

Serviço de Medicina Nuclear Ltda.

Cálculo de Blindagem

Autor: [Sandro Roger Boschetti](#)

Sumário

1	Introdução	4
2	Classificação	4
3	Identificação	4
3.1	Identificação da Instalação	4
3.2	Identificação do Titular	4
3.3	Identificação do Supervisor de Proteção Radiológica	4
3.4	Autor deste Documento e dos Cálculos	5
4	Método – Radionuclídeo Único	5
4.1	A Equação da Taxa de Dose	5
4.2	A Equação da Atenuação	5
4.3	Unindo as Duas Equações	6
4.4	A Atividade Média e Sua Relação com a Dose	6
4.5	Outros Fatores: Tempo de “Uptake” (F_U), Fator de Ocupação (T) e Carga de Trabalho (N)	7
5	Método – Múltiplos Radionuclídeos	8
6	Cálculos	9
6.1	Considerações Iniciais	9
6.2	Limites de Doses	12
6.3	Hipóteses Sobre os Tempos de Irradiação (t e t_U ou R_t e F_U)	12
6.4	Hipóteses Adicionais	12
6.5	Resultados	14
6.5.1	Sala de Exame	14
6.5.2	Sanitário Exclusivo de Pacientes Injetados	14
6.5.3	Sala de Espera Exclusiva de Pacientes Injetados	15
6.5.4	Administração de Radiofármacos	16
6.5.5	Laboratório de Manipulação e Armazenamento de Fontes em Uso	16
6.5.6	Sala de Rejeitos	17
6.5.7	Ergometria	17
6.5.8	Box Maca / Inalação	18
6.5.9	Corredor Interno	18
6.6	Resultados – Considerações Finais	19
6.7	Resultados Diretos do Programa	20
	Referências	26

7 Apêndices	26
A Atividade Média	26
B Coeficientes de Atenuação Linear	27
C Listagem Programa Cálculo de Blindagem	28

1 Introdução

Este documento foi elaborado com o intuito de obter da *Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)* a Autorização de Construção para o *Serviço de Medicina Nuclear (SMN) Serviço de Medicina Nuclear Ltda.*, segundo o Ato Administrativo correspondente e aderente às normas da CNEN, em especial à norma (CNEN, 2014b, NN-6.02).

É parte integrante deste documento o cálculo de blindagens para as paredes, portas, pisos e tetos das áreas desse SMN. O cálculo de blindagens é fortemente inspirado no documento (Madsen et al., 2006, AAPM-TG-108) da *The American Association of Physicists in Medicine (AAPM)*.

2 Classificação

Embora o ato administrativo na CNEN relativo à solicitação de autorização para construção não exija a classificação da instalação nesta fase, fizemos aqui o cálculo para verificar que a instalação se classifica como sendo do Grupo 5.

Radionuclídeo	Bq/g	mCi/g	Bq (1)	μCi	Aquisição Semanal (mCi)	Aquisição Semanal (Bq)	Atividade Normalizada i (2)
Tc-99m	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+07	270,27	1000	3,70E+10	3700
I-131	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+06	27,03	50	1,85E+09	1850
I-123	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+07	270,27	15	5,55E+08	56
Ga-67	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+06	27,03	20	7,40E+08	740
Tl-201	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+06	27,03	10	3,70E+08	370
Sm-153	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+06	27,03	100	3,70E+09	3700
Ra-223	1,00E+02	2,70E-06	1,00E+05	2,70	1,62	5,99E+07	599
Atividade Normalizada:							11014,90
(2) Grupo:							5

(1) Tabela 1 níveis de isenção da norma 3.01 posição regulatória 001/2011 página 3.

(2) Norma 6.02, Licenciamento de Instalações Radiativas (Resolução CNEN 215/17), art 4º página 3.

3 Identificação

3.1 Identificação da Instalação

Razão Social: Serviço de Medicina Nuclear Ltda.

CNPJ: 00.000.000/0001-00

Endereço: Rua XXXX, 0000, Cidade XXXX, CEP: 00.000-000

3.2 Identificação do Titular

Nome: XXXX

CPF: 00.000.000-00

CRM: 0000

3.3 Identificação do Supervisor de Proteção Radiológica

Nome: XXXX

CPF: 00.000.000-00

CNEN: FM-0000

3.4 Autor deste Documento e dos Cálculos

Nome: Sandro Roger Boschetti
CPF: 000.000.000-00
RG: XX-00.000.000
CNEN: FM-0000
ABFM: MN-000/000

4 Método – Radionuclídeo Único

Como mencionado na seção 1, o método de cálculo de blindagem em *medicina nuclear (MN)* usado aqui é fortemente baseado naquele constante em (Madsen et al., 2006, AAPM-TG-108). Esse método aplica-se à medicina nuclear que emprega *Positron Emission Tomography – PET*. Neste documento, adaptou-se esse método à medicina nuclear convencional sem *PET* e sem *tomografia computadorizada (Computed Tomography – CT)* integrada.

O método leva em consideração basicamente 3 quesitos: 1) os limites de dose de indivíduo do público e de IOE, 2) a distância da fonte de radiação ao ponto de interesse e 3) o tempo em que o indivíduo fica exposto. Este é dependente do tempo que o indivíduo permanece no ponto de interesse (fator de ocupação – T) assim como o tempo em que a fonte está presente. Há também uma dependência de características da fonte tais como atividade e energia, como ficará mais claro adiante.

4.1 A Equação da Taxa de Dose

Como a fonte é considerada pontual, ou seja, a geometria é radial, então pode-se considerar a equação 1 para o cálculo da taxa de dose de radiação a uma distância d de uma fonte pontual com atividade A .

$$\dot{D} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (1)$$

Na equação 1, Γ é a constante de proporcionalidade e encerra em si uma série de informações importantes sobre a fenomenologia que ocorre nesse caso.

4.2 A Equação da Atenuação

Outra equação importante para o entendimento do método é a da atenuação (equação 2) cuja dedução pode ser encontrada em (Eisberg e Resnick, 1985, página 48) e em (Lamarsh e Baratta, 2001, página 54).

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

A equação 2 dá a intensidade I de um feixe de radiação, após passar por uma blindagem, em função da intensidade do feixe incidente I_0 e da espessura da blindagem x . O parâmetro $\mu = \mu(z, \rho, E)$ é a seção de choque macroscópica do feixe e dependente de características da blindagem como o número atômico z e a densidade ρ e do feixe de radiação como sua energia E . A seção de choque macroscópica μ é também referenciada, no jargão na física nuclear, como $\Sigma = N\sigma$, em que N é a densidade de átomos e σ é a seção de choque microscópica em unidades do inverso do quadrado de comprimento. Assim, como é o caso da equação 1, essa equação (equação 2) possui uma série de restrições ao seu uso. Em princípio, ela só poderia ser utilizada para feixes de radiação finos, colimados e monoenergéticos. Além disso, só poderia ser aplicada em casos em que a espessura

da barreira, x , é fina. Mesmo assim, essa equação é utilizada por ser uma aproximação razoável e suficiente aos propósitos almejados.

4.3 Unindo as Duas Equações

A intensidade I do feixe da equação 2 é diretamente proporcional à dose D ou à taxa de dose \dot{D} num ponto de interesse. Assim, podemos escrever:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

A equação 3 dá a taxa de dose \dot{D} em um ponto de interesse considerando uma blindagem de espessura x e coeficiente de atenuação linear μ (seção de choque macroscópica). \dot{D}_0 é a taxa de dose que ocorreria no ponto de interesse caso não houvesse a blindagem.

Estamos interessados em conhecer a espessura da blindagem x que é necessária para diminuir a dose D_0 ao limite D estabelecido pelos órgão reguladores e pelas recomendações internacionais. Para se obter a espessura da blindagem, deve-se simplesmente inverter a equação 3. Em especial, é interessante obter um valor intermediário que é a percentagem ou porção de radiação que ultrapassa a barreira. Essa quantidade é designada por B e é dada por:

$$B = \frac{\dot{D}}{\dot{D}_0} = e^{-\mu x} \quad (4)$$

Por exemplo, se a taxa de dose estabelecida por lei em um determinado ponto é $20 \mu\text{Sv}$ por semana e observa-se que o local exibe uma taxa de dose de $50 \mu\text{Sv}$ por semana devido a uma fonte de ^{99m}Tc , então a blindagem deve proporcionar uma redução tal que o feixe após a blindagem tenha uma intensidade máxima de $B = 20/50 = 40\%$ da intensidade inicial. Caso a blindagem escolhida fosse de Pb ($\mu = 2,558 \text{ mm}^{-1}$ segundo (Cherry et al., 2012)), então precisaríamos de uma camada de Pb de espessura $x = -\ln(0,4)/2,558 = 0,358 \text{ mm}$.

Até aqui foi feita uma explicação em linhas gerais sobre o método de cálculo de blindagem em medicina nuclear que considera apenas um radionuclídeo. A seguir, faremos algumas considerações especiais para enriquecer o método e torná-lo mais abrangente. Serão consideradas características que tem a ver com a dinâmica que é específica da medicina nuclear tal como a atividade média durante o período de exame e o tempo de decaimento do material dentro do paciente até o momento do exame. Além disso, explica-se também sobre a carga de trabalho, tempo médio de ocupação no ponto de interesse e a blindagem em si.

4.4 A Atividade Média e Sua Relação com a Dose

Em medicina nuclear, uma fonte de radiação importante a ser considerada nos cálculos de blindagens é o paciente ao qual fora administrada alguma quantidade de atividade de algum radiofármaco (radionuclídeo). Embora essa atividade possa ser administrada ao paciente por várias vias (oral, aérea, intravenosa), é comum, por simplicidade, referir-se a eles como pacientes injetados. Esses pacientes injetados portam consigo uma certa atividade de material radioativo e essa atividade não é constante no tempo. Ela diminui por decaimento radioativo e por eliminação biológica (excreção urinária, por exemplo). Dessa forma, ao se considerar uma certa atividade a ser blindada, é importante considerar também essa diminuição da atividade. Se a um paciente fora injetado 30 mCi e ele permanece em uma sala de espera de pacientes injetados por aproximadamente $1,5 \text{ h}$, nesse tempo, essa atividade diminui. Se considerarmos a equação 3 para o cálculo da dose e consideramos que nesse tempo a atividade é constante, superestimaríamos a dose, já que a atividade média é menor do que 30 mCi . Vide equação 5 da atividade média e o apêndice A.

$$\overline{A(t)} = A_0 \frac{T_{1/2}}{t \cdot \ln(2)} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

Desse raciocínio temos que a dose média durante o tempo t é

$$\overline{\dot{D}(t)} = \Gamma \frac{\overline{A(t)}}{d^2} \quad (6)$$

E a dose integrada no tempo t é:

$$\overline{\dot{D}(t)} \cdot t = \Gamma \frac{\overline{A(t)}}{d^2} \cdot t \quad (7)$$

Substituindo $\overline{A(t)}$ da equação 7 por sua expressão dada pela equação 5 e fazendo $D_0 = \overline{\dot{D}(t)} \cdot t$, temos:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0 \frac{T_{1/2}}{t \cdot \ln(2)} (1 - e^{-\lambda t})}{d^2} \cdot t \quad (8)$$

ou, reorganizando:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0}{d^2} \frac{T_{1/2}}{t \cdot \ln(2)} (1 - e^{-\lambda t}) \cdot t \quad (9)$$

Fazendo:

$$R_t = \frac{T_{1/2}}{t \cdot \ln(2)} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (10)$$

temos:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0}{d^2} R_t \cdot t \quad (11)$$

A dose D_0 é a dose total em um tempo t em um dado ponto de interesse devido a uma fonte pontual cuja atividade inicial é A_0 e decai com o tempo. Nesse caso, não há blindagem entre a fonte e o ponto de interesse. Esse fato está codificado pelo subscrito 0 em D_0 .

4.5 Outros Fatores: Tempo de “Uptake” (F_U), Fator de Ocupação (T) e Carga de Trabalho (N)

Na equação 11, A_0 é a atividade administrada ao paciente e considera-se que o período de tempo t é imediatamente após essa administração, ou seja, A_0 é a atividade no paciente no início do período ($t_0 = 0$ e o tempo em que ocorre a administração do radiofármaco). Ocorre que, em certas situações, o cálculo deve ser feito durante um período de tempo t que se inicia após um tempo t_U da administração do radiofármaco. Deste modo, a atividade no paciente no início desse período não é mais A_0 devido ao decaimento radioativo. Tal atividade é dada por $A_0 e^{-\lambda t_U}$.

Por simplicidade e para não carregar muitos termos nas equações, define-se o fator F_U de decaimento a seguir:

$$F_U = e^{-\frac{\ln(2) t_U}{T_{1/2}}} \quad (12)$$

Incorporando F_U da equação 12 na equação 11 temos:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0}{d^2} R_t F_U t \quad (13)$$

Além disso, o ponto a ser blindado não é ocupado por pessoas o tempo todo. A porção de tempo em que o ponto de interesse fica ocupado chamamos de fator de ocupação e o simbolizamos por T sendo $0 \leq T \leq 1$. Depois de incorporar o termo fator de ocupação na equação 13, temos:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0}{d^2} R_t F_U T t \quad (14)$$

Esses três fatores, R_t , F_U , e T reduzem a dose inicial (sem barreira) em um determinado ponto e acabam por diminuir as restrições em termos de blindagem. Existe ainda mais um fator que reduz as restrições na blindagem como veremos mais adiante. Esse fator está relacionado com a percentagem de fótons que não escapam do paciente devido a absorção no tecido.

Por último, considera-se a carga de trabalho do SMN, ou seja, o número de pacientes por semana N , com cada um recebendo uma atividade média de A_0 . Então a equação da dose fica:

$$D_0 = \Gamma \frac{A_0}{d^2} N R_t F_U T t \quad (15)$$

O caso até aqui descrito refere-se a situação em que apenas um radionuclídeo é utilizado no serviço. Quer dizer, a atividade média A_0 e N , assim como $T_{1/2}$ e Γ nas equações 10, 12 e outras, tem a ver com esse único radionuclídeo. Se assim for, para encontrar a espessura necessária de um dado material com uma determinada CSR para diminuir a dose inicial D_0 à dose limite D , é só invertermos a equação 4 utilizando o limite D e a dose D_0 da equação 15. Então temos:

$$x = \frac{\ln \left(\frac{\Gamma A_0 N R_t F_U T t}{D \cdot d^2} \right)}{\mu} \quad (16)$$

ou,

$$x = \left(\frac{CSR}{\ln(2)} \right) \ln \left(\frac{\Gamma A_0 N R_t F_U T t}{D d^2} \right) \quad (17)$$

5 Método – Múltiplos Radionuclídeos

Em um serviço de medicina nuclear típico, cerca de 90% dos procedimentos utiliza o radionuclídeo ^{99m}Tc , sendo os demais de uso esporádico. Para alguns, isso pode justificar os cálculos de blindagem considerando apenas a utilização do ^{99m}Tc .

No entanto, em algumas situações a CNEN pode não aceitar o cálculo de blindagem aproximado utilizando-se um único radionuclídeo, mesmo que praticamente todos os procedimentos do serviço sejam apenas com ^{99m}Tc . Assim, é necessário fazer modificações no método proposto inicialmente na seção 4 para considerar todos os radionuclídeos que o serviço de medicina nuclear intenta utilizar.

Nesse caso, a principal dificuldade que se encontra é que não há forma analítica para a solução das equações para se encontrar a espessura de blindagem que atenda as necessidades. Então, é necessário utilizar métodos numéricos para encontrar tal solução.

Para entender melhor o problema, comecemos por equacionar a contribuição do radionuclídeo i para a dose semanal D_0 no ponto de interesse sem a blindagem.

$$D_{0i} = \frac{\Gamma_i A_{0i} N_i R_{ti} F_{Ui} T t}{d^2} \quad (18)$$

Na equação 18 assumimos, por simplicidade, que o tempo t dos procedimentos sejam iguais independentemente do radionuclídeo. O parâmetro T não depende do radionuclídeo e é uma característica da vizinhança para a qual se deseja uma blindagem.

A dose D_0 é a dose total (sem blindagem) formada pela contribuição de todos os radionuclídeos e que deve ser menor ou igual a dose limite D . Logo:

$$D_0 = \sum_i D_{0i} = \frac{(\sum_i \Gamma_i A_{0i} N_i R_{ti} F_{Ui}) Tt}{d^2} \leq D \quad (19)$$

Se essa condição não for satisfeita, então é necessário blindagem. A questão é que cada radionuclídeo tem seu fator de blindagem, ou seja, a dose de cada radionuclídeo após uma barreira de espessura x e camada semirredutora CSR é:

$$D_i = D_{0i} e^{-\frac{\ln 2}{CSR_i} x} \quad (20)$$

Ou, reescrevendo:

$$D_i = \frac{\Gamma_i A_{0i} N_i R_{ti} F_{Ui} Tt}{d^2} e^{-\frac{\ln 2}{CSR_i} x} \quad (21)$$

e a dose total advinda da contribuição de todos os radionuclídeos após a blindagem é:

$$\sum_i D_i = \sum_i \frac{\Gamma_i A_{0i} N_i R_{ti} F_{Ui} Tt}{d^2} e^{-\frac{\ln 2}{CSR_i} x} \leq D \quad (22)$$

Essa é uma equação que deve ser resolvida para x e não tem solução analítica. Para resolvê-la, será utilizado o método numérico que consiste em atribuir valores de x desde zero até o valor que efetivamente dá dose menor do que o limite D . Isso pode ser feito, já que cada parcela é uma função monotonicamente decrescente de x sendo também, portanto, o somatório.

Para encontrar a solução numérica para cada blindagem utiliza-se um programa de computador escrito em Octave cuja listagem pode ser vista no apêndice C.

6 Cálculos

Os cálculos das blindagens são realizados por meio de um programa de computador escrito pelo autor deste documento (**Sandro Roger Boschetti**). Esse programa foi escrito na linguagem Octave e sua listagem pode ser vista no apêndice C. Pode ser também visualizado em https://github.com/sandrorb/CalculoBlindagemMN/blob/master/calculo_blindagem.m e pode ser baixado em <https://github.com/sandrorb/CalculoBlindagemMN> ou <https://sandrorb.github.io/CalculoBlindagemMN>. Para a execução desse programa, tem-se como uma opção o site <http://octave-online.net> embora a melhor opção é baixar o *software* gratuito em <https://www.gnu.org/software/octave>

6.1 Considerações Iniciais

Para os cálculos de blindagem para este serviço de medicina nuclear (vide seção 3), consideramos um fluxo de 152 pacientes por semana distribuídos segundo a tabela 1. Nesta tabela encontra-se também a atividade média de cada radionuclídeo administrada aos pacientes.

As meias-vidas físicas dos radionuclídeos foram obtidas de (ICRP, 2007).

Com relação a constante Γ , várias fontes literárias foram consultadas e diferentes valores foram encontrados. Em (Unger e Trubey, 1982, página 22) o valor dessa constante para o ^{99m}Tc é $3,317 \times 10^{-5} \frac{\text{mSv}}{\text{MBq}\cdot\text{h}}$ a 1 m. Informações dão conta de que esse valor tem sido aceito pela CNEN. Já o valor adotado por (Facure, Slides de Aula) é de $0,0195 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{MBq}$ a 1 m para uma fonte pontual e de $0,0075 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{MBq}$ a 1 m para paciente (considerando atenuação do paciente).

Radionuclídeo	Atividade Semanal		$T_{1/2}$ (h)	Atividade por Paciente	N
	mCi	MBq			
^{99m}Tc	1000	37000	6,02	30	120
^{131}I	50	1850	192,0	30 ou 5 ou 0,2	10
^{123}I	15	555	13,2235	5	5
^{67}Ga	20	740	78,24	5	4
^{201}Tl	10	370	73,0104	10	2
^{153}Sm	100	1850	46,284	50	1
$^{223}\text{Ra}^*$	1,6	59,2	11,4	0,16	10

Tabela 1: Lista dos radionuclídeos e suas respectivas atividades semanais a serem utilizadas no serviço, meias vidas-físicas, atividades administradas por paciente e números de pacientes semanais. A meia-vida física é proveniente de (ICRP, 2007). *O ^{223}Ra não entra no cálculo de blindagem por ser emissor α . Dos pacientes aos quais são administradas doses de ^{131}I , somente os que recebem doses iguais ou menores do que 5 mCi aguardam na sala de espera de pacientes injetados. As doses terapêuticas maiores que 5 mCi e menores do que 50 mCi são administradas ambulatorialmente e os pacientes são liberados para irem às suas residências.

Por último, há o livro (Cherry et al., 2012, página 435), uma das mais importantes e conhecidas referências em medicina nuclear, cujo valor é de $0,0141 \frac{\text{mGy m}^2}{\text{GBq h}}$.

O valor adotado da constante Γ para o ^{99m}Tc foi o de (Cherry et al., 2012, página 435), ou seja, $\Gamma = 0,0141 \frac{\text{mGy m}^2}{\text{GBq h}}$.

Por solicitação da CNEN em análise de um outro projeto, não consideraremos a atenuação do paciente e, portanto, não teremos uma constante Γ especial para esse caso. Isso faz com que, com relação a esse quesito, espessura das blindagens sejam superestimadas.

As demais constantes Γ para os outros radionuclídeos são oriundas de (Unger e Trubey, 1982). A lista de todas as constantes Γ encontram-se na tabela 2.

Radionuclídeo	Γ $\mu\text{Sv m}^2 \text{ MBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$	CSR (cm)		
		Pb	Barita	Concreto
^{99m}Tc	0,01410	0,025	0,272	1,911
^{131}I	0,07647	0,233	1,776	3,018
^{123}I	0,07478	0,039	0,580	2,208
^{67}Ga	0,03004	0,034	0,508	2,142
^{201}Tl	0,02372	0,017	0,149	1,653
^{153}Sm	0,02440	0,014	0,056	1,195

Tabela 2: Lista dos radionuclídeos e de suas respectivas constantes Γ e camadas semirredutoras (csr ou CSR) para as três opções que o serviço poderá utilizar: chumbo (Pb), barita e concreto. O Γ do ^{99m}Tc foi retirado de (Cherry et al., 2012, página 435) e os demais foram obtidos em (Unger e Trubey, 1982).

Os valores das camadas semirredutoras para os 3 diferentes materiais, chumbo, barita e concreto, para os diversos radionuclídeos estão listados na tabela 2. As CSRs foram obtidas por meio da expressão:

Local	Fator de Ocupação Recomendado (T)
<ul style="list-style-type: none"> • postos de trabalho com ocupação permanente (escritórios, laboratórios, farmácias hospitalares, consultórios, recepções, postos de espera/guarda da enfermagem/atendentes) • áreas para guarda/cuidados de crianças 	1
<ul style="list-style-type: none"> • postos de trabalho com ocupação parcial (devem estar devidamente justificadas) • leitos hospitalares • corredores • salas de descanso para os trabalhadores/Copa 	1/5
<ul style="list-style-type: none"> • portas com acesso aos corredores 	1/8
<ul style="list-style-type: none"> • sanitários • depósitos/almoxxarifados • áreas externas com local para espera • sala de espera para acompanhantes 	1/20
<ul style="list-style-type: none"> • áreas externas de trânsito (sem ocupação fixa) • estacionamento 	1/40

Tabela 3: Lista dos fatores de ocupação sugeridos pela CNEN em seu documento “manual NEW P3 Licenciamento e Controle de Instalações Medicinas”.

$$CSR = \frac{\ln 2}{\mu},$$

em que μ é o coeficiente de atenuação linear. Este, por sua vez, foi obtido por meio da expressão:

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \rho,$$

já que as tabelas não relacionam o μ diretamente mas sim o coeficiente de atenuação mássico ($\mu\rho^{-1}$). Essa fração, assim como a densidade ρ , foram obtidos de (Hubbell e Seltzer, 1993) e estão listadas na tabela 4. No entanto, o coeficiente de atenuação mássico, μ/ρ , não consta na referência para toda e qualquer energia e também não há uma expressão analítica para ele. A obtenção desse coeficiente para energias intermediárias foi realizada por meio de interpolação linear.

Adicionalmente, para o caso em que o radionuclídeo tenha mais de uma energia, como é o caso do ^{67}Ga , o procedimento adotado consistiu em se obter o μ para cada energia e então obter o “ μ_{efetivo} ” por meio de uma soma ponderada em que os pesos são a abundância relativa de cada energia. Para maiores detalhes sobre a obtenção dos valores das camadas semirredutoras, consulte o apêndice B.

6.2 Limites de Doses

Segundo (CNEN, 2014a, NN-3.01), as doses anuais para indivíduo do público e IOE são, respectivamente, 1 mSv e 20 mSv. No entanto, tem-se adotado o limite de 5 mSv/ano para IOE como critério para o cálculo de blindagem (*Shielding Design Goal*). Esse é o caso em (Madsen et al., 2006, AAPM-TG-108). O ano, segundo a proteção radiológica, tem 50 semanas. Logo, os limites semanais adotados neste documento serão de $20 \mu\text{Sv/sem}$ para indivíduos do público e de $100 \mu\text{Sv/sem}$ para IOEs.

6.3 Hipóteses Sobre os Tempos de Irradiação (t e t_U ou R_t e F_U)

Algumas hipóteses adotadas neste documento são de que o paciente passa, em média, um tempo de $t_U = 1,5 \text{ h}$ na sala de espera de pacientes injetados, $t = 0,5 \text{ h}$ na sala de exames, $t = 0,5 \text{ h}$ na sala de ergometria (logo após a injeção). Essas hipóteses tem impacto nos cálculos dos fatores R_t e F_U .

Considerações importantes também são feitas a respeito de cada uma das outras áreas controladas do SMN: Sanitário Exclusivo, Sala de Administração de Radiofármacos, Laboratório de Manipulação e Armazenamento de Fontes em Uso, Sala de Armazenamento de Rejeitos Radioativos e Sala de Inalação.

Supõe-se que o tempo médio de que um paciente passa no sanitário exclusivo é de 3 minutos.

Já para a Sala de Administração de Radiofármacos, admite-se que uma fonte de cada radionuclídeo de atividade típica de injeção, conforme tabela 1, fica fora da blindagem por um período aproximado de 10 minutos por dia.

Supõe-se que, no Laboratório, cada dose típica a ser preparada para os pacientes fica, em média, durante o preparo, 10 minutos fora de suas respectivas blindagens.

A atividade efetiva que consta na Sala de Decaimento de Rejeitos Radioativos irradia as áreas vizinha permanentemente. No entanto, consideraremos uma irradiação de 40h semanais, pois essa é a jornada de trabalho máxima dos ocupantes das áreas vizinhas.

A Sala de Inalação admite-se que é usada exclusivamente para pacientes aos quais se é administrado o ^{99m}Tc por 30 minutos cada um num total de 30 pacientes por semana.

No corredor interno, admite-se que o paciente permaneça no máximo 1 minuto, pois é uma área apenas de transição entre ergometria e sala de espera e injeção e sala de espera.

6.4 Hipóteses Adicionais

No laboratório, por determinação das normas da CNEN e em atendimentos às melhores práticas de proteção radiológica, todas as fontes são blindadas. As blindagens são: cercado de 5 cm de Pb para geradores, caixas blindadas em 3 a 5 mm de Pb para rejeitos, blindagem de diluição em forma de “L” de 3 a 5 cm de Pb e blindagens variadas para frascos e seringas de no mínimo 3 mm de Pb.

Na Sala de Decaimento de Rejeitos Radioativos supõe-se que as fontes são compostas de uma percentagem de 10% da quantidade recebida semanalmente armazenadas na forma de volumes de caixas perfurocontantes ou sacos plásticos. Como, por força da lei (normas da CNEN), esses volumes permanecem blindados, então as atividades efetivas a serem blindadas pelas paredes desta área controlada são uma combinação entre a percentagem da quantidade recebida e quantidade de radiação que ainda consegue ultrapassar as blindagens. Esta atividade efetiva expõe as áreas vizinhas permanentemente, mas nos interessa somente a proteção radiológica das pessoas que eventualmente ocupam essas áreas vizinhas, ou seja, um tempo de irradiação máximo de 40h semanais. A espessura de Pb das blindagens dos volumes de rejeitos consideradas nos cálculos é de 5 mm.

Em situações em que o ponto de interesse recebe irradiação de mais de uma fonte para as quais cada

uma tem sua blindagem, será considerado como limite de dose o limite de dose normal dividido pelo número de paredes (“ponto cruzado”).

Paredes que dividem dois ambientes em que cada um é fonte e alvo ao mesmo tempo, será calculada a blindagem necessária em duas vias e a maior espessura prevalece.

A dose de ^{131}I média adotada é de 5 mCi para a sala de exames, sala de espera de pacientes injetados, e sanitário exclusivo de pacientes injetados. A Sala de Administração de Radiofármacos e o Laboratório adota-se 30 mCi. A Sala de Decaimento de Rejeitos Radioativos tem regras especiais, como descrito acima e a Ergometria e a Sala de Inalação só se considera o ^{99m}Tc .

Considera-se para estes cálculos que a fonte-paciente esteja a 1,5 m do piso e a fonte-rejeito esteja a 0,5 m do piso.

A distância do piso ao teto (pé-direito) do SMN é de 3,0 m. O pé-direito do andar inferior é de 4,0 m e do andar superior é de 3,0 m. Tanto o teto quanto o piso são feitos de lajes duplas com 10 cm de espessura de concreto cada uma e separadas entre si por uma distância de 40 cm. A densidade do concreto (cimento, areia e brita) é de $2.200 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$.

Há que se considerar que parte do SMN é localizada numa área do hospital que anteriormente era uma varanda. Está parte tem seu teto construído em telhado e não há nenhuma ocupação acima dela. As áreas do SMN que estão nessa parte são: sanitário exclusivo para pacientes injetados, sala de espera de pacientes injetados, sala de administração de radiofármacos, (**maior parte do**) laboratório de manipulação e armazenamento de fontes em uso (sala quente) e sala de guarda de rejeitos radioativos em decaimento. Neste caso, o fator de ocupação é $T = 0$ e, portanto, não há necessidade de blindagem nos tetos dessas áreas. O cálculo da espessura de blindagem para o teto do laboratório serve para a parte que há laje. A parte de telhado não será blindada dado o fator de ocupação $T = 0$.

Considera-se também que todos os pontos P1 situados nas áreas que estão no vão livre atrás das paredes W1 das áreas Sanitário Exclusivo, Espera de Pacientes Injetados, Administração de Radiofármacos, Laboratório e Guarda de Rejeitos tem fator de ocupação $T = 0$, pois ficam na rua a uma altura de uns 4 m da calçada.

Para nos assegurar das densidades dos materiais que consideramos como opção para a blindagem, além de obtermos documentos dos fornecedores em que constam esse parâmetro, pode-se fazer o seguinte experimento.

Material	Densidade $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Chumbo	11,35
Barita	3,35
Concreto	2,30

Tabela 4: Lista dos materiais para os quais são realizados os cálculos de blindagem com suas respectivas densidades obtidas em (Hubbell e Seltzer, 1993).

Obter uma amostra do material a ser testado e pesá-lo para se avaliar sua massa m . Para o caso do concreto e da barita, utiliza-se uma porção representativa e com as características que a massa terá no momento da aplicação (ex.: traço) e espera-se que seque. Após, o material deve ser envolto em uma fina camada plástica para ficar impermeável. Então, imerge-se o volume em um recipiente completamente cheio de água e coleta-se toda a água que transborda. Mede-se a água coletada para avaliar o volume V . A densidade ρ é então calculada como sendo:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

6.5 Resultados

Foi implementado um programa em `Octave` para facilitar e automatizar a realização dos cálculos e, principalmente, para realizar numericamente a solução do cálculo de espessura de blindagem da equação 22.

O programa pode ser visto no apêndice C e os resultados dos cálculos realizados por ele são mostrados a seguir. Os dados apresentados estão codificados por **W** (parede), **F** (fonte) e **P** (ponto de interesse) e são mapeados na planta que acompanha este documento. As espessuras calculadas para as blindagem de chumbo (Pb), Barita e Concreto nas 3 últimas colunas das tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 estão todas em centímetros (cm) e os valores das doses estão em μSv .

Lista dos dados resultante dos cálculos realizados pelo programa listado no apêndice C. As três primeiras colunas são **W = parede**, **F = fonte** e **P = ponto**. As linhas da tabela estão mapeadas na planta que acompanha este documento. Nas três últimas colunas estão listados os resultados dos cálculos que são as espessuras das blindagem em centímetros (cm). Em vermelho, os valores de espessura de barita com mais de 2,5 cm.

Em cada tabela contendo os resultados de cada sala, a penúltima linha é do piso e a última é do teto.

6.5.1 Sala de Exame

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl e ^{153}Sm são respectivamente 30, 5, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1.

Tabela 5: Sala de Exame

W	F	P	t	t_u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.500	1.500	0.200	3.037	100.00	19.75	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.500	1.500	0.200	2.763	100.00	23.88	0.000	0.000	0.000
3	1	3	0.500	1.500	1.000	2.616	20.00	133.10	0.085	0.918	5.427
4	1	4	0.500	1.500	0.200	2.818	20.00	22.96	0.006	0.055	0.388
5	1	5	0.500	1.500	1.000	2.736	20.00	121.68	0.080	0.865	5.166
6	1	6	0.500	1.500	0.200	3.309	100.00	16.64	0.000	0.000	0.000
Piso			0.500	1.500	0.200	2.400	20.00	31.64	0.019	0.192	1.295
Teto			0.500	1.500	1.000	2.400	20.00	158.19	0.096	1.027	5.933

6.5.2 Sanitário Exclusivo de Pacientes Injetados

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl e ^{153}Sm são respectivamente 30, 5, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1. O tempo médio de permanência do paciente nesta área é de 3 minutos.

Tabela 6: Sanitário Exclusivo de Pacientes Injetados

W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.050	0.000	0.000	1.686	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.050	0.000	0.200	1.236	20.00	14.20	0.000	0.000	0.000
3	1	3	0.050	0.000	1.000	1.848	20.00	31.76	0.018	0.192	1.301
4	1	4	0.050	0.000	1.000	1.258	20.00	68.45	0.050	0.542	3.483
Piso			0.050	0.000	0.200	2.400	20.00	3.76	0.000	0.000	0.000
Teto			0.050	0.000	0.000	2.400	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000

6.5.3 Sala de Espera Exclusiva de Pacientes Injetados

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl e ^{153}Sm são respectivamente 30, 5, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1.

Com a finalidade de se realizar um cálculo mais realista para a espessura de blindagem da porta da sala de exames, optou-se por assumir um tempo de 15 minutos de permanência dos pacientes de ^{131}I na sala de espera de pacientes injetados, em vez de 1,5h como dos outros radionuclídeos. Para a realização deste cálculo em particular, optou-se por realizá-lo não pelo programa que realiza o cálculo dos outros pontos, mas por meio de uma planilha. O resultado desse cálculo específico é mostrado na imagem abaixo.

Tabela 7: Sala de Espera Exclusiva de Pacientes Injetados. **Desconsiderar o resultado para a barreira 5 (porta da sala). O cálculo para a porta foi realizado por meio de uma planilha em anexo cujo resultado é exibido nesta seção 6.5.3.**

W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	1.500	0.000	0.000	1.812	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2	1	2	1.500	0.000	1.000	3.125	100.00	309.76	0.046	0.498	3.204
3	1	3	1.500	0.000	0.200	2.811	100.00	76.56	0.000	0.000	0.000
4	1	4	1.500	0.000	1.000	1.993	100.00	761.56	0.091	0.981	5.802
5	1	5	1.500	0.000	1.000	2.299	20.00	572.32	0.247	2.234	9.720
6	1	6	1.500	0.000	0.050	3.210	20.00	14.68	0.000	0.000	0.000
Piso			1.500	0.000	0.200	2.400	20.00	105.03	0.071	0.767	4.723
Teto			1.500	0.000	0.000	2.400	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Cálculo de Blindagem em Medicina Nuclear																	
2						1,5	0,0			1,0	2,299							
3						t	t _u	Rt	F.u	T	d							
4	Radionuclídeo	T _{1/2}	Gamão	A	N							Dose (Doi)						
5	^{99m} Tc	6,02	0,01410	30	120	1,5	0,0	0,918	1,0	1,0	2,299	489,522	0,025	13,126	0,272	12,022	1,911	17,630
6	¹³¹ I	192	0,07647	5	10	0,25	0,0	1,0	1,0	1,0	2,299	6,689	0,233	4,536	1,776	3,791	3,018	0,815
7	¹²³ I	13,2235	0,07478	5	5	1,5	0,0	0,962	1,0	1,0	2,299	18,879	0,039	1,856	0,58	3,319	2,208	1,063
8	⁶⁷ Ga	78,24	0,03004	5	4	1,5	0,0	0,993	1,0	1,0	2,299	6,267	0,034	0,438	0,508	0,861	2,142	0,323
9	²⁰¹ Tl	73,0104	0,02372	10	2	1,5	0,0	0,993	1,0	1,0	2,299	4,946	0,017	0,024	0,149	0,006	1,653	0,106
10	¹⁵³ Sm	46,284	0,02440	50	1	1,5	0,0	0,989	1,0	1,0	2,299	12,668	0,014	0,020	0,056	0,000	1,195	0,062
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19	Observação 1: não incluir nem excluir linhas ou colunas, caso contrário a macro não funcionará.																	
20	Observação 2: o tempo de permanência de pacientes de Iodo-131 na sala de espera de pacientes injetados é menor, 15 minutos.																	
21																		
22																		
23																		
24																		

Dose sem considerar blindagem (Do): 538,971

Limite Semanal: 20

Material	Espessura (cm)
Chumbo	0,131
Barita	1,455
Concreto	9,164

Calcular

6.5.4 Administração de Radiofármacos

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc, ¹³¹I, ¹²³I, ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl e ¹⁵³Sm são respectivamente 30, 30, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1.

Tabela 8: Administração de Radiofármacos.

							Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.167	0.000	0.000	1.866	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.167	0.000	1.000	1.939	100.00	126.83	0.013	0.126	0.734
3	1	3	0.167	0.000	0.200	2.240	20.00	19.02	0.000	0.000	0.000
4	1	4	0.167	0.000	0.200	1.722	20.00	32.18	0.026	0.267	1.477
Piso			0.167	0.000	0.200	2.400	20.00	16.57	0.000	0.000	0.000
Teto			0.167	0.000	0.000	2.400	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000

6.5.5 Laboratório de Manipulação e Armazenamento de Fontes em Uso

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc, ¹³¹I, ¹²³I, ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl e ¹⁵³Sm são respectivamente 30, 30, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1.

Tabela 9: Laboratório de Manipulação e Armazenamento de Fontes em Uso.

							Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.167	0.000	0.000	1.784	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.167	0.000	0.050	1.703	100.00	8.22	0.000	0.000	0.000

3	1	3	0.167	0.000	1.000	2.360	20.00	85.66	0.121	1.140	4.622
4	1	4	0.167	0.000	1.000	2.772	20.00	62.09	0.077	0.774	3.572
5	1	5	0.167	0.000	1.000	3.417	100.00	40.85	0.000	0.000	0.000
6	1	6	0.167	0.000	0.200	3.298	100.00	8.77	0.000	0.000	0.000
7	1	7	0.167	0.000	1.000	1.476	100.00	218.84	0.046	0.478	2.449
Piso			0.167	0.000	0.200	2.400	20.00	16.57	0.000	0.000	0.000
Teto			0.167	0.000	1.000	2.400	20.00	82.83	0.115	1.096	4.511

6.5.6 Sala de Rejeitos

A atividade semanal autorizada para cada um radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl e ^{153}Sm é 1000, 50, 15, 20, 10 e 100. Supõe-se que, em média, 10% desta atividade vai ao decaimento de rejeitos radioativos. Supõe-se também que os compartimentos blindados dos rejeitos têm espessura mínima de chumbo de 5 mm.

Logo as atividades (em mCi) efetivas de cada radionuclídeo a ser blindada pelas paredes é de 9.5367e-005, 1.1298, 2.0736e-004, 7.4837e-005, 1.4002e-009 e 1.7739e-010 respectivamente.

Considera-se que essas fontes fiquem 40h por semana irradiando as áreas vizinhas. Período máximo no qual pode haver pessoas ocupando tais áreas.

O “número de pacientes” (1, 1, 1, 1, 1 e 1) neste caso é uma fonte de cada radionuclídeo com as respectivas atividades acima irradiando por 40h.

Tabela 10: Sala de Rejeitos.

W	F	P	t	t_u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	40.000	0.000	0.000	1.732	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000
2	1	2	40.000	0.000	0.050	1.282	20.00	3.62	0.000	0.000	0.000
3	1	3	40.000	0.000	1.000	1.957	20.00	31.09	0.149	1.131	1.921
4	1	4	40.000	0.000	0.125	1.488	100.00	6.72	0.000	0.000	0.000
Piso			40.000	0.000	0.200	1.400	20.00	12.15	0.000	0.000	0.000
Teto			40.000	0.000	0.000	3.400	20.00	0.00	0.000	0.000	0.000

6.5.7 Ergometria

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl e ^{153}Sm são respectivamente 30, 0, 0, 0, 0 e 0. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 0, 0, 0, 0 e 0.

A ergometria só atende pacientes cujo radionuclídeo administrado é o ^{99m}Tc . Considera-se conservadoramente de que todos os 120 pacientes que são submetidos a uma administração com ^{99m}Tc

fazem ergometria.

Tabela 11: Ergometria.

W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.500	0.000	1.000	1.986	100.00	231.36	0.031	0.330	2.313
2	1	2	0.500	0.000	1.000	1.634	20.00	341.99	0.103	1.115	7.828
3	1	3	0.500	0.000	1.000	1.454	20.00	431.64	0.111	1.206	8.470
4	1	4	0.500	0.000	0.200	2.194	20.00	37.91	0.024	0.251	1.764
5	1	5	0.500	0.000	0.200	2.843	20.00	22.58	0.005	0.048	0.335
6	1	6	0.500	0.000	1.000	2.582	20.00	136.93	0.070	0.755	5.304
7	1	7	0.500	0.000	0.200	2.547	100.00	28.13	0.000	0.000	0.000
Piso			0.500	0.000	0.200	2.400	20.00	31.69	0.017	0.181	1.269
Teto			0.500	0.000	1.000	2.400	20.00	158.43	0.075	0.813	5.706

6.5.8 Box Maca / Inalação

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc, ¹³¹I, ¹²³I, ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl e ¹⁵³Sm são respectivamente 30, 0, 0, 0, 0 e 0. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 20, 0, 0, 0, 0 e 0.

Tabela 12: Box Maca / Inalação.

W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.500	0.000	0.200	1.747	100.00	9.97	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.500	0.000	0.200	1.552	100.00	12.64	0.000	0.000	0.000
3	1	3	0.500	0.000	1.000	1.470	20.00	70.38	0.046	0.494	3.469
4	1	4	0.500	0.000	1.000	0.890	20.00	192.01	0.082	0.888	6.236
Piso			0.500	0.000	0.200	2.400	20.00	5.28	0.000	0.000	0.000
Teto			0.500	0.000	1.000	2.400	20.00	26.40	0.011	0.110	0.766

6.5.9 Corredor Interno

Atividades em mCi adotadas para os radionuclídeos ^{99m}Tc, ¹³¹I, ¹²³I, ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl e ¹⁵³Sm são respectivamente 30, 5, 5, 5, 10 e 50. O número de pacientes atendidos semanalmente para cada radionuclídeo é respectivamente 120, 10, 5, 4, 2 e 1.

Tabela 13: Corredor Interno.

W	F	P	t	t _u	T	d (m)	Doses (μSv)		Espessuras (cm)		
							Limite	Dose	Pb	Barita	Concreto
1	1	1	0.017	0.000	1.000	2.083	20.00	2.34	0.000	0.000	0.000
2	1	2	0.017	0.000	0.200	1.666	20.00	0.73	0.000	0.000	0.000
Piso			0.017	0.000	0.200	2.400	20.00	0.35	0.000	0.000	0.000
Teto			0.017	0.000	1.000	2.400	20.00	1.76	0.000	0.000	0.000

6.6 Resultados – Considerações Finais

Os resultados mostrados nas tabelas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 dão as espessuras em centímetros de cada parede (ou porta), piso e teto para uma das opções: chumbo (Pb), Barita ou Concreto. O responsável pela obra deve escolher uma das opções para cada parede (barreira). Não é necessário que se use a mesma opção para todas as barreiras.

As espessuras listadas nas tabelas são as espessuras mínimas para que se atinja níveis aceitáveis de exposição a radiação do outro lado da barreira. Muitas das vezes essa espessura mínima tem um valor inconveniente para a sua real implementação prática. Neste caso, o responsável pela obra pode optar por uma espessura maior. Não pode ser uma espessura menor.

Como o piso e o teto já possuem uma barreira intrínseca que é os 2 x 10 cm de concreto, então os cálculos que dão como resultado uma espessura menor do que essa, indicam que não é necessário blindagem adicional.

Algumas das barreiras tem mais de um cálculo. Para essas barreiras, deve-se escolher o resultado de espessura mais conservador, ou seja, a maior valor. Isso deve ser feito verificando-se na planta as referências de uma barreira específica e mapeando-a nas tabelas do documento para encontrar a maior espessura. A tabela 14 mostra esses resultados calculado em duas vias.

Tabela 14: Comparações dos resultados do cálculo de blindagem feito em duas vias para a Barita.

Comparações		Resultado Final (cm)	
		Exato	Arredondado
Sala Exame 0.000	Inalação 0.888	0.888	1.0
Sala Exame 0.000	Sanitário 0.192	0.192	0.5
Sala Espera 0.000	Sanitário 0.000	0.000	0.0
Sala Espera 0.498	Administração 0.267	0.498	0.5
Sala Espera 0.981	Inalação 0.000	0.981	1.0

Administração 0.126	Laboratório 0.478	0.478	0.5
Laboratório 0.000	Rejeito 0.000	0.000	0.0
Laboratório 0.000	Ergometria 0.330	0.330	0.5

Para o cálculo da espessura de blindagem da porta da sala de exames utilizou-se uma planilha conforme é mostrado na seção 6.5.3.

É fundamental que o responsável pela obra elabore um documento formal indicando quais das três opções escolheu para cada barreira e qual foi efetivamente a espessura implementada para cada barreira. Esse documento deverá ser anexado ao Plano de Proteção Radiológica para futura referência e para eventual uso futuro em outros cálculos no caso de mudança no SMN.

6.7 Resultados Diretos do Programa

Cálculos realizados em 28 de março de 2019 às 15h58min

W significa Parede ou Porta. F, fonte e P, ponto de interesse.

Sala de Exame:

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:

Dose: 19.75 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 3.04 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 23.88 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 2.76 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:

Dose: 133.10 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.62 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.085, 0.918, 5.427

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:

Dose: 22.96 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.82 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.006, 0.055, 0.388

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:

Dose: 121.68 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.74 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.080, 0.865, 5.166

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:

Dose: 16.64 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 3.31 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W7, Fonte: F1 e Ponto: P7:

Dose: 31.64 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.019, 0.192, 1.295

Parede: W8, Fonte: F1 e Ponto: P8:

Dose: 158.19 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.096, 1.027, 5.933

Sanitário Exclusivo de Pacientes Injetados:

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:

Dose: 0.00 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 1.69 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 14.20 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 1.24 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:

Dose: 31.76 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 1.85 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.018, 0.192, 1.301

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:

Dose: 68.45 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 1.26 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.050, 0.542, 3.483

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:

Dose: 3.76 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P5:

Dose: 0.00 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Sala Exclusiva de Pacientes Injetados:

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:

Dose: 0.00 μSv | Limite: 20.00 μSv | Distancia: 1.81 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 309.76 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 3.12 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.046, 0.498, 3.204

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:

Dose: 76.56 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 2.81 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:

Dose: 761.56 μSv | Limite: 100.00 μSv | Distancia: 1.99 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.091, 0.981, 5.802

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:

Dose: 572.32 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.30 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.247, 2.234, 9.720

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:
Dose: 14.68 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 3.21 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W7, Fonte: F1 e Ponto: P7:
Dose: 105.03 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.071, 0.767, 4.723

Parede: W8, Fonte: F1 e Ponto: P8:
Dose: 0.00 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Administração de Radiofármacos:

Suposicao de que cada administração tem duração média de 10 minutos

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:
Dose: 0.00 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.87 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:
Dose: 126.83 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 1.94 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.013, 0.126, 0.734

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:
Dose: 19.02 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.24 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:
Dose: 32.18 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.72 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.026, 0.267, 1.477

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:
Dose: 16.57 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:
Dose: 0.00 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Laboratório:

Admite-se que todas as fontes estão blindadas, a não ser durante o preparo de cada dose (eluições e marcações), e que cada dose típica permanece não blindada por todo o tempo médio de 10 minutos. São preparadas tantas doses quantos pacientes atendidos semanalmente.

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:
Dose: 0.00 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.78 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 8.22 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 1.70 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:
Dose: 85.66 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.36 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.121, 1.140, 4.622

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:
Dose: 62.09 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.77 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.077, 0.774, 3.572

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:
Dose: 40.85 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 3.42 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:
Dose: 8.77 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 3.30 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W7, Fonte: F1 e Ponto: P7:
Dose: 218.84 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 1.48 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.046, 0.478, 2.449

Parede: W8, Fonte: F1 e Ponto: P8:
Dose: 16.57 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W8, Fonte: F1 e Ponto: P9:
Dose: 82.83 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.115, 1.096, 4.511

Sala de Rejeitos:

Suposicao de que 10% de cada dose semanal é descartada e de que são armazenadas em blindagens de 5 mm de espessura de chumbo.

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:
Dose: 0.00 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.73 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:
Dose: 3.62 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.28 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:
Dose: 31.09 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.96 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.149, 1.131, 1.921

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:
Dose: 6.72 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 1.49 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:
Dose: 12.15 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:

Dose: 0.00 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 3.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Ergometria:

Suposição de que essa sala é usada apenas para pacientes com Tc-99m

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:

Dose: 231.36 muSv | Limite: 100.00 muSv | Distancia: 1.99 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.031, 0.330, 2.313

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 341.99 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 1.63 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.103, 1.115, 7.828

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:

Dose: 431.64 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 1.45 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.111, 1.206, 8.470

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:

Dose: 37.91 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 2.19 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.024, 0.251, 1.764

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:

Dose: 22.58 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 2.84 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.005, 0.048, 0.335

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:

Dose: 136.93 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 2.58 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.070, 0.755, 5.304

Parede: W7, Fonte: F1 e Ponto: P7:

Dose: 28.13 muSv | Limite: 100.00 muSv | Distancia: 2.55 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W8, Fonte: F1 e Ponto: P8:

Dose: 31.69 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.017, 0.181, 1.269

Parede: W9, Fonte: F1 e Ponto: P9:

Dose: 158.43 muSv | Limite: 20.00 muSv | Distancia: 2.40 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.075, 0.813, 5.706

Inalação:

Suposição de que essa sala é usada apenas para pacientes com Tc-99m

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:

Dose: 9.97 muSv | Limite: 100.00 muSv | Distancia: 1.75 m

Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:

Dose: 12.64 µSv | Limite: 100.00 µSv | Distancia: 1.55 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:
Dose: 70.38 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.47 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.046, 0.494, 3.469

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:
Dose: 192.01 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 0.89 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.082, 0.888, 6.236

Parede: W5, Fonte: F1 e Ponto: P5:
Dose: 5.28 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W6, Fonte: F1 e Ponto: P6:
Dose: 26.40 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.011, 0.110, 0.766

Corredor Interno:

Parede: W1, Fonte: F1 e Ponto: P1:
Dose: 2.34 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.08 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W2, Fonte: F1 e Ponto: P2:
Dose: 0.73 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 1.67 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W3, Fonte: F1 e Ponto: P3:
Dose: 0.35 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Parede: W4, Fonte: F1 e Ponto: P4:
Dose: 1.76 µSv | Limite: 20.00 µSv | Distancia: 2.40 m
Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): 0.000, 0.000, 0.000

Comparações dos resultados dos cálculos de duas vias:

Sala Exame: 0.000 e Inalação: 0.888

A maior espessura é: 0.888

Sala Exame: 0.000 e Sanitário: 0.192

A maior espessura é: 0.192

Sala Espera: 0.000 e Sanitário: 0.000

A maior espessura é: 0.000

Sala Espera: 0.498 e Administração: 0.267

A maior espessura é: 0.498

Sala Espera: 0.981 e Inalação: 0.000

A maior espessura é: 0.981

Administração: 0.126 e Laboratório: 0.478

A maior espessura é: 0.478

Laboratório: 0.000 e Rejeito: 0.000

A maior espessura é: 0.000

Laboratório: 0.000 e Ergometria: 0.330

A maior espessura é: 0.330

Referências

- Cherry, S. R., Sorenson, J. A. e Phelps, M. E. Physics in Nuclear Medicine. Elsevier Saunders, 4a. edição, 2012.
- CNEN. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, março 2014a. URL <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Último acesso em 05/11/2015.
- CNEN. Licenciamento de Instalações Radiativas – Resolução CNEN no. 166/14, abril 2014b. URL <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm602.pdf>. Último acesso ao link em 11/08/2015. Publicada no DOU de 29/04/2014.
- Eisberg, R. e Resnick, R. Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles. John Wiley & Sons, 2a. edição, 1985.
- Facure, A. Cálculo de Blindagens – Medicina Nuclear. Slides de Aula. facure@cnen.gov.br.
- Hubbell, J. H. e Seltzer, S. M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. 1993. URL <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>. Radiation Physics Division, PML, NIST.
- ICRP. ICRP Publication 107, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. 2007.
- Lamarsh, J. R. e Baratta, A. J. Introduction to Nuclear Engineering. Prentice Hall, 3a. edição, 2001.
- Madsen, M. T., Anderson, J. A., Halama, J. R., Kleck, J., Simpkin, D. J., Votaw, J. R., Wendt III, R. E., Williams, L. E. e Yester, M. V. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements. Med. Phys., 33, janeiro 2006.
- Unger, L. M. e Trubey, D. K. Specific Gamma-Ray Dose Constants for Nuclides Important to Dosimetry and Radiological Assessment. maio 1982. Oak Ridge National Laboratory – U. S. Department of Energy.

7 Apêndices

A Atividade Média

A equação de decaimento da atividade é:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}}$$

onde $A(t)$ é a atividade num tempo t qualquer, A_0 é a atividade no tempo inicial t_0 , T é a meia-vida física e t é o tempo decorrido desde t_0 . Segundo o teorema do valor médio, a atividade média \overline{A} é dada por:

$$\overline{A(t)} = \frac{\int_0^t A(t) dt}{t}$$

$$\overline{A(t)} = \frac{\int_0^t A_0 e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}} dt}{t} = \frac{A_0}{t} \int_0^t e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}} dt$$

$$\overline{A(t)} = \frac{A_0}{t} \left[\frac{T}{\ln(2)} \left(1 - e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}} \right) \right]$$

$$\overline{A(t)} = A_0 \left[\frac{T}{t \cdot \ln(2)} \left(1 - e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}} \right) \right]$$

Vê-se pela equação acima que a atividade média depende da atividade inicial e de um termo multiplicativo que chamaremos aqui de R_{t_U} e é:

$$R_{t_U} = \frac{T}{t \cdot \ln(2)} \left(1 - e^{-\frac{\ln(2) \cdot t}{T}} \right)$$

B Coeficientes de Atenuação Linear

Nessa seção são realizados alguns cálculos e algumas considerações a respeito dos coeficientes de atenuação linear usados nos cálculos de blindagens.

Os cálculos dos coeficientes de atenuação linear dos vários radionuclídeos usados tem como base a referência (Hubbell e Seltzer, 1993) que pode ser encontrada em <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>. A partir dela obtêm-se os valores com os quais são realizadas interpolações e médias ponderadas.

Exemplo:

O ^{67}Ga tem 4 picos (wikipedia: 93 keV - 40%, 184 keV - 20%, 300 keV - 17% e 393 keV - 5%). Por meio de interpolação, encontrou-se os valores para os μ 's de cara energia e, multiplicando pela densidade ρ e fazendo $\text{CSR} = \ln(2)/\mu$, encontra-se os seguintes valores da CSR para cada energia: 93 keV - 1,5718 cm, 184 keV - 1,956 cm, 300 keV - 2,7472 cm e para 393 keV utilizou-se o valor de 400 keV - 2,0012 cm.

A pergunta que surge é como associar esses valores já que o cálculo está sendo feito com apenas um μ por radionuclídeo. A ideia aqui é aproximar um μ efetivo por meio de uma soma ponderada. Nesse caso, teremos o seguinte valor:

$$\mu_{\text{efetivo}} = \frac{0,4 \times 1,5718 + 0,2 \times 1,956 + 0,17 \times 2,7472 + 0,05 \times 2,0012}{0,4 + 0,2 + 0,17 + 0,05} = 1,692 \text{ cm}$$

É interessante notar que se calcularmos a transmissão do feixe usando as 4 CSRs de cada energia e também a transmissão usando somente a CSR efetiva e compararmos, não há diferença significativa.

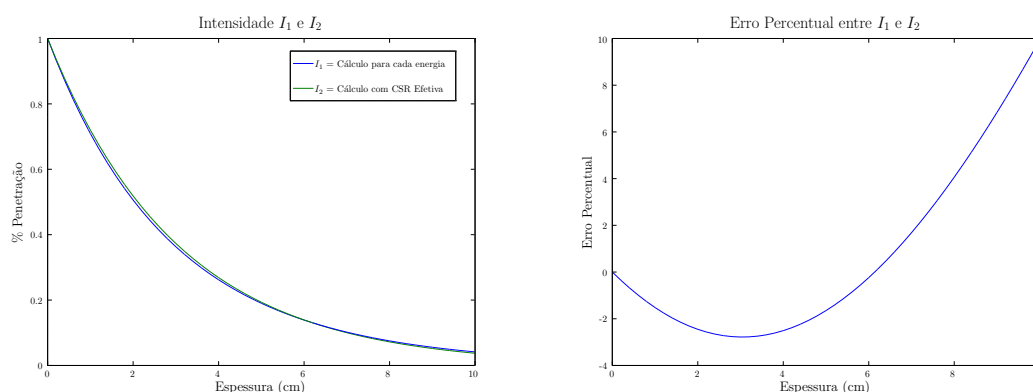


Figura 1: À esquerda, são graficados os valores de I_1 e I_2 em função da espessura. À direita, é graficado o erro relativo entre os dois gráficos mostrados à esquerda.

$$I_1 = \frac{0.4e^{-\frac{\ln(2) \cdot x}{1.5718}} + 0.2e^{-\frac{\ln(2) \cdot x}{1.956}} + 0.17e^{-\frac{\ln(2) \cdot x}{2.7472}} + 0.05e^{-\frac{\ln(2) \cdot x}{2.0012}}}{0.4 + 0.2 + 0.17 + 0.05}$$

$$I_2 = e^{-\frac{\ln(2) \cdot x}{\text{CSR}_{\text{efetiva}}}}$$

Os gráficos da figura 1 monstam as intensidades I_1 e I_2 em valores absolutos à esquerda e o erro percentual à direita.

O erro fica restrito a 10% o que, para os propósitos dos cálculos aqui realizados, não é significativo. Portanto, para radionuclídeos que possuem mais de uma emissão, serão consideradas suas emissões mais significativas e o coeficiente de atenuação linear utilizado para os cálculos de blindagem será obtido por média ponderada dos coeficientes de atenuação linear para cada uma das emissões. Além disso, o coeficiente de atenuação linear de uma dada emissão é obtido por interpolação linear dos dados obtidos de (Hubbell e Seltzer, 1993).

C Listagem Programa Cálculo de Blindagem

```
#####
# Autor: Sandro Roger Boschetti
# Contato: linkedin.com/in/sandroboschetti
# Data: 22 de novembro de 2016 às 11h09min
# Atualização: 28 de março de 2019 às 15h58min

# Programa implementado para a realização de cálculos de blindagem
# em medicina nuclear.

# Programas em Octave podem ser executados online em http://octave-online.net
# Para executar este programa sugere-se utilizar os programas gratuitos que
# podem ser encontrados em https://www.gnu.org/software/octave

# Esse programa encontra-se por tempo indeterminado em:
# https://github.com/sandrorb/CalculoBlindagemMN
# https://sandrorb.github.io/CalculoBlindagemMN
# e pode ser retirado do ar a qualquer momento

# source('calcula_blindagem.m');
#####

# Variáveis globais usadas para acumular dados para impressão
# dentro de uma função. A variável wfp significa Wall Fonte Ponto
```

```
global wfp;
global dadosParaImpressao;

clc;

printf("Cálculos realizados em 28 de março de 2019 às 15h58min\n\n");

##### Definicoes : Inicio #####
sigla = cellstr(['Tc-99m'; 'I-131'; 'I-123'; 'Ga-67'; 'Tl-201'; 'Sm-153']);

# Meias-vidas físicas
Tf = [6.02 192 13.2235 78.24 73.0104 46.284];

# Numero de pacientes por semana para cada radionuclideo
# Para cada area considerada esses valores podem mudar
NumeroPacientesTc99m = 120;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];

# Atividade media administrada de cada radionuclideo em mCi
# Esses valores podem ser alterados em locais onde ha consideracoes especiais
# tais como Sala de Rejeitos, Laboratorio, Injecao e Ergometria
AmCi = [30 30 5 5 10 50];

# Atividade adquirida semanalmente a ser usada na sala de rejeitos
# AmCi = [1500 560 25 20 20 50];

# Atividade em MBq
A = AmCi .* 37;

# Gamao em (microSv m^2) / (Mbq h)
# G(1) = 0.00705 para o Tc-99m quando a fonte eh o paciente e 0.0141 caso
# contrario. Mas a CNEN nao aceitou considerar a atenuacao.
G = [0.0141 0.07647 0.07478 0.03004 0.02372 0.02440];

# Camadas semirredutoras em cm para o Pb
#csrPb = [0.017 0.233 0.039 0.034 0.017 0.014];
csrPb = [0.025 0.233 0.039 0.034 0.017 0.014];

# Camadas semirredutoras em cm para a barita
csrBarita = [0.272 1.776 0.580 0.508 0.149 0.056];

# Camadas semirredutoras em cm para a concreto
# CSR(concreto, Tc-99m) = 3.9 cm -> Facure
csrConcreto = [1.911 3.018 2.208 2.142 1.653 1.195];

# Arranjo bidimensional dos dados das camadas semirredutoras.
# Os ponto-e-virgulas separam as linhas da matriz enquanto os espacos
# (ou virgulas) separam as colunas.
csr = [csrPb; csrBarita; csrConcreto];

# Coeficiente de atenuacao linear em 1/cm
mu = log(2) ./ csr;
##### Definicoes : Fim #####

#####
# As variáveis x, y e z são as espessuras de Pb, Barita e
# Concreto respectivamente.
function [x, y, z] = calculaEspessuras(mu, doseSemBlindagem, doseLimite)

    delta = 0.001;

    x = 0.0;
    doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(1,:) * x);
    doseInicial = sum(doseComBlindagem);

    # mu(1,:) Pb
    while (sum(doseComBlindagem) > doseLimite)
```

```

        x = x + delta;
        doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(1,:) * x);
    endwhile

    y = 0.0;
    doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(2,:) * y);
    doseInicial = sum(doseComBlindagem);

# mu(2,:) Barita
    while (sum(doseComBlindagem) > doseLimite)
        y = y + delta;
        doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(2,:) * y);
    endwhile

    z = 0.0;
    doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(3,:) * z);
    doseInicial = sum(doseComBlindagem);

# mu(3,:) Concreto
    while (sum(doseComBlindagem) > doseLimite)
        z = z + delta;
        doseComBlindagem = doseSemBlindagem .* exp (- mu(3,:) * z);
    endwhile

endfunction
#####

#####
function doseSemBlindagem = calculaDose(G, A, N, t, tu, T, d, Tf)
    Rt = Tf .* (1 - e.^(-(log(2) ./ Tf) * t)) / (log(2) * t);
    Fu = e.^(-(log(2) ./ Tf) * tu);
    doseSemBlindagem = (G .* A .* N .* Rt .* Fu .* T * t) / d^2;
endfunction
#####

#####
function calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite)

    global wfp;
    global dadosParaImpressao;
    global contador;

    doseSemBlindagem = calculaDose(G, A, N, t, tu, T, d, Tf);
    [x, y, z] = calculaEspessuras(mu, doseSemBlindagem, doseLimite);

    printf("Parede: %d, Fonte: %F, d: %e, Ponto: %P: %d: \n", wfp(1), wfp(2), wfp(3));
    printf("Dose: %.2f, muSv |", sum(doseSemBlindagem));
    printf("Limite: %.2f, muSv |", doseLimite);
    printf("Distancia: %.2f, m \n", d);
    printf("Blindagem (cm de Pb, barita e concreto): %6.3f, %6.3f, %6.3f \n\n", x, y, z);

    aux = wfp;
    # A ordem de exportação da tabela LaTeX não é a que consta abaixo
    wfp = [wfp doseLimite sum(doseSemBlindagem) x y z t tu T d];
    dadosParaImpressao = vertcat(dadosParaImpressao, wfp);
    wfp = aux;
endfunction
#####

#####
# Saida de dados para tabela LaTeX
# Estrutura do array dadosParaImpressao: [W F P limite dose Pb Barita Concreto]
function printLatexAntigo(fn)
    global dadosParaImpressao;
    fid = fopen(fn, "w");
    fprintf(fid, "\\textbf{W} & \\textbf{F} & \\textbf{P} & \\textbf{limite} & \\textbf{dose} & \\textbf{Pb} & \\textbf{Barita} & \\textbf{Concreto}");
    fprintf(fid, "\\textbf{limite} & \\textbf{dose} & \\textbf{Pb} & \\textbf{Barita} & \\textbf{Concreto}");

```

Sandro Roger Boschetti 22 de outubro de 2019 às 09h52min página 31 de 39

```

    if ( i == (rows(dadosParaImpressao) - 2) )
        fprintf(fid, "\\hline\n");
    endif

    endfor
    fclose(fid);
endfunction
#####

#####
# Os dados abaixo são valores padrão mas que podem ser modificados em
# outras partes do programa para atender aos requisitos de cada área do SMN.

# Algumas distâncias existentes na planta em metros
peDireitoSMN = 3.00; #2.95
peDireitoAndarSuperior = 3.00;
peDireitoAndarInferior = 4.00;
espessuraLaje = 0.10; # cada uma
espessuraLaje = espessuraLaje * 2; # são lajes duplas, mas com separação de 40cm
dEntreLajesDuplas = 0.40;

# distância do paciente (1.5 m do chão) a 30 cm abaixo da laje inferior
dPacAlvoAndarInferior = 1.5 + espessuraLaje + dEntreLajesDuplas + 0.3;

# distância do paciente a 30 cm da superfície da laje superior
dPacAlvoAndarSuperior = peDireitoSMN - 1.5 + espessuraLaje + dEntreLajesDuplas + 0.3;

# distância do paciente (1.5 m do chão) a 30 cm abaixo da laje inferior
dRejeitoAlvoAndarInferior = 0.5 + espessuraLaje + dEntreLajesDuplas + 0.3;

# distância do paciente a 30 cm da superfície da laje superior
dRejeitoAlvoAndarSuperior = peDireitoSMN - 0.5 + espessuraLaje + dEntreLajesDuplas + 0.3;

fatorOcupAndarInf = 1/5;
fatorOcupAndarSup = 1;
fatorOcupAndarSupEspecial = 0; #1/40;
fatorOcupVaoLivreRua = 0;
#####

printf("W_significa_Parede_ou_Porta_F_fonte_e_P_ponto_de_interesse.\n\n\n");

# Esta auxiliar para calcular a real distância em metros a partir do
# valor obtido na planta em PDF em milímetro reduzido pela escala 1/50.
function d = mm2m(mm)
    escala = 1/50;
    d = (mm / 1000) / escala;
endfunction

#####
#####
#                AQUI INICIAM-SE DE FATO OS CÁLCULOS
#####
#####

#####
printf("Sala_de_Exame:\n\n");

AmCi = [30 5 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];
t = 30 / 60;
tu = 90 / 60;

wfp = [1 1 1]; T = 1/5; d = mm2m(60.75); doseLimite = 100;

```



```

calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/5; d = mm2m(55.25); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(52.33); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1/5; d = mm2m(56.35); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [5 1 5]; T = 1; d = mm2m(54.73); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [6 1 6]; T = 1/5; d = mm2m(66.19); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [7 1 7]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [8 1 8]; T = fatorOcupAndarSup; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_exame.tex");
#####
xExame = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Sanitário_Exclusivo_de_Pacientes_Injetados:\n\n");

AmCi = [30 5 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];
t = 3 / 60;
tu = 0;

# Vão livre voltado pra rua à uns 4 m acima da calçada.
wfp = [1 1 1]; T = fatorOcupVaoLivreRua; d = mm2m(33.71); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/5; d = mm2m(24.71); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(36.95); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1; d = mm2m(25.17); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [5 1 5]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [6 1 5]; T = fatorOcupAndarSupEspecial; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_sanitario.tex");
#####
xSanitario = dadosParaImpressao;

```

```

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Sala Exclusiva de Pacientes Injetados:\n\n");

AmCi = [30 5 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];
t = 90 / 60;
tu = 0;

# Vão livre voltado pra rua à uns 4 m acima da calçada.
wfp = [1 1 1]; T = fatorOcupVaoLivreRua; d = mm2m(36.25); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1; d = mm2m(62.50); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1/5; d = mm2m(56.22); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1; d = mm2m(39.86); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [5 1 5]; T = 1; d = mm2m(45.98); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [6 1 6]; T = 1/20; d = mm2m(64.20); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [7 1 7]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [8 1 8]; T = fatorOcupAndarSupEspecial; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_espera_injetados.tex");
#####
xEspera = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Administração de Radiofármacos:\n\n");
printf("Suposicao de que cada administração tem duração média de 10 minutos\n\n");

AmCi = [30 30 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];
t = 10 / 60;
tu = 0.0;

# Vão livre voltado pra rua à uns 4 m acima da calçada.
wfp = [1 1 1]; T = fatorOcupVaoLivreRua; d = mm2m(37.32); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1; d = mm2m(38.79); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1/5; d = mm2m(44.80); doseLimite = 20;

```

```

calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1/5; d = mm2m(34.44); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [5 1 5]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [6 1 6]; T = fatorOcupAndarSupEspecial; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_administracao.tex");
#####
xAdm = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Laboratório:\n\n");

#-----
printf("Admite-se que todas as fontes estão blindadas, a não ser durante\n");
printf("o preparo de cada dose (eluições e marcações), e que cada dose\n");
printf("típica permanece não blindada por todo o tempo médio de 10 minutos.\n");
printf("São preparadas tantas doses quantos pacientes atendidos semanalmente.\n");

AmCi = [30 30 5 5 10 50]; # com iodo: solicitação do SPR e RT
A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1]; # uma dose típica de cada radionuclídeo
t = 10/60;
tu = 0.0;
#-----

# Vão livre voltado pra rua à uns 4 m acima da calçada.
wfp = [1 1 1]; T = fatorOcupVaoLivreRua; d = mm2m(35.68); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/20; d = mm2m(34.06); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(47.20); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1; d = mm2m(55.44); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [5 1 5]; T = 1; d = mm2m(68.35); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [6 1 6]; T = 1/5; d = mm2m(65.97); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [7 1 7]; T = 1; d = mm2m(29.53); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Devido ao posicionamento do rejeito, consideraremos 0.30 cm
# Os rejeitos estão bem blindados e sobra apenas o que se
# considerou anteriormente, ou seja, doses típicas sem blindagens.
#wfp = [4 1 4]; T = 1/5; d = 0.70; doseLimite = 100;
#calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

#-----
#AmCi = [30 30 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
#N = [1 1 1 1 1 1]; #[NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];

```

```
#t = 8 * 5;
#tu = 0.0;
#printf("Ponto especial com considerações especial para proteção da câmara\n");
#wfp = [5 1 5]; T = 1; d = 1.90; doseLimite = 20;
#calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);
#-----

# Piso
wfp = [8 1 8]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
# 0 Teto do Laboratório é parcialmente telhado e uma pequena parte é laje
# Será feito o cálculo como se tudo fosse laje, mas a parte de telhado não terá blindagem
wfp = [8 1 9]; T = fatorOcupAndarSup; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_laboratorio.tex");
#####
xLab = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Sala de Rejeitos:\n\n");

printf("Suposicao de que 10% de cada dose semanal é descartada de que são\n");
printf("armazenadas em blindagens de 5mm de espessura de chumbo.\n\n");

AmCi = 0.1 .* [1000 50 15 20 10 100] .* exp(-log(2) * 0.5 ./ csrPb);
A = AmCi .* 37;

N = [1 1 1 1 1 1];
t = 40;
tu = 0.0;

# Vão livre voltado pra rua à uns 4 m acima da calçada.
wfp = [1 1 1]; T = fatorOcupVaoLivreRua; d = mm2m(34.64); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/20; d = mm2m(25.64); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(39.14); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1/8; d = mm2m(29.77); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [5 1 5]; T = fatorOcupAndarInf;
d = dRejeitoAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [6 1 6]; T = fatorOcupAndarSupEspecial;
d = dRejeitoAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_rejeitos.tex");
#####
xRejeito = dadosParaImpressao;
```

```

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Ergometria:\n\n");

# Consideração de que apenas fontes de Tc-99m com dose típica de 30 mCi
# ficam expostas por um período aproximado do procedimento de 30 minutos.

printf("Suposição de que essa sala é usada apenas para pacientes com Tc-99m\n\n");

AmCi = [30 0 0 0 0 0]; A = AmCi .* 37;
NumeroPacientesTc99m = 120; # numero super estimado
N = [NumeroPacientesTc99m 0 0 0 0 0];
t = 30 / 60;
tu = 0.0;

wfp = [1 1 1]; T = 1; d = mm2m(39.72); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1; d = mm2m(32.67); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(29.08); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1/5; d = mm2m(43.88); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [5 1 5]; T = 1/5; d = mm2m(56.86); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [6 1 6]; T = 1; d = mm2m(51.63); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [7 1 7]; T = 1/5; d = mm2m(50.94); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [8 1 8]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [9 1 9]; T = fatorOcupAndarSup; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_ergometria.tex");
#####
xErgo = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Inalação:\n\n");

printf("Suposição de que essa sala é usada apenas para pacientes com Tc-99m\n\n");

AmCi = [30 0 0 0 0 0]; A = AmCi .* 37;
NumeroPacientesTc99m = 20; # numero super estimado
N = [NumeroPacientesTc99m 0 0 0 0 0];

```

```

t = 30 / 60;
tu = 0.0;

wfp = [1 1 1]; T = 1/5; d = mm2m(34.94); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/5; d = mm2m(31.03); doseLimite = 100;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [3 1 3]; T = 1; d = mm2m(29.40); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [4 1 4]; T = 1; d = mm2m(17.80); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [5 1 5]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [6 1 6]; T = fatorOcupAndarSup; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_inalacao.tex");
#####
xInalacao = dadosParaImpressao;

wfp = [];
dadosParaImpressao = [];

#####
printf("Corredor_□Interno:\n\n");

AmCi = [30 5 5 5 10 50]; A = AmCi .* 37;
N = [NumeroPacientesTc99m 10 5 4 2 1];
t = 1 / 60;
tu = 0;

wfp = [1 1 1]; T = 1; d = mm2m(41.65); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

wfp = [2 1 2]; T = 1/5; d = mm2m(33.32); doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Piso
wfp = [3 1 3]; T = fatorOcupAndarInf; d = dPacAlvoAndarInferior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

# Teto
wfp = [4 1 4]; T = fatorOcupAndarSup; d = dPacAlvoAndarSuperior; doseLimite = 20;
calculoParede(G, A, N, t, tu, T, d, Tf, mu, doseLimite);

printf("\n");

printLatex("tabela_dados_corredor.tex");
#####

#####
function printMaior(f, a, b, x, y)
    printf("%s:□%.3f□e□%.3f\n", a, x, b, y);
    printf("A□maior□espessura□é:□%.3f\n\n", max(x,y));

    #fprintf(f, "%s & %.3f & %s & %.3f \\\n", a, x, b, y);

```

```
# fprintf(f, "%s & %.3f & %.3f \\\n", a, x, max(x,y));
# fprintf(f, "%s & %.3f & \\\nline \n", b, y);
res = max(x,y);
resArredondado = idivide(fix(res * 100) + 49, 50, "fix") / 2;
fprintf(f, "%s_\n%s_\n\\multirow{2}{*}{%.3f}_\n\\multirow{2}{*}{%.1f}_\n", a, b, res, resArredondado);
fprintf(f, "%.3f_\n%.3f_\n\\nline\n", x, y);
endfunction
# Pb = 6. barita = 7 e concreto = 8
i = 7; # barita
fcomp = fopen("resultadosComparacoes.tex", "w");

printf("Comparações_dos_resultados_dos_cálculos_de_duas_vias:\n");

# Exame/Espera foi tirado pois o cálculo foi feito em separado em planilha
#printMaior(fcomp, "Sala Exame", "Espera Injetados", xExame(1,i), xEspera(5,i));
printMaior(fcomp, "Sala_Exame", "Inalação", xExame(2,i), xInalacao(4,i));
printMaior(fcomp, "Sala_Exame", "Sanitário", xExame(6,i), xSanitario(3,i));

printMaior(fcomp, "Sala_Espera", "Sanitário", xEspera(6,i), xSanitario(2,i));
printMaior(fcomp, "Sala_Espera", "Administração", xEspera(2,i), xAdm(4,i));
printMaior(fcomp, "Sala_Espera", "Inalação", xEspera(4,i), xInalacao(1,i));

printMaior(fcomp, "Administração", "Laboratório", xAdm(2,i), xLab(7,i));

printMaior(fcomp, "Laboratório", "Rejeito", xLab(2,i), xRejeito(4,i));
printMaior(fcomp, "Laboratório", "Ergometria", xLab(5,i), xErgo(1,i));

fclose(fcomp);
#####

#(idivide(floor(x * 100), 51, "floor") + 1) / 2

#clear wfp dadosParaImpressao;
clear -all;
```