

Caracterização da Resposta do Dosímetro Fricke Gel preparado com Gelatina 270 Bloom para Feixes de Elétrons Clínicos

C. C. Cavinato¹, R. K. Sakuraba², J. C. Cruz², L. L. Campos¹

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – 05508-000 – São Paulo – Brasil

²Hospital Israelita Albert Einstein – HIAE
Av. Albert Einstein, 627/701 – Morumbi – 05652-000 – São Paulo – Brasil

Abstract. *The Fricke gel dosimetry has been widely studied for clinical application because it allows the three-dimensional dose verification when used the magnetic resonance imaging (MRI) technique. The objective of this study is to characterize the spectrophotometric response of the Fricke gel dosimeter developed at IPEN, prepared with 270 Bloom gelatine produced in Brazil for clinical electron beams with energies of 4, 6, 9, 12 and 16 MeV to depth of dose maximum using water phantom. The optical absorption spectra, dosimetric wavelength, dose dependent response, sensitivity, minimum detection limit, energy dependent response and reproducibility were the parameters studied.*

Resumo. A dosimetria Fricke gel tem sido muito estudada para aplicação clínica porque permite a verificação da dose tridimensional quando utilizada a técnica de Imageamento por Ressonância Magnética (IRM). O objetivo deste trabalho é caracterizar a resposta espectrofotométrica do dosímetro Fricke gel desenvolvido no IPEN, preparado com gelatina 270 Bloom produzida no Brasil, para feixes de elétrons clínicos com energias de 4, 6, 9, 12 e 16 MeV à profundidade de máxima dose utilizando simulador de água. Os parâmetros avaliados foram: espectros de absorção óptica, comprimento de onda dosimétrico, intervalo linear de resposta em função da dose, sensibilidade, limite inferior de detecção, dependência da resposta com a energia do feixe de radiação incidente e reprodutibilidade.

1 INTRODUÇÃO

A dosimetria Fricke gel permite a verificação tridimensional da dose quando utilizada a técnica de Imageamento por Ressonância Magnética (IRM), além da bem estabelecida técnica de espectrofotometria de Absorção Óptica (AO) e, por isso, tem sido muito estudada para aplicação clínica [1-3]. Os íons ferrosos (Fe^{2+}) inicialmente presentes no dosímetro Fricke gel oxidam formando íons férricos (Fe^{3+}) quando submetidos à radiação ionizante, proporcionalmente à dose absorvida [1].

Com o objetivo de possibilitar a aplicação desse método de dosimetria nas clínicas de radioterapia e radiocirurgia em todo o Brasil, o Laboratório de Doses Altas (LDA) do IPEN desenvolveu e caracterizou, para aplicação em campos de radiação gama, X e fótons de energias altas [4-9], uma solução Fricke Xilenol Gel (FXG) preparada com gelatina suína de qualidade 270 Bloom produzida no Brasil, de baixo custo e fácil aquisição no mercado nacional, em substituição à solução Fricke gel produzida com gelatina de qualidade 300 Bloom, utilizada por diferentes pesquisadores, que é importada, de difícil aquisição e com custo aproximadamente quarenta e cinco vezes superior à gelatina de 270 Bloom.

Uma importante modalidade de tratamento na radioterapia moderna é representada pelos feixes de elétrons de megavoltagem (aceleradores de alta energia, tipicamente fornecem várias energias de feixes de elétrons, no intervalo de 4 à 22 MeV) que, frequentemente, são a única opção no tratamento de tumores superficiais (menores que 5 cm de profundidade) [10]. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency* – IAEA), a água é o meio de referência recomendado para medições em feixes de elétrons. O simulador de água deve abranger pelo menos 5 cm além de todos os quatro lados do maior tamanho de campo empregado na profundidade de medida [11].

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a resposta espectrofotométrica do dosímetro Fricke gel desenvolvido no IPEN, preparado com gelatina 270 Bloom, para feixes de elétrons clínicos com energias de 4, 6, 9, 12 e 16 MeV à profundidade de máxima dose utilizando simulador de água.

Foram avaliados os espectros de absorção óptica, o comprimento de onda dosimétrico, o intervalo linear de resposta em função da dose, a sensibilidade do dosímetro, o limite mínimo de detecção, a dependência da resposta com a energia do feixe de radiação incidente e a reprodutibilidade da resposta dosimétrica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação da solução dosimétrica

Foram preparados, de acordo com Olsson [12], 400 mL de solução dosimétrica Fricke gel com 5% de gelatina suína (alimentícia e farmacêutica) 270 Bloom (GELITA[®]), água ultra-pura (purificador de água ELGA[®] modelo PURELAB Option-Q DV 25), 50 mM de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 1 mM de cloreto de sódio (NaCl), 1 mM de sulfato ferroso amoniacal ou sal de Mohr [$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] e 0,1 mM de alaranjado de

xilenol ($C_{31}H_{28}N_2Na_4O_{13}S$), que é indicador de íons Fe^{3+} . Todos os reagentes químicos (MERCK®) são de grau analítico.

As amostras de solução Fricke gel foram acondicionadas em cubetas de polimetilmetacrilato (PMMA) (SARSTEDT®), com duas faces ópticas paralelas, cujas dimensões e caminho óptico são de $10 \times 10 \times 45 \text{ mm}^3$ e 10 mm, respectivamente, e foram individualmente seladas com filme de policloreto de vinila (PVC).

As amostras da solução foram mantidas sob refrigeração $((4 \pm 1) ^\circ\text{C})$ e ao abrigo da luz por 14 horas [12] e permaneceram por aproximadamente 30 minutos à temperatura ambiente e ao abrigo da luz antes da irradiação.

2.2 Irradiação das amostras

As amostras foram irradiadas na própria cubeta de leitura e as irradiações foram sempre realizadas na água. Para evitar o contato da solução Fricke gel com a água, cada conjunto de três amostras foi embalado com filme de PVC (Fig. 1).



Figura 1. Conjuntos de três amostras (solução Fricke gel) acondicionadas em cubetas de PMMA, embalados com filme de PVC para irradiação na água.

Todas as amostras foram irradiadas com feixes de elétrons clínicos no acelerador linear de elétrons da VARIAN® modelo CLINAC 2100C (Fig. 2a), pertencente à Unidade de Radioterapia do Centro Oncológico do Hospital Israelita Albert Einstein (HIAE), com diferentes doses e energias utilizando um campo de irradiação de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ e diferentes espessuras de água (acima da cubeta) para garantir a dose máxima no centro de cada amostra de solução Fricke gel. Os parâmetros de irradiação são apresentados na Tab. 1. A temperatura, a umidade e a pressão atmosférica da sala de irradiação foram de 21°C , 55% e 695 mmHg, respectivamente, durante as irradiações.

Tabela 1. Parâmetros de irradiação no acelerador linear de elétrons CLINAC 2100C.

IRRADIAÇÃO DA SOLUÇÃO FRICKE GEL (GELATINA 270 BLOOM)			
Determinação da Dependência da Resposta Dosimétrica com a Dose			
Energia Nominal (MeV)	Espessura de Água (acima da cubeta) (cm)	Dose (Gy)	Taxa de Dose (cGy.min ⁻¹)
16	2,0	0,05	400
		0,1	
		0,2	
		0,3	
		0,4	
		0,5	
		1,0	
		4,0	
		10,0	
		15,0	
		21,0	
Determinação da Dependência da Resposta Dosimétrica com a Energia			
Energia Nominal (MeV)	Espessura de Água (acima da cubeta) (cm)	Dose (Gy)	Taxa de Dose (cGy.min ⁻¹)
4	0,6	9,65 ± 2,05	400
6	0,8	10,1 ± 0,6	
9	1,2	9,2 ± 0,4	
12	2,0	9,85 ± 0,07	
16	2,0	10 ± 0	

Para a realização das irradiações foi utilizado um simulador de água (densidade (ρ) = 1,0 g.cm⁻³) cujas dimensões são 24 x 33 x 12 cm³, sendo as quatro paredes e o fundo de PMMA (ρ = 1,19 g.cm⁻³) com espessura de 0,5 cm (Fig. 2b). Para garantir o retroespalhamento foram colocadas dentro do simulador duas placas de Bolus (ρ = 1,03 g.cm⁻³) (CVICO® modelo MTCB410S) de 1 cm de espessura e dimensões de 30 x 30 cm² cada uma (Fig. 2b). Em cada irradiação foi posicionado um conjunto de três amostras de solução Fricke gel (Fig. 1) sobre as duas placas de Bolus, exatamente no centro do simulador de água. Para impedir a emersão dos conjuntos de amostras estes foram contidos por duas placas de acrílico de 0,8 cm de espessura cada, posicionadas sobre as extremidades superiores e inferiores dos conjuntos, conforme apresentado na Fig. 2b.

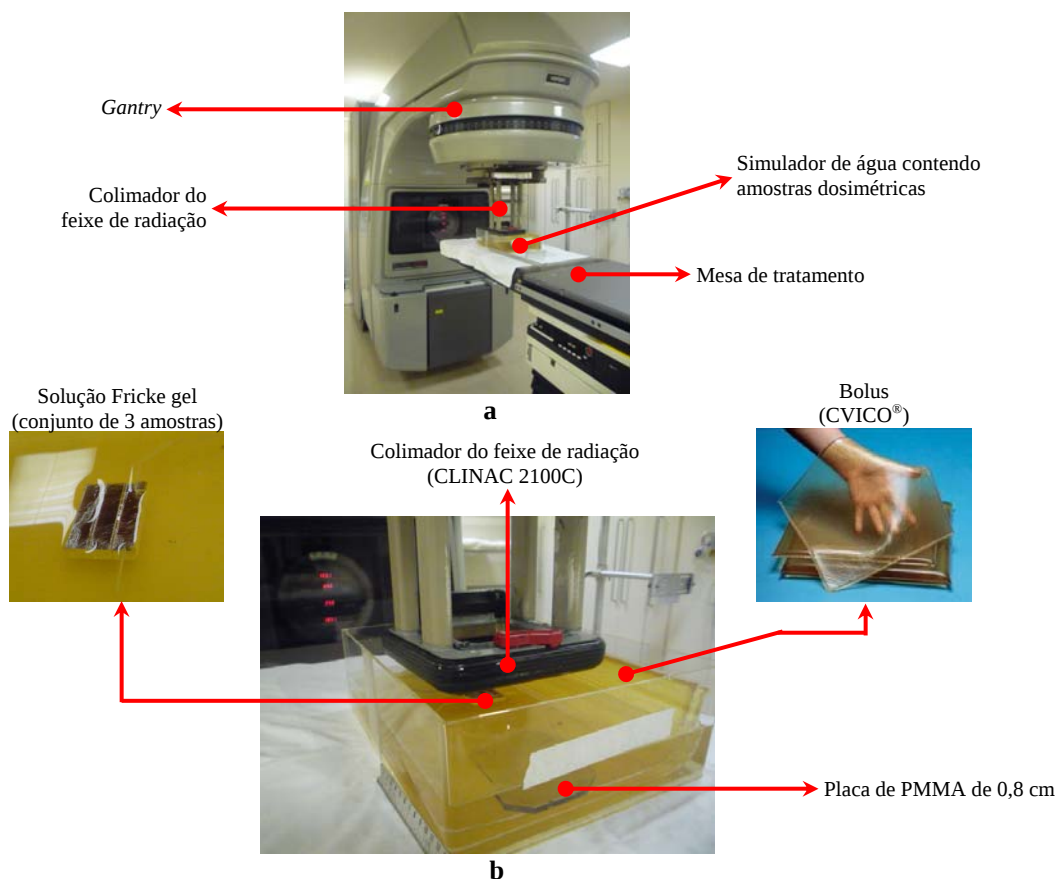


Figura 2. Arranjo experimental para a irradiação das amostras de solução Fricke gel no acelerador linear de elétrons clínicos CLINAC 2100C (a) e simulador de água utilizado para as irradiações (b).

2.3 Avaliação das amostras

A técnica de avaliação utilizada foi a espectrofotometria de AO. As medições de AO foram realizadas imediatamente após a preparação da solução dosimétrica e cerca de trinta minutos depois das irradiações, utilizando o espectrofotômetro SHIMADZU® modelo UV-2101PC (LDA/IPEN). Foi determinado o comprimento de onda dosimétrico para cada amostra irradiada analisada. Esse comprimento de onda foi utilizado para a obtenção dos valores de absorvância das amostras irradiadas.

A mudança de cores da solução Fricke gel (0-21 Gy) foi verificada com o auxílio do negatoscópio E.M.B.® modelo Prendograv (Laboratório de Materiais Dosimétricos – LMD do IPEN).

2.4 Parâmetros estudados

Foram estudados os parâmetros seguintes: espectros de AO, comprimento de onda dosimétrico, intervalo linear de resposta em função da dose, sensibilidade, limite inferior de detecção, dependência da resposta com a energia do feixe de radiação incidente e reprodutibilidade intra-lote da resposta dosimétrica.

2.5 Apresentação dos resultados

As medições espectrofotométricas correspondem à média aritmética de três amostras para cada parâmetro analisado e as barras de erro dos pontos apresentados nas figuras correspondem aos desvios padrões das médias das leituras; incertezas do tipo B não foram consideradas. A radiação natural de fundo foi subtraída de todas as médias aritméticas dos resultados das medições empregando a técnica de AO.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resposta em função da dose

Na Fig. 3 é apresentada a mudança na coloração da solução Fricke gel preparada com 5% de gelatina 270 Bloom, acondicionada em cubetas de PMMA, não irradiada e irradiada com feixes de elétrons clínicos de 16 MeV com doses entre 0,05 e 21 Gy (intervalo de doses clínicas). As cores variam do amarelo-ouro (solução não irradiada) ao violeta-claro (21 Gy) e nota-se que, visualmente, não há diferença de cores entre as amostras não irradiada e irradiadas com até 1 Gy.

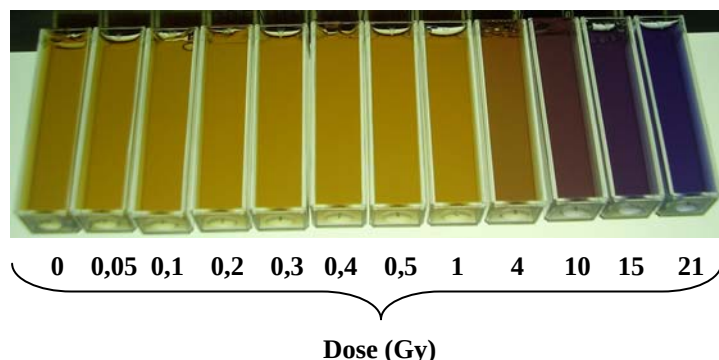


Figura 3. Escala de cores apresentada pela solução Fricke gel (gelatina 270 Bloom) não irradiada e irradiada com feixes de elétrons clínicos com doses entre 0,05 e 21 Gy.

Na Fig. 4 são apresentados os espectros de absorção óptica obtidos das amostras não irradiada e irradiadas com feixes de elétrons clínicos de 16 MeV (doses entre 0,05 e 21 Gy).

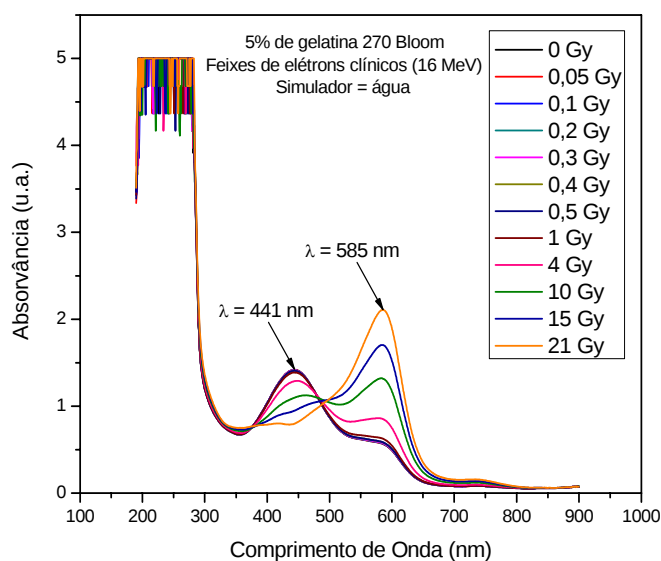


Figura 4. Espectros de absorção óptica das amostras de solução Fricke gel preparada com gelatina 270 Bloom não irradiada e irradiadas com feixes de elétrons clínicos.

A solução preparada com gelatina 270 Bloom apresenta duas bandas de absorção: uma em 441 nm, correspondente aos íons Fe^{2+} inicialmente presentes na solução Fricke gel e outra em 585 nm, correspondente aos íons Fe^{3+} originados pela oxidação dos íons Fe^{2+} pela ação da radiação ionizante. Observa-se intensificação dos valores de absorvância da banda de 585 nm com o aumento da dose de radiação e que a banda de absorção em 441 nm tende a desaparecer (Fig. 4) em função da dose. Comparando os espectros das amostras dosimétricas irradiadas, foi fixado o comprimento de onda dosimétrico de 585 nm, o mesmo estabelecido por Bero [2].

Na Fig. 5 é apresentada a curva da resposta espectrofotométrica da solução Fricke gel irradiada com feixes de elétrons clínicos de 16 MeV (intervalo de dose entre 0,05 e 21 Gy) em função da dose. A solução Fricke gel apresenta linearidade da resposta no intervalo de dose estudado, entre 0,05 e 21 Gy.

Analisando o detalhe da Fig. 5, pode ser observado que a solução Fricke gel apresenta sensibilidade adequada para a detecção de elétrons clínicos, pois é capaz de discriminar valores de dose de 0,01 Gy.

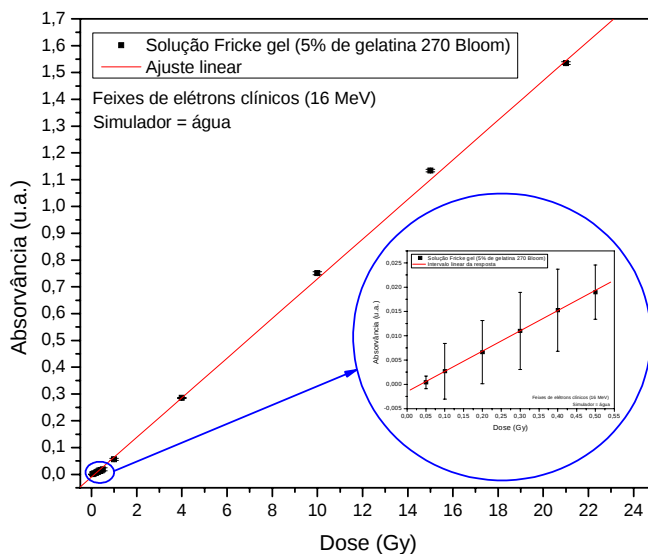


Figura 5. Resposta espectrofotométrica da solução Fricke gel (gelatina 270 Bloom) em função da dose.

3.2 Limite mínimo de detecção

O limite mínimo de detecção experimental foi obtido irradiando as amostras com dose de 0,05 Gy, que é a menor dose obtida com o acelerador de elétrons clínicos CLINAC 2100C. Para efeitos práticos, o limite mínimo de detecção para feixes de elétrons clínicos será considerado 0,05 Gy.

3.3 Dependência da resposta em função da energia do feixe de radiação incidente

Na Fig. 6 são apresentados os espectros de AO obtidos das amostras não irradiada e irradiadas com feixes de elétrons clínicos com dose de 10 Gy e energias entre 4 e 16 MeV.

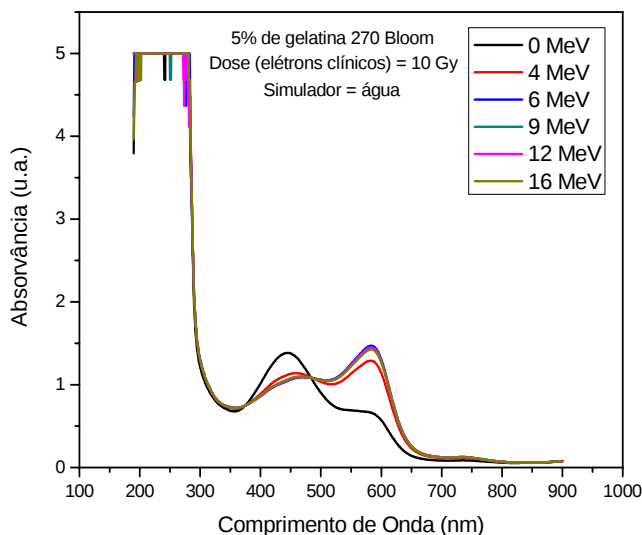


Figura 6. Espectros de absorção óptica das amostras de solução Fricke gel preparada com gelatina 270 Bloom não irradiada e irradiadas com feixes de elétrons clínicos.

Na Fig. 7 é apresentada a curva da dependência energética da resposta espectrofotométrica relativa a elétrons de 16 MeV da solução Fricke gel (gelatina 270 Bloom) irradiada com elétrons com energias entre 4 e 16 MeV e dose de 10 Gy.

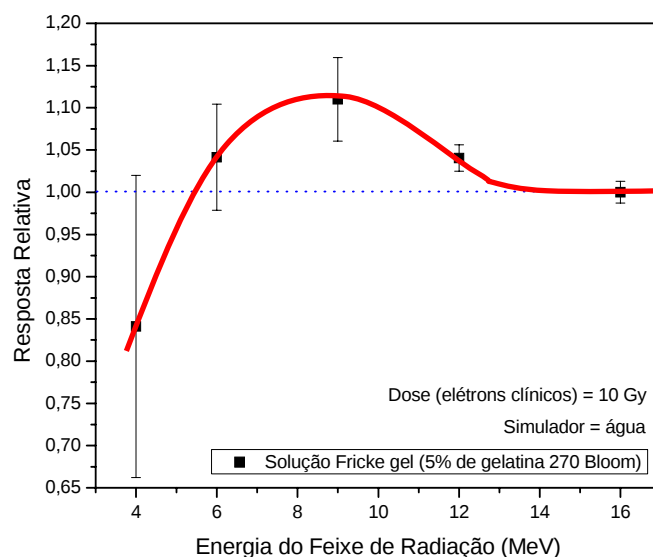


Figura 7. Dependência energética da resposta espectrofotométrica da solução Fricke gel (gelatina 270 Bloom) irradiada com feixes de elétrons clínicos.

A resposta espectrofotométrica da solução Fricke gel apresenta dependência máxima de $\cong 10\%$ para a energia nominal de 9 MeV no intervalo de energia estudado. Para energias maiores que $\cong 12$ MeV não se verifica dependência energética da resposta espectrofotométrica. Os resultados obtidos para a energia de 4 MeV apresentaram uma incerteza grande e um gradiente de dose no conjunto de amostras de solução Fricke gel de 11,1 à 8,2 Gy (dose média de $(9,65 \pm 2,05)$ Gy) em virtude da rápida queda de dose com a profundidade que ocorre em irradiações com baixas energias de elétrons; por isso, não foi possível avaliar a dependência de modo satisfatório.

3.4 Reprodutibilidade

Para o teste de reprodutibilidade intra-lote da resposta espectrofotométrica da solução Fricke gel irradiada com feixes de elétrons clínicos (dose de 1 Gy e energia de 16 MeV) foram utilizadas medições de 5 conjuntos de três amostras submetidos às mesmas condições experimentais. A reprodutibilidade intra-lote da resposta dosimétrica é melhor que $\pm 3\%$.

4 CONCLUSÕES

O dosímetro Fricke gel desenvolvido no IPEN, preparado com gelatina 270 Bloom, produzida no Brasil, apresenta excelentes resultados quando irradiado com feixes de elétrons clínicos, no que se refere ao seu comportamento em função da dose absorvida e da energia do feixe de radiação incidente. Todos os resultados obtidos neste trabalho são semelhantes aos obtidos para radiação gama do ^{60}Co [4], o que comprova que a solução estudada pode ser mais uma opção para o controle de qualidade dos tratamentos de tumores menores que 5 cm de profundidade, utilizando feixes de elétrons clínicos.

Os resultados também indicam a viabilidade da aplicação desse dosímetro na dosimetria tridimensional de elétrons à semelhança do que foi observado na dosimetria em radiocirurgia empregando a técnica de Gamma Knife® [5].

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao HIAE por permitir as irradiações das amostras no acelerador linear de elétrons CLINAC 2100C (VARIAN®) e à CAPES, à FAPESP, ao CNPq, ao IPEN e à CNEN pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] J.C. Gore, Y.S. Kang, R.J. Schulz, Measurement of Radiation Dose Distributions by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Imaging, *Phys. Med. Biol.* 29 (1984) 1189.
- [2] M.A. Bero, W.B. Gilboy, P.M. Glover, Radiochromic Gel Dosimeter for Three-dimensional Dosimetry, *Radiat. Phys. Chem.* 61 (2001) 433.
- [3] G.S. Ibbott, Clinical Applications of Gel Dosimeters, *J. Phys. Conf. Ser.* 56 (2006) 108.
- [4] C.C. Cavinato, Padronização do Método de Dosimetria Fricke Gel e Avaliação Tridimensional de Dose Empregando a Técnica de Imageamento por Ressonância Magnética, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009.
- [5] C.C. Cavinato, O. Rodrigues Jr., H.J. Cervantes, S.R. Rabbani, L.L. Campos, A Dosimetric Evaluation of Tissue Equivalent Phantom Prepared Using 270 Bloom Gelatin for Absorbed Dose Imaging in Gamma Knife Radiosurgery, Preliminary Proceedings of the 5th International Conference on Radiotherapy Gel Dosimetry, 2008 (p. 80).
- [6] C.C. Cavinato, L.L. Campos, Energy Dependent Response of the Fricke Gel Dosimeter Prepared with 270 Bloom Gelatine for Photons in the Energy Range 13.93 keV–6MeV, *Nucl. Instr. and Meth. A.* 2009, Aceito para publicação.
- [7] C.C. Cavinato, L.L. Campos, Study of Fricke Gel Dosimeter Response for Different Gel Quality, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2009, Aceito para publicação.
- [8] A.M.S. Galante, H.J. Cervantes, C.C. Cavinato, L.L. Campos, S.R. Rabbani, MRI Study of Radiation Effect on Fricke Gel Solutions, *Radiat. Meas.* 43 (2008) 550.
- [9] A.M.S. Galante, L.L. Campos, in: A.N. Camilleri (Ed.), *Radiation Physics Research Progress*, Nova Science, New York, 2008, pp. 355–384.
- [10] W. Strydom, W. Parker, M. Olivares, in: E.B. Podgorsak (Ed.), *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005, pp. 273-299.
- [11] P. Andreo, D.T. Burns, K. Hohlfeld, M.S. Huq, T. Kanai, F. Laitano, V. Smyth, S. Vynckier, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [12] L.E. Olsson, S. Petersson, L. Ahlgren, S. Mattsson, Ferrous Sulphate Gels for Determination of Absorbed Dose Distributions using MRI Technique: Basic Studies, *Phys. Med. Biol.* 34 (1989) 43.