

COMPOSITO PIROELETRICO PARA DETECÇÃO DE INTENSIDADE DE RAIOS-X

¹Walter Katsumi Sakamoto, ²Giuliano Pierre Estevam, ²Aparecido Augusto de Carvalho, ²Wesley Pontes, ³Mauro Henrique de Paula (in memoriam)

¹ Faculdade de Engenharia – UNESP – Univ. Estadual Paulista Campus de Ilha Solteira, Departamento de Física e Química, Grupo de Polímeros, Av. Brasil, 56, 15.385-000, Ilha Solteira (SP), Brazil. E-mail: sakamoto@dfq.feis.unesp.br

² Faculdade de Engenharia – UNESP – Univ. Estadual Paulista Campus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica.

³ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS – Departamento de Física - Campo Grande (MS).

RESUMO

Material compósito obtido com cerâmica ferroelétrica titanato de chumbo modificado (Pz34) e a matriz polimérica polieter-eter-cetona (PEEK) foi utilizado como componente sensor, para medir a intensidade de raios-X em um novo sistema de detecção. O elemento sensor trabalha como um transdutor térmico, convertendo um fluxo térmico não quantificado em uma quantidade mensurável de voltagem elétrica. Foram obtidas amostras do filme compósito com até 60 % de cerâmica, em volume, pressionando a mistura de Pz34 e PEEK, na forma de pó, a uma temperatura de 368 °C sob pressão de 12 MPa, aplicada durante 2,0 h. A resposta do sensor varia de 2,70 V até 0,80 V no intervalo de razão de fluência de energia de 6,30 até 37.20 W/m². A energia incidente absorvida foi analisada em função da energia ionizante.

Palavras-chave: Compósito, sensor piroelétrico, radiação X, ortovoltagem.

INTRODUÇÃO

Polímeros ferroelétricos, cerâmicas ferroelétricas e materiais relacionados têm sido usados como transdutor térmico devido a sua atividade piroelétrica. Energia radiante ionizante (raios-X, prótons, etc.) e não-ionizante (infravermelho, UV, etc) são monitorados por estes sensores⁽¹⁻⁴⁾. Na área médica, o câncer tem sido um dos piores problemas e a terapia de radiação é um dos métodos mais efetivos em seu tratamento. Dessa forma, a dose de radiação aplicada deve ser precisa e localizada para evitar efeitos colaterais e recorrência da doença.

Dentre os dosímetros comumente usados na terapia de radiação, a câmara de ionização é a mais precisa e é considerado o padrão para a dosimetria. Entretanto, há algumas limitações relacionadas com a melhor resolução espacial e a razão sinal/ruído⁽⁵⁾. Além disso, as câmaras de ionização têm um preço não muito acessível, o que sem dúvida se torna uma limitação.

Recentemente, De Paula e colaboradores⁽⁶⁾ propuseram um instrumento micro-controlado, que usa um cristal piroelétrico como elemento sensor, para medir

a intensidade de radiação X, como uma alternativa às dispendiosas câmaras de ionização. Os autores usaram os cristais tantalato de lítio (LiTaO_3) e o niobato de lítio (LiNb_5O_3) como detectores para monitorar a intensidade de raios-X no intervalo de energia usado em mamografia.

No presente trabalho um compósito cerâmica/polímero é apresentado como sensor piroelétrico alternativo, para medir a intensidade de raios-X no intervalo de ortovoltagem (120 – 300 kV_p). O filme compósito combina as boas propriedades de cada fase do material, oferecendo algumas vantagens como flexibilidade, formabilidade e resistência a choques mecânicos, em comparação com os cristais e cerâmicos. Além disso, o detector piroelétrico tem vantagem de operação em temperatura ambiente e vasto espectro de resposta.

MATERIAIS E MÉTODOS

O polieter-eter-cetona é um polieter aromático. Devido a características como resistência mecânica, temperatura de transição vítrea em torno de 143 °C, resistência a um grande número de agentes químicos, o PEEK é considerado um termoplástico de alta performance^(7,8). Sobre a característica dielétrica, não há relaxação no intervalo de frequência de 1,0 Hz até 10⁵ Hz e sua constante dielétrica está em torno de 3,5⁽⁹⁾. O material usado, na forma de pó, foi comprado da Goodfellow com tamanho médio de grãos em torno de 80 micra. O titanato de chumbo modificado (Pz34) em pó, comprado da Ferroperm Piezoceramics A/S, apresenta uma grande anisotropia eletromecânica e baixa constante dielétrica.

Filmes compósitos de Pz34/PEEK foram obtidos por prensagem a quente da mistura dos pós na temperatura de 368 °C por 2,0 h. A espessura das amostras foram no intervalo de 150 a 300 micra após a aplicação de uma pressão de 12 MPa. A fração volumétrica de cerâmica usada para preparar o filme foi de 50 vol.% e 60 vol.%. A quantidade de Pz34 e PEEK foi calculada usando a equação abaixo

$$M_c = M_p \frac{\rho_c}{\rho_p} \left(\frac{\Phi_c}{1 - \Phi_c} \right) \quad (1)$$

onde M é a massa, ρ é a densidade e os subscritos p e c estão relacionados ao polímero e à cerâmica, respectivamente. Φ_c é a fração volumétrica de cerâmica.

Eletrodos circulares de alumínio, com 10 mm de diâmetro, foram depositados em ambas as faces do filme compósito para contato elétrico. As amostras foram polarizadas com campo elétrico apropriado e para evitar a ruptura dielétrica do ar, a

polarização foi realizada em banho de óleo de silicone, com temperatura controlada. O coeficiente piezoelétrico longitudinal d_{33} foi medido com o Pennebaker modelo 8000 d_{33} Piezo Tester (APC) a 60 Hz. A atividade piezoelétrica do filme compósito foi estudada em função do campo de polarização. O coeficiente piroelétrico $p(T)$ foi determinado usando-se o método direto da medida da corrente piroelétrica⁽¹⁰⁾.

Sistema de Detecção da Radiação.

A figura 1 ilustra a câmara piroelétrica construída para medir a intensidade de raios-X. O protótipo consiste de um sensor piroelétrico (filme compósito), um conversor corrente-voltagem de alta sensibilidade e baixo ruído, um microcontrolador e um mostrador digital.

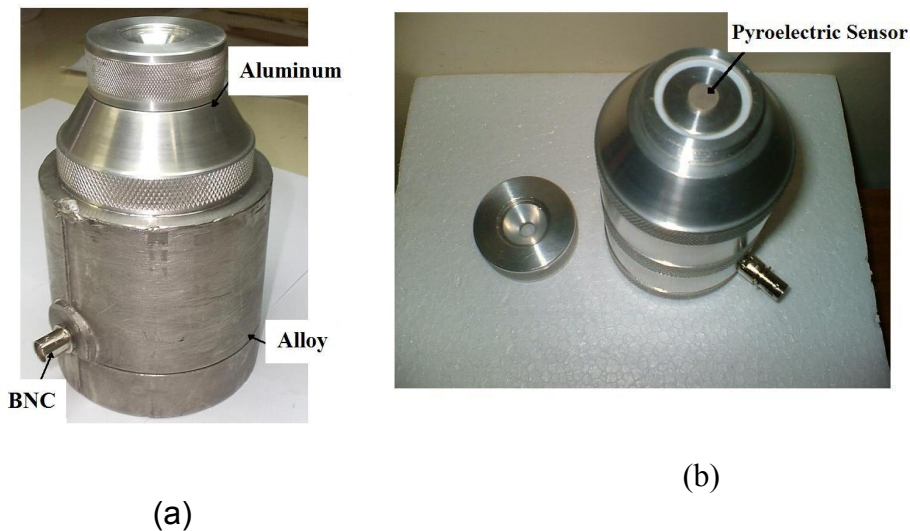


Fig. 1 : Foto da câmara piroelétrica (a) fechada e (b) aberta mostrando o sensor.

A radiação foi aplicada por um equipamento de ortovoltagem (Seimens Sabilipan II). As características do instrumento estão descritas na tabela I.

Tabela I – Potencial de tubo e corrente

Pico do Potencial de tubo (kV _p)	Corrente fixa (mA)
120	20
180	20
200	20
250	15
300	12

Filtros de cobre de 0,60 mm, 1,10 mm, 2,10 mm e 4,20 mm foram usados para 180 kV_p, 200 kV_p, 250 kV_p e 300 kV_p, respectivamente. Para 120 kV_p, foi usado um

filtro de alumínio de 3 mm. O sensor piroelétrico foi colocado a 50 cm da fonte de raios-X, que é a distância comumente usada em pacientes durante o tratamento.

A razão de fluência de energia (Ψ) do feixe foi calculada a partir da medida da razão de exposição de raios-X (\dot{X}) e do coeficiente de absorção de energia do ar $(\mu_{ab}/\rho)_{air}$, usando a equação 2⁽¹¹⁾.

$$\Psi = \dot{X} \frac{8.73 \times 10^{-3}}{(\mu_{ab} / \rho)_{air}} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

onde \dot{X} foi medido com uma câmara de ionização cilíndrica calibrada de 0,6 cm³, conectada a um eletrômetro FARMER modelo 2570, designado para uso clínico no intervalo de ortovoltagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Filmes compósitos Pz34/PEEK com 60 vol.% de cerâmica foi polarizado a 130 °C por 1,0 h. Variando o campo elétrico aplicado, a eficiência do processo de polarização pode ser analisado. Para evitar ruptura do dielétrico do ar, o processo de polarização foi realizado em banho de óleo de silicone. Em relação à atividade piroelétrica, uma amostra pré-polarizada com 15 MV/m foi colocada numa câmara com temperatura controlada e a corrente de despolarização termoestimulada (TSDC) foi medida. A amostra foi aquecida a uma razão constante de 1 °/min com seus eletrodos em curto e a corrente foi monitorada por um eletrômetro Keithley modelo 610 C. A corrente piroelétrica reversível foi estabelecida após remoção de todas as contribuições irreversíveis à corrente de despolarização, o que ocorreu após a 3ª varredura. O coeficiente piroelétrico $p(T)$ como função da temperatura foi calculado com auxílio da equação 3:

$$p(T) = \frac{1}{A} \frac{I_p}{dT/dt} \quad (3)$$

onde A é a área com eletrodo, I_p é a corrente piroelétrica e dT/dt é a taxa de aquecimento. O valor de $p(T)$ na temperatura ambiente é 19 $\mu\text{C/m}^2\text{K}$ e a figura de mérito piroelétrica (FOM) é 0,43 $\mu\text{C/m}^2\text{K}$. Nenhuma mudança apreciável nos coeficientes piezo e piroelétrica foi observada após a irradiação com 760 Roentgens, indicando que não ocorre degradação do sensor com a energia utilizada. A Figura 2 ilustra o comportamento do coeficiente piroelétrico $p(T)$ com a temperatura.

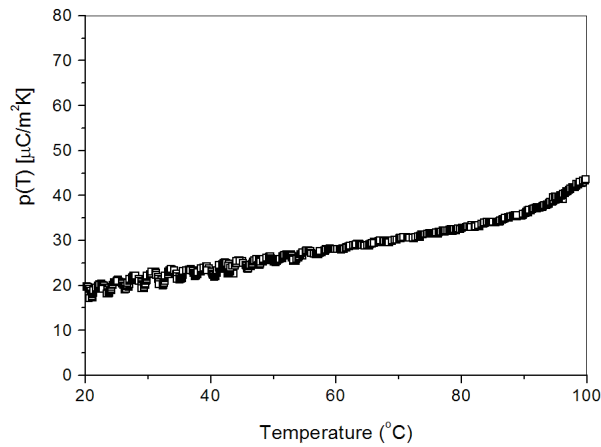


Fig. 2: Coeficiente piroelétrico em função da temperatura. Compósito Pz34/PEEK 60 vol% de cerâmica.

Para medir a energia absorvida pelo sensor, uma folha de chumbo de espessura 7 mm, com um buraco de 7 mm de diâmetro foi colocado a 50 cm do tubo de raios-X. A exposição foi medida com e sem o sensor cobrindo o buraco na folha de chumbo. A tabela III ilustra a porcentagem de energia absorvida pela cerâmica Pz34, pelo cristal LiNbO_3 e pelo filme compósito Pz34/PEEK com 60 vol.% de cerâmica, para todos os potenciais do tubo.

É possível ver pelos dados da tabela II que a radiação não é completamente absorvida pelo material sensor. As espessuras da cerâmica Pz34 e do cristal LiNbO_3 é de 1 mm, enquanto a espessura do filme compósito é de 220 μm . A resposta do sensor piroelétrico é proporcional à razão de fluência de energia ou intensidade dos raios-X.

O comportamento da resposta do sensor em função da fluência de energia ou intensidade de raios-X é ilustrado na Figura 3. Para comparação, as respostas da cerâmica ferroelétrica Pz34 e do cristal piezoelétrico LiNbO_3 também são apresentados.

O sinal elétrico vindo da saída do conversor corrente-voltagem, de alta sensibilidade, é filtrado antes de alimentar o sistema de aquisição do microcontrolador. Este é interfaciado através de uma porta serial para receber comandos e enviar dados para um computador. A intensidade de raios-X é calculada dividindo a fluência de energia pelo tempo de exposição dos raios-X. A exposição foi medida com um sistema Radcal modelo 9015 (Monróvia, CA, USA).

Tabela II - Energia absorvida pelo material sensor

Material	Potencial do tubo (kV _p)	Exposição sem o sensor (R/min)	Exposição com o sensor (R/min)	Absorção (%)
LiNbO ₃	120	7,58	1,22	83,91
Pz34	120	7,58	0,32	95,78
Pz34/PEEK	120	7,58	1,56	79,42
LiNbO ₃	180	13,44	4,62	65,63
Pz34	180	13,44	1,12	91,67
Pz34/PEEK	180	13,44	4,62	65,63
LiNbO ₃	200	10,06	5,00	50,30
Pz34	200	10,06	1,34	86,68
Pz34/PEEK	200	10,06	4,50	55,27
LiNbO ₃	250	10,64	7,14	32,89
Pz34	250	10,64	2,58	75,75
Pz34/PEEK	250	10,64	6,12	42,48
LiNbO ₃	300	4,84	4,02	16,94
Pz34	300	4,84	1,92	60,33
Pz34/PEEK	300	4,84	3,48	28,10

Conforme ilustra a Figura 3, energias comumente usadas na terapia de radiação (120 kV_p), apresentam maiores respostas dos materiais sensores. Este comportamento pode estar relacionado com a absorção de energia, que é de 95,78%, 83,91% e 79,78% para o Pz34, LiNbO₃ e Pz34/PEEK, respectivamente. Com o aumento da intensidade de raios-X, a absorção decresce e também a resposta dos sensores. Entretanto, a intensidade da resposta é suficientemente alta para ser medida com precisão. Os valores apresentados na Figura 3, são valores médios obtidos após 5 medições, o que indica a repetibilidade das medidas.

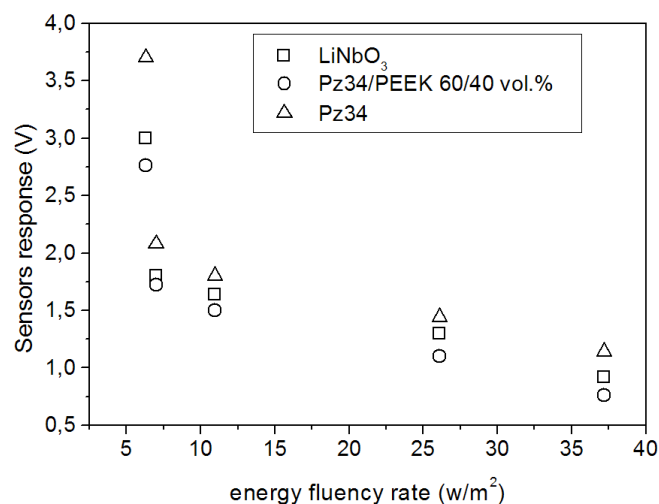


Fig. 3 – Resposta do sensor para a intensidade de raios-X no intervalo de ortovoltagem.

Um sistema de medida da intensidade de raios-X no intervalo de ortovoltagem foi implementado usando, como material sensor, um filme compósito cerâmica/polímero, com 60 % de cerâmica em volume. Apesar da baixa absorção de energia do compósito, em comparação com a cerâmica pura e com o cristal de lítio, a amplitude da resposta é muito similar. Embora a relação entre a resposta do sensor e a intensidade de raios-X não seja linear, não há valores duplos de voltagem para diferentes energias, indicando que o compósito Pz34/PEEK pode ser usado como elemento sensível para detectores de radiação. Pesquisas estão em andamento, em nosso laboratório, para mostrar que este compósito também pode ser usado no intervalo de radiação não-ionizante como o infravermelho.

CONCLUSÃO

Um novo instrumento, usando um compósito piroelétrico feito com cerâmica Pz34 e matriz polimérica PEEK foi implementado como uma alternativa às dispendiosas câmaras de ionização para dosimetria. O instrumento mede diretamente a intensidade de raios-X, sem necessidade de cálculos posteriores e pode monitorar de forma precisa a dose de radiação aplicada. Sendo o sistema microcontrolado, a não linearidade entre a resposta do sensor e a intensidade de raios-X não é um problema. Medidas experimentais comprovaram a não degradação do filme compósito após a aplicação da radiação ionizante. No intervalo de fluência de energia de raios-X de 6.30 a 37.19 W/m², a resposta do sensor variou de 2,70 V a 0,80 V.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro.

ABSTRACT

Composite material obtained with modified lead titanate (Pz34) ferroelectric ceramic and polyether-ether-ketone (PEEK) polymer matrix was used as sensitive component to measure X-ray intensity in a novel detection system. The sensing element works as a thermal transducer, converting a non-quantified thermal flux into an output measurable quantity of electrical voltage. The samples were obtained up to 60 vol.% of ceramic, by hot pressing the mixture of Pz34 and PEEK powders at

368°C and applying 12 MPa pressure for 2.0 h. The sensor response varies from 2.70 V to 0.80 V in the energy fluence rate range of 6.30 to 37.20 W/m². The absorbed incident energy was analyzed as a function of the ionizing energy. Furthermore, by measuring the pyroelectric activity of the composite film it was observed that there is no degradation of the sensor after the irradiation.

Keywords: composite; pyroelectricity; X-ray radiation sensor.

REFERENCIA

- [1] Hester, D. L., Glower, D. D., Overton, L. J., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **11**, 145 – 148, (1964).
- [2] de Carvalho, A. A., Brassalotti, A. L., de Paula, M. H., Alter, A. J., *Electron. Lett.*, **40**, 1097 – 1098, (2004).
- [3] Stadlober, B., Zirkl, M., Leising, G., Gaar, N., Bauer-Gogonea, S., Bauer, S., *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul.*, **13**(5), 1087 – 1092, (2006).
- [4] Mokkonen-Craig, S., Paronen M., Arstila, K., Helariutta, K., Ranhala, E., Tikkanen, P., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Research B*, **236**, 366 – 370, (2005).
- [5] Metcalfe, P., Kron, T., Hoban, P., Medical Physics Publishing, Madison WI, (1997), chap. 1 – 5.
- [6] de Paula, M. H., de Carvalho, A. A., Brassalotti, A. L., Alter, A. J., Sakamoto, W. K., Malmonge, J. A., de Almeida, A., *Med. Biol. Eng. Comput.*, **43**, 751 – 755, (2005).
- [7] Provisional data sheet PK1, *Grades, properties and processing characteristics*, Imperial Chemical Industries (ICI), UK. (1980).
- [8] Charrier, J. M., *Polymeric materials and processing*, Hanser Publishers, Munich, (1991), pp 144 – 145.
- [9] Sakamoto, W. K., *Eclética Química*, **28**(2), 49 – 53, (2003).
- [10] Byer, R. L., Roundy, C. B., *Ferroelectrics*, **3**, 333 – 338, (1972).
- [11] de Carvalho, A.A., Alter, A. J., *IEEE Trans. Ultras. Ferroel. Freq. Contr.*, **44**, 1198 – 1203, (1997).