

VIABILIDADE DE NOVAS FORMULAÇÕES DO DOSÍMETRO QUÍMICO FRICKE GEL

E. S. Ferreira¹ e L. N. Oliveira^{2,*}¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG/Campus Inhumas²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG/Campus Goiânia

lucas@ifg.edu.br *

Artigo submetido em 28/02/2015 e aceito em 22/12/2016

DOI: 10.15628/holos.2016.2810

RESUMO

Os géis dosimétricos vêm sendo estudados para se tornarem mais sensíveis, a partir, das modificações em suas concentrações de seus reagentes. No dosímetro Fricke padrão (aquoso), foi adicionado o alaranjado de Xilenol e gelatina 300 Bloom para a obtenção do dosímetro Fricke Xilenol Gel (FXG). Através da interação da radiação ionizante ou com o ambiente, surgem íons que podem favorecer reações com outras moléculas e produzir radicais livres e íons secundários que podem reagir formando produtos químicos estáveis. Neste trabalho foram feitas modificações nos reagentes do

FXG, com objetivo de encontrar dosímetros promissores e/ou de baixo custo, principalmente pela substituição da gelatina 300 Bloom pela gelatina comercial. Dessa maneira, foi realizada a preparação de géis dosimétricos, leituras no espectrofotômetro UV/VIS e análises das soluções. Com intuito de criar um novo dosímetro a partir da variação da concentração de seus reagentes, com maior sensibilidade. Os resultados demonstram que os géis modificados neste trabalho podem ser utilizados em pesquisa de Física Médica.

PALAVRAS-CHAVE: Dosímetros, Espectrofotômetro, Fricke Xilenol Gel.

VIABILITY OF NEW FORMULATIONS OF THE CHEMIST FRICKE GEL DOSIMETER

ABSTRACT

The dosimeters gels have been studied to become more sensitive to changes in the starting concentrations of their reactants. In standard Fricke (aqueous) dosimeter was added the xylenol orange and 300 Bloom gelatin to obtain the Fricke dosimeter xylenol gel (FXG). Through the interaction of ionizing radiation or environmental, ions arise which can promote reactions with other molecules and produce free radicals and secondary ions that can react to form stable chemical. In this paper, modifications were made in the FXG reagents, in order

to find promising and/or inexpensive dosimeters, mainly by replacement of 300 Bloom gelatine by trade gelatine. Thus, the preparation of dosimetric gels, readings in the UV/VIS spectrophotometer and analysis of the solutions were performed. Aiming to create a new dosimeter from the variation of the concentration of its reactants, with greater sensitivity. The results demonstrate that the modified gels in this work can be used in Medical Physics's research.

KEYWORDS: Dosimeter, Spectrophotometry, Fricke Xylenol Gel.

1 INTRODUÇÃO

Os dosímetros químicos vêm sendo estudados para se tornarem mais sensíveis a partir das modificações de suas concentrações em seus reagentes, quando irradiados ou expostos ao ambiente, oxidam, na qual a concentração desses íons oxidados é proporcional à dose absorvida. Estes tem a capacidade de medir a dose absorvida em certa região de interesse, devido a sua exatidão, reprodutibilidade e linearidade, por isso o dosímetro Fricke Xilenol Gel (FXG) é classificado como um sistema padrão de referência em dosimetria química (CALCINA et al., 2007; COSTA, 2001; GORE et al., 1984; OLIVEIRA, 2007). O dosímetro Fricke iniciou-se em 1927, por Hugo Fricke e Stern Morse, estes desenvolveram o dosímetro padrão constituído por sulfato ferroso, ácido sulfúrico e água (FRICKE, 1927). Ao longo do tempo, esses dosímetros sofreram modificações em suas composições, as quais podem ser feitas nas concentrações de seus reagentes a partir da solução descrita na literatura. Em 2000, Bero et al., modificou o dosímetro Fricke com a inserção do alaranjado de Xilenol e a gelatina 300 Bloom, este se tornou mais sensível para baixos valores de dose absorvida, passando-se a se chamar dosímetro Fricke Xilenol Gel (BERO et al., 2000). A aplicação do FXG vem sendo desenvolvida em diversas pesquisas envolvendo a radiação ionizante como: em equipamentos de raios-X terapêuticos (CAVINATO, 2007); campos pequenos (OLIVEIRA, 2007a, OLIVEIRA, 2007b; PIRANI et al., 2013); irradiação em sangue (LAMA, 2013); radioterapia para destruição de células tumorais (MOREIRA, 2012; SILVEIRA, 2010).

Existem alguns tipos de dosímetros que são utilizados para medições da distribuição de dose da radiação, dentre eles: câmaras de ionização, filmes, termoluminescentes, Fricke etc. Segundo Silveira, o FXG apresenta algumas vantagens quando comparados à outros dosímetros, este possui o Z efetivo muito próximo ao da água, isso facilita a comparação desse dosímetro com o corpo humano, possibilidade de fazer medições num plano de uma única vez, alta resolução espacial, forma e volume variáveis, amplo intervalo de dose útil, 1 a 30 Gy, disponibilidade comercial dos reagentes, baixo custo, sensibilidade, precisão e exatidão adequados para medições de dose de radiação ionizante (OLIVEIRA et al., 2009a; OLIVEIRA et al., 2009b; SILVEIRA, 2010).

A motivação deste trabalho veio da necessidade de formular novos dosímetros oriundos do Fricke Xilenol Gel (FXG), os quais podem ser úteis em novas pesquisas, sendo assim, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver e avaliar a viabilidade de novas formulações do dosímetro químico FXG, a partir das modificações das concentrações de seus reagentes, proporcionando novos dosímetros com melhor sensibilidade. Este trabalho se insere nas perspectivas de Bero et al. 2000, este iniciou-se as modificações dos reagentes da solução Fricke, apesar de eventualmente nunca ter sido realizado, dessa forma específica, deve-se obter géis dosimétricos adequados como esperados na literatura (BERO et al., 2001). Os objetivos específicos deste trabalho são: a) preparação da solução Fricke (FXG), b) a partir da solução FXG, fazer novas soluções com diferentes concentrações de seus reagentes; comparar as soluções modificadas com a solução FXG utilizando a técnica de espectrofotometria; c) analisar o comportamento da nova solução química através de observações, quanto a sua homogeneidade; coloração; temperatura e pH.

Finalmente, com este trabalho, os novos dosímetros avaliados podem trazer novas informações de futuras pesquisas em técnicas de pré-irradiações em géis dosimétricos.

1.1 Dosímetro Fricke xilenol gel

A determinação da dose absorvida do dosímetro químico consiste nas medições das variações das concentrações de reagentes químicos em uma solução induzida pela radiação ionizante. Através da interação da radiação ionizante com o meio, surgem íons que podem favorecer reações com outras moléculas e produzir radicais livres e íons secundários que podem reagir formando produtos químicos estáveis (SILVEIRA, 2010).

O FXG é composto de 96% de água, dessa forma, a dosimetria química está baseada na radiólise da água, na qual, é um processo de oxidação que permite que a radiação ao interagir com as moléculas de água, promova o surgimento de íons H^+ e OH^- . Alguns desses radicais livres se ligam ao íon Fe^{2+} oxidando-o e produzindo Fe^{3+} que interage com o alaranjado de xilenol, produzindo o complexo indicador de dose absorvida (Fe^{3+} -Xilenol), é essa concentração do complexo que se mede espectrofotometricamente. O Xilenol (XO) tem por objetivo indicar o íon férrico, como descrito acima, e também contribuir para o aumento da oxidação no gel dosimétrico (OLIVEIRA, 2007; PETCHEVIST, 2006). O dosímetro Fricke Xilenol Gel (FXG), possui o número atômico efetivo de $Z_{eff}= 7,75$ e densidade volumétrica de $d=1,05 \text{ g/cm}^3$, próximos aos valores do tecido mole $Z_{eff}= 7,42$ e $d=1,04 \text{ g/cm}^3$, possui alta resolução parcial que permite um amplo volume de medições simultaneamente, e suas leituras podem ser realizadas através da espectrofotometria UV-Visível, na região do visível (400 a 700nm), o que possibilita a determinação da absorvância (PETCHEVIST, 2006; MOREIRA, 2012).

1.2 Radiação ionizante

A radiação ionizante é definida como aquela que tem energia suficiente para interagir com os átomos neutros do meio por onde ela se propaga. A ionização pode ser direta ou indireta, a radiação diretamente ionizante deposita energia no meio através de interações coulombianas diretas entre a partícula carregada projétil, com os elétrons orbitais dos átomos no meio, a radiação indiretamente ionizante, como fótons e nêutros (fótons podem liberar elétrons e nêutros podem liberar prótons), deposita sua energia sobre as partículas carregadas do meio, ou seja, as partículas carregadas transferem energia para os átomos do meio através de interações coulombianas diretas com elétrons orbitais dos átomos (PETCHEVIST, 2006; SILVEIRA, 2010). O processo de emissão da radiação característica ocorre quando o elétron faz a transição entre dois estados com diferentes energias, emitindo a energia da diferença como raios-X característico e a grandeza física que descreve a quantidade de radiação ionizante absorvida para um meio é a dose absorvida D , definida como energia depositada (E) por unidade de massa (m) do meio na qual ela interage. No sistema Internacional de Medidas, a dose absorvida é dada em gray (Gy) (PETCHEVIST, 2006).

1.3 Algumas aplicações do dosímetro Fricke xilenol gel

O dosímetro FXG vêm sendo aplicado na terapia, na qual utiliza as radiações ionizantes, estes se inserem entre os principais aliados nos tratamentos de cânceres, sendo que, em todo o mundo a metade dos pacientes portadores de neoplasmas malignos é submetida à radioterapia (SILVEIRA, 2010). Por esse motivo, médicos, radioncologistas, físicos-médicos, químicos, biólogos,

radiobiologistas e engenheiros hospitalares procuram desenvolver técnicas e equipamentos que melhorem as qualidades das aplicações dessas radiações e dosímetros (MOREIRA, 2012; PIRANI et al., 2009).

Na irradiação do sangue, o dosímetros FXG vêm sendo aplicado com a necessidade médica em determinar a verdadeira dose absorvida, para controle de qualidade da irradiação do sangue e seus derivados. Este fato ocorre por este apresentar características dosimétricas muito próximas aos do tecido mole (LAMA, 2013; SAMPAIO et al., 2013a; SAMPAIO et al., 2013b).

Para o tratamento na radioterapia, através de feixes de radiação ionizante de fótons e elétrons com altas energias, vem sendo desenvolvido a avaliação da capacidade do Fricke Xilenol Gel para medições da dose absorvida na região de não-equilíbrio e o comportamento dessas (MOREIRA, 2012).

1.4 Espectrofotometria de absorção uv-visível

A espectrofotometria é um método de análise baseada em medições de absorção de radiação eletromagnética em uma substância, e detectar como ela afeta a passagem da luz. É uma técnica espectroscopia quantitativa, tem baixo custo operacional, é de fácil utilização, produz resultados de interpretação simples. Espectrofotômetro é um aparelho que permite avaliar a transmissão de uma amostra em função do seu comprimento de onda, isto é, a razão entre intensidade de luz transmitida pela amostra (I_t) e a intensidade de luz incidente (I_0), sendo que a transmitância (T) é dada por $T = I_t/I_0$. O espectro de uma determinada substância, em função do comprimento de onda, é unívoco, ou seja, característico da substância. No caso das moléculas dissolvidas em um solvente, em certas condições a intensidade da luz transmitida (de um determinado comprimento de onda) obedece a Lei de Lambert-Beer (PETCHEVIST, 2006), como na Equação (1):

$$T = I_t/I_0 = 10^{-\epsilon lc} \quad (1)$$

Em que:

T: Transmitância;

ϵ : Constante característica do soluto (absortividade), também conhecida como coeficiente de absorção;

l: Distância que a luz atravessa (caminho ótico);

C: Concentração;

I_0 : Intensidade de luz incidente na amostra;

I_t : Intensidade de luz pela amostra.

Em termos de absorbância A, tem-se que $A = -\log(T)$, como na Equação (2):

$$A = \log(I_0/I_t) = \epsilon Cl \quad (2)$$

2 METODOLOGIA

Na preparação do FXG, foi utilizada gelatina 300 bloom, ácido sulfúrico, sulfato ferroso e água Milli-Q. O primeiro passo, no preparo do FXG é hidratar a gelatina em um béquer com 75% da água a ser utilizada na solução (béquer 1). Após 10 minutos da adição da água no béquer a gelatina hidratada foi aquecida (Figura 1), até atingir 45^oC e então o aquecimento deve ser desligado. Após a solução gelatinosa atingir a temperatura necessária para o preparo da solução final (40^oC), prepara-se a segunda parte da solução dosimétrica, dividida em dois processos, no primeiro processo coloca-se no (béquer 2), o alaranjado de xilenol e o ácido sulfúrico, no (béquer 3) o sulfato ferroso II, com os 25% restantes da água. Assim que a solução gelatinosa atingir 45^oC, deve ser acrescentada à solução do béquer 2 e manter á solução final em agitação. No segundo processo, adiciona-se o béquer 3 na solução, juntando-o a solução final, nesse passo a temperatura utilizada é de 40^oC, até a completa homogeneização. Com a solução finalizada, preencheu-se cubetas com uma pipeta, levando-as para uma geladeira até atingir 40 minutos (formação de gel). Uma sequência similar de preparo é descrita na literatura (BERO et al., 2000).

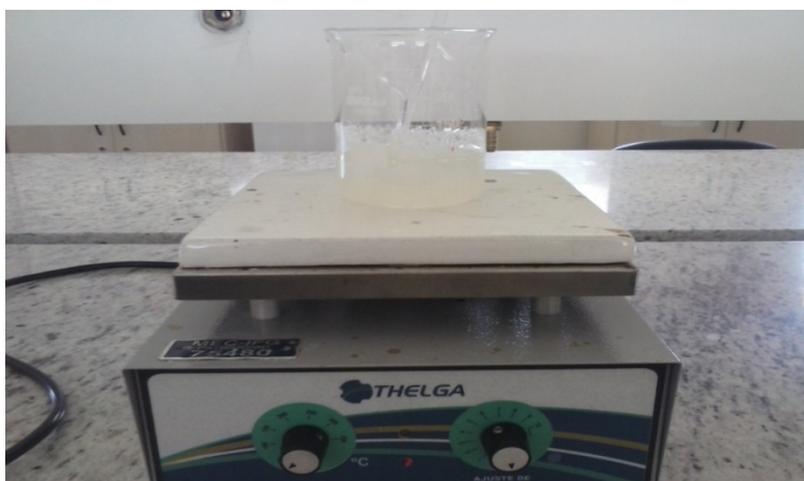


Figura 1: Início da preparação do FXG, mostra-se a diluição da gelatina 300 Bloom em água Milli-Q.

2.1 Variação das concentrações

Foram feitas variações das concentrações e de um componente do FXG original. Variou-se a concentração do sulfato ferroso, alaranjado xilenol e a troca da gelatina 300 Bloom pela gelatina comercial. As medidas foram feitas sempre fixando as concentrações dos demais componentes e variando a concentração de apenas um reagente.

Preparou-se quatro amostras diferentes (Figura 2), um intervalo de cinco minutos para cada amostra, após foram feitas as leituras no pHmetro Hanna Instruments pH/ORO/ISE Mester e no espectrofotômetro UV-Visível 3806 GEHAKA.

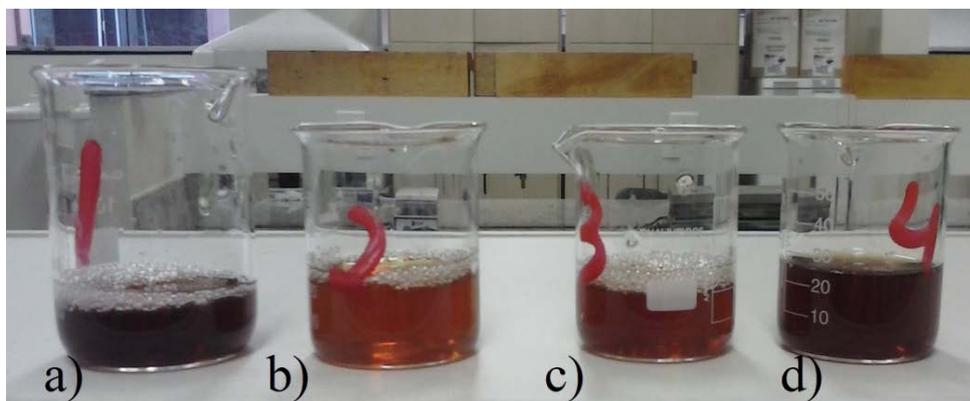


Figura 2: Amostras com diferentes FXG modificados, na amostra a) foi feita a solução do FXG padrão, mantendo as concentrações dos reagentes constantes. Nas amostras b, c, foi modificado apenas um reagente de cada solução, na b) modificou o sulfato ferroso e na c) o alaranjado de xilenol., em d) em vez de modificar a concentração da gelatina 300 Bloom, foi realizado a substituição pela gelatina comercial com a mesma massa.

2.2 Modificações dos dosímetros Fricke xilenol gel

A partir da solução FXG, esta foi modificada pela variação da concentração de seus reagentes. Para isso, utilizou-se as concentrações do FXG, (Tabela 1).

Tabela 1: Composição química dos reagentes do sistema dosimétrico Fricke gel (BERO, 2000).

Substâncias	Forma Molecular	Massa Molecular (g.mol ⁻¹)	Concentração (mM)
Gelatina	(C ₁₇ H ₃₂ N ₅ O ₆) _x	402,47	124,38
Xilenol	C ₃₁ H ₂₈ N ₂ O ₁₃ Sa ₄	760,58	0,10
Sulfato Ferroso	Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ 6H ₂ O	392,47	0,50

Para as medidas de massas das novas concentrações (Tabela 2), utilizou-se a seguinte Equação (3):

$$M = C \cdot V \cdot PM \quad (3)$$

Em que M é a massa, C é a concentração desejada, V é o volume e PM é o peso molecular do reagente. No gel 3, a modificação não foi na concentração e sim a substituição da gelatina 300 Bloom pela comercial, usando a mesma massa, sendo o volume total de cada solução de 50 ml.

Tabela 2: Composição e concentrações dos reagentes das novas formulações dos dosímetros Fricke.

	Sulfato Ferroso ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	Alaranjado de Xilenol ($\text{C}_{31}\text{H}_{28}\text{N}_2\text{O}_{13}\text{SNa}_4$)	Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)
	(mM)	(mM)	(mM)
FXG	0,7	0,1	25
Gel 1	0,5	0,3	25
Gel 2	0,5	0,1	25
Gel 3	0,5	0,1	25

2.3 Leitura dos dosímetros Fricke xilenol gel

Espectrofotômetro

Após o preparo da solução FXG e dos novos géis, a leitura da variação da absorbância foi realizada com uma varredura de 400 a 700 nm, num espectrofotômetro UV-Visível 3806 GEHAKA.

pHmetro

Foi feito a leitura de pH da solução FXG e dos novos géis no pHmetro Hanna Instruments pH/ORO/ISE Meter.

2.4 Análises dos dosímetros Fricke xilenol gel

Nesta pesquisa têm-se três análises das medições das soluções realizadas, entre elas: a) homogeneidade, b) coloração e c) temperatura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análises dos espectros do Fricke xilenol gel

Na Figura 3, pode-se observar que o aumento de 40% na concentração de sulfato ferroso, fez que a absorvância em 550 nm passasse de 0,60 para 0,92, resultante num aumento de variação de 53%. Vale ressaltar que este aumento pode estar relacionado com o aumento de íons de ferro na solução, necessariamente se oxidando naturalmente. Já o pico em torno de 450 nm obteve diminuição e deslocamento para direita não significativos.

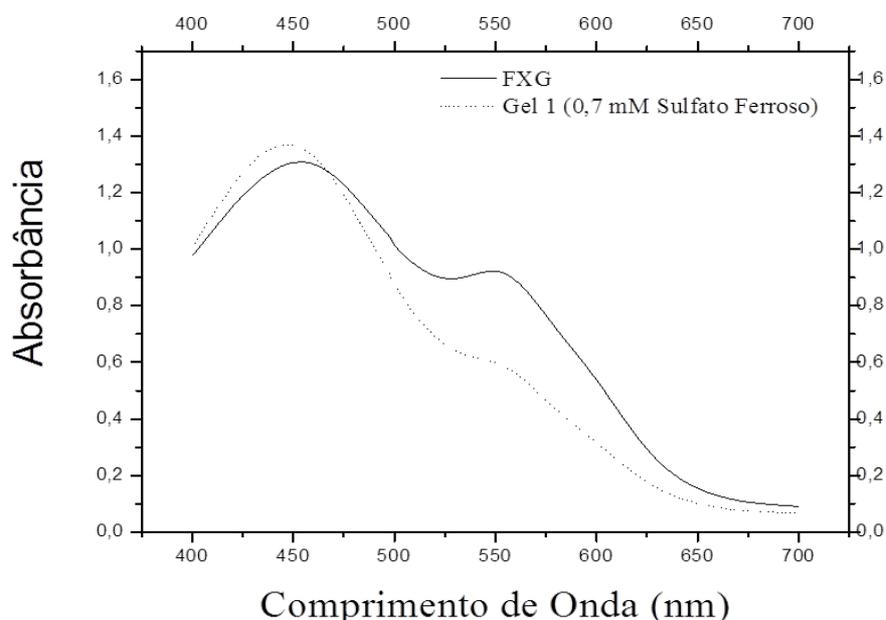


Figura 3: Absorbância versus comprimento de onda de 400 a 700 nm, para o FXG e Gel 1.

Na Figura 4, nota-se no pico em 550 nm, ocorreu uma diminuição de 21% na absorvância fato este que coloca esta solução como uma promissora em aplicação em Física Médica, devida a sua não formação do complexo $Fe^{+3}-XO$ em comparação ao do FXG padrão. O fato que concorda com isto, está no pico de 450 nm, onde a presença de íons de Fe^{+2} é superior em 16% em comparação a do FXG padrão.

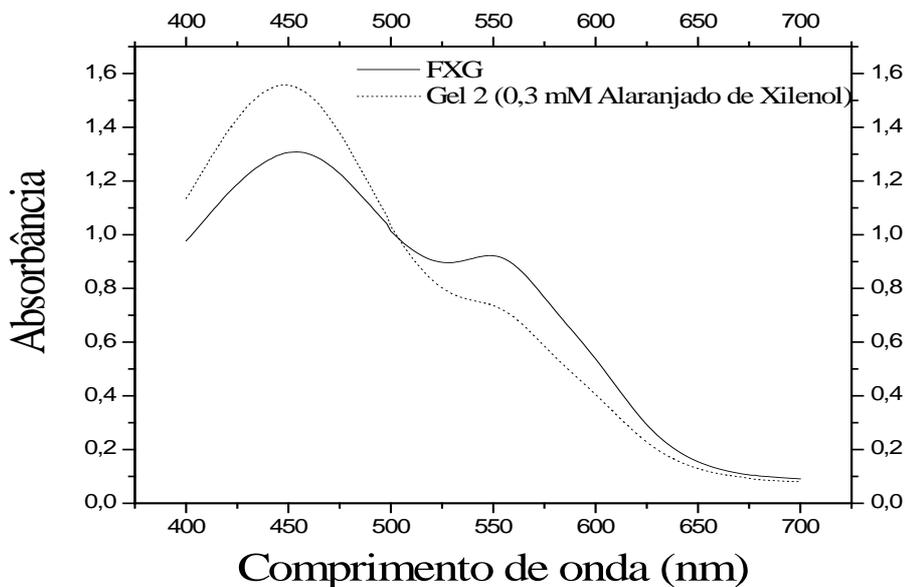


Figura 4: Absorbância versus comprimento de onda de 400 a 700 nm, para o FXG e Gel 2.

Na Figura 5, nota-se que o pico de 550 nm, não mostra diferença significativa entre as absorbâncias para FXG padrão e FXG modificado com gelatina comercial. Para o pico de 450 nm, a gelatina comercial apresenta 15% superior do que a gelatina 300 Bloom, padrão do FXG. Este fato é importante principalmente na necessidade de se ter uma maior quantidade de íons de Fe^{+3} não oxidados na solução, os quais, após a sua oxidação podem fornecer uma maior sensibilidade dosimétrica.

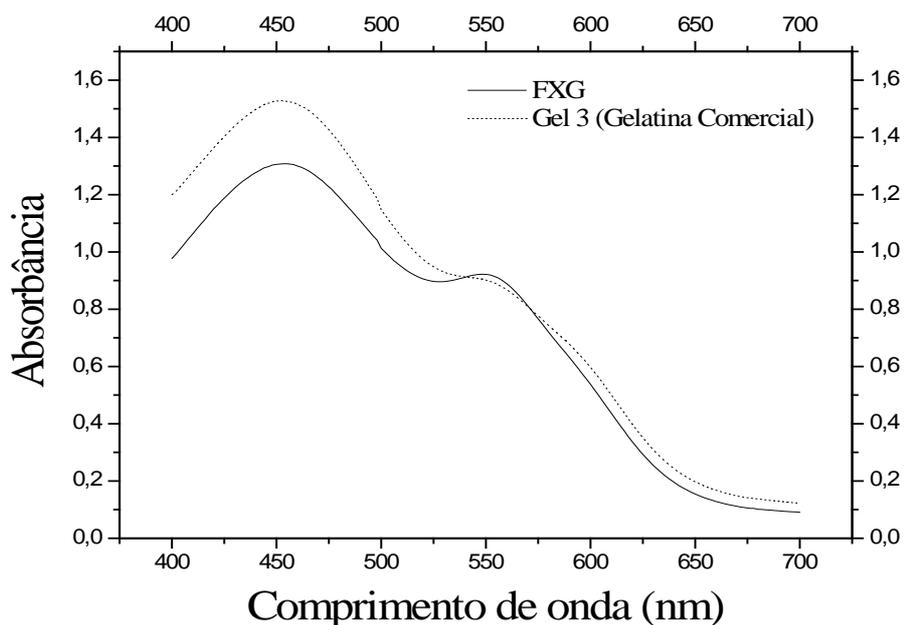


Figura 5: Absorbância versus comprimento de onda de 400 a 700 nm, para o FXG e Gel 3.

3.2 Análises das soluções do Fricke xilenol gel

Na Tabela 3, mostra-se a homogeneidade, coloração e o pH, para o FXG, Gel 1,2 e 3, observa-se que nas análises das amostras houve uma aproximação significativa entre os pHs, isso é devido ao ácido sulfúrico presente na solução. A solução ácida faz com que a reação aconteça mais rapidamente por ter uma concentração maior em íon hidrogênio, ou seja, a oxidação de íon ferroso passa para íon férrico. Já na coloração as amostras 1 (Fricke padrão) e 4 (Fricke modificado/Gelatina comercial), teve uma maior oxidação do que as demais amostras, por apresentar a coloração mais escura. Quanto a homogeneidade todas as amostras apresentaram bons resultados quanto a sua homogeneidade, devido a sua preparação.

Tabela 3: Sensibilidade do FXG variando a Gelatina 300 Bloom, Sulfato Ferroso e Xilenol em gel. Todas as medidas foram feitas em 400 a 700 nm, através de cubetas padrão, na mesma temperatura de 28°C.

Formulação	Homogeneidade	Coloração	pH
FXG	Sim	Laranja escuro	2,91
Gel 1	Sim	Laranja	2,50
Gel 2	Sim	Laranja médio	2,57
Gel 3	Sim	Laranja escuro	2,92

4 CONCLUSÕES

Os espectros de absorção dos dosímetros são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, nota-se que houve dois picos de absorbância bem definidos, um em 450 e outro em 550 nm, cujas absorbâncias aumentam e diminuem. Pode-se dizer que enquanto aumenta absorção do dosímetro, tem-se uma quantidade maior de Fe^{+2} para serem modificados, e quando há uma diminuição de absorção, têm-se então Fe^{+3} formados na solução.

Através das análises dos resultados obtidos deste trabalho, observa-se que no FXG teve o resultado esperado como mostra na literatura, ou seja, obteve-se um bom dosímetro. No Gel 1, houve um aumento da variação de 53% em relação ao aumento da concentração do sulfato ferroso, usando a concentração de 0,7 mM. No Gel 2, teve uma resposta promissora, devido a não formação do complexo Fe^{+3} - Xilenol, isso obteve-se através da concentração de 0,12 mM do Xilenol, para o Gel 3, observa-se que não teve diferença significativa em relação ao FXG, para a troca de gelatina pesquisada pela comercial.

A partir dos resultados obtidos nos espectros, percebe-se um aumento de 40% na concentração do sulfato ferroso de 0,60 para 0,92, na absorbância, este aumento pode estar relacionado com o aumento de íons de ferro na solução, necessariamente se oxidando naturalmente (Figura 3). Observa-se alguns aspectos no FXG, no qual este se modifica, para uma diminuição de 21% na absorbância, isto se deve ao fato de ter a presença de íons de Fe^{+2} superior (450 nm) em 16% em comparação a do FXG padrão (Figura 4). Obteve-se um resultado significativo quanto à sensibilidade da gelatina comercial, devido aos 15% de aumento (450 nm)

quanto a gelatina 300 Bloom, não apresentando diferença significativa entre as absorvâncias (550 nm), este pode ser confeccionado com baixo custo, por usar uma gelatina comercial (Figura 5).

Quanto às observações das análises dos géis, nota-se que houve uma aproximação entre os pH, devido a presença do ácido sulfúrico, sua presença favorece a solução por acelerar a oxidação de íon ferroso passa para íon férrico. Quanto a coloração percebe-se no FXG e no Gel 3 a cor mais escura (Laranja escuro), isso porque houve uma maior oxidação, todos os géis apresentaram boa homogeneidade. Os resultados demonstram que os géis modificados neste trabalho podem ser utilizados em pesquisas de Física Médica.

A proposta futura é a otimização deste dosímetro, irradiando todas as amostras confeccionadas com as variações dos componentes, buscando uma maior estabilidade e sensibilidade.

5 REFERÊNCIAS

1. Bero, M.A., Gilboy, W.B., Glover, P.M., El-masri, H. M. (2000). Tissue-equivalent gel for non-invasive spatial radiation dose measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 166(1), 820-825. doi: 10.1016/S0168-583X(99)00873-3.
2. Bero, M.A., Gilboy, W.B., Glover, P.M. (2001). An optical method for three-dimensional dosimetry. *Journal of Radiological Protection*. 20(3), 287-294.
3. Calcina, C.S.G., Oliveira, L.N., Almeida, C.E., Almeida, A. (2007). Dosimetric parameters for small field sizes using Fricke xylene gel, thermoluminescent, film dosimeters, and an ionization chamber. *Physics in Medicine and Biology*. 52 (5), 1431-1439. doi:10.1088/0031-9155/52/5/014.
4. Cavinato, C.S.G.; Campos, L.L. (2007). *Resposta do dosímetros Fricke Gel desenvolvida no IPEN em função da qualidade do gel*. In: XII Congresso Brasileiro de Física Médica, Foz do Iguaçu. Anais de congresso. Foz do Iguaçu: XII Congresso Brasileiro de Física Médica.
5. Costa, R.T. (2001). *Avaliando a viabilidade do uso do dosímetro Fricke modificado na radioterapia*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.
6. Fricke, H. and Morse, S. (1927). The Chemical Action of Roentgen Rays on Dilute Ferrous Sulphate Solutions a Measure of Dose. *The American Journal of Roentgenology Radium Therapy and Nuclear Medicine*. 18(1), 430-432.
7. Gore, J.C.; Tang, Y.S.; Schulz, R.I. (1984). Measurement of Irradiation Dose distribution by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Imaging. *Physical Medical and Biology*, 29(10), 1189-1197.
8. Lama, L.S.D. (2013). *Caracterização e adaptação do dosímetros Fricke para dosimetria em irradiação de sangue*. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.
9. Moreira, M.V. (2012). *Dosimetria Fricke xylene gel na região de não-equilíbrio para radioterapia com feixes de fótons e elétrons*. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.

10. Oliveira, L.N., Calcina, C.S.G., Parada, M.A., Almeida, C.E., Almeida, A. (2007a). Ferrous Xylenol Gel Measurements for 6 and 10 MV Photons in Small Field Sizes. *Brazilian Journal of Physics*. 27 (3B), 1141-1146.
11. Oliveira, L.N., Zimmerman, R.L, Moreira, M.V., ILA, D., Almeida, A. (2009a). Determination of diffusion coefficient in Fricke Xylenol gel dosimeter after electron beam bombardment. *Surface & Coatings Technology*. 203 (17), 2367-2369. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.03.044.
12. Oliveira, L.N., Calcina, C.S.G., Parada, M.A., Almeida, C.E., Almeida, A. (2009b). 6 MV Wedge Photon Beam Profiles with the Fricke Xylenol Gel Dosimeter. *Brazilian Journal of Physics*. 39 (4), 615-618.
13. Oliveira, L.N. (2007). *Parâmetros dosimétricos e coeficiente de difusão para elétrons em campos pequenos, através do dosímetro Fricke xilenol*. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.
14. Pechevist, P.C.D. (2006). *Dosímetros FXGB para caracterização de feixe em radioterapia*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.
15. Pirani, L.F., Moreira, M.V., Costa, J.J.L, Oliveira, L.N., Caldas, L.V.E, Almeida, A. (2013). Fricke dosimeter gel measurements of the profiles of shielded fields. *Applied Radiation and Isotopes*. 82 (1), 239–241.
16. Pirani, L.F.; Oliveira, L.N.; Petchevist, P.C. D.; Moreira, M.V.; Almeida, A.(2009). New Chemical Fricke Gel Radiation Dosimeter. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 280(2), 259-264.
17. Sampaio, F.G.A., Oliveira, L.N., Moreira, M.V., Petchevist, P.C.D., Almeida, C.E., Almeida, A. (2013a). 8 and 10 MeV Electron Beams Small Field-Size Dosimetric Parameters Through the Fricke Xylenol Gel Dosimeter. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 60 (2), 572-577. doi: 10.1109/TNS.2013.2251423.
18. Sampaio, F.G.A., Del Lama, L.S., Sato, R., De Oliveira, D.M.M., Czelusniak, C., Oliveira, L.N., Almeida, A.(2013b). Quality Assurance of a Two-Dimensional CCD Detector System. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 60(2), 810-816. doi:10.1109/TNS.2013.2240464.
19. Silveira, M.C. (2010). *Distribuição da dose absorvida no tratamento da micose fungóide através da dosimetria Fricke xilenol gel*. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP.