



# Estudo da influência do espectro de cargas de trabalho no cálculo de blindagem em salas de radiologia convencional

**Alejandro H. L. Gonzales e Paulo R. Costa**

Laboratório de Dosimetria das Radiações e Física Médica  
Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP)  
Rua do Matão Travessa ,n° 187  
05508-090 São Paulo, SP  
[ahlopezg@usp.br](mailto:ahlopezg@usp.br)  
[pcosta@if.usp.br](mailto:pcosta@if.usp.br)

---

## ABSTRACT

In this work, it was investigated the changes both in the transmission curves and in the thickness of the shielding material when the workload spectrum present in NCRP report 147 is exchanged by the local workload spectrum. The local workload spectra are referred to data from the São Paulo city hospitals and classified as: *floor and other barriers, chest bucky wall* and *all barriers*. The air kerma yield at 1 m due to a 3-phase x-ray tube with a tungsten anode, presented in NCRP report 147 is used to determinate the transmission curve. The attenuation properties of lead, concrete and steel determine the transmission curve for each workload spectrum. The transmission data calculated for the local spectrum were fitted by using Archer model. The resulting parameters were used to compute the shielding thickness. Finally, we compare the present results with those obtained in typical case of shielding in radiological rooms published in NCRP report 147.

## RESUMO

No presente trabalho são estudadas as alterações nas curvas de transmissão e a espessura da blindagem quando se trocam os espectros de carga de trabalho apresentados na publicação 147 do NCRP pelos espectros de carga de trabalho locais. Os espectros de carga de trabalho locais referem-se aos dados de hospitais da cidade de São Paulo e classificados em: *piso e outras barreiras, estativa bucky mural de parede e todas as barreiras*. A equação do rendimento a 1m em termos do kerma no ar de um tubo de raios X trifásico e com ânodo de tungstênio, apresentada no NCRP 147, é usada para determinar a curva de transmissão. As propriedades de atenuação do chumbo, concreto e

aço determinam as curvas de transmissão para cada um dos espectros de cargas de trabalho. As curvas de transmissão ponderadas pelos espectros locais foram ajustadas pelo modelo de Archer. Os parâmetros resultantes foram usados para determinar a espessura da blindagem. No final, os resultados do presente trabalho foram comparados com os obtidos em casos típicos de blindagem em salas radiológicas presentes na publicação 147 do NCRP.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A metodologia para o cálculo da blindagem em salas de radiologia convencional se baseia na obtenção de curvas de transmissão através de diversos materiais, ponderadas pelo espectro de cargas de trabalho do tubo de raios X [1]. O espectro de carga de trabalho determina o uso do tubo de raios X para determinados valores da tensão aplicada no tubo [2]. Geralmente a faixa de tensão aplicada em salas de radiologia convencional é de 40 até 140 kVp [2]. A publicação 147 do NCRP apresenta espectros de cargas de trabalho (obtidos pelo comitê de pesquisa No. 9 da AAPM) representativos de hospitais dos Estados Unidos [3]. No presente trabalho são estudadas as alterações nas curvas de transmissão e na espessura da blindagem quando se utiliza um espectro de cargas de trabalho diferente daqueles apresentados na publicação 147 do NCRP. Os espectros de carga de trabalho local referem-se aos dados de hospitais da cidade de São Paulo classificados em: *piso e outras barreiras, estativa bucky mural de parede e todas as barreiras* [4]. Curvas de transmissão ponderadas pela carga de trabalho local são obtidas para materiais absorvedores de chumbo, concreto e aço. O ajuste é feito segundo modelo de Archer [5] e os valores das estimativas dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são obtidos com ajuda do software Origin 8.5.1. No final, foram utilizados os valores das estimativas dos parâmetros de Archer para determinar as espessuras da blindagem nos casos de estativa bucky mural de parede e nas exposições feitas na direção das áreas que ficam debaixo do piso da sala radiológica.

## 2. MATERIAIS E METODOS

### 2.1. Kerma no Ar primário por unidade de carga de trabalho

Seja  $K_W^1(kVp)$ , o Kerma no Ar por unidade de carga de trabalho ( $mGy\ mA^{-1}\ min^{-1}$ ) a uma distância de 1 m devido ao feixe de radiação primária de um tubo de raios X operado na tensão  $kVp$ . Para um tubo de raios X trifásico, ânodo de Tungstênio e com filtro de Alumínio; o Kerma no Ar por unidade de carga de trabalho a 1 m da fonte é bem ajustado pela seguinte equação [5]:

$$K_W^1(kVp) = 1,22 - 5,66 \times 10^{-2} kVp + 1,22 \times 10^{-3} kVp^2 - 3,13 \times 10^{-6} kVp^3 \quad (1)$$

### 2.2. Carga de Trabalho

A Carga de Trabalho de um tubo de raios X usado em radiologia médica especifica a quantidade de corrente elétrica usada no tubo em um intervalo de tempo, ou seja, determina o uso do tubo de raios X para um valor fixo da tensão aplicada. Convencionalmente a carga de trabalho se expressa em unidades de mA min.

### 2.3. Espectro de Carga de Trabalho

Os métodos tradicionais para o cálculo da blindagem em salas radiológicas assumem que a carga de trabalho total é produzida em um valor fixo de tensão, por exemplo, 100 ou 125  $kVp$  [6]. Este método não é realista, já que a maior exposição ocorre na faixa de 70-90  $kVp$ , com exceção das exposições de tórax que tem uma componente significativa em 120  $kVp$  [7]. O método descrito neste trabalho usa o conceito de espectro de cargas de trabalho, o qual representa a distribuição da carga de trabalho sobre uma faixa de tensão no tubo [2]. Os espectros usados neste trabalho representam dados fornecidos pelos hospitais da cidade de São Paulo [4], os quais são usados para gerar o espectro de cargas de trabalho local e as curvas de transmissão ponderadas pelos

espectros. A Tabela 1 apresenta os valores da carga de trabalho para faixas de 5 kVp de tensão, nas categorias de *piso e outras barreiras* e *estativa bucky mural* de parede.

**Tabela 1. Valores da carga de trabalho (mA min/paciente). Dados obtidos de salas de radiologia convencional, divididos em estativa bucky mural de parede e piso e outras barreiras. Tensão (kVp)**

Tensão	Piso e Outras Barreiras	$\sigma_w$	Estativa bucky mural de Parede	$\sigma_w$
40	$2,70 \times 10^{-2}$	0,002	$1,00 \times 10^{-3}$	0
45	$1,50 \times 10^{-2}$	0,002	0	0
50	$1,80 \times 10^{-2}$	0,003	$1,00 \times 10^{-3}$	0
55	$1,41 \times 10^{-1}$	0,023	$4,00 \times 10^{-3}$	0,001
60	$2,47 \times 10^{-1}$	0,017	$6,00 \times 10^{-3}$	0,001
65	$2,01 \times 10^{-1}$	0,027	$6,00 \times 10^{-3}$	0,001
70	$3,87 \times 10^{-1}$	0,026	$1,70 \times 10^{-2}$	0,002
75	$2,27 \times 10^{-1}$	0,016	$2,20 \times 10^{-2}$	0,003
80	$1,47 \times 10^{-1}$	0,015	$4,00 \times 10^{-2}$	0,004
85	$8,60 \times 10^{-2}$	0,015	$4,60 \times 10^{-2}$	0,009
90	$3,10 \times 10^{-2}$	0,010	$3,30 \times 10^{-2}$	0,005
95	$1,90 \times 10^{-2}$	0,005	$4,60 \times 10^{-2}$	0,010
100	$1,20 \times 10^{-2}$	0,002	$2,40 \times 10^{-2}$	0,001
105	$1,00 \times 10^{-3}$	0,001	$2,20 \times 10^{-2}$	0,007
110	0	0	$2,20 \times 10^{-2}$	0,002
115	0		$5,00 \times 10^{-3}$	0,001
120	0		$6,00 \times 10^{-3}$	0,001
125	0		$1,00 \times 10^{-3}$	0
130	0		0	0
135	0		0	0

O espectro de cargas de trabalho para a categoria todas as barreiras é obtido somando os valores da carga de trabalho para estativa bucky mural de parede e piso e outras barreiras. O desvio padrão foi obtido calculando-se a propagação de erros da soma dos valores das cargas de trabalho.

#### 2.4. Fator de Atenuação

Materiais tais como chumbo, aço e concreto, apresentam propriedades de atenuação representadas por suas respectivas curvas de transmissão. Archer e colaboradores, em 1994 [5], publicaram curvas de transmissão para chumbo, aço e concreto em tensões fixas de 50, 70, 100, 125 e 150

$kVp$  em tubos de raios X monofásicos e trifásicos. O valor do Kerma no Ar depois de atravessar um absorvedor de espessura  $x$ , é obtido multiplicando o valor do Kerma no Ar sem absorvedor por  $B(x, kVp)$ , que é o fator de atenuação e depende da espessura do absorvedor e da tensão no tubo [7]. Simpkin, no ano de 1995, conseguiu interpolar os dados de transmissão de Archer em faixas de 5 kVp, o que resultou nas curvas de transmissão respectivas [8].

O Kerma no Ar a 1 m, atenuado por um absorvedor de espessura  $x$ , e por unidade de carga de trabalho, é obtido pela expressão [7]:

$$K_w^1(x, kVp) = K_w^1(kVp)B(x, kVp) \quad (2)$$

Considerando  $U=1$  (fator de uso), e multiplicando  $K_w^1(x, kVp)$  vezes a carga de trabalho  $W(kVp)$ , obtém-se:

$$K^1(x, kVp) = K_w^1(kVp)B(x, kVp)W(kVp) \quad (3)$$

Somando sobre a faixa de tensão 40 até 140  $kVp$  usada em radiologia convencional, obtemos o Kerma no Ar a 1 m atenuado e ponderado pela carga de trabalho.

$$K^1(x) = \sum_{kVp} K_w^1(kVp)B(x, kVp)W(kVp) \quad (4)$$

O somatório é feito em intervalos de 5  $kVp$ , os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  do fator de atenuação  $B(x, kVp)$  em cada intervalo para chumbo, aço e concreto são obtidos da Tabela A 1 da publicação 147 do NCRP [1,8].

A transmissão  $B(x)$  é definida pela razão entre o Kerma no Ar atenuado  $K^1(x)$  e o Kerma no Ar sem atenuação  $K^1(0)$  [7]:

$$B(x) = \frac{K^1(x)}{K^1(0)} \quad (5)$$

O ajuste da transmissão  $B(x)$  em função da espessura do absorvedor é feita com ajuda do método de mínimos quadrados não-linear nos parâmetros e usando o modelo:

$$B(x) = \left[ \left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) e^{\alpha\gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-1/\gamma} \quad (6)$$

Os valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  dependem da tensão no tubo [5]. No presente trabalho foram ajustados os valores do Kerma no Ar atenuado por chumbo, aço e concreto e foram determinadas as curvas de transmissão ponderadas pelo espectro de carga de trabalho local. Além disso, foram obtidos os valores das estimativas dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

Uma das metodologias recomendadas na publicação 147 do NCRP, usa o valor da transmissão  $B(x)$  e os valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  obtidos do ajuste das curvas de transmissão ponderadas pelo espectro de cargas de trabalho, para resolver a equação (7) e obter a espessura da blindagem.

$$x = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left( \frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right) \quad (7)$$

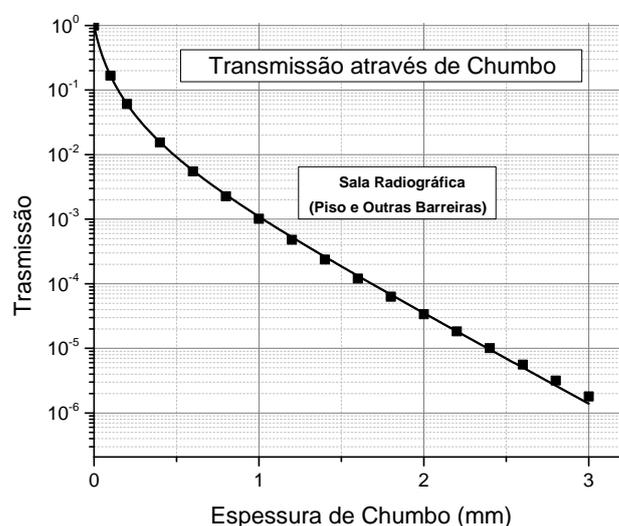
A publicação 147 do NCRP considera a atenuação feita pelo receptor de imagem e pela mesa radiográfica. Dixon, em 1998, publicou espessuras equivalentes de atenuação,  $x_{pre}$ , em materiais como chumbo, concreto e aço, correspondentes à atenuação do equipamento [7]. Portanto, o valor de  $x$  na equação (7), fica como:

$$x = x_{barreira} + x_{pre} \quad (8)$$

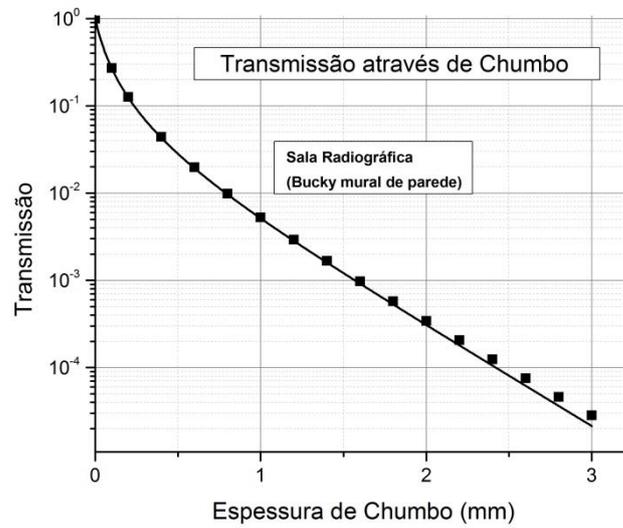
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Curvas de transmissão ponderadas pelo espectro de carga de trabalho local

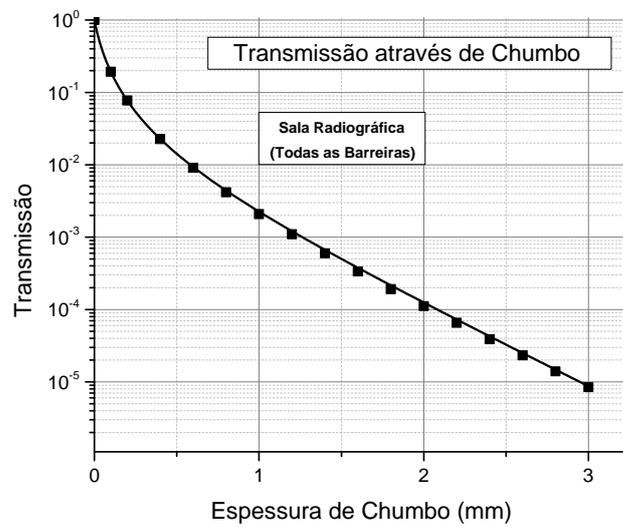
As curvas de transmissão ponderadas pelo espectro de carga de trabalho local para as categorias de piso e outras barreiras, estativa bucky mural de parede e todas as barreiras, são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 1, 2 e 3 para chumbo, nas Figuras 4, 5 e 6 para concreto e nas Figuras 7, 8 e 9 para aço. O ajuste foi feito utilizando o programa Origin 8.5.1 e o modelo de ajuste está representado pela equação (6).



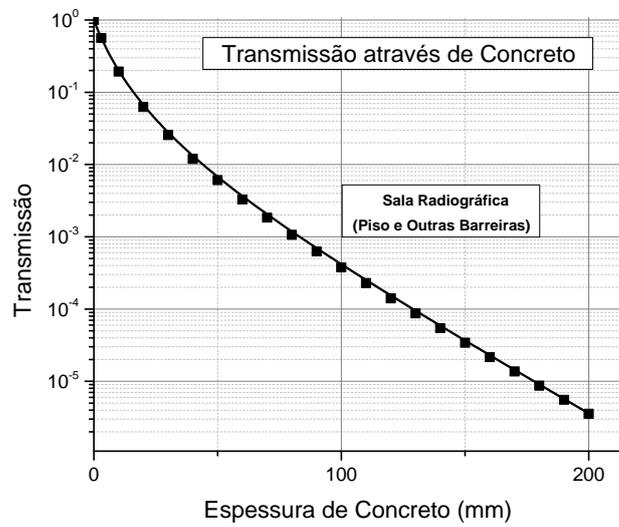
*Figura 1. Transmissão de feixe primário através de chumbo para piso e outras barreiras.*



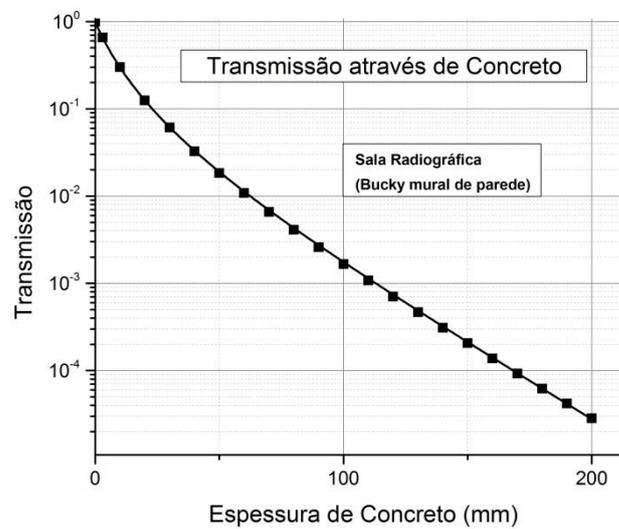
**Figura 2.** Transmissão de feixe primário através de chumbo para estativa bucky mural de parede.



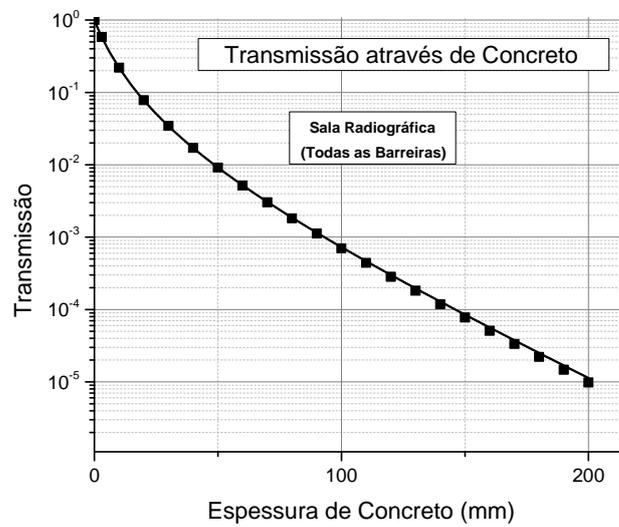
**Figura 3.** Transmissão de feixe primário através de chumbo para todas as barreiras.



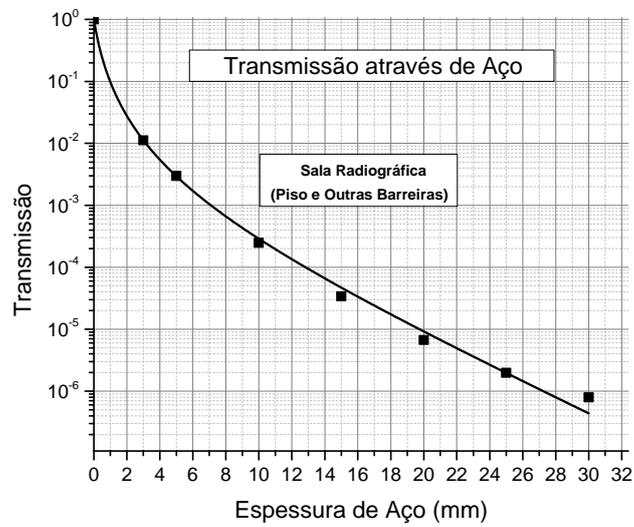
**Figura 4.** – Transmissão de feixe primário através de concreto para piso e outras barreiras.



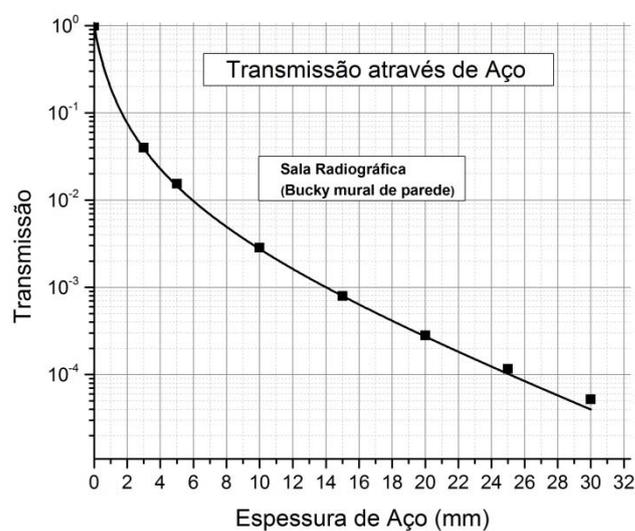
**Figura 5.** Transmissão de feixe primário através de concreto para estativa bucky mural de parede.



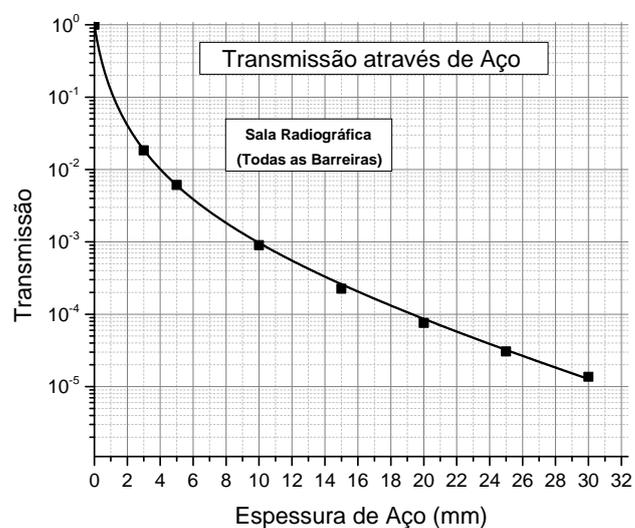
**Figura 6.** Transmissão de feixe primário através de concreto para todas as barreiras.



**Figura 7.** Transmissão de feixe primário através de aço para piso e outras barreiras.



**Figura 8.** Transmissão de feixe primário através de aço para estativa bucky mural de parede.



**Figura 9.** Transmissão de feixe primário através de aço para todas as barreiras.

A Tabela 2 registra os valores das estimativas dos parâmetros de Archer para os 3 tipos de espectros de cargas de trabalho considerados nesta publicação. Entre parêntesis encontram-se os valo-

res dos desvios-padrão para cada uma das estimativas. Do mesmo jeito, a Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os valores dos parâmetros de Archer para concreto e aço, respectivamente.

**Tabela 2. Parâmetros do ajuste para a transmissão do feixe primário em chumbo**

Espectro de Carga de Trabalho	Chumbo		
	$\alpha(\text{mm}^{-1})$	$\beta(\text{mm}^{-1})$	$\gamma$
Todas as barreiras	2,60(8)	23,25(5)	0,597(7)
Piso e outras barreiras	3,19(7)	24,79(4)	0,553(5)
Estativa bucky mural de parede	2,64(16)	16,96(12)	0,708(24)

**Tabela 3. Parâmetros do ajuste para a transmissão do feixe primário em concreto**

Espectro de Carga de Trabalho	Concreto		
	$\alpha(\text{mm}^{-1})$	$\beta(\text{mm}^{-1})$	$\gamma$
Todas as barreiras	$3,86 \times 10^{-2}(2)$	$15,82 \times 10^{-2}(2)$	$4,36 \times 10^{-1}(1)$
Piso e outras barreiras	$4,52 \times 10^{-2}(151)$	$16,61 \times 10^{-2}(135)$	$4,37 \times 10^{-1}(72)$
Estativa bucky mural de parede	$3,98 \times 10^{-2}(13)$	$11,13 \times 10^{-2}(11)$	$5,25 \times 10^{-1}(13)$

**Tabela 4. Parâmetros do ajuste para a transmissão do feixe primário em aço**

Espectro de Carga de Trabalho	Aço		
	$\alpha(\text{mm}^{-1})$	$\beta(\text{mm}^{-1})$	$\gamma$
Todas as barreiras	0,16(9)	3,17(27)	0,45(7)
Piso e outras barreiras	0,29(4)	3,47(13)	0,43(3)
Estativa bucky mural de parede	0,17(12)	2,33(30)	0,53(14)

## 4. DISCUSSÃO

A Figura 9 representa uma configuração típica de uma sala radiológica. O esquema e dados segue um exemplo obtido do capítulo 5, seção 5.3.3.1 da publicação 147 do NCRP [1]. Apresentam-se dois casos de cálculo de barreira primária.

### 4.1. Barreira Primária: Receptor da Imagem para exames de tórax (estativa bucky mural de parede)

Consideremos o caso de uma área não controlada que esta na direção do feixe primário do tubo de raios X: considerando exposições feitas apenas no receptor da imagem, o fator de uso da distribuição de carga de trabalho para exposições de tórax é  $U=1$ . O número  $N$  de pacientes por semana é 125, a distância entre a fonte de raios X e a área ocupada é 2,5 m. O Kerma no Ar não atenuado por paciente a 1 m do tubo é 2,3 mGy. Nessa configuração, o Kerma no Ar sem atenuação na área ocupada é 46 mGy semana<sup>-1</sup>. O fator de ocupação e o limite de doses são  $T=1/5$  e  $P=0,02$  mGy semana<sup>-1</sup>, então, o limite recomendado que resulta da razão entre o limite de dose e o fator de ocupação é 0,1 mGy semana<sup>-1</sup>. Portanto, para atender às recomendações normativas, é necessária uma transmissão menor ou igual a  $2,2 \times 10^{-3}$ .

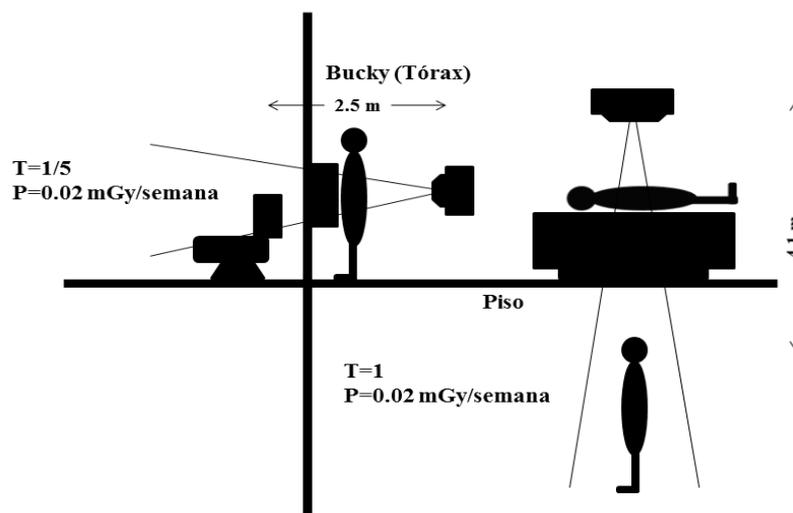
Utilizando a equação 7 e a Tabela 2 (exposições de tórax), a espessura de chumbo necessária para garantir o limite recomendado é 1,28 mm. Na mesma configuração anterior, mas usando o espectro de carga de trabalho obtido por Simpkin, a espessura de chumbo necessária é 1,3 mm. A atenuação do receptor de imagem em termos de espessura de chumbo é 0,85mm [7]. Portanto, a espessura de chumbo para garantir a blindagem adequada é 0,43mm (no presente trabalho) e 0,45mm (seguindo a publicação 147 do NCRP).

### 4.2. Barreira Primária: Para a sala abaixo da mesa radiográfica (piso e outras barreiras)

Para este caso, o valor do Kerma no ar não atenuado a 1 m do tubo de raios X é 5,2 mGy por paciente. O fator de uso da distribuição de carga de trabalho *piso e outras barreiras* para este

caso é  $U=1$  (consideração conservadora). O número  $N$  de pacientes por semana é 125, a distância entre a fonte de raios  $X$  e a área ocupada é 4,1 m. Nessa configuração, o Kerma no Ar sem atenuação na área ocupada é  $39 \text{ mGy semana}^{-1}$ . O fator de ocupação e o limite de doses são  $T=1$  e  $P=0,02 \text{ mGy semana}^{-1}$ . Portanto, para seguir com as normas recomendadas, é necessária uma transmissão menor ou igual a  $5,1 \times 10^{-4}$ .

Com ajuda da equação 7 e da Tabela 3 (piso e outras barreiras) a espessura de concreto que se precisa é 96 mm, na mesma configuração anterior, mas usando o espectro de carga de trabalho obtido por Simpkin, a espessura de concreto que se precisa é 107 mm. A atenuação do receptor de imagem em termos de espessura de concreto (sem considerar o paciente) é 72 mm [7]. Portanto, a espessura de concreto para blindagem é 24 mm (no presente trabalho) e 35 mm (segundo a publicação 147 do NCRP).



**Figura 9.** Configuração típica de uma sala de radiologia, o esquema e magnitudes apresentadas seguem um exemplo obtido do capítulo 5 da publicação 147 do NCRP [1].

## 5. CONCLUSÕES

A troca do espectro de carga de trabalho apresentada na publicação 147 do NCRP pelo espectro de carga de trabalho local resulta em pequenas alterações da espessura final da blindagem. No caso da espessura de chumbo obtida apenas para exposições no estativa bucky mural de parede, resultou 0,43 mm (no presente trabalho) e 0,45 mm (segundo NCRP No. 147), eles não fazem diferença nenhuma devido a que a menor blindagem de chumbo comercial é 0,79 mm, a qual deve ser especificada.

No segundo caso, a espessura de concreto considerando o espectro de carga de trabalho local é 24 mm e 35 mm para os dados da publicação 147 do NCRP, existe uma diferença de 11 mm a favor dos dados da publicação 147. Isto é devido ao fato de que a tensão média do espectro local é  $68kVp$  e no caso do espectro obtido por Simpkin é  $77 kVp$ . Portanto, a energia média do feixe ponderado pelo espectro local é de menor energia que o feixe ponderado pelo espectro obtido por Simpkin, o que resulta num feixe local menos penetrante.

A proposta futura é obter as curvas de transmissão ponderadas pelo espectro de cargas de trabalho em salas de Fluoroscopia, e usá-las no cálculo de barreiras secundária.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPESP através do projeto de pesquisa 2010/12237-7. Também agradecem ao CNPq pelo suporte através do projeto 134364/2012 e da parceria CNPq/FAPESP no projeto INCT - Metrologia das Radiações Ionizantes na Medicina.

## REFERÊNCIAS

1. NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurement. **Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. NCRP Report 147**, Bethesda: NCRP, 2004. 125p.
2. Simpkin D. J. Shielding a Spectrum of Workloads in Diagnostic Radiology. **Health Physics**, v. 61, p. 259-261, 1991.
3. Simpkin D. J. Evaluation of NCRP Report No. 49 assumptions on workload and use factors in diagnostic radiology facilities”, **Medical Physics**, v. 23(4), p. 577-584, 1996.
4. Mello, L. B.; Costa, P. R. Evaluation of workload weighed transmission curves of commercial shielding materials used in diagnostic rooms. In: **International Nuclear Atlantic Conference, 2007**, Santos-SP. Anais da International Nuclear Atlantic Conference, 2007
5. Archer B. R., Fewell T. R., Conway B. J. and Quinn P. W. Attenuation Properties of diagnostic X-Ray Shielding Materials, **Medical Physics**, v. 21(9), p. 1499-1507, 1994.
6. NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurement. **Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X-Ray and Gamma Rays Up to 10 MeV. NCRP Report 49**, Bethesda: NCRP, 1976.
7. Dixon R. L., Simpkin D. J. Primary Shielding Barriers for Diagnostic X-Ray Facilities: A New Model. **Health Physics**, v. 74(2), p. 181-189, 1998.
8. Simpkin D. J. Transmission data for Shielding Diagnostic X-Ray Facilities. **Health Physics**, v. 68(5), p. 704-709, 1995.