

Estudo Comparativo entre as Respostas da Solução Fricke Gel Desenvolvida no IPEN Avaliadas pelas Técnicas de Espectrofotometria de Absorção Óptica e Ressonância Magnética

Christianne C. Cavinato¹, Hernán J. Cervantes R.², Said R. Rabbani² e Letícia L. Campos¹

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo, Brasil

²Instituto de Física, Universidade de São Paulo, IF-USP, São Paulo, Brasil

Resumo. Neste trabalho foram avaliados alguns parâmetros dosimétricos da solução Fricke gel desenvolvida no IPEN, empregando a técnica de Ressonância Magnética (RM), para comparação com a resposta espectrofotométrica desta solução, determinada em estudos anteriores. Este trabalho foi realizado a fim de verificar se a solução dosimétrica estudada apresenta desempenho satisfatório quando avaliada por RM, tanto quanto quando avaliada pela técnica de espectrofotometria de Absorção Óptica (AO). Os resultados obtidos indicam similaridade no comportamento das respostas das soluções dosimétricas avaliadas pelas diferentes técnicas. Desta forma, a técnica de Imageamento por Ressonância Magnética (IRM), muito útil na avaliação da distribuição de dose absorvida em três dimensões (3D) para o controle de qualidade nos procedimentos radioterápicos e radiocirúrgicos realizados no Brasil, pode ser empregada para avaliar a resposta da solução Fricke gel desenvolvida no IPEN.

Palavras-chave: dosímetro Fricke gel, espectrofotometria de absorção óptica, ressonância magnética, distribuição de dose em 3D.

Comparative Study between the Responses of the Fricke Gel Solution Developed at IPEN Evaluated by Optical Absorption Spectrophotometry and Magnetic Resonance Techniques

Abstract. In this work some dosimetric parameters of Fricke gel solution developed at IPEN, using the Magnetic Resonance (MR) technique were evaluated for comparison with the spectrophotometric response of the solution, determined in previous studies. This work was carried out to verify if the dosimetric solution studied presents satisfactory performance when evaluated by MR, as well as by Optical Absorption (OA) spectrophotometry technique. The results indicate similarity in the behavior of the responses of the dosimetric solutions evaluated by the different techniques used. Thus, the Magnetic Resonance Imaging (MRI) technique, very useful in three dimensions (3D) absorbed dose distribution evaluation for quality control in radiotherapy and radiosurgery procedures performed in Brazil, it can be applied to evaluate the response of the Fricke gel solution developed at IPEN.

Keywords: Fricke gel dosimeter, optical absorption spectrophotometry, magnetic resonance, 3D dose distribution.

1. Introdução

Em 1984, Gore [1] reconheceu que a resposta do dosímetro Fricke convencional [2] também poderia ser avaliada pela técnica de RM, além da bem estabelecida técnica de AO [3] e então, estabeleceu o dosímetro Fricke gel. Assim como no Fricke convencional, no dosímetro Fricke gel ocorre a oxidação dos íons ferrosos (Fe^{2+}) a íons férricos (Fe^{3+}) induzida pela radiação ionizante. De forma análoga à medida da mudança resultante na concentração de íons Fe^{3+} pela técnica de AO, o método de RM proposto por Gore [1] determina a concentração de íons Fe^{3+} pela observação das mudanças nas propriedades magnéticas da solução que acompanham a mudança no estado de valência [1].

Com a modificação do dosímetro Fricke convencional por meio da adição de um agente gelatinoso (gelatina, geralmente) [4,5], o que torna a solução consistente, é possível obter a distribuição de dose absorvida em 3D empregando a técnica de IRM. Para o sucesso nos tratamentos de tumores com radiação ionizante é de fundamental importância o conhecimento da distribuição de dose em 3D. Por isso, o dosímetro Fricke gel tem sido amplamente estudado [5,6,7,8,9,10,11,12] para aplicação no controle de qualidade desses tratamentos, já que os dosímetros convencionais [13,14,15], como o filme dosimétrico, são limitados a medições em duas dimensões (2D).

Neste trabalho foram avaliados alguns parâmetros dosimétricos da solução Fricke gel

desenvolvida no IPEN [16,17], empregando a técnica de RM, para comparação com os mesmos parâmetros avaliados por AO em estudos anteriores [18,19]. O objetivo foi verificar se a solução dosimétrica estudada apresenta desempenho satisfatório quando avaliada por RM, tanto quanto quando avaliada pela técnica espectrofotométrica, para que possa ser aplicável na avaliação da distribuição de dose absorvida em 3D por IRM, muito útil para o controle de qualidade nos procedimentos radioterápicos e radiocirúrgicos realizados no Brasil, como por exemplo o tratamento empregando a técnica de Gamma Knife® [12].

2. Materiais e Métodos

2.1. Preparação das soluções Fricke gel

Foram preparados diferentes lotes de solução Fricke gel com 5%, 10% e 15% de gelatina suína alimentícia 270 Bloom, água tri-distilada, 50 mM de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 1 mM de cloreto de sódio (NaCl), 1 mM de sulfato ferroso amoniacal [$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] e 0,1 mM de alaranjado de xilenol ($\text{C}_{31}\text{H}_{28}\text{N}_2\text{Na}_4\text{O}_{13}\text{S}$) [6], que é o indicador de íons Fe^{3+} ; todos os reagentes são de grau analítico.

A gelatina foi dissolvida em 75% do volume total de água tri-distilada. Inicialmente, a gelatina foi umedecida com um pouco de água fria. Depois da total absorção foi adicionado o restante da água que foi previamente aquecida a 45 °C. Esta solução foi mantida sob agitação e aquecimento até a completa dissolução. Nos 25% de água restante foram dissolvidos os demais compostos. Esta solução foi adicionada à solução gelatinosa, a qual foi previamente resfriada (35 °C, aproximadamente). A solução resultante foi mantida sob agitação para completa homogeneização [6].

Imediatamente após a preparação, as soluções foram acondicionadas em cubetas de acrílico (4 mL) com faces ópticas paralelas e caminho óptico de 10 mm, as quais foram seladas com filme de Policloreto de Vinila (PVC).

2.2. Irradiação das soluções Fricke gel

As soluções a serem irradiadas foram mantidas sob refrigeração ((4 ± 1) °C) e ao abrigo da luz por aproximadamente 12 horas [6]. Antes da irradiação permaneceram por 30 minutos à temperatura ambiente e ao abrigo da luz.

As amostras das soluções Fricke gel foram irradiadas (na própria cubeta de leitura) na fonte de radiação gama do ^{60}Co Gammacell (*Atomic Energy of Canada*® modelo 220), do Laboratório de Fontes Intensas de Radiação do IPEN, com doses de 5, 10 e 30 Gy. As irradiações foram sempre realizadas no ar e em condições de equilíbrio eletrônico.

2.3. Avaliação das soluções Fricke gel

As amostras das soluções Fricke gel foram avaliadas empregando a técnica de RM, aplicando a técnica de IRM e o tempo de relaxação T_1 .

As imagens por RM e os T_1 das amostras foram obtidos utilizando o Tomógrafo de Corpo Inteiro (TCI) PHILIPS® modelo GYROSCAN S15/ACS-II (1,5 T) do Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear da USP e foram utilizadas as sequências de pulso seguintes: Eco do Campo Turbo ponderado em T_1 (T_1 -Weighted Turbo Field Echo – T_1 -TFE), Inversão-Recuperação (*Inversion-Recovery* – IR) e Eco de Spin Turbo com Inversão-Recuperação (*Inversion-Recovery Turbo Spin Echo* – IR-TSE). Foi utilizada a orientação coronal em todas as sequências de pulso. Todos os valores de intensidade de sinal de RM foram obtidos de fatias das imagens das amostras de orientação coronal.

As medições de RM correspondem à média aritmética de três amostras e as barras de erro dos pontos apresentados nos gráficos (imperceptíveis em alguns deles), correspondem aos desvios padrões das médias das leituras. Incertezas do tipo B não foram consideradas nos testes de desempenho das soluções Fricke gel realizados neste trabalho.

A radiação de fundo foi subtraída de todas as médias aritméticas dos resultados das medições, exceto das amostras utilizadas para a determinação da estabilidade da reposta da solução Fricke gel avaliada por RM.

2.4. Parâmetros avaliados

Foi determinada a influência da concentração da gelatina na solução Fricke gel, empregando a técnica de IRM. Os demais parâmetros estudados, a dependência com a taxa de dose e a estabilidade (em função do tempo) da resposta das soluções dosimétricas, foram avaliados a partir da taxa do tempo de relaxação T_1 $\left(R_1 = \frac{1}{T_1}\right)$.

Para a avaliação dos parâmetros estudados foram utilizadas amostras dos mesmos lotes de soluções Fricke gel preparadas para a avaliação espectrofotométrica desses mesmos parâmetros, apresentada em trabalhos anteriores [18,19]. Para comparação das respostas das soluções avaliadas por AO e RM foram mantidas as mesmas condições experimentais utilizadas para o estudo espectrofotométrico.

3. Resultados

3.1. Influência da concentração da gelatina

Na Figura 1 é apresentada a intensidade de sinal de RM das soluções preparadas com concentrações de 5%, 10% e 15% de gelatina 270 Bloom, irradiadas com radiação gama do ^{60}Co com dose de 5 Gy.

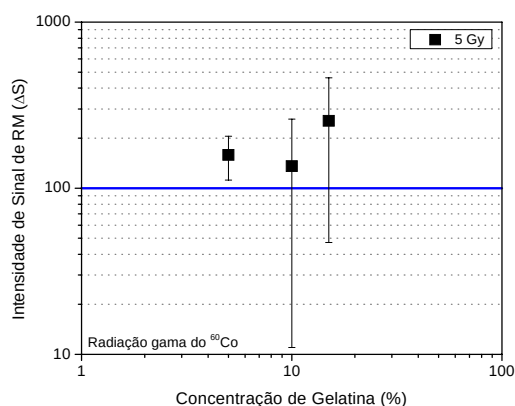


Figura 1. Intensidade de sinal de RM das soluções Fricke gel preparadas com gelatina 270 Bloom em função da concentração de gelatina.

De forma análoga aos resultados obtidos pela técnica de espectrofotometria de AO [19], as soluções preparadas com 5% e 10% de gelatina apresentam comportamento similar (ocorre variação não significativa em relação aos valores de absorvância e desvios padrões da média das leituras grandes, possivelmente em virtude de artefatos da imagem de RM obtida das amostras). O valor de intensidade de sinal de RM da solução preparada com 15% de gelatina, comparado com os valores das soluções preparadas com as concentrações de 5% e 10% de gelatina, é maior. Isto indica que essa solução (15% de gelatina) apresenta maior quantidade de íons Fe^{3+} (originados em virtude da maior quantidade de gelatina empregada na sua preparação), já que o gel contribui na oxidação dos íons Fe^{2+} durante a irradiação [7]. Portanto, a concentração de gelatina também foi fixada em 5% [19] para a resposta das soluções avaliadas por IRM.

3.2. Dependência com a taxa de dose

Na Figura 2 é apresentada a taxa do tempo de relaxação T_1 (R_1) da solução preparada com 5% de gelatina 270 Bloom e irradiada com radiação gama do ^{60}Co com dose de 30 Gy e taxas de dose de 2,6 kGy/h (sem atenuação), 1,3 kGy/h (atenuação de 50%), $7,6 \times 10^{-1}$ kGy/h (atenuação de 70%) e $2,6 \times 10^{-1}$ kGy/h (atenuação de 90%).

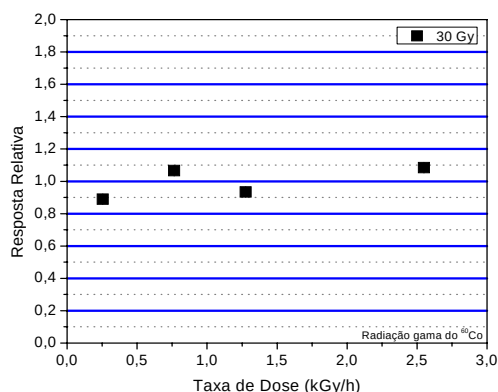


Figura 2. Resposta relativa ao valor médio da taxa de relaxação R_1 da solução Fricke gel preparada com 5% de gelatina 270 Bloom e irradiada com radiação gama do ^{60}Co em função da taxa de dose.

A maior variação de R_1 da solução com a taxa de dose para radiação gama do ^{60}Co é de $\pm 11\%$ e é semelhante aos resultados apresentados para a técnica de espectrofotometria de AO [18].

Assim como para os resultados obtidos pela técnica espectrofotométrica, deve ser utilizada, para a calibração das amostras, a mesma taxa de dose utilizada na irradiação.

3.3. Estabilidade da resposta

Na Figura 3 é apresentada a estabilidade da taxa de relaxação R_1 da solução Fricke gel preparada com 5% de gelatina 270 Bloom não irradiada e irradiada com radiação gama do ^{60}Co com dose de 10 Gy, sob as duas diferentes condições de armazenagem seguintes:

- Condição 1: sob refrigeração ($(4 \pm 1)^\circ\text{C}$) e ao abrigo da luz;
- Condição 2: sob temperatura e luz ambiente.

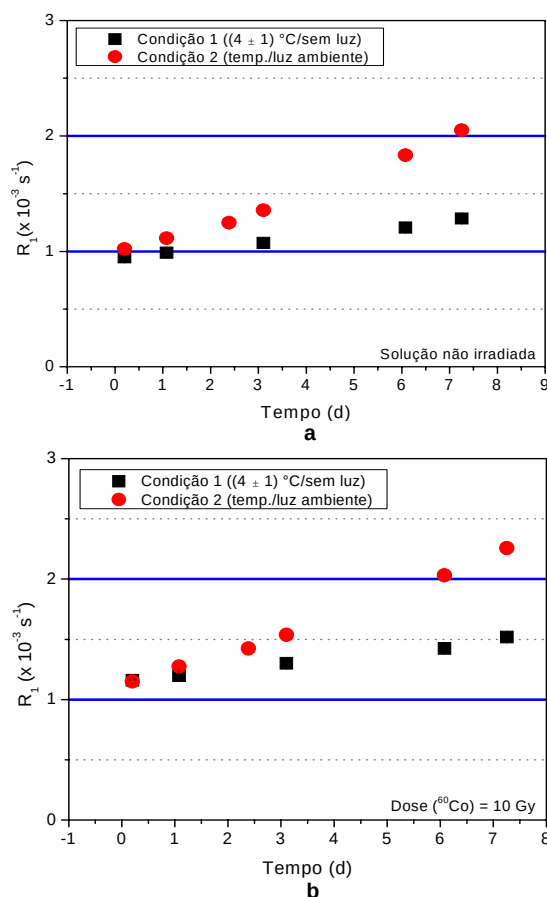


Figura 3. Estabilidade da taxa de relaxação R_1 da solução Fricke gel preparada com 5% de gelatina 270 Bloom não irradiada (a) e irradiada (b) em função do tempo.

Observa-se intensificação significativa dos valores de R_1 das amostras não irradiadas e irradiadas nas duas condições de armazenagem, sendo mais significativa na condição 2, de modo análogo ao observado empregando a técnica de espectrofotometria de AO [18,19].

A solução dosimétrica permaneceu sob a forma sólida (temperatura ambiente) e não houve formação de fungos durante todo o período de análise (7 dias).

Embora, como determinado em outro estudo realizado [20], o tempo ideal para a avaliação da solução Fricke gel por IRM é $\leq 2,5$ horas.

4. Discussão e Conclusões

As respostas da solução Fricke gel correspondentes aos parâmetros dosimétricos estudados neste trabalho, avaliadas pela técnica de RM, apresentam comportamento satisfatório e similar ao observado quando a técnica de espectrofotometria de AO é empregada. Os resultados obtidos, juntamente com os resultados de estudos anteriores [10,12,20], qualificam a aplicabilidade do dosímetro Fricke gel desenvolvido no IPEN na dosimetria tridimensional pela técnica de IRM.

Agradecimentos

Os autores são gratos à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pelo apoio financeiro; e, ao Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear (LRMN) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP) pelas medições de RM.

Referências

- Gore JC, Kang YS, Schulz RJ. Measurement of radiation dose distributions by nuclear magnetic resonance (NMR) imaging. *Phys Med Biol* 1984; 29(10):1189-97.
- Attix FH, Roesch WC. Radiation dosimetry. New York: Academic; 1966.
- Mahesh K, Vij DR. Techniques of radiation dosimetry. Índia: Wiley Eastern; 1985.
- Schreiner LJ. Review of Fricke gel dosimeters. *J Phys Conf Ser* 2004; 3:9-21.
- Bero MA. Dosimetric properties of a radiochromic gel detector for diagnostic X-rays. *Nucl Instrum Methods A* 2007; 580:186-9.
- Olsson LE, Petersson S, Ahlgren L, Mattsson S. Ferrous sulphate gels for determination of absorbed dose distributions using MRI technique: basic studies. *Phys Med Biol* 1989; 34(1):43-52.
- Chu WC. Radiation dosimetry using Fricke-infused gels and magnetic resonance imaging. *Proc Natl Sci Coun ROC(B)* 2001; 25(1):1-11.
- Bero MA, Kharita, MH. Effects of ambient temperature on the FXG radiochromic gels used for 3-D dosimetry. *J Phys Conf Ser* 2004; 3:236-9.
- Bero MA, Gilboy WB, Glover PM, El-Masri HM. Tissue-equivalent gel for non-invasive spatial radiation dose measurements. *Nucl Instrum Methods B* 2000; 166-167:820-5.
- Galante AMS, Cervantes HJ, Cavinato CC, Campos LL, Rabbani SR. MRI study of radiation effect on Fricke gel solutions. *Radiat Meas* 2008; 43:550-3.
- Chan MF, Ayyangar K. Verification of water equivalence of FeMRI gels using Monte Carlo simulation. *Med Phys* 1995; 22(4):475-8.
- Cavinato CC, Rodrigues Junior O, Cervantes HJ, Rabbani SR, Campos LL, editors. 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; Hersonissos; Creta; Grécia. Hersonissos: University of Crete; 2008.
- McLaughlin WL, Boyd AW, Chadwick KH, McDonald JC, Miller A. Dosimetry for radiation processing. London: Taylor & Francis; 1989.
- Shani G. Radiation dosimetry: instrumentation and methods. Boca Raton: CRC; 1991.
- Podgorsak EB. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005.
- Galante AMS, Campos LL. Investigations of the Fricke gel (FXG) dosimeter developed at IPEN irradiated with ^{60}Co gamma rays. Proceedings of the 3rd International Nuclear Atlantic Conference; 2007; Santos; Brazil. Santos: Associação Brasileira de Energia Nuclear; 2007.
- Camilleri AN. Radiation physics research progress. New York: Nova Science; 2008.
- Cavinato CC, Campos LL. Energy dependence response of the Fricke gel dosimeter prepared with 270 Bloom gelatine for photons in the energy range of 13,93 keV to 6 MeV. Proceedings of the 11th International Symposium on Radiation Physics; 2009; Melbourne; Australia. Melbourne: University of Melbourne; 2009. Submitted.
- Cavinato CC, Campos LL. Influence of gelatine concentration and quality in the spectrophotometric response of Fricke gel solution. Proceedings of the 4th International Nuclear Atlantic Conference; 2009; Rio de Janeiro; Brazil. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear; 2009. Submitted.
- Cervantes HR, Bloise AC, Cavinato CC, Campos LL, Rabbani SR. NMR study of Fe^{3+} ions diffusion in gamma irradiated Fricke gel. *Appl Radiat Isot* 2008; submitted.

Contato:

Christianne Cobello Cavinato
ccavinato@ipen.br