

# Espectros e deposição de dose em profundidade em *phantom* de mama de polimetilmetacrilato: obtenção experimental e por método de Monte Carlo

## Spectra and depth-dose deposition in a polimetilmetacrilate breast phantom obtained by experimental and Monte Carlo method

Mariano G. David<sup>1</sup>, Evandro J. Pires<sup>1</sup>, Marcos A. Albuquerque<sup>2</sup>, Luís A. Magalhães<sup>1</sup>, Mario A. Bernal<sup>3</sup>, José G. Peixoto<sup>4</sup>, Carlos E. de Almeida<sup>1</sup> e Carlos F. E. Alves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Ciências Radiológicas da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>3</sup>Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas (SP), Brasil.

<sup>4</sup>Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

### Resumo

Este trabalho enfoca a obtenção, experimental e por método de Monte Carlo (MMC), de espectros de fótons a diversas profundidades e de curvas de deposição de dose para feixes de raios-x empregados em mamografia, obtidos em *phantom* de mama de polimetilmetacrilato (PMMA). Foram adquiridos espectros referentes a feixes de 28 e 30 kV e calculados os valores de energia média ( $E_{med}$ ) correspondentes. Para a aquisição experimental foi empregado um espectrômetro de Si-PIN fotodiodo e para as simulações por MMC foi empregado o código PENELOPE. Os espectros experimentais e os simulados mostram uma boa concordância, o que foi corroborado pela baixa diferença entre os valores de  $E_{med}$  encontrados. Um aumento na  $E_{med}$  e uma forte atenuação dos feixes com o incremento da profundidade no *phantom* de PMMA também foram observados.

**Palavras-chave:** radiologia, mamografia, raios X, método de Monte Carlo, Penelope.

### Abstract

This paper focuses on the obtainment, using experimental and Monte Carlo-simulated (MMC) methods, of the photon spectra at various depths and depth-dose deposition curves for x-rays beams used in mammography, obtained on a polimetilmetacrilate (PMMA) breast phantom. Spectra were obtained for 28 and 30 kV quality-beams and the corresponding average energy values ( $E_{med}$ ) were calculated. For the experimental acquisition was used a Si-PIN photodiode spectrometer and for the MMC simulations the PENELOPE code was employed. The simulated and the experimental spectra show a very good agreement, which was corroborated by the low differences found between the  $E_{med}$  values. An increase in the  $E_{med}$  values and a strong attenuation of the beam through the depth of the PMMA phantom was also observed.

**Keywords:** radiology, mammography, X-rays, Monte Carlo method, Penelope.

### Introdução

A mamografia, método mais eficaz de diagnóstico precoce do câncer de mama, emprega feixes de raios-x de baixa energia cujo potencial de dano vem sendo objeto de diversas pesquisas<sup>1,2</sup>. Com o intuito de estudar os efeitos desta radiação, foram obtidos os espectros de energia dos feixes de radiação mamográficos de 28 e 30 kV

em profundidade, em *phantom* de mama de polimetilmetacrilato (PMMA), bem como as curvas de percentual de dose em profundidade (PDD). O conhecimento sobre os espectros é também útil para estudos sobre a melhoria da qualidade da imagem na mamografia<sup>3</sup>.

Os espectros foram obtidos de duas formas: experimentalmente, com espectrômetro, e por simulação, pelo método de Monte Carlo (MMC), e os resultados verificados no presente

**Autor correspondente:** Mariano Gazineu David – Laboratório de Ciências Radiológicas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) – Rua São Francisco Xavier, 524, PHLC, sala 136 – CEP: 20550-900 – Rio de Janeiro (RJ), Brasil – E-mail: marianogd08@gmail.com

estudo foram empregados na área da microdosimetria na avaliação de danos causados pela radiação ao DNA<sup>4</sup>.

Esta pesquisa constitui o desdobramento de um trabalho realizado com a espectrometria dos feixes padrão de mamografia empregados em metrologia no Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR)<sup>5</sup> e foi realizada no mesmo arranjo experimental de calibração de dosímetros<sup>6</sup>.

## Material e Métodos

### Obtenção experimental dos espectros

Os feixes de radiação estudados foram emitidos por um tubo de raios-x Philips, modelo PW 2185/00 com alvo de Mo e janela de Be, alimentado por um gerador de alta-voltagem Saifert (*ripple*<1%). Durante a aquisição dos espectros, a corrente do tubo foi ajustada para o menor valor permitido, que é 2 mA<sup>6</sup>.

Os espectros foram medidos experimentalmente por meio de um conjunto espectrométrico composto por detector, amplificador de sinal e analisador multicanal fabricado pela Amptek. O detector de Si-PIN fotodiodo (XR-100CR), com volume sensível de 6 mm<sup>2</sup> x 0,5 mm e janela de Be de 1 mm de espessura, apresenta, na faixa de energia da mamografia, alta resolução (145–165 eV para 5,9 keV) e baixa eficiência de detecção, o que evita a necessidade de diminuição da taxa de kerma no ar além do valor permitido pelo gerador de tensão. O conjunto espectrométrico foi conectado a um PC, que adquiriu dados pelo *software* Amptek-ADMCA. Um colimador tipo *pinhole* de 1 mm de diâmetro foi colocado na entrada do detector<sup>5</sup>.

Foram estudados feixes emitidos com 28 e 30 kV filtrados por 0,03 mm de Mo, de modo a reproduzirem as qualidades de radiação mamográficas. O *phantom* de mama completo é composto por nove placas de poli(metilmetacrilato) (PMMA) de 5 mm de espessura, totalizando 45 mm. Os espectros de fótons foram adquiridos a 60 cm do ponto focal com quatro espessuras diferentes de PMMA (5, 15, 30 e 45 mm), bem como sem o *phantom*. As aquisições foram realizadas de modo a totalizar 10<sup>6</sup> fótons, com tempo morto inferior a 1%. Os espectros foram calibrados pelas linhas espectrais do Mo e corrigidos pela eficiência do detector para cada faixa de energia. Para fins de comparação, todos os espectros foram plotados adotando-se faixas de energia (*bins*) de 0,5 keV.

A fim de levantar uma curva experimental de PDD foram realizadas medidas de kerma no ar com câmara de ionização de placas paralelas Radcal 10X5-6M em todas as espessuras do *phantom* de 5 a 45 mm.

### Simulação dos espectros

A simulação dos espectros de fótons com o MMC empregou o código PENELOPE (versão 2008), sendo realizada a partir de espectros obtidos em trabalho anterior logo após a janela do tubo (a 1,5 cm do ponto focal)<sup>5</sup>. Tais espectros foram empregados como fonte de fótons para atravessar uma geometria que simula as mesmas condições

do arranjo experimental. Detectores com 1,5 cm de raio e 0,1 cm de espessura foram situados no centro do feixe primário, em diferentes profundidades do *phantom*, de forma a reproduzir as mesmas distâncias foco-detector e espessuras de PMMA usadas na obtenção experimental.

Foram acompanhados 1,2x10<sup>9</sup> fótons primários para a obtenção dos espectros a diferentes profundidades, empregando os seguintes valores para os parâmetros do código PENELOPE: C1=C2=0,1 e WCC=WCR=0,25 keV. As simulações foram realizadas no *cluster* de computadores instalado no LCR (PCs com processadores Intel i7 980X de 3,33 GHz com 12 núcleos de processamento), em 10 máquinas paralelizadas por meio do *script* *clonEasy*<sup>7</sup> (totalizando 120 *jobs*), tendo sido consumidas cerca de 2 horas para cada qualidade de radiação.

Foram obtidas as curvas de PDD no *phantom* de PMMA para as qualidades de radiação de mamografia correspondentes a 28 e 30 kV a partir dos resultados de *depth-dose* fornecidos pelo aplicativo *penmain* do código PENELOPE com intervalos de profundidade de 0,1 cm. As curvas foram obtidas calculando-se o percentual de dose depositado em cada profundidade em relação à dose máxima dentro do *phantom*, que se dá a 0,05 cm de PMMA.

### Energia média dos espectros de fótons

Uma vez que constitui uma informação relevante sobre o espectro de fótons, a energia média ( $E_{med}$ ) de cada um dos perfis de energia foi calculada analiticamente. Com os valores de  $E_{med}$  também é possível comparar os espectros obtidos pelo método experimental e por simulação. Esta grandeza foi obtida pela média ponderada das energias dos fótons no centro de cada *bin* com as frequências normalizadas das faixas de energia, segundo a relação:

$$E_{med} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot E_i \quad (1)$$

em que  $f_i$  são as frequências normalizadas de fótons e  $E_i$  as energias dos  $n$  *bins* correspondentes.

A incerteza associada à determinação da  $E_{med}$  ( $u_{E_{med}}$ ) foi calculada por:

$$u_{E_{med}} = \sum_{i=1}^n u_{f_i} \cdot E_i \quad (2)$$

em que  $u_{f_i}$  são as incertezas nas frequências de fótons para as  $n$  faixas de energia. As incertezas expandidas relacionadas correspondem a um fator de abrangência  $k=2$ , para nível de confiança de aproximadamente 95%.

Para os espectros experimentais, as incertezas associadas à determinação das frequências de fótons foram obtidas considerando o número de fótons detectados em cada faixa de energia como sendo resultado de uma distribuição de Poisson. Assim, a incerteza em cada frequência foi igualada à raiz quadrada do número de fótons normalizado pelo total de fótons detectados no espectro<sup>5</sup>.

Já considerando os espectros simulados, as incertezas associadas à determinação das frequências de fótons foram obtidas dos valores de incerteza estatística (tipo A)

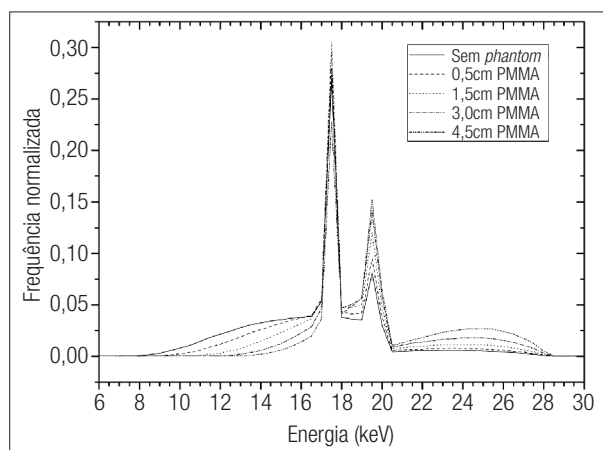
fornecidos pelo código PENELOPE (também normalizados), juntamente com 0,5% de incerteza estimada ( $k=2$ ) para os componentes tipo B<sup>8</sup>.

## Resultados

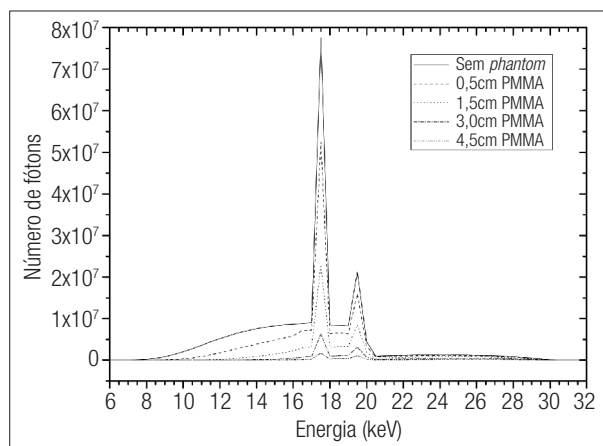
Em virtude do número de espectros e PDDs obtidos e do curto espaço disponível, serão apresentados neste trabalho apenas exemplos de resultados gráficos, assegurando-se que os espectros das demais qualidades de radiação e profundidade de PMMA exibem perfis semelhantes aos aqui mencionados.

Os espectros experimentais para 28 kV obtidos em diferentes profundidades, superpostos, são apresentados na Figura 1. Como as contagens foram normalizadas para o total de fótons de cada espectro, é possível observar aumento relativo das frequências de fótons nas energias mais altas conforme cresce a profundidade de aquisição.

Por outro lado, uma vez que os espectros simulados foram obtidos a partir de um número fixo de fótons primários ( $1,2 \times 10^9$ ), torna-se possível mostrá-los não com frequências



**Figura 1.** Espectros experimentais para 28 kV com frequências normalizadas para os totais fótons, obtidos a diferentes profundidades de polimetilmetacrilato.

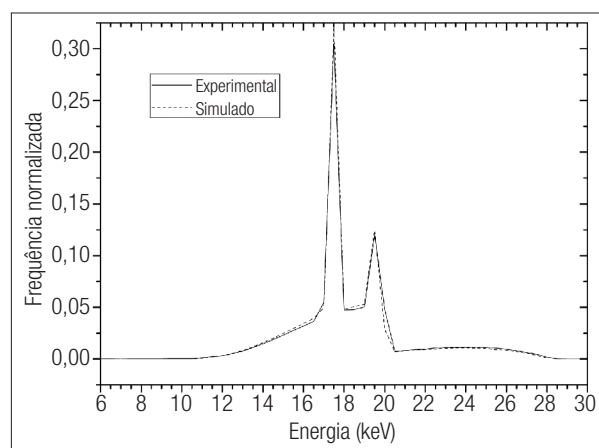


**Figura 2.** Espectros simulados para 30 kV com número de fótons detectados, obtidos a diferentes profundidades de polimetilmetacrilato.

normalizadas, mas com os números absolutos de fótons que chegam a cada profundidade. Esta forma de apresentação permite a visualização do efeito de atenuação causado pelo PMMA. Desta maneira, os espectros simulados para 30 kV, superpostos, podem ser visualizados na Figura 2.

Para a comparação entre os espectros obtidos experimentalmente e os simulados, entretanto, torna-se necessário apresentar ambos com as frequências de fótons normalizadas para os totais. Observam-se na Figura 3 (28 kV com 1,5 cm de PMMA) pequenas discrepâncias entre os espectros.

A  $E_{med}$  calculada para cada um deles, além de constituir uma informação sobre a distribuição energética, pode ser usada para fins de comparação dos perfis de frequência de energia obtidos pelos métodos experimental e por



**Figura 3.** Comparação entre os espectros experimental e simulado para 28 kV à profundidade de 1,5 cm de polimetilmetacrilato (frequências normalizadas para os totais de fótons).

**Tabela 1.** Valores de  $E_{med}$  (keV) para os espectros de 28 kV, com as diferenças percentuais entre os valores obtidos pelos métodos experimental e por simulação.

	Experimental	Simulado	Diferença (%)
Sem placa	16,89±0,15	16,63±0,13	1,5
0,5 cm PMMA	17,63±0,14	17,40±0,13	1,3
1,5 cm PMMA	18,46±0,14	18,28±0,13	1,0
3,0 cm PMMA	19,28±0,14	19,19±0,14	0,5
4,5 cm PMMA	20,11±0,14	20,07±0,16	0,2

PMMA: polimetilmetacrilato.

**Tabela 2.** Valores de  $E_{med}$  (keV) para os espectros de 30 kV, com as diferenças percentuais entre os valores obtidos pelos métodos experimental e por simulação.

	Experimental	Simulado	Diferença (%)
Sem placa	17,28±0,15	17,01±0,10	1,6
0,5 cm PMMA	18,00±0,15	17,78±0,10	1,2
1,5 cm PMMA	18,94±0,15	18,72±0,11	1,2
3,0 cm PMMA	19,93±0,15	19,85±0,12	0,4
4,5 cm PMMA	21,00±0,15	20,99±0,14	0,0

PMMA: polimetilmetacrilato.

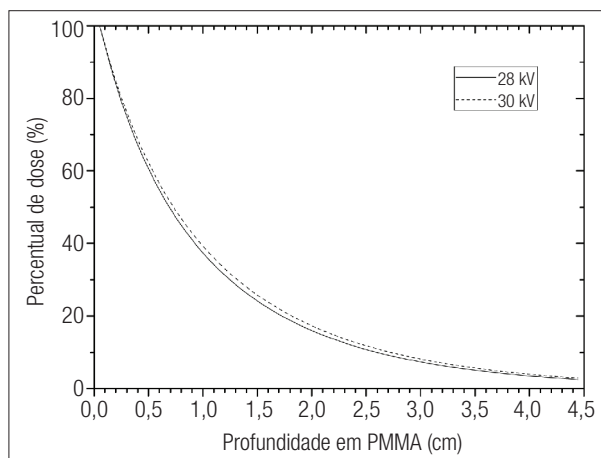
simulação. Nas Tabelas 1 (28 kV) e 2 (30 kV) podem ser vistos os valores de  $E_{med}$  obtidos pela equação (1), juntamente com as incertezas estimadas para estes valores, além da diferença percentual para cada par de espectros de mesma qualidade de radiação e profundidade de PMMA.

As curvas de PDD relativas à dose a 0,05 cm de profundidade, determinadas por simulação, constam na Figura 4.

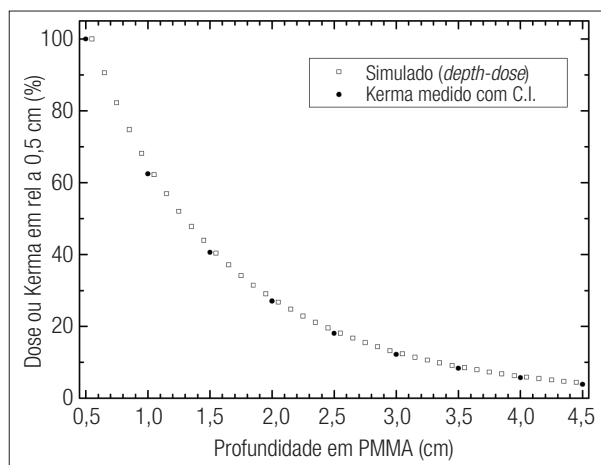
Para fins de comparação, foram determinadas também as curvas de PDD relativas à dose a 0,5 cm de profundidade obtidas por medida do kerma no ar com câmara de ionização e por simulação. A curva comparativa para 28 kV pode ser verificada na Figura 5.

## Discussão e Conclusões

As pequenas diferenças observadas entre os espectros de fótons obtidos por ambos os métodos utilizados indicam a



**Figura 4.** Curvas de percentual de dose em profundidade em polimetilmetacrilato (PMMA) relativas à dose a 0,05 cm das qualidades de radiação de 28 e 30 kV obtidas por simulação.



**Figura 5.** Curvas de percentual de dose em profundidade em polimetilmetacrilato relativas à dose a 0,5 cm para 28 kV obtidas por simulação e por meio de medidas com câmara de ionização (C.I.).

adequação dos instrumentos, dos parâmetros e das metodologias empregados. Da mesma forma, as baixas diferenças nos valores de  $E_{med}$  (máximo de 1,6%) corroboram a referida adequação, bem como resultados obtidos anteriormente<sup>5</sup>, sobretudo se levarmos em conta as dificuldades envolvidas tanto na aquisição experimental quanto na simulação de espectros, conforme relatado na literatura<sup>9-11</sup>.

A acentuada degradação dos espectros e da dose depositada em profundidade no *phantom* de PMMA sugere que a dose entregue pelos feixes de mamografia é majoritariamente depositada nas camadas mais próximas da superfície. O pequeno aumento da energia média do feixe em profundidade é compensado pela grande diminuição do número de fótons presentes.

Os dados obtidos neste artigo podem ser usados, como de fato já o foram<sup>4</sup>, em estudos sobre o mecanismo de deposição de energia da radiação de qualidade mamográfica e sobre os danos causados por esta radiação aos tecidos que compõem a mama. O intenso trabalho de pesquisa na área da microdosimetria que vem sendo realizado em todo mundo<sup>1,2,4</sup> pode vir a contribuir com o aprimoramento desta importante ferramenta diagnóstica que é a mamografia, tanto em termos de melhoria da imagem, quanto de redução da dose média depositada na mama.

Como desenvolvimento do presente documento, estão sendo obtidos, por simulação, os espectros de elétrons correspondentes aos de fótons aqui apresentados, bem como a simulação dos espectros substituindo o material do *phantom* pelos tecidos glandular e adiposo que compõem a mama. Tais espectros fornecem informações adicionais sobre os mecanismos de deposição de energia envolvidos. Também estão sendo avaliados, em trabalhos experimentais, os danos causados pela radiação de qualidade mamográfica em termos de apoptose (morte celular).

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) pelo empréstimo do espectrofotômetro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Referências

1. Frankenberg D, Kelnhofer K, Bär K, Frankenberg-Schwager M. Enhanced neoplastic transformation by mammography X rays relative to 200 kVp X rays: indication for a strong dependence on photon energy of the RBE(M) for various end points. *Radiat Res.* 2002;157(1):99-105.
2. Göggelmann W, Jacobsen C, Panzer W, Walsh L, Roos H, Schmid E. Re-evaluation of the RBE of 29 kV x-rays (mammography x-rays) relative to 220 kV x-rays using neoplastic transformation of human CGL1-hybrid cells. *Radiat Environ Biophys.* 2003;42(3):175-82.
3. Meyer P, Buffard E, Mertz L, Kennel C, Constantinesco A, Siffert P. Evaluation of the use of six diagnostic X-ray spectra computer codes. *Br J Radiol.* 2004;77(915):224-230.

4. Bernal MA, deAlmeida CE, David M, Pires E. Estimation of the RBE of mammography-quality beams using a combination of a Monte Carlo code with a B-DNA geometrical model. *Phys Med Biol.* 2011;56(23):7392-403.
5. David MG, Pires EJ, Bernal MA, Peixoto JG, Dealmeida CE. Experimental and Monte Carlo-simulated spectra of standard mammography-quality beams. *Br J Radiol.* 2012;85(1013):629-35.
6. Pires EJ, David MG, Peixoto JG, Dealmeida CE. Establishment of radiation qualities for mammography according to the IEC 61267 and TRS 457. *Radiat Prot Dosimetry.* 2011;145(1):45-51.
7. Badal A, Sempau J. A package of Linux scripts for the parallelization of Monte Carlo simulations. *Comput Phys Comm.* 2006;175(6):440-50.
8. ISO/IEC. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Guide 98. ISO, IEC; 1995.
9. Künzel R, Herdade SB, Terini RA, Costa PR. X-ray spectroscopy in mammography with a silicon PIN photodiode with application to the measurement of tube voltage. *Med Phys.* 2004;31(11):2996-3003.
10. Ay MR, Shahriari M, Sarkar S, Adib M, Zaidi H. Monte Carlo simulation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C. *Phys Med Biol.* 2004;49(21):4897-917.
11. Wilkinson E, Johnston PN, Heggie JC. A comparison of mammography spectral measurements with spectra produced using several different mathematical models. *Phys Med Biol.* 2001;46(5):1575-89.