

# Princípios do cálculo de blindagem em radioterapia

(Principles of calculating shielding in radiotherapy)

Eduardo de Paiva<sup>1</sup>

Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
Recebido em 31/3/2014; Aceito em 18/4/2014; Publicado em 7/8/2014

A radioterapia é uma prática médica que emprega radiação ionizante para o tratamento de câncer. Um problema deste tipo de uso das radiações ionizantes é como evitar que as vizinhanças da sala de tratamento receba uma quantidade de radiação acima dos níveis permitidos. Neste trabalho a lei do inverso do quadrado da distância e a lei de atenuação exponencial da intensidade da radiação são usadas para obter uma expressão básica necessária para se estimar as espessuras das barreiras primárias em radioterapia.

**Palavras-chave:** lei do inverso do quadrado da distância, atenuação exponencial, blindagem, radioterapia.

Radiotherapy is a medical practice that uses ionising radiation for the treatment of cancer. A problem of this type of use of ionizing radiation is how to prevent that the vicinities of the treatment room receive an amount of radiation above the permitted levels. In this work the inverse-square law and the exponential attenuation law of the radiation intensity are used to obtain a basic expression necessary to estimate the thickness of primary barriers in radiotherapy.

**Keywords:** inverse-square law, exponential attenuation, shielding, radiotherapy.

## 1. Introdução

A radioterapia é uma técnica que utiliza radiação ionizante para o tratamento de câncer [1]. A radiação ionizante pode ser constituída de partículas sem massa (raios X e gama) ou com massa (prótons, elétrons, nêutrons, pósitrons, etc.) e seu emprego em medicina começou logo após a descoberta dos raios X por Roentgen em 1895 [2] e da radioatividade por Becquerel em 1896 [3]. A radioterapia evoluiu bastante desde então e atualmente existem formas de tratamentos muito sofisticados que empregam grandes aceleradores de partículas e/ou geradores de fótons de alta energia (até 30 MeV) [4]. Uma preocupação recorrente é como calcular as espessuras das barreiras (ou blindagens) das salas que abrigam tais máquinas de modo que os níveis de radiação em suas vizinhanças fiquem dentro dos valores permitidos. No que segue serão mostrados os princípios físicos envolvidos no cálculo das espessuras das barreiras para o caso de uma instalação de radioterapia que abriga um acelerador linear de elétrons que produz feixes de fótons de alta energia via o processo de bremsstrahlung (ver Fig. 1), e em seguida uma expressão simples será obtida para se estimar a espessura da barreira.

## 2. Os princípios físicos

A Fig. 2 mostra um esboço de uma sala de tratamento radioterápico com uma fonte de fótons de alta energia. A grandeza radiológica que deve ser avaliada neste caso é a dose absorvida, definida como a razão entre a energia média depositada pela radiação em um certo volume e a massa desse volume (no SI joule/kg que recebe o nome de Gray, símbolo Gy). A questão então é saber qual a espessura  $S$  da barreira de modo que a taxa de dose  $D$  dentro da sala seja reduzida ao valor permitido  $P$  no ponto A fora da sala. A taxa de dose  $P$  também é chamada de limite de dose, e no Brasil os limites de dose legalmente permitidos são aqueles adotados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear [5], e depende se na área a ser protegida apenas permanecem funcionários da instalação (devidamente treinados e credenciados para trabalhar com radiação) ou se é de livre acesso (por exemplo um jardim ou estacionamento). No primeiro caso a área é dita ser uma área *controlada* e no segundo uma área *livre*. A radiação (e a taxa de dose) que chega no ponto A da Fig. 2 depende essencialmente da lei do inverso do quadrado da distância e da lei de atenuação exponencial da intensidade da radiação.

<sup>1</sup>E-mail: epaiva@ird.gov.br.



Figura 1 - Acelerador linear de elétrons usado em radioterapia. A seta indica a direção de saída do feixe.

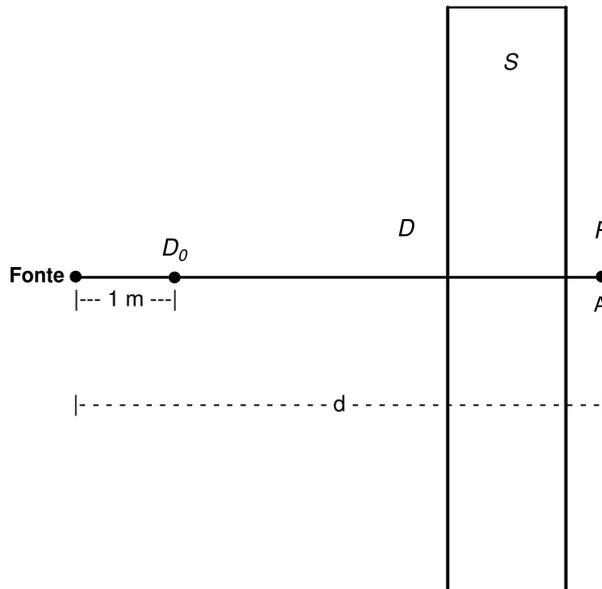


Figura 2 - Geometria usada no cálculo da espessura  $S$  da barreira.

Várias grandezas físicas variam com o inverso do quadrado da distância à sua fonte. Assim é o caso da força de atração gravitacional entre duas massas que é inversamente proporcional ao quadrado da distância de separação entre elas; da força de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas que também depende do inverso do quadrado da distância entre elas, e da intensidade da radiação eletromagnética emitida por uma fonte pontual, que decresce com o quadrado da distância.

<sup>2</sup>Aqui vamos supor que as dimensões da fonte são pequenas quando comparadas com as distâncias envolvidas. Em radioterapia com o uso de aceleradores lineares esta suposição é bastante razoável, uma vez que as distâncias são da ordem de alguns metros.

<sup>3</sup>Aqui vamos supor que a interação dos fótons com o ar é desprezível. Em radioterapia com o uso de aceleradores lineares, em que as energias podem chegar a algumas dezenas de megaelétrons-volt, esta suposição é bastante razoável.

Vamos considerar que a fonte de radiação na Fig. 2 seja uma fonte pontual<sup>2</sup> e que emite radiação de modo isotrópico, e sejam duas esferas imaginárias e concêntricas de raios 1 e  $d$  metros com centro na fonte. Na distância de 1 m o número de fótons  $N_1$  por unidade de área é  $\varphi_0$ , e na distância  $d$  o número de fótons  $N_d$  por unidade de área é  $\varphi_d$ ,

$$\varphi_0 = \frac{N_1}{4\pi 1^2} \quad \text{e} \quad \varphi_d = \frac{N_d}{4\pi d^2}. \quad (1)$$

Como o número total de fótons que emana da fonte e que atravessa cada esfera concêntrica é uma quantidade que se conserva,<sup>3</sup> podemos escrever que

$$N_1 = N_d \quad \text{ou} \quad \varphi_0 4\pi 1^2 = \varphi_d 4\pi d^2, \quad (2)$$

que leva à expressão matemática da lei do inverso do quadrado da distância

$$\frac{\varphi_d}{\varphi_0} = \frac{1}{d^2}. \quad (3)$$

Em termos de taxas de doses a Eq. (3) pode ser escrita como

$$\frac{D}{D_0} = \frac{1}{d^2}, \quad (4)$$

sendo  $D_0$  a taxa de dose na distância de referência de 1 m da fonte.

O modo como a intensidade de um feixe de radiação eletromagnética é atenuado quando atravessa um meio é descrito pela lei de atenuação exponencial

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (5)$$

onde  $I$  é a intensidade da radiação transmitida após a radiação de intensidade inicial  $I_0$  atravessar um meio absorvedor de espessura  $x$ , e  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear, que depende da energia da radiação e da natureza do material do meio. Em sua passagem pelo absorvedor o fóton é atenuado por vários processos físicos, sendo os principais o espalhamento Thomson (espalhamento do fóton por um elétron do átomo, sendo que os fótons espalhado e incidente possuem a mesma energia), o efeito fotoelétrico (o fóton incidente ejeta um dos elétrons orbitais do átomo, e toda a sua energia é transferida para o elétron), o espalhamento Compton (espalhamento do fóton por um elétron do átomo, sendo que o fóton incidente transfere uma parte de sua energia para o elétron) e a produção de pares (o fóton de energia  $E \geq 1,02$  MeV interage com o átomo e toda a sua energia é usada para a criação do par elétron ( $e^-$ )–pósitron ( $e^+$ )) [6]. Portanto o coeficiente  $\mu$  representa a soma dos coeficientes individuais,

$$\mu = \mu_{\text{Thomson}} + \mu_{\text{fotoelétrico}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{par}}. \quad (6)$$

O espalhamento Thomson só é importante para baixas energias do fóton incidente ( $E < 10$  keV) e grandes números atômicos  $Z$ , e portanto em radioterapia com o uso de aceleradores lineares ( $E \geq 4$  MeV) pode ser desprezado. A atenuação devido ao efeito fotoelétrico é proporcional a  $(Z/E)^3$  e por isso contribui bastante para o coeficiente de atenuação total em baixas energias do fóton e materiais de grandes  $Z$ ; à medida que a energia do fóton cresce a contribuição do efeito fotoelétrico decresce acentuadamente até que a energia do fóton supera a energia de ligação do elétron e o espalhamento Compton começa a predominar. O espalhamento Compton cai com a energia e é independente de  $Z$  e por isso não difere de modo significativo para elementos leves e pesados. A contribuição da produção de pares para o coeficiente de atenuação tem limiar em 1,02 MeV e aumenta com  $Z^2$  e com a energia do fóton. À medida que a energia cresce a contribuição de Compton diminui e a produção de pares aumenta. Em energias muito maiores que 1,02 MeV a produção de pares é o processo de interação dominante. A Fig. 3 mostra o coeficiente de atenuação linear total como função da energia do fóton para concreto comum, aço e chumbo com dados obtidos da Ref. [7].

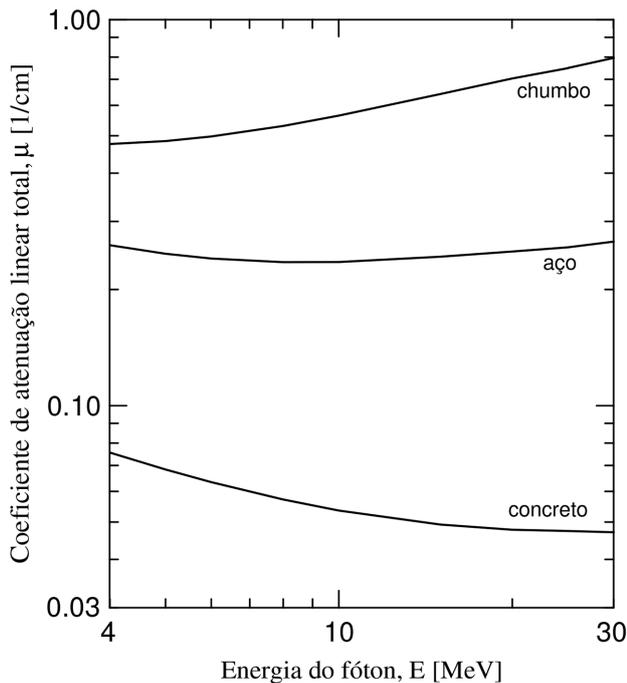


Figura 3 - Coeficiente de atenuação linear total como função da energia do fóton para concreto comum, aço e chumbo.

Para cada material e para cada energia da radiação há uma espessura do material absorvedor que reduz a intensidade da radiação incidente à metade e a um décimo de seu valor inicial. Estas espessuras são chamadas, respectivamente, de camada semi-redutora (*half-value layer* – HVL) e camada deci-redutora (*tenth-value*

*layer* – TVL). Para este último caso podemos escrever

$$\frac{I_0}{10} = I_0 e^{-\mu \text{TVL}}, \quad (7)$$

ou

$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}. \quad (8)$$

A Eq. (5) aplicada para as taxas de doses mostradas na Fig. 2 permite escrever

$$\frac{P}{D} = e^{-\mu S}, \quad (9)$$

e com isso a espessura  $S$  da barreira pode ser escrita como

$$S = -\frac{\ln \frac{P}{D}}{\mu}, \quad (10)$$

ou ainda usando a Eq. (8)

$$S = \left( -\frac{\ln \frac{P}{D}}{\ln 10} \right) \times \text{TVL}. \quad (11)$$

Considerando agora a relação de mudança de base dos logaritmos,

$$\log_a Y = \frac{\log_b Y}{\log_b a},$$

temos

$$S = -\log \frac{P}{D} \times \text{TVL}. \quad (12)$$

Finalmente, inserindo a Eq. (4) obtida da lei do inverso do quadrado da distância, obtemos

$$S = -\log \frac{P d^2}{D_0} \times \text{TVL}. \quad (13)$$

A Eq. (13) vale para barreiras primárias, ou seja, barreiras expostas diretamente ao feixe. No que segue veremos aplicações da expressão acima para o cálculo de barreira.

### 3. A espessura da barreira primária

Como exemplo, seja uma instalação de radioterapia que possui uma sala de tratamento com um acelerador linear de elétrons que produz fótons de 6 MeV, onde a fonte está localizada a uma distância de 4,5 m do ponto A (ver Fig. 2). A taxa de dose  $D_0$  depende de parâmetros do acelerador; da quantidade de pacientes tratados por dia; da frequência e tipos de tratamento, e se o ponto A a ser protegido é uma área com ocupação integral, parcial ou esporádica. No Brasil, para equipamentos com esta energia, um valor típico de  $D_0$  é 171,43 Sievert/semana.<sup>4</sup> O limite de dose no caso em que a área (ponto A) é uma área controlada vale  $P = 0,4$

<sup>4</sup>O Sievert (Sv) é a unidade de dose equivalente, que difere da dose absorvida (Gy), pois leva em conta os fatores de qualidade da radiação. Contudo, para fótons o Sievert é numericamente igual ao Gray,  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$ .

mSv/semana, conforme Ref. [5]. Para fótons de 6 MeV e considerando a barreira construída com concreto comum, a Tabela B.2 da Ref. [8] indica um valor de camada deci-redutora, TVL, igual a 37 cm. A inserção dos valores das grandezas na Eq. (13) permite calcular a espessura da barreira primária,

$$S = \left( -\log \frac{0,4 \times 10^{-3} \times 4,5^2}{171,43} \right) \times 37 = 160,05 \text{ cm.}$$

Na Fig. 4, para uma energia fixa de 6 MeV, é mostrado como a espessura da barreira varia com a distância  $d$  da fonte ao ponto a ser protegido, para áreas livre ( $P = 0,02$  mSv/semana) e controlada, e para chumbo ( $\rho = 11,35$  g/cm<sup>3</sup>), aço ( $\rho = 7,87$  g/cm<sup>3</sup>) e concreto comum ( $\rho = 2,35$  g/cm<sup>3</sup>) como materiais blindadores. Pode ser observado que a espessura da barreira diminui com o aumento da distância da fonte ao ponto que deve ser protegido. Ainda pode ser observado que as espessuras diminuem com o aumento da densidade do material da barreira e que são sempre maiores quando se usa limite de dose para indivíduos do público (área livre).

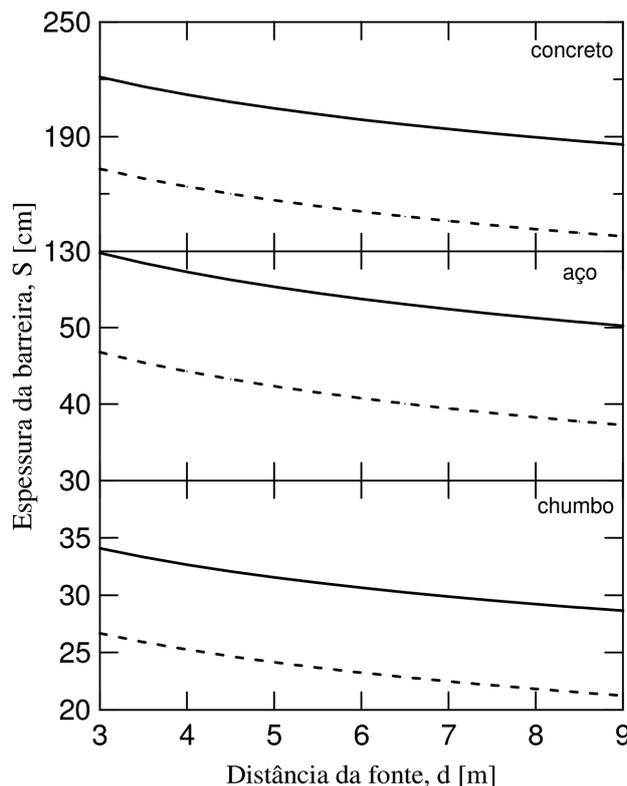


Figura 4 - Espessura da barreira primária como função da distância da fonte para concreto comum, aço e chumbo. Linhas sólidas: cálculo para área livre; linhas tracejadas: cálculo para área controlada.

Na Fig. 5, para uma distância fixa de 5,5 m, é mostrado como a espessura da barreira varia com a energia  $E$  do feixe de fótons, para áreas livre e controlada, e para chumbo, aço e concreto comum como materiais

das blindagens. Da Fig. 5 pode ser visto que a espessura da barreira aumenta com o aumento da energia para o concreto; para o aço aumenta até 10 MeV e depois permanece constante, e para o chumbo é constante em toda a faixa de energia. Este comportamento pode ser entendido com uma análise da Fig. 3 onde se vê que para o concreto o coeficiente de atenuação linear total  $\mu$  diminui com a energia, o que significa que o TVL aumenta, conforme Eq. (8), e portanto a espessura da barreira também aumenta, conforme Eq. (13). Para o aço o coeficiente  $\mu$  diminui até  $\sim 10$  MeV, o que significa que o TVL aumenta; a partir de 10 MeV o coeficiente  $\mu$  aumenta, o que significa que o TVL diminui. Contudo, por uma questão de conservação, usamos o maior TVL correspondente a 10 MeV que implica em uma maior espessura da barreira. Para o chumbo o coeficiente  $\mu$  aumenta em toda a faixa de energia, o que significa que o TVL diminui, mas de novo por uma questão de conservação usamos o maior valor correspondente a 4 MeV que implica em uma maior espessura da barreira. Como na Fig. 4, pode ser observado que as espessuras diminuem com o aumento da densidade do material da barreira e que são sempre maiores quando se usa limite de dose para indivíduos do público.

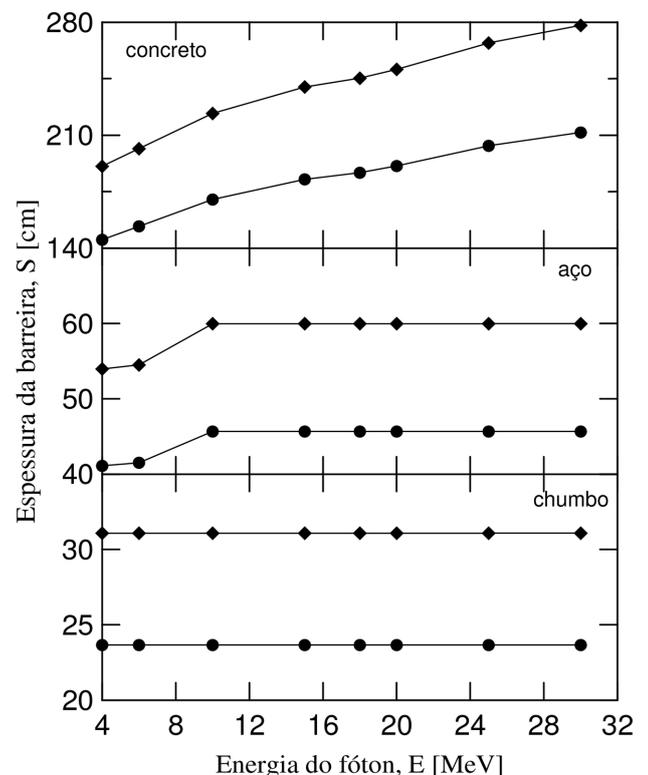


Figura 5 - Espessura da barreira primária como função da energia da fonte para concreto comum, aço e chumbo. Losangos: cálculo para área livre; círculos: cálculo para área controlada.

#### 4. Considerações finais

A radioterapia emprega radiação ionizante para o tratamento de tumores. Atualmente existem aceleradores lineares de elétrons que produzem feixes de fótons de alta energia com importante utilização em radioterapia. Uma questão importante então é como estimar as espessuras das blindagens das salas de instalações de radioterapia que abrigam estes equipamentos de modo que a radiação nas vizinhanças da sala esteja dentro dos níveis aceitáveis. Neste trabalho as leis do inverso do quadrado da distância e da atenuação exponencial da intensidade da radiação são usadas para obter uma expressão que permite estimar a espessura da blindagem primária de uma sala de radioterapia. É mostrado que a espessura da barreira depende de parâmetros do equipamento; dos tipos de tratamento; da quantidade de pacientes tratados por dia; do tipo de ocupação da área que deve ser protegida; da distância da fonte; da energia do feixe de fótons; da natureza do material escolhido para construir a barreira, e do nível de radiação

permitido no ponto de interesse.

#### Referências

- [1] E.S. de Almeida, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **12**, 12 (1990).
- [2] W.C. Roentgen, *Journal of the Franklin Institute* **141**, 183 (1896).
- [3] H. Becquerel, *Comptes Rendus* **122**, 501 (1896).
- [4] F.M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy* (Williams & Wilkins, Baltimore, 1984), chap. 4.
- [5] Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN-NN-3.01 (2005).
- [6] R. Eisberg and R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979), cap. 2.
- [7] NIST homepage, National Institute of Standards and Technology. Disponível em <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap2.html>.
- [8] National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report 151 (2005).