



Avaliação da substituição de placas de PMMA por PLA impresso 3D na resposta TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

S. B. de Almeida^a; C. C. S. Valeriano^a; L. L. Campos^a;

^a, Gerência de Metrologia das Radiações. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares –

IPEN/CNEN, 05508-000, São Paulo-SÃO PAULO, Brasil

caio144fisicamedica@gmail.com

RESUMO

O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ é um material dosimétrico produzido nacionalmente, que apresenta alta sensibilidade, porém, uma alta dependência energética da resposta termoluminescente (TL) na região do efeito fotoelétrico. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo da resposta TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ quando irradiado com diferentes energias, na presença de placas de ácido polilático (PLA) impressas 3D e polimetilmetacrilato (PMMA). Os resultados obtidos indicam que o PLA apresenta uma diferença na atenuação da radiação, comparada ao PMMA, indicando que deve ser levada em consideração a qualidade da impressão empregada na confecção da placa a ser irradiada.

Palavras-chave: Impressora 3D, Dosímetro termoluminescente, Dependência energética.

ABSTRACT

The $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ is a dosimetric material that is nationally produced, which presents high sensibility but a high energy dependence of its thermoluminescent (TL) response at the photoelectric effect region. This study aims to compare the TL response of the $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ when irradiated with different energies at the presence of 3D printed plates of polylactic acid (PLA) and polymethylmetacrylate (PMMA). Results show that the PLA presents different radiation attenuation when compared to PMMA, indicating that the quality of the print used on PLA plates manufacture should be taken into account.

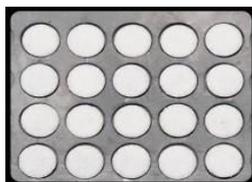
Keywords: 3D printer, thermoluminescent dosimeter, energetic dependence.

1. INTRODUÇÃO

Sempre que um fósforo termoluminescente (TL) é irradiado com feixe de fótons, seja para calibração ou para medição, deve ser levada em consideração a condição de equilíbrio eletrônico, normalmente expressa em massa por área (mg/cm^2). Materiais como PMMA, Teflon e Nylon são normalmente utilizados para obtenção de equilíbrio eletrônico, sendo recomendado colocar uma espessura maior de material do que a requerida, de modo a reduzir o erro produzido na irradiação.

O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (figura 1) é um material desenvolvido, patenteado e produzido pelo IPEN, comercializado em forma de pó e pastilhas de 6 mm de diâmetro e espessura de 0,2 e 0,8 mm, com massa respectivamente de 10 e 50 mg. Embora apresente alta sensibilidade, devido ao seu número atômico efetivo alto (15,3), apresenta também uma alta dependência energética da resposta TL na região de efeito fotoelétrico.

Figura 1. Pastilhas dosimétricas de sulfato de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$).



As principais propriedades dosimétricas do sulfato de cálcio são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades dosimétricas do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

Material ativador	Dy
Número atômico efetivo (Z)	15,3
Densidade [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	4,93

Decaimento térmico do pico dosimétrico à 20°C	5% ano
Tratamento pré-irradiação	300°C/3h

Visando suprir as novas necessidades do mercado, a partir dos anos 80, teve início a utilização das técnicas de prototipagem rápida. O emprego dessa tecnologia, em seus primórdios, era com a finalidade de confecção rápida de protótipos, porém, se expandiu para áreas como saúde e produção. Atualmente, a essa tecnologia é dado o nome de fabricação por adição (AM – Additive Manufacturing).

Também chamada de impressão 3D, a fabricação por adição caracteriza-se por ser o processo no qual, objetos físicos de três dimensões (3D) são confeccionados através da transformação de objetos virtuais em objetos sólidos por meio de uma impressora 3D.

Uma impressora 3D, basicamente, interpreta um desenho 3D elaborado em qualquer sistema CAD que exporte em formato STL e o transforma em um objeto físico por meio da construção camada por camada, até que esteja finalizada sua produção. Dentre os materiais usados em impressora 3D podem ser citados o PLA (ácido polilático), cuja densidade varia de 1210 kg/m³ a 1430 kg/m³.

No presente trabalho foi avaliada a resposta termoluminescente do CaSO₄:Dy, empregando placas de PLA impressas em 3D e de polimetilmetacrilato (PMMA) de mesma espessura para obtenção da condição de equilíbrio eletrônico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram empregadas:

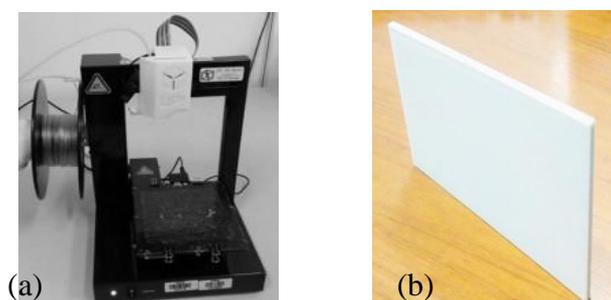
- Placas de polimetilmetacrilato (PMMA) com 3 mm de espessura;
- Placas de ácido polilático (PLA), impressas por uma impressora 3D, com 3 mm de espessura (figura 2b).

- 30 pastilhas dosimétricas de CaSO₄:Dy previamente selecionadas, apresentando sensibilidade dentro de $\pm 5\%$.

Também foram empregados:

- Impressora 3D UP Modelo Plus 2 (figura 2a);

Figura 2. Impressora 3D UP Modelo Plus 2 (a); e placa de PLA impressa (b).



- Leitora termoluminescente Thermo Scientific Harshaw, modelo 4500;
- Irradiador Panorâmico de ¹³⁷Cs marca Hopewell, com atividade de 38,11 GBq em 17/11/2014 (Figura 3);

Figura 3. Irradiador Panorâmico de ¹³⁷Cs Hopewell.



- Fonte de radiação gama do ⁶⁰Co, com atividade de 0,339 TBq em setembro de 1999;
- Sistema de Raios X Pantak/Seifert com as qualidades de radioproteção e radiodiagnóstico apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: *Qualidades de Raios X do Sistema de Raios X Pantak/Seifert*

Qualidade da Radiação	Tensão (kV)	CSR	Energia Efetiva (keV)
RQR3	50	1,78 mmAl	29,7
RQR5	70	2,58 mmAl	34
RQR10	150	6,57 mmAl	46,5
N150*	150	2,4 mmCu	118

*qualidade de radioproteção

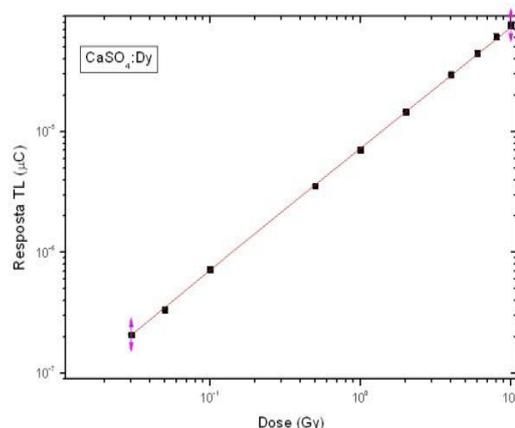
As placas de PLA empregadas neste trabalho foram desenhadas utilizando o software FreeCAD e impressas no modo de menor preenchimento interno. A representação do preenchimento pode ser visto na figura 4. As energias de raios X utilizadas são empregadas na calibração de equipamentos de diagnóstico e radioproteção. Para todas as energias, exceto para a qualidade N150, o tempo de exposição foi calculado para uma dose de 30 mGy. Esse valor de dose foi escolhido por fazer parte da curva de calibração dos dosímetros utilizados. Em razão das limitações da taxa de dose da qualidade N150, a dose aplicada foi de 10 mGy. As doses de radiação gama do ^{137}Cs e ^{60}Co foram também de 30 mGy.

Figura 4. *Modo de preenchimento da placa de PLA impressa*

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizados foram previamente selecionados (em lote) com resposta TL dentro de +0,2% (média ponderada pela incerteza), sendo sua curva de resposta TL em função da dose para radiação gama do ^{60}Co , mostrada na figura 5, que demonstra a linearidade da resposta TL no intervalo de dose estudado.

Figura 5. Curva de resposta TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em função da dose para radiação gama do ^{60}Co .



Os resultados obtidos com as placas de PLA de 3mm de espessura foram comparados com os resultados obtidos com as placas de 3mm de espessura de PMMA (material utilizado como espessura de equilíbrio eletrônico na seleção e calibração do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ com radiação gama do ^{60}Co).

As respostas TL obtidas para as diferentes energias foram relacionadas com a resposta TL obtida para o ^{60}Co , de modo a gerar os fatores de correção para dependência energética da resposta, por unidade de dose. As tabelas 3a e 3b apresentam, respectivamente, os valores de leitura e fatores de correção para dependência energética obtidos para o PMMA e para o PLA.

Os fatores de correção apresentados nas tabelas 3a e 3b foram obtidos por meio da razão da resposta TL pela dose (RTL/dose) para cada energia. A partir desses valores, foi também calculado, para cada energia, o fator de correção por meio da equação 1.

$$F_{\text{Correção}} = \frac{R_{TL}}{\text{dose}} / \frac{R_{TL_{60Co}}}{\text{dose}} \quad (1)$$

$\frac{R_{TL_{60Co}}}{\text{dose}}$

corresponde ao valor obtido quando empregado a irradiação de referência com o ^{60}Co .

Tabela 3a: Resposta TL e fator de correção obtidos para placas de PMMA.

Qualidades de Radiação	Resposta TL (μC) \pm 0,2%	Fator de dependência energética
^{60}Co	1,76E-05 \pm 3,52E-08	1
^{137}Cs	1,99E-05 \pm 3,98E-08	1,13
N150	1,22E-05 \pm 2,44E-08	2,09
RQR10	1,29E-04 \pm 2,58E-08	7,36
Qualidades de Radiação	Resposta TL (μC) \pm 0,2%	Fator de dependência energética
^{60}Co	1,80E-05 \pm 3,6E-08	1
^{137}Cs	2,03E-05 \pm 4,06E-08	1,13
N150	1,26E-05 \pm 2,52E-08	2,1

Ta-
3b:
posta
fator
cor-
obti-

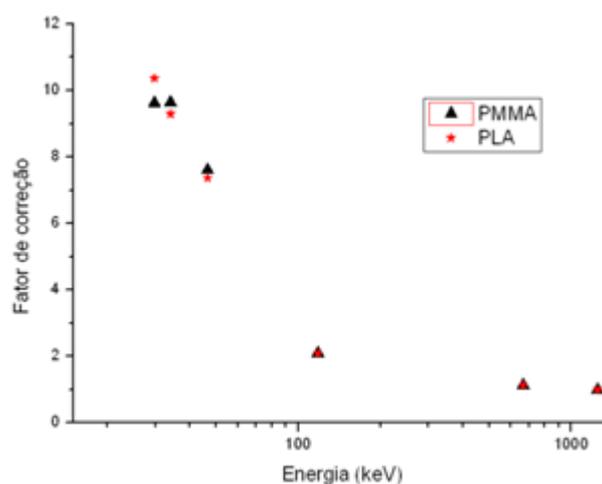
bela
Res-
TL e
de
reção
dos

para placas de PLA.

RQR10	$1,37\text{E-}04 \pm 2,74\text{E-}07$	7,6
RQR5	$1,73\text{E-}04 \pm 3,46\text{E-}07$	9,64
RQR3	$1,70\text{E-}04 \pm 3,40\text{E-}07$	9,62

A figura 6 apresenta as curvas de dependência energética da resposta TL do CaSO₄:Dy empregando os dois tipos de placas.

Figura 6. Curvas de dependência energética da resposta TL do CaSO₄:Dy empregando os dois tipos de placas.



A partir da curva de calibração (figura 5) foi calculado o fator de calibração do lote de dosímetros, o qual foi empregado na conversão da resposta TL (μC) para a dose (Gy). Os valores de dose obtidos para os dosímetros irradiados (empregando as placas de PMMA e PLA) são mostrados na tabela 4, juntamente com suas respectivas incertezas obtidas por meio da propagação

de incertezas, onde foram consideradas as incertezas no fator de calibração da fonte de ^{60}Co e no valor das doses de raios X, fornecidas pelo Laboratório, bem como do fator de calibração do lote.

Os valores das doses contidos na tabela 4 foram normalizados com a dose nominal de 30 mGy de radiação gama do ^{60}Co (fonte radiativa de referência), tendo sido calculada a diferença percentual entre os valores para o PMMA e o PLA, por meio da equação 2. Sendo as diferenças menores que 10%.

Qualidades de Radiação	Dose (mGy)		Diferença percentual
	PMMA	PLA	
^{60}Co	28,3±0,04%	25,5±0,04%	9,89
^{137}Cs	28,3±0,05%	25,5±0,03%	9,89
N150	9,4±0,03%	8,48±0,05%	9,79
RQR10	28,3±0,21%	25,5±0,42%	9,89

doses contidos na tabela 4 foram normalizados com a dose nominal de 30 mGy do ^{60}Co (fonte radiativa de referência), tendo sido calculada a diferença percentual entre os valores para o PMMA e o PLA, por meio da equação 2. Sendo as diferenças me-

$$Dif\% = \left[\frac{D_{PMMA} - D_{PLA}}{D_{PMMA}} \right] * 100 \quad (2)$$

Tabela 4: Doses calculadas empregando placas de PMMA e PLA, relativas a uma dose nominal de radiação gama de 30 mGy.

RQR5	28,3±0,77%	25,5±1,42%	9,89
RQR3	28,3±0,52%	25,5±0,46%	9,89

Conforme o manual do fabricante, a malha impressa não é totalmente sólida, de modo a existir es-paços não preenchidos por PLA (figura 4). Como pode ser observado na tabela 4, as doses avaliadas para as placas de PLA são inferiores àquelas obtidas para o PMMA. Nas tabelas 3a e 3b os fatores de correção para a dependência energética nas qualidades de raios X diagnóstico (exceto RQR3) mostram que o PMMA, com a espessura adequada para o equilíbrio eletrônico para radiação do ^{60}Co , apresenta fatores de dependência energética sempre maiores que para o PLA, sendo um demonstrativo de que a espessura de 3mm de PLA não é suficiente para fornecer condição de equilíbrio eletrônico para radiação do ^{60}Co , com consequente subestimativa da dose. Para a qualidade RQR 3, há o indicativo de que com a baixa energia efetiva do feixe (29,7keV), e considerando a qualidade da impressão utilizada, a placa de PLA impressa irá apresentar uma atenuação diferenciada, provocando dessa forma uma maior dependência energética da resposta TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Desse modo, é necessário o uso cauteloso e uma melhor avaliação das espessuras das placas de PLA impressas, de modo a que seja corrigida a influência da qualidade da impressão na equivalência do PLA ao polimetilmetacrilato.

4. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro, à empresa Eletrocell CIETEC/IPEN pela manutenção da impressora 3D e ao LCI/IPEN pelas irradiações realizadas.

REFERÊNCIAS

1. Journal

CAMPOS, L.L.; LIMA, M.F. Dosimetric Properties of CaSO₄ : Dy + Teflon Pellets Produced at IPEN.- Rad. Prot. Dosim. 14, 4 (1986) 333.

Nunes, M.G., Campos, L. L.Study of CaSO₄:Dy and LiF:Mg,Ti Detectors TL Response to Electron Radiation Using a SW Solid Water Phantom. Rad. Measurement. 43 (2008) 459 – 462

2. Book

CAMERON, J.R; SUNTHARALINGAM, N.; KENNEY, G.N. **Thermoluminescent Dosimetry**. Madison, Wisconsin: The University of Wisconsin Press, Ltd., 1968.

TAYLOR, J.R. **Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Bookman Companhia Editora Ltda., 2012.

CUNICO, M. W. M. **Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de compósito**. 2013. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

3. Report

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements. **Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60**, Bethesda: ICRU, 1998. 24p.

4. Web site

UP! 3D Brasil. **UP! User Manual.** Disponível em:<
http://www.bcstecnologia.com.br/cariboost_files/UP_Plus_2_User_Manual-PT_BRV2.pdf>.
Last accessed:01 nov 2015

5. Conferences Proceedings

VENEZIANI, G. R.; CORREA, E.L.; POTIENS, M.P.A.; CAMPOS, L.L.. Attenuation coefficient determination of printed abs and pla samples in diagnostic radiology standard beams. In: 8º Congresso Brasileiro de Metrologia. 29 novembro à 4 de dezembro, 2015. Bento Gonçalves, RS.