

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA**

ELISSON TIAGO DE OLIVEIRA BARÃO

**USO DA SOLUÇÃO FRICKE XILENOL GEL PARA COMPARAÇÃO
ENTRE O PERFIL DE DOSE EM FUNÇÃO DA ABSORBÂNCIA PARA
FOTONS E ELETRONS**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE SAÚDE E SERVIÇOS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM RADIOLOGIA**

ELISSON TIAGO DE OLIVEIRA BARÃO

**USO DA SOLUÇÃO FRICKE XILENOL GEL PARA COMPARAÇÃO
ENTRE O PERFIL DE DOSE EM FUNÇÃO DA ABSORBÂNCIA
FOTONS E ELETRONS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Radiologia.

Profº Orientador: Dr. Alexandre D'Agostini Zottis

Profª Co-Orientadora: Dra. Renata Pietsch Ribeiro

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

USO DA SOLUÇÃO FRICKE XILENOL GEL PARA COMPARAÇÃO ENTRE O PERFIL DE DOSE EM FUNÇÃO DA ABSORBÂNCIA PARA FÓTONS E ELÉTRONS

ELISSON TIAGO DE OLIVEIRA BARÃO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Radiologia e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Radiologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 Dezembro, 2018.

Banca Examinadora:

Alexandre Dagostini Zottis,Dr.

Renata Pietsch Ribeiro,Dra.

Marcel Piovezan,Dr.

Marcos Renan,Dr.

A minha esposa Marijonce e meu filhos Larissa, Lara e
Enzo,
a quem sem o apoio jamais conseguiria completar
essa jornada de conhecimento

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus orientadores, professor Dr. Alexandre Dagostini Zottis e professora Dr. Renata Pietsch Ribeiro pela paciência em explicar todos os questionamentos por mim feitos, e a todo conhecimento que foi adquirido nessa jornada que servirá não somente para a conclusão dessa pesquisa mais sim para toda minha vida profissional que levarei como exemplo.

Ao Cepon na pessoa do Sr. Daniel Souza Felipe, Físico Médico, pela parceria com o ISFC. E em disponibilizar seu tempo e conhecimento e também o acelerador de fótons e elétrons para as irradiações das amostras das soluções fricke xilenol gel.

A minha esposa Marijonce Valdeni Machado, pelo amor, compreensão e todo companheirismo que foram essenciais nessa jornada.

A minha família mãe, irmãos por todo apoio e incentivo nas horas em que mais precisei.

A todos os professores do Instituto Federal de Santa Catarina do curso Superior de Tecnologia em Radiologia

E a todos que de alguma maneira contribuíram para que essa tese fosse concluída com sucesso em especial aos meus colegas de graduação Will Nunes, Marzeu Selau, Daniela Ramos, Nataly Pereira Roxo e Suanny Vasques Jardim a quem considero muito pela afinidade e amizade que vai além do curso fica aqui registrado o meu muito obrigado.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

A dosimetria química vem sendo muito pesquisada nos últimos anos, mais especificamente quando se fala em dosimetria Fricke, desenvolvida no início do século XX por Hugo Fricke e aprimorada mais recentemente com a adição do alaranjado de xilenol, fazendo assim o Fricke Xilenol Gel (FXG). Neste trabalho foi avaliada a característica da resposta: dose de radiação de fótons e de elétrons versus absorvância da solução Fricke Xilenol Gel (FXG). As amostras foram produzidas no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Para a comparação dos resultados das curvas de dose resposta para feixes de fótons e elétrons. Foi feito o cálculo do rendimento radioquímico do dosímetro para os dois tipos de radiação e calculado a densidade efetiva do dosímetro FXG. A técnica de leitura padrão utilizada foi a espectrofotometria UV-VIS. O comportamento da resposta para o intervalo de dose entre 5 e 15 Gy foi linear. No entanto, a partir dos 20 Gy perdeu a linearidade, chegando na saturação do dosímetro, demonstrando um comportamento abaixo do esperado e encontrado na literatura, que apresenta um fator limite de resposta-dose de 30 Gy.

Palavras-chave: Dosimetria Fricke, FXG, Absorvância, Fótons, Elétrons.

USE OF FRICKE SOLUTION XYLENOL GEL FOR COMPARISON BETWEEN THE DOSE PROFILE IN FUNCTION OF PHOTONS AND ELECTRONS ABSORBANCE

ELISSON TIAGO DE OLIVEIRA BARÃO

ABSTRACT

Chemical dosimetry has been much researched in recent years, more specifically when talking about Fricke dosimetry, developed in the early twentieth century by Hugo Fricke and more recently improved with the addition of xylene orange, thus making the Fricke Xylene Gel (FXG). In this work the characteristics of the dose response versus absorbance of the Fricke Xylene Gel (FXG) solution were evaluated for photons and electrons, whose samples were produced at the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC) for the comparison of the results of dose response curves for bundles of photons and electrons. The radiochemical yield of the dosimeter was calculated for the two types of radiation and the effective density of the FXG dosimeter was calculated. The standard reading technique used was UV spectrophotometry. The behavior of the response for the dose range between 5Gy and 15Gy was linear and from 20 Gy it lost the linearity demonstrating a behavior lower than expected and found in the literature, which presents a dose response limiting factor of 30 Gy.

Key words: Fricke dosimetry, FXG, Absorbance, Photons, Electrons.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modos de interação	5
Figura 2 - Cubetas ópticas	14
Figura 3 - Acondicionamento das amostras	14
Figura 4 - Ajuste de posicionamento das amostras	15
Figura 5 - amostras prontas para serem irradiadas com o uso do bolus.	16
Figura 6 - amostras do FXG após a irradiação	17
Figura 7 - Espectrofotômetro Agilent Technologies, Cary 60 UV-VIS	17
figura 8 - soluções de Fe(III)	18
figura 9 - picnômetro 50 ml Diogolab	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Partícula carregada interação e consequências	6
Tabela 2 - Interações possíveis de ocorrer para radiação eletromagnética ionizante	7
Tabela 3 – Sistemas dosimétricos e exemplos de dosímetros utilizados	10
Tabela 4 – Formulação dosímetro FXG	13
Tabela 5 - Valores das absorvâncias médias das amostras do dosímetro FXG não irradiadas	22
Tabela 6 - média e desvio padrão das amostras após irradiação	23
Tabela 7 - concentração Fe(III) e absorvância	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSTR- Curso Superior de Tecnologia em Radiologia

DASS – Departamento Acadêmico Saúde e Serviços

FXG - Fricke xilenol gel

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

Gy – Gray

mM - Mili Molar

PMMA - Polimetilmetacrilato

TLD - Termoluminescente

UV - VIS– Ultravioleta - Visível

XO - Xilenol

MV – Megavolts

Mev - Mega elétron volts

2D - Bidimensional

3D - tridimensional

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

IX

ABSTRACT

XI

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA	1
1.2	JUSTIFICATIVA	2
1.3	OBJETIVO GERAL	3
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES	4
2.2	INTERAÇÕES DAS RADIAÇÕES COM A MATÉRIA	6
2.3	INTERAÇÕES DE RADIAÇÃO DE ELÉTRONS COM O MEIO	7
2.4	INTERAÇÕES DE RADIAÇÃO DE FÓTONS X COM O MEIO	8
2.5	MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DE DOSE PARA RADIAÇÃO IONIZANTE EM RADIOTERAPIA	9
2.6	TIPOS DE DOSÍMETROS E DOSÍMETRO FRICKE	10
2.7	TÉCNICAS DE ESPECTROFOTOMETRIA VISÍVEL PARA DOSIMETRIA FRICKE	11
3	METODOLOGIA	12
3.1	PRODUÇÃO DA SOLUÇÃO FXG	13
3.2	IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS	14
3.3	LEITURA ESPECTROFOTOMÉTRICA	17
3.4	CURVA DE CALIBRAÇÃO	18
3.5	DENSIDADE RELATIVA DA SOLUÇÃO FXG	18
3.6	CÁLCULO DO RENDIMENTO RADIOQUÍMICO DA SOLUÇÃO FXG	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1	VALORES DAS ABSORBÂNCIAS MÉDIAS DAS AMOSTRAS DO DOSÍMETRO FXG NÃO IRRADIADAS	22

4.2	VALORES DAS ABSORBÂNCIAS MÉDIAS DAS AMOSTRAS DO DOSÍMETRO FXG APÓS A IRRADIAÇÃO	23
4.3	CURVA DE CALIBRAÇÃO	24
4.4	VALORES ESTIMATIVA DO PERFIL DE CURVA DOS PONTOS EXPERIMENTAIS DA ABSORBÂNCIA VERSUS DOSE ABSORVIDA (até 30 Gy) PARA FÓTONS E ELÉTRONS (6,0 MV) NO DOSÍMETRO FXG	24
4.5	COMPARATIVO DO PERFIL DE DOSE ENTRE FÓTONS E ELÉTRONS	27
4.6	RESULTADOS DO CÁLCULO DO RENDIMENTO RADIOQUÍMICO	27
4.7	DENSIDADE DA SOLUÇÃO FXG.	29
5.	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta pelo professor universitário Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) em 1895, os Raios x têm sido amplamente utilizados como método de diagnóstico médico. No final de 1897, é destacado o pleno avanço da Física das Radiações pelo casal Marie e Pierre Curie, que ao invés do método qualitativo da impressão em chapa fotográfica, utilizado até então por Bequerel em 1896, eles passaram a quantificar a radiação pelo efeito de ionização que ela produzia no ar (CAPELETI, 2014).

A aplicação da radiação ionizante que é a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, ou seja é capaz de arrancar um elétron de um átomo ou molécula, está amplamente difundida na medicina, tanto para diagnóstico (radiodiagnóstico) quanto para tratamento (radioterapia). Dependendo do tipo e da energia, a radiação ionizante interage de uma maneira diferente com o meio que atravessa, sempre formando pares de íons e consequentemente transferindo energia para o meio (MANGUEIRA, 2009).

A dosimetria é uma técnica utilizada com a finalidade de determinar a dose empregada em um processamento com radiação, e a escolha do material que atuará como dosímetro como sólidos, líquidos ou gasosos dependerá de alguns fatores. Dentre esses, têm-se: resposta independente da energia da radiação incidente, características de absorção equivalente ao material que será irradiado, relação linear entre a dose e o efeito produzido no detector, resolução espacial e simplicidade de preparo e uso (SCHABERLE; SILVA, 2009).

Atualmente, novas técnicas têm sido desenvolvidas para a determinação da dose de radiação absorvida, a qual utiliza objetos simuladores que podem ser constituídos de materiais equivalentes ao tecido vivo e por materiais dosimétricos, como, por exemplo, o dosímetro Fricke-Xilenol-gel (FXG) O dosímetro FXG emprega a solução Fricke modificada pela adição de um agente gelificante.

A dosimetria gel ainda está em constante aprimoramento com vários estudos para introduzi-la definitivamente no uso clínico, ainda existem algumas dificuldades na preparação e utilização de alguns géis. De modo que cabe aos pesquisadores

que trabalham com dosímetros géis incentivar a utilização clínica mais generalizada desse vantajoso método dosimétrico, aproveitando todas as oportunidades para apresentar os bons resultados que vêm sendo obtidos (CAVINATO; CAMPOS, 2009). O dosímetro Fricke-Gel atende às exigências de aplicação em dosimetria tridimensional, muito útil em radioterapia e radiocirurgia. As características do dosímetro FXG devem ser muito bem avaliadas e todas as variáveis relacionadas ao seu desempenho devem ser determinadas, para a precisão e exatidão da sua resposta (CAVINATO; CAMPOS, 2009).

A presente pesquisa visa dar continuidade aos estudos envolvendo dosimetria Fricke realizada no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) usando a solução FXG para analisar e comparar a dose versus absorvência para radiações de fótons e elétrons. Devido a suas interações com a matéria, serem totalmente diferentes

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Sabe-se que as radiações diretamente ionizantes (**elétrons**) e indiretamente ionizantes (**fótons**) interagem de maneira totalmente diferente com a matéria (**tecido vivo**) sendo assim. Apresenta-se o seguinte questionamento: Qual é a relação entre absorvência e a dose administrada sobre o dosímetro FXG para fótons e elétrons?

1.2 JUSTIFICATIVA

Dosímetros convencionais, tais como câmaras de ionização, dosímetros termoluminescentes (TLDs), diodos e filmes radiocrômicos são os mais empregados, mas dificultam o uso na avaliação tridimensional da distribuição de dose, que é de extrema importância no planejamento dos tratamentos de doenças empregando radiações ionizantes, por serem limitados a medições em duas dimensões (2D). No entanto, se forem utilizados dosímetros químicos na forma de gel tipo o FXG, a informação de dose pode ser obtida em três dimensões (3D) com alta resolução espacial. Por isso, esses dosímetros tridimensionais são tão atrativos na área médica (SCHABERLE; SILVA, 2009). Esse estudo teve como intuito de contribuir com a melhoria de informações e estabelecer uma investigação entre o

comportamento quanto a resposta possível na relação entre dose-absorbância de fótons e elétrons.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é analisar o perfil de absorbância *versus* dose absorvida para fótons e elétrons em solução dosimétrica de FXG.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos do trabalho:

a) Preparar as soluções de FXG para a realização de irradiação por fótons e elétrons;

b) Esboçar gráfico de perfil de dose absorvida de fótons e elétrons em função da absorbância;

c) calcular a densidade da solução FXG

d) fazer a calibração da curva do Fe^{3+} para obtenção da concentração de íons férricos na amostra;

e) calcular o rendimento radioquímico das amostras de FXG irradiadas por fótons e elétrons.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho seguiu como princípio básico a revisão da literatura em que envolve estudos preliminares de outros autores e a preparação da solução FXG.

no laboratório de química do IFSC e a irradiação no Cepon com energias para fótons e elétrons e posteriormente, realizar leitura no espectrofotômetro para verificar a linearidade e absorbância das amostras expostas à radiação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Características básicas das radiações ionizantes

Radiação é energia que se propaga a partir de uma fonte emissora, através de qualquer meio, e se apresenta em forma de partículas atômicas ou subatômicas energéticas (partículas alfa, elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons). Ainda, a radiação pode se apresentar também em forma de onda eletromagnética, tais como as radiações ionizantes, descrito pelos fótons X e gama (OKUNO; 1998).

As radiações ionizantes se subdividem em ionizantes diretas e ionizantes indiretas. No processo de transferência de energia de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que têm carga, como elétrons, partículas alfa e fragmentos de fissão, atuam principalmente por meio de seu campo elétrico e transferem sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo, e são denominadas radiações diretamente ionizantes.

As radiações que não possuem carga como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons são chamados de radiações indiretamente ionizantes, pois interagem individualmente transferindo sua energia para elétrons, que irão provocar novas ionizações (TAUHATA, 2003; p.78).

2.2 Interações das radiações com a matéria.

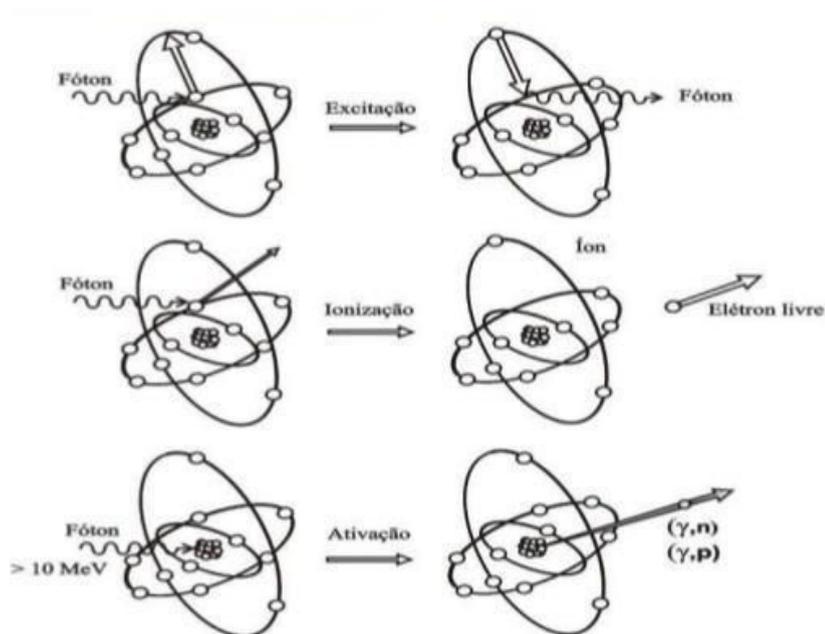
Segundo Yoshimura (2009), sob o ponto de vista físico, as radiações ao interagirem com um material, podem nele provocar excitação, ionização, ativação ou radiação de freamento (Figura 1),.

Excitação é a interação onde elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente sob a forma de luz ou raios X característicos.

Ionização é a interação onde elétrons são removidos dos orbitais pelas radiações, resultando elétrons livres de alta energia, íons positivos ou radicais livres quando ocorre quebra de ligações químicas.

Ativação do núcleo é a interação de radiações com energia superior à energia de ligação dos núcleos com um material, podendo provocar reações nucleares, resultando num núcleo residual e emissão de radiação. A absorção de nêutrons de baixa energia, denominados de nêutrons térmicos, pode ocorrer com certa frequência dependendo da natureza do material irradiado e da probabilidade de captura do nêutron pelo núcleo deixando-o também em um estado excitado.

Figura 1: modos de interação com matéria



Fonte: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073468.pdf

As radiações constituídas por partículas carregadas como alfa, beta e elétrons acelerados, ao interagir com a matéria, podem converter uma parte de sua energia de movimento, cerca de 5%, em radiação eletromagnética. Esta radiação, denominada de raios X de freamento, é o resultado da interação entre os campos elétricos da partícula incidente, do núcleo e dos elétrons atômicos. Ocorre com maior probabilidade na interação de elétrons com átomos de número atômico elevado. Devido ao mecanismo e ao ângulo aleatório de saída da partícula após a interação, a energia convertida em raios X é imprevisível, com valor variando de zero até um valor máximo, igual à energia cinética da partícula incidente.

2.3 Interações de elétrons com o meio

Elétrons perdem energia principalmente pelas ionizações que causam no meio material e, em segunda instância, pela produção de radiação de freamento (*bremstrahlung*). Como são relativamente leves, sua trajetória é irregular, podendo ser defletidos para a direção de origem.(TAHUATA, 2013; p.97).

Ao contrário da radiação eletromagnética, partículas carregadas como elétrons, pósitrons e íons pesados têm probabilidade 100% de interagir no meio material, pois há cargas distribuídas no meio e a força coulombiana é de longo alcance. O modelo mais frequentemente utilizado para descrever a passagem de uma partícula carregada pela matéria supõe que há uma sequência contínua de interações nas quais a partícula perde pequenas frações de sua energia, até ser completamente freada e não ser mais considerada uma radiação ionizante.(YOSHIMURA, 2009; p.60)

A seguir na tabela 1, todas as Interações possíveis de ocorrer para partículas carregadas rápidas e consequências das interações.

Tabela 1 – Partícula carregada interação e consequências

Partícula carregada	interações possíveis	o que provoca no meio onde interage	radiação ionizante produzida
Elétrons, pósitrons e íons pesados	Colisão inelástica com o átomo (colisão suave) Colisão com elétron fortemente ligado (colisão dura) Choque elástico com o núcleo	Excitação e eventual ionização de átomos em camada de valência Ionização (camada interna) e excitação do átomo Recuo do núcleo	Partícula primária com pequena mudança de direção, eventualmente um elétron rápido (secundário) Partícula primária, elétron rápido (secundário), raios X característicos, elétrons Auger Partícula primária com mesma energia e outra trajetória
Elétrons e pósitrons	Choque inelástico com o núcleo	Recuo do núcleo	Partícula primária e radiação de freamento (Bremsstrahlung)
Pósitrons	Aniquilação com um elétron do meio	Ionização e excitação do átomo	Dois fótons de aniquilação, cada um com $h\nu \geq 0,511 \text{ MeV}$

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

2.4 Interações de fótons com o meio.

As radiações eletromagnéticas ionizantes de interesse são as radiações X devido ao seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, essas radiações podem penetrar em um material, percorrendo grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação. Este poder de penetração depende da probabilidade ou secção de choque de interação para cada tipo de evento que pode absorver ou espalhar a radiação incidente. A penetrabilidade dos raios X e gama é muito maior que a das partículas carregadas, e a probabilidade de interação depende muito do valor de sua energia. (TAHUATA; 2013, p.79).

Na faixa de energias que inclui os raios X e gama, há várias interações possíveis com o átomo ou com elétrons atômicos ou ainda com o núcleo, mas há também a possibilidade de não-interação, ou seja, a interação da radiação eletromagnética, pode atravessar distâncias consideráveis em um meio material sem modificá-lo e sem se modificar.

As probabilidades de interação e de não-interação dependem de características do meio e da radiação. A interação da radiação eletromagnética ionizante é tratada, em boa parte dos casos, como um conjunto de partículas – os fótons. A cada energia de fóton ($h\nu$) corresponde um momento associado $h\nu/c$, e, dessa forma, podem ocorrer ‘colisões’ em que o fóton transfere energia e momento para outras partículas. As principais interações que ocorrem na matéria com fótons de energias na faixa de poucos keV até dezenas de MeV está na tabela 2 abaixo:

Tabela 2. Interações possíveis de ocorrer para radiação eletromagnética ionizante

Interação – símbolo da seção de choque	O que muda no meio	O que muda na radiação incidente	Radiação ionizante produzida
Espalhamento Coerente - σ_{coer} (espalhamento da radiação pelo átomo)		Direção de propagação, (mantém energia)	REM espalhada de mesma energia
Fotoelétrico - τ (ejeção de elétron ligado)	Ionização e excitação do átomo, recuo do núcleo	Fóton é absorvido	Elétron rápido, raios X característicos, elétrons Auger

Compton - sinc (espalhamento do fóton por um elétron)	Ionização do átomo	Fóton perde energia e muda de direção	Elétron rápido, fóton com menor energia, espalhado
Produção de Par - k (energia do fóton é consumida na criação do par (e- e+))	Reco do núcleo; aniquilação do pósitron	Fóton é absorvido	Elétron e pósitron rápidos, raios X de aniquilação

Fonte: Do autor, 2018

2.5 Métodos de mensuração da dose de radiação ionizante absorvida em radioterapia

Segundo Furnari (2009) o uso das radiações ionizantes com fins terapêuticos começou muito antes do que se imagina. Já antes de 1900, tinha-se percebido que a radiação destruía tecidos e que podia ser usada para tratamento de qualquer tipo de lesão, pelo menos era assim que se pensava na época. Isso quer dizer que mesmo conhecendo muito pouco sobre os efeitos da radiação, esta era empregada empiricamente de forma inconsequente. O mesmo autor destaca que na radioterapia tradicional, as primeiras formas de tratamento implicavam exclusivamente nos esforços associados à dose absorvida para cada tipo de tumor e o resultado experimental era obtido por meio de tentativa e erro. As mudanças introduzidas são progressivas, baseadas em resultados de pesquisas em radiobiologia, com a comparação dos resultados obtidos na utilização de diferentes protocolos de tratamento (FURNARI; 2009, p.77-90). ***A dosimetria é uma técnica utilizada com a finalidade de determinar a dose absorvida ou Kerma empregada em um processo com radiação, resultante da interação da radiação ionizante com a matéria.***

2.5.1 Tipos de dosímetro e dosímetro FXG

Um dosímetro é um dispositivo, instrumento ou sistema que mede ou avalia, direta ou indiretamente, as grandezas exposição, kerma, dose absorvida ou dose

equivalente, ou suas derivadas do tempo (taxas), e podem se encontrar no estado sólido, líquido ou gasoso (CAVINATO; CAMPOS, 2009).

Dosímetros convencionais, tais como câmaras de ionização, dosímetros termoluminescentes (TLDs), diodos e filmes radiocrômicos são os mais empregados, mas dificultam o uso na avaliação tridimensional da distribuição de dose, que é de extrema importância no planejamento dos tratamentos de doenças empregando radiações ionizantes, por serem limitados a medições em duas dimensões (2D). No entanto, se forem utilizados dosímetros na forma gel, a informação de dose pode ser obtida em três dimensões (3D) com alta resolução espacial, por isso esses dosímetros tridimensionais são tão atrativos na área médica (SCHABERLE; SILVA, 2009).

A dosimetria química é baseada no conhecimento da relação entre uma mudança química induzida pela radiação em sistemas próprios e a energia absorvida pelos sistemas. A princípio, qualquer mudança química induzida pela radiação pode ser usada para propósitos dosimétricos, contanto que a mudança seja reproduzível e suficientemente bem caracterizada. A dosimetria química é extremamente versátil com respeito a espaço e tempo: pode-se determinar a energia absorvida em um volume de qualquer tamanho e forma (YAMANAKA et al, 1994).

Desde sua primeira aplicação a dosimetria química com a solução de sulfato ferroso tem evoluído e no ano de 1984, com a modificação de uma solução de sulfato ferroso, surgiu o dosímetro Fricke modificado ou Fricke gel (CAPELETI; 2014, p.28).

O Fricke modificado é um tipo de dosímetro químico, o qual permite a determinação da dose absorvida a partir das medidas da variação das concentrações dos reagentes químicos na sua solução, induzida pela radiação ionizante. No caso do dosímetro Fricke modificado, a determinação da dose absorvida é baseada na oxidação do sulfato ferroso. Quando a solução é exposta à radiação, ocorre o processo de oxidação do Fe^{2+} , formando íons férricos Fe^{3+} , sendo que a variação da concentração deste íon na solução é proporcional à dose absorvida. Com esse dosímetro, é possível medir dose absorvida com acurácia de

1-2 %, com uma incerteza da mesma ordem na reprodutibilidade.(FELIPE; 2003, p.30).

Ainda segundo Felipe (2003, p.30) no ano de 2000, a solução de sulfato ferroso foi aprimorada, surgindo a solução Fricke Modificada (FM). Na solução original foram adicionados um corante (alaranjado de Xylenol) e uma gelatina de origem animal. Com essas modificações surgiu a solução FXG que acarretaram uma maior sensibilidade da solução.

Segundo Galante (2009, p57):

dosímetros químicos constituídos contendo uma solução FXG, apresentam resultados satisfatórios quanto à facilidade de manuseio, sensibilidade, reprodutibilidade da resposta e consistência. Os resultados obtidos confirmam sua aplicabilidade na dosimetria e também permitem informação da distribuição espacial da dose absorvida e a obtenção do perfil de dose em função da absorvância da radiação utilizando a técnica de leitura espectrofotométrica.

Na tabela 3 exemplos dos sistemas dosimétricos e dosímetros mais utilizados.

Tabela 3 – Sistemas dosimétricos e exemplos de dosímetros utilizados

Sistema	Dosímetros
Físicos	Calorímetros Câmaras de ionização Semicondutores
Químicos líquidos	Dosímetro de sulfato ferroso (dosímetro Fricke) Dosímetro de dicromato Soluções radiocrômicas coloridas
Sólidos	Aminoácidos. Ex.: alanina Vidros Plásticos. Ex.: PMMA*, CTA** e filmes radiocrômicos Dosímetros termoluminescentes (TLDs) Químico Gasosos - Óxido de nitrogênio (NO) Dióxido de carbono (CO ₂)

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

2.6 TÉCNICAS DE ESPECTROFOTOMETRIA VISÍVEL PARA DOSIMETRIA FRICKE

A espectrofotometria baseia-se no fato de um feixe de radiação monocromático com potência inicial P_0 atravessa uma amostra colocada no interior de uma cubeta de plástico ou quartzo em um espectrofotômetro, e parte desse feixe incidido sobre a amostra é atenuado pela mesma, denominada P . De modo que a relação entre P_0 e P corresponde ao valor de absorvância (A) do feixe de radiação, ou seja, quanto do feixe monocromático incidido sobre a amostra foi absorvido, e quanto foi capaz de atravessá-la, denominada de transmitância (T) (GOMES, 2008)

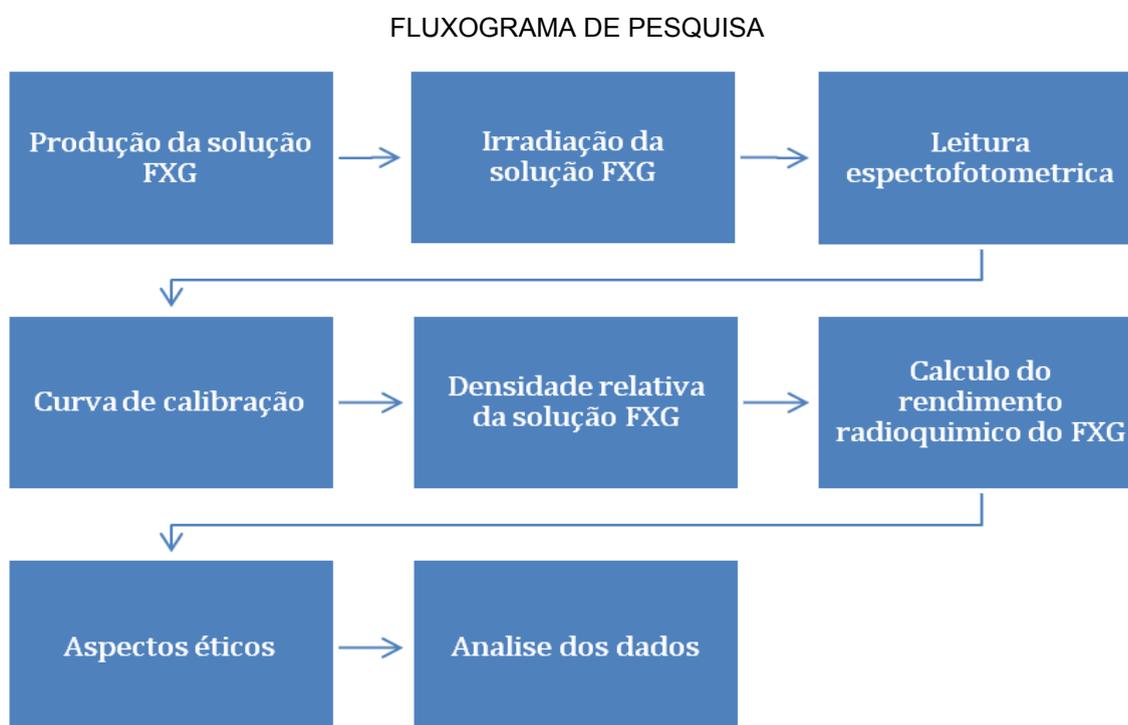
Para Pedrosa (2006), a espectrofotometria é a técnica utilizada para mensurar a quantidade de íons férricos (Fe^{3+}) da solução Fricke após o contato da solução com a radiação ionizante causando sua oxidação.

A variação no espectro eletromagnético visível varia de acordo com a quantidade de dose de radiação ionizante que incidiu sobre o dosímetro. O Xilenol tem como objetivo quantificar a oxidação de Fe^{2+} em Fe^{3+} , já o gel por possuir características químicas semelhantes ao tecido mole, possui um elevado valor de resolução espacial, permitindo medições simultâneas, sendo que suas leituras podem ser feitas através da espectrofotometria na região do visível (400 a 700nm), que possibilita assim a determinação da absorvância.

3 METODOLOGIA

Para GÜNTHER, Hartmut (2006) na pesquisa quantitativa tenta-se obter um controle máximo sobre o contexto, inclusive produzindo ambientes artificiais com o objetivo de reduzir ou eliminar variáveis interferentes e irrelevantes. Busca a

objetividade, considerando sempre que a veracidade a pesquisa se dá embasada na análise de dados brutos, recolhidos com o auxílio de instrumentos padronizados, recorrendo à utilização de uma linguagem matemática objetivando descrever relações de causa e efeito de um determinado fenômeno, abaixo temos o fluxograma de como se segue a sequência da pesquisa.



3.1 PRODUÇÃO DA SOLUÇÃO FXG

A primeira etapa da pesquisa foi o preparo do dosímetro químico FXG no laboratório de química do IFSC.

No preparo das soluções FXG foram usadas concentrações dos reagentes pré-estabelecidas por Bero (2000) mostradas na tabela 4.

Tabela 4 – Formulação dosímetro FXG.

Substância	massa molar (g/mol)	concentração mM
Gelatina 300 bloom Sigma	402,7	124,38
alaranjado de xilenol	760,6	0,10
sulfato ferroso	392,5	0,50
ácido sulfúrico	98,1	25

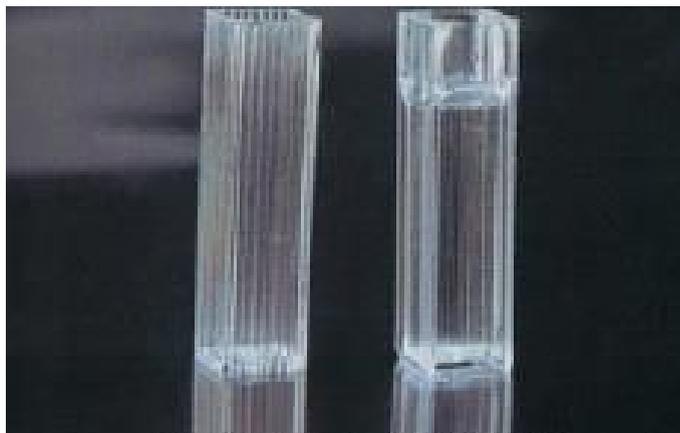
Fonte: Bero (2000).

Para o preparo da solução, hidratou-se a gelatina com 75 % da água ultra milliQ usada na solução, aquecendo a mistura em seguida até atingir 45°C. O alaranjado de Xilenol e o ácido sulfúrico foram misturados em um segundo becker, e o sulfato ferroso com os 15 % de água restantes em um terceiro becker.

Com o intuito de evitar a oxidação do sulfato ferroso, misturou-se o ácido sulfúrico ao xilenol, e em seguida à gelatina, juntamente com a solução de sulfato ferroso.

Como terceira etapa a solução foi colocada em cubetas de PMMA (figura 2) num total de 60 (sessenta) amostras, foi feita a leitura espectrofotométrica das amostras no comprimento de onda de 585 nM antes da irradiação, para determinar a oxidação natural do dosímetro no período.

Figura 2 - cubetas ópticas



Fonte: <http://www.ictsl.net/productos/plastico/cubetaparaespectrofotometriapsmmakartell.html>

Figura 3 - acondicionamento das amostras



Fonte: pesquisa 2018

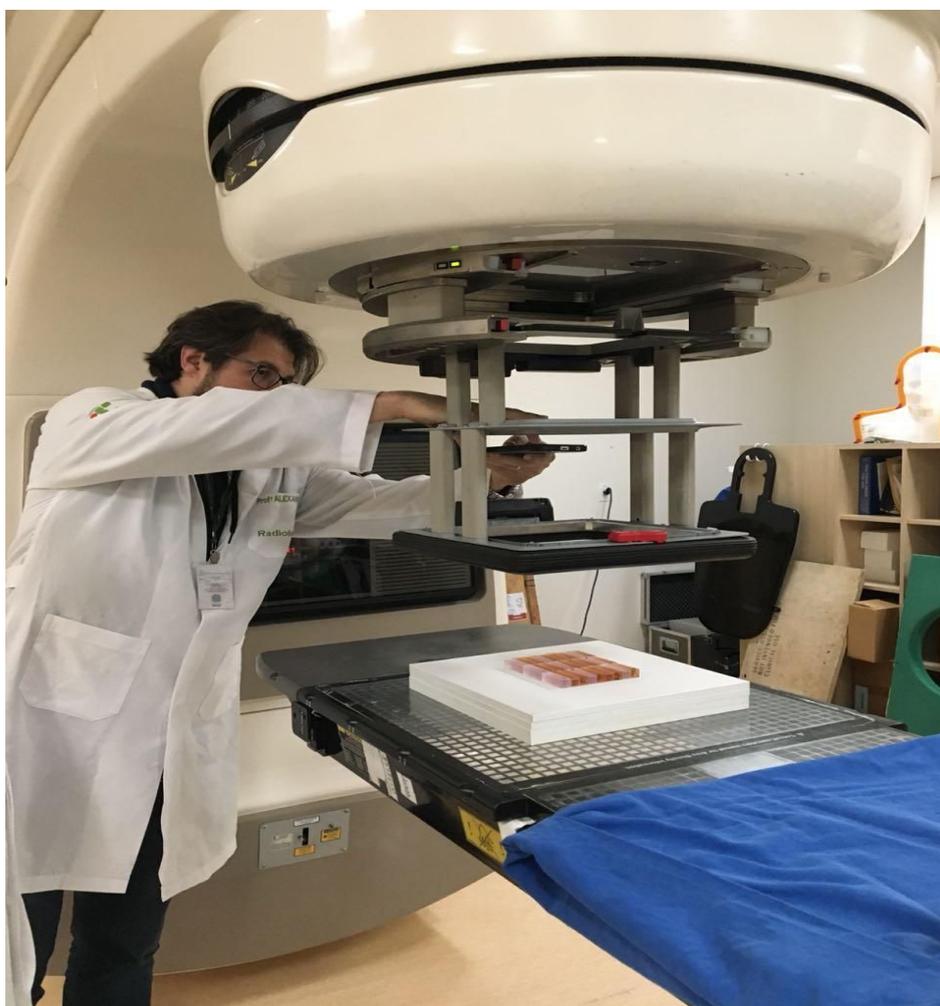
As amostras foram acondicionadas em refrigerador em 5 graus celsius por o período de 4 horas para diminuir sua oxidação natural e atingir seu estado em gel. Para o transporte até o local da irradiação foram acondicionadas em um recipiente de isopor acima (Fig.3).

3.2 IRRADIAÇÃO DA SOLUÇÃO FGX

As cubetas com solução FGX foram transportadas ao Cepon aproximadamente 6 horas após sua produção, em recipiente isolado de interferência externa, como temperatura e luminosidade.

E logo em seguida as amostras foram irradiadas no Cepon utilizando um acelerador linear 2100 SC, fabricante Varian Medical System capaz de produzir feixes de raios-x de 6 MV a 15 MV. (Figura 3). aproximadamente 6 horas após sua produção no laboratório de Química do IFSC, foi mantido uma variação de dose emitida nas triplicatas das amostras que seguiu a seguinte sequência (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 Gy) tanto para fóton quanto para elétrons.

Figura 4 - ajuste de posicionamento das amostras



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Também na figura 4 vemos o pré posicionamento das amostras antes de serem irradiadas, com o acompanhamento do professor e orientador Dr. Alexandre Dagostinni Zottis que após posicioná-las foi posto o bolus figura 5 que são materiais utilizados para aumentar a dose na superfície de entrada de um campo ou para compensar uma falta de tecido, esse tipo de material precisa possuir características próprias, tais como interagir com radiações ionizantes de forma similar aos tecidos e ser maleável a ponto de possibilitar sua moldagem ao contorno do paciente.

Figura 5 -Amostras prontas para serem irradiadas com o uso do bolus.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na figura 6 podemos observar as amostras já irradiadas, com as energias de 0 a 30 Gy aumentando a energia 5Gy de uma triplicata da solução para a outra podemos notar que a coloração do dosímetro, (oxidação) é proporcional a energia utilizada na irradiação, ou seja, quanto maior a energia mais o dosímetro oxida o Fe^{2+} em Fe^{3+} mudando assim sua coloração que pode variar de laranja (não irradiado) para uma cor violeta escuro (apos da irradiação).

Figura 6 - amostras do FXG após a irradiação



Fonte: O autor (2018).

3.3 LEITURA ESPECTROFOTOMÉTRICA

Logo após a irradiação das soluções de FXG foi feita a leitura espectrofotométrica para determinar a absorbância do dosímetro. O comprimento de onda selecionado foi 585 nm utilizando o espectrofotômetro marca Agilent Technologies, Cary 60 UV-VIS (figura 7).

Figura 7 - Espectrofotômetro Agilent Technologies, Cary 60 UV-VIS



Fonte: <http://www.medicaexpo.com/pt/prod/agilent-technologies/product-80230-540505>.

3.4 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Construiu-se uma curva de calibração com solução de cloreto férrico. Esta é uma substância que contém apenas o ferro-III (que é o ferro oxidado da solução FXG) e não contém o ferro-II. Para isso, pesou-se uma quantidade de cloreto férrico para fazer solução a 1 mM e, a partir desta, diluiu-se até obter soluções entre 0,1 e 0,8 mM figura 8.

figura 8: soluções de ferro 3



fonte: pesquisa 2018

A concentração do alaranjado de xilenol foi de 0,10 mM, como na solução FXG. Determinou-se a absorvância das diferentes concentrações a 585 nm de comprimento de onda, no mesmo aparelho de espectrofotômetro .

3.5 DENSIDADE RELATIVA DA SOLUÇÃO FXG

A densidade relativa da solução Fricke foi determinada em comparação à densidade da água deionizada, com o auxílio de um picnômetro. Esta vidraria consiste em um pequeno frasco de vidro com volume invariável em torno de 50 ml de capacidade (figura 9).

figura 9 : picnômetro 50 ml Diogolab



fonte: Pesquisa 2018

Pesou-se o picnômetro vazio, completo com água e depois com a solução FXG em balança de precisão e Determinou-se a massa dos líquidos por diferença de peso, e a densidade relativa é calculada pela razão entre a massa do FXG pela massa da água ultra pura e volume seguindo a equação (1) abaixo:

$$d = m/v \quad (1)$$

m^1 = massa do picnômetro vazio

m^{12} = massa do picnômetro mais a água ultrapura

m^{13} = massa do picnômetro mais da solução FXG

m^2 = massa da água ultra pura

$$m^2 = m^{12} - m^1 \quad (2)$$

m^3 = massa da solução FXG

$$m^3 = m^{13} - m^1 \quad (3)$$

$$d^2 = \text{densidade da água pura} = m^2 / V \quad (4)$$

V = volume da solução

$$d^3 = \text{densidade da solução FXG} = m^3 / V \quad (5)$$

Substituindo os dados da eq. (3) e com o resultado utilizamos a eq. (5) obtém-se a densidade da solução FXG conforme cálculo apresentado no capítulo 4 (seção 4.7)

3.6 CÁLCULO DO RENDIMENTO RADIOQUÍMICO DA SOLUÇÃO FXG

A partir da determinação do coeficiente de extinção molar ϵ (valor obtido da curva de calibração pela leitura espectrofotométrica de acordo com a seção 3.4) e a determinação da densidade da solução FXG utilizadas para este estudo (anteriormente descrita na seção 3.5).

Desse modo a produção de espécies iônicas da solução férrica (Fe^{3+}) após irradiadas, é dada pelo rendimento radioquímico $G(\text{Fe}^{3+})$ que é um dos parâmetros associados a quantidade de íons de Fe^{3+} formados por 100 eV de energia absorvida pelo sistema irradiado por raios X, radiação gama e feixes de elétrons rápidos (PEDROSA, 2005, OLIVEIRA, 2014). Sendo que para o dosímetro Fricke, vários autores apontam que seu valor teórico para fótons X se encontra na média de $16,11 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{J}^{-1}$ ou $9,7 \times 10^{17} \text{ íons} \cdot \text{J}^{-1}$ para cada 100 eV (PEDROSA, 2005, GUPTA & NARAYAN, 1985). Desse modo, de acordo com a metodologia, por meio da equação (4) e considerando a dose absorvida conhecida (D) e realizada sua leitura no espectrofotômetro do laboratório Química Analítica do IFSC, foi possível calcular analiticamente os valores do rendimento radioquímico, na solução de FXG, conforme a equação (2):

$$G\text{Fe}^{3+} (\text{mol} / \text{J}) = \Delta DO \times N_A / \epsilon \cdot D_c \cdot l \cdot \rho \quad (2)$$

Em que :

$$\epsilon = \text{coeficiente de extinção molar do } \text{Fe}^{3+} = 11,09 \text{ mol} \cdot \text{m}^2$$

l = caminho óptico dado pela largura da cubeta de plástico (1,0 cm ou 10^{-2} m)

ρ = densidade relativa da solução de FXG ($1,007 \times 10^3$ Kg / m³)

ΔDO = diferença da densidade óptica ou as absorvâncias lidas no espectro de 585 nm pela média das absorvância máximas lidas nas amostras irradiadas)

$Abs_{(585\text{ nm})}$ = absorvância correspondendo ao pico na cor alaranjado do xilenol

$Abs(FXG)$ = *valor médio das absorvâncias lidas no espectrofotômetro para 15Gy para fótons e para elétrons*

$$\Delta DO = A - A_0 \quad (2)$$

Substituindo os dados acima da eq. (06) e os parâmetros experimentais da equação (5), obtém se os valores de GFe^{+3} que estão no capítulo 4 (seção 4.6)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALORES DAS ABSORVÂNCIAS MÉDIAS DAS AMOSTRAS DO DOSÍMETRO FXG NÃO IRRADIADAS.

Os resultados que foram obtidos primeiramente de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3, envolveram as leituras espectrofotométricas na faixa do visível associado ao comprimento de onda de 585 nm correspondente à absorção de radiação luminosa no quelato de íons Fe^{3+} - xilenol. É vista na Tabela 5 a relação entre os valores médios (realizados em triplicata) da absorvância e o desvio padrão (DP) das amostras não irradiadas.

Tabela 5 - Valores das absorvâncias médias das amostras do dosímetro FXG não irradiadas.

Amostra	Abs \pm DP
1	0,21173 \pm 0,00439
2	0,2195 \pm

	0,00072
3	0,2187 ± 0,00056
4	0,22093 ± 0,00323
5	0,2217 ± 0,00185
6	0,22473 ± 0,00297
7	0,2219 ± ±0,00796
8	0,21897 ± 0,00197
9	0,22023 ± 0,00341
10	0,21543 ± 0,00211
Total	0,2194 ± 0,00292

Fonte: Dados da pesquisa (2018)

A tabela 5 aponta os valores médios (0,2194 ± 0,00292) das absorvâncias seguidos do desvio padrão correspondente do conjunto de dez dosímetros de FXG obtidos pela leitura espectrofotométrica no visível (585 nm) para as 60 amostras sem serem irradiadas.

4.2 VALORES DAS ABSORBÂNCIAS MÉDIAS DAS AMOSTRAS DO DOSÍMETRO FXG APÓS A IRRADIAÇÃO

A metodologia para as medidas realizadas em todas as amostras não irradiadas no acelerador linear constitui análise de 60 amostras do dosímetro de FXG divididas em 20 (vinte) triplicatas, sendo que a média dos resultados das triplicatas e o DP é mostrada na Tabela 6 abaixo, em busca de uma maior precisão nos resultados quanto aos estudos de estabilidade em função de fatores físicos (temperatura, luminosidade).

Tabela 6: média e desvio padrão das amostras após irradiação

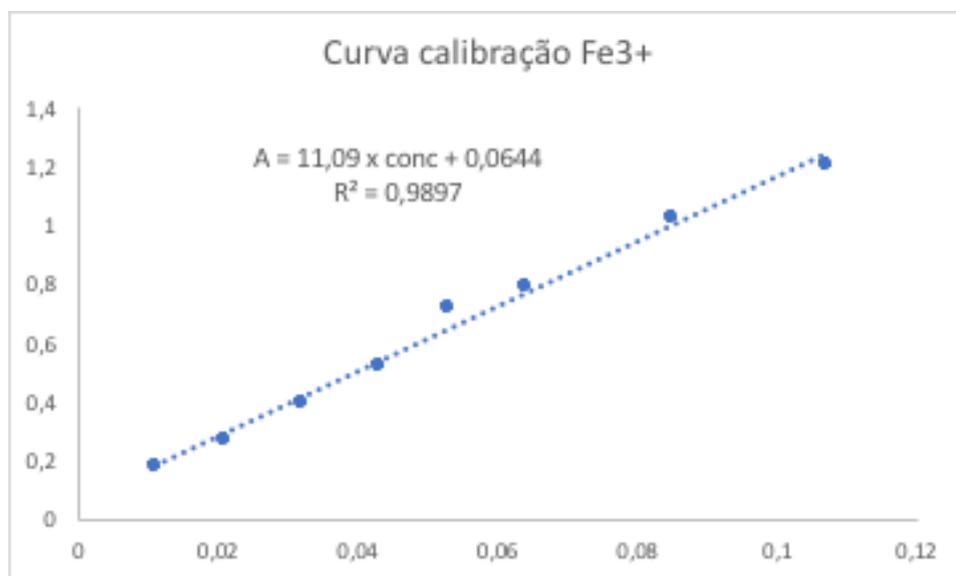
Dose (Gy)	Abs \pm DP elétrons	Abs \pm DP
0	0,2409 \pm 0,0014	0,2431 \pm 0,0113
5	0,6291 \pm 0,0291	0,5923 \pm 0,0040
10	0,9893 \pm 0,0085	1,0021 \pm 0,0056
15	1,2702 \pm 0,0044	1,3265 \pm 0,0074
20	1,3928 \pm 0,0117	1,4339 \pm 0,0094
25	1,4362 \pm 0,0014	1,4613 \pm 0,0068
30	1,4446 \pm 0,0127	1,4762 \pm 0,0023

Fonte: Pesquisa 2018

4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

O gráfico 1 ilustra a curva de calibração construída com soluções de diferentes concentrações de ferro-III que encontram se na tabela 7. Pode-se observar que a equação da reta foi linear .

O coeficiente de extinção molar ou absorvidade molar foi de 11,09 L mol⁻¹cm⁻¹ que foi um dos valores utilizado para calcular o rendimento radioquímico



FONTE: PESQUISA 2018

Tabela 7 :concentração ferro-III e absorbância

[Fe ³⁺]teór. (mol L ⁻¹)	[FeCl ₃]real (mol L ⁻¹)	Abs (585 nm)
0,001	0,107	1,1863
0,002	0,214	1,3933
0,003	0,32	1,447
0,004	0,427	1,4753
0,005	0,534	1,4928
0,006	0,641	1,4993
0,008	0,854	1,5239
0,01	1,068	1,555

Fonte : pesquisa 2018

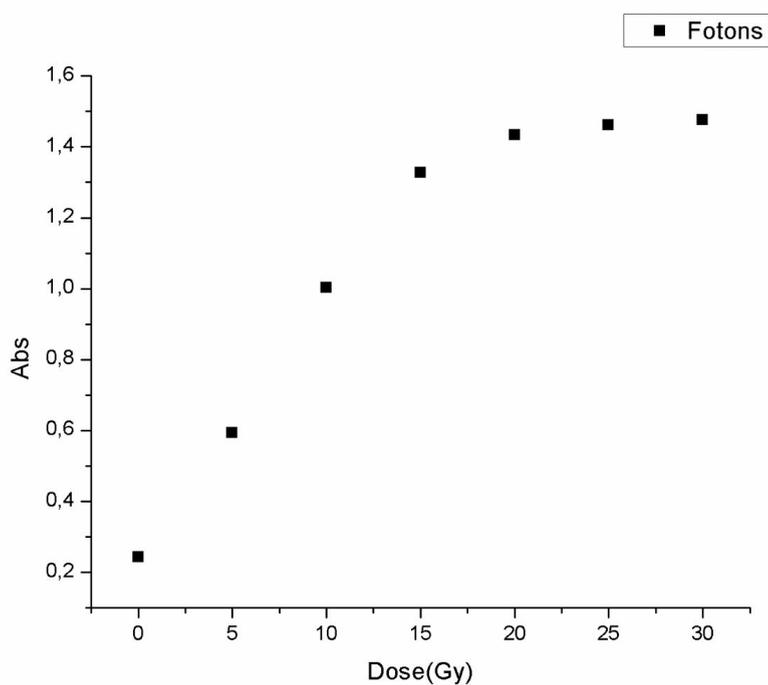
4.4 VALORES ESTIMATIVA DO PERFIL DE CURVA DOS PONTOS EXPERIMENTAIS DA ABSORBÂNCIA *VERSUS* DOSE ABSORVIDA (até 30 Gy) PARA FÓTONS E ELÉTRONS (6,0 MV) NO DOSÍMETRO FXG.

O que se observa nos gráficos, mostra que não houve alteração na estabilidade e linearidade do dosímetro FXG para as amostras irradiadas até 15 Gy, uma vez que os resultados obtidos nas leituras espectrofotométricas das absorvâncias foram proporcionais à dose absorvida.

De acordo com os resultados obtidos, as amostras irradiadas apresentaram saturação na cor representando um roxo intenso conforme ilustrado (Fig.7), uma vez que a mudança nos resultados da resposta-dose absorvida nos valores correspondendo a 20, 25 e 30 Gy não notou-se alteração significativa nos valores de absorvância (1,4339; 1,4614 e 1,4763) para fótons (1,3928;1,4362 e 1,4446) para elétrons. Desse modo, no gráfico 2 e 3, para os pontos experimentais, foi traçada

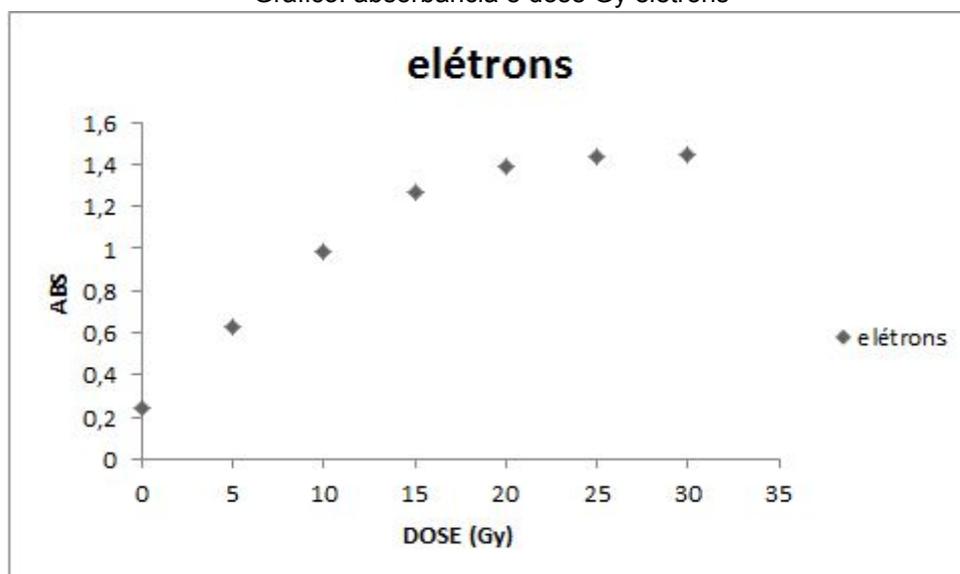
uma curva com estimativa de uma função resposta-dose absorvida com característica sigmoidal ($R^2 = 0,9897$) revelando um perfil de saturação da energia depositada no dosímetro FXG em função da taxa de dose utilizada nas medidas experimentais.

Gráfico: absorbância e dose Gy fótons



FONTE: PESQUISA 2018

Gráfico: absorbância e dose Gy elétrons

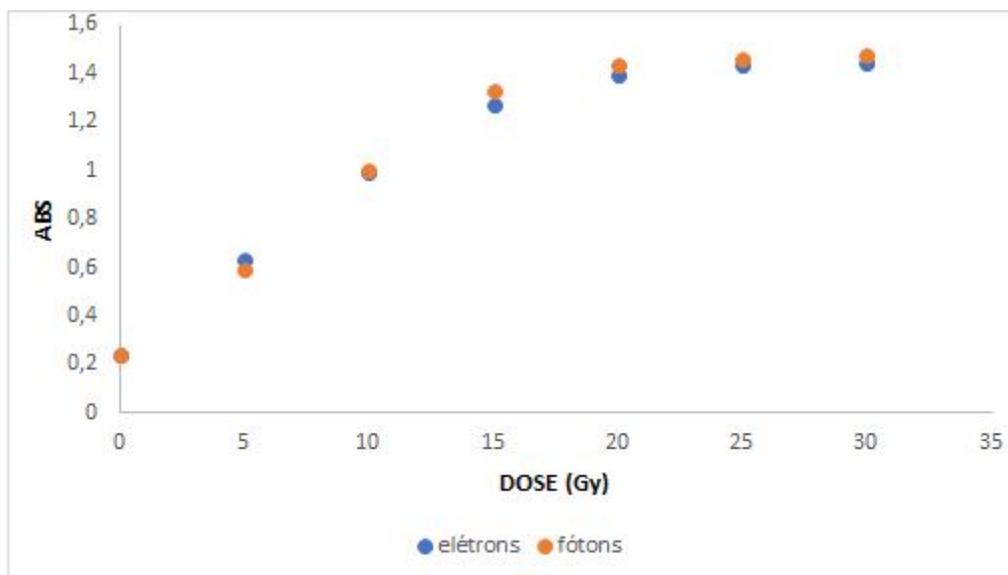


FONTE: PESQUISA 2018

4.5 COMPARATIVO DO PERFIL DE DOSE ENTRE FÓTONS E ELÉTRONS

No gráfico 4 observa se, que mesmo com radiações que interagem totalmente diferente com a matéria como fótons (indiretamente ionizante) e elétrons (diretamente ionizante) na comparação de resposta dose absorvida o dosímetro FXG teve comportamento quase idêntico se levar em consideração o DP pode se considerar igual, o que leva a entender que indiferente do tipo de radiação utilizada no dosímetro FXG o que vai alterar a leitura espectrofotométrica da absorbância é a energia utilizada na radiação.

GRÁFICO: 4 COMPARAÇÃO DE DOSE-RESPOSTA ENTRE FÓTONS E ELÉTRONS



FONTE: PESQUISA 2018

4,6 RENDIMENTO RADIOQUÍMICO

O valor do rendimento radioquímico para o dosímetro de FXG de nosso estudo apresentou resultados diferentes dos já calculados e anteriormente registrados na literatura. Destacam-se os estudos desenvolvidos por Klassen e colaboradores em que foi apresentado a comparação do valor do $G(\text{Fe}^{3+})$ entre raios γ de cobalto 60 com energia variada de acelerador linear de fótons X, correspondendo aos seguintes valores, respectivamente, $16,13 \times 10^{-7} \pm 0,05 \text{ mol.J}^{-1}$, $16,25 \times 10^{-7} \pm 0,06$ e $16,21 \pm 0,06 \text{ mol J}^{-1}$ para o $G(\text{Fe}^{3+})$ em ^{60}Co , 20 MV e 30 MV. alguns fatores podem influenciar nesse resultado como o temperatura, luminosidade ao qual o dosímetro foi exposto

FOTONS'

$$\Delta DO' = A - A_0 = 1,327 - 1,067, = 0,260 \text{ fótons}$$

$$G\text{Fe}^{3+}(\text{íons} / \text{J}) = (0,260 \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol} / 15,00 \text{ J.Kg}^{-1} \times 11,09 \text{ mol.m}^2 \times 10^{-2} \text{ m} \times 1,007 \times 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$G(\text{Fe}^{3+}) = 1,5652 \times 10^{23} \text{ mol} / 1,6751 \times 10^5 \text{ mol.J}^{-1}$$

Ou

$$G_{\text{Fe}^{3+}}(\text{íons / J}) = 9,3 \times 10^{17} \text{ íons / J (em cada 100 eV)}$$

Ou convertendo para moles, obtém-se :

$$G_{\text{Fe}^{3+}}(\text{mol / J}) = 1,54 \times 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}$$

ELETRONS²

$$\Delta DO^1 = A - A_0 = 1,270 - 1,067, = 0,203 \text{ elétrons}$$

$$G_{\text{Fe}^{3+}}(\text{íons / J}) = (0,203 \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol} / 15,00 \text{ J.Kg}^{-1} \times 11,09 \text{ mol.m}^2 \times 10^{-2} \text{ m} \times 1,007 \times 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$G(\text{Fe}^{3+}) = 1,2220 \times 10^{23} \text{ mol} / 1,6751 \times 10^5 \text{ mol.J}^{-1}$$

Ou

$$G_{\text{Fe}^{3+}}(\text{íons / J}) = 7,3 \times 10^{17} \text{ íons / J (em cada 100 eV)}$$

Ou convertendo para moles, obtém-se :

$$G_{\text{Fe}^{3+}}(\text{mol / J}) = 1,21 \times 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}$$

verificou se que a diferença percentual entre o rendimento radioquímico nas soluções do FXG para fótons e elétrons mostrou -se irrelevante, como vemos na equação abaixo o resultado.

$$DM\% = (1,54 \times 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1} - 1,21 \times 10^{-6} \text{ mol.J}^{-1}) * 100 = 0,000033 \%$$

4.7 DENSIDADE DA SOLUÇÃO FXG.

A densidade determina a quantidade de matéria que está presente em uma unidade de volume nos auxilia na caracterização de uma substância.

no caso do estudo de dosimetria de radiações quanto mais o dosímetro se assemelhar ao valor do tecido humano que tem o valor de densidade segundo GARIB (2007) de 1,008 g/cm³, mais ele é indicado para o uso em dosimetria.

$$V = 50,00 \text{ ml}$$

$$m^1 = 33,2888 \text{ g/cm}^3$$

$$m^{12} = 49,3476 \text{ g/cm}^3$$

$$m^{13} = 50,0334 \text{ g/cm}^3$$

$$m^2 = 49,3476 - 33,2888$$

$$m^2 = 16,0588$$

$$m^2 / V = 16,0588 / 50,00 = 0,98695 \text{ g/cm}^3$$

$$m^3 = 50,0334 - 33,2888$$

$$m^3 = 16,7446 / 50,00 = 1,007 \text{ g/cm}^3$$

$$d^2 = 0,98695 \text{ g/cm}^3 \quad (5)$$

$$d^3 = 1,007 \text{ g / cm}^3 \quad (6)$$

Com o resultado na equação acima que definiu a densidade da solução FXG em 1,007 g/cm³ reforça seu uso como método de estimativa de dose na pele pois se aproximou muito da densidade do tecido mole.

5. CONCLUSÕES

Nesse estudo foi observado que as amostras pós-irradiação demonstraram variação com relação à mudança de absorvância em função da dose absorvida para um certo limite o qual ficou em 15 Gy, tanto para fótons quanto para elétrons

demonstrando um comportamento abaixo do esperado na literatura, que apresenta um fator limite de resposta-dose de 30 Gy, outra observação foi que mesmo quando utilizadas radiações que com a matéria interagem totalmente de forma diferenciada, que é o caso de fótons e elétrons o dosímetro se comportou de maneira igual na absorvância demonstrando que indiferente do tipo de radiação, ele responde somente a energia que a mesma utiliza.

A densidade calculada da solução FXG teve resultado muito aproximado com os encontrados na literatura, e muito próximo dos valores do tecido mole praticamente iguais o que reforça o seu uso como método de estimativa de dose na pele.

As amostras não irradiadas lidas no espectrofotômetro corresponderam à baixa variação em relação às amostras pós-irradiadas com fótons e elétrons, sendo assim pode ser inferido que quaisquer fatores físicos envolvendo influência de temperatura ou tempo de leitura em relação às amostras não irradiadas, não alteraram resultados na análise espectrofotométrica.

A curva de calibração do Fe^{3+} mostrou-se linear até a concentração de 0,8 mM e depois desse valor tornou-se saturada essa concentração quando feita sua leitura no espectrofotômetro da absorvância de 1,5239, o que se formos comparar com a absorvância média para fótons de até 15 Gy que é de 1,3265 e para elétrons de até 15 Gy que é 1,2702 mostra-se que, apesar da não linearidade da curva de dose-resposta versus absorvância após os 15 Gy em teoria era para ela continuar sendo linear.

o cálculo do rendimento radioquímico também apresentou resultados diferentes dos encontrados na literatura tanto para fótons quanto para elétrons e os resultados se comparados entre eles tiveram uma diferença irrelevante de valores o que condiz que o rendimento radioquímico para fótons ou elétrons é praticamente igual.

REFERÊNCIAS

CAVINATO, Christianne Cobello; CAMPOS, L. L. **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, 2009.

CAVINATO, C. C. et al. **Resposta do dosímetro Fricke Gel desenvolvido no IPEN em função da qualidade do gel.** In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE FÍSICA MÉDICA. 2007.

CAPELETI, Felipe Favaro. **Dosimetria em tomografia computadorizada e avaliação do perfil de dose empregando dosímetro Fricke gel e a técnica de imageamento por ressonância magnética.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PODGORSAK, E.B. **Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students.** Vienna: **International Atomic Energy Agency**, 2005. cap. 1, basic radiation physics. p. 1-43

SANTOS, C.A. O Indiana Jones do núcleo atômico: colunista revê legado de Ernest Rutherford, que há cem anos recebeu o Nobel de Química. Ci. Hoje, São Paulo, jun. 2008. Seção Do Laboratório para a Fábrica. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/122576>>. Acesso em: 22 jun. 2009

SCHABERLE, F.A.; SILVA, N.C. **Introdução à física da radioterapia.** Santa Catarina: **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2000. Disponível em: <<http://www.fsc.ufsc.br/~canzian/introtrt/planejamento>>. Acesso em: 22 jun. 2009.

TAUHATA, Luiz et al. **Radioproteção e dosimetria.** CEP, v. 22783, p. 127, 2003.

YAMANAKA, LUCY KIYOKO et al. **Aplicação de métodos químicos modificados em dosimetria das radiações.** 1994. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SAO PAULO.

YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. **Física das Radiações: interação da radiação com a matéria.** Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, n. 1, p. 57-67, 2009.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos-9^a revisão** novembro/2013-Rio de Janeiro-IRD. **CNEN. 345p.**

FURNARI, Laura. **Controle de qualidade em radioterapia.** Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, n. 1, p. 77-90, 2009.

OKUNO, Emico. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios.** 1988.

SALVAJOLI, João Victor; SALVAJOLI, Bernardo Peres. **O papel da radioterapia no tratamento do câncer: avanços e desafios.** Rev Onco [Internet], v. 13, p. 32-6, 2012.

MANGUEIRA, Thyago Fressatti. **Avaliação dosimétrica da solução fricke gel usando a técnica de espectrofotometria para aplicação na dosimetria de elétrons e nêutrons.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FELIPE, Daniel Souza. **Desenvolvimento, teste e aplicação de protótipo para dosimetria da solução Fricke modificada.** 2003. Tese de Doutorado.

GARIB, DANIELA GAMBA ET AL. **TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE FEIXE CÔNICO (CONE BEAM): ENTENDENDO ESTE NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO POR IMAGEM COM PROMISSORA APLICABILIDADE NA ORTODONTIA.** REV DENTAL PRESS ORTOD ORTOP FACIAL, v. 12, n. 2, p. 139-56, 2007.

GOMES, Marcos S. et al. Uso de scanner em espectrofotometria de absorção molecular: **aplicação em experimento didático enfocando a determinação de ácido ascórbico.** Química Nova, v. 31, n. 6, p. 1577-1581, 2008.

BERO, M. A. Dosimetric properties of a radiochromic gel detector for diagnostic X-rays. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 580, n. 1, p. 186-189, 2007.

