



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA VOLUNTÁRIA – PICVOL

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS
DE $\text{CaSO}_4:\text{Mn,Ag}$ PARA DOSIMETRIA**

Desenvolvimento de novos materiais e dispositivos para
uso em radioterapia.

Relatório Final
Período da bolsa: de Maio 2022 a Agosto de 2022

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica
PICVOL

Orientador: Divanizia do Nascimento Souza
Autor: Beatriz Diniz de Oliveira Guedes

Sumário

1. INTRODUÇÃO	3
2. OBJETIVOS	3
2.2. Objetivos Específicos	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1. Luminescência.....	4
3.1.1. Termoluminescência	4
3.1.2. Luminescência opticamente estimulada	5
3.1.3. Sulfato de Cálcio.....	6
3.1.4. Propriedades Dosimétricas	6
3.1.4.1. Curva de Emissão	6
3.1.4.2. Curva Dose-Resposta.....	7
3.1.4.3. Dependência energética.....	7
3.1.4.4. Fading.....	7
3.1.4.5. Tratamento Térmico.....	8
3.1.4.6. Reprodutibilidade.....	8
3.1.4.7. Dose Mínima Detectável.....	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
4.1. Síntese do $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$	9
4.2. Caracterização $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$	10
4.2.1. Difração de raios X (DRX).....	10
4.2.2. Análise do Sinal Luminescente.....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
5.1. Difração de raios X (DRX).....	10
5.2. Termoluminescência.....	11
5.2.1. Curva de emissão TL	11
5.2.2. Resposta TL em função da dose	12
5.2.3. Reprodutibilidade	12
5.3. Curva de decaimento LOE	14
5.4. LID	14
6. CONCLUSÕES	15
7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	15
8. REFERÊNCIAS.....	15
9. OUTRAS ATIVIDADES	16

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço do uso da radiação não ionizante na medicina, aumentou-se a exposição à radiação nos seres humanos. Concomitantemente, os estudos da radioproteção se intensificaram, em busca de materiais que protejam e quantifiquem a dose absorvida pelos indivíduos envolvidos, diminuindo assim, os riscos associados.

Um dosímetro emprega princípios físicos e químicos para medir a dose recebida por um indivíduo exposto, podendo esse ser termoluminescente (TL) ou luminescência opticamente estimulada (LOE), por exemplo. As duas formas utilizam a luminescência emitida por um material previamente irradiado, estimulado por luz ou calor, a fim de encontrar a dose absorvida. Os materiais escolhidos para compor um dosímetro precisam combinar algumas características específicas, como boa resposta luminescente à dose, reprodutibilidade do sinal luminescente ao mesmo estímulo e baixo decaimento desse sinal em função do tempo de armazenamento. Essas características favorecem a utilização e comercialização do dosímetro. Os dosímetros termoluminescentes mais utilizados são os de fluoreto de lítio (LiF) e sulfato de cálcio (CaSO_4). Nos últimos anos, o sulfato de cálcio vem sendo bastante trabalhado dopado com uma variedade de íons terra raras, como disprósio (Dy), túlio (Tm) e manganês (Mn), tornando-se um material atrativo pelas suas propriedades dosimétricas (YAMASHITA et al., 1971; ZAHEDIFAR et al., 2011; JUNOT, 2013; SILVA, 2019).

Na literatura, há registros de que o $\text{CaSO}_4\text{:Mn}$ tem alta sensibilidade termoluminescente; mas em contrapartida, com um grande desvanecimento de seu sinal (*fading*), o que o torna desvantajoso para uso dosimétrico rotineiro. Uma alternativa encontrada foi o uso de nanofolhas sintetizadas, em que o sulfato de cálcio dopado com manganês apresentou alta sensibilidade e baixo desvanecimento (ZAHEDIFAR et al., 2011).

Para contornar o problema supracitado, neste projeto o material está sendo produzido pela rota de evaporação lenta, a fim de testar a viabilidade da rota como uma alternativa para diminuir o *fading*, mantendo sua sensibilidade TL. Estava previsto também o uso de prata como co-dopante, mas isso foi descartado porque os primeiros testes não demonstraram resultados satisfatórios o suficiente para a continuidade ao trabalho.

Os resultados descritos neste projeto fazem parte de um projeto mais amplo, que está sendo desenvolvido por um estudante de doutorado, Anderson Manoel Bezerra da Silva.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

- Produzir e caracterizar pastilhas de $\text{CaSO}_4\text{:Mn}$ por meio da rota de

evaporação lenta para fins dosimétricos.

2.2. Objetivos Específicos

- Apontar as propriedades dosimétricas do $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ produzidos pela rota de evaporação lenta;
- Diminuir o *fading* do sinal termoluminescente do $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Luminescência

A luminescência é um fenômeno que alguns materiais apresentam liberando energia em forma de luz após passar por um processo de excitação de elétrons de sua estrutura. Existem tipos diferentes de luminescência, os quais diferem da maneira da excitação ou tempo entre excitação e emissão de luz. Em relação a isso, existe a fotoluminescência (excitação por feixe de fótons), eletroluminescência (excitação causada por corrente elétrica), termoluminescência (excitação causada pelo calor) e luminescência opticamente estimulada (excitação causada pela luz).

Em relação ao tempo entre a excitação e a emissão de luz, existem duas classificações: fluorescência ou fosforescência. A primeira, o material só é capaz de emitir luz enquanto está sendo excitado, isto é, recebendo energia. Na fosforescência o material é capaz de manter a emissão mesmo depois de um certo tempo de a excitação cessar.

3.1.1. Termoluminescência

A termoluminescência (TL), ocorre a partir de um material previamente irradiado, quando este é termicamente estimulado, seguido da emissão de luz. Esse processo pode ser explicado pela teoria de bandas para os níveis de energia dos elétrons.

Os níveis de energia de uma rede cristalina consistem em bandas de valência e condução, os quais são separados por um gap de energia, chamado banda proibida (YUKIHARA; MCKEEVER, 2011). Existem essas três bandas energéticas: a banda proibida, correspondendo a uma larga faixa de estados energéticos, na qual não há probabilidade de encontrar elétrons; a banda de valência, que é repleta de elétrons em seu estado fundamental; e a banda de condução, que se encontra vazia. A Figura 1 ilustra esse modelo:

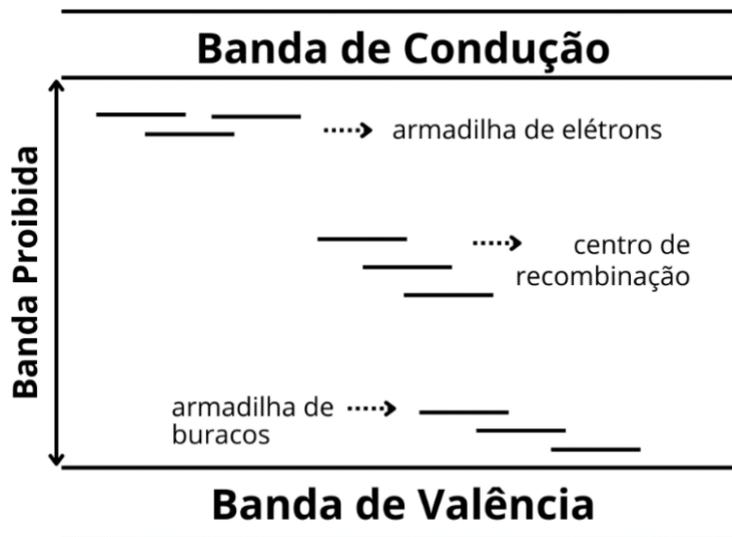


Figura 1- Esquema das bandas energéticas dos cristais (Adaptada de Yukihiro e McKeever, 2011).

Em um material cristalino ionizado, os elétrons podem passar da banda de valência para a banda de condução, deixando buracos (ou vacância) na camada de valência, isto é, defeitos na rede cristalina do material. Esses elétrons na banda de condução e os buracos na camada de valência podem se recombinar, movendo-se na rede cristalina, ou podem ser capturados por outros níveis de energia, como a banda proibida. Por exemplo, quando o material é aquecido, os portadores de carga (elétrons ou buracos) absorvem essa energia térmica e são capazes de sair das armadilhas, movendo-se na rede cristalina e recombinando-se, assim, emitindo luz.

Os materiais termoluminescentes costumam ser policristais que possuem defeitos em sua rede cristalina, que podem ser armadilhas, para elétrons ou buracos, ou centros de recombinação. Quando podem capturar cargas, são chamados de armadilhas, mas quando podem capturar buracos da banda de valência para, em seguida, capturar um elétron da banda de condução, são denominados centros de recombinação.

3.1.2. Luminescência opticamente estimulada

A luminescência opticamente estimulada (LOE, ou em inglês OSL), ocorre a partir de um material, previamente irradiado, sendo esse isolante ou semiconductor, durante exposição à luz (GUIDELLI, 2015). Devido à ionização, os elétrons livres ficam aprisionados na rede cristalina defeituosa. Desse modo, quando o material é exposto à luz, os elétrons presos absorvem os fótons, isto é, são excitados para em seguida voltarem à banda de valência, processo que é acompanhado pela emissão de luz.

Os defeitos da rede cristalina de um material, são ocasionados pois a radiação ionizante é capaz de deixar buracos na camada de valência ao levar elétrons da banda de valência até a banda de condução. Portanto, quanto maior a dose de radiação absorvida, maior será a ionização e, por conseguinte, o número de cargas armadilhadas (GUIDELLI, 2015). Quando ocorre o estímulo óptico, as cargas armadilhadas podem ser liberadas para a banda de condução e recombinar os pares elétron-buraco, processo que é seguido pela emissão de luz opticamente estimulada.

3.1.3. Sulfato de Cálcio

O sulfato de cálcio (CaSO_4) é muito utilizado na pintura, na construção, em fertilizantes e como material na dosimetria das radiações. Consiste em uma ligação dupla formada por um cátion de cálcio ligado a um ânion de sulfato. O composto existe em três formas principais, diferindo o grau de hidratação: gipsita (diidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), bassanita (hemihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (anidro, CaSO_4). A depender da temperatura de calcinação, são produzidos três tipos de anidritas: anidrita I, anidrita II e anidrita III. A temperatura de calcinação é de 1180°C , acima de 300°C e entre 110 e 220°C respectivamente (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Segundo PIETRO-TABOADA et al. (2015), as anidritas possuem características distintas quanto à estrutura e solubilidade. A anidrita I é considerada insolúvel com estrutura cúbica. Já a anidrita II, é dita com estrutura cristalina ortorrômbica e não é considerada completamente insolúvel. Por fim, a anidrita III apresenta estrutura hexagonal e é totalmente solúvel.

Enquanto ao estudo do sulfato de cálcio dopado com manganês ($\text{CaSO}_4:\text{Mn}$), na literatura este é descrito como um material luminescente altamente sensível, mas também com um considerável *fading*.

3.1.4. Propriedades Dosimétricas

3.1.4.1. Curva de Emissão

A curva de emissão luminescente é representada graficamente, em relação a intensidade TL em função da temperatura a qual o material foi submetido. Embora seja preferível que o material possua uma curva de emissão simples, observa-se a formação de vários picos, os quais estão associados a uma determinada profundidade de armadilhas, sendo a temperatura onde ocorre a emissão máxima. O pico de emissão termoluminescente é relacionado à probabilidade de escape do elétron da armadilha. Quanto mais é aquecido o material, a probabilidade de escape aumenta, o que aumenta a emissão, sendo máxima na temperatura do pico. Porém, com a redução dos portadores de carga armadilhados, a intensidade TL volta a decrescer. (JUNOT, 2013).

A curva de decaimento LOE é a intensidade da luz emitida em função do tempo de estimulação. Esta curva está associada à liberação dos portadores de carga do centro de captura, por isso possui um comportamento de decaimento exponencial à medida que o material é irradiado (BOTTER-JENSEN et al., 2003).

3.1.4.2. Curva Dose-Resposta

É preferível que a relação entre a intensidade da resposta TL ou LOE e a dose absorvida seja linear para um grande intervalo de dose. Contudo, na prática, alguns materiais não apresentam uma curva linear. Quando isso ocorre, utiliza-se uma faixa de dose na qual a resposta é supralinear, aplicando-se fatores de correção, como mostrado na Figura 2:

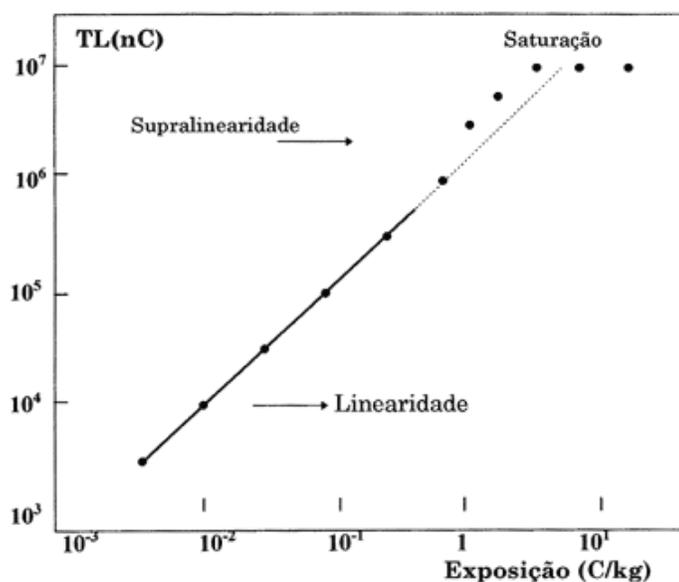


Figura 2 - Curva típica de resposta TL de um material em função da exposição à radiação (CAMPOS, 1998).

3.1.4.3. Dependência energética

A emissão de sinais de dosímetros luminescentes depende da energia da radiação incidente, podendo variar de acordo com o coeficiente de absorção do material. No entanto, é preferível que um dosímetro apresente uma resposta constante para uma faixa de energia conhecida, ou seja, para a mesma dose apresente o mesmo resultado independentemente da energia, por isso é importante conhecer a dependência de resposta de um dosímetro para utilizá-lo corretamente (CALDAS, 1980).

3.1.4.4. Fading

O fading é o processo em que há a liberação espontânea dos elétrons do centro de captura, com isso, ocorre a perda da intensidade do sinal luminescente. Os fatores que influenciam tal fenômeno vão desde a variação de temperatura ambiente à luz e à umidade. Para que um dosímetro seja ideal, ele não deve apresentar decaimento do sinal luminescente durante o tempo de uso ou armazenamento.

3.1.4.5. Tratamento Térmico

Um material para dosimetria TL ou LOE pode ser reutilizado incontáveis vezes, para isso, deve passar por um tratamento térmico específico, ou serem submetidos a certas condições ópticas sem perder suas propriedades dosimétricas. Tais tratamentos eliminam os sinais residuais e restauram as propriedades originais do dosímetro. Existem diversos tipos de tratamento: tratamento pré-irradiação, com ou sem resfriamento rápido, tratamento pós-irradiação, com ou sem resfriamento rápido; ou ainda a combinação de diferentes tratamentos térmicos ou ópticos.

3.1.4.6. Reprodutibilidade

A reprodutibilidade é a consistência das medidas feitas em um dosímetro pelo mesmo indivíduo e instrumento, ou seja, o quanto tais medidas variam sob a mesma condição. Para um dosímetro luminescente, é prescindível que apresente a mesma intensidade de sinal, mesmo depois de inúmeros ciclos de tratamento, irradiação e medição do sinal, para as mesmas condições de dose e energia.

Essa medida é representada pelo coeficiente de variação percentual das leituras dos dosímetros ($CV\%$) como está mostrado na equação (1):

$$CV\% = \left(\frac{s}{M}\right) \times 100 \quad (1)$$

na qual s é o desvio padrão das leituras individuais das pastilhas TL e M é a média das leituras supracitadas.

Segundo a ISO 12794:2000 (ISO, 2000), devem ser aceitos apenas dosímetros que indicam resposta luminescente com $CV\%$ menores ou iguais a 10% para a reprodutibilidade (SILVA, 2019).

3.1.4.7. Dose Mínima Detectável

A dose mínima detectável, também chamada de limite inferior de detecção (LID), consiste na menor dose mensurável pelo dosímetro. Para um dosímetro ser utilizável, é preciso conhecer sua dose mínima detectável, principalmente para uso em situações nas quais as doses costumam ser baixas, como na dosimetria pessoal e ambiental.

O LID pode ser definido como a soma da média das leituras de dosímetros não irradiados e do valor de 3 desvios padrões, multiplicado pelo fator de calibração (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979). Isto é:

$$LID = (\underline{B} + 3\sigma_{\underline{B}})f_c \quad (3)$$

em que \underline{B} é a média das leituras dos dosímetros não irradiados; $\sigma_{\underline{B}}$ o desvio padrão das leituras dos dosímetros não irradiados e f_c o fator de calibração.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Síntese do CaSO₄:Mn

Para a síntese do CaSO₄:Mn foi adotado a rota de evaporação lenta, que consiste em um sistema de produção a vácuo, desenvolvido primeiramente por Yamashita e seus colaboradores, de forma a manter a sensibilidade do sulfato de cálcio e diminuir seu decaimento térmico exorbitante. E ainda, seu sistema selado permite a reciclagem do ácido sulfúrico, minimizando os efeitos ambientais. Inicialmente, em um balão volumétrico, uma solução composta por carbonato de cálcio, ácido sulfúrico e nitrato de manganês foi aquecida em uma chapa até 375 °C, a fim de que todo ácido da solução evaporasse. Desse modo, ocorre a neutralização do ácido, uma vez que estes interagem com solução básica de hidróxido de sódio que se encontram nos francos lavadores.

Depois da evaporação completa, o sulfato de cálcio dopado com manganês se encontra pronto, mas ainda necessita de alguns manuseios laboratoriais. Então, é transferido para um béquer, e iniciado o processo de lavagem do material com água destilada. Nesse procedimento foram utilizadas águas em temperaturas quentes (375 °C) e frias (25 °C), sendo aplicadas sucessivamente, uma após a outra, até que o pH do material atingisse o mais próximo de 6. Logo após a lavagem, o material foi levado a uma estufa por 12 horas a uma temperatura de 70 °C a fim de que a água existente evaporasse.

Uma vez seco, o material que saiu da estufa foi macerado em um almofariz separado por granulometria em uma peneira de 75-150 µm para a homogeneização dos tamanhos dos cristais. Os grãos selecionados foram calcinados em um forno tipo mufla, sendo o material aquecido a uma taxa de 10 °C/min até alcançar o patamar de 600 °C, ficando por 1 hora.

Neste trabalho foi adotado o formato de pastilha das amostras para realizar a caracterização do CaSO₄:Mn. No entanto, foi necessário adicionar, com proporção estequiométrica 1:1, politetrafluoretileno (Teflon) para que a pastilha pudesse ter estrutura mecânica. Após a adição e homogeneização do material, utilizou-se uma prensa hidráulica para a formação física da pastilha, aplicando uma pressão de 0,5 toneladas em quantidades de pó previamente medidas em uma balança de precisão. Uma vez prensado, o material foi sinterizado a 400 °C por 1 hora, obtendo pastilhas com 6 mm de diâmetro, 1 mm de espessura e 40 mg de massa.

4.2. Caracterização CaSO₄:Mn

4.2.1. Difração de raios X (DRX)

O difratômetro utilizado na análise estrutural da amostra foi um da marca Rigaku (RINT 2000/PC) que pertence ao Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física da USP.

As análises foram realizadas com grãos de CaSO₄:Mn com até 0,75 µm de diâmetro, utilizando radiação Cu-K α com tubos de raios X operando a 40 kV e 30 mA no modo de varredura contínua de 20° a 80° com passos de 0,05 °/min.

Os dados obtidos experimentalmente foram comparados, por meio do software Match, com os dados pertencentes ao banco de dados cristalográficos PDF2 (Power Diffraction File), com o objetivo de identificar as fases cristalinas da amostra.

4.2.2. Análise do Sinal Luminescente

Foram obtidas curvas de emissão TL e LOE do sulfato de cálcio dopado com manganês, tal resultado veio de uma irradiação do material com a fonte de ⁹⁰Sr+⁹⁰Y (radiação beta) do sistema Risø pertencente ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Nas análises TL, empregou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C/s. Foram obtidas curvas de decaimento LOE das amostras no modo contínuo pelo tempo de 40s.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X foi utilizada para determinar a estrutura cristalina do CaSO₄ produzido em forma de pó, após a calcinação. A Figura 3 mostra os resultados da caracterização por DRX, em comparação com o padrão cristalográfico juntamente com o padrão de Bragg. Verificou-se, portanto, que há a formação de uma única fase com simetria ortorrômbica de grupo espacial Amma.

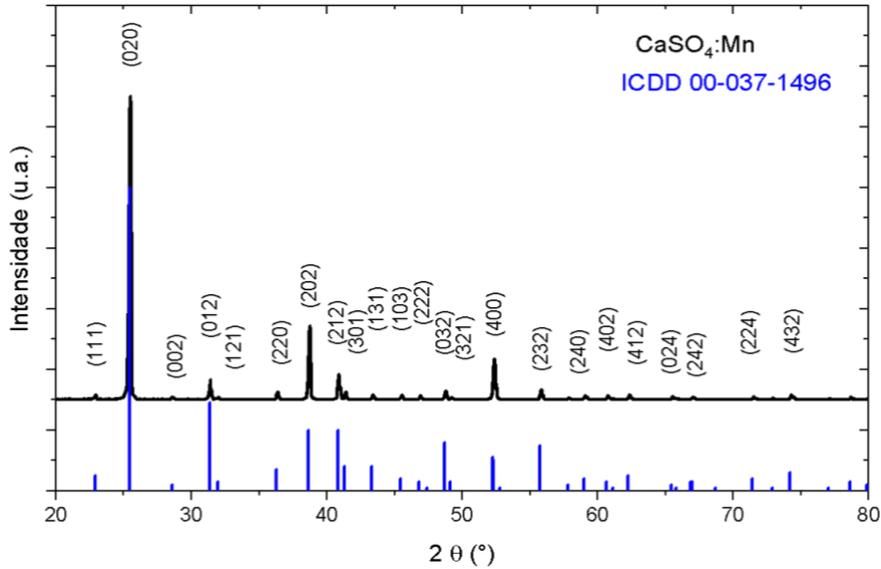


Figura 3 - Difratoograma de raios X de $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ (pó), seu respectivo padrão cristalográfico e reflexões padrão de Bragg.

5.2. Termoluminescência

5.2.1. Curva de emissão TL

A Figura 4 mostra a curva de emissão no intervalo de 100°C a 400°C , na qual o pico dosimétrico principal apresenta-se em aproximadamente 175°C e um pico de baixa intensidade em torno de 300°C .

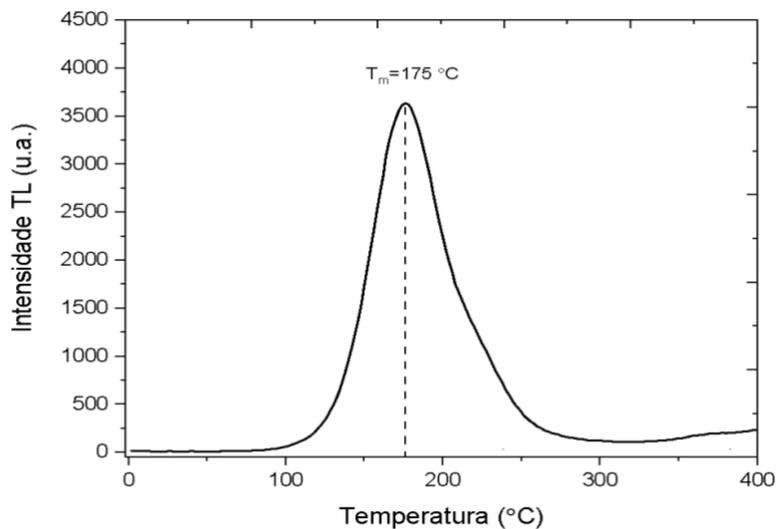


Figura 4 - Curva de emissão TL típica de amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ irradiadas com 1 Gy de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (radiação beta).

5.2.2. Resposta TL em função da dose

Foram obtidas curvas de emissão TL através da irradiação do material pela fonte de radiação beta $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ do sistema Risø, com doses absorvidas variando de 0,169 Gy a 9,971 Gy, a fim de avaliar a dependência energética do material, como mostra a Figura 6a.

Observa-se a formação de uma curva de emissão típica do material e, ao integrar as curvas da Figura 5a, tem-se os dados expostos na Figura 5b, a qual representa uma curva dose-resposta TL do material. Nesta, verifica-se um comportamento de linearidade no intervalo da dose analisada, comprovando assim, que o dosímetro TL não tem dependência energética.

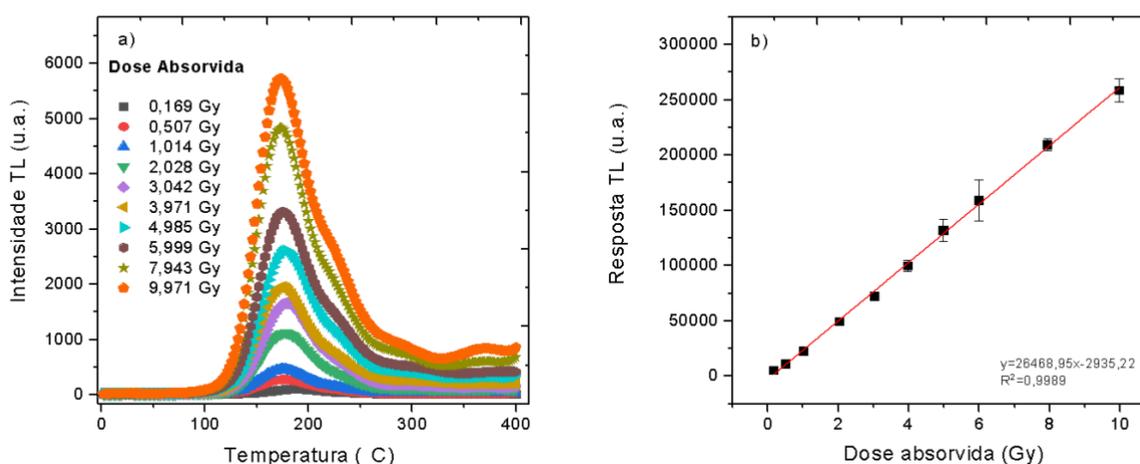


Figura 5 - (a) Resposta TL das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ e (b) em função da dose absorvida de radiação beta ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$).

5.2.3. Reprodutibilidade

Na avaliação da reprodutibilidade da resposta TL, foram realizados cinco ciclos de tratamento térmico - irradiação - leitura, sendo a amostra irradiada com 1 Gy da fonte de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, a medição realizada na leitora Risø e o tratamento térmico de reutilização das amostras.

A Figura 6 mostra a resposta termoluminescente da amostra de $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ depois de cada ciclo de tratamento - irradiação - leitura. O coeficiente de variação das leituras dos dosímetros (CV%) observado é menor que 10%, atendendo a ISO de 2000, a qual diz que só devem ser aceitos dosímetros com coeficiente de variação menor ou igual a 10%.

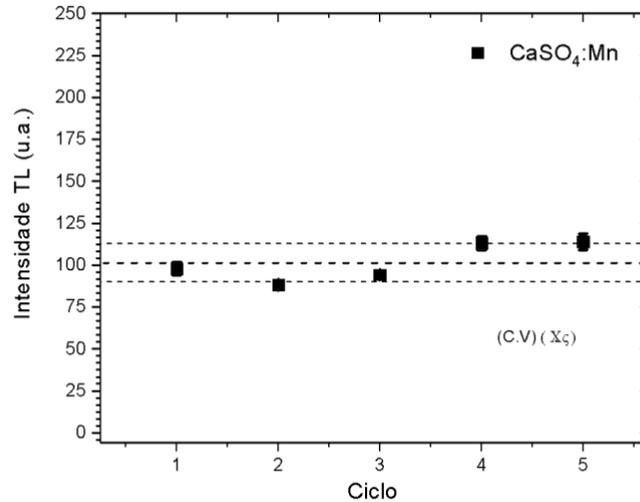


Figura 6 - Resposta TL (área integrada) de amostra de $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ em 5 ciclos de tratamento térmico - irradiação - leitura.

5.2.4. Desvanecimento

A fim de avaliar o *fading* do material, realizou-se avaliou-se a integral da área sob a curva de emissão TL de amostras irradiadas com 1 mGy e leituras após diferentes intervalos de dias. Os dados foram plotados na Figura 7, na qual constata-se um decaimento de 14% no primeiro dia e de 75% no vigésimo oitavo dia. Ou seja, o material teve essa propriedade dosimétrica melhorada, visto que na literatura o decaimento do sulfato de cálcio dopado com manganês chegava a 60% ao dia (CAMPOS, 1998).

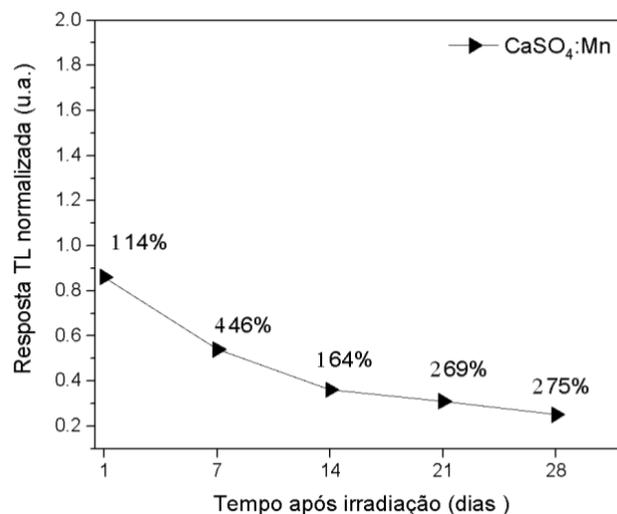


Figura 7 - Integral da área sob a curva de emissão TL de amostras irradiadas com 1 Gy e leituras após diferentes intervalos de dias.

5.3. Curva de decaimento LOE

As pastilhas foram expostas a doses absorvidas variando de 0,169 Gy a 9,971 Gy, a fim de avaliar a dependência energética do material.

Na Figura 8a, observa-se o comportamento das curvas de decaimento LOE do CaSO₄:Mn em relação à dose absorvida. Além disso, é notório que os compostos apresentaram curva de decaimento LOE exponencial típica de CaSO₄:Mn.

Ao realizar a integral das curvas da Figura 8a, obtém-se os dados que foram plotados na Figura 8b que mostra uma relação de linearidade da curva dose-resposta do material no intervalo de 0,169 Gy a 9,971 Gy.

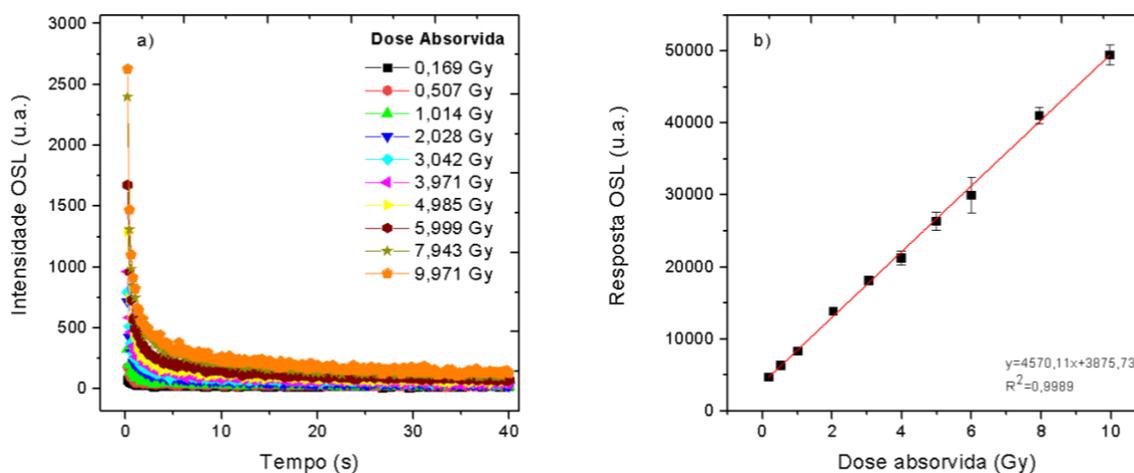


Figura 8 - (a) Resposta LOE das amostras de CaSO₄:Mn e (b) em função da dose absorvida de radiação beta (90Sr+90Y).

5.4. LID

O LID foi avaliado através da Equação 3, associando a média das leituras dos dosímetros não irradiados, após tratamento térmico, com o desvio padrão e multiplicando pelo fator de calibração. Na Tabela 1, observa-se a soma das médias das leituras dos dosímetros TL e LOE (\bar{B}), o desvio padrão ($\sigma_{\bar{B}}$) TL e LOE e o fator de calibração TL e LOE (f_c) de forma individual e o LID, medido em mGy, com sua respectiva incerteza.

Tabela 1 - Limite Inferior de Detecção do CaSO₄:Mn e suas respectivas incertezas, para TL e LOE.

Técnica	\bar{B} (u.a)	$\sigma_{\bar{B}}$ (u.a)	f_c (mGy/u.a)	LID (mGy)
TL	2414,3	287,4	0,0015	4,9514±0,03
LOE/OSL	6767,5	100,7	0,0268	189,834±0,09

6. CONCLUSÕES

O sulfato de cálcio dopado com manganês apresentou propriedades dosimétricas de acordo com outros estudos descritos na literatura, com o adicional de um menor fading (75% ao mês). As análises dos difratogramas de raios X (DRX) mostraram que o material preparado possui uma única fase e uma estrutura de simetria otorrômbica do grupo espacial Amma. Uma análise das propriedades dosimétricas mostrou que o material possui curva de emissão TL típica, com pico dosimétrico principal em 175 °C e, através de um estudo da ordem de cinética, soube-se a energia de ativação de 1,07 eV, também ficou claro que a amostra não depende de energia, mediante apresentação da curva dose resposta tanto para TL como para LOE. Ademais, indicou reprodutibilidade dentro do determinado pela ISO e desvanecimento inicial de 14% ao dia e 75% ao mês, um número inferior ao encontrado na literatura, de 60% ao dia.

7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a linha de pesquisa irá voltar-se para a implementação de novos co-dopantes no CaSO₄:Mn, com o intuito de aprimorar mais suas propriedades dosimétricas e continuar diminuindo o fading.

8. REFERÊNCIAS

BØTTER-JENSEN, L.; ANDERSEN, C. E.; DULLER, G. A. T.; MURRAY, A. S. Developments in radiation, stimulation and observation facilities in luminescence measurements. **Radiation Measurements**, v. 37, ed. 4-5, p. 535-541, 2003.

CALDAS, L. V. E. **Alguns métodos de calibração e de dosimetria da radiação beta**. 1980. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 1980.

CAMPOS, L.L. Termoluminescência de materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação. **Cerâmica**, v. 44, n. 290, 1998.

GUIDELLI, E. J. **Luminescência Opticamente Estimulada em Condições de Ressonância Plasmônica**. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, 2015.

JUNOT, D. O. **Análise das propriedades termoluminescentes e exoeletrônicas de dosímetros de CaSO₄:Eu com adição de prata**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2013.

OBERHOFER, M.; SCHARMANN, A. Applied Thermoluminescence Dosimetry. Ispra: Commission of European Communities, 1979.

PIETRO-TABOADA, N.; LARRAÑAGA, A.; GOMÉZ-LASERNA, O.; MARTÍNEZ-ARKARAZO, A.; OLAZABAL, M. A.; MADARIAGA, J. M. The relevance of the combination of XRD and Raman spectroscopy for the characterization of the CaSO₄-H₂O system compounds. **Microchemical Journal**, v. 122, p. 102-109, 2015.

PIETRO-TABOADA, N.; GOMÉZ-LASERNA, O.; MARTÍNEZ-ARKARAZO, A.; OLAZABAL, M. A.; MADARIAGA, J. M. Raman spectra of the different phases in the CaSO₄-H₂O system. **Anal. Chem.**, v. 86, p. 10131-10137, 2014.

SILVA, A.M.B. **Produção e caracterização de compósitos de CaSO₄:TB,Ag para fins dosimétricos**. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2019.

SILVA, A.M.B., SOUZA L.F., ANTONIO P.L., JUNOT D.O., CALDAS, L. V. E, SOUZA, D.N. Effects of manganese and terbium on the dosimetric properties of CaSO₄. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 198, 2022, 110207.

SILVA, A.M.B., WELLISSON S. S., MATOS T. S., JUNOT D.O., REZENDE M.V.S., e SOUZA, D.N. Effect of terbium and silver co-doping on the enhancement of photoluminescence in CaSO₄ phosphors. **Optical Materials**, v.111, 2021, 110717.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, v. 53, ed. 1, p. 57-77, 2007.

SOUZA, L. F. **Produção e caracterização de dosímetros à base de magnésio**. 2012. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2012.

YUKIHARA, EDUARDO G.; McKEEVER, STEPHEN W. S. **Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons, 2011.

ZAHEDIFAR, M.; MEHRABIB, M.; HAROONIA, S. Synthesis of CaSO₄: Mn nanosheets with high thermoluminescence sensitivity. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, ed. 7, p. 1002-1006, 2011.

9. OUTRAS ATIVIDADES

As atividades aqui descritas foram as realizadas pela estudante que passou a executar o plano de trabalho a partir de maio de 2022, substituindo o estudante que esteve na execução do plano até abril deste ano.

Período	Atividades
02/05/2022 a 14/05/2022	Estudo teórico de artigos, dissertações e teses relacionados ao material de interesse e participação em reuniões.
15/05/2022 a 05/06/2022	Preparação de resumo expandido e banner sobre o ensino da física médica em congresso científico.
06/06/2022 a 12/06/2022	Participação no Congresso Brasileiro de Física Médica, realizado em Fortaleza-CE.
13/06/2022 a 15/08/2022	Participação em reuniões e montagem do relatório final do projeto de pesquisa.