörter-buch.** Disponível em: <https://dict.tu-chemnitz.de/>.

UFU Repositório, biblioteca UFU. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/>.

UFU S, Template biblioteca UFU. Disponível em: <https://www.bibliotecas.ufu.br/servicos/treinamento-virtual>.

UFU T, Template biblioteca UFU. Disponível em: <https://www.bibliotecas.ufu.br/acontece/2019/09/tem-plate-para-trabalhos-academicos>.

UFU TCC, biblioteca. UFU. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/static/sobre/tutoriais/tutorial_autoarquivamento_TCC.pdf.

UFU 5, Template biblioteca UFU. Disponível em: <https://www.bibliotecas.ufu.br/acontece-/2020/11/biblios-episodio-5-templates-e-recursos-eletronicos>.

U.S. DHEW, U.S. Department of Health, Education and Welfare. **Radiological Health Handbook.** Bureau of Radiological Health. Maryland, 1970. Disponível em: [https://static1.squarespace.com/static/562e7cefe4b0b5cbdd53eb74/t/56cb836c27d4bdfc9545c5e1/1456178087755/Radiological Health Handbook 1970.pdf](https://static1.squarespace.com/static/562e7cefe4b0b5cbdd53eb74/t/56cb836c27d4bdfc9545c5e1/1456178087755/Radiological+Health+Handbook+1970.pdf).

WIKIPEDIA. **Urânio.** Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ur%C3%A2nio>.