



## Notas Técnicas

CBPF-NT-002/22

junho 2022

Notas didáticas sobre a otimização das blindagens em bunkers de radioterapia

Eduardo Sergio Santini

## Notas didáticas sobre a otimização das blindagens em bunkers de radioterapia

*Didactic notes on the optimization in radiotherapy bunkers*

Eduardo Sergio Santini\*

*Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Rua General Severiano 90, Botafogo,  
CEP: 22290-901, Rio de Janeiro, Brazil*

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Rua Xavier Sigaud, 150, Urca,  
CEP: 22290-180, Rio de Janeiro, Brazil*

*Submetido em 25/12/2021*

*Aceito: 01/06/2022*

**Resumo:** Após apresentar uma demonstração da fórmula para o fator de transmissão  $B$  ótimo, são discutidos vários exemplos de otimização de paredes de bunkers que abrigam Aceleradores Lineares de uso médico em Radioterapia.

**Palavras chave:** Radioproteção, Bunkers de Radioterapia, Otimização .

**Abstract:** A demonstration for the formula for the optimal transmission factor  $B$ , is given, then several examples of optimization of Radiotherapy bunkers of medical Linear Accelerators, are discussed.

**Keywords:** Radioprotection, Radiotherapy Bunkers, Optimization .

## Sumário

<b>1. Introdução</b>	2
<b>2. Demonstração da fórmula do B ótimo</b>	2
<b>3. Exemplo de uma parede secundária adjacente ao cinturão primário</b>	4
3.1. Caso 1: A área protegida por esta parede recebe somente radiação secundária	4
3.1.1. Opção conservadora	6
3.1.2. Opção menos conservadora	6
3.2. Caso 2: A área protegida por esta parede recebe não somente radiação secundária mas também radiação primária, embora que parcialmente	7
3.2.1. Opção conservadora	8
3.2.2. Opção menos conservadora	9
<b>4. Exemplo de uma parede primária</b>	9
4.1. Opção conservadora	11
4.2. Opção menos conservadora	11
<b>5. Exemplo de uma parede secundária genérica</b>	11
<b>6. Exemplo da porta</b>	14
6.1. Fótons	14
6.1.1. Opção conservadora	17
6.1.2. Opção menos conservadora	18
6.2. Nêutrons	19
6.2.1. Opção conservadora	20
6.2.2. Opção menos conservadora	20
<b>7. Apêndice: Sobre a "regra das duas fontes"</b>	21
7.1. Uma versão geral e melhorada da regra das duas fontes.	21
7.2. Exemplo de Duas Salas	22
<b>Agradecimentos</b>	24
<b>Referências</b>	24

## 1. INTRODUÇÃO

Existem várias abordagens para realizar a otimização da Radioproteção de maneira quantitativa ([1], [2], [3], [4]), porém a mais difundida na área de blindagens em Radioterapia é a que surge de [1]. Esta é a que adotaremos nestas notas por ser bem útil e bem simples. No cálculo das blindagens por limitação de dose, necessário para o processo de otimização, adotaremos as equações e notações do NCRP151 [5].

## 2. DEMONSTRAÇÃO DA FÓRMULA DO B ÓTIMO

Definimos:

$X \equiv$  Custo da blindagem,

$Y \equiv$  Custo do detrimento biológico.

Seja uma parede de uma espessura dada por  $N$  camadas deci-redutoras (as que chamaremos de  $(TVL)$ ) (em metros) e com área  $A$  (em  $m^2$ ). Se o custo por metro cúbico do material é  $C$  (em  $\frac{\text{dolar}}{m^3}$ ) então o seu custo  $X$  em dolar estará dado por  $C \times \text{volume}$  ou seja:

$$X = C.A.(TVL).N \quad (1)$$

e se  $B$  é o fator de transmissão da parede, sabemos que  $N = \log(\frac{1}{B})$  então vamos poder e escrever  $X$  como uma função de  $B$ :

$$X(B) = C.A.(TVL).\log(\frac{1}{B}). \quad (2)$$

Para calcular  $Y$ , o custo do detrimento biológico, vamos considerar por um lado que o "coeficiente monetário"  $\alpha$  nos dá o custo do detrimento por cada unidade de dose coletiva ( $\text{pessoa.Sv}$ ), quer dizer que  $\alpha$  se expressa em unidades  $\frac{\text{dolar}}{\text{pessoa.Sv}}$  e, por outro, que para  $n$  indivíduos em ocupação integral submetidos cada um a uma taxa de equivalente de dose total após a blindagem de  $H_T \cdot B$  (em  $\frac{\text{Sv}}{\text{semana}}$ ) a dose coletiva  $S$  no tempo  $T_v$  (tempo de vida útil da instalação, em semanas) estará dada por

$$S = n.(Dose \text{ para um individuo}) = n.H_T.B.T_v. \quad (3)$$

Aqui é útil notar que o fator de ocupação  $T$  da região a proteger, adjacente à parede, já está contido no  $n$  desde que este representa o número de pessoas em ocupação integral o qual se escreve sempre na forma genérica  $m.T$  (onde  $m$  é um número inteiro de pessoas) ou sumatoria de termos desta forma<sup>1</sup>,

$$n = \sum_i m_i T_i. \quad (4)$$

Então fica claro que  $H_T$ , que é a taxa de equivalente de dose total no ponto a proteger sem blindagem, se calcula sem fator de ocupação (ou equivalentemente com fator de ocupação igual a 1). Se considerarmos  $T$  em  $H_T$ , estaremos usando um  $T^2$  no denominador de  $B_{ot}$ ! (veja a seguir,

<sup>1</sup> A fórmula (4) é uma generalização conveniente para evitar subestimar o valor de  $n$  mas, não deve induzir a pensar que uma determinada área pode ter necessariamente vários fatores de ocupação diferentes. Ver discussão deste ponto na seção 5.

Eq. 15). Notar também que o  $n$  não é necessariamente um número inteiro.

Então o custo do detrimento biológico estará dado por  $\alpha.S$  quer dizer que:

$$Y(B) = \alpha.n.H_T.B.T_v \quad (5)$$

De acordo com a teoria de otimização apresentada no ICRP 33 (Ref. [1]) temos que minimizar o "custo total", quer dizer, a função soma  $X + Y$  para encontrar o  $B$  ótimo. Chamando  $Z$  ao "custo total", para encontrar o mínimo temos que exigir que a sua derivada primeira seja zero:

$$Z(B) \equiv X(B) + Y(B) \quad (6)$$

$$B = B_{ot} \Leftrightarrow \frac{dZ(B)}{dB}(B_{ot}) = 0 \quad (7)$$

e, de acordo com o critério da derivada segunda, sabemos que, para que seja efetivamente um mínimo, a derivada segunda avaliada em  $B_{ot}$  deverá ser positiva.

Calculamos então a derivada primeira e igualamos a zero:

$$Z(B) = C.A.(TVL).log\left(\frac{1}{B}\right) + \alpha.n.H_T.B.T_v \quad (8)$$

$$\frac{dZ(B)}{dB} = \frac{d}{dB} \left( C.A.(TVL).log\left(\frac{1}{B}\right) \right) + \frac{d}{dB} (\alpha.n.H_T.B.T_v) = 0 \quad (9)$$

$$C.A.(TVL). \frac{d}{dB} \left( log\left(\frac{1}{B}\right) \right) + \alpha.n.H_T.T_v = 0 \quad (10)$$

$$C.A.(TVL). \frac{d}{dB} (-log(B)) + \alpha.n.H_T.T_v = 0 \quad (11)$$

$$-C.A.(TVL). \frac{d}{dB} (log(B)) + \alpha.n.H_T.T_v = 0 \quad (12)$$

pasando o logaritmo á base natural:

$$-C.A.(TVL). \frac{d}{dB} \left( \frac{\ln(B)}{\ln(10)} \right) + \alpha.n.H_T.T_v = 0 \quad (13)$$

$$-\frac{C.A.(TVL)}{\ln(10)} \cdot \frac{1}{B} + \alpha.n.H_T.T_v = 0 \quad (14)$$

ou seja que o  $B$  ótimo é

$$B_{ot} = \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10).\alpha.n.H_T.T_v} \quad (15)$$

Esta é a fórmula a ser utilizada nas seções seguintes para calcular o fator de transmissão ótimo,  $B_{ot}$ .

Que é um mínimo se vê ao calcular a derivada segunda (a partir do lado esquerdo de Eq.14, que representa a derivada primeira de  $Z$ ) e verificar que, ao avaliar em  $B_{ot}$ , efetivamente, é positiva. A derivada da

$$\frac{d^2Z}{dB^2} = \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10).B^2}, \quad (16)$$

avaliando em  $B_{ot}$  sai que

$$\frac{d^2Z}{dB^2}(B_{ot}) = \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10) \cdot \left( \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10).\alpha.n.H_T.T_v} \right)^2}, \quad (17)$$

simplificando

$$\frac{d^2Z}{dB^2}(B_{ot}) = \frac{\ln(10) (\alpha.n.H_T.T_v)^2}{C.A.(TVL)}, \quad (18)$$

e vemos que todas as quantidades tanto do numerador quanto do denominador são positivas, portanto

$$\frac{d^2Z}{dB^2}(B_{ot}) > 0. \quad (19)$$

Queda então demonstrado que  $B_{ot}$  é um mínimo da função  $Z(B)$ .

Não temos que perder de vista que o processo de otimização exige que se cumpra mais uma condição, além de minimizar a função  $Z$ , qual é manter as taxas de dose dos IOE e do público por debaixo de um limite. Isto é o que fazemos ao calcular as blindagens também por "limitação de dose" e depois escolher a melhor opção. Isso é o que vamos fazer nos seguintes exemplos.



$$a(26^\circ) = \frac{-2,61}{10^\circ} \times 10^{-3}(26^\circ - 20^\circ) + 5,79 \times 10^{-3} \quad (21)$$

ou seja que

$$a(26^\circ) = 4,224 \times 10^{-3} \quad (22)$$

Olhando a tabela B.5a de [5]:

Camada deci-redutora, "(TVL)", interpolamos para o ângulo  $\alpha$  entre 15 e 30 graus:

$$(TVL)(\alpha) = \frac{28cm - 39cm}{30^\circ - 15^\circ}(\alpha - 15^\circ) + 39cm \quad (23)$$

então

$$(TVL)(26^\circ) = -\frac{11cm}{15^\circ}(26^\circ - 15^\circ) + 39cm \quad (24)$$

ou seja que

$$(TVL)(26^\circ) = 30,93cm \cong 31cm \quad (25)$$

Continuamos: A taxa de dose equivalente sem a blindagem,  $H_T$ , será a soma das contribuições Fuga:

$$H_L = f \cdot \frac{W_L \cdot T}{d^2} \quad (26)$$

e Espalhada:

$$H_{ps} = a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{scat}^2 d_{sec}^2} \frac{F}{400} \quad (27)$$

Nesta última,  $d_{scat} = 1m$  = distância desde o alvo de RX até o isocentro.

Quer dizer que

$$H_T = f \cdot \frac{W_L \cdot T}{d^2} + a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{scat}^2 d_{sec}^2} \frac{F}{400} \quad (28)$$

Como foi observado na seção 2, o fator de ocupação no cálculo de  $H_T$  não deve ser considerado (ou equivalente-

mente fazer  $T = 1$ ) sendo que ele já está contemplado ao calcular o  $n$  = número de indivíduos com ocupação integral. Substituindo os dados informados acima (e sabendo que as unidades de comprimento são canceladas) temos<sup>3</sup>:

$$H_T = 10^{-3} \cdot \frac{3600 \frac{Gy}{sem}}{(6,2)^2} + 4,224 \times 10^{-3} \cdot \frac{1200 \frac{Gy}{sem} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1600}{1^2 \cdot (6,2)^2 \cdot 400} \quad (29)$$

Utilizando que o fator de qualidade para fótons é  $Q = 1 \frac{Sv}{Gy}$  passamos de Gy para Sv<sup>4</sup>:

$$H_T = 0,0937 \frac{Sv}{sem} + 0,1055 \frac{Sv}{sem}, \quad (30)$$

quer dizer que

$$H_T = 0,1992 \frac{Sv}{sem} \quad (31)$$

Notar que não utilizamos o fator de uso  $U = 1$ , usual para parede secundária, para o cálculo da  $H_{ps}$  mas o fator de uso da parede primária adjacente,  $U = 1/5$ . Isto responde a que nem sempre o *Gantry* estará orientado para esta parede, mas uma fração 1/5 e usar  $U = 1$  seria uma (boa) opção conservadora dando um valor de  $H_{ps}$  algo superdimensionado (veja discussão em ([5] Cap. 2.3).

Da equação (30) observamos que a componente espalhada  $H_{ps} = 0,1055 \frac{Gy}{sem}$  não somente não é desprezível senão que supera à componente de Fuga  $H_L = 0,0937 \frac{Gy}{sem}$  (e ainda tendo utilizado  $U = \frac{1}{5}$  em lugar de  $U = 1$ !). Isto demonstra claramente que a prática mencionada acima não é, em geral, válida.

Portanto o fator de transmissão ótimo, usando Eq. (15) será:

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_T \cdot T_v} = \frac{12,43m^2 \cdot 500 \frac{USS}{m^3} \cdot 0,31m}{2,3 \cdot 10^4 \frac{USS}{p \cdot Sv} \cdot 2p \cdot 0,1992 \frac{Sv}{sem} \cdot 1040sem} \cong 1,992 \times 10^{-4} \quad (32)$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = -\log(1,992 \times 10^{-4}) \cong 3,7 \quad (33)$$

<sup>3</sup> Usamos que  $d = d_{sec} = 6,2m$ : esta distância é utilizada também para a componente de fuga porque se considera o isocentro como a posição média do alvo, sempre que se trate de uma utilização simétrica do cabeçote ao longo dos 360 graus [5].

<sup>4</sup> Equivalente de dose = Fator Qualidade  $\cdot$  Dose absorvida, quer dizer:  $H = Q \cdot D$ , ver por exemplo [5], [8], [11].

e a espessura ótima :

$$t_{ot} = 0,35m + (3,7 - 1)0,31m \cong 1,19m. \quad (34)$$

### Cálculo por limitação de dose

#### 3.1.1. Opção conservadora

O cálculo por limitação de dose deve considerar, como sabemos, um limite  $P$  que vamos chamar, seguindo [5], "meta do projeto de blindagem" ou brevemente "meta do projeto" ou simplesmente "meta". Esta meta do projeto,  $P$ , pode no nosso país, dependendo do projetista e de outros fatores, ser considerado igual ao limite primário para IOE estabelecido em Normas do Órgão Regulador. No entanto essa não é a opção mais conservadora nem é a que recomendamos nestas notas já que ela, a princípio e se vencer a espessura por limitação de dose, iria deixar os IOE, em particular as técnicas que operam o AL, expostos a uma taxa de dose igual a ao limite primário  $4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  já desde o início. Assim, ante qualquer situação imprevista de aumento de taxa de dose, esses IOE logo tomariam uma dose superior ao limite primário estabelecido. Um exemplo muito frequente é a situação apresentada quando um serviço de Radioterapia adquire um novo equipamento e, para sua instalação, deve construir uma nova sala adjacente à existente. O comando da antiga sala pode estar sendo atingido pela nova fonte e então reforços na antiga blindagem se farão necessários já que qualquer nova contribuição irá estourar o limite primário nessa área. E isso deve ser realizado além da construção da nova sala.

Uma melhor opção é utilizar um valor de  $P$  como sendo igual a uma fração desse limite primário. Espero que em breve isso seja contemplado em Normas do Órgão Regulador. Muitos projetos são elaborados de forma conservadora, utilizando sempre o limite de público  $= 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$  inclusive para proteger as IOEs. Nestas notas recomendaremos sempre essa opção mais conservadora usando como meta  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$  para calcular por limitação de dose as espessuras por Fuga e por Espalhada.

Deste modo, usando as fórmulas usuais ([5] (2.7) e (2.8)) temos:

para a componente espalhada

$$B_{ps} = \frac{P}{aWTU} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad (35)$$

$$= \frac{(2 \times 10^{-5})}{(4,22 \times 10^{-3})(1200) 1 \frac{1}{5}} (1)^2 (6,2)^2 \frac{400}{1600} \cong 1,898 \times 10^{-4} \quad (36)$$

então

$$N_{ps} = \log\left(\frac{1}{B_{ps}}\right) = 3,72 \Rightarrow t_{ps} = 3,72 \times 0,31m \cong 1,15m.$$

e para a componente de Fuga

$$B_L = \frac{Pd_L^2}{10^{-3}W_L T} \quad (37)$$

$$= \frac{(2 \times 10^{-5})(6,2)^2}{(10^{-3})(3600)} = 2,14 \times 10^{-4} \quad (38)$$

então

$$N_L = \log\left(\frac{1}{B_L}\right) = 3,67 \Rightarrow t_L = 0,35m + (3,67 - 1) \times 0,31m \cong 1,18m. \quad (39)$$

Quer dizer que as espessuras espalhada  $t_{ps} = 1,15m$  e fuga  $t_L = 1,18m$  diferem em menos de um TVL, então devemos somar 1 HVL = 10,5cm á maior<sup>5</sup> (regra das duas fontes, ver o apêndice) o qual dá como resultado por limitação de dose:  $1,285m \cong 1,29m$ .

Portanto vemos que a limitação de dose "vence" à otimização e a espessura da parede B deve ser, no mínimo :

$$t_B = 1,29m.$$

#### 3.1.2. Opção menos conservadora

Vale comentar que, se tivéssemos adotado a opção menos conservadora<sup>6</sup>, dada pela meta  $P = 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$ , as espessuras teriam resultado Espalhada = 0,75m e Fuga = 0,77m e, somando 1 HVL á maior, teria resultado por limitação de dose um valor de  $\cong 0,88m$ . Com isto teria "prevalecido" otimização e a parede teria resultado ser, de uma espessura de 1,19m. Porém, esta opção deixaria os IOE tomando uma taxa de dose que é o dobro da opção recomendada nestas notas (já que diferem em 1 HVL).

<sup>5</sup> Este valor sai usando que  $(HVL) = \log(2) \cdot (TVL)$  para o valor  $(TVL)_1 = 35cm$  (conservativo) para radiação de fuga de 10MV extraído da tabela B.7 de [5].

<sup>6</sup> Infelizmente, muitos projetos seguem essa opção.

### 3.2. Caso 2: A área protegida por esta parede recebe não somente radiação secundária mas também radiação primária, embora que parcialmente

Neste caso a área protegida, o comando, é interceptada parcialmente pelo cone primário, tal como pode ser observado na figura 2. Esta contribuição atravessa a parede primária A, mas de qualquer forma deve ser considerada, tanto na otimização quanto na limitação de dose.<sup>7</sup>

Para a otimização, no cálculo da taxa de dose sem blindagem  $H_T$  vamos ter que acrescentar a contribuição primária às contribuições secundárias, já calculadas antes no caso 1 e que são as mesmas que no presente caso.

A contribuição do feixe primário se escreve:

$$\frac{WUT}{d'^2}, \quad (40)$$

onde  $d' \cong 7,2m$  é a distância desde o alvo do AL (a fonte de radiação) até o ponto a blindar no comando (no cantinho, sempre  $0,3m$  após a parede, ver a figura).

Então vamos ter para  $H_T$ :

$$H_T = f \cdot \frac{W_L \cdot T}{d^2} + a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{scat}^2 d_{sec}^2} \frac{F}{400} + \frac{WUT}{d'^2} \quad (41)$$

A contribuição secundária já a temos de (30) e então vai ser (lembrar que fazemos  $T = 1$ ):

$$H_T = 0,0937 \frac{Sv}{sem} + 0,1055 \frac{Sv}{sem} + \frac{1200 \frac{Sv}{sem} \frac{1}{5}}{7,2^2} \quad (42)$$

$$H_T = 0,0937 \frac{Sv}{sem} + 0,1055 \frac{Sv}{sem} + 4,6296 \frac{Sv}{sem} \quad (43)$$

$$H_T \cong 4,829 \frac{Sv}{sem} \quad (44)$$

e com isto o  $B_{ot}$  resultará

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_T \cdot T_v} =$$

$$= \frac{12,43m^2 \cdot 500 \frac{USS}{m^3} \cdot 0,31m}{2,3 \cdot 10^4 \frac{USS}{p \cdot Sv} \cdot 2p \cdot 4,829 \frac{Sv}{sem} \cdot 1040sem} \cong 8,34 \times 10^{-6} \quad (45)$$

e o número de TVL :

$$N = \log \frac{1}{8,34 \times 10^{-6}} \cong 5,079 \quad (46)$$

e a espessura ótima:

$$t_{ot} = 0,35m + (5,079 - 1)0,31m \cong 1,61m. \quad (47)$$

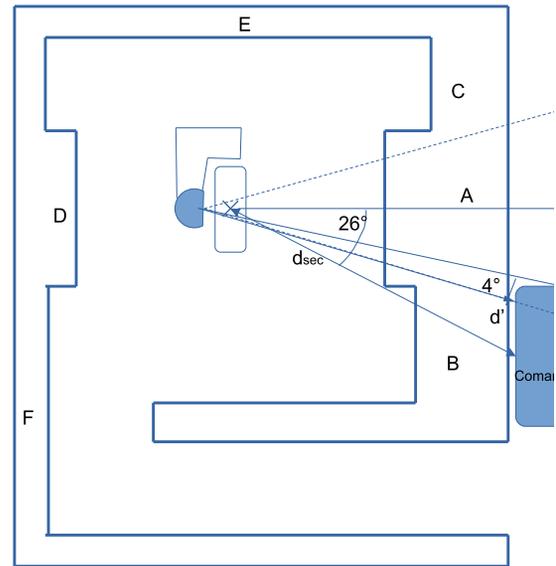


Figura 2: Parede B secundária. Há também contribuição primária.

<sup>7</sup> Gostaria comentar que a localização do Comando num projeto como na figura tem a vantagem de uma boa visibilidade da porta do bunker mas tem as desvantagens de ficar perto da fonte de radiação, onde as taxas de dose são relativamente mais altas além de ser uma região com contribuições da componente secundária e, as vezes, também primária. Uma escolha mais segura, que tenho visto em varios serviços, é projetar o Comando separado das paredes da sala (uns poucos metros já melhora muito) e completamente fora do alcance do cone primário. Um exemplo é mostrado no apêndice.

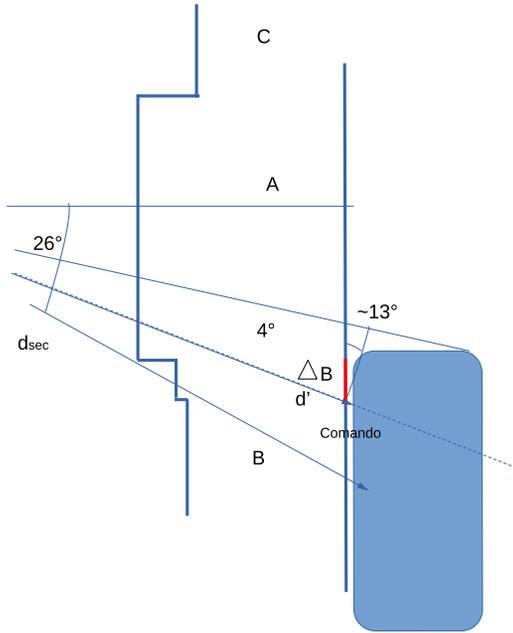


Figura 3: Detalhe da parede B.

### 3.2.1. Opção conservadora

No caso que estamos analisando parte do cone primário, após atravessar a parede A, atinge parte do Comando. Supondo que a espessura da parede A foi calculada utilizando uma meta de valor  $P_A$  então os IOE do Comando (ou ao menos alguma dessas pessoas) vão estar submetidos também a este limite, recebendo uma contribuição total aproximadamente igual a  $P + P_A$ . Isso já impede que seja adotada como meta  $P$  um valor igual ao limite primário  $4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  porque nesse caso teríamos  $P + P_A > 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  ou seja a taxa de dose no Comando iria estourar o limite para IOE. Portanto, no caso em análise, não é aceitável utilizar uma meta  $P = 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  neste local. É por isso que neste caso estamos forçados a utilizar um valor menor, uma fração desse limite primário. Uma forma algo standard é usar a "regra das duas fontes" e adotar o valor  $\frac{1}{2} \cdot 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$ .<sup>8</sup> No entanto, nestas notas adotaremos a opção mais conservadora usando como meta  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$  para calcular por limitação de dose as espessuras por Fuga e por Espalhada. Mas, uma vez que queremos garantir essa meta  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$  e, sabendo que temos duas contribuições (secundária e primária), então aplicaremos a 'regra das duas

fontes' e usaremos, no cálculo das espessuras, a metade  $\frac{P}{2} = 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$ .

Deste modo, usando as fórmulas usuais ([5] (2.7) e (2.8)) temos:

para a componente espalhada (aqui já substituímos  $\frac{P}{2}$  em lugar de  $P$ )

$$B_{ps} = \frac{\frac{P}{2}}{aWT} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad (48)$$

$$= \frac{(10^{-5})}{(4,22 \times 10^{-3})(1200)^{\frac{1}{5}} (1)^2 (6,2)^2} \frac{400}{1600} \cong 9,489 \times 10^{-5} \quad (49)$$

então

$$N_{ps} = \log\left(\frac{1}{B_{ps}}\right) = 4,02 \Rightarrow t_{ps} = 4,02 \times 0,31m \cong 1,25m$$

e para a componente de Fuga (aqui já substituímos  $P/2$  em lugar de  $P$ )

$$B_L = \frac{\frac{P}{2} d_L^2}{10^{-3} W_L T} \quad (50)$$

$$= \frac{(10^{-5})(6,2)^2}{(10^{-3})(3600)} = 1,07 \times 10^{-4} \quad (51)$$

então

$$N_L = \log\left(\frac{1}{B_L}\right) = 3,97$$

$$\Rightarrow t_L = 0,35m + (3,97 - 1) \times 0,31m \cong 1,27m. \quad (52)$$

Quer dizer que as espessuras espalhada  $t_{ps} = 1,25m$  e fuga  $t_L = 1,27m$  diferem em menos de um TVL, então devemos somar  $1 \text{ HVL} = 10,5cm$  a maior o qual dá como resultado por limitação de dose:  $1,375m \cong 1,38m$ .

Vemos então que neste caso a otimização ( $1,61m$ ) prevalece frente à limitação de dose ( $1,38m$ ) e então a espessura da parede B deve ser, conservativamente para proteger o cantinho do comando, no mínimo :

$$t_B = 1,61m.$$

Como a contribuição primária não ocorre em todo o comando e sim no cantinho, essa espessura de  $1,61m$  será necessária apenas nesta pequena região do comando. Con-

<sup>8</sup> Trata-se de uma generalização dessa regra já que na verdade uma das duas contribuições passa por outra parede.

siderando que a porção angular do feixe primário que atinge o comando é de aproximadamente, (Fig. 2 e Fig 3),  $\Delta\alpha \simeq 4^\circ$ , a extensão correspondente  $\Delta B$  será dada<sup>9</sup> aproximadamente pela metade do arco subtendido à distância  $d'$ :  $\Delta B \simeq \frac{1}{2} \text{ arco} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{360^\circ} 2\pi d'$ , ou seja

$$\Delta B \simeq \frac{1}{2} \frac{4^\circ}{360^\circ} 2\pi \times 7,2m \simeq 0,26m. \quad (53)$$

A parte restante do comando terá uma espessura de 1,38m, que é obtida desconsiderando a contribuição primária no cálculo por otimização (o qual indicava 1,19m segundo vimos no caso 1) e confirmando que prevalece a espessura obtida pela limitação de dose, já calculada acima (mantemos a meta  $P$  adotada, por conservadurismo).

### 3.2.2. Opção menos conservadora

Também gostaríamos de comentar que, se tivéssemos adotado a opção menos conservadora, dada neste caso pela meta  $P = 2 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  (segundo a discussão acima) as espessuras teriam resultado Espalhada = 0,84m e Fuga = 0,87m e, somando 1 HVL á maior, teria resultado por limitação de dose um valor de  $\simeq 0,98m$ . Com isto teria prevalecido outra vez a otimização, 1,61m, e a parede ainda teria resultado ser desta espessura na região atingida pelo cone primário no cantinho do comando (largura de  $\simeq 0,25m$  a partir do dente da parede primária). Já, fora desta região, a otimização exige uma espessura de 1,19m (o cálculo foi feito já no caso 1, onde não tinha contribuição primária), enquanto a limitação de dose dá uma espessura de 0,98m, como recém vimos. Portanto a espessura fora da região atingida pelo cone primário deverá ser de 1,19m.

### Uma boa solução para evitar contribuição primária

No caso estudado, com o comando localizado adjacente à parede B e assumindo que o projetista deseja impedir que a radiação primária o alcance, uma boa solução é projetar o cinturão primário para que tenha o dente para o exterior (protuberante). Desta forma, não haverá contribuição primária (ver a figura 4) e estaremos em um caso parecido ao caso A.

## 4. EXEMPLO DE UMA PAREDE PRIMÁRIA

Consideramos que estamos no caso 2 recém estudado.

Esta parede blinda uma região definida como "área livre".

<sup>9</sup> Na figura 3 vemos o triângulo retângulo cuja hipotenusa é  $2\Delta B$  e o ângulo formado por ela e o arco é aproximadamente a metade de  $26^\circ$ , então temos que  $\Delta B \times \cos 13^\circ \simeq \frac{1}{2} \text{ arco}$  o qual da na verdade  $\Delta B \simeq 0,2566m$ .

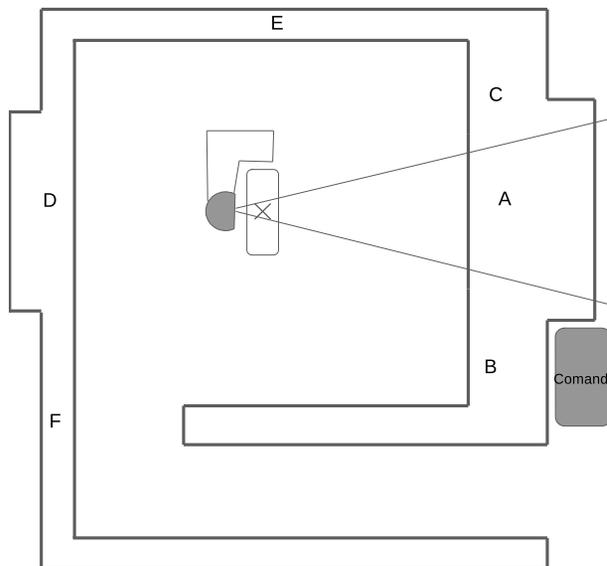


Figura 4: Parede B secundária. Não há contribuição primária no comando sendo que o cinturão proturde para o exterior da sala.

A distancia desde o alvo do AL (i.e. a fonte de radiação) até o ponto a blindar, localizado a uns 0,3m do lado externo da parede (ver figura 5), é  $d_p = 6,55m$ .

Área da parede =  $3,2m \times 3,55m = 11,36m^2$ .

Fator de ocupação  $T_1 = \frac{1}{2}$ .

Número de pessoas com ocupação integral,  $n$ :

Sabemos que nessa região haverá  $m_1 = 4$  pessoas não monitoradas com essa ocupação parcial  $T_1$ . Então, a princípio, teríamos que o número de pessoas com ocupação integral seria (Eq. 4)  $n = m_1 \cdot T_1 = 4 \cdot \frac{1}{2} = 2$  (melhor  $n = 2 \text{ pessoas} = 2p$ ). Mas, como observamos antes, parte do feixe primário atinge o comando, em outras palavras, a parede A esta blindando também parte do comando e podemos estimar que um dos IOE do comando do AL ( $m_2 = 1$ ) estará alí nesse cantinho e com a ocupação do comando, quer dizer, integral, ou seja  $T_2 = 1$ . Portanto haverá uma contribuição de valor  $m_2 \cdot T_2 = 1 \cdot 1$  ao  $n$ , de modo que vamos ter na verdade (Eq. 4)  $n = m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2 = 4 \cdot \frac{1}{2} + 1 \cdot 1 = 3$ .

A taxa de equivalente de dose sem blindagem no ponto a proteger,  $H_T$ , costuma ser calculada como dada por uma única contribuição, a saber, a componente primária, já que as componentes de Fuga e Espalhada seriam desprezíveis na frente dessa. No entanto, o princípio da otimização visa manter as doses o mais baixo possível, considerando os fa-

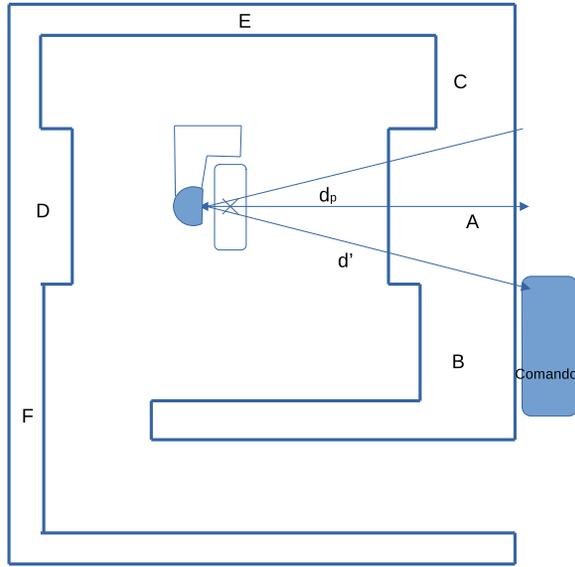


Figura 5: Parede A primária.

tores econômicos-sociais, uma vez que não há limiar para o surgimento de efeitos estocásticos da radiação, quer dizer que ainda bem pequenas doses podem produzir um efeito estocástico. É por isso que, na otimização, as componentes de Fuga e Espalhada devem também ser consideradas ( ver [8] Cap. 8.3). Temos

$$H_T = H_p + H_L + H_{ps} \quad (54)$$

$$H_T = \frac{WUT}{d_p^2} + f \frac{W_L T}{d_L} + a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{scat}^2 d_{sec}^2} \frac{F}{400} \quad (55)$$

Notamos que nos cálculos da componente Espalhada é utilizada nas fórmulas sempre, por conseqüência, o tamanho de campo  $F = 40cm \times 40cm = 1600cm^2$ . Também, como foi observado na seção 2, o fator de ocupação no cálculo de  $H_T$  não deve ser considerado (ou equivalentemente fazer  $T = 1$ ) sendo que ele já está contemplado ao calcular o  $n =$  número de indivíduos com ocupação integral.

Temos, uma vez canceladas as unidades de comprimento

$$H_T = \frac{(1200 \frac{Gy}{sem}) (\frac{1}{5})}{(6,55)^2} + 10^{-3} \cdot \frac{(3600 \frac{Gy}{sem})}{(5,55)^2} + 4,224 \times 10^{-3} \cdot \frac{(1200 \frac{Gy}{sem}) \cdot (\frac{1}{5})}{(1)^2 \cdot (5,55)^2} \frac{1600}{400} \quad (56)$$

e utilizando o fator de qualidade para fótons  $Q = 1 \frac{Sv}{Gy}$  para passar de Gy para Sv:

$$H_T = (5,59 + 0,12 + 0,132) \frac{Sv}{sem} \quad (57)$$

$$H_T = 5,842 \frac{Sv}{sem} \quad (58)$$

Portanto o fator de transmissão ótimo, usando Eq. (15) será:

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_T \cdot T_v} = \frac{(11,36m^2) \cdot 500 \frac{USS}{m^3} \cdot 0,37m}{2,3 \cdot 10^4 \frac{USS}{p \cdot Sv} \cdot 3p \cdot 5,842 \frac{Sv}{sem} \cdot 1040sem} \cong 4,936 \times 10^{-6} \quad (59)$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = -\log(4,936 \times 10^{-6}) \cong 5,31, \quad (60)$$

e a espessura ótima :

$$t_{Ao} = 0,41m + (5,31 - 1) \times 0,37m \cong 2m. \quad (61)$$

Para o cálculo por limitação de dose:

#### 4.1. Opção conservadora

Meta do projeto para esta parede:  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$ .

Utilizando a fórmula usual ([5] (2.1))

Primária

a) Para proteger as pessoas com ocupação  $T = \frac{1}{2}$ :

$$B_p = \frac{Pd_p^2}{WUT} \quad (62)$$

temos

$$B_p = \frac{(2 \times 10^{-5}) \cdot (6,55)^2}{(1200)^{\frac{1}{5}} \cdot \frac{1}{2}} = 7,15 \times 10^{-6} \quad (63)$$

então o número de TVL:

$$N = \log\left(\frac{1}{B_p}\right) = -\log(7,15 \times 10^{-6}) \cong 5,15 \quad (64)$$

e a espessura primária por limitação de dose:

$$t_{Aa} = 0,41m + (5,15 - 1) \times 0,37m \cong 1,95m \quad (65)$$

b) Para proteger o IOE no cantinho do comando do AL com  $T = 1$  e com distância (desde o alvo até a posição no "cantinho" do Comando)  $d' = 7,2m$ :

$$B = \frac{Pd'^2}{WUT} \quad (66)$$

devemos lembrar que no comando há duas contribuições, secundária e primária, portanto usaremos como limite a metade de  $P$  ou seja  $10^{-5} \frac{Sv}{sem}$

$$B = \frac{(10^{-5}) \cdot (7,2)^2}{(1200)^{\frac{1}{5}}} = 2,16 \times 10^{-6} \quad (67)$$

então o número de TVL:

$$N = \log\left(\frac{1}{B}\right) = -\log(2,16 \times 10^{-6}) \cong 5,67 \quad (68)$$

e a espessura primária por limitação de dose:

$$t_{Ab} = 0,41m + (5,67 - 1) \times 0,37m \cong 2,14m. \quad (69)$$

Quer dizer que predomina o caso b): são necessários 2,14m para blindar também o cantinho do comando. Portanto o resultado por limitação de dose é :

$$t_{Al} = 2,14m$$

Então temos que a limitação de dose (2,14m) vence à otimização (2m) e a espessura desta parede deverá ser, no mínimo:

$$t_A = 2,14m.$$

#### 4.2. Opção menos conservadora

Novamente comentamos que, se tivéssemos adotado a opção menos conservadora para o comando, dada pela meta  $P = 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  então a espessura por limitação de dose para o caso b) teria resultado ser igual a 1,65m. Assim teria predominado o caso a), a saber, 1,95m sendo este o resultado da espessura por limitação de dose. Quer dizer que a otimização (2m) teria "vencido" à limitação de dose e a espessura da parede primária A deverá ser, nesta opção : = 2m . Porém, esta opção deixaria as pessoas na parede A (e também o IOE no cantinho do comando) tomando uma taxa de dose algo maior do que na opção mais conservadora adotada nestas notas.

### 5. EXEMPLO DE UMA PAREDE SECUNDÁRIA

#### GENÉRICA

Consideramos a Parede E que é a parede de trás do AL, Fig. (6). Esta parede blindar uma sala de tratamento de outro AL.

Vamos supor os seguintes parâmetros:

A distancia desde o isocentro até o ponto a blindar, localizado a uns 0,3m do lado externo da parede (ver figura 6), é  $d_{sec} = 5,3m$ .

Área da parede E =  $8,1m \times 3,55m = 28,755m^2 \cong 28,76m^2$

Fator de atenuação pelo cabeçote  $f = 0,001$ .

Fator de ocupação :  $T = \frac{1}{2}$ . (Adotamos o valor orientativo dado em tabela B1 de [5] o qual é bem representativo, ver discussão mais na frente, no cálculo por limitação de dose).

Tamanho do campo no paciente, opção bem conservadora:  $F = 40\text{cm} \times 40\text{cm} = 1600\text{cm}^2$ .

Número de pessoas em ocupação integral (Eq. 4),  $n$ : supondo três técnicos IOE (dois técnicos mais uma enfermeira) dentro da sala adjacente e contando o paciente nela, isso dá 4 pessoas. O paciente tem uma ocupação bem menor do que a dos técnicos mas por conservadorismo vamos contar como a mesma, e teremos todos os 4 bem protegidos. Então com a ocupação definida acima temos  $n = 4p \cdot \frac{1}{2} = 4p$ . ( $p \equiv$  pessoas assim ficará dimensionalmente correto na fórmula do B ótimo, ver Eq (32))

Custo do material da blindagem, concreto [8]:  $C = 500 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$ .

Coefficiente monetário, segundo Norma CNEN 3.01 Art. 5.4.3.2, [9]:  $\alpha = 10^4 \frac{\text{US\$}}{p \cdot \text{Sv}}$

Fração de espalhamento no paciente para o ângulo de  $90^\circ$  (tabela B4 de [5]):  $a \cong 3,81 \times 10^{-4}$ .

Camada deci-reutora para esse ângulo de  $90^\circ$  (tabela B5a de [5]):  $(\text{TVL}) \cong 0,18\text{m}$ .

#### Cálculo por otimização:

Dado que na parede E não há incidência direta do feixe primário, a taxa de dose equivalente sem a blindagem  $H_T$  será a soma, somente, das contribuições de Fuga e de Espalhada:

Fuga:

$$H_L = f \cdot \frac{W_L \cdot T}{d^2} \quad (70)$$

e Espalhada:

$$H_{ps} = a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{\text{scat}}^2 d_{\text{sec}}^2} \frac{F}{400} \quad (71)$$

Quer dizer que

$$H_T = f \cdot \frac{W_L \cdot T}{d^2} + a \cdot \frac{W \cdot U \cdot T}{d_{\text{scat}}^2 d_{\text{sec}}^2} \frac{F}{400} \quad (72)$$

Substituindo os dados informados acima (lembrar que, como antes, devemos fazer  $T = 1$ ) e sabendo que as unidades de comprimento são canceladas, temos:

$$H_T = 10^{-3} \cdot \frac{3600 \frac{\text{Gy}}{\text{sem}}}{(5,3)^2} + 3,81 \times 10^{-4} \cdot \frac{1200 \frac{\text{Gy}}{\text{sem}}}{1^2 \cdot (5,3)^2} \frac{1600}{400} \quad (73)$$

Utilizando que o fator de qualidade para fótons é  $Q = 1 \frac{\text{Sv}}{\text{Gy}}$  passamos de Gy para Sv:

$$H_T = 0,1281 \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} + 0,0651 \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (74)$$

Ou seja:

$$H_T = 0,1932 \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (75)$$

Fator de transmissão ótimo, usando Eq. (15) será:

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (\text{TVL})}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_T \cdot T_v} = \frac{28,76\text{m}^2 \cdot 500 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \cdot 0,31\text{m}}{2,3 \cdot 10^4 \frac{\text{US\$}}{p \cdot \text{Sv}} \cdot 2p \cdot 0,1932 \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \cdot 1040\text{sem}} \cong 4,68 \times 10^{-4} \quad (76)$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = -\log(4,68 \times 10^{-4}) \cong 3,33 \quad (77)$$

e a espessura ótima :

$$t_{ot} = 0,35\text{m} + (3,33 - 1)0,31\text{m} \cong 1,07\text{m} \quad (78)$$

#### Cálculo por limitação de dose.

A meta do projeto para esta parede,  $P$ : A região adjacente à parede E é uma área controlada por ser o bunker de um outro AL. O limite primário para os IOE que frequentam o interior do bunker, técnicos, enfermeiros, etc, é  $4 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}}$ . No entanto nessa área vão ingressar também indivíduos do público, a saber, os pacientes. É por isso que o valor da meta do projeto  $P$  não pode ser aquele valor de IOE, deve ser, como máximo, o limite para público  $2 \times 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}}$  para

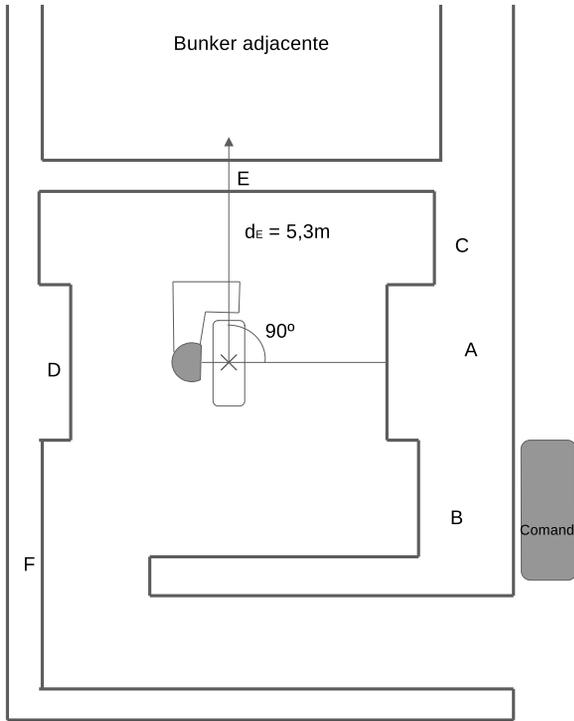


Figura 6: Parede E secundária.

proteger as pacientes, e poderia ser ainda menor...([8] Cap. 4.1). Então vamos adotar como meta do projeto para esta parede  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$ .

Fator de ocupação: De todas as pessoas que frequentam essa área, os IOEs e os pacientes, o indivíduo maximamente exposto (que é quem define o  $T^{10}$ ) certamente será um IOE. Ou seja, o fator de ocupação será definido pelos IOEs, que são as pessoas (empregados da instituição) que tem presença regular ao longo de todo o ano e nunca pelos pacientes porque eles ficam por lá esporadicamente, uma fração de tempo muito pequena do ano. Portanto, num caso como este é equivocado considerar um fator de ocupação de pacientes. O fator de ocupação está definido para uma área e não para um grupo de pessoas: dada uma área frequentada por diversas pessoas ou grupos de pessoas vou escolher para definir o  $T$ , dentre todas elas, a máximamente exposta. Há uma boa discussão em Ref. [5] Cap. 1.7. É de notar também que fatores de ocupação bem pequenos podem dar taxas de

dose instantâneas muito altas.<sup>11</sup> Portanto vamos a adotar:

Fator de ocupação:  $T = \frac{1}{2}$  (valor orientativo dado em tabela B.1 de [5] o qual é bem representativo).

Usando as fórmulas usuais ([5] (2.7) e (2.8)) temos:

para a componente espalhada

$$B_{ps} = \frac{P}{aWTU} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad (79)$$

$$= \frac{(2 \times 10^{-5})}{(3,81 \times 10^{-4})(1200)^{\frac{1}{2}} 1} (1)^2 (5,3)^2 \frac{400}{1600} \cong 6,1439 \times 10^{-4} \quad (80)$$

então

$$N_{ps} = \log\left(\frac{1}{B_{ps}}\right) \cong 3,21 \Rightarrow t_{ps} = 3,21 \times 0,18m \cong 0,58m .$$

e para a componente de Fuga

$$B_L = \frac{Pd_L^2}{10^{-3}W_L T} \quad (81)$$

$$= \frac{(2 \times 10^{-5})(5,3)^2}{(10^{-3})(3600)^{\frac{1}{2}}} = 3,12 \times 10^{-4} \quad (82)$$

então

$$N_L = \log\left(\frac{1}{B_L}\right) \cong 3,51 \Rightarrow t_L = 0,35m + (3,51 - 1) \times 0,31m \cong 1,13m . \quad (83)$$

Quer dizer que as espessuras espalhada  $t_{ps} = 0,58m$  e fuga  $t_L = 1,13m$  diferem em mais de um TVL, então basta com adotar a maior delas o qual dá como resultado por limitação de dose: 1,13m.

Portanto vemos que a limitação de dose (1,13m) prevalece frente à otimização (1,07m) e a espessura da parede E deve

<sup>10</sup> Por definição "O fator de ocupação (T) para uma área é a fração média de tempo que o indivíduo maximamente exposto está presente enquanto o feixe está ligado. Assumindo que o uso de um serviço de radioterapia está uniformemente distribuído ao longo da semana de trabalho, o fator de ocupação é a fração das horas de trabalho na semana que esse indivíduo ocuparia a área, em média ao longo do ano." [5] Cap. 1.7.

<sup>11</sup> Tenho visto projetos (muitos) onde são considerados fatores de ocupação para sala adjacente absurdamente pequenos, os quais vem de considerar a ocupação do paciente: isso, como vimos, não é correto.

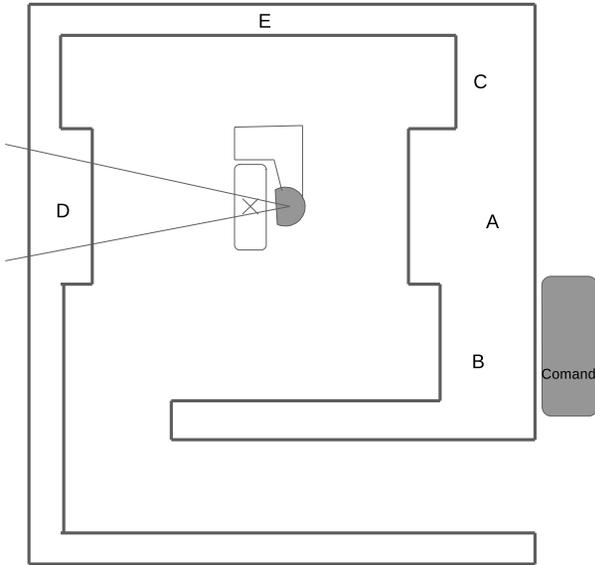


Figura 7: Situação para o cálculo da Porta.

ser, no mínimo :

$$t_B = 1,13m.$$

## 6. EXEMPLO DA PORTA

O cálculo da taxa de equivalente de dose na porta sem a blindagem  $H_T$  (fótons) e  $H_n$  (nêutrons) está bem descrito na bibliografia, [5] [7] [8], onde a partir das mesmas, são calculadas as espessuras por limitação de dose. Nestas notas não vamos discutir esse cálculo mas somente vamos a partir de valores já dados e bem realistas das taxas de dose mencionadas para realizar a análise e cálculo por otimização. No exemplo que estamos tratando, um AL de 10 MV, sabemos que esse é o potencial acelerador a partir do qual devemos prever a blindagem tanto para fótons quanto para nêutrons [5]. Supomos que no cálculo da porta o Gantry foi direcionado para a parede D, de acordo com a figura 7.

Os dados adotados para a otimização, que são comuns tanto para fótons como para nêutrons, são:

O fator de ocupação na porta:

$$T_P = \frac{1}{8}. \quad (84)$$

Este é o valor (mínimo!) recomendado em [5].

Número de pessoas com ocupação integral:

Para esta situação do Comando ficar praticamente “colado” à porta não podemos deixar de considerar os IOE que operam o AL, em meia, duas pessoas ( $m_1 = 2$  com  $T_1 = T_P = \frac{1}{8}$ ). Poderia ser questionada esta adoção argumentando-se que os IOE encontram-se em ocupação integral  $T = 1$  no comando mas é aceitável pensar que os IOE dividem sua ocupação em  $\frac{7}{8}$  no comando e  $\frac{1}{8}$  perto da porta e que o valor  $T = 1$  foi usado, por exemplo no cálculo por limitação de dose, por conservadorismo. Também, sabemos que nos serviços de Radioterapia poderá ter outros IOE passando eventualmente perto da porta e portanto, vamos considerar mais uma pessoa contribuindo para o  $n$  ( $m_2 = 1$  com  $T_2 = T_P = \frac{1}{8}$ ). Deste modo vamos ter (Eq. 4)

$$n = 2 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot \frac{1}{8} = \frac{3}{8} = 0,375. \quad (85)$$

Área da porta:

$$A = 2,2m \times 1,4m = 3,08m^2. \quad (86)$$

### 6.1. Fótons

Os dados para realizar a otimização são os seguintes:

Assumimos que as taxas de equivalente de dose semanais para as diferentes componentes de fótons, calculados segundo a abordagem e notação apresentada em [5] Cap. 2.4, (indicando o TVL e energia correspondente, segundo a referência citada) são as seguintes:

a) Radiação primária espalhada nas superfícies da sala ( $E \cong 0,2MeV$ ;  $TVL \equiv (TVL)_a \cong 6mm de Pb$ ) (já multiplicada por  $f$  = fração do feixe primário transmitido a través do paciente):

$$f.H_S = 2,6 \times 10^{-6} \frac{Sv}{sem} \quad (87)$$

b) Radiação de fuga espalhada nas superfícies da sala ( $E \cong$

$0,2\text{MeV}; TVL \equiv (TVL)_b \cong 6\text{mm de Pb}$ ):

$$H_{LS} = 3,9 \times 10^{-6} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (88)$$

c) Radiação primária espalhada no paciente ( $E \cong 0,2\text{MeV}; TVL \equiv (TVL)_c \cong 6\text{mm de Pb}$ ):

$$H_{ps} = 1,2 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (89)$$

d) Radiação de fuga transmitida a través da parede interna do labirinto ( $E \cong 10\text{MeV}; TVL \equiv (TVL)_d \cong 57\text{mm de Pb}$ ):

$$H_{LT} = 6,6 \times 10^{-7} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (90)$$

e) Fótons de captura ( $E \cong 3,6\text{MeV}; TVL \equiv (TVL)_e \cong 61\text{mm de Pb}$ ):

$$H_{cg} = 4,3 \times 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (91)$$

Temos para a contribuição total (fótons espalhados e transmitidos), segundo as fórmulas (2.13) e (2.14) de [5], com o Gantry, no nosso caso, apontando para a parede D:

$$H_D = f.H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT} \quad (92)$$

$$H_{Tot} = 2,64.H_D, \quad (93)$$

Esse fator 2,64 vem de estimar a superposição das contribuições na porta vindas do Gantry apontando para todas as quatro barreiras (D, A, piso e teto) (ver [5] Cap. 2.4.1).

De (93) e (92) temos

$$H_{Tot} = 2,64.\{f.H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}\} =$$

$$= 2,64.\{2,6 \times 10^{-6} + 3,9 \times 10^{-6} + 1,2 \times 10^{-4} + 6,6 \times 10^{-7}\} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \cong 3,3570 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}}. \quad (94)$$

E a contribuição total (sumando agora os fótons de captura) será:

$$H_T = H_{Tot} + H_{cg} = 2,64.\{f.H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}\} + H_{cg} \quad (95)$$

$$H_T = 3,3570 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} + 4,30 \times 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \cong 3,7870 \times 10^{-4} \frac{\text{Sv}}{\text{sem}} \quad (96)$$

Esta contribuição total de taxa de equivalente de dose sem blindagem  $H_T \equiv \sum H_i$ , onde cada termo  $H_i$  representa a cada uma das cinco contribuições, é a que entra no denominador

do  $B_{ot}$ , Eq. (15). Mas como está composta de contribuições  $H_i$  que tem cada uma um  $(TVL)_i$  diferente, é necessário, por exemplo, adotar um  $(TVL)$  representativo comum para todas as contribuições, para colocar no numerador do  $B_{ot}$ . Uma forma simples é adotar o promedio dos  $(TVL)_i$  ponderado pelas taxas de dose  $H_i$ . Chamamos esse TVL promedio  $\overline{TVL}$  e estará dado em geral por:

$$\overline{TVL} = \frac{\sum H_i \cdot (TVL)_i}{\sum H_i} \quad (97)$$

e substituindo cada  $H_i$  e o seu  $(TVL)_i$ , permite escrever:

$$\overline{TVL} =$$

$$\frac{2,64\{f.H_S.(TVL)_a + H_{LS}.(TVL)_b + H_{ps}.(TVL)_c + H_{LT}.(TVL)_d\} + H_{cg}.(TVL)_e}{2,64(f.H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}) + H_{cg}} \quad (98)$$

ou seja

$$= \frac{2,64\{f.H_S.(TVL)_a + H_{LS}.(TVL)_b + H_{ps}.(TVL)_c + H_{LT}.(TVL)_d\} + H_{cg}.(TVL)_e}{H_T} \quad (99)$$

e substituindo os valores das taxas de dose e os TVLs, usando que  $(TVL)_a = (TVL)_b = (TVL)_c = 6mm$  e simplifi-

cando já as unidades  $\frac{Sv}{sem}$  temos

$$\overline{TVL} = \frac{2,64(2,6 \times 10^{-6} + 3,9 \times 10^{-6} + 1,2 \times 10^{-4}).6mm + 2,64.(6,6 \times 10^{-7}).57mm + 4,30 \times 10^{-5}.61mm}{3,7870 \times 10^{-4}} \quad (100)$$

quer dizer que

$$\overline{TVL} = \frac{4,66438 \times 10^{-3}mm}{3,7870 \times 10^{-4}} \cong 12,3mm. \quad (101)$$

Notar que, no caso que estudamos, se cumpre que  $H_{LT} < \frac{H_p}{2}$  quer dizer a componente de fuga (de maior energia) não é predominante entre as quatro componentes convencionais e, portanto, a media adotada é aceitável. Caso contrário bas-

taria contemplar somente  $H_{LT}$  e  $H_{cg}$  (ver [5] Cap. 2.4.1 ).

O custo do material da blindagem, o chumbo, é hoje (ano de 2022) aproximadamente

$$C = 5,68 \times 10^4 \frac{US\$}{m^3} \quad (102)$$

E usando os valores já dados para  $n$  e  $A$ , Eqs. (85) e (86), vamos ter para o fator de transmissão ótimo

$$\begin{aligned} B_{ot} &= \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10).\alpha.n.H_T.T_v} = \\ &= \frac{5,68 \times 10^4 \frac{US\$}{m^3} . 3,08m^2 . 0,0123m}{2,3 . 10^4 \frac{US\$}{p.Sv} . 0,375p . 3,7870 \times 10^{-4} . 1040sem} \\ &= \frac{2151,81US\$}{3396,94US\$} \cong 0,633 \end{aligned} \quad (103)$$

O número de TVL será

$$t_{fo} = 0,199 \times 12,3mm \cong 2,45mm \cong 2,5mm \quad (105)$$

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = \log\left(\frac{1}{0,633}\right) \cong 0,199, \quad (104)$$

e a espessura ótima :

Cálculo por limitação de dose

## 6.1.1. Opção conservadora

A porta é classificada como área controlada e, na opção conservadora adotada nestas notas, vamos definir a meta para a porta:

$$P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}. \quad (106)$$

Dado que na porta temos duas contribuições, fótons  $H_T$  e nêutrons  $H_n$ , vamos estabelecer uma meta  $\frac{P}{2}$  para cada uma delas<sup>12</sup>. Queremos determinar a espessura  $X$  de chumbo que faz decaer o feixe de fótons até um valor  $\frac{P}{2}$ . Lembrando que o fator de ocupação da porta é  $T = \frac{1}{8}$ , buscamos o  $X$  que satisfaz

$$T.H_T(X) = \frac{P}{2} \quad (107)$$

onde  $H_T(X)$  denota a taxa de dose após a espessura  $X$ .

Este feixe, antes da espessura, é composto de cinco contribuições, cada uma delas dada por cada um dos termos do ladoo direito da equação (95):

$$H_T = 2,64 \cdot \{f.H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT}\} + H_{cg} \quad (108)$$

E sabemos que cada uma destas componentes tem seu proprio TVL, de modo que uma espessura  $X$  vai produzir uma degradação do feixe do seguinte modo:

$$H_T(X) = 2,64 \cdot \{f.H_S + H_{LS} + H_{ps}\} \cdot 10^{(-\frac{X}{6mm})} + H_{LT} \cdot 10^{(-\frac{X}{57mm})} + H_{cg} \cdot 10^{(-\frac{X}{61mm})} \quad (109)$$

Substituindo esta última na (107) temos a equação que a espessura  $X$  deve satifazer:

$$T \cdot \{2,64 \cdot \{f.H_S + H_{LS} + H_{ps}\} \cdot 10^{(-\frac{X}{6mm})} + H_{LT} \cdot 10^{(-\frac{X}{57mm})} + H_{cg} \cdot 10^{(-\frac{X}{61mm})}\} = \frac{P}{2} \quad (110)$$

Com os valores numéricos dados nas equações (87),(88),(89),(90), (106) e o valor de  $T$  e simplificando as

unidades de taxa de dose, temos de (110):

$$\frac{1}{8} \cdot \{3,3396 \times 10^{-4} \cdot 10^{(-\frac{X}{6mm})} + 1,7424 \times 10^{-6} \cdot 10^{(-\frac{X}{57mm})} + 4,30 \times 10^{-5} \cdot 10^{(-\frac{X}{61mm})}\} = 10^{-5} \quad (111)$$

Para obter, de forma artesanal, o valor do  $X$  que verifica a igualdade acima (Eq. 111) podemos ir dando valores a  $X$ , começando a partir do zero e aumentando até obter a igual-

dade com aproximação suficiente.

Também é possível obter  $X$  como aquele que faz zero a função definida a partir de (107) como

$$f \equiv -T.H_T(X) + \frac{P}{2} \quad (112)$$

ou seja:

$$f \equiv -\frac{1}{8} \cdot \left\{ 3,3396 \times 10^{-4} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{6mm}\right)} + 1,7424 \times 10^{-6} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{57mm}\right)} + 4,30 \times 10^{-5} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{61mm}\right)} \right\} + 10^{-5} \quad (113)$$

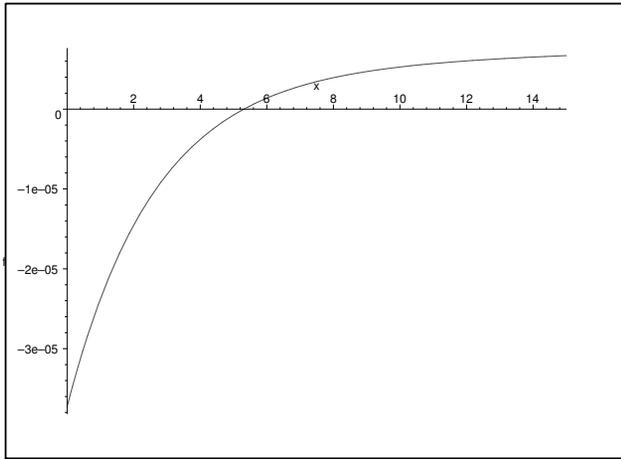


Figura 8: Gráfico de  $f$  vs  $X$ . O valor mínimo de  $X$  que satisfaz a limitação de dose é o que faz zero a função  $f$ . Resulta ser  $X \cong 5,31$  mm. Qualquer valor maior serve.

E para isso realizamos o gráfico de  $f$  vs  $X$  o que pode ser feito numericamente com algum dos programas que hoje existem, como maple, mathematica etc.

Gráficamente sai que (ver Figuras 8 e 9):

$$X = 5,31 \pm 0,01 \text{ mm} \quad (114)$$

$$\frac{1}{8} \cdot \left\{ 3,3396 \times 10^{-4} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{6mm}\right)} + 1,7424 \times 10^{-6} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{57mm}\right)} + 4,30 \times 10^{-5} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{61mm}\right)} \right\} = 2 \times 10^{-4} \quad (116)$$

Notar que se fazemos  $X = 0$  o lado esquerdo desta equação da  $4,73378 \times 10^{-5}$  o qual já é menor que o  $2 \times 10^{-4}$  do lado direito. Isto significa que não é necessária espessura nenhuma, do ponto de vista da limitação de dose. Este resultado

$$g \equiv -\frac{1}{8} \cdot \left\{ 3,3396 \times 10^{-4} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{6mm}\right)} + 1,7424 \times 10^{-6} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{57mm}\right)} + 4,30 \times 10^{-5} \cdot 10^{\left(-\frac{X}{61mm}\right)} \right\} + 2 \times 10^{-4} \quad (117)$$

Na Figura (10) observamos que  $g$  seria zero somente para um valor negativo de  $X$  e que ainda para  $X = 0$  e para todos os

Deste modo a espessura obtida por limitação de dose (5,31 mm) prevalece contra a obtida por otimização (2,5 mm) e, portanto, a espessura em chumbo da porta deverá ser

$$t_{PortaPb} \cong 5,31 \text{ mm}. \quad (115)$$

#### 6.1.2. Opção menos conservadora

Caso seja adotada a opção menos conservadora, dada pela escolha da meta  $P$  como sendo igual ao limite primário de IOE, a espessura  $X$  de chumbo vai sair como solução da mesma equação (110) mas substituindo o valor  $P = 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  no lado direito. Ao substituir todos os valores numéricos vamos ter:

pode também ser visto ao graficar (Figura (10)) a função  $g$  definida (analogamente a  $f$  no caso conservador) como  $g \equiv -T.H_T(X) + \frac{P}{2}$ :

valores maiores resulta ser  $g > 0$  ou seja que  $\frac{P}{2} > T.H_T(X)$  quer dizer a taxa de dose se mantém sempre por debaixo da

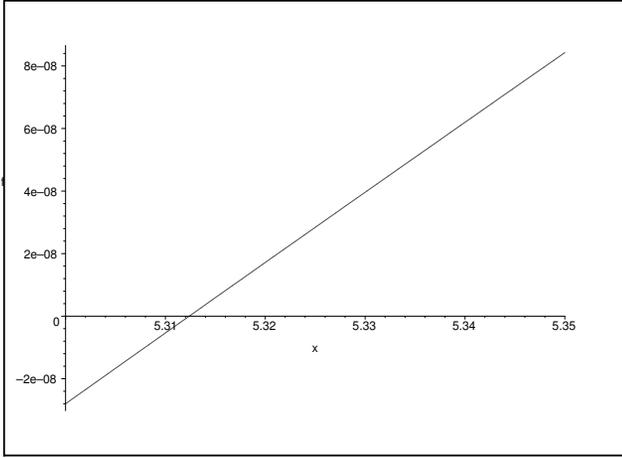


Figura 9: Gráfico de  $f$  vs  $X$ . Ampliação da Fig. 8. Se observa que  $X = (5,31 \pm 0,01)$  mm. Qualquer valor maior serve.

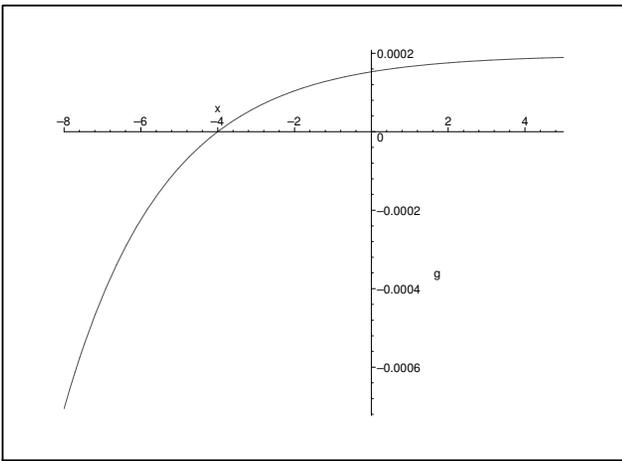


Figura 10: Gráfico de  $g$  vs  $X$ . Se observa que ainda com um valor negativo de  $X$  se tem  $g = 0$ . Repare que para todo valor maior de  $X$ , incluso o zero, é  $g > 0$  ou seja que a taxa de dose se mantém sempre menor que a meta adotada, i.e.  $\frac{P}{2} > T.H_T(X)$ . Então não é necessária blindagem segundo o cálculo por limitação de dose.

meta adotada.

Temos portanto que, neste caso menos conservador, a es-

peSSura calculada por otimização ( $\cong 2,5$  mm) vai prevalecer contra a obtida por limitação de dose (0 mm) ou seja que a espessura em chumbo da porta deverá ser, no mínimo:

$$t_{PortaPb} \cong 2,5 \text{ mm}. \tag{118}$$

### 6.2. Nêutrons

Os dados para realizar a otimização são os seguintes:

Assumimos que a taxa de equivalente de dose para nêutrons sem a blindagem na região da porta foi calculada e deu um valor de

$$H_n \cong 3 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}. \tag{119}$$

Trata-se de um valor bem realista para um AL de 10 MV numa sala com um labirinto de uns 8 ~ 9 m de comprimento.

Custo do  $m^3$  do material da blindagem, a saber, Parafina Borada (ou Polietileno borado, conhecido como "BPE" pela sigla em inglês Borated Polyethylene) é hoje (ano de 2022) aproximadamente

$$C = 4,75 \times 10^3 \frac{US\$}{m^3} \tag{120}$$

O (TVL) do BPE é  $45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$  (para nêutrons com  $E \cong 0,1 \text{ MeV}$ , [5] Cap. 2.4.3 e referencias citadas ali.), o  $B_{ot}$  vai ser:

$$B_{ot} = \frac{C.A.(TVL)}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_n \cdot T_v} =$$

$$= \frac{4,75 \times 10^3 \frac{US\$}{m^3} \cdot 3,08 \text{ m}^2 \cdot 0,045 \text{ m}}{2,3 \cdot 10^4 \frac{US\$}{p.Sv} \cdot 0,375 \text{ p} \cdot 3 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem} \cdot 1040 \text{ sem}} = \frac{658,35 \text{ US\$}}{2691,0 \text{ US\$}} \cong 0,245 \tag{121}$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = \log\left(\frac{1}{0,245}\right) \cong 0,611, \tag{122}$$

e a espessura ótima :

$$t_{no} = 0,611 \times 0,045 \text{ m} \cong 0,02749 \text{ m} \cong 2,75 \text{ cm} \tag{123}$$

Para o cálculo por limitação de dose:

### 6.2.1. Opção conservadora

A porta é classificada como área controlada e, nossa meta foi definida como  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$ . Mas, como já foi dito, adotaremos a metade porque, além dos nêutrons, está a contribuição de fótons, já estudada.

Então temos que o valor da taxa de equivalente de dose  $H_n$  será reduzido ao valor  $\frac{P}{2}$  graças ao fator de transmissão da blindagem de BPE e considerando o fator de ocupação  $T$ , segundo a equação:

$$\frac{P}{2} = B.T.H_n \quad (124)$$

O número de TVL será:

$$\begin{aligned} N &= \log \frac{1}{B} = \log \frac{2.T.H_n}{P} = \\ &= \log \frac{2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 3 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}}{2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}} = \log(3,75) \cong 0,574 \quad (125) \end{aligned}$$

então temos para a espessura da blindagem da porta para nêutrons por limitação de dose

$$t_{nl} = 0,574 \times 4,5cm \cong 2,58cm. \quad (126)$$

Portanto a espessura por otimização ( $\cong 2,75cm$ ) prevalece contra a obtida por limitação de dose ( $\cong 2,58cm$ ) e, então, temos que a espessura de BPE na porta deverá ser, no mínimo:

$$t_{PortaBPE} = 2,75cm .$$

Aqui lembramos que, seguindo o sentido do labirinto de dentro para fora, primeiro colocaremos a espessura de chumbo e depois a espessura de BPE: o chumbo atenuará a energia dos nêutrons e assim, a absorção no BPE será mais eficaz. Às vezes, será necessário colocar o BPE no meio de duas fatias de chumbo, como um sanduíche, de modo que o chumbo externo blinde os raios gama de captura gerados no mesmo BPE (ver os detalhes em [5] Cap. 2.4).

### 6.2.2. Opção menos conservadora

Se adotarmos  $P = 4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  ou seja como sendo igual ao limite primário para IOE, opção "nada" conservadora mas, como comentamos antes, permitida em Norma, logo percebemos (olhando a Eq. (124)) que o fator  $T = \frac{1}{8}$  ao multiplicar  $H_n = 3 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  vai dar um valor menor que o  $\frac{P}{2} = 2 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}$  e portanto não será necessária blindagem.

Podemos ver isso nas contas: vamos ter para o número de TVL:

$$\begin{aligned} N &= \log \frac{1}{B} = \log \frac{2.T.H_n}{P} = \\ &= \log \frac{2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 3 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}}{4 \times 10^{-4} \frac{Sv}{sem}} = \log(0,1875) < 0, \quad (127) \end{aligned}$$

e o valor negativo indica que não é necessária espessura nenhuma por limitação de dose. Quer dizer que o resultado por limitação de dose se escreve

$$t_{nl} = 0. \quad (128)$$

Portanto a espessura por otimização ( $\cong 2,75cm$ ) prevalece também neste caso menos conservador e a espessura da blindagem para nêutrons ainda deverá ser, no mínimo:

$$t_{PortaBPE} = 2,75cm .$$

Comentário importante:

Deve ficar claro para este caso menos conservador que, embora a limitação de dose indique que não é necessária blindagem para nêutrons na porta (observar que a taxa de dose sem blindagem  $H_n$  é da ordem do limite adotado (limite de IOE) e ao dividir por 8 (fator  $T = \frac{1}{8}$ ) resulta uma taxa aceitável), a análise por otimização (análise exigida especificamente para a porta em Norma CNEN 6.10 Art. 32 II e em geral em Norma CNEN 3.01 Art 5.4.3) dá um resultado não nulo, igual a 2,75cm de BPE, como vimos acima. Caso não seja colocada blindagem de BPE essa porta não estará corretamente otimizada para nêutrons e é claro que tanto o principio ALARA quanto a Norma CNEN não estarão sendo respeitadas.

Este comentário é válido para tentar desmitificar a insistência numa afirmação que é escutada nas discussões sobre blindagens "No caso de AL de 10 MV labirinto longo (8 ~ 9m) não precisa se preocupar com nêutrons". Esta afirmação é enganosa já que, como acabamos de mostrar, não é bem assim, sendo que o principio de otimização termina exigindo uma certa espessura de BPE para blindar corretamente a contribuição de nêutrons na porta. Porqué isso acontece? pois, em particular, porque foi adotado um valor alto demais para a meta  $P$  no cálculo por limitação de dose...

Também, no fundamento dessa afirmação, há críticas indicando que as fórmulas usuais utilizadas no cálculo de  $H_n$  são aproximações semi-empíricas imprecisas e que por isso seria necessária uma simulação numérica para calcular um valor mais confiável de  $H_n$ . Pois bem, simulações para Aceleradores de potencial de 15MV e maiores (mas não conheço se para 10MV) já foram realizadas ([10]) e o resultado notável foi que as taxas de dose de nêutrons simuladas resultaram sempre maiores (até 2 a 4 vezes) do que as calculadas semi-empiricamente. Quer dizer que as fórmulas

usuais semiempíricas subestimariam as doses de nêutrons na entrada das salas. Portanto creio que não seria raro que um resultado parecido se repita para o caso de AL de 10MV. Se esse fosse o caso, ou seja se a taxa sem blindagem  $H_n$  simulada resultara ser maior, a espessura otimizada seria ainda maior, já que  $H_n$  entra no denominador de Eq. (121).

## 7. APÊNDICE: SOBRE A "REGRA DAS DUAS FONTES"

No cálculo usual por limitação de dose de uma parede secundária consideramos separadamente cada contribuição: Fuga (F) e Espalhada (E). Definimos uma meta  $P$  e calculamos cada uma com as fórmulas usuais. Se as espessuras obtidas são "parecidas" (i.e. se diferem em menos de 1 TVL) isso significa que cada espessura vai "deixar passar" praticamente o mesmo, quer dizer  $P$ . Então teríamos no ponto a proteger aproximadamente  $P + P = 2P$ , ou seja o dobro da meta. Para remediar isto temos que diminuir à metade esse valor, por isso basta acrescentar uma camada semirredutora, 1 HVL, à maior (seja a maior, por ex., a espessura que blindava E). Com isso a componente E vai diminuir agora à  $P/2$  e a componente F vai diminuir ainda à menos do que  $P/2$  já que estará atravessando uma espessura maior do que a calculada, em mais de 1 HVL (a espessura para blindar F era algo menor do que a de E). Então em total, pela espessura adotada, vai passar  $\frac{P}{2} +$  algo menor do que  $\frac{P}{2} \approx$  algo menor do que  $P$  e o ponto estará bem protegido.

Caso em que as duas espessuras calculadas diferam em mais de 1 TVL a "regra das duas fontes" indica adotar a espessura da maior (seja a maior, por ex., a espessura que blindava E), somente, sem acrescentar mais nada. Neste caso a componente E vai diminuir à  $P$  e a componente F vai diminuir à menos do que  $P/10$  (porque F vai agora estar atravessando uma espessura mais de 1 TVL maior do que o valor obtido no seu cálculo). Quer dizer que no ponto a proteger vamos ter uma taxa menor do que  $P + \frac{1}{10}P = \frac{11}{10}P$  ou seja haverá um excesso de menos de um 10 por cento da meta  $P$ . Isto não é algo ótimo mas está dentro do margem de erros. Mas nestes casos, muitas vezes o cálculo por otimização pode ajudar a melhorar a proteção radiológica.

### 7.1. Uma versão geral e melhorada da regra das duas fontes.

Podemos considerar que, em geral, o fator de transmissão  $B$  se calcula com uma fórmula do tipo (ver as Eqs. (35), (37) e (62)):

$$B = \frac{P}{H} \quad (129)$$

Onde  $P$  é a meta adotada para proteger o ponto em análise e  $H$  é a taxa de equivalente de dose produzida pela fonte sem a blindagem.

O número de TVL sabemos que será (o chamamos  $N_1$ ):

$$N_1 = \log \frac{1}{B} = \log \frac{H}{P} \quad (130)$$

Se agora temos o caso de duas fontes iguais que contribuem ao mesmo ponto a proteger, vamos ter que nova taxa  $H'$  vai ser o dobro da anterior:  $H' = 2H$ . Para blindar o ponto vamos calcular o novo fator de transmissão, que chamamos  $B'$ , com

$$B' = \frac{P}{H'} = \frac{P}{2H} \quad (131)$$

O número de TVL, chamado agora  $N_2$  será:

$$N_2 = \log \frac{1}{B'} = \log \frac{2H}{P} = \log \frac{H}{P} + \log 2 = N_1 + \log 2 \quad (132)$$

mas sabemos que  $(\log 2)$  TVL é, por definição, 1 HVL. Essa é a "regra das duas fontes": acrescentar 1 HVL ao duplicar a fonte.

Se tivermos três fontes, com o mesmo raciocínio vamos obter que o número de TVL, que chamamos agora  $N_3$ , vai ser:

$$N_3 = N_1 + \log 3 \quad (133)$$

quer dizer que para três fontes vamos ter que acrescentar  $(\log 3)$  TVL, o que representa uma espessura capaz de diminuir a  $\frac{1}{3}$  a dose, o que poderia ser chamada de camada "terçoredutora". Bom é claro agora que para um número  $\mathcal{F}$  de fontes iguais vamos ter

$$N_{\mathcal{F}} = N_1 + \log \mathcal{F} \quad (134)$$

quer dizer que temos que acrescentar  $(\log \mathcal{F})$  TVL, o que chamariamos de camada " $\mathcal{F}$ -redutora". Quer dizer que há, em geral, uma "regra das  $\mathcal{F}$  fontes": acrescentar  $(\log \mathcal{F})$  TVL ao " $\mathcal{F}$ -plicar" (multiplicar por  $\mathcal{F}$ ) a fonte.

Esta regra pode ser vista de uma maneira equivalente. Voltando ao caso de duas fontes, Eq.(131):

$$B' = \frac{P}{H'} = \frac{P}{2H} \quad (135)$$

escrevendo da forma

$$B' = \frac{P}{H'} = \frac{P}{2H} \quad (136)$$

olhando o numerador do lado direito da segunda igualdade

vamos considerar, no cálculo por limitação de dose, a metade da meta, quer dizer  $\frac{P}{2}$ . Dos resultados obtidos, no caso de espessuras por Fuga e por Espalhada para uma parede secundária, vamos escolher a maior, e ponto. O HVL já estará automaticamente e sempre, acrescentado (ver Eq. (132)). No caso de duas paredes diferentes, que blindam cada uma uma fonte (por exemplo no caso de dois bunkers de aceleradores lineares) para proteger um mesmo ponto com a meta  $P$ , se calcula com  $\frac{P}{2}$  para cada parede.

Generalizando esta forma de ver, no caso de  $\mathcal{F}$  fontes vamos escrever

$$B_{\mathcal{F}} = \frac{P}{\mathcal{F}H} = \frac{\frac{P}{\mathcal{F}}}{H} \quad (137)$$

e então vamos estar considerando no cálculo, a meta  $P$  dividida pelo número de fontes  $\mathcal{F}$ , quer dizer  $\frac{P}{\mathcal{F}}$ .

O caso que aparece em Radioterapia é o de varios equipamentos, como por exemplo acelerador linear, equipamento de braquiterapia alta taxa de dose, Gamma Knife, Equipamento de telecobalto, etc.

## 7.2. Exemplo de Duas Salas

A seguir vamos considerar brevemente o caso de duas salas de tratamento contiguas, tal como é mostrado na figura (11). Os parâmetros de cada AL, como a carga de trabalho primária  $W$ , a carga de fuga associada a IMRT  $W_L$ , o fator de atenuação pelo cabeçote  $f$  e o ângulo de espalhamento (para as paredes B1 e B2) serão os mesmos que os adotados nos exemplos anteriores, em particular na seção 3.1. Notar que agora os comandos estão bem separados das paredes das salas e fora do cone primário. Deste modo vamos ter, da planta, que a distância desde o isocentro até o Comando é de 9,2m.

Analisamos a Sala 1, parede B1: Para a otimização temos que a única mudança em relação ao cálculo do  $B_{ot}$  apresentado na seção 3.1, Eq. (32) é no valor da  $H_T$ . Temos que  $H_T$  estará composto de duas contribuições, uma de cada Acelerador Linear. Para a contribuição do AL1, cujo isocentro se encontra a 9,2m do Comando 1, basta multiplicar a Eq. (31) pelo fator  $(\frac{6,2}{9,2})^2$  para assim obter o novo  $H_{T1}$ .

$$H_{T1} = 0,1992 \frac{Sv}{sem} \times (\frac{6,2}{9,2})^2 \cong 0,0905 \frac{Sv}{sem} \quad (138)$$

Para a contribuição do AL2 assumimos conservadoramente que a distância é a mesma, embora seja um pouco maior. Então vamos ter para a contribuição total:

$$H_T = H_{T1} + H_{T2} \cong 2 \times H_{T1} \cong 2 \times 0,0905 \frac{Sv}{sem} = 0,181 \frac{Sv}{sem} \quad (139)$$

Com isso sai o  $B_{ot}$ , basta multiplicar por  $\frac{0,1992}{0,181}$  o valor dado em Eq. (32):

$$B_{ot} = 1,992 \times 10^{-4} \times \frac{0,1992}{0,181} \cong 2,192 \times 10^{-4} \quad (140)$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = -\log(2,192 \times 10^{-4}) = 3,66 \quad (141)$$

e a espessura ótima :

$$t_{ot} = 0,35m + (3,66 - 1)0,31m \cong 1,17m \quad (142)$$

É claro que, por simetria, esta é também a espessura ótima para a parede B2.

Para o cálculo por limitação de dose:

A meta nos Comandos é  $P = 2 \times 10^{-5} \frac{Sv}{sem}$

No Comando 1 temos contribuições que vem tanto do AL1 quanto do AL2, por isso, de acordo com o discutido acima nesta seção, vamos realizar o cálculo com  $\frac{P}{2}$  ("regra das duas fontes"). Mas também, ao considerar as componentes

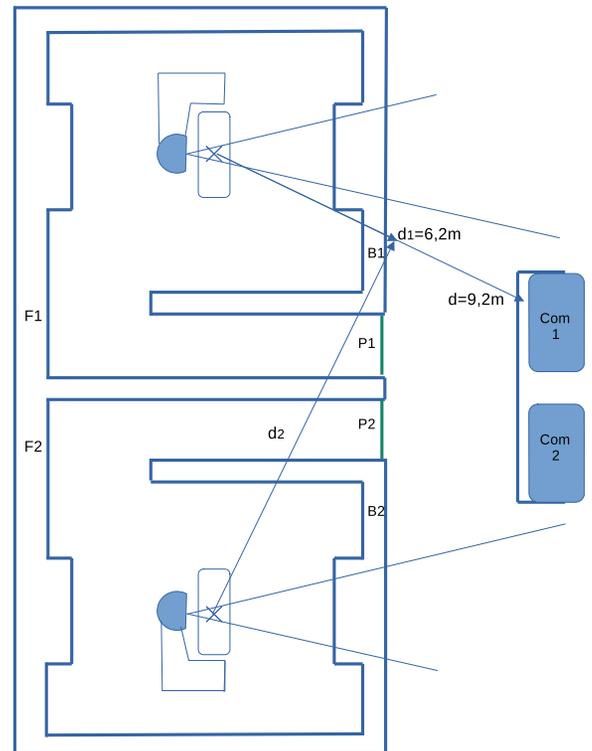


Figura 11: Situação para aplicar "Regra das duas fontes"

Fuga e Espalhada, vamos usar a regra das duas fontes da forma melhorada como explicamos acima. Quer dizer que vamos dividir mais uma vez por 2, e com isso vai ser acrescentado 1 HVL automaticamente. Então nosso cálculo vai ser com  $\frac{P}{4}$ .

Para a componente espalhada temos

$$B_{ps} = \frac{P/4}{aWTU} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad (143)$$

$$= \frac{(0,5 \times 10^{-5})}{(4,22 \times 10^{-3})(1200) 1^{\frac{1}{5}}} (1)^2 (9,2)^2 \frac{400}{1600} \cong 1,045 \times 10^{-4} \quad (144)$$

então

$$N_{ps} = \log\left(\frac{1}{B_{ps}}\right) \cong 3,98 \Rightarrow t_{ps} = 3,98 \times 0,31m \cong 1,23m .$$

e para a componente de Fuga

$$B_L = \frac{(P/4)d_L^2}{10^{-3}W_L T} \quad (145)$$

$$= \frac{(0,5 \times 10^{-5})(9,2)^2}{(10^{-3})(3600)} = 1,175 \times 10^{-4} \quad (146)$$

então

$$N_L = \log\left(\frac{1}{B_L}\right) = 3,93$$

$$\Rightarrow t_L = 0,35m + (3,93 - 1) \times 0,31m \cong 1,26m . \quad (147)$$

De estas duas espessuras, Espalhada e Fuga, vemos que prevalece a segunda. Lembrar que, neste caso, ao ter usado a forma melhorada da regra das duas fontes, embora as espessuras sejam parecidas (diferam em menos de 1 TVL), não será necessário acrescentar mais nada já que o HVL foi automaticamente acrescentado quando dividimos por 2. Quer dizer que a espessura por limitação de dose é: 1,26m.

Vemos que a espessura por limitação de dose, 1,26m prevalece frente a espessura ótima 1,17m e, então, a espes-

sura da parede B1 deverá ser, no mínimo:

$$t_{B1} = 1,26m.$$

É importante notar que deverá ser verificado que a espessura adotada serve para proteger a região intermédia entre o comando 1 e a parede B1, quer dizer a 30cm da parede B1. Neste projeto essa região é de passagem e tem um fator de ocupação  $T = \frac{1}{5}$  (adotado da tabela B1 de [5]). A distância é de 6,2m (como na seção 3.1). Com estes dados é simples ver que por limitação de dose sai uma espessura de 1,15m. O cálculo por otimização sai, como sabemos, da Eq. (15), para a qual, da seção 3.1, já conhecemos todas as quantidades nela, com exceção de duas, a saber  $H_T$  e  $n$ .

Para determinar  $H_T$  é necessário considerar a contribuição dos dois AL, de modo que vamos ter

$$H_T = H_{T1} + H_{T2} \quad (148)$$

Da planta se observa que o isocentro do AL2 se encontra a uma distância  $d_2$  do ponto a proteger (em B1) que é 1,5 vezes a distância deste ponto ao isocentro de AL1  $d_1$ . Temos assim  $d_2 = 1,5d_1$ . Ou seja que AL2, ao ter a mesma carga (tanto  $W$  quanto  $W_L$ ) que AL1, vai contribuir com  $\frac{1}{1,5^2}$  vezes a contribuição de AL1 (lei do quadrado da distância), quer dizer:

$$H_{T2} = H_{T1} \frac{(d_1)^2}{(d_2)^2} = H_{T1} \frac{(d_1)^2}{(1,5 \cdot d_1)^2} = \frac{H_{T1}}{1,5^2} = \frac{H_{T1}}{2,25} . \quad (149)$$

Por isso a contribuição total pode ser escrita como

$$H_T = H_{T1} + \frac{H_{T1}}{2,25} = \frac{3,25}{2,25} H_{T1} \quad (150)$$

$H_{T1}$  é o mesmo da seção 3.1, Eq. (31),  $H_{T1} = 0,1992 \frac{Sv}{sem}$ , então:

$$H_T = \frac{3,25}{2,25} \cdot 0,1992 \frac{Sv}{sem} \cong 0,288 \frac{Sv}{sem} . \quad (151)$$

O fator  $n$  "número de pessoas com ocupação integral" é diferente agora já que, no presente projeto, temos um corredor. Notar que não seria correto deixar o valor da seção 3.1,  $n = 2$ , porque, com uma ocupação agora de  $T = \frac{1}{5}$  isso significaria que, da Eq. (4), o  $n$  se deveria poder escrever  $n = 2 = m \cdot \frac{1}{5}$  ou seja que deveria ser  $m = 10$ , umas 10 pessoas presentes na região adjacente à parede B1, todo um exagero. Vamos aceitar que se tem duas pessoas com essa ocupação, portanto temos:  $n = 2 \cdot \frac{1}{5} = 0,4$ . Então vamos ter para o  $B_{ot}$ :

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot n \cdot H_T \cdot T_v} = \frac{12,43m^2 \cdot 500 \frac{USS}{m^3} \cdot 0,31m}{2,3 \cdot 10^4 \frac{USS}{p \cdot Sv} \cdot 0,4p \cdot 0,288 \frac{Sv}{sem} \cdot 1040sem} \cong 6,992 \times 10^{-4} \quad (152)$$

Número de TVL será

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ot}}\right) = -\log(6,992 \times 10^{-4}) \cong 3,16 \quad (153)$$

e a espessura ótima :

$$t_{ot} = 0,35m + (3,16 - 1)0,31m \cong 1,02m. \quad (154)$$

Vemos que a espessura obtida por limitação de dose 1,15m prevalece frente a espessura obtida por otimização 1,02m e então para proteger esta região intermedia é necessária uma espessura de 1,15m. No entanto tínhamos já calculado que, para proteger o comando, a espessura necessária para a

parede B1 é de 1,26m e com isso fica verificado que a região intermedia estará bem protegida.

As outras barreiras da sala 1 para as que é necessário considerar a contribuição dos dois AL são a porta P1, o teto secundário acima do labirinto e a parede F1. O mesmo, simetricamente, quando seja analisada a sala 2.

### Agradecimentos

Agradeço ao departamento de publicações do CBPF, Servidores Nilton Alves Jr, F. Valéria Fortaleza de Vasconcelos, Aline Correa Dantas e demais colaboradores pelo excelente trabalho que vêm realizando e que possibilitou a divulgação destas notas. Agradeço o apoio da CNEN e do CBPF/MCTI.

- 
- [1] Protection Against Ionizing Radiation From External Sources Used in Medicine, ICRP Publication 33, Annals of the ICRP Volume 9 No. 1 (1982).
  - [2] Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection, ICRP Publication 37, Annals of the ICRP Volume 10 No. 2/3 (1983).
  - [3] 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP Volume 21 No. 1-3 (1991).
  - [4] The Optimization of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101, PART 2, Annals of the ICRP Volume 36 No. 3 (2006).
  - [5] Structural Shielding design and evaluation for megavoltagem X and Gamma- Ray radiotherapy Facilities. NCRP report #151 (2005).
  - [6] Norma CNEN-NN-6.10 Requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de Radioterapia.
  - [7] Patton H. McGinley, Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities, Medical Physics Publishing, (1998).
  - [8] Eugênio del Vigna e Rossana C. Falcão, Blindagem em Radioterapia- Técnicas e Normas, PQRT - INCA (2000).
  - [9] Norma CNEN-NN-3.01 Diretrizes Básicas de Radioproteção.
  - [10] Alessandro Facure, Doses Ocupacionais Devido a Nêutrons em Salas de Aceleradores Lineares de Uso Médico, Tese doutorado COPPE (2006).
  - [11] Luis Tahuata e outros autores, Radioproteção e Dosimetria, Fundamentos, IRD, 9na Revisão (2003).

Notas Técnicas é uma publicação de trabalhos técnicos relevantes, das diferentes áreas da física e afins, e áreas interdisciplinares tais como: Química, Computação, Matemática Aplicada, Biblioteconomia, Eletrônica e Mecânica entre outras.

Cópias desta publicação podem ser obtidas diretamente na página web <http://revistas.cbpf.br/index.php/nt> ou por correspondência ao:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brasil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>

Notas Técnicas is a publication of relevant technical papers, from different areas of physics and related fields, and interdisciplinary areas such as Chemistry, Computer Science, Applied Mathematics, Library Science, Electronics and Mechanical Engineering among others.

Copies of these reports can be downloaded directly from the website <http://notastecnicas.cbpf.br> or requested by regular mail to:

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Área de Publicações  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – 4<sup>o</sup> andar  
22290-180 – Rio de Janeiro, RJ  
Brazil  
E-mail: [alinecd@cbpf.br](mailto:alinecd@cbpf.br)/[valeria@cbpf.br](mailto:valeria@cbpf.br)  
<http://portal.cbpf.br/publicacoes-do-cbpf>