



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD
baseados em CaSO_4 para aplicação em dosimetria das radiações**

PATRÍCIA BERINGHS RIO GASPARIAN

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutora em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações**

Orientadora:

**Profa. Dra. Leticia Lucente
Campos Rodrigues**

São Paulo

2022

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD
baseados em CaSO₄ para aplicação em dosimetria das radiações**

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

PATRÍCIA BERINGHS RIO GASPARIAN

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutora em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:
**Profa. Dra. Letícia Lucente Campos
Rodrigues**

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

GASPARIAN, P. B. R. ***Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD baseados em CaSO₄ para aplicação em dosimetria das radiações.*** 2022. 126 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <www.teses.usp.br> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN,
com os dados fornecidos pela autora.

Gasparian, Patrícia Beringhs Rio

Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD baseados em CaSO₄ para aplicação em dosimetria das radiações / Patrícia Beringhs Rio Gasparian; orientadora Leticia Lucente Campos. -- São Paulo, 2022.

126 f.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2022.

1. OSL. 2. sulfato de cálcio. 3. mapeamento de dose. 4. filme OSLD. I. Campos, Leticia Lucente, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Patrícia Berings Rio Gasparian. *Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD baseados em CaSO₄ para aplicação em dosimetria das radiações*. 2022.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear – Aplicações da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutora em Ciências.

Data: ___/___/_____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

*Dedico à minha pequena grande cientista,
aquela que colore os meus dias.*

AGRADECIMENTOS

Faltam palavras para expressar meu sincero agradecimento:

À Dra. Letícia Lucente Campos, pela orientação acadêmica, apoio e incentivo, sempre com paciência e atenção.

À mentora Dra. Anna Luiza Metidieri Cruz Malthes, por fornecer os materiais utilizados para a produção dos filmes OSLD e, principalmente, pelo incansável suporte. Sem ela, a realização deste trabalho não seria possível. Agradeço pelas inúmeras conversas e sugestões ao longo de toda esta jornada.

Ao colega Aldo Ramos de Oliveira, pela produção dos cristais de sulfato de cálcio no laboratório do IPEN e por diversos apoios, sempre com disposição e serenidade.

Ao Renato Giordano, pela ajuda na confecção da caixa de *bleaching*.

Aos colegas Alan Naor da Silva, Maria Cristina de Abreu e Vicente de Paulo de Campos, que, com disposição, por vezes me ajudaram ligando e desligando equipamentos durante a execução da parte experimental deste trabalho.

À Michele Torquato, pelas irradiações realizadas na Clinirad Radiotherapy Clinic.

À Elizabeth S. Ribeiro Somessari, pelas irradiações no GammaCell do Centro Tecnológico das Radiações do IPEN.

Ao Dr. Neilo Trindade, pelo apoio, e ao Dr. Alexandre Brincalpe Campo e seus alunos, Daniel Botelho Bicalho e Isabela Gilho Teixeira Francisco, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), pela realização dos testes de resistência mecânica das amostras.

Aos amigos Dr. Paulo Giannini, Jordana A. Zampelli e Thais Aparecida Silva, por disponibilizarem os microscópios ópticos e me auxiliarem a usá-los. Ao amigo Dr. Isaac Jamil Sayeg pela observação preliminar das amostras no MEV do IGC-USP e pelos importantes conselhos.

Ao Laboratório de Microscopia e Microanálise do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do IPEN/CNEN. À Dra. Larissa Otubo, pela disponibilidade e atenção, e especialmente ao Glauson A. F. Machado, que foi incansável nas observações e re-observações das amostras no MEV.

Ao Dr. Julio T. Marumo e Dr. Leandro Goulart de Araújo, por disponibilizarem a mesa vibratória do Laboratório de Cimentação e Caracterização de Produto da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN.

À Dra. Patrícia de Lara Antonio, pelo suporte com o leitor Risø TL/OSL DA-20.

Ao IPEN, na pessoa do Sr. Superintendente Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo, pela oportunidade de executar este trabalho.

À Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens e à Dra. Linda V. E. Caldas, pelo apoio e disponibilidade do desenvolvimento do trabalho na Gerência de Metrologia das Radiações do IPEN.

Às amigas que admiro, Dra. Nancy K. Umisedo e Dra. Elisabeth Mateus Yoshimura, do Laboratório de Dosimetria do IFUSP, por emprestar equipamentos, ajudar nas questões técnicas e me apoiar.

Ao amigo Dr. Eduardo Gardenali Yukihara, pela ajuda com a bibliografia utilizada neste trabalho.

À amiga Shirlane Barboza, pelas boas conversas e compartilhamento de experiências de pesquisa de doutorado.

Aos amigos queridos que acompanharam esta jornada e me incentivaram, Dra. Cíntia Melazo Dias, Dr. Alessandro Facure, Claudia da Silva Silveira e Walter Fritz Lima França.

Àquela, cujo amor me acompanha desde seu ventre, que sempre me apoia e me encoraja a ser o melhor que eu possa ser, minha mãezica Evani Marzagão Beringhs.

Ao meu pai, Fernando Bulcão Rio, e ao meu irmão, Guilherme Beringhs Rio, pelo incentivo e carinho e cuidado sempre presentes.

Ao meu amado Bruno E. N. M. Gasparian, pelo incansável apoio, por fazer tudo o que estava ao seu alcance para facilitar a minha dedicação neste trabalho, pela compreensão nas horas difíceis e pelo valioso incentivo.

À mais linda flor de nosso jardim, que alegra nossos dias e que compreendeu e apoiou sua mamãe a realizar a pesquisa de doutorado.

Aos demais familiares e amigos, tão preciosos, que acompanharam esta jornada, me apoiando de diferentes formas e auxiliando meu percurso.

A Deus, cujos pensamentos são mais altos que os meus e não importa quão grande eu sonhe, Ele me surpreende e abençoa sobre medida a minha história.

“Aprender é a única coisa
de que a mente
nunca se cansa,
nunca tem medo
e nunca se arrepende”
Leonardo da Vinci

RESUMO

GASPARIAN, P.B.R. ***Desenvolvimento, produção e caracterização de filmes OSLD baseados em CaSO₄ para aplicação em dosimetria das radiações*** 2022. 126p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Nos tratamentos modernos de radioterapia (RT), campos pequenos e distribuições de dose complexas requerem técnicas de dosimetria adequadas e precisas. Filmes radiocrômicos e arranjos de câmaras de ionização (CI) apresentam limitações, como alto custo, precisão dependente da variabilidade de produção dos filmes e resolução limitada (arranjo de CI). Estudos recentes demonstraram que sistemas de luminescência opticamente estimulada (do inglês *optically stimulated luminescence* -OSL) permitem a avaliação de doses para mapeamento 2D de forma relativamente rápida e simples e os resultados mostram resolução submilimétrica. Este trabalho apresenta, pela primeira vez, um dosímetro de luminescência opticamente estimulada (OSLD) na forma de um filme flexível feito com partículas de CaSO₄:Eu embebidas em uma matriz de elastômero de silicone. O filme OSLD foi produzido por uma metodologia relativamente simples e de baixo custo. Esse filme é reutilizável e o sinal pode ser limpo satisfatoriamente com uso de LEDs azuis. As principais propriedades dosimétricas foram avaliadas utilizando o leitor TL/OSL Risø com estimulação azul e filtro Hoya U-340. A investigação mostra repetibilidade dentro de 3% ao medir com a mesma amostra de filme. Em relação à homogeneidade do filme OSLD, foi observada uma mudança de sensibilidade de aproximadamente 12% ao longo do filme OSLD de 5 x 5 cm². Além disso, a curva de resposta em função da dose mostra linearidade de 5 a 25 Gy. O desvanecimento do sinal OSL é relativamente alto, cerca de 50% nas primeiras 48h, e depois fica estável. Um filme OSLD de 3 x 3 cm² foi usado com sucesso para mapear a distribuição de dose em radiocirurgia (feixe de fótons de 6 MV). Este trabalho demonstra a viabilidade da dosimetria 2D usando filmes OSLD reutilizáveis baseados em CaSO₄:Eu.

Palavras-chave: OSL, sulfato de cálcio, filme OSLD, mapeamento de dose.

ABSTRACT

GASPARIAN, P.B.R. *Development, production and characterization of OSLD films based on CaSO₄ for radiation dosimetry applications* 2022. 126p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

In modern radiotherapy (RT) treatments, small fields and complex dose distributions require adequate and precise dosimetry techniques. Radiochromic films and ionization chamber (IC) arrays have limitations, such as high cost, accuracy dependent on the variability of production of the films and limited resolution (IC arrays). Recent studies demonstrated that optically stimulated luminescence (OSL) systems allow the evaluation of doses for 2D mapping in a relatively fast and simple way and results show sub-millimeter resolution. This work presents, for the first time, an optically stimulated luminescence dosimeter (OSLD) in the form of a flexible film made with CaSO₄:Eu particles embedded in a silicone elastomer matrix. The OSLD film was produced using a low-cost and relatively simple methodology. This film is reusable and the signal can be satisfactorily bleached using blue LEDs. The main dosimetric properties were evaluated using TL/OSL Risø reader with blue stimulation and Hoya U-340 filter. Investigation shows repeatability within 3% when measuring with the same film sample. Regarding the OSLD film homogeneity, nearly 12% sensitivity change was observed within the 5 x 5 cm² produced film. Additionally, the dose response curve shows linearity from 5 to 25 Gy. Fading of the OSL signal is relatively high, about 50% in the first 48h and then is stable. Nevertheless, a 3 x 3 cm² OSLD film was successfully used to map dose distribution in radiosurgery (6 MV photon beam). This work demonstrates the feasibility of 2D dosimetry using reusable OSLD films based on CaSO₄:Eu.

Keywords: optically stimulated luminescence, CaSO₄, OSLD film, bi-dimensional dose mapping

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA DO FENÔMENO OSL: 1) IRRADIAÇÃO, 2) IONIZAÇÃO, 3) CAPTURA DE CARGA, 4) ESTIMULAÇÃO ÓPTICA E IONIZAÇÃO DE CARGAS CAPTURADAS, 5) RECOMBINAÇÃO DE BURACO E ELÉTRON E 6) EMISSÃO DE LUZ. ARMADILHAS RASAS, DOSIMÉTRICAS E PROFUNDAS SÃO REPRESENTADAS POR (A), (B) E (C), RESPECTIVAMENTE. | 23 |
| FIGURA 2 - MATERIAIS TESTADOS PARA A MATRIZ DO FILME OSLD..... | 45 |
| FIGURA 3 - LEITOR RISØ TL/OSL DA-20 (DTU-NUTECH) DO SEGMR DO IPEN. | 47 |
| FIGURA 4 - (A) MESA VIBRATÓRIA QUIMIS, (B) CUBA ULTRASSÔNICA CHUBBY E (C) ROLO FURA-BOLHAS DUPOL UTILIZADOS PARA TESTAR A ELIMINAÇÃO DE BOLHAS DE AR NA MATRIZ UTILIZADA NA CONFECÇÃO DOS FILMES OSLD. | 49 |
| FIGURA 5 - MODELAGEM DA ESTRUTURA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS FILMES..... | 50 |
| FIGURA 6 - ESTRUTURA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS FILMES, (A) VISTA LATERAL E (B) VISTA INFERIOR..... | 51 |
| FIGURA 7 - (A) ESTÊNCEL UTILIZADO, (B) FILME MARCADO E (C) FILME POSICIONADO NA ESTRUTURA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA. | 52 |
| FIGURA 8 - (A) IMAGEM DO FILME DEMARCADO NA ESTRUTURA SEM ÁGUA E (B) IMAGEM DO MESMO FILME TENSIONADO PELA COLUNA D'ÁGUA. | 52 |
| FIGURA 9 - PROCESSAMENTOS DE IMAGEM REALIZADOS NO LABVIEW: (A) MÁSCARA CIRCULAR, (B) EXTRAÇÃO DE PLANO DE COR, (C) BINARIZAÇÃO E (D) FILTRAGEM DE PARTÍCULAS. | 53 |
| FIGURA 10 - GRÁFICO COM AS COORDENADAS DOS PONTOS DE UMA AMOSTRA DE FILME PURO. | 54 |
| FIGURA 11 - SOLUÇÃO DE $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ EM AGITADOR MAGNÉTICO. | 56 |
| FIGURA 12 - SOLUÇÃO DE $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ EM BALÃO VOLUMÉTRICO SOBRE MANTA AQUECEDORA..... | 56 |
| FIGURA 13 - TIRA DE TESTE DE PH DO $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Eu}$ PRODUZIDO. | 57 |
| FIGURA 14 - CONJUNTO DE PENEIRAS UTILIZADAS. | 58 |
| FIGURA 15 - CRISTAIS DE $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Eu}$ EM PÓ (75-180 μm) PRODUZIDOS. | 58 |
| FIGURA 16 - (A) FILME OSLD COM AS MARCAS DE CORTE E (B) DUAS AMOSTRAS CORTADAS DO FILME OSLD. | 60 |
| FIGURA 17 - CAIXA PARA TRATAMENTO ÓPTICO DOS FILMES OSLD. | 62 |
| FIGURA 18 - AS TRÊS REGIÕES (INDICADAS EM VERMELHO) DO FILME OSLD COM TRÊS AMOSTRAS CADA..... | 62 |
| FIGURA 19 - LUPA BINOCULAR CARL ZEISS STEMI SV 11. | 65 |
| FIGURA 20 - MICROSCÓPIO PETROGRÁFICO CARL ZEISS, MODELO AXIOPLAN 2. | 66 |
| FIGURA 21 - DUAS AMOSTRAS DE FILME OSLD RECOBERTAS COM CARBONO POSICIONADAS EM PORTA-AMOSTRAS..... | 67 |
| FIGURA 22 - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DE ALTA RESOLUÇÃO JEOL JSM 6701F. | 68 |
| FIGURA 23 - À DIREITA, EXEMPLO DE DUAS AMOSTRAS DE FILME OSLD ENVIADAS PARA IRRADIAÇÃO EM ACELERADOR LINEAR CLÍNICO. À ESQUERDA, AS MESMAS AMOSTRAS EMBALADAS PROTEGIDAS DA EXPOSIÇÃO A LUZ. ACIMA, UMA DAS TIRAS DE FILME OSLD (2 x 0,5 cm^2) E ABAIXO, UMA AMOSTRA DE 3 x 3 cm^2 | 70 |
| FIGURA 24 - (A) SIMULADOR COM PLACAS DE BOLUS GEL NO CENTRO, ABAIXO DAS QUAIS (B) ESTÁ POSICIONADA A AMOSTRA DE FILME OSLD. | 71 |
| FIGURA 25 - MOLDES CRIADOS PARA O CORTE DAS AMOSTRAS IRRADIADAS DE FILME OSLD. | 72 |
| FIGURA 26 - DEMONSTRAÇÃO DO USO DO MOLDE PARA CORTAR AMOSTRA DE FILME OSLD DE 3 x 3 cm^2 | 73 |
| FIGURA 27 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL A. | 75 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 28 - LEITURA OSL DO MATERIAL A SEM IRRADIAÇÃO PRÉVIA (BG) E APÓS EXPOSIÇÃO A DOSE DE 0,2 Gy. | 75 |
| FIGURA 29 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL B. | 76 |
| FIGURA 30 - LUMINESCÊNCIA FOTOESTIMULADA DO MATERIAL B APÓS IRRADIAÇÃO A DOSE DE 0,4 Gy E 0,8 Gy COM E SEM ESTIMULAÇÃO OSL E LEITURA OSL DO MATERIAL B SEM EXPOSIÇÃO PRÉVIA (BG). | 76 |
| FIGURA 31 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL C. | 77 |
| FIGURA 32 - FILME (CURADO HÁ MAIS DE 2 MESES) FEITO DE MATERIAL C MANCHA UM PAPEL, SE DEIXADO SOBRE ELE POR MAIS DE 1 DIA. | 77 |
| FIGURA 33 - SINAIS OSL DOS COMPONENTES DO MATERIAL C, ANTES E APÓS EXPOSIÇÃO A DOSE DE 0,2 Gy. | 78 |
| FIGURA 34 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL D. | 79 |
| FIGURA 35 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL E. | 79 |
| FIGURA 36 - FILME TESTE PRODUZIDO COM MATERIAL F. | 80 |
| FIGURA 37 - O FILME PRODUZIDO COM O MATERIAL F E CRISTAIS DE SULFATO DE CÁLCIO FICOU RÍGIDO E QUEBRADIÇO. | 80 |
| FIGURA 38 - ASPECTOS DAS AMOSTRAS DE CADA MATERIAL (A, B, C, D, E E F), AOS PARES, DE CIMA PARA BAIXO: (A) CONTROLE, (B) TRATAMENTO TÉRMICO DE 250°C/2H E (C) TRATAMENTO TÉRMICO DE 250°C/15H, COM EXCEÇÃO (D) DAS QUATRO AMOSTRAS DO MATERIAL D QUE PERMANECERAM APENAS 5 E 10 MIN NO FORNO A 250°C. | 81 |
| FIGURA 39 - AMOSTRAS DE FILME PURO, APÓS CURA, PRODUZIDAS COM MATERIAL A. NAS PRIMEIRAS 3H30MIN DA CURA, (A) FICOU NA BANCADA DO LABORATÓRIO, (B) NA CUBA ULTRASSÔNICA E (C) NA MESA VIBRATÓRIA. | 82 |
| FIGURA 40 - AMOSTRAS DE FILME PURO, APÓS CURA, PRODUZIDAS COM MATERIAL A. NO PRIMEIRO MINUTO DA CURA DE 24H, (A) FICOU NA BANCADA DO LABORATÓRIO, (B) COLOCADA NA CUBA ULTRASSÔNICA, (C) FOI SOPRADA E (D) O ROLO FURA-BOLHAS FOI PASSADO SOBRE ELA. | 83 |
| FIGURA 41 - ESTÁGIOS DURANTE A CURA DO MATERIAL A, SENDO (A) MISTURA DERRAMADA NA BANCADA, (B) DURANTE O USO DO ROLO, (C) LOGO APÓS O USO DO ROLO E (D) APÓS 24H. | 84 |
| FIGURA 42 - AMOSTRA DE FILME PURO, APÓS CURA, PRODUZIDA COM MATERIAL A, NO QUAL FOI PASSADO O ROLO FURA-BOLHAS ANTES DA CURA. | 84 |
| FIGURA 43 - RESULTADOS DOS TRÊS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA REALIZADOS COM AS AMOSTRAS A (PURA), B (3 IRRADIAÇÕES DE 20 Gy) E C (IRRADIADA 10 VEZES COM 20 Gy CADA). EIXOS X E Y EM MILÍMETROS. | 85 |
| FIGURA 44 - BG E SINAL OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :DY LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 0,2 Gy. | 86 |
| FIGURA 45 - BG E SINAL OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :EU LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 0,2 Gy. | 87 |
| FIGURA 46 - BG E SINAL OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :CE LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 0,2 Gy. | 87 |
| FIGURA 47 - SINAIS OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :DY – BG, LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 0,1 Gy, APÓS IRRADIAÇÃO E TL 100°C E APÓS IRRADIAÇÃO E TL 400°C. INSERÇÃO: CURVA TL DO CASO ₄ :DY OBTIDA COM TAXA DE AQUECIMENTO DE 5°C/s. ... | 88 |
| FIGURA 48 – SINAIS OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :EU – BG, LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 3 Gy, APÓS IRRADIAÇÃO E TL 100°C E APÓS IRRADIAÇÃO E TL 400°C. | 89 |
| FIGURA 49 - SINAIS OSL DE CASO ₄ :CE EM PÓ – BG, LOGO APÓS IRRADIAÇÃO DE 0,2 Gy, E APÓS IRRADIAÇÃO E TL 550°C. INSERÇÃO: CURVA TL DO CASO ₄ :CE OBTIDA COM TAXA DE AQUECIMENTO DE 5°C/s. | 89 |
| FIGURA 50 - SINAL OSL DE PASTILHA DE CASO ₄ :DY SEM IRRADIAÇÃO PRÉVIA (BG), E APÓS IRRADIAÇÃO COM DOSE DE 20 Gy SEGUIDA DE TRATAMENTOS ÓPTICOS (TO) PELOS PERÍODOS DE 1H30MIN, 3H E 7H. | 90 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 51 - SINAL OSL DE PASTILHA DE CaSO_4 :EU SEM IRRADIAÇÃO PRÉVIA (BG), E APÓS IRRADIAÇÃO COM DOSE DE 20 GY SEGUIDA DE TRATAMENTOS ÓPTICOS (TO) PELOS PERÍODOS DE 1H30MIN, 3H E 7H. | 91 |
| FIGURA 52 - FILMES OSLD DESENFOMADOS. | 92 |
| FIGURA 53 - INDICAÇÃO DAS ESPESSURAS MEDIDAS, EM MM, NOS PONTOS INDICADOS. CORRESPONDEM À MÉDIA DE 3 MEDIDAS E AS INCERTEZAS SÃO OS DESVIOS PADRÃO. (A) FILME OSLD 1 E (B) FILME OSLD 2. | 93 |
| FIGURA 54 - COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DE 20 AMOSTRAS DE FILME OSLD E DE 3 PASTILHAS DE CONTROLE (C1, C2 E C3), OBTIDOS APÓS 6 CICLOS DE IRRADIAÇÃO, LEITURA OSL E TRATAMENTO ÓPTICO. | 95 |
| FIGURA 55 - DOSE RESPOSTA DO FILME OSLD, EM TERMOS DA INTENSIDADE OSL INICIAL CORRIGIDA PELA SENSIBILIDADE. CADA PONTO CORRESPONDE À MÉDIA DE TRÊS AMOSTRAS E AS BARRAS DE ERRO SÃO OS DESVIOS PADRÃO. | 97 |
| FIGURA 56 - DOSE RESPOSTA DO FILME OSLD, EM TERMOS DA ÁREA TOTAL DO SINAL OSL CORRIGIDO PELA SENSIBILIDADE. CADA PONTO CORRESPONDE À MÉDIA DE TRÊS AMOSTRAS E AS BARRAS DE ERRO SÃO OS DESVIOS PADRÃO. | 97 |
| FIGURA 57 - SINAL REMANESCENTE MÉDIO APÓS DIFERENTES PERÍODOS, OBTIDO DA INTENSIDADE OSL INICIAL DE 5 AMOSTRAS MANTIDAS NO ESCURO. AS BARRAS DE ERRO SÃO OS DESVIOS PADRÃO. | 98 |
| FIGURA 58 - SINAL REMANESCENTE MÉDIO APÓS DIFERENTES PERÍODOS, OBTIDO DA ÁREA TOTAL DO SINAL OSL DE 5 AMOSTRAS MANTIDAS NO ESCURO. AS BARRAS DE ERRO SÃO OS DESVIOS PADRÃO. | 99 |
| FIGURA 59 - FILME DE SILICONE-BORRACHA PURA, SEM MATERIAL DOSIMÉTRICO, OBSERVADO EM LUPA STEMI COM LUZ TRANSMITIDA. | 100 |
| FIGURA 60 - TRÊS AMOSTRAS, DE TRÊS REGIÕES DISTINTAS DE FILME OSLD, OBSERVADAS EM LUPA STEMI COM LUZ TRANSMITIDA. | 100 |
| FIGURA 61 - CORTE TRANSVERSAL DE FILME DE SILICONE-BORRACHA PURA (MATERIAL A), SEM MATERIAL DOSIMÉTRICO, OBSERVADO EM LUPA STEMI COM LUZ REFLETIDA. | 101 |
| FIGURA 62 - UMA AMOSTRA DE FILME OSLD OBSERVADO EM LUPA STEMI COM LUZ REFLETIDA. | 102 |
| FIGURA 63 - AMOSTRA DE FILME OSLD OBSERVADA EM MICROSCÓPIO ÓPTICO COM DIFERENTES AUMENTOS (ESCALAS INDICADAS). A CAPTURA DA IMAGEM "A" FOI REALIZADA COM NICÓIS CRUZADOS. | 103 |
| FIGURA 64 - IMAGENS DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DE AMOSTRAS DE FILME OSLD (A) DO CENTRO, (B) DE UMA EXTREMIDADE E (C) DE OUTRA EXTREMIDADE, OBTIDAS EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV). | 104 |
| FIGURA 65 - IMAGENS, OBTIDAS COM MEV (ELÉTRONS SECUNDÁRIOS), DE SEÇÃO TRANSVERSAL DE AMOSTRAS DE FILME PURO (A) VIRGEM, (B) IRRADIADO COM DOSE DE 60 GY E (C) IRRADIADO COM DOSE DE 200 GY. | 105 |
| FIGURA 66 - ESPECTRO POR EDS DE AMOSTRA DE REGIÃO 1 (CENTRO) DE FILME OSLD. | 106 |
| FIGURA 67 - ESPECTRO POR EDS DE AMOSTRA DE REGIÃO 2 (SUPERIOR ESQUERDA) DE FILME OSLD. | 107 |
| FIGURA 68 - ESPECTRO POR EDS DE AMOSTRA DE REGIÃO 3 (INFERIOR DIREITA) DE FILME OSLD. | 107 |
| FIGURA 69 - CALIBRAÇÃO DO FILME OSLD NO FEIXE CLÍNICO DE FÓTONS DE 6 MV. CADA PONTO CORRESPONDE À MÉDIA DA INTENSIDADE OSL INICIAL CORRIGIDA PELA SENSIBILIDADE DE 4 AMOSTRAS E AS BARRAS DE ERRO SÃO OS RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO. | 109 |
| FIGURA 70 - MAPEAMENTO BIDIMENSIONAL DE DOSE ABSORVIDA OBTIDO COM FILME OSLD EM CONTROLE DE QUALIDADE DE UM TRATAMENTO DE RADIOCIRURGIA NA REGIÃO DA CABEÇA: (A) MAPA BIDIMENSIONAL, (B) VISTA SUPERIOR. | 111 |
| FIGURA 71 - DISTRIBUIÇÃO DE DOSES DO PLANEJAMENTO DE TRATAMENTO DE RADIOCIRURGIA. | 112 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - ALGUNS MATERIAIS (COM POTENCIAL DE USO COM A TÉCNICA OSL), SUAS CARACTERÍSTICAS DOSIMÉTRICAS E AS REFERIDAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. | 33 |
| TABELA 2 - LISTA DE MATERIAIS ELASTÔMEROS TESTADOS E AS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS..... | 74 |
| TABELA 3 - INTENSIDADES OSL INICIAIS MÉDIAS E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DAS AMOSTRAS AVALIADAS EM TRÊS CICLOS DE IRRADIAÇÃO E LEITURA OSL..... | 94 |
| TABELA 4 - INTENSIDADE OSL INICIAL MÉDIA E RESPECTIVO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA CADA REGIÃO DO FILME..... | 95 |
| TABELA 5 - NÚMERO ATÔMICO EFETIVO ESTIMADO, USANDO EDS-MEV, PARA CADA REGIÃO DAS TRÊS AMOSTRAS DE FILME OSLD AVALIADAS..... | 108 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | OBJETIVOS | 19 |
| 3 | JUSTIFICATIVA, ORIGINALIDADE E RELEVÂNCIA DA PESQUISA | 20 |
| 4 | LUMINESCÊNCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL) | 21 |
| 5 | O ESTADO DA ARTE | 24 |
| 5.1 | Al ₂ O ₃ :C | 24 |
| 5.2 | ÓXIDO DE BERÍLIO | 25 |
| 5.3 | SULFATO DE CÁLCIO | 27 |
| 5.4 | OUTROS MATERIAIS COM PROPRIEDADES PARA USO EM DOSIMETRIA OSL | 32 |
| 5.5 | FILMES DETECTORES..... | 34 |
| 5.6 | FILME OSLD BASEADO NO ÓXIDO DE ALUMÍNIO..... | 35 |
| 5.7 | DOSIMETRIA OSL BIDIMENSIONAL COM BEO..... | 36 |
| 5.8 | FILME OSLD BASEADO EM CAF ₂ | 37 |
| 5.9 | FILME OSLD BASEADO EM BAFBR | 38 |
| 5.10 | FILME OSLD BASEADO EM SRS:CE,SM | 39 |
| 5.11 | FILME OSLD BASEADO EM KCL:EU ²⁺ | 40 |
| 5.12 | FILME OSLD BASEADO EM NAMGF ₃ :EU..... | 41 |
| 5.13 | FILME OSLD BASEADO EM LIMGPO ₄ | 42 |
| 5.14 | FILME OSLD BASEADO EM LIF:MG,CU,P | 43 |
| 6 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 44 |
| 6.1 | SELEÇÃO DE MATRIZ DO FILME | 44 |
| 6.1.1 | <i>Preparação de filmes.....</i> | 44 |
| 6.1.2 | <i>Pesquisa de características dos filmes puros.....</i> | 46 |
| 6.2 | TESTES DE ELIMINAÇÃO DE BOLHAS DO FILME | 48 |
| 6.3 | TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MATRIZ | 49 |
| 6.4 | SELEÇÃO DE MATERIAL DETECTOR | 54 |
| 6.5 | PRODUÇÃO DE CASO ₄ :EU EM PÓ | 55 |
| 6.6 | MÉTODO DE PRODUÇÃO DO FILME OSLD | 59 |
| 6.7 | AValiação DAS PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS DO FILME OSLD | 59 |
| 6.7.1 | <i>Repetibilidade.....</i> | 60 |
| 6.7.2 | <i>Reprodutibilidade</i> | 61 |
| 6.7.3 | <i>Homogeneidade do filme OSLD.....</i> | 62 |
| 6.7.4 | <i>Sensibilidade.....</i> | 63 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 6.7.5 | <i>Desvanecimento do sinal OSL</i> | 63 |
| 6.7.6 | <i>Resposta em função da dose</i> | 64 |
| 6.8 | AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO FILME OSLD | 64 |
| 6.8.1 | <i>Lupa estereoscópica</i> | 64 |
| 6.8.2 | <i>Microscópio petrográfico</i> | 65 |
| 6.8.3 | <i>Microscópio eletrônico de varredura</i> | 66 |
| 6.9 | ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS) | 68 |
| 6.10 | AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DO FILME OSLD EM RADIOCIRURGIA | 69 |
| 6.10.1 | <i>Preparação das amostras</i> | 69 |
| 6.10.2 | <i>Irradiações utilizando acelerador linear clínico</i> | 70 |
| 6.10.3 | <i>Leitura das amostras irradiadas</i> | 72 |
| 7 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 74 |
| 7.1 | TESTES DE DIFERENTES MATRIZES | 74 |
| 7.2 | TESTES DE ELIMINAÇÃO DE BOLHAS NAS MATRIZES | 82 |
| 7.3 | TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MATRIZ DO FILME | 84 |
| 7.4 | SELEÇÃO DE DOPANTE DO SULFATO DE CÁLCIO | 86 |
| 7.5 | MÉTODO DE PRODUÇÃO DO FILME OSLD | 91 |
| 7.6 | AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS DO FILME OSLD | 94 |
| 7.6.1 | <i>Repetibilidade</i> | 94 |
| 7.6.2 | <i>Reprodutibilidade</i> | 94 |
| 7.6.3 | <i>Homogeneidade do filme OSLD</i> | 95 |
| 7.6.4 | <i>Sensibilidade</i> | 96 |
| 7.6.5 | <i>Resposta em função da dose</i> | 96 |
| 7.6.6 | <i>Desvanecimento do sinal OSL</i> | 98 |
| 7.7 | AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO FILME OSLD | 99 |
| 7.8 | ESTIMATIVA DE NÚMERO ATÔMICO EFETIVO DO FILME OSLD | 106 |
| 7.9 | AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE APLICAÇÃO DO FILME OSLD EM RADIOCIRURGIA | 109 |
| 7.9.1 | <i>Calibração do filme OSLD no feixe clínico</i> | 109 |
| 7.9.2 | <i>Mapeamento de dose com filme OSLD em radiocirurgia</i> | 110 |
| 8 | CONCLUSÕES | 113 |
| 9 | PRETENÇÕES FUTURAS | 115 |
| 10 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 116 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), há mais de 3.000 instalações radiativas no país, concentradas principalmente na área da saúde e na indústria (GASPARIAN; FACURE, 2020). A regulamentação dessas instalações está sujeita a diversas normas nacionais de licenciamento e segurança, que abrangem do controle de qualidade dos equipamentos que fazem uso da radiação à avaliação das doses ocupacional e ambiental.

Tanto no Brasil quanto internacionalmente, os programas de avaliação das doses ocupacional e ambiental e os diversos protocolos para controle de qualidade de equipamentos são baseados em dosímetros de estado sólido passivos (IZEWSKA *et al.*, 2003; RAMOS *et al.*, 2015). Dentre esses, destacam-se os dosímetros luminescentes que fazem uso das técnicas de termoluminescência (TL) e de luminescência opticamente estimulada (OSL, do inglês *Optically Stimulated Luminescence*).

Os dosímetros são compostos por materiais detectores sensíveis à radiação, os quais, quando submetidos a um estímulo externo, térmico (TL) ou óptico (OSL), emitem luz com intensidade proporcional à dose de radiação absorvida anteriormente pelo material.

Devido à natureza óptica do processo, a técnica OSL apresenta diversas vantagens em relação à técnica TL, como simplicidade de leitura, possibilidade de reavaliação das doses e medidas de dose acumulada e individual com o mesmo detector (GASPARIAN *et al.*, 2010; MALTHEZ *et al.*, 2014; SAWAKUCHI *et al.*, 2014; YUKIHARA *et al.*, 2010; YUKIHARA; MCKEEVER, 2011). A principal desvantagem dessa técnica, entretanto, reside no número de detectores que apresentam características intrínsecas adequadas para aplicações em dosimetria das radiações (YUKIHARA *et al.*, 2014). Mundialmente, embora diversos países já utilizem a técnica OSL em várias áreas da dosimetria, a maioria das aplicações é baseada no óxido de alumínio dopado com carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$). No caso de monitoração individual, somente dois materiais são utilizados como detectores OSL, o $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ e o óxido de berílio (BeO) (LALIC *et al.*, 2019).

Diante das vantagens da técnica OSL e do baixo número de detectores OSL comercialmente disponíveis, diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo têm trabalhado no desenvolvimento de novos materiais (sintéticos) e pesquisado

as propriedades luminescentes e dosimétricas de materiais naturais, como o minério fluorita, composto basicamente por fluoreto de cálcio (CaF_2) (MALTHEZ *et al.*, 2018; MITTANI *et al.*, 2008; PRADHAN *et al.*, 2008; TWARDAK *et al.*, 2014; WROBEL *et al.*, 2014; YOSHIMURA; YUKIHARA, 2006b, a).

Dentre os materiais sintéticos, destacam-se, por exemplo, o aluminato de lítio (LiAlO_2) e o fosfato de magnésio e lítio (LiMgPO_4). Eles podem ser produzidos por meio de reações químicas ou de técnicas de crescimento de cristais, como *micro-pulling-down* ou o método *Czochralski*, apresentando características dosimétricas compatíveis com detectores ou cristais de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, quando utilizados com a técnica OSL (MALTHEZ *et al.*, 2018).

Outros grupos internacionais têm estudado a aplicação de detectores de CaSO_4 com diferentes tipos de dopantes como disprósio, európio, manganês, cério, entre outros (BAHL *et al.*, 2017; BHATT *et al.*, 2014; ERFURT; KRBETSCHEK, 2002; KULKARNI *et al.*, 2014; OMANWAR; PALAN, 2018).

Diferentes estudos na literatura demonstram que sistemas OSL permitem a avaliação de doses para mapeamento bidimensional de forma relativamente rápida e simples, devido à estimulação óptica e resultados com resolução sub-milimétrica (AHMED *et al.*, 2017; JAHN *et al.*, 2013; MARTINS *et al.*, 2020).

Tendo em vista as vantagens da técnica OSL em dosimetria e o baixo número de detectores comerciais disponíveis, este trabalho propõe a produção e a caracterização de detectores OSL em forma de folha flexível (filme OSLD) para aplicações em dosimetria das radiações, baseados em material detector de origem nacional não comercial (CaSO_4) e matriz de baixo custo sustentável (reciclado), como polímeros fluoretados da família do politetrafluoretileno (PTFE), termoplásticos como polimetilmetacrilato (PMMA) e policloreto de polivinila (PVC).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento, a produção e a caracterização de detectores OSL em forma de folhas flexíveis (filmes OSLD), baseados em material detector de origem nacional e não-comercial, CaSO_4 , utilizando matriz de material de baixo custo, para aplicação em dosimetria das radiações.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Testar diferentes materiais para matriz do filme e selecionar a mais adequada;
2. Avaliar algumas propriedades dosimétricas dos detectores de sulfato de cálcio com diferentes dopantes e selecionar o mais adequado para a produção do filme OSLD;
3. Desenvolver a metodologia de produção dos filmes OSLD;
4. Produzir filmes OSLD com a matriz e o detector selecionados;
5. Caracterizar os filmes OSLD por meio da avaliação de propriedades dosimétricas utilizando a técnica OSL;
6. Caracterizar as propriedades mecânicas e morfológicas do filme produzido;
7. Avaliar a possibilidade de mapeamento de dose bidimensional com os filmes OSLD produzidos; e
8. Apresentar o método de produção dos filmes OSLD como uma alternativa acessível financeiramente e de fácil produção, quando comparado aos materiais OSL disponíveis comercialmente.

3 JUSTIFICATIVA, ORIGINALIDADE E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Atualmente, a busca por materiais detectores que apresentem propriedades dosimétricas adequadas para serem utilizados com a técnica OSL em medições com diferentes tipos e energias de radiação se tornou um desafio. Há diversos trabalhos e estudos já publicados que ressaltam as possíveis aplicações de novos materiais com a técnica OSL, entretanto, cada um apresenta suas peculiaridades com desvantagens que precisam ser superadas.

No que diz respeito a filmes OSLD, apenas pesquisas recentes obtiveram resultados favoráveis, as quais ainda carecem de estudo mais aprofundado. Há dois estudos em estágio mais avançado com resultados satisfatórios de aplicação em mapeamento bidimensional de dose. Um deles é baseado em filmes protótipos comerciais (de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ e de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C},\text{Mg}$) que ainda não são comercializados e cuja produção é monopólio da empresa Landauer Inc.. O outro utiliza placas cerâmicas de BeO comercializadas pela empresa Materion Inc.. Cada estudo utilizou um sistema de leitura OSL diferente, desenvolvidos em laboratório, que não estão disponíveis comercialmente.

O presente trabalho utilizou o sulfato de cálcio produzido no IPEN, que pode ser facilmente adquirido no país e não há toxicidade em sua manipulação. Foram utilizadas matrizes flexíveis e elásticas de relativamente simples manipulação.

Os filmes OSLD produzidos são flexíveis, característica não encontrada em detectores OSL atualmente disponíveis no mercado comercial, bem como reutilizáveis após tratamento óptico. A produção de filmes OSLD e sua caracterização dosimétrica permitirão o mapeamento de dose bidimensional e em diferentes geometrias.

4 LUMINESCÊNCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA (OSL)

Diversos materiais naturais e sintéticos podem apresentar diferentes fenômenos luminescentes. A luminescência opticamente estimulada (OSL, do inglês *optically stimulated luminescence*), também conhecida como luminescência fotoestimulada (PSL, do inglês *photostimulated luminescence*) é um fenômeno com princípio físico semelhante ao da termoluminescência (TL) e, por vezes, ambas podem ser observadas no mesmo material. Quando irradiado previamente, o material pode ser submetido a estímulo óptico, resultando em sinal OSL, ou térmico, levando à emissão TL. A fotoluminescência (PL, do inglês *photoluminescence*) é outro fenômeno, que independe de irradiação prévia e cuja luz emitida pelo material cessa ao cessar o estímulo óptico, nesse caso a luz emitida tem comprimento de onda maior que a do estímulo. Já o fenômeno da fotofosforescência pode ter comprimento de onda maior ou menor que o estímulo óptico e geralmente persiste por alguns segundos ou minutos após cessado o estímulo. Durante a irradiação do material, também pode ocorrer a emissão de luz, chamada de radioluminescência (RL, do inglês *radioluminescence*). Outro fenômeno luminescente é a radiofotoluminescência (RPL, do inglês *radiophotoluminescence*), que é estimulada com luz ultravioleta após a irradiação do material. Ela pode ser estimulada inúmeras vezes e, diferentemente da OSL, o estímulo óptico causa apenas transições intra-bandas. Para resetar o material, utiliza-se tratamento térmico.

Este trabalho utilizou a dosimetria OSL, cujo princípio básico é a proporcionalidade entre emissão de luz (quando estimulado) e energia anteriormente absorvida (quando irradiado). O fenômeno OSL é possível devido à estrutura dos níveis de energia do cristal (detector): as bandas de valência e condução são as principais bandas de energia. Entre elas, está a banda proibida, na qual existem apenas níveis localizados de energia, cuja ocorrência é devida a defeitos estruturais do cristal.

Quando o detector é exposto à radiação ionizante, os elétrons da banda de valência são excitados para a banda de condução, deixando um buraco (falta de elétron) na banda de valência. Os elétrons e os buracos são livres para se mover nas respectivas faixas até serem capturados por armadilhas ou ocorrer

recombinação. A concentração de carga retida é proporcional à energia depositada pela radiação.

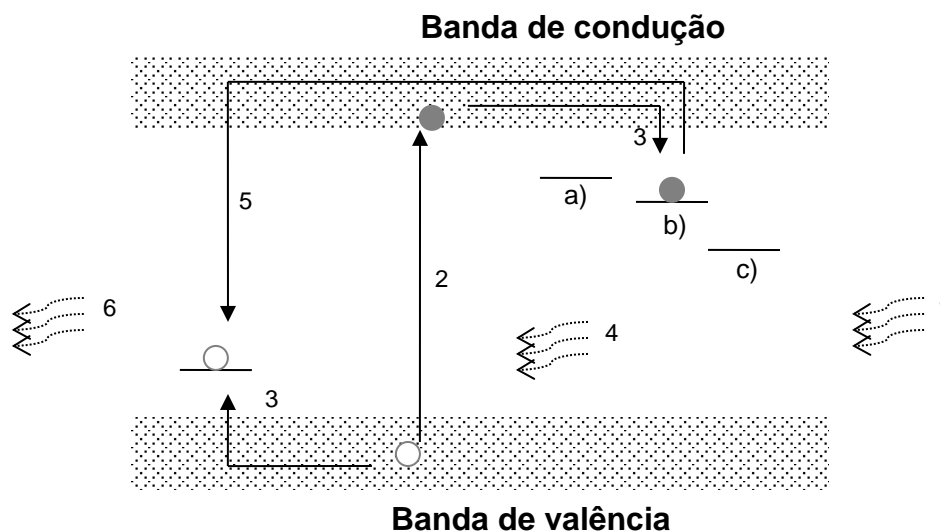
Com a estimulação óptica, os elétrons presos são liberados para a banda de condução e podem se recombinar com os buracos, emitindo luminescência - OSL. Portanto, a luminescência emitida pode ser associada à dose total absorvida pelo detector. Todo o processo dosimétrico de OSL está representado na Figura 1. A intensidade OSL é dada pela equação 1:

$$I(t) \propto n_0 \sigma \varphi e^{-\sigma \varphi t} \quad \text{Equação 1}$$

onde σ é a seção de choque de fotoionização do centro de captura, φ a taxa de foto fluência, n_0 é a concentração inicial das cargas capturadas e t é o tempo de estimulação (YUKIHARA; MCKEEVER, 2011).

Diversos fenômenos luminescentes ocorrem no material a partir da excitação com radiação até a emissão OSL. Três armadilhas são distinguidas dependendo da diferença de energia entre elas e a banda de valência (se armadilha de buraco) ou banda de condução (se armadilha de elétrons): armadilhas rasas, armadilhas dosimétricas e armadilhas profundas (Figura 1). As armadilhas rasas têm uma pequena diferença de energia da banda de valência (armadilha de buraco) ou da banda de condução (armadilha de elétrons) e, por esse motivo, as cargas podem facilmente recombinar e emitir fosforescência após a irradiação. Também existe a possibilidade de que, com a estimulação, as cargas da armadilha dosimétrica sejam capturadas pela armadilha rasa. Outro fenômeno é o aumento inicial na intensidade do sinal OSL, que ocorre quando as armadilhas rasas são preenchidas pela captura de cargas liberadas da armadilha dosimétrica. As armadilhas profundas podem afetar a sensibilidade do cristal à medida que são preenchidas com cargas (YUKIHARA *et al.*, 2004).

Figura 1 - Descrição esquemática do fenômeno OSL: 1) irradiação, 2) ionização, 3) captura de carga, 4) estimulação óptica e ionização de cargas capturadas, 5) recombinação de buraco e elétron e 6) emissão de luz. Armadilhas rasas, dosimétricas e profundas são representadas por (a), (b) e (c), respectivamente.



Fonte: Autora

Embora as técnicas TL e OSL sejam semelhantes do ponto de vista físico, ambas apresentam vantagens e desvantagens relacionadas ao tipo de estímulo aplicado (MCKEEVER; MOSCOVITCH, 2003; OLKO, 2010). No caso da técnica TL, o estímulo térmico pode ocasionar mudanças na rede cristalina do material, alterando a sensibilidade e reprodutibilidade da intensidade luminescente emitida pelo material, o que não ocorre no caso da técnica OSL, pois utiliza estímulo óptico com comprimentos de onda específicos na faixa do visível (MCKEEVER; MOSCOVITCH, 2003). A leitura óptica também é, sem dúvida, mais fácil de controlar do que o aquecimento do detector; além disso, ela pode ser mais rápida, porque é possível estimular apenas a intensidade inicial do sinal OSL. Fora a leitura rápida, a estimulação de uma pequena porção do sinal OSL permite várias leituras do mesmo detector.

Outra vantagem associada à técnica OSL é o sistema leitor. O leitor OSL é relativamente simples comparado a um leitor TL e pode ser portátil, permitindo prática leitura no local da irradiação (hospital, por exemplo) (GASPARIAN *et al.*, 2010).

5 O ESTADO DA ARTE

Atualmente, os dois principais materiais utilizados em dosimetria OSL são o óxido de alumínio dopado com carbono ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) e o óxido de berílio (BeO) (LALIC *et al.*, 2019; YUKIHARA; MCKEEVER, 2011).

Dadas as vantagens da técnica OSL e a baixa variabilidade de materiais comerciais, pesquisadores estão estudando a produção de novos materiais dosimétricos a serem explorados com a técnica. Entre os materiais naturais com possível aplicabilidade na dosimetria, as rochas naturais de fluoreto compostas por fluoreto de cálcio e sal natural mostraram potencial (MALTHERZ *et al.*, 2014). Na categoria de materiais artificiais, o CaSO_4 com vários tipos de dopantes tem se destacado para uso com a técnica OSL (BAHL *et al.*, 2017; GUCKAN *et al.*, 2017; KULKARNI *et al.*, 2014; OMANWAR; PALAN, 2018; PATLE *et al.*, 2019), o $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Ce},\text{Li}$ apresentou características promissoras (GUSTAFSON *et al.*, 2019; SOUZA, L. F. *et al.*, 2019) e o $\text{KBr}:\text{Eu}$ se mostrou adequado para dosimetria em tempo real na área médica (MCKEEVER, S. W.S., 2011).

Neste capítulo, serão abordados os principais materiais OSL para dosimetria das radiações e as recentes pesquisas envolvendo mapeamento de dose com a técnica OSL.

5.1 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

O óxido de alumínio dopado com carbono é o material dosimétrico mais utilizado atualmente com a técnica OSL (MCKEEVER, 2011). Sua aplicabilidade foi validada em diferentes áreas da dosimetria, como radioterapia, dosimetria ambiental, dosimetria espacial e dosimetria retrospectiva (MCKEEVER *et al.*, 2004).

Suas características dosimétricas vantajosas são a relativa alta sensibilidade e a resposta OSL com a dose linear até aproximadamente 10 Gy. O óxido de alumínio dopado com carbono tem, entretanto, algumas limitações, como sua elevada densidade ($3,85 \text{ g/cm}^3$) e seu número atômico efetivo de 11,3, o que o leva a apresentar resposta aproximadamente 4 vezes maior para feixes de raios X de baixas energias (20 a 30 keV). Outra dificuldade para algumas aplicações é a longa vida da luminescência (35 ms), que pode ser superada com o uso da técnica

OSL (OSL pulsada), por exemplo. A baixa seção de choque para nêutrons é outra dificuldade que o desenvolvimento de detectores com inclusão de conversores de nêutrons buscou resolver (YUKIHARA; MCKEEVER, 2011).

As características dosimétricas para uso do $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ em dosimetria OSL são, de maneira geral, favoráveis, e há estudo para proporcionar o uso desse material em mapeamento bidimensional de dose adotando-se uma metodologia de correção (por conta da vida longa de sua luminescência) (AHMED *et al.*, 2017). O principal problema é que esse material só pode ser adquirido comercialmente e apenas uma empresa detém sua comercialização (Landauer Inc.). A proposta deste trabalho é sugerir o uso de um material detector de relativamente fácil aquisição nacional (sulfato de cálcio produzido no IPEN), demonstrar a forma de produção de filmes OSLD e como eles podem ser aplicados para mapeamento bidimensional de dose.

5.2 Óxido de berílio

A capacidade da cerâmica BeO de absorver a energia depositada pela radiação ionizante é conhecida há muitas décadas (ALBRECHT; MANDEVILLE, 1956; MANDEVILLE; ALBRECHT, 1954). Ao ser estudado como dosímetro TL, sua sensibilidade à luz trouxe a ideia de se investigar sua aplicação com a técnica OSL (RHYNER; MILLER, 1970). Estudos reportaram características dosimétricas promissoras para o uso do BeO como dosímetro OSL (SOMMER *et al.*, 2007, 2008; SOMMER; HENNIGER, 2006). Em comparação com o óxido de alumínio, o óxido de berílio apresenta a característica vantajosa de seu número atômico efetivo ser menor (aproximadamente 7.2 contra 11.3 do $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$) e bem próximo do número atômico do tecido mole, o que o faz promissor para aplicações em medicina.

Quanto às suas propriedades dosimétricas, a resposta com a dose é linear de 10 μGy até 10 Gy (JAHN *et al.*, 2011). O desvanecimento óptico (*fading*) do sinal OSL é de aproximadamente 6% nos primeiros 30 min após a irradiação e depois o desvanecimento do sinal é menor que 1% em 6 meses (SOMMER; HENNIGER, 2006). Sua sensibilidade OSL é alta, com dose mínima detectável da ordem de 20 μGy (SOMMER *et al.*, 2008).

Yukihara (2011) observou fosforescência devido ao esvaziamento de armadilhas rasas em temperatura ambiente, duas ordens de magnitude menor que

o sinal OSL (observado para dose absorvida de aproximadamente 200 mGy). No ano de 2019, o pesquisador reportou presença de sinal OSL de transferência térmica (TT-OSL, *thermally transferred optically stimulated luminescence*), o qual é estimulado após o aquecimento térmico de um detector previamente irradiado cujo sinal OSL já havia sido completamente estimulado (YUKIHARA, 2019). Ele verificou que esse TT-OSL tem intensidade de pouco mais de 50% do sinal OSL original, é reproduzível e tem resposta linear com a dose (estudada até 100 Gy). O autor sugere que, após estudo mais detalhado do mecanismo TL/OSL do BeO, poder-se-ia adotar protocolo de uso do TT-OSL para aplicações em dosimetria de forma que não haveria necessidade de evitar a exposição à luz da cerâmica durante sua manipulação/irradiação.

A aplicação do BeO vem sendo estudada para dosimetria 2D (JAHN *et al.*, 2010, 2011, 2013), dosimetria de fibra ótica (SANTOS *et al.*, 2013, 2015; TEICHMANN *et al.*, 2018) e dosimetria clínica (GROBE *et al.*, 2009). A empresa Dosimetrics GmbH comercializa dosímetros pessoais baseados em BeO e Butler *et al.* (2018) avaliaram esses dosímetros comparando os valores de Hp(10) obtidos no Japão e na Austrália e relataram alta precisão (incerteza estatística de 0.32%).

Muito recentemente, após seu estudo sobre TT-OSL do óxido de berílio, Yukihiro propôs um modelo para a luminescência do BeO, contendo armadilhas rasas, armadilhas intermediárias, armadilhas óticamente ativas, armadilhas difíceis de apagar, armadilhas profundas e centros de recombinação. O modelo proposto facilita a compreensão dos mecanismos TL/OSL do BeO e deve facilitar novas aplicações desse material em dosimetria (YUKIHARA, 2020).

De qualquer forma, o Thermalox 995^R, que é o BeO utilizado nos trabalhos aqui mencionados, é monopólio de comercialização pela Materion Ceramics Inc. e a proposta deste estudo é justamente oferecer um detector OSL de fácil aquisição, em filme, para que possa ser usado para medidas de dose bidimensionais. O uso de BeO em pó, e objeto de estudo de outros grupos de pesquisa, foi descartado neste trabalho porque a alta toxicidade dificulta sua manipulação.

5.3 Sulfato de cálcio

Os primeiros registros de uso de sulfato de cálcio como dosímetro termoluminescente datam do final da década de 60 (YAMASHITA *et al.*, 1968). Nambi *et al* (1974) avaliaram esse fósforo dopado com diferentes terras raras e apontaram Dy e Tm como os ativadores mais eficientes.

Mejdhal apresentou o sulfato de cálcio dopado com disprósio para aplicação em dosimetria ambiental há 50 anos (SUNTA (INVITED), 1984). Desde então, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ é utilizado como dosímetro termoluminescente em diferentes países do mundo para várias aplicações. O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN) tem seu processo de produção bem estabelecido e o utiliza na forma de discos com PTFE desde a década de 80 (CAMPOS; LIMA, 1986).

Cabe ressaltar que o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ desenvolvido pelo IPEN é o único TLD comercial que foi produzido no Brasil. Apesar de ser um dosímetro extremamente sensível, cerca de 20 vezes mais sensível que o TLD-100 ($\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$), seu número atômico efetivo é alto (~15,3), o que faz com que a resposta TL do dosímetro apresente dependência elevada com energia da radiação incidente.

Os principais aspectos positivos do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TLD para uso em dosimetria são baixo custo, estabilidade do sinal (baixo *fading* durante armazenamento) e alta sensibilidade (LAKSHMANAN, 2018). Adicionalmente, foi observado *fading* máximo de 6% em 3 meses de armazenamento, sensibilidade 40 vezes maior que a do TLD-100 (o que depende da sua produção) e, na forma de pó, é inerte a tratamentos térmicos até 700°C (LAKSHMANAN., 2018).

O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ apresenta resposta TL sem *fading* significativo, linear para baixas doses (até 0,1 Gy) e altas doses (a partir de 100 Gy). Supralinearidade é observada para doses intermediárias, devido à competição de armadilhas.

O principal aspecto negativo desse material fica por conta de sua maleabilidade. Como seu índice de dureza é apenas 3,5, ele necessita de outro material base para ser sinterizado. A sua utilização na forma de pó é inconveniente, pela dificuldade de manipulação, podendo alterar o tamanho dos grãos, o que, por sua vez, interfere na sensibilidade TL. Lakshmanan (2018) aponta as várias formas nas quais o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ vem sendo utilizado como dosímetro termoluminescente, descritas a seguir.

Na década de 70, Pradhan *et al* e Iga *et al* usaram capilares de vidro selados, com determinada quantidade de pó de sulfato de cálcio no interior. Em 1984, Yasuno *et al* propôs o uso de dosímetro feito de pó de sulfato de cálcio sobre um prato plástico, que ele chamou de filme TL, para dosimetria bidimensional. Recentemente, Rao *et al* utilizou $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ encapsulado em capilar de vidro envolto em cápsula de plástico para dosimetria ambiental na Índia (LAKSHMANAN, 2018).

A Harshaw Chemical Co. comercializa, há décadas, o conhecido TLD-900, que é produzido com uso de LiF inerte (não-luminescente) como ligante ao $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, por tecnologia própria patenteada (BACCI *et al.*, 1980).

Pastilhas sinterizadas de sulfato de cálcio com diferentes materiais ligantes são reportadas em literatura (DRAŽIČ; TRONTELJ, 1983; PROKIC, 1991; PROKIĆ, 1978). Geralmente, o pó do material detector é apropriadamente misturado com o material ligante adequado e a posterior sinterização da mistura ocorre a elevadas temperaturas. Muitos testes de pastilhas não obtiveram sucesso por conta de interferência do material ligante nas propriedades termoluminescentes do sulfato de cálcio (LAKSHMANAN, 2018). Algumas pastilhas, como as produzidas por Prokic, patenteadas, apresentam bons resultados (PROKIĆ, 1980). O Korean Atomic Energy Research Institute (KAERI) produz as pastilhas nomeadas KCT 300, utilizadas em dosimetria pessoal e desenvolvidas no início dos anos 2000 (LAKSHMANAN, 2018).

Burgkhardt *et al* descreveram, na década de 70, dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ feitos em base de alumínio. Esses apresentaram baixa sensibilidade por conta da opacidade do alumínio e alteração da curva TL após aquecimento (LAKSHMANAN, 2018).

Roman *et al* (2012) descreveram a produção de filmes de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ depositado em substratos de quartzo, alumínio e vidro por pulverização pirólise e avaliaram suas características termoluminescentes. Os filmes do sulfato de cálcio dopado com disprósio no substrato de quartzo apresentaram maior sensibilidade.

Finalmente, os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ embutido em Politetrafluoroetileno (PTFE) são os mais comumente utilizados em muitos países para aplicações em dosimetria das radiações. Os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizados há décadas no IPEN são desse tipo (CAMPOS; LIMA, 1986). O PTFE, conhecido por teflon, é um material inerte e normalmente não altera as

propriedades dosimétricas do sulfato de cálcio. A produção desse tipo de dosímetro é relativamente simples e se inicia com a mistura homogênea do material detector com o teflon em temperatura criogênica para evitar interferência estática, então os discos (ou outra forma) são prensados a frio, depois sinterizados em alta temperatura e, por fim, resfriados lentamente à temperatura ambiente. Como o teflon é inerte e branco, em geral os resultados obtidos com esses dosímetros correspondem às propriedades dosimétricas do material em pó. Algumas desvantagens do teflon, entretanto, são baixa temperatura de amolecimento (limita a leitura TL abaixo de 327°C), característica de material isolante (as camadas do disco de teflon não aquecem uniformemente ao mesmo tempo), alto coeficiente de expansão (o disco precisa de espaço para expandir durante o aquecimento e, se for muito fino, pode quebrar-se) e baixa estabilidade a muito altas doses de radiação ionizante (acima de 10^4 Gy) (LAKSHMANAN., 2018).

Em resumo, há diversos estudos na literatura sobre esses dosímetros. As propriedades TL do CaSO_4 com diferentes impurezas foram extensivamente estudadas (BAHL *et al.*, 2016; LAKSHMANAN, 2001; LAPRAZ *et al.*, 2002; NAMBI *et al.*, 1974; JUNOT, 2017) e o CaSO_4 dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) tem sido usado para dosimetria pessoal com técnica de termoluminescência (TL) há décadas e suas propriedades TL são bem conhecidas (CAMPOS; LIMA, 1986).

Um caminho para se conhecer novos materiais detectores para uso em dosimetria com a técnica OSL é avaliar os materiais termoluminescentes já estabelecidos que demonstrem sensibilidade à luz. Nesse sentido, este projeto propõe o estudo das propriedades dosimétricas pela técnica OSL do sulfato de cálcio com diferentes dopantes. Poucos trabalhos na literatura iniciaram essa investigação.

Pradhan e Ayyangar (1977) reportaram que o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ poderia ser utilizado como dosímetro opticamente estimulado. Em seu estudo, eles apontaram que esse fósforo irradiado poderia ser estimulado com luz visível ou ultravioleta, e que a resposta é sensível o suficiente para sua utilização em dosimetria das radiações. Eles utilizaram o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em pó e lâmpada de mercúrio com filtro Corning 7-54 (para estimulação UV) e lâmpada de tungstênio (estimulação acima de 400nm, inclusive infravermelho) e reportaram fosforescência após a irradiação, a qual decai a 10% após 7h. Os autores conduziram suas medidas 24h após irradiação para garantir que não houvesse interferência dessa fosforescência na

medida OSL e a resposta com a dose observada foi linear até 10^3 Gy (irradiação gama de fonte de Co-60); a dose mínima detectável obtida foi 10^{-2} Gy \pm 3%.

Pradhan e Bhatt (1981) compararam as respostas do CaSO₄:Dy com as técnicas TL, luminescência estimulada com UV e luminescência estimulada com comprimentos de onda acima de 400 nm e, principalmente, infravermelho. Seu estudo apontou que o espectro de emissão desse material é o mesmo para as três técnicas: 451 nm, 478 nm e 571 nm. O *fading* do sinal estimulado com UV é de 9% após 16 dias de armazenamento no escuro, comparável ao *fading* insignificante do sinal TL. Já o sinal estimulado com uma lâmpada de tungstênio decaiu quase 60% em menos de 15 dias, o que os autores justificaram que a estimulação com infravermelho não consegue liberar os elétrons das armadilhas profundas, resultando num sinal instável como o do pico TL de 140°C desse material. Já Pradhan *et al* (1983) avaliaram a aplicabilidade do uso do CaSO₄:Dy com a técnica OSL apenas para dosimetria de nêutrons rápidos.

Enquanto as propriedades dosimétricas de CaSO₄:Dy como detector TL são bem conhecidas e há inúmeras publicações na literatura, a aplicabilidade do CaSO₄:Dy com a técnica OSL foi apontada por Pradhan (1981) e as propriedades dosimétricas OSL desse material não são totalmente descritas na literatura. Falta estudo detalhado do sinal OSL do CaSO₄:Dy, que pode ou não resultar em sua aplicação como um detector OSL. Um material dosimétrico é apropriado para ser usado como detector de radiação quando o material: i) apresenta resposta linear à dose na faixa em que será utilizado; ii) possui sensibilidade às energias e tipos de radiação que são conhecidos e adequados para o uso; iii) possui um sinal estável ou baixa degradação do sinal com tempo de armazenamento (baixo *fading*) e iv) fornece resposta reproduzível considerando as mesmas condições de irradiação.

Há registros em literatura de estudos da aplicabilidade da técnica OSL utilizando-se o sulfato de cálcio com outros dopantes também, sendo o CaSO₄:Eu o mais estudado com a técnica OSL. Alguns autores avaliaram as características TL do sulfato de cálcio com diferentes dopantes e investigaram preliminarmente a presença de resposta OSL desses materiais.

Kulkarni *et al* (2014) publicaram seu estudo preliminar das propriedades dosimétricas da luminescência opticamente estimulada (OSL) do CaSO₄:Eu. Os autores reportaram que o detector de CaSO₄:Eu que eles produziram, pelo método de precipitação, apresenta sensibilidade OSL equivalente a 55% da sensibilidade

OSL do $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$. Observaram também resposta linear com a dose até 1 Gy e *fading* de armazenamento insignificante em 10 dias (em comparação com o sinal apresentado logo após as primeiras 24 h).

Guckan *et al* (2017) estudaram as propriedades OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ com mais detalhes. Eles reportaram singela sublinearidade da resposta com a dose para a faixa de dose entre 0,1 e 50 Gy e resposta linear para a faixa de 50 a 100 Gy. Com relação ao *fading* do sinal OSL de detectores armazenados no escuro, os pesquisadores observaram desvanecimento de 8% nas primeiras 24h e apenas 4% após 28 dias. Segundo seus estudos, o sinal OSL deve estar relacionado às mesmas armadilhas responsáveis pelo pico TL de 240°C.

Uma avaliação da dependência energética do detector de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ foi feita para elétrons (6 a 22 MeV) e fótons (0,38 a 15 MeV) e o resultado demonstrou variação da resposta dentro das faixas de incerteza, de forma que os autores sugerem avaliação mais detalhada no futuro. A reprodutibilidade desses detectores foi avaliada na repetição de 10 ciclos de irradiação e leitura OSL e resultou em desvio máximo de -2,7% no décimo ciclo. Enquanto isso, a possibilidade de releitura OSL do mesmo detector resultou em 30 leituras de 1 s de estimulação até que o sinal OSL decresceu para nível de *background* (GUCKAN *et al.*, 2017).

Recentemente, Patle *et al* (2019) avaliaram o efeito do tamanho dos grãos na resposta OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ produzido por co-precipitação e concluíram que a amostra de 0,1 M, com grãos entre 100 e 500 nm apresentou maior sensibilidade OSL (em comparação a grãos menores) e equivalente a aproximadamente 18% da sensibilidade do $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ comercial. Adicionalmente, Mandlik *et al* (2020) compararam as respostas TL e OSL de amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ nanocristalinas e $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ microcristalinas submetidas a diferentes tratamentos térmicos. Eles observaram maior sensibilidade na amostra nanocristalina tratada a 900°C e reportaram dose resposta linear dessas amostras na faixa de 0,02 Gy a 100 Gy.

Bahl *et al* (2017) checaram a possibilidade de uso do $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ como dosímetro OSL. O sulfato de cálcio dopado com manganês era promissor como TLD dada a sua alta sensibilidade, entretanto o alto *fading* do sinal limitou bastante o seu uso. Nesse trabalho, os autores concluíram que o $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ é promissor como detector OSL, após avaliarem que: (i) o *fading* (armazenamento no escuro) do sinal OSL é de aproximadamente 15% em 24h (não avaliaram para períodos

maiores); (ii) a dose resposta é linear para a faixa de 0,1 a 100 Gy (radiação gama); e (iii) o teste de reprodutibilidade verificado em 12 ciclos de irradiação, leitura OSL e *annealing* não resultou em variação da intensidade OSL acima de 4% (após 12 ciclos).

Em sua tese de doutorado, Junot (2017) estudou o potencial de novos detectores baseados em CaSO_4 com diferentes combinações de impurezas ($\text{CaSO}_4:\text{Eu,Ag}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Eu}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Yb}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Tm,Ag}$), usando técnicas TL e OSL. Ele observou sinal OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Eu,Ag}$ com resposta linear com a dose para a faixa de 0,1 a 1 Gy. As amostras com combinações de Tb apresentaram sinal OSL e é necessário estudo mais detalhado de suas características. As amostras dopadas com Tm não apresentaram resposta OSL quando estimuladas com LED azul após irradiação.

Recentemente, Silva (2019) conclui em sua Dissertação de Mestrado que os compostos por ele produzidos, $\text{CaSO}_4:\text{Tb}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Ag(NP)}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Ag(Ox)}$ e CaSO_4 puro apresentam sinal OSL. Ele conclui que os cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Ag(NP)}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Tb}$ apresentaram maior sensibilidade OSL que o $\text{CaSO}_4:\text{Tb,Ag(Ox)}$ e que o CaSO_4 puro. Todas as amostras por ele avaliadas apresentaram sinal linear, com respostas OSL proporcionais à dose absorvida na faixa estudada.

5.4 Outros materiais com propriedades para uso em dosimetria OSL

Enquanto os materiais bem estabelecidos para dosimetria OSL são o óxido de alumínio e o óxido de berílio, há vários outros materiais em estudo com potencial para utilização em dosimetria com a técnica da luminescência opticamente estimulada.

Outros materiais que foram ou estão sendo avaliados para sua utilização com a técnica OSL, por diferentes grupos de pesquisa, estão expostos na Tabela 1 abaixo, publicada por Pradhan *et al* (2008).

Tabela 1 - Alguns materiais (com potencial de uso com a técnica OSL), suas características dosimétricas e as referidas referências bibliográficas.

| Material detector OSL | Referência | Sensibilidade OSL relativa | Faixa linear de reposta com a dose | Comprimento de onda de estimulação OSL (nm) | Comprimento de onda da emissão principal (nm) | Taxa de fading | Z Ef (Tissue =7.4) |
|--|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|---|---|---|--------------------|
| Al ₂ O ₃ :C | (AKSELROD; MCKEEVER, 1999) | 1.00 | μGy-10Gy | 450-550 | ~420 | <5%/ano | 11.3 |
| BeO | (SOMMER et al., 2007) | ~1.00 | μGy-10Gy | ~ 435 | ~335 | 6% nas primeiras 10h e depois estabiliza | 7.2 |
| MgO:Tb | (BOS et al., 2006) | ~1.00 | 100μGy-10Gy | 500-560 | 375, 420, 440, 470, 500, 650 | 43% nas primeiras 36h e depois estabiliza | 10.8 |
| NaMgF ₃ :Eu | (DOTZLER et al., 2007) | ~10.0 | μGy - 100Gy | ~ 470 | 360 | 40% nas primeiras 24h e depois estabiliza | 10.4 |
| KMgF ₃ :Ce | (LE MASSON et al., 2001) | ~10.0 | 1μGy-10Gy | ~ 470 | ~360 | fading alto e auto-irradiação por K-40 | 14.7 |
| Li ₂ Al ₂ O ₄ :Tb | (MITTANI et al., 2008) | ~0.01 | 200μGy-10Gy | <532 | 370, 420 and 440 | 50% nas primeiras 50h | 9.74 |
| Mg ₂ SiO ₄ :Tb | (MITTANI et al., 2008) | ~0.11 | 30μGy-10Gy | <532 | 370, 420 and 440 | 30% nas primeiras 10h | 11.23 |
| Mg ₂ SiO ₄ :Tb,Co | (MITTANI et al., 2008) | ~0.08 | 40μGy-10Gy | <532 | 370, 420 and 440 | 30% nas primeiras 10h | 11.23 |
| KCl:Eu | (NANTO et al., 1993) | ~1.00 | 100μGy-10Gy | 500-560 | 350-480 and 560-700 | fading alto e auto-irradiação por K-40 | 18.1 |
| KBr:Eu | (DOUGUCHI et al., 1999) | ~1.00 | 100μGy-10Gy | 500-560 | 350-480 and 560-700 | fading alto e auto-irradiação por K-40 | 31.76 |
| (NH ₄) ₂ SiF ₆ :Tl | (LE MASSON et al., 2004) | ~0.02 | > few mGy | 470 | 300-370 | Auto-irradiação e 80% nas primeiras 10h | 10.31 |
| Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :C | (DOTZLER et al., 2006) | ~0.10 | 10mGy-100Gy | 500-560 | 350-480 and 560-700 | insignificante em 2 meses | 33.81 |

Fonte: PRADHAN *et al.* (2008).

Dos materiais mencionados, ressalta-se o KBr:Eu, que demonstra excelente potencial para dosimetria em tempo real em aplicações médicas, basicamente porque apresenta sinal OSL muito rápido (aproximadamente 25 ms) (KLEIN; MCKEEVER, 2008). McKeever (2011) ressaltou, entretanto, que, devido ao alto *fading* do sinal em temperatura ambiente, esse material não é adequado como dosímetro de integração de dose.

Há outros materiais relevantes que não estão relacionados nessa tabela de 2008. Considerando materiais detectores de origem nacional, Malthez *et. al* (2018), em estudo sobre as propriedades OSL dos detectores de CaF₂ com cloreto de sódio (CaF₂:NaCl), mostraram que estes apresentam um alto decaimento da

resposta (*fading*) transcorridas 72h após a irradiação, mas com uma estabilização do sinal OSL após esse intervalo, avaliado ao longo de 30 dias.

Oliveira *et al.* (2016) reportaram a produção de MgO:Li,Ce,Sm com propriedades dosimétricas interessantes. Usando OSL, obtiveram dose mínima detectável de 0,2 μ Gy e resposta linear com a dose de 2 mGy a 20 Gy. Eles observaram *fading* do sinal OSL de 7 % em 35 dias.

Recentemente, outros pesquisadores estão dando atenção especial ao MgB₄O₇:Ce,Li, que tem se mostrado promissor para a dosimetria OSL (SOUZA *et al.*, 2017; YUKIHARA *et al.*, 2017). Gustafson *et al.* (2019) buscaram otimizar a produção desse material e demonstraram que o uso de precursor de alta pureza aumenta a intensidade do sinal OSL do MgB₄O₇:Ce,Li em 3 a 4 vezes em comparação com as amostras que sintetizaram no estudo anterior. Souza *et al.* (2019) avaliaram as características dosimétricas do tetraborato de magnésio dopado com cério e lítio que produziram e reportaram dose mínima detectável de aproximadamente 1 mGy, resposta com a dose linear até 100 Gy, *fading* do sinal OSL em temperatura ambiente menor que 5% em 40 dias e tempo de vida das luminescências de aproximadamente 3 μ s. As autoras concluíram que esse material apresenta características favoráveis para o uso de leitura scanner em dosimetria bidimensional e para dosimetria in-vivo.

O presente trabalho deu ênfase aos estudos com sulfato de cálcio, descritos no item anterior, porque ele é produzido no IPEN há décadas (CAMPOS; LIMA, 1986; LALIC *et al.*, 2019) e, portanto, de fácil aquisição para a produção dos filmes OSLD objetivo deste projeto.

5.5 Filmes detectores

Os detectores em forma de filme amplamente utilizados para mapeamento bidimensional de doses, tanto em radiologia quanto em radioterapia, são os filmes radiológicos e radiocrômicos.

Enquanto esses filmes apresentam alta resolução espacial, o que é essencial para a verificação de gradientes de dose acentuados, eles apresentam um problema: a quantificação da variação da resposta depende de calibração e eles não são reutilizáveis (HARTMANN *et al.*, 2010).

A desvantagem desses filmes é que eles são descartáveis. Isso faz com que a calibração seja feita com um filme e as medidas, com outros, de forma que a acurácia dos resultados fica dependente da variabilidade da produção dos filmes. Além disso, eles são apenas disponíveis comercialmente e a custo bastante elevado no Brasil. A grande vantagem da técnica OSL é a possibilidade de reutilização dos detectores. Dessa forma, este trabalho desenvolveu, produziu e caracterizou filmes OSLD que são de fácil aquisição (custo relativamente baixo) e reutilizáveis para aplicação em mapeamento bidimensional de dose.

5.6 Filme OSLD baseado no óxido de alumínio

O detector utilizado com a técnica OSL mais conhecido é chamado de Luxel[®] e é produzido e comercializado pela Landauer Inc. Trata-se de uma fita plástica (poliestireno) contendo uma camada fina de pó de óxido de alumínio dopado com carbono. Essa fita pode ser disponibilizada em forma de rolo com 15 mm de largura e 0.3 mm de espessura de área ativa e corta-se o comprimento desejável. Comercialmente, o Luxel[®] é usado em discos de 7 mm e integra o sistema InLight microStar[®] de dosimetria pessoal comercializado pela Landauer Inc.

Yukihara *et al* (2009) utilizaram o Luxel[®] cortado em tiras (5 mm x 150 mm) para medição de perfil de dose em tomografia computadorizada (TC) e também um leitor OSL com LED desenvolvido no laboratório com trilho motorizado para a leitura automatizada ponto a ponto da tira de Luxel[®]. Os autores obtiveram perfis de dose de TC e valores de CTDI₁₀₀, que diferiram menos de 5% quando comparados com os obtidos com câmara de ionização tipo lápis nas mesmas condições experimentais.

Assim, esses pesquisadores demonstraram a possibilidade de dosimetria OSL 1D de forma relativamente simples e o referido estudo corrobora com a viabilidade do presente projeto indicando que se pode produzir filmes OSLD para diferentes aplicações de dosimetria 1D e 2D.

Além do Luxel[®], conhecido há quase 20 anos, há outros filmes produzidos de forma experimental pela Landauer Inc recentemente. Um deles é também composto de Al₂O₃:C e o outro, de Al₂O₃:C,Mg (AHMED *et al.*, 2016, 2017; AHMED *et al.*, 2014). Ahmed *et al* (2014) descrevem que a composição é a mesma,

com a diferença de que, nos novos filmes, os grãos são menores que os do Luxel^R. Segundo Ahmed *et al* (2017), esse filme consiste em camada de 75 µm de poliéster e camada de 47 µm de partículas de óxido de alumínio (grãos de aproximadamente 15 µm) em ligante. A Landauer Inc. produziu esse filme de 125 µm de espessura em rolo de 30 cm de largura. Os autores mencionam que, devido ao uso de grãos de tamanhos menores, esse novo filme é visivelmente mais homogêneo que o Luxel^R.

Ahmed *et al* (2014) descrevem a leitora OSL desenvolvida pelo grupo de pesquisa para dosimetria 2D com esses novos filmes OSLD de óxido de alumínio da Landauer Inc. Trata-se de uma leitora scanner que utiliza laser verde (de potência aproximadamente 100 mW) para estimulação do sinal OSL que, por sua vez, é detectado por fotomultiplicadora com filtro Hoya U-340.

Algumas características desse sistema OSL 2D citadas pelos autores (AHMED *et al.*, 2017) são resposta com a dose aproximadamente linear-exponencial de 20 mGy a 70 Gy, dose mínima detectável menor que 1 mGy, doses medidas em concordância dentro de 1% com medidas da câmara de ionização e resolução espacial submilimétrica.

Ressalta-se que esses três filmes OSLD são baseados em óxido de alumínio e sua metodologia de produção é propriedade da Landauer Inc. No sentido contrário, este trabalho tem como objetivo disponibilizar a forma de produção de detectores OSL não-comerciais em filmes feitos com materiais de fácil aquisição.

5.7 Dosimetria OSL bidimensional com BeO

O BeO é comercializado na forma de pó, difícil de ser manipulado devido à toxicidade, ou em placas cerâmicas, mais comum de serem utilizadas em dosimetria, com diferentes tamanhos e formatos (Materion Ceramics^R). Alguns trabalhos destacam a viabilidade desse material para dosimetria 2D.

Jahn *et al* (2010) apresentaram um sistema dosimétrico 2D para leitura OSL de Thermalox^R em placas de (52 x 52 x 1) mm. Tratava-se de um leitor ponto a ponto da área da placa de BeO, cujas principais limitações eram a resolução espacial (prejudicada pelo espalhamento da luz de estimulação no material detector) e o longo tempo de leitura de cada placa. Posteriormente, esse sistema foi aprimorado com a utilização de fibra acoplada ao LED para estimulação e com

a possibilidade de uso de múltiplas fibras, para a estimulação simultânea de 8 pontos do detector (JAHN *et al.*, 2011). Dessa forma, o tempo de leitura diminuiu para 2min por placa (52 x 52 mm) e os autores reportaram resposta com a dose linear de 10 μ Gy a 10 Gy.

As propriedades OSL do BeO são satisfatórias e o leitor desenvolvido apresentou bons resultados. O grupo de pesquisa utilizou o denominado sistema BeOmax para aplicações em dosimetria 2D em diferentes áreas (JAHN *et al.*, 2013). A principal limitação do sistema reside no monopólio de comercialização do detector e, conseqüentemente, na dependência do tamanho e forma do Thermalox^R comercializado pela Materion Ceramics Inc.

5.8 Filme OSLD baseado em CaF₂

Primeiramente, Nakhaei *et al* (2012) apresentaram fibra feita de álcool polivinílico (PVA) e CaF₂. Eles sintetizaram nanopartículas de CaF₂ por método de co-precipitação e produziram fibras de PVA com diferentes quantidades de CaF₂. Nakhaei e Shahtahmassebi (2015) sintetizaram CaF₂:Er por método de co-precipitação e obtiveram filmes de PVA pela técnica de eletrofiação. As nanofibras PVA/CaF₂:Er apresentaram luminescência de conversão ascendente e eles podem ser usados para aplicação a laser e bioimagem em tecnologia médica.

Souza *et al* (2017) apresentaram um filme OSLD flexível de CaF₂:Ce em uma matriz de PVC. A produção é feita por fundição de solução seguida de evaporação do solvente (acetona benzeno). O grupo de pesquisa não avaliou mapeamento de dose com esse filme. No estudo, cortaram o filme em amostras de tamanho 0.4 x 0.4 cm para leitura do sinal OSL e verificaram que: (i) as respostas OSL de cada lado da mesma amostra do filme são similares; (ii) a máxima diferença no sinal OSL de diferentes amostras do mesmo filme foi 4.5%; e (iii) a resposta com a dose mostra tendência linear de 100 a 700 mGy, com barras de erro de 10% nesse estudo preliminar.

Os autores propuseram o uso desse filme OSLD em pacientes para medidas in-vivo de dose na entrada da pele. Pode-se observar que os pesquisadores demonstraram metodologia para produção de filmes OSLD de PVC com microcristais de CaF₂:Ce. Enquanto o referido filme pode ser promissor, ainda

é necessária a sua caracterização dosimétrica detalhada. Também falta a avaliação de possibilidade de mapeamento bidimensional de dose.

Malthez *et al* (2018) apresentaram uma metodologia de baixo custo para produção de filmes detectores de CaF_2 , consistindo em pó de fluorita natural em uma matriz semi-orgânica à base de silicone acético.

Pagotto *et al* (2019) estudaram a resposta em energia desses filmes OSLD de CaF_2 para dosimetria pessoal. O mesmo grupo avaliou o aumento da eficiência de detecção dos filmes adicionando nanopartículas de prata (REWAY *et al.*, 2019). Além disso, foi demonstrada a aplicabilidade desses filmes para mapeamento de dose em radiocirurgia (MARTINS *et al.*, 2020; TORQUATO, 2019). Esses estudos corroboram com a viabilidade do presente trabalho.

5.9 Filme OSLD baseado em BaFBr

Recentemente, pesquisadores da Bélgica estudaram a utilização de filmes OSLD relativamente largos produzidos experimentalmente pela Agfa HealthCare, para aplicação em radioterapia (CRIJNS *et al.*, 2017). Esses filmes, que foram produzidos pela empresa para teste, são compostos de duas camadas: uma de 196 μm de polietileno e a outra, a camada ativa, de 23 μm , de partículas de BaFBr (5%) dispersas em solução aglutinante de polímero (DE ROOVER *et al.*, 2019). Crijsns *et al* (2017) avaliaram a aplicação desse filme, no tamanho 20 x 18 cm^2 e número atômico efetivo de 4.43, em radioterapia de intensidade modulada (IMRT) e De Roover (2019) testaram a aplicabilidade de filme maior, de 43 x 35 cm^2 e número atômico efetivo de 4.55, em radioterapia de campo estendido (EFRT).

Para estimulação e leitura do sinal opticamente estimulado desses filmes, os pesquisadores utilizaram scanners comerciais produzidos pela Agfa HealthCare, Flying Spot CR-15-X e CR-10-X, e realizaram o processamento dos dados em Matlab. Com o equipamento scanner, o sinal é estimulado com laser vermelho e detectado por fotomultiplicadora (não ficou claro qual a faixa de comprimento de onda detectada nesses estudos).

Roover *et al.* (2019) estabeleceram uma metodologia de calibração para corrigir a forte dependência energética desse filme e confirmaram a sua aplicabilidade em dosimetria clínica. Segundo eles, é o primeiro dosímetro 2D que combina tamanho grande, boa resolução (0.2 mm) e possibilidade de reuso. Com

relação à resposta com a dose, reportaram linearidade de 0 a 32 Gy (CRIJNS *et al.*, 2017).

Além da metodologia de correção pela dependência energética e da avaliação da resposta com a dose, os pesquisadores não avaliaram outras características dosimétricas, como o *fading* do sinal. No caso, eles estabeleceram um tempo padrão entre irradiação e leitura de 5min para todas as suas medições e, para garantir limpeza do sinal OSL do filme, repetiram mais de uma vez a leitura.

Esses estudos, embora promissores, avaliaram o protótipo de um filme OSLD o qual, se vier a ser comercializado, será monopólio de uma empresa (Agfa Healthcare), tanto o detector quanto o sistema leitor.

Outro grupo de pesquisa publicou um estudo realizado com BaFBr:Eu, no qual produziram detectores à base desse material e elastômetro de silicone (KIM *et al.*, 2018), propondo seu uso para dosimetria 1D *in vivo*. Os autores produziram fitas flexíveis de (5 x 100 x 1) mm e desenvolveram um sistema de leitura para essas fitas, com uma base translacional. O leitor e o uso de fitas OSL foram antes propostos por (YUKIHARA *et al.*, 2009). A inovação do sistema de Kim *et al.* (2018) é a leitura tanto do sinal OSL (estimulação com laser vermelho) quanto do sinal PL (estimulação UV). Eles consideraram que a intensidade do sinal PL é proporcional à densidade do material e, portanto, utilizaram o valor PL para corrigir o sinal OSL medido, de forma a normalizar os resultados a variações de densidade da fita.

Esse trabalho reporta linearidade da resposta com a dose de 0 a 6 Gy. A resolução espacial do sistema filme e leitor é $1.09 \text{ mm} \pm 4.5\%$. Os autores discutiram duas dificuldades do material que afetam os resultados: *fading* do sinal OSL (observaram aproximadamente 20% de decaimento do sinal OSL em 20min) e fosforescência de vida longa (calcularam que para diminuir a incerteza dos resultados deveriam aguardar 18min após a irradiação, antes de realizar a leitura da fita). A conclusão do trabalho é que o BaFBr:Eu não é o material mais adequado para essas fitas por conta dessas características.

5.10 Filme OSLD baseado em SrS:Ce,Sm

Há mais de duas décadas, pesquisadores na França propuseram o uso de filme OSLD composto de uma camada ativa de partículas de sulfeto de magnésio dopado com cério e samário depositadas em filme de Kapton^R para

mapeamento de dose em feixes de elétrons de alta energia (DUSSEAU *et al.*, 1999).

Idri *et al.* (2004) utilizaram esse tipo de filme com sulfeto de estrôncio dopado com cério e samário, preparado com 150 μm de espessura e tamanho 15 x 15 cm^2 , para avaliação da distribuição de doses em campos de radiação de feixes de fótons em IMRT. O sistema leitor foi desenvolvido para esse estudo, consistindo basicamente em LED infravermelho para estimulação e fotomultiplicadora para detecção do sinal. Os autores reportaram resolução espacial de 500 μm , resposta com a dose linear para a faixa de zero a 10 Gy e variação de 4.7% da resposta OSL para diferentes feixes de fótons com energias de 6 a 18 MeV. Eles concluíram que é possível o mapeamento de doses em IMRT com a utilização dos filmes OSLD de SrS:Ce,Sm.

Idri *et al.* (2004) não mencionaram o procedimento de *annealing* adotado. A desvantagem desse tipo de filme OSLD é a baixa temperatura máxima a que pode ser submetido para não danificar e possibilitar seu reuso. O grupo que propôs o uso desses filmes OSLD, em 1998, mencionou que foi utilizado, no máximo, dose absorvida de 1 Gy e *annealing* na temperatura de 80°C para possibilitar reuso do filme OSLD (DUSSEAU *et al.*, 1998).

No presente trabalho, foram produzidos filmes OSLD, suas propriedades dosimétricas foram avaliadas e procedimentos de *bleaching/annealing*, estabelecidos para a reutilização deles.

5.11 Filme OSLD baseado em KCl:Eu²⁺

Em 2014, Li *et al.* (2014) relataram a produção experimental de filmes de KCl:Eu²⁺ por dois métodos: vaporização-deposição e fundição em fita. Além disso, os autores desenvolveram um protótipo de sistema leitor dos filmes, com laser para estimulação e fotomultiplicadora para detecção do sinal. O grupo realizou algumas medidas em laboratório, comparando a resposta OSL dos referidos filmes com pastilhas de KCl:Eu²⁺ e obtiveram resultados semelhantes.

Como esse estudo inicial não contemplou a aplicação dos filmes em feixes clínicos, o grupo realizou simulações por Monte Carlo para estimar a dependência energética desses e obteve diferença máxima de 1.6% na região

periférica (fótons espalhados de baixa energia) quando simularam filme com 20% de KCl e 80% de ligante.

A pesquisa demonstrou a viabilidade de fabricação em laboratório de filmes de KCl:Eu²⁺. Para que os filmes venham a ser utilizados, entretanto, dada a natureza higroscópica do KCl, é necessário o desenvolvimento de alguma forma de encapsulamento para proteção do filme em relação à umidade ambiente. Fora isso, a produção de filme pelo método de fundição em fita requer o desenvolvimento de uma forma de processamento do pó de KCl sem umidade, visando à obtenção de partículas de poucos micrometros.

Resumindo, os resultados apresentados pelo grupo demonstram a possibilidade de fabricação e utilização de filmes baseados em KCl:Eu²⁺ para mapeamento de dose. Estudos futuros são imprescindíveis e ainda devem contemplar aprimoramento das metodologias de produção dos filmes, método de encapsulamento (proteção contra umidade), aplicação dos filmes em feixes clínicos e estudo detalhado de suas características dosimétricas.

5.12 Filme OSLD baseado em NaMgF₃:Eu

Recentemente, Schuyt e Williams (2019) demonstraram que é possível utilizar filme OSLD com NaMgF₃:Eu e câmera CCD para dosimetria 2D em radioterapia. Eles produziram protótipo desse filme, em laboratório, usando partículas de NaMgF₃:Eu de tamanhos entre 1 e 10 µm em solução de resina epóxi curada sobre camada plástica. Esse filme tem aproximadamente 21 x 27 mm com espessuras: 0.85 mm da camada de resina mais detector e 200 µm de base plástica. A dupla propôs o uso de sistema de estimulação com LED e detecção com câmera CCD para a leitura dos filmes OSLD.

Os autores compararam os resultados do filme com o NaMgF₃:Eu puro e verificaram que a resolução espacial obtida (com o sistema de câmera CCD montado) do material puro foi melhor que do filme produzido. Eles concluíram que devem otimizar o tamanho das partículas e produzir filmes mais finos para melhorar a homogeneidade e reduzir o espalhamento de forma a garantir melhor resolução espacial. Por fim, os pesquisadores avaliaram a resposta com a dose do material e os resultados demonstraram linearidade de pouco menos de 1 Gy até 100 Gy.

Esse estudo demonstrou a viabilidade de produção de filmes OSLD com $\text{NaMgF}_3:\text{Eu}$ e resina epóxi. É necessário estudo mais detalhado almejando-se a obtenção de filmes mais finos e homogêneos. Os pesquisadores não mencionaram sobre a possibilidade de se produzir filmes maiores.

5.13 Filme OSLD baseado em LiMgPO_4

Recentemente, Sadel *et al* (2020a) apresentaram um filme OSLD produzido com silicone e LiMgPO_4 , o qual tem alta sensibilidade e resposta com a dose linear para larga faixa de doses (SADEL *et al.*, 2020). O filme foi produzido em três diâmetros (8 mm, 14 mm, e 25 mm) e 0.4 mm de espessura. Os autores estabeleceram um procedimento de *annealing* com *bleaching* no leitor Risø: estimulação com LED azul por 30 min à temperatura de 200°C e reportaram reprodutibilidade satisfatória nas repetidas leituras OSL (com esse tratamento entre elas).

O grupo de pesquisa avaliou a resposta OSL desses filmes tanto no leitor Risø, quanto em um microscópio fluorescente com câmera CCD altamente sensível. Também observaram que o *fading* do sinal OSL chega a 30% em 2h de armazenamento escuro dos detectores. Na avaliação da resposta com a dose, de 2 a 100 Gy, relataram uma leve tendência supra linear, a qual deve ser verificada em estudo futuro porque pode ser afetada pelo *fading* do sinal durante a irradiação (tempo maior de irradiação para doses mais altas).

Os autores testaram a aplicabilidade dos seus filmes em dosimetria clínica de próton terapia. Utilizaram 13 filmes OSLD de 14 mm de diâmetro cada em blocos simuladores de PMMA e irradiaram com feixe colimado (5 mm diâmetro) de prótons (58.8 MeV). Eles obtiveram a dose relativa em água para cada profundidade e compararam com os resultados obtidos da câmara de ionização Markus. Desse modo, verificaram que a resposta OSL é 50% menor no pico Bragg e, a partir da leitura corrigida dos filmes, reconstruíram a distribuição de doses na água.

Esse estudo demonstra a viabilidade de produção de filmes OSLD e de sua aplicação em dosimetria clínica para avaliação de distribuição espacial de dose.

5.14 Filme OSLD baseado em LiF:Mg,Cu,P

Logo após a publicação acima mencionada, Sadel *et al.* (2020b) reportaram a produção em laboratório de filme OSLD à base de silicone e LiF:Mg,Cu,P (SADEL; BILSKI; KŁOSOWSKI; et al., 2020). Eles escolheram esse material detector porque o número atômico efetivo é menor que do óxido de alumínio e por não ser tóxico na forma de pó, como o BeO. Os pesquisadores produziram filmes transparentes e flexíveis de 8 mm de diâmetro e 0.5 mm de espessura. Em seguida, realizaram as leituras OSL em sistema por eles desenvolvido, com estimulação por LED azul e detecção por câmara CCD, e no leitor OSL Risø para fins de comparação.

Os resultados mostraram boa reprodutibilidade com a metodologia de *annealing* e *bleaching* que os pesquisadores estabeleceram. A concordância entre os resultados obtidos do sistema de câmara CCD e do leitor Risø demonstram que o sistema leitor desenvolvido é satisfatório. Os autores apresentaram a resposta com a dose de 1 a 100 Gy, com tendência sublinear e o *fading* do sinal OSL (protegido da luz ambiente) chega a 50% em 4h. Outras características dosimétricas dos filmes propostos ainda não foram reportadas.

Essa pesquisa demonstra a possibilidade de produção de pequeno filme OSLD à base de silicone e LiF:Mg,Cu,P e de uso de sistema leitor de imagem com câmara CCD desenvolvido em laboratório. Os autores afirmam que é necessário um estudo mais profundo para que se possa produzir filmes em tamanhos maiores com boa homogeneidade e que é preciso melhorias no processamento de imagem (correções) para viabilizar a leitura dos filmes OSLD maiores. Os filmes produzidos ainda não foram testados em aplicações.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no IPEN, na Gerência de Metrologia das Radiações (SEGMR), o qual possui infraestrutura para produção e caracterização dos filmes OSLD. Os materiais e equipamentos utilizados estão descritos juntamente com as metodologias adotadas, nos subcapítulos que seguem.

6.1 Seleção de matriz do filme

6.1.1 Preparação de filmes

A fim de selecionar o material base mais adequado para o desenvolvimento do filme OSLD, diferentes materiais foram testados (Figura 2). Eles foram cedidos pela Prof^a. Dra. Anna Luiza Malthez, do Departamento de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Foram testados seis diferentes materiais:

- Silicone-borracha T2 da fabricante Dow Corning (material A): incolor, vendido em componente borracha mais catalisador líquido, com tempo de cura de 24h em temperatura ambiente, suporta até 190°C quando curada (proporção de preparo de 10% de massa de catalisador em relação a massa da borracha, conforme especificação do fabricante);
- Borracha de silicone Siquol Platina D-30 (material B): translúcida, vendida em dois componentes para mistura na proporção de 1:1, com tempo de cura de 24h em temperatura ambiente, suporta até 250°C quando curada, além de possuir alta resistência a tração e torção, boa maleabilidade, ser atóxica e autodesmoldante;
- Silicone-borracha não acético para molde (material C): cor branco, vendido em componente borracha mais catalisador líquido com tempo de cura de 24h em temperatura ambiente, suporta até 280°C quando curado (proporção de preparo de 1 gota de catalisador para cada 1 g de silicone-borracha conforme especificação do distribuidor)
- Adesivo PU40 Flex da fabricante Solufix (material D): adesivo selante de poliuretano monocomponente, cor branco, temperatura de trabalho até 80°C;

- Silicone Solusil Multi 280 da fabricante Solufix (material E): silicone acético multiuso incolor com temperatura de trabalho até 100°C; e
- Silicone Solusil RTV da fabricante Solufix (material F): silicone acético de cor cinza, para uso em altas temperaturas, suporta até 320°C.

Figura 2 - Materiais testados para a matriz do filme OSLD.



Fonte: Autora

Para os testes iniciais, foram produzidos filmes puros, ou seja, sem material detector OSL. Os três primeiros materiais foram produzidos misturando-se manualmente a borracha e o respectivo catalisador ou componente, utilizando-se béquer de vidro e espátula. As massas foram medidas em balança digital Shimadzu

AY220 calibrada, do Laboratório de Materiais Dosimétricos (LMD) do SEGMR do IPEN-CNEN.

As misturas de silicone-borracha (A, B e C) foram depositadas em formas plásticas para curar à temperatura ambiente por 24h. Já as folhas de silicone solufix (D, E e F) foram abertas com rolo untado com vaselina, em superfície plástica e utilizadas também após 24h de cura em temperatura ambiente.

6.1.2 Pesquisa de características dos filmes puros

Depois da cura de 24h, foi utilizado um cortador de furo para confeccionar amostras circulares (diâmetro de 6 mm) de cada folha. Uma avaliação inicial foi realizada para averiguar se esses filmes puros teriam sinal OSL. Eles foram irradiados e lidos no leitor automatizado Risø TL/OSL DA-20 (DTU-Nutech). Tanto neste teste bem como nas demais leituras e avaliações do sinal OSL das amostras, utilizou-se dois leitores Risø TL/OSL DA-20 equipados com LED azuis para estimulação óptica: um equipamento está localizado no SEGMR do IPEN (Figura 3) e o outro foi disponibilizado pelo Grupo de Dosimetria das Radiações e Física Médica do Instituto de Física da USP (IFUSP). A janela de detecção adotada estava na faixa do ultravioleta, que foi selecionada utilizando um filtro Hoya U-340 em frente à fotomultiplicadora do leitor. Ambos os leitores são equipados com fontes embutidas de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ emissora de partículas beta ($E_{\text{med}}=2,7$ MeV) utilizadas nas irradiações, porém a taxa de dose na posição da amostra do leitor do IFUSP é cerca de 100 vezes menor que a do leitor do SEGMR, porque possui uma janela de berílio para reduzir a exposição das amostras. As irradiações e leituras OSL foram conduzidas em temperatura ambiente.

Figura 3 - Leitor Risø TL/OSL DA-20 (DTU-Nutech) do SEGMR do IPEN.



Fonte: Autora

Além de avaliar o sinal OSL dos possíveis materiais matrizes, foi conduzido um ensaio de resistência térmica dessas amostras e, para isso, utilizou-se o forno EDGON 3P do Laboratório de Dosimetria do IFUSP. Tendo em mente o procedimento de tratamento térmico (300°C por 15h) utilizado como padrão para as pastilhas TLD de sulfato de cálcio dopado com disprósio (quando irradiadas com altas doses), adotou-se 250°C por 15h para avaliar preliminarmente a resistência das amostras produzidas à temperatura.

Também foi testada a resistência das amostras ao tratamento térmico sugerido por Nunes (2012) para as pastilhas TLD de sulfato de cálcio dopado com cério (250°C por 2h). Duas amostras de cada material foram submetidas ao tratamento térmico de 250°C por 2h e duas a 250°C por 15h, enquanto outras duas amostras foram mantidas em temperatura ambiente como controle. Esses ensaios foram realizados na expectativa de que fosse necessário o uso de tratamento térmico para reutilização do filme OSLD.

6.2 Testes de eliminação de bolhas do filme

Visando à produção de um filme OSLD homogêneo e sem bolhas de ar, foi testada a cura em diferentes temperaturas, a utilização de cuba ultrassônica, de mesa vibratória e de rolo fura bolhas.

O Material A (Silicone-borracha T2 da Dow Corning) apresentou as melhores características como matriz para o filme OSLD. Entretanto, muitas bolhas de ar se formavam na produção do filme. Alguns testes foram conduzidos a fim de se eliminar as bolhas. Para esses testes, descritos a seguir, utilizou-se apenas o material matriz, sem detector OSL.

Primeiramente, a mistura de silicone borracha com seu catalisador foi colocada na forma e levada ao forno à temperatura de 40°C por 1h para depois curar em temperatura ambiente por 24h.

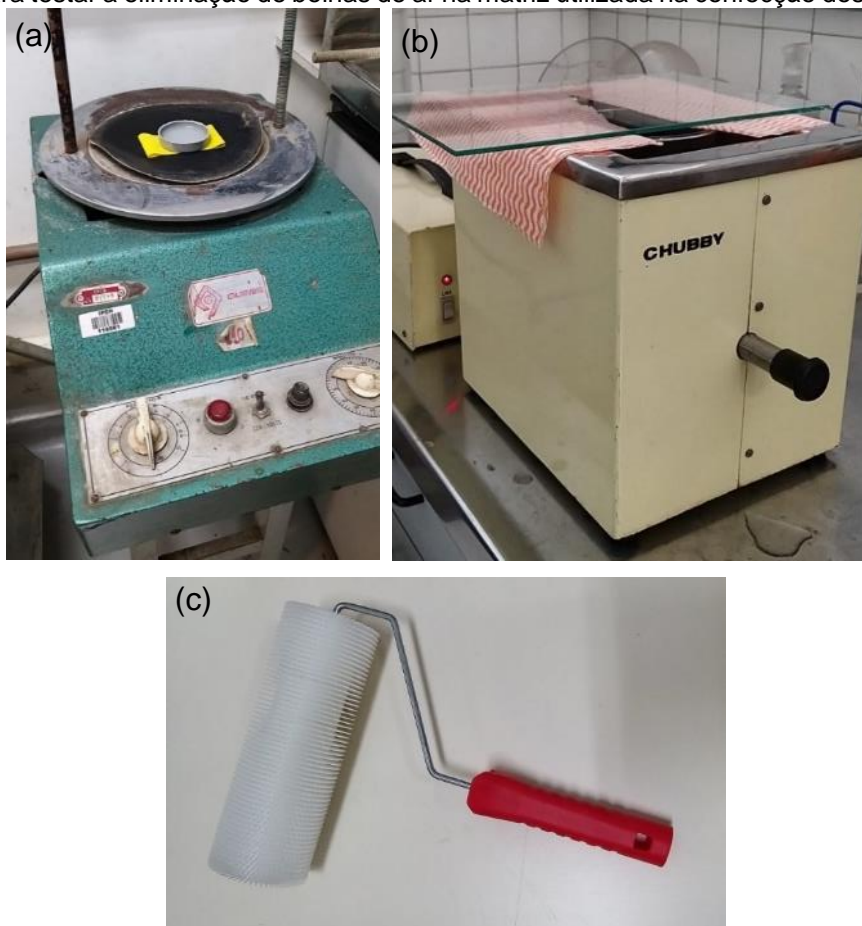
Depois, foi testado o uso de mesa vibratória Quimis (Figura 4a) do Laboratório de Cimentação e Caracterização de Produto da Gerência de Rejeitos Radioativos do IPEN. Imediatamente após o silicone-borracha e seu catalisador serem misturados, essa amostra foi colocada na mesa vibratória pelo período de 1h, e depois curou em temperatura ambiente por 24h.

Paralelamente, foi testado o uso de cuba ultrassônica Chubby (Figura 4b) do Laboratório de Materiais Dosimétricos (LMD) do IPEN/CNEN para eliminação das bolhas da matriz do filme. Para isso, a forma com a mistura de silicone-borracha e catalisador foi imediatamente colocada dentro de um béquer mergulhado em água na cuba ultrassônica. O procedimento foi repetido para diferentes períodos da amostra na cuba (logo antes da cura de 24h em temperatura ambiente): 1min, 30min, 1h, 3h e 5h.

Um rolo fura-bolhas DUPOL (Figura 4c), de uso em construção civil, foi também testado para eliminação de bolhas de ar da mistura da matriz antes de sua cura. Imediatamente após depositar a mistura de silicone-borracha e catalisador na forma, o rolo foi passado sobre ela, ida e volta por três vezes em cada direção.

Após a cura de 24h, todas as amostras produzidas foram comparadas visualmente para determinar qual o melhor método para eliminação de bolhas de ar da matriz do filme OSLD.

Figura 4 - (a) Mesa vibratória Quimis, (b) Cuba ultrassônica Chubby e (c) Rolo fura-bolhas DUPOL utilizados para testar a eliminação de bolhas de ar na matriz utilizada na confecção dos filmes OSLD.



Fonte: Autora

6.3 Testes de resistência mecânica da matriz

Depois de definido o método de produção do filme OSLD, foi realizado um estudo para se verificar qualitativamente se a resistência mecânica da matriz escolhida é afetada pela irradiação. O objetivo específico deste estudo foi avaliar a possibilidade de reuso do filme OSLD do ponto de vista mecânico (não-dosimétrico).

Para isso, foram produzidos 3 filmes iguais de matriz pura (sem material OSL) no mesmo lote de produção, cada filme medindo 6 x 6 cm² com espessura aproximada de 1,5 mm. Desses, um filme foi guardado novo, sem uso; o segundo, irradiado com 60 Gy (três irradiações de 20 Gy cada); e o terceiro filme, irradiado dez vezes com 20 Gy, totalizando a dose absorvida de 200 Gy.

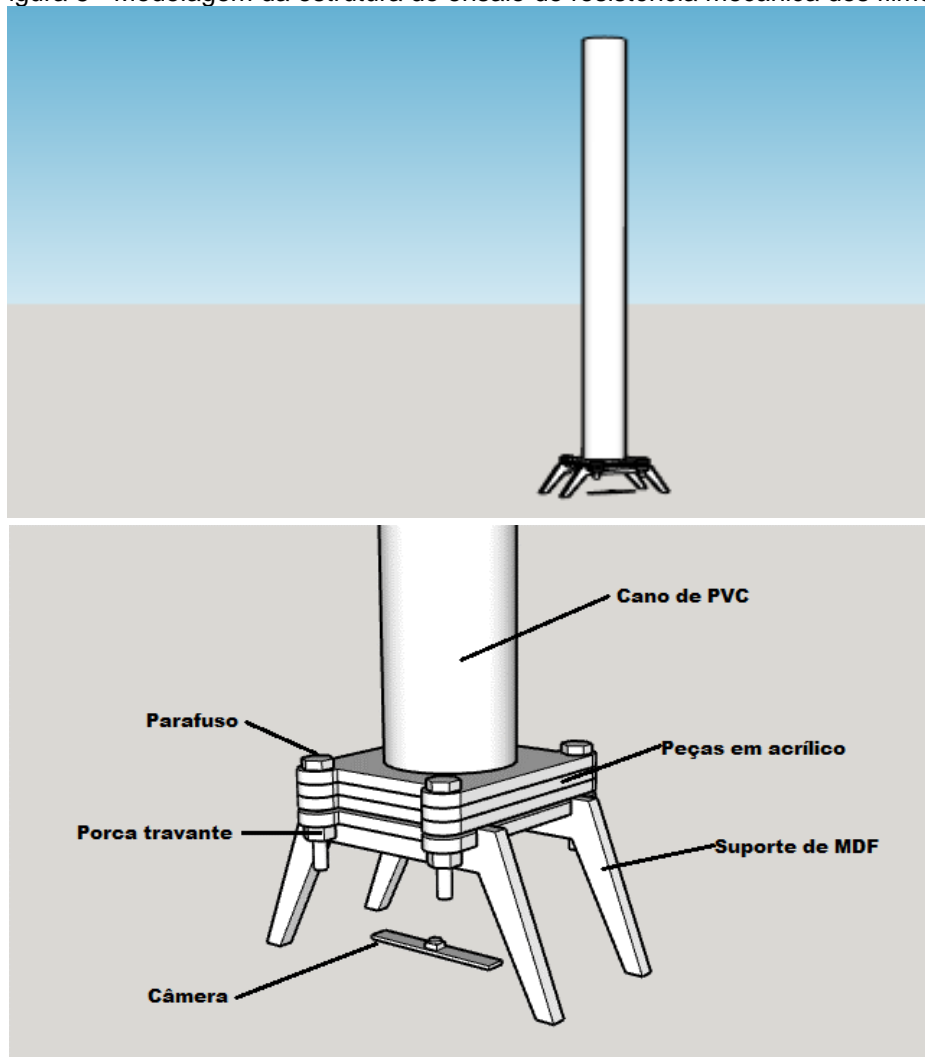
Essas irradiações foram realizadas na fonte GammaCell modelo 220 N, Atomic Energy of Canada Ltd., localizada no Centro de Tecnologia das Radiações

(CTR) do IPEN. A atividade da fonte de Co-60 era 502,88 Ci (novembro/2021) e a taxa de dose na posição da amostra era 0,433 kGy/h. As amostras foram sanduichadas em placas de acrílico de 3,3 cm de espessura e fixadas em suporte de madeira posicionado no centro da câmara de irradiação.

As três amostras foram estudadas pelo Grupo SoRo - Pesquisa e Desenvolvimento de Robôs Complacentes, orientado pelo Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo, no Laboratório de Controle Aplicado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP). O grupo desenvolveu uma estrutura de ensaio específica para avaliação desses filmes (Figura 5).

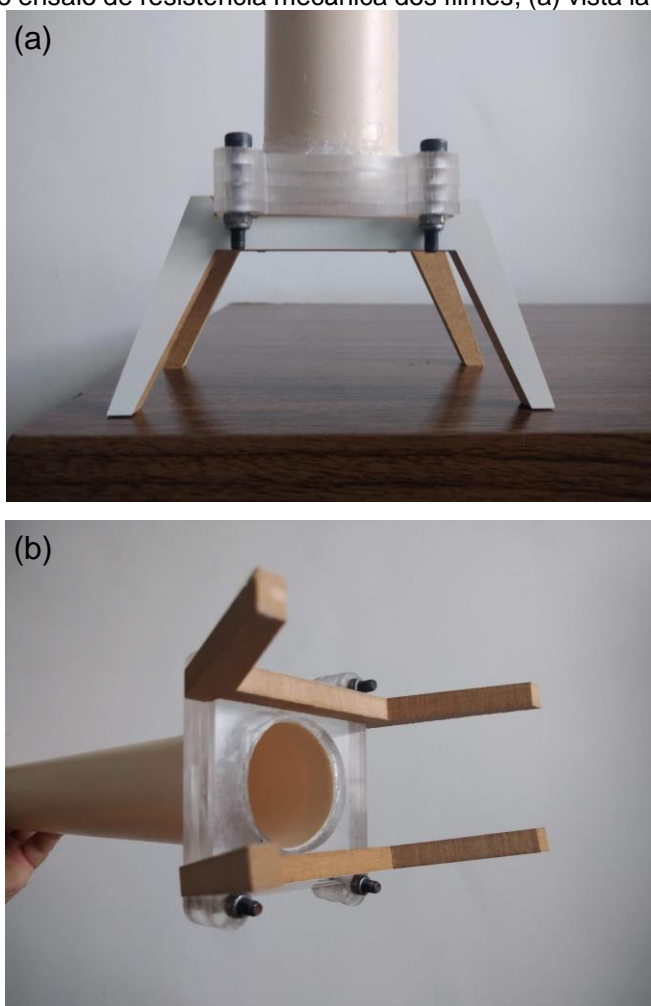
Essa estrutura foi feita com pés de madeira que sustentam placas de acrílico e tubo de PVC sobre estas (Figura 6) e o filme foi inserido entre as placas de acrílico.

Figura 5 - Modelagem da estrutura do ensaio de resistência mecânica dos filmes.



Fonte: Daniel Botelho, IFSP.

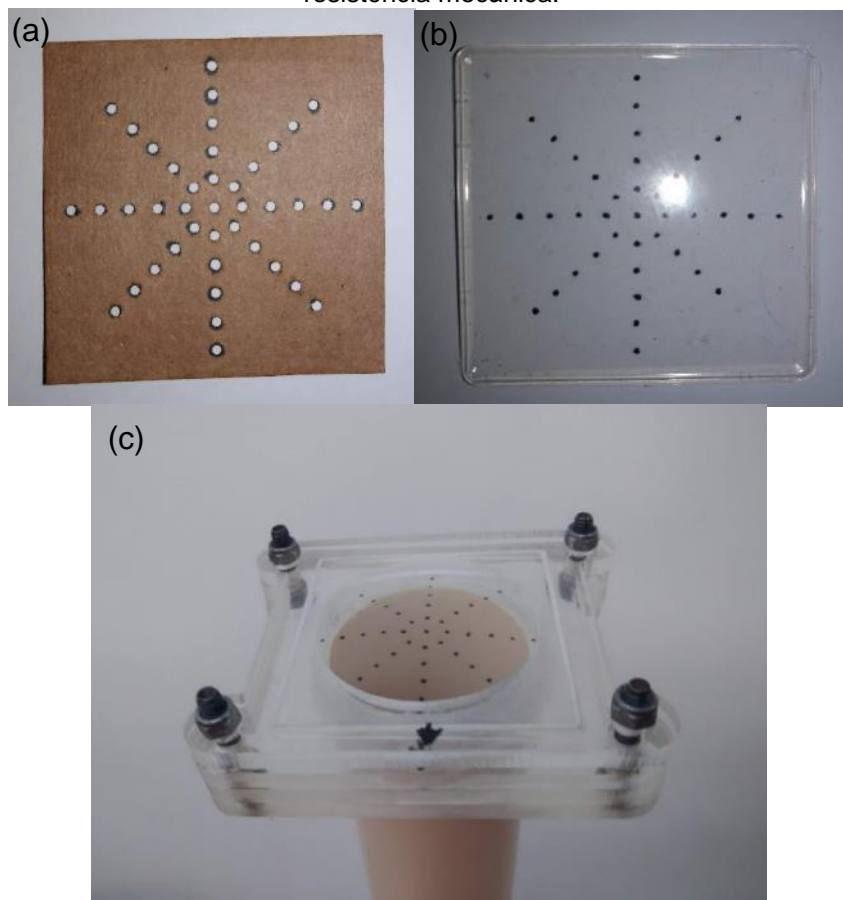
Figura 6 - Estrutura do ensaio de resistência mecânica dos filmes, (a) vista lateral e (b) vista inferior.



Fonte: Daniel Botelho, IFSP.

Para que as amostras pudessem ser comparadas, pontos foram marcados em cada uma, com uso de estêncil e caneta permanente (Figura 7).

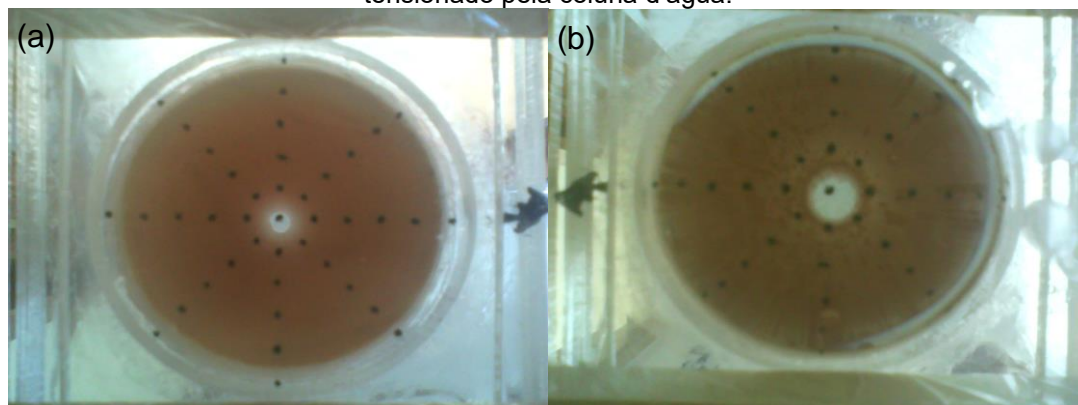
Figura 7 - (a) Estêncil utilizado, (b) filme marcado e (c) filme posicionado na estrutura do ensaio de resistência mecânica.



Fonte: Daniel Botelho, IFSP.

A Figura 8 mostra os registros capturados pela câmera de um filme sem e com esforço.

Figura 8 - (a) imagem do filme demarcado na estrutura sem água e (b) imagem do mesmo filme tensionado pela coluna d'água.

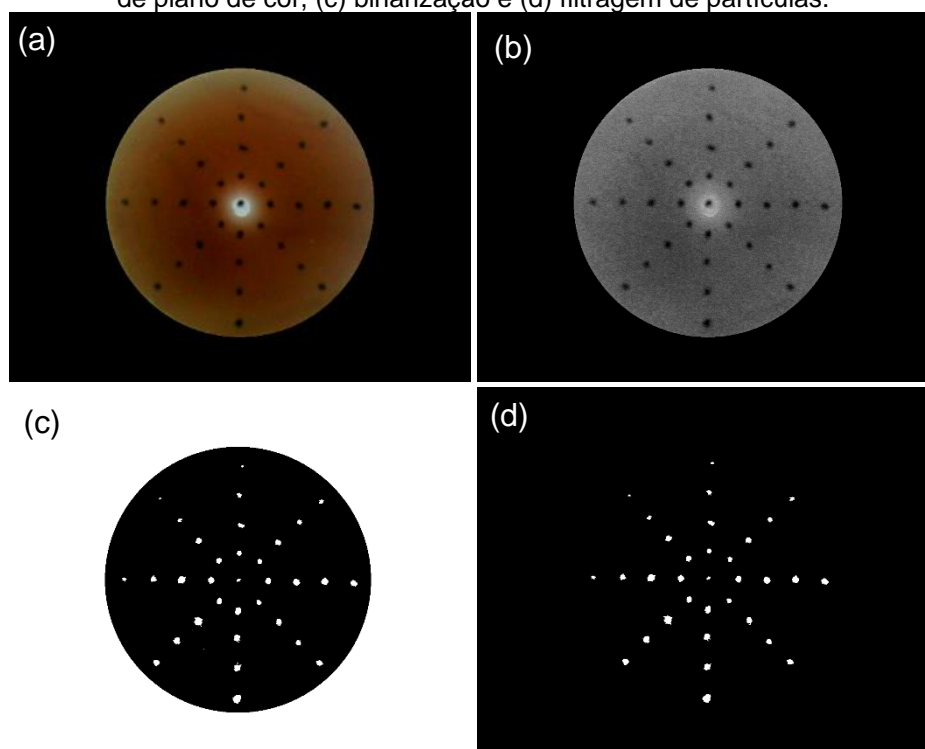


Fonte: Daniel Botelho, IFSP.

As imagens foram processadas no software Vision (um conjunto de ferramentas de visão computacional do software LabVIEW). Depois do ajuste, foi aplicada uma máscara circular na imagem para remover partes da imagem desnecessárias à análise (Figura 9a).

Então, foi feita a extração de um plano de cor da imagem (Figura 9b) e sua binarização (Figura 9c), transformando os pixels da imagem em 0 (preto) ou 1 (branco), de acordo com a intensidade de brilho presente no pixel. Por fim, foi aplicada uma ferramenta de filtragem de partículas, sendo as regiões de aglomerados de pixels brancos considerados como partículas (Figura 9d).

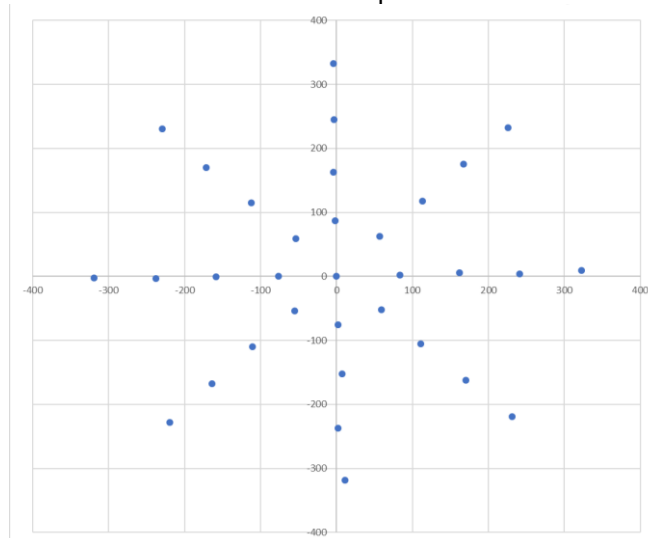
Figura 9 - Processamentos de imagem realizados no LabVIEW: (a) máscara circular, (b) extração de plano de cor, (c) binarização e (d) filtragem de partículas.



Fonte: Daniel Botelho, do IFSP.

Posteriormente, com uma ferramenta de análise de partículas, foram extraídas as coordenadas X e Y do centro de massa das partículas, que foram plotadas no plano cartesiano (Figura 10).

Figura 10 - Gráfico com as coordenadas dos pontos de uma amostra de filme puro.



Fonte: Daniel Botelho, do IFSP.

6.4 Seleção de material detector

Uma vez definida a matriz do filme OSLD, foi escolhido o material detector OSL. Para isso, cristais de sulfato de cálcio com diferentes dopantes foram produzidos no Laboratório de Materiais Dosimétricos (LMD) do IPEN. Neste estudo, foram exploradas algumas propriedades dosimétricas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$.

Optou-se por trabalhar com o sulfato de cálcio porque o IPEN possui vasta experiência na produção, sendo este um material de aquisição relativamente fácil para futuras produções e aplicações do filme OSLD.

Para a avaliação preliminar, foram produzidos grupos de pastilhas com cada dopante ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$), cada uma com 6 mm de diâmetro, contendo os cristais prensados com teflon[®] como agregante. Para isso, primeiro os materiais foram pesados separadamente na balança digital LIBROR Instrumentos Científicos, misturados na temperatura do nitrogênio líquido e depois prensados utilizando uma prensa Fred Frey modelo FC5, do LMD-IPEN.

Depois de prensadas, as pastilhas foram sinterizadas no forno Vulcan 3-550PD Ney. Foi adotado o protocolo já estabelecido no LMD-IPEN: 300°C por 30min (taxa de aquecimento de 30°C/min), depois 400°C por 1h30min (taxa de aquecimento de 12°C/min) e resfriamento lento dentro do forno até atingir a temperatura ambiente.

Para escolher o melhor material a ser utilizado no filme em conjunto com a técnica OSL, foram avaliadas as seguintes características dosimétricas: sensibilidade e influência da leitura TL no sinal OSL. Além disso, foi avaliado qual o melhor tratamento térmico para reutilização, se térmico ou óptico.

Com base nesses resultados, o $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ foi adotado para a produção do filme OSLD, porque foi observado que basta o tratamento óptico para sua reutilização. A ausência de tratamento térmico é desejável, porque além de ser mais prático e evitar efeito de *thermal quenching* e possíveis alterações na sensibilidade do material OSL (MCKEEVER; MOSCOVITCH, 2003), também evita a limitação de temperatura da matriz.

6.5 Produção de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ em pó

Os cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ usados nos filmes OSLD foram produzidos no LMD-IPEN pela rota de Nunes (2012).

O procedimento foi iniciado com a mistura de carbonato de cálcio (CaCO_3) com ácido sulfúrico (H_2SO_4), em capela com exaustão, e, após o término da reação, foi acrescentado o óxido de európio (Eu_2O_3) na proporção de 0,15 mol%. O frasco Erlenmeyer com a solução foi colocado em agitador magnético até a completa homogeneização e obtenção de $\text{CaSO}_4+\text{H}_2\text{SO}_4$, solução límpida (Figura 11). Essa solução foi levada a um balão volumétrico em uma manta aquecedora (Figura 12) a aproximadamente 300 °C por 24h, até todo o ácido sulfúrico evaporar (que foi recolhido num frasco Erlenmeyer na saída do condensador). Nesse procedimento de síntese, os possíveis vapores não-condensados foram neutralizados com solução de hidróxido de sódio.

Figura 11 - Solução de $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ em agitador magnético.



Fonte: Autora

Figura 12 - Solução de $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ em balão volumétrico sobre manta aquecedora.



Fonte: Autora

Os cristais de $\text{CaSO}_4\cdot\text{Eu}$ que cresceram no balão volumétrico ficaram aderidos à sua parede e foram removidos com auxílio de espátula. Em seguida, os cristais sintetizados foram lavados abundantemente com água destilada até que o seu pH, medido com tira (Macherey Nagel, 921) estivesse básico (entre 6 e 7) (Figura 13).

Figura 13 - Tira de teste de pH do $\text{CaSO}_4\cdot\text{Eu}$ produzido.



Fonte: Autora

Para a granulometria utilizou-se um almofariz, um pistilo e peneiras com malhas de 75 μm e 180 μm (Figura 14). Os cristais foram triturados e peneirados até serem obtidas partículas com diâmetro entre 75 e 180 μm .

O material resultante foi levado ao forno (Vulcan 3-550PD) para sensibilização (eliminação de resíduos) por 1h a 600°C e, ao término desse período, imediatamente retirado para resfriamento com choque térmico. A Figura 15 mostra o pó de $\text{CaSO}_4\cdot\text{Eu}$ produzido neste trabalho.

Figura 14 - Conjunto de peneiras utilizadas.



Fonte: Autora

Figura 15 - Cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ em pó (75-180 μm) produzidos.

Fonte: Autora

6.6 Método de produção do filme OSLD

Definidos os materiais dosimétricos e a matriz, foi desenvolvida a metodologia para a produção do filme OSLD.

Primeiramente, foi realizado o tratamento térmico do pó de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$, a 300°C por 60min, no forno Vulcan 3-550PD. Na balança digital Shimadzu, calibrada, mediu-se 11 g de silicone-borracha e adicionou-se 3 g de pó de sulfato de cálcio dopado com európio. Na sequência, o silicone e o pó detector foram misturados vagarosamente, com uso de espátula, sempre na mesma direção, por 5min.

A seguir, foi adicionado 1,1 g do catalisador, pesado utilizando a balança Shimadzu. Misturou-se os três componentes vagarosamente por mais 2min e a mistura foi despejada em 2 formas quadradas separadas. Para garantir a mesma quantidade de material, uma forma de cada vez foi posicionada na balança e recebeu 7 g da mistura.

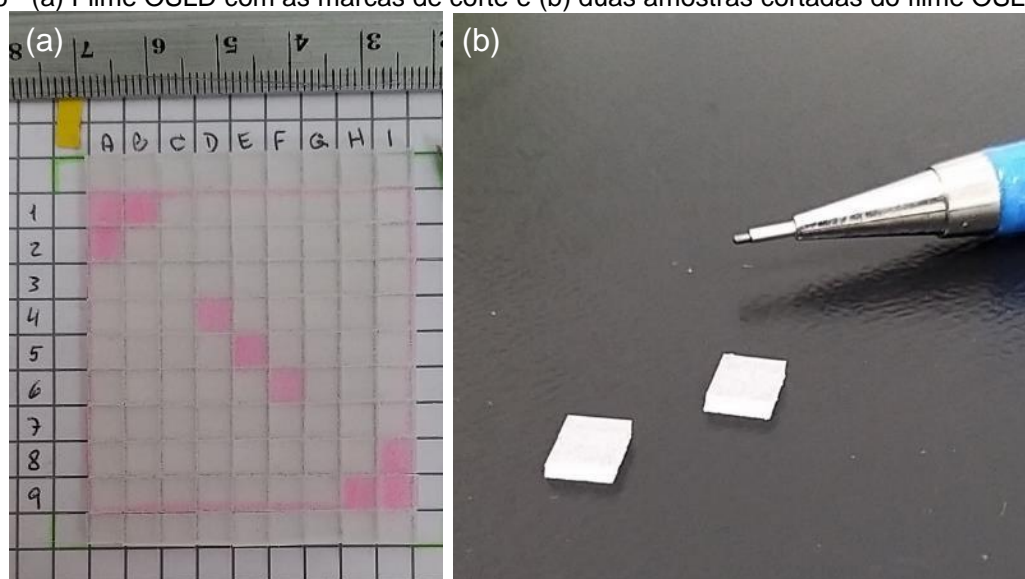
As formas preenchidas foram apoiadas em bancada previamente nivelada. Imediatamente, o rolo fura-bolhas foi passado, em cada uma delas, 3 vezes, ida e volta, nas duas direções da forma. Foi utilizado um rolo para cada forma, evitando-se que restos de uma mistura passassem para a seguinte.

As duas formas foram cobertas e ficaram intocadas por 24h. Após esse, período os filmes OSLD foram desenformados. O processo aqui descrito resultou em um lote com dois filmes OSLD de $6,2 \times 6,2 \text{ cm}^2$. Aguardou-se o período extra de 7 dias antes de se utilizar os filmes OSLD.

6.7 Avaliação das propriedades dosimétricas do filme OSLD

Para avaliação das propriedades dosimétricas dos filmes OSLD, um deles foi cortado em amostras de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (Figura 16). Essas amostras foram irradiadas e lidas no leitor Risø.

Figura 16 - (a) Filme OSLD com as marcas de corte e (b) duas amostras cortadas do filme OSLD.



Fonte: Autora

Alguns cuidados gerais foram tomados em todos os experimentos envolvendo as amostras de filme OSLD e o leitor Risø. Primeiramente, o leitor e todos os porta-amostras (*cups*) foram limpos cuidadosamente e checados contra contaminação por outro material OSL.

Depois, cada amostra foi associada a um *cup* e uma posição no carrossel do leitor. Nos casos de tratamento fora do leitor, as amostras eram manipuladas e retornadas a seus respectivos *cups* e posições. Adicionalmente, entre uma amostra e outra no carrossel, ao menos uma posição era sempre deixada vazia para evitar irradiação cruzada.

6.7.1 Repetibilidade

A repetibilidade pode ser definida como o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas realizadas em curto período. Neste trabalho, a repetibilidade se refere às medições sucessivas das mesmas amostras de filme OSLD, conduzidas no leitor Risø, no mesmo dia, sem interrupções.

Para avaliar a repetibilidade da resposta dos filmes OSLD, foram utilizadas 9 amostras. Foi adotada a dose absorvida de 3 Gy para irradiações com a fonte embutida do Risø e o tempo de estimulação de 1800 s no leitor. Esse período longo de leitura foi adotado porque testes iniciais demonstraram que é suficiente para limpar todo o sinal OSL da amostra. Especificamente, para avaliar

a repetibilidade, todas as medidas foram realizadas no leitor OSL automaticamente, sem abrir e fechar o equipamento e sem manipular as amostras. A dose de irradiação e o tempo de leitura foram selecionados para que fosse possível realizar o tratamento óptico de reutilização no próprio leitor Risø.

O total de 9 amostras foi dividido em 3 grupos de 3 amostras, os quais foram avaliados separadamente. Foi estabelecida a seguinte sequência no leitor para cada amostra: leitura OSL por 60s para avaliar possível sinal remanescente ou de fundo (*background* – BG), irradiação (3 Gy), leitura OSL por 1800s. Foram programados 3 ciclos dessa sequência. Esse procedimento foi realizado no mesmo dia para os três grupos de amostras.

6.7.2 Reprodutibilidade

A reprodutibilidade pode ser definida como o grau de concordância entre os resultados de medições realizadas nas mesmas condições experimentais. Neste trabalho, as mesmas amostras de filme OSLD foram submetidas a subseqüentes condições em dois equipamentos distintos (irradiação e leitura OSL no leitor Risø e tratamento óptico na caixa de *bleaching*) e em dias diferentes.

A reprodutibilidade da resposta do filme OSLD foi avaliada irradiando 20 amostras no leitor Risø. Para este estudo, adotou-se a dose absorvida de 5 Gy.

Neste ensaio, o tratamento óptico das amostras foi realizado em dias distintos das irradiações e das leituras, utilizando um aparato especialmente desenvolvido para o tratamento das amostras, nomeado caixa de *bleaching* (Figura17). Trata-se de uma caixa de alumínio polido (favorecendo a reflexão da luz) com uma lâmpada de LED azul PAR30 de 10 W (Lexman).

O tempo de estimulação óptica para leitura do sinal OSL das amostras foi de 180s no leitor Risø e o período de tratamento óptico foi de 7h na caixa de *bleaching*.

Figura 17 - Caixa para tratamento óptico dos filmes OSLD.

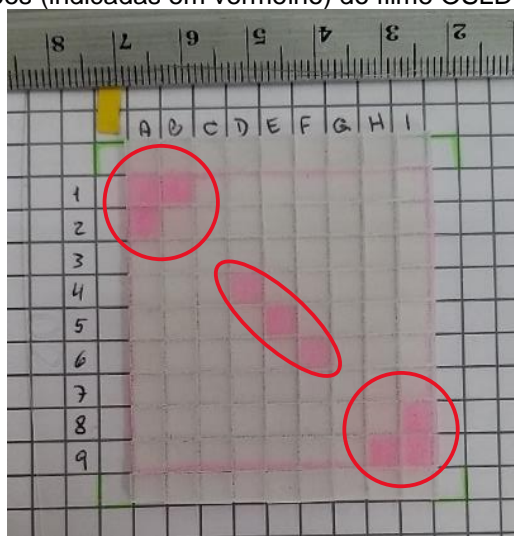


Fonte: Autora

6.7.3 Homogeneidade do filme OSLD

Para o ensaio de homogeneidade do filme, 3 grupos de amostras foram propositalmente retirados de três regiões distintas do filme OSLD, conforme Figura18.

Figura 18 - As três regiões (indicadas em vermelho) do filme OSLD com três amostras cada.



Fonte: Autora

As amostras foram irradiadas com doses de 3 Gy e lidas com estimulação óptica de 1800s. Os resultados do estudo de repetibilidade descrito anteriormente foram utilizados para comparar as três regiões do filme OSLD (2 extremidades e o centro).

6.7.4 Sensibilidade

Para avaliar a sensibilidade do filme OSLD foram utilizadas 24 amostras. Elas foram irradiadas no leitor Risø, todas com 5 Gy e estimuladas por 180s, no mesmo dia, depois de obtida uma leitura de fundo (BG) de cada uma. A sensibilidade individual delas, em contagens/Gy, foi calculada pela razão entre a intensidade OSL inicial (primeiros 10s subtraído o BG) e a dose no valor de 5 Gy.

Adicionalmente, cada amostra foi pesada na balança digital Shimadzu do LMD do IPEN/CNEN e a sensibilidade foi dividida pela massa, assim, obteve-se a sensibilidade intrínseca de cada amostra de filme OSLD e o valor de sensibilidade intrínseca médio (24 amostras).

6.7.5 Desvanecimento do sinal OSL

Na avaliação do desvanecimento óptico ou *fading* do sinal OSL, foram utilizadas 5 amostras de filme OSLD. Para evitar influência de variação de sensibilidade de uma amostra a outra, optou-se por utilizar somente essas 5 amostras para todas as medidas e comparar o sinal OSL após diferentes períodos, sempre em relação ao sinal OSL da mesma amostra, lido logo após a irradiação (nomeado tempo zero).

Para isso, as amostras foram primeiramente irradiadas (dose de 20 Gy) e lidas no leitor Risø, logo após a irradiação, uma de cada vez, a fim de se obter o sinal OSL de cada amostra (S_{zero}). Em seguida, as amostras eram irradiadas no leitor, retiradas e guardadas no escuro pelo período estabelecido, e então recolocadas no leitor para a obtenção do sinal OSL após os períodos estabelecidos. Isso foi repetido para cada período de desvanecimento estudado: 10min, 30min, 1h, 24h, 2 dias, 1 semana, 2 semanas e 3 semanas. Entre cada um desses ciclos, as amostras foram deixadas na lata de *bleaching* por 6h para garantir a limpeza do sinal OSL residual. Ademais, o sinal de BG foi verificado antes de cada irradiação.

Dessa forma, obteve-se a porcentagem de desvanecimento do sinal OSL para diferentes períodos, para cada uma das cinco amostras.

6.7.6 Resposta em função da dose

Para obtenção da resposta do filme OSLD em função da dose foram utilizadas 24 amostras. Utilizou-se 3 amostras para cada dose de irradiação. Todas elas foram irradiadas no mesmo dia no leitor Risø e depois guardadas por 2 semanas, protegidas da luz e de fontes de radiação, visando minimizar a influência do desvanecimento.

Passadas as 2 semanas, as amostras foram estimuladas por 180 s. Após a leitura, elas foram posicionadas na caixa de *bleaching* por 4h. Por fim, retornaram ao leitor para irradiação, todas com uma dose de referência (5 Gy) e leitura, uma por vez.

Dessa forma, a dose resposta foi corrigida pela sensibilidade das amostras. Essa metodologia foi adotada porque, devido à quantidade limitada de filmes OSLD, não era possível realizar seleção prévia de detectores pela sensibilidade e porque, considerando a pausa de 2 semanas para estabilização do sinal, não convinha utilizar o mesmo grupo de amostras para todas as doses estudadas.

6.8 Avaliação morfológica do filme OSLD

As morfologias de amostras de filme OSLD e amostras de filme de silicone-borracha puro (sem material dosimétrico) foram avaliadas em lupa com luz transmitida e com luz refletida, em microscópio óptico e em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

6.8.1 Lupa estereoscópica

Foi utilizada a lupa binocular Carl Zeiss – Stemi SV.11 (Figura 19), tanto com um iluminador de luz transmitida quanto com luz refletida, e câmera Leica MC170HD pertencentes ao Laboratório de Petrografia Sedimentar (LabPetro) do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC-USP).

Figura 19 - Lupa binocular Carl Zeiss Stemi SV 11.



Fonte: Autora

6.8.2 Microscópio petrográfico

Um microscópio óptico (Figura 20) do Laboratório de Petrografia Sedimentar do IGC-USP foi utilizado: fabricante Carl Zeiss, modelo Axioplan 2. Ele tem recursos de luz polarizada, *charriot* com precisão de 0,5 mm, luz refletida e transmitida, luz condensada e platina móvel e proporciona um aumento máximo de 1000 vezes. Utilizou-se o software Leica Application Suite (LAS) e a câmera Leica MC170HD, do LabPetro do IGC-USP.

Figura 20 - Microscópio petrográfico Carl Zeiss, modelo Axioplan 2.



Fonte: Autora

6.8.3 Microscópio eletrônico de varredura

As amostras de filme OSLD foram observadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o objetivo de se avaliar a morfologia, topografia da superfície, composição, tamanho e distribuição dos cristais de sulfato de cálcio na amostra. Essa técnica baseia-se na interação entre um feixe colimado de elétrons e a superfície do material em análise. Na interação, são gerados elétrons retro espalhados e secundários, que fornecem a informação necessária para a formação da imagem. As imagens de MEV apresentam alto contraste, diferenciando elementos leves e pesados.

Nesta análise, foram avaliadas três amostras de filme OSLD, sendo uma de cada região (centro e extremidades) do filme. O objetivo foi avaliar a distribuição dos cristais e os tamanhos deles, além de comparar os resultados das três regiões.

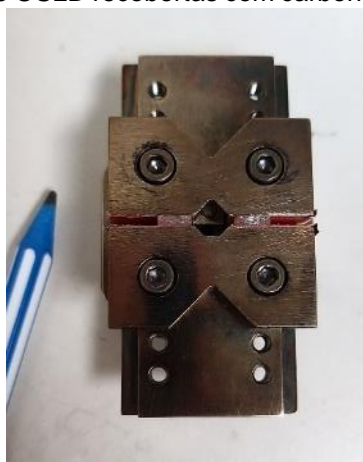
Também foram observadas amostras de filme de silicone-borracha puro (sem material dosimétrico), sendo 5 amostras virgens, 5 delas previamente irradiadas em GammaCell com dose de 60 Gy e 5 outras irradiadas com 200 Gy. O objetivo foi avaliar se há alteração na morfologia das amostras irradiadas em relação às virgens.

Todas as amostras de filme puro e filme OSLD foram observadas tanto em suas superfícies quanto em seções transversais. Para isso, elas foram levemente seccionadas com bisturi.

As amostras analisadas no MEV foram previamente recobertas com carbono. O recobrimento foi realizado na evaporadora Baltec SCD 050. A Figura 21 exibe o porta-amostras com seções de filme OSLD recobertos com carbono.

O microscópio eletrônico de varredura de alta resolução Jeol JSM 6701F (Figura 22) utilizado pertence ao Laboratório de Microscopia e Microanálise do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do IPEN/CNEN.

Figura 21 - Duas amostras de filme OSLD recobertas com carbono posicionadas em porta-amostras.



Fonte: Autora

Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura de alta resolução Jeol JSM 6701F.



Fonte: Autora

6.9 Espectroscopia por energia dispersiva (do inglês, energy dispersive spectroscopy -EDS)

Adicionalmente às imagens obtidas pelo MEV, as amostras de filme OSLD foram submetidas à análise de elementos por meio de espectroscopia por energia dispersiva (EDS-MEV). Foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Microscopia e Microanálise do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do IPEN/CNEN: microscópio eletrônico de varredura de alta resolução Jeol JSM 6701F e sistema de análise de energia dispersiva de raios-X com detector SDD Thermo Scientific Ultra Dry, controlado por software Thermo Scientific Noran System Six.

O EDS permite a realização de uma avaliação química qualitativa do material. Quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, ocorrem interações e há emissão de raios-x característicos das transições eletrônicas. Esses fótons são detectados e o chamado espectro de energia dispersiva é gerado. A análise do espectro nos fornece uma estimativa da concentração dos elementos presentes na superfície da amostra. A posição dos picos no espectro identifica os elementos (energia das transições eletrônicas características) e a intensidade do sinal de cada

pico é proporcional à concentração daquele elemento na amostra. Três regiões do filme OSLD foram avaliadas e, de cada uma dessas amostras, foi obtido o espectro de três áreas.

A porcentagem em massa de cada elemento foi multiplicada pelo número atômico do elemento e a soma desses valores corresponde ao número atômico efetivo (Z_{ef}) obtido para cada uma das 9 regiões avaliadas. Foi calculada a média das nove regiões como uma estimativa do Z_{ef} do filme OSLD produzido neste trabalho.

6.10 Avaliação da possibilidade de aplicação do filme OSLD em radiocirurgia

Para avaliar a possibilidade de aplicação dos filmes OSLD em radiocirurgia, amostras dos filmes OSLD produzidos foram enviados para irradiações na Clinirad – Clínica de Radioterapia e Quimioterapia sede Curitiba, do Instituto Halsted.

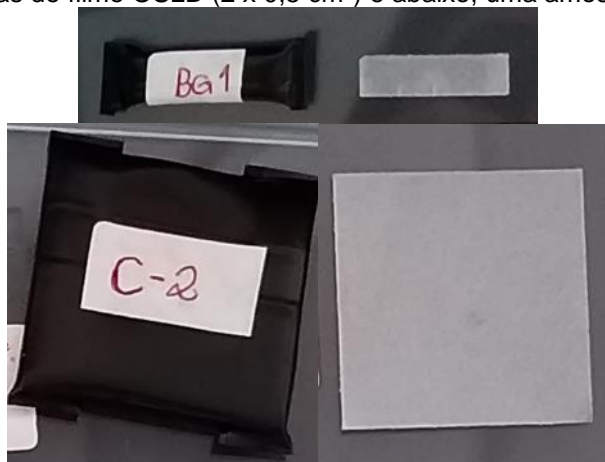
6.10.1 Preparação das amostras

Com o uso de padrão de grade, régua e bisturi, foram cortadas tiras de filme OSLD de 2 cm de comprimento e 0,5 cm de largura e uma amostra de 3 x 3 cm². As tiras foram separadas, uma para controle de qualidade, quatro tiras para calibração e uma para controle de BG. Ademais, a amostra de 3 x 3 cm² para ser irradiada em tratamento de radiocirurgia.

Todas essas amostras eram novas e foram tratadas opticamente na caixa de *bleaching*, previamente descrita, pelo período de 3h.

Após o tratamento, as amostras foram embaladas uma a uma, em pacotes elaborados com fita isolante preta, completamente vedadas de exposição à luz. Cada pacote foi identificado antes de ser encaminhado à clínica, como exemplo da Figura 23.

Figura 23 - À direita, exemplo de duas amostras de filme OSLD enviadas para irradiação em acelerador linear clínico. À esquerda, as mesmas amostras embaladas protegidas da exposição a luz. Acima, uma das tiras de filme OSLD ($2 \times 0,5 \text{ cm}^2$) e abaixo, uma amostra de $3 \times 3 \text{ cm}^2$.



Fonte: Autora

6.10.2 Irradiações utilizando acelerador linear clínico

Na clínica, o acelerador linear utilizado é o modelo Synergy Full (Elekta) com opções de feixe de fótons e de elétrons de diferentes energias. Neste trabalho, utilizou-se apenas o feixe de fótons de 6 MV.

Todas as irradiações foram realizadas no mesmo dia e, para garantir a confiabilidade das medidas, primeiramente foi realizado o conjunto de testes de garantia da qualidade no acelerador linear, conforme recomendações do TECDOC 1151. Foram efetuados tanto os testes mecânicos quanto os dosimétricos (descritos no TRS 398), que são aceitos pela legislação nacional como padrões de garantia da qualidade na entrega de dose no paciente.

Para o teste dosimétrico do acelerador foi utilizado um simulador de água $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ e uma câmara de ionização calibrada PTW farmer (modelo TN30013), com campo $10 \times 10 \text{ cm}^2$ na profundidade de dose máxima 1,5 cm e distância da fonte até a superfície de 100 cm. Os resultados mostraram que 100 (cem) unidades monitoras entregues pelo acelerador linear equivalem a 99,871 cGy de dose absorvida apresentaram uma diferença menor que 0,13%, a qual está dentro dos valores de referência que toleram até 2% de variação.

Foi realizado procedimento de controle de qualidade (CQ) do tratamento, com câmara de ionização, para verificação da dose a ser entregue ao paciente em

um tratamento simulado de radiocirurgia na região da cabeça. A dose planejada foi de 2100 cGy.

A câmara de ionização utilizada foi PTW semi-flex (modelo TN31010) com um eletrômetro PTW (Unidos E). As leituras obtidas por meio da câmara de ionização dadas em ηC foram convertidas em dose absorvida (cGy) utilizando o coeficiente de calibração ou fator rendimento diário de 33,12096 $\eta\text{C}/\text{cGy}$, adquirido através da irradiação do simulador com campos paralelo-opostos 10 x 10 cm^2 ajustados no isocentro do simulador, conforme recomendações internacionais para corrigir possíveis diferenças no rendimento diário do acelerador linear.

Para as irradiações dos filmes OSLD, assim como para o CQ utilizando IC, foi utilizado um simulador montado com placas de polimetilmetacrilato com densidade equivalente à da água, com encaixe para câmara de ionização em região central. Foram utilizadas 16 placas de 1 cm de espessura e 2 placas de 0,5 cm para formar um simulador de dimensões 30 x 30 x 17 cm^3 que atende às recomendações do Report TG 119 (EZZELL et al., 2009). Essas placas já possuem vinco na região central para encaixe da câmara de ionização. Para as irradiações das tiras de filme OSLD, a placa central foi substituída por duas camadas de bolus gel para abraçar o filme OSLD e minimizar a camada de ar entre filme e placas, conforme demonstrado na Figura 24.

Figura 24 - (a) Simulador com placas de bolus gel no centro, abaixo das quais (b) está posicionada a amostra de filme OSLD.



Fonte: Michele Torquato, Clinirad.

Primeiramente, quatro tiras de filme OSLD foram irradiadas em feixe de fótons de 6 MeV, cada uma com uma dose de planejamento, a fim de se avaliar o fator de calibração para o filme OSLD. As doses utilizadas foram 500 Gy, 1000 Gy,

2000 Gy e 3000 Gy, para avaliação da dose resposta do filme OSLD nas condições clínicas.

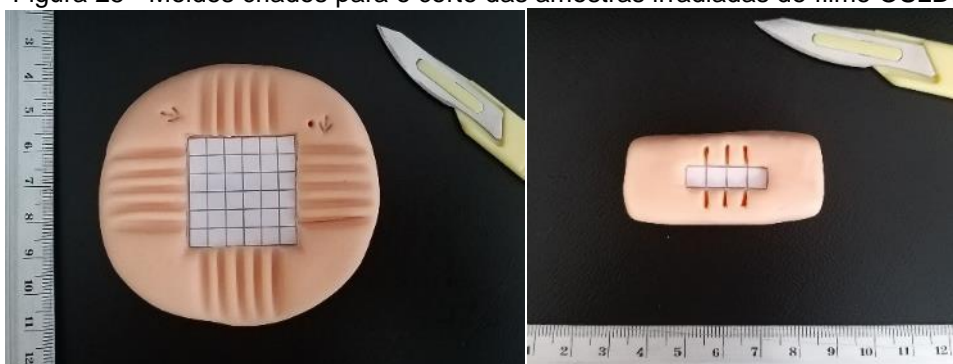
Em segundo momento, a amostra de filme OSLD de 3 x 3 cm² foi irradiada para verificar a distribuição de dose no planejamento radiocirúrgico. De acordo com os procedimentos anteriores, o filme foi posicionado no centro do simulador, entre as camadas de bolus gel, que por sua vez estão entre as placas de polimetilmetacrilato.

6.10.3 Leitura das amostras irradiadas

As amostras irradiadas foram armazenadas por 2 semanas e protegidas da luz. Então, elas foram lidas na leitora TL/OSL-DA-20 Risø com LED azul e filtro Hoya U-340. Para isso, como essa leitora é projetada para leituras pontuais, os filmes OSLD foram cortados.

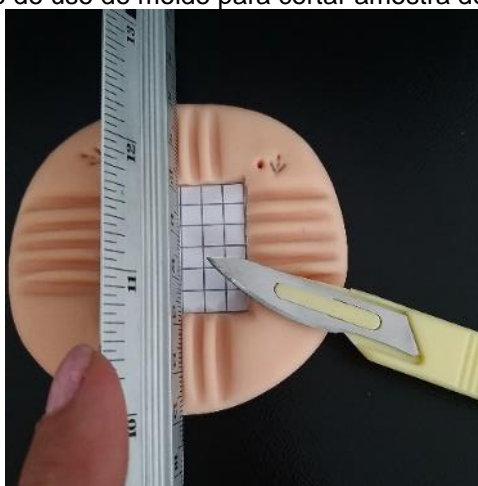
Os pacotes foram abertos no escuro, com apenas uma lâmpada vermelha posicionada indiretamente, no próprio laboratório da leitora OSL. Para o corte das amostras, utilizou-se moldes de biscuit, elaborados especialmente para essa tarefa (Figura 25). Depois de posicionadas no centro, as amostras foram cortadas com auxílio da régua (posicionada nos vincos correspondentes) e uso do bisturi, conforme Figura 26.

Figura 25 - Moldes criados para o corte das amostras irradiadas de filme OSLD.



Fonte: Autora

Figura 26 - Demonstração do uso do molde para cortar amostra de filme OSLD de 3 x 3 cm².



Fonte: Autora

O sinal OSL de cada amostra foi estimulado e registrado por 180 s. Após a leitura de todas as amostras, elas foram colocadas na caixa de *bleaching* por 3h para tratamento óptico. Na sequência, elas foram novamente levadas ao leitor, nos respectivos *cups* e mesmas posições. Então, foram irradiadas com uma dose de referência e seus sinais OSL lidos (por 180 s) imediatamente após a irradiação. Isso foi realizado com uma amostra por vez, utilizando a fonte embutida na leitora e a dose de 0,16 Gy.

Na análise dos resultados, as medidas de intensidade OSL obtidas das irradiações clínicas foram divididas pelas medidas de intensidade OSL após dose de referência. Esse procedimento foi adotado para corrigir diferenças de massa e sensibilidade de uma amostra para a outra.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Testes de diferentes matrizes

A Tabela 2 apresenta um resumo dos materiais avaliados como matriz para os filmes OSLD. Nela são elencadas suas características físicas principais e o resultado do teste de aplicação de cada material em dosimetria OSL.

Tabela 2 - Lista de materiais elastômeros testados e as respectivas características principais.

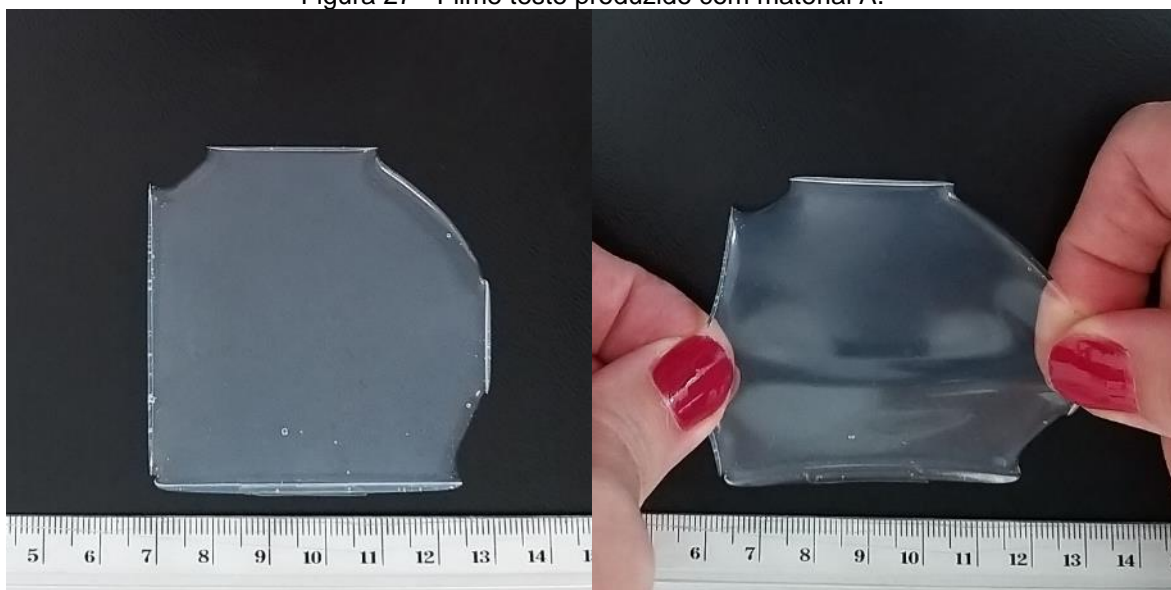
| Material-matriz | Modelo e Fabricante | Cor | Temperatura máxima (°C) | Característica na preparação | Característica após cura | Aplicação na dosimetria OSL |
|-----------------|--|-----------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| A | Silicone-borracha T2 Dow Corning | incolor | 190 | Boa viscosidade | Flexível | Favorável |
| B | Borracha de silicone Siqmol Platina D-30 | incolor leitoso | 250 | Viscoso demais | Flexível | Apresenta luminescência foto-estimulada |
| C | Silicone-borracha não acético para molde | branco | 280 | Boa viscosidade | Bem flexível e com oleosidade | Apresenta sinal OSL |
| D | Adesivo PU40 Flex | branco | 80 | Endurece rapidamente | Flexível | Favorável |
| E | Silicone Solusil Multi 280 | incolor | 100 | Endurece rapidamente | Pouco flexível | Favorável |
| F | Silicone Solusil RTV | cinza | 320 | Endurece rapidamente | Pouco flexível | Favorável |

Fonte: Autora

O material A (Figura 27), embora viscoso, foi de fácil mistura com os cristais detectores OSL. Após a cura, o filme ficou relativamente uniforme e flexível, mas apresentou bolhas de ar. Quando avaliado puro (sem material detector), não apresentou sinal OSL (Figura 28).

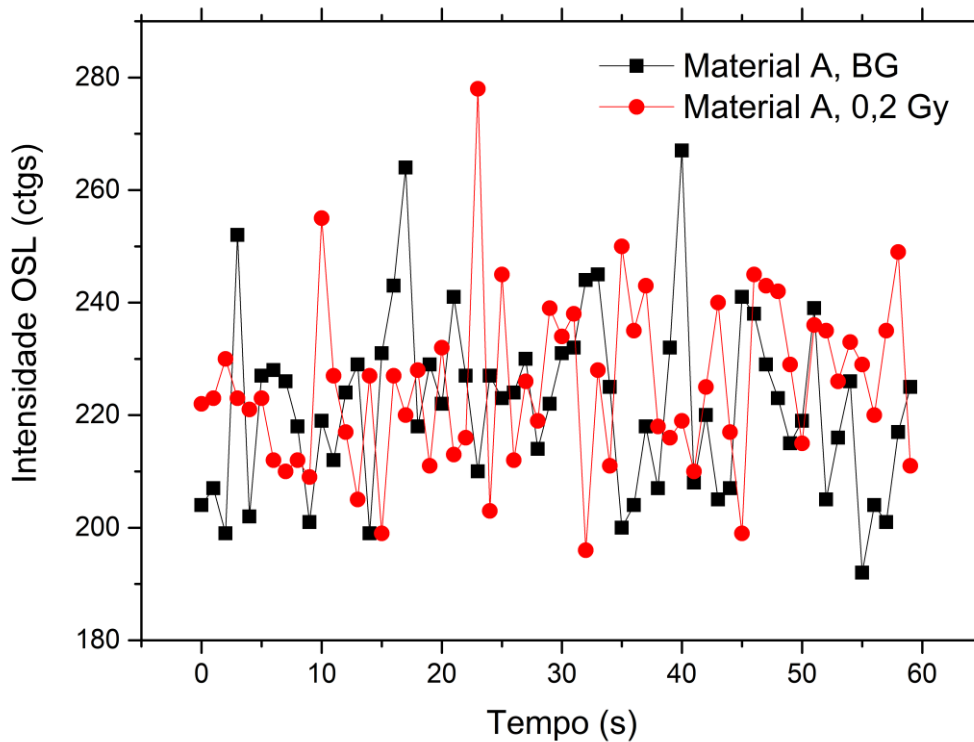
O material B (Figura 29) é mais viscoso que o material A. Isso dificultou a mistura da matriz com os cristais. Após a cura, esse filme também ficou relativamente uniforme e flexível, mas com uma densidade relativamente alta de bolhas de ar, quando comparado ao material A. Ele não apresentou sinal OSL quando avaliado puro (sem material detector), mas emitiu luminescência fotoestimulada, a qual independe de irradiação prévia, conforme apresentado na Figura 30.

Figura 27 - Filme teste produzido com material A.



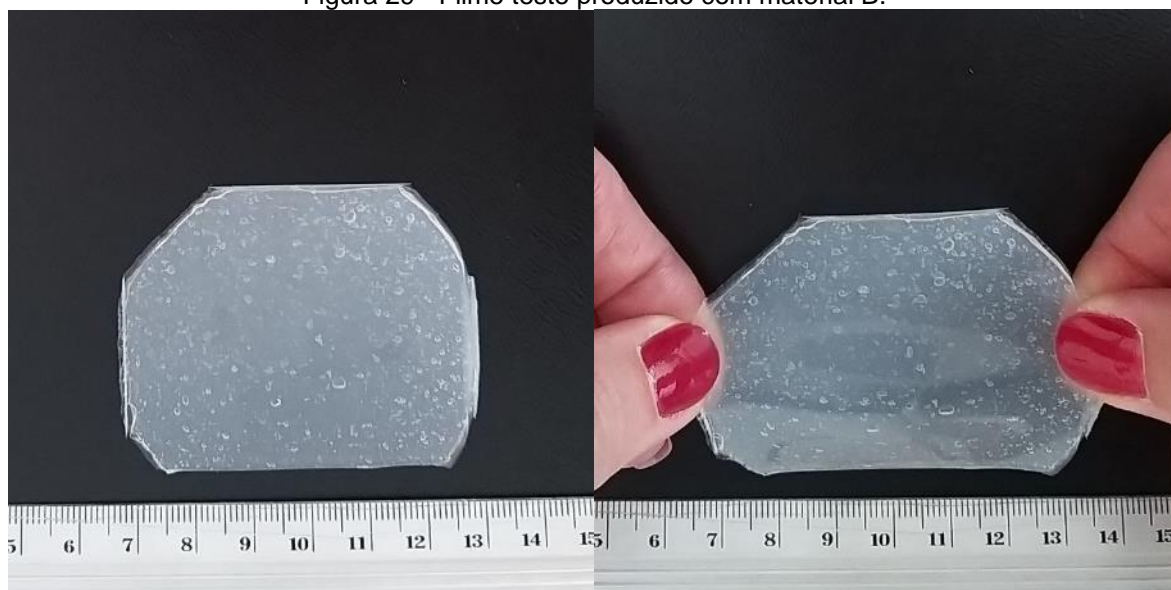
Fonte: Autora

Figura 28 - Leitura OSL do material A sem irradiação prévia (BG) e após exposição a dose de 0,2 Gy.



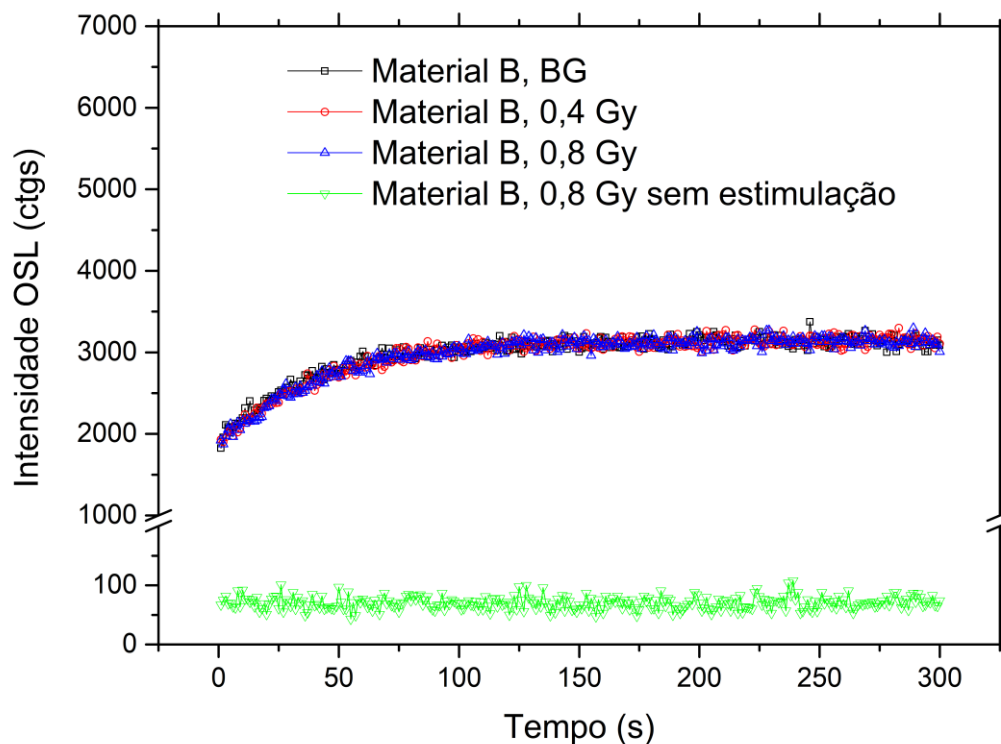
Fonte: Autora

Figura 29 - Filme teste produzido com material B.



Fonte: Autora

Figura 30 - Luminescência fotoestimulada do material B após irradiação a dose de 0,4 Gy e 0,8 Gy com e sem estimulação OSL e leitura OSL do material B sem exposição prévia (BG).

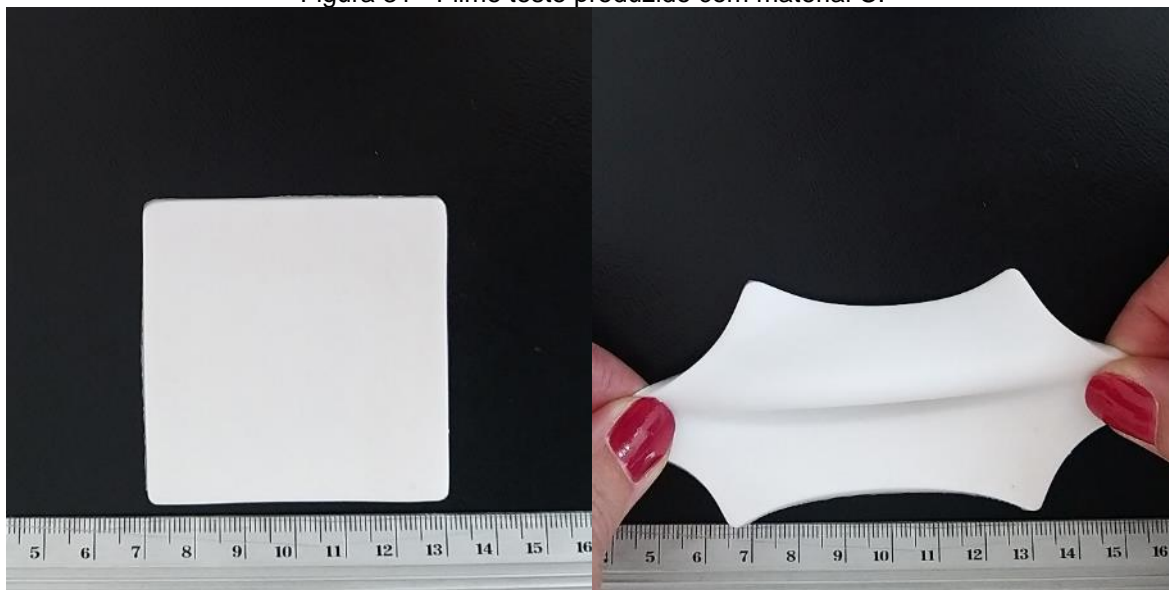


Fonte: Autora

O material C (Figura 31) é o menos viscoso desses três materiais. Ele foi de fácil mistura com os cristais detectores. Após a cura, o filme ficou uniforme, bastante flexível e sem bolhas. Entretanto, esse filme solta uma oleosidade

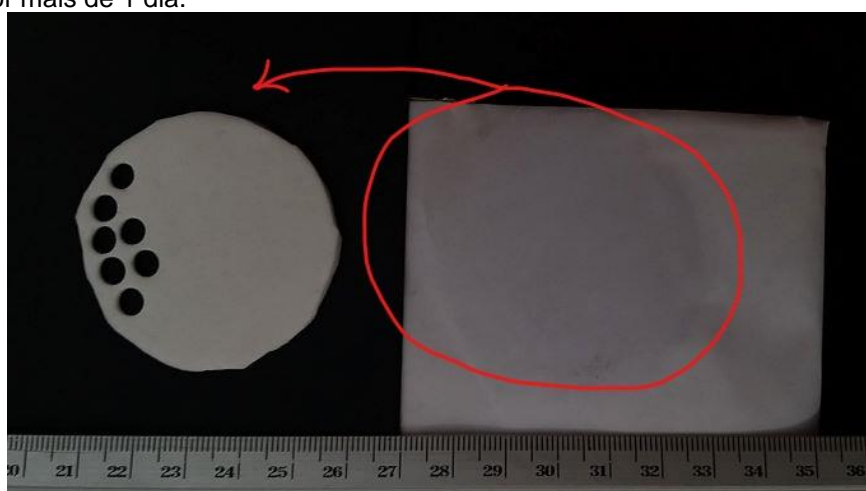
naturalmente, em temperatura ambiente, com o tempo. Foi avaliado que 2 meses após a cura, o filme ainda mancha um papel quando deixado mais de um dia sobre ele (Figura 32). Além disso, no estudo de avaliação do filme puro, observou-se que esse material apresenta sinal OSL. A Figura 33 mostra que o silicone-borracha componente do material C apresenta sinal OSL, enquanto seu catalisador não.

Figura 31 - Filme teste produzido com material C.



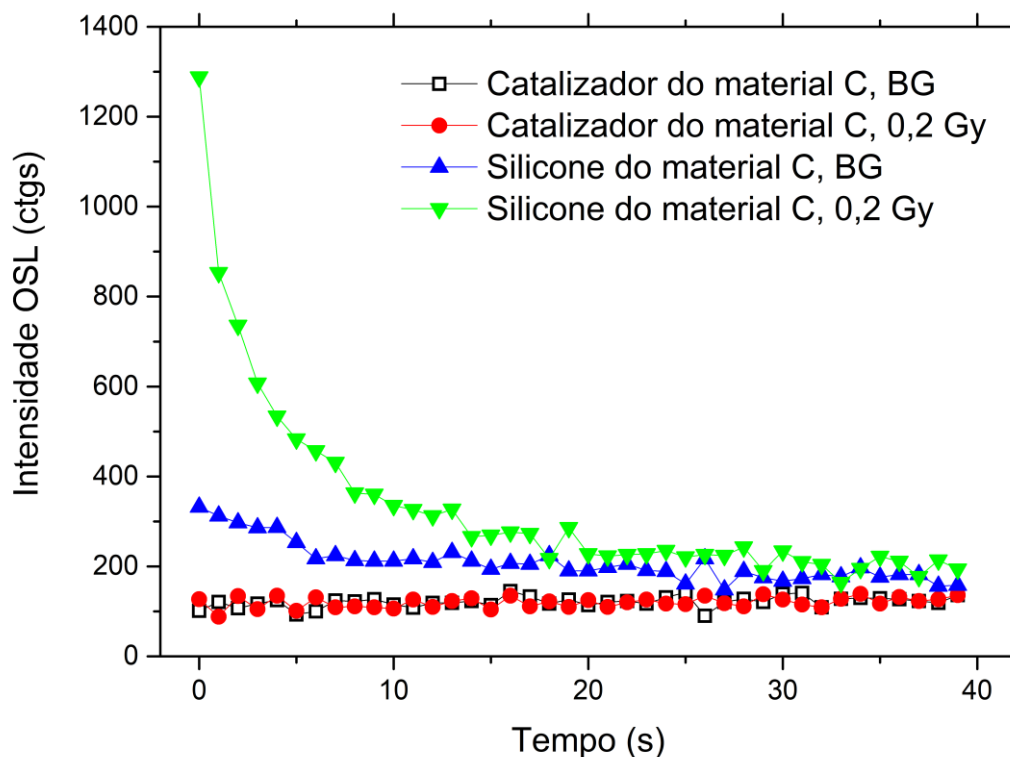
Fonte: Autora

Figura 32 - Filme (curado há mais de 2 meses) feito de material C mancha um papel, se deixado sobre ele por mais de 1 dia.



Fonte: Autora

Figura 33 - Sinais OSL dos componentes do material C, antes e após exposição a dose de 0,2 Gy.

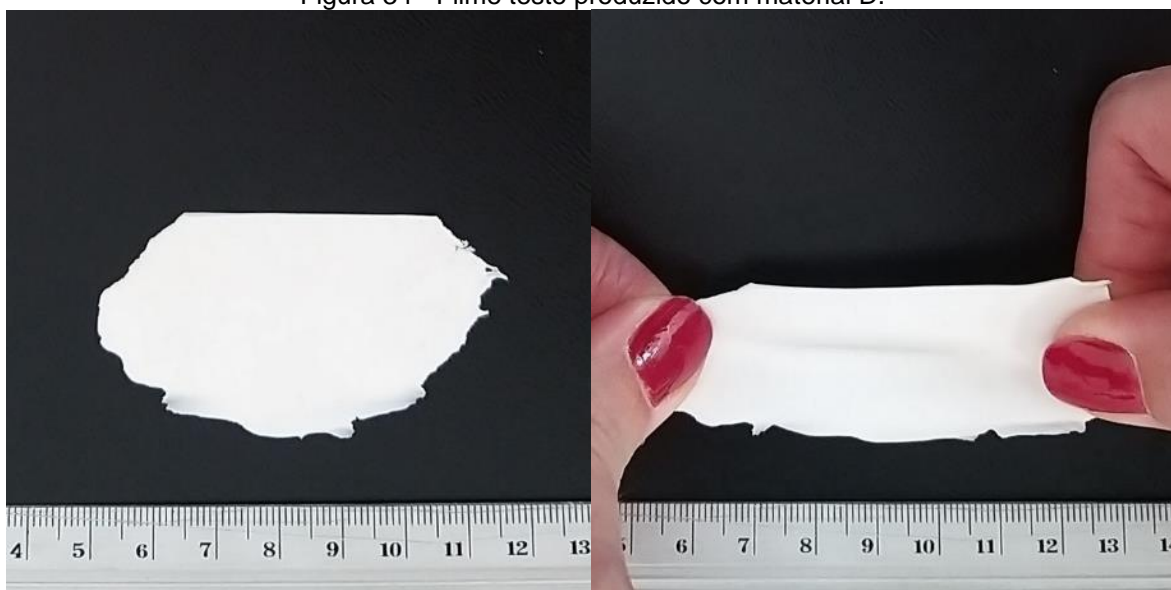


Fonte: Autora

Já os materiais D, E e F (Figuras 34, 35 e 36) foram descartados como matriz para a produção dos filmes porque, embora sejam favoravelmente inertes em termos de dosimetria OSL, se apresentaram de difícil manipulação no processo de produção dos filmes e ficaram ressecados após a cura. Esses materiais endurecem rapidamente, dificultando a homogeneização da distribuição dos cristais no filme.

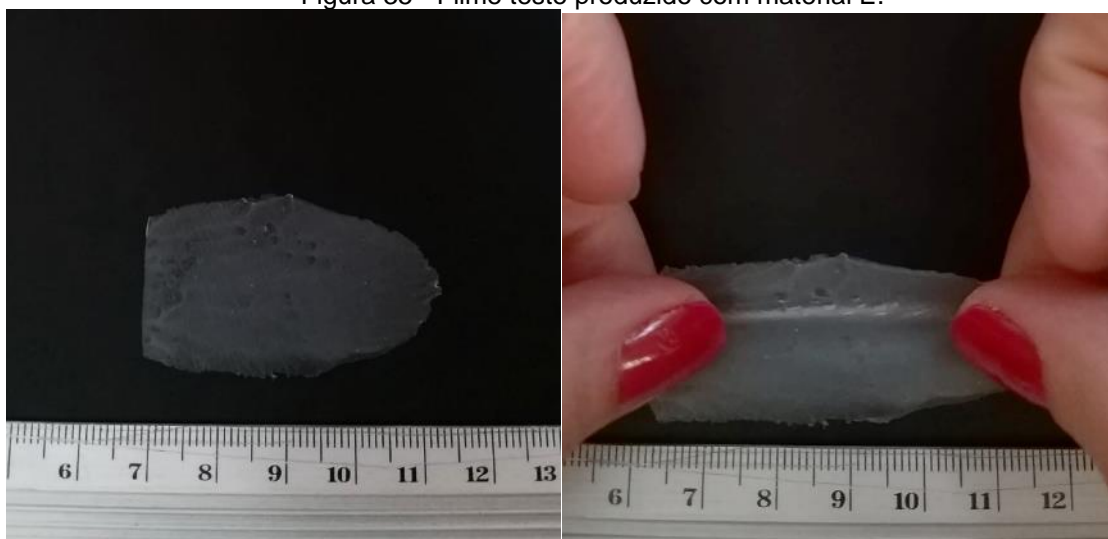
Adicionalmente, os três são materiais de característica adesiva, que necessitam de vaselina e rolo para produção de filmes. Por fim, os protótipos produzidos com o material F e com cristais do material detector ficaram com as superfícies irregulares e quebradiços após cura (Figura 37).

Figura 34 - Filme teste produzido com material D.



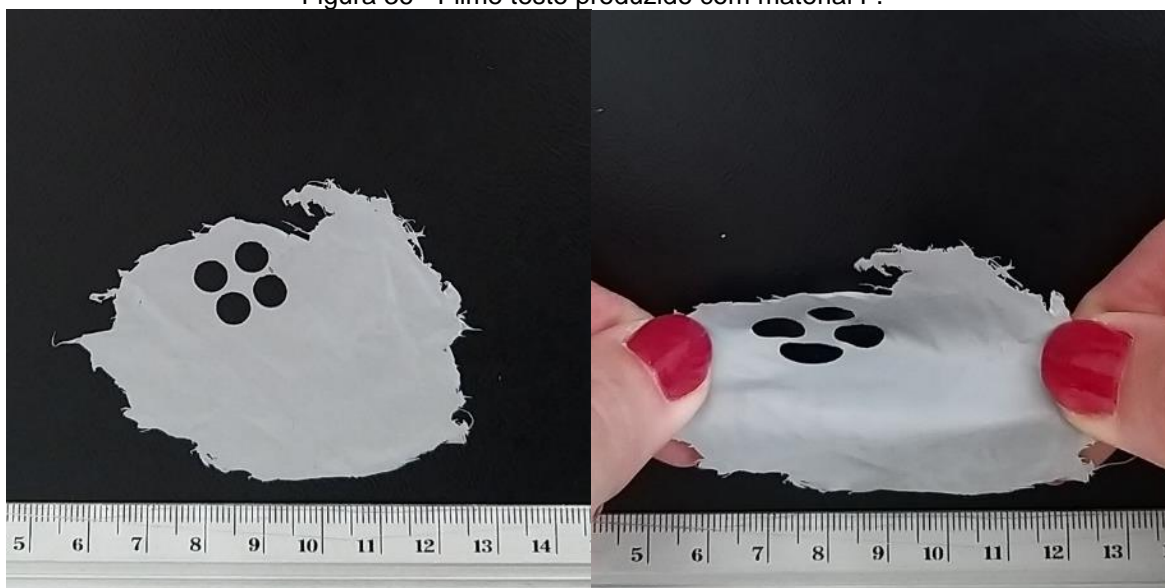
Fonte: Autora

Figura 35 - Filme teste produzido com material E.



Fonte: Autora

Figura 36 - Filme teste produzido com material F.



Fonte: Autora

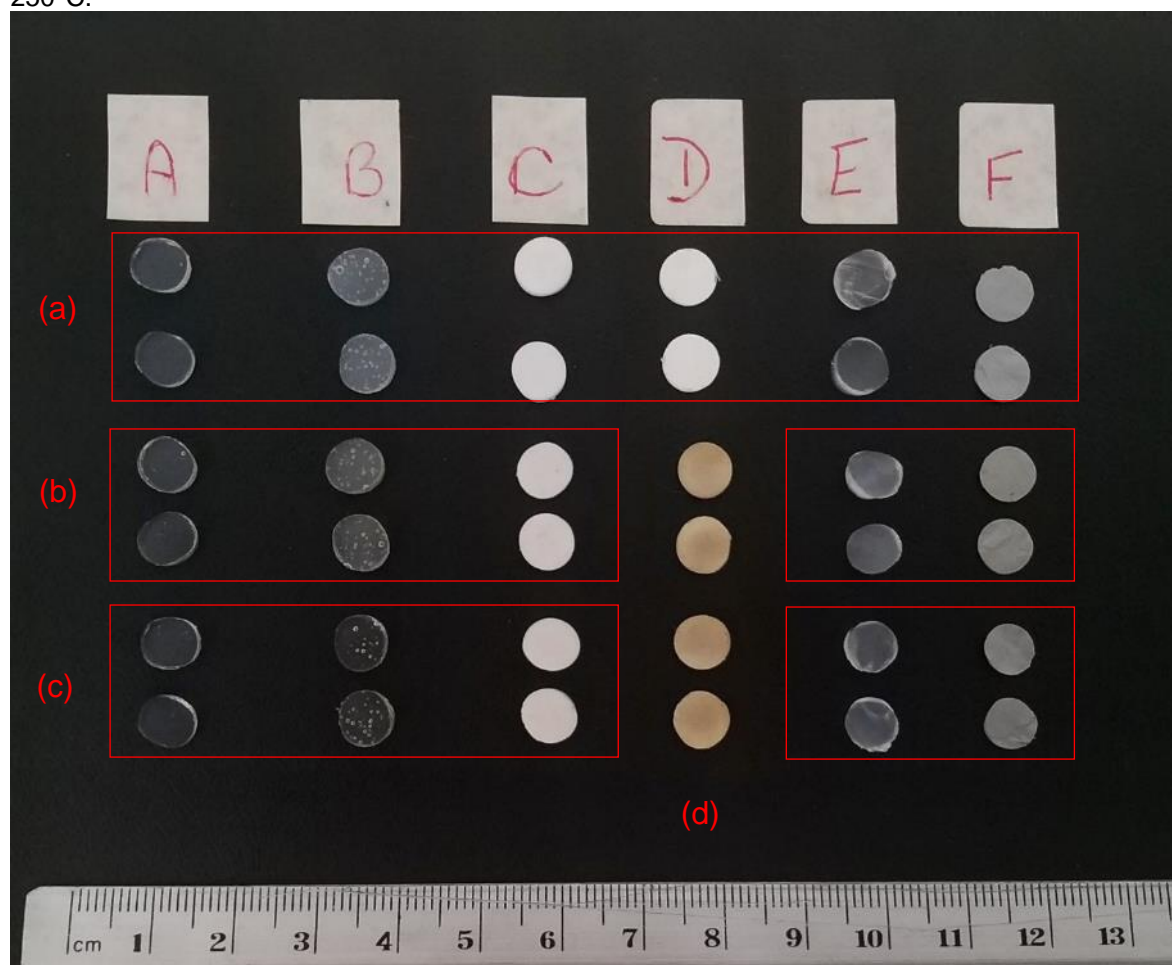
Figura 37 - O filme produzido com o material F e cristais de sulfato de cálcio ficou rígido e quebradiço.



Fonte: Autora

A resistência térmica de todos esses materiais também foi avaliada. Duas amostras de cada material puro foram submetidas a 250°C por 2h e outras duas amostras passaram 15h a 250°C no forno, enquanto duas amostras foram mantidas em temperatura ambiente, como controle do teste. A Figura 38 apresenta a aparência dessas amostras após a avaliação.

Figura 38 - Aspectos das amostras de cada material (A, B, C, D, E e F), aos pares, de cima para baixo: (a) controle, (b) tratamento térmico de 250°C/2h e (c) tratamento térmico de 250°C/15h, com exceção (d) das quatro amostras do material D que permaneceram apenas 5 e 10 min no forno a 250°C.



Fonte: Autora

Não há alteração visualmente evidente do material A e do material E, submetidos aos dois tratamentos, em relação aos controles. As amostras de material B apresentaram mudança de coloração após ambos os tratamentos, sendo mais evidente após o período mais longo no forno. O material C, por outro lado, não apresentou mudança de cor perceptível, mas as amostras que passaram 15h no forno amoleceram consideravelmente, apresentando forte aderência.

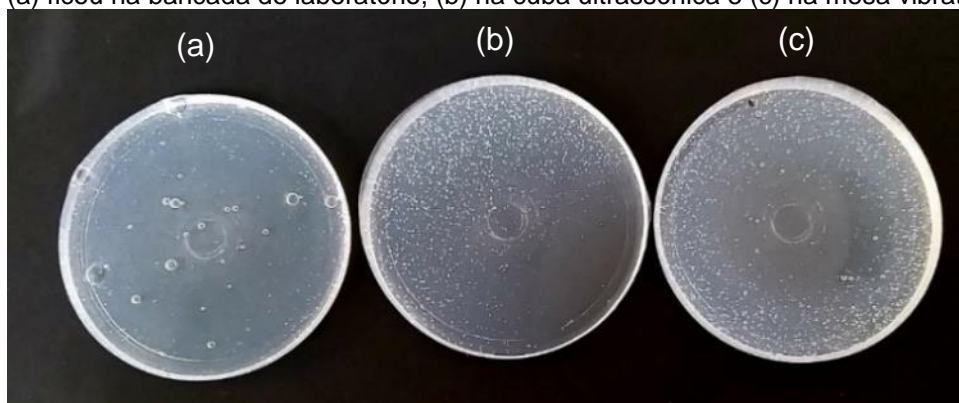
Por fim, as amostras do material F, que resistiria até 320°C de acordo com o fabricante, mudaram sutilmente de coloração após 2h e após 15h de forno, sendo que após o período mais longo, encolheram e ficaram mais rígidas em relação ao controle.

Após a verificação dos resultados, foi optado pelo uso do material A para a produção dos filmes OSLD e, para isso, foi conduzido um estudo com o objetivo de eliminar as bolhas de ar na produção de filmes com esse material.

7.2 Testes de eliminação de bolhas nas matrizes

A Figura 39 compara amostras de filme produzidas com material A e levadas à cuba ultrassônica e à mesa vibratória, durante as primeiras 3h30min da cura (do total de 24h). Foi observado que a amostra de controle, que foi mantida na bancada, apresenta menos bolhas, as quais são de tamanho maior quando comparadas às muitas microbolhas que apareceram nas amostras que foram à cuba ultrassônica e à mesa vibratória.

Figura 39 - Amostras de filme puro, após cura, produzidas com material A. Nas primeiras 3h30min da cura, (a) ficou na bancada do laboratório, (b) na cuba ultrassônica e (c) na mesa vibratória.



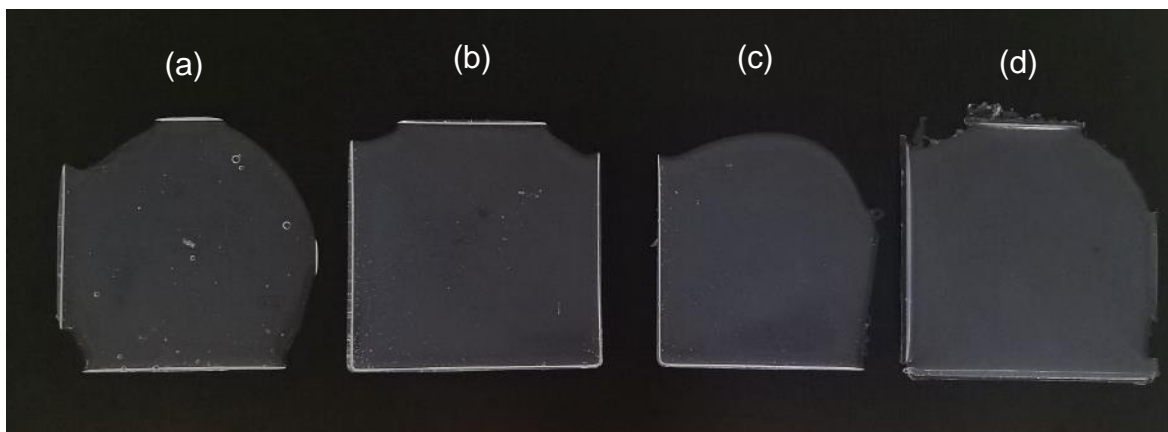
Fonte: Autora

As amostras que passaram algumas horas na cuba ultrassônica e na mesa vibratória apresentaram muitas microbolhas, enquanto a amostra em condições ambiente apresentava apenas algumas bolhas maiores.

Foi observado que o resultado das amostras da cuba ultrassônica e da mesa vibratória são similares. O uso de mesa vibratória foi descartado e o teste foi repetido, deixando as amostras na cuba ultrassônica por períodos menores. Neste caso, foi observado que, quando a amostra é colocada na cuba ultrassônica apenas no primeiro minuto de cura e depois deixada na bancada em temperatura ambiente, o resultado é um filme com uma densidade de bolhas extremamente baixa.

O último teste de eliminação de bolhas realizado comparou 1 min de cuba ultrassônica com sopro e com rolo fura-bolhas (utilizado em construção civil). A Figura 40 mostra o aspecto visual das amostras após a cura.

Figura 40 - Amostras de filme puro, após cura, produzidas com material A. No primeiro minuto da cura de 24h, (a) ficou na bancada do laboratório, (b) colocada na cuba ultrassônica, (c) foi soprada e (d) o rolo fura-bolhas foi passado sobre ela.



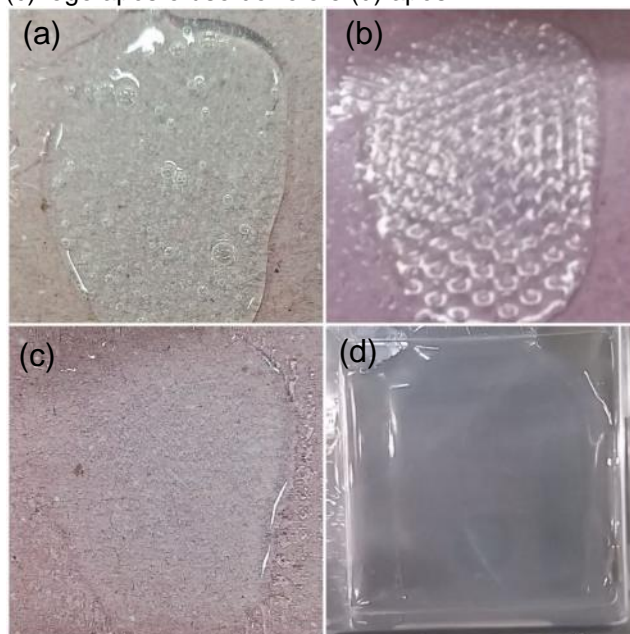
Fonte: Autora

A comparação dessas amostras evidencia que a cuba ultrassônica, embora elimine as bolhas maiores, ainda deixa algumas microbolhas. A amostra que foi soprada logo após ser derramada sobre a forma teve bolhas eliminadas, mas algumas persistiram. O rolo fura-bolhas foi mais eficaz na obtenção de amostra praticamente sem bolhas.

Na Figura 41, é possível observar a aparência da amostra durante os primeiros minutos de cura, com o uso do rolo fura-bolhas, e a aparência após 24h de cura, sem bolhas.

A Figura 42 mostra um filme praticamente sem bolhas de ar, no qual foi passado o rolo fura-bolhas antes da cura. Ficou claro que o rolo fura-bolhas era o melhor instrumento na eliminação de bolhas quando utilizado o material A escolhido para a matriz dos filmes OSLD.

Figura 41 - Estágios durante a cura do material A, sendo (a) mistura derramada na bancada, (b) durante o uso do rolo, (c) logo após o uso do rolo e (d) após 24h.



Fonte: Autora

Figura 42 - Amostra de filme puro, após cura, produzida com material A, no qual foi passado o rolo fura-bolhas antes da cura.

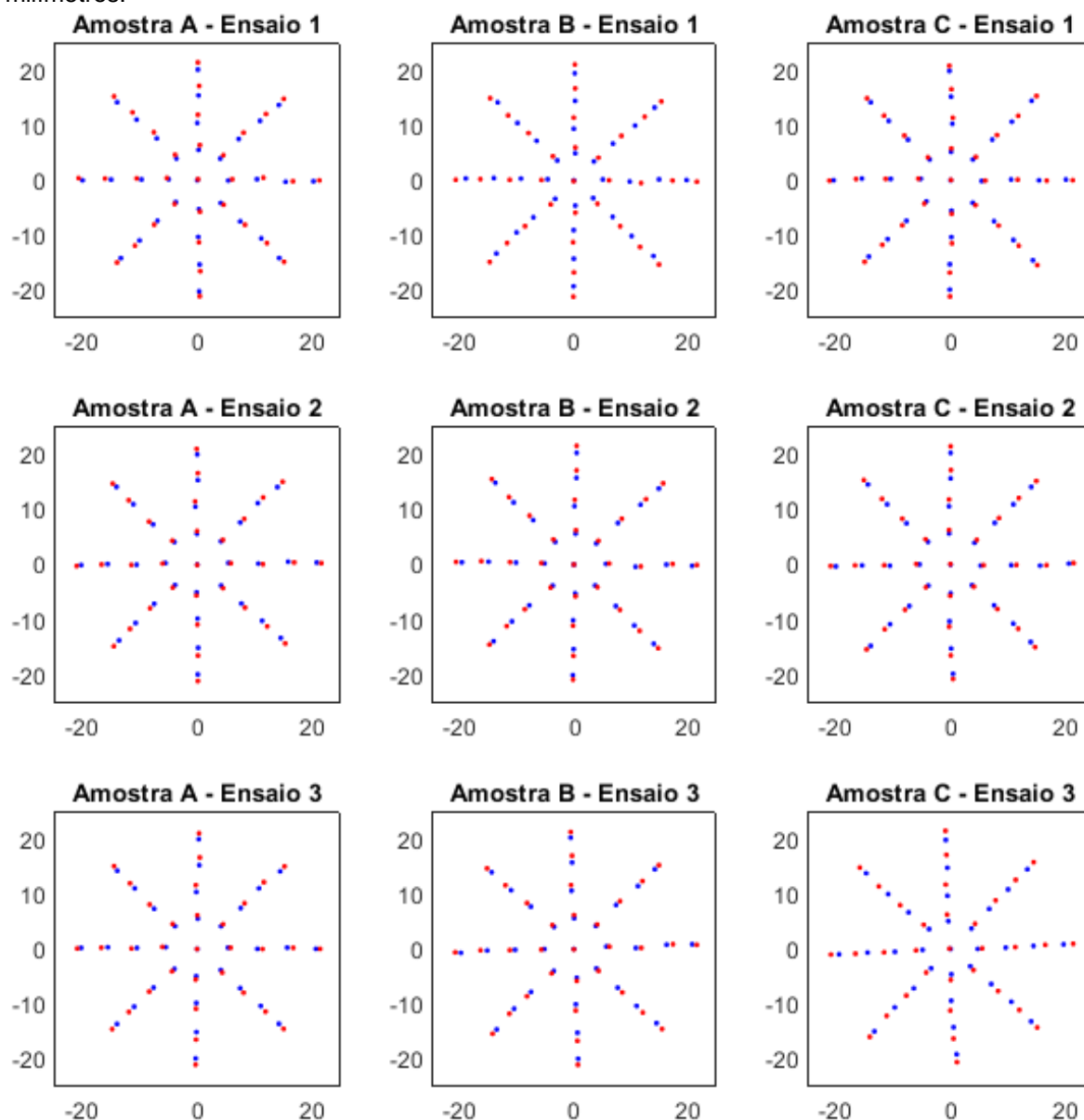


Fonte: Autora

7.3 Teste de resistência mecânica da matriz do filme

A Figura 43 apresenta os gráficos obtidos em cada ensaio realizado (3 ensaios para cada amostra), nos quais os pontos azuis correspondem à amostra sem esforço mecânico e os pontos vermelhos à mesma amostra com esforço (coluna de água).

Figura 43 - Resultados dos três ensaios de resistência mecânica realizados com as amostras A (pura), B (3 irradiações de 20 Gy) e C (irradiada 10 vezes com 20 Gy cada). Eixos x e y em milímetros.



Fonte: Daniel Botelho, IFSP

Esses ensaios demonstram que não houve alteração da resistência mecânica entre as amostras A, B e C.

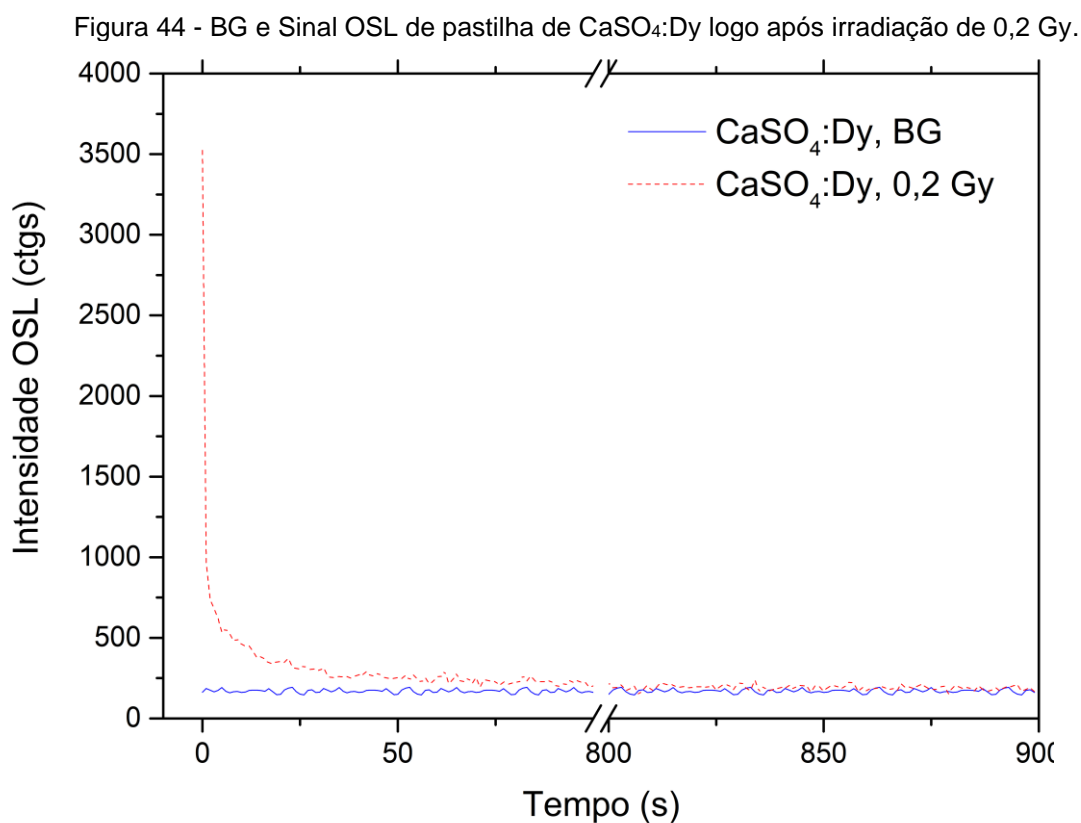
Algumas considerações são relevantes. A primeira é de que o resultado se refere aos filmes produzidos apenas com a matriz e não pode ser equivocadamente interpretado como sendo a resistência mecânica do filme OSLD (mistura dos cristais ao elastômero), de forma que o resultado do mesmo teste poderia ser diferente para os filmes OSLD. Isso não invalida a avaliação realizada,

na qual é possível afirmar que o elastômero utilizado não apresenta deterioração mecânica após 10 ciclos de irradiação de 20 Gy cada.

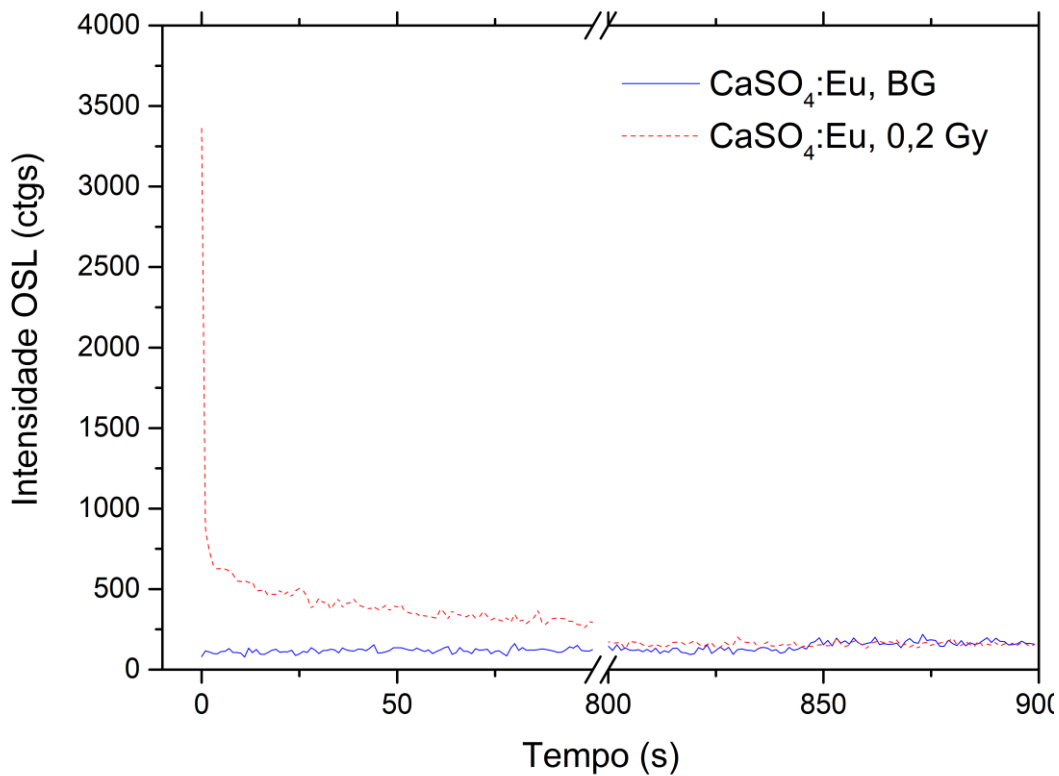
A segunda é que, para validar o resultado estatisticamente, dever-se-ia ter avaliado uma quantidade de amostras de cada condição (nova e irradiada). Isso foi planejado, mas não foi possível por infortúnios decorrentes da pandemia de Covid-19. Ainda assim, considerando que os resultados obtidos claramente não apontam discrepâncias na resistência das três amostras ao mesmo tipo de esforço, pode-se afirmar que, do ponto de vista mecânico de manipulação e irradiação, os filmes OSLD podem ser reutilizados.

7.4 Seleção de dopante do sulfato de cálcio

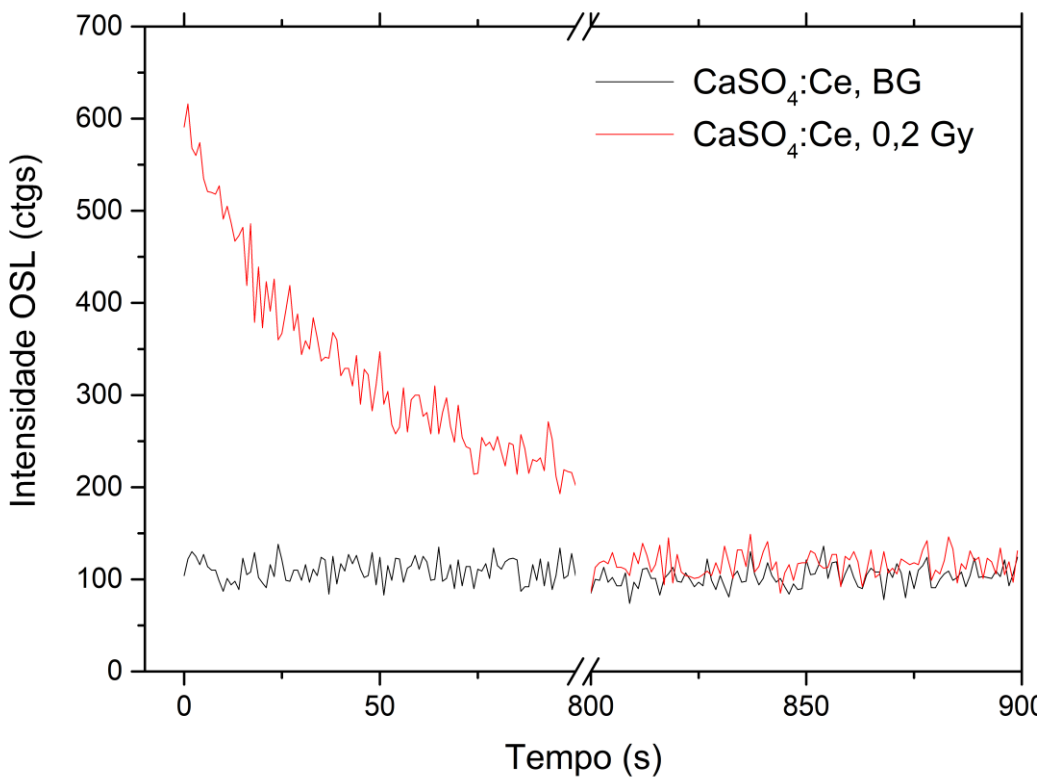
Foi estudado o sinal OSL dos detectores: $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$. As Figuras 44, 45 e 46, respectivamente, comparam o sinal OSL de uma pastilha do material após irradiação de 0,2 Gy comparada ao seu BG.



Fonte: Autora

Figura 45 - BG e Sinal OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ logo após irradiação de 0,2 Gy.

Fonte: Autora

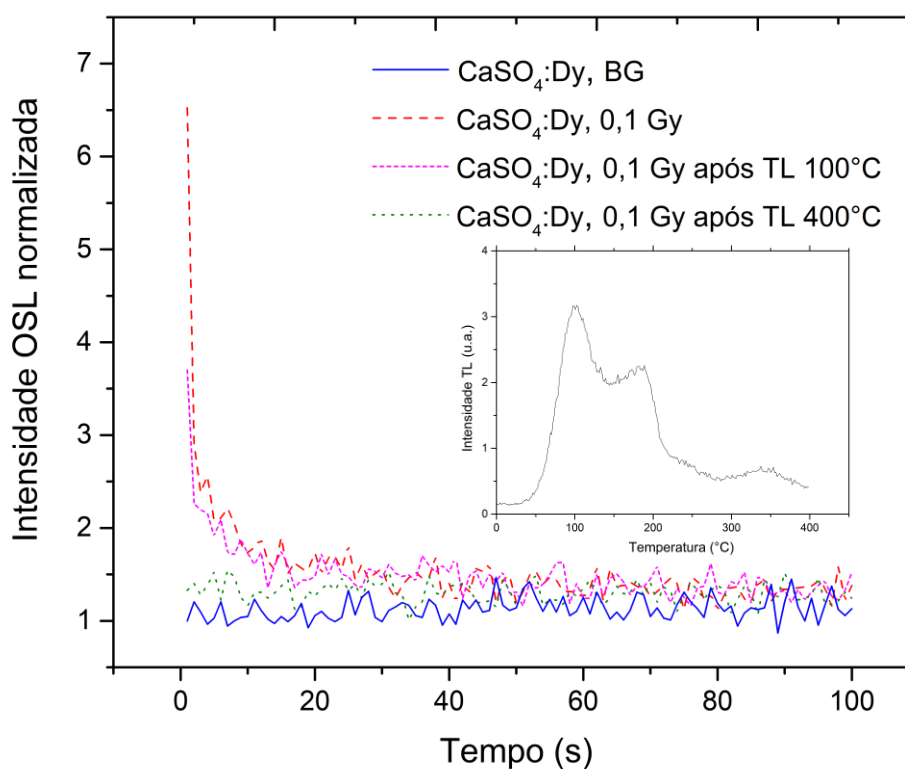
Figura 46 - BG e Sinal OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ logo após irradiação de 0,2 Gy.

Fonte: Autora

Os resultados mostraram que, quando observadas as intensidades OSL iniciais, as sensibilidades do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e do $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ são similares, enquanto o $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ apresenta sensibilidade OSL relativamente baixa.

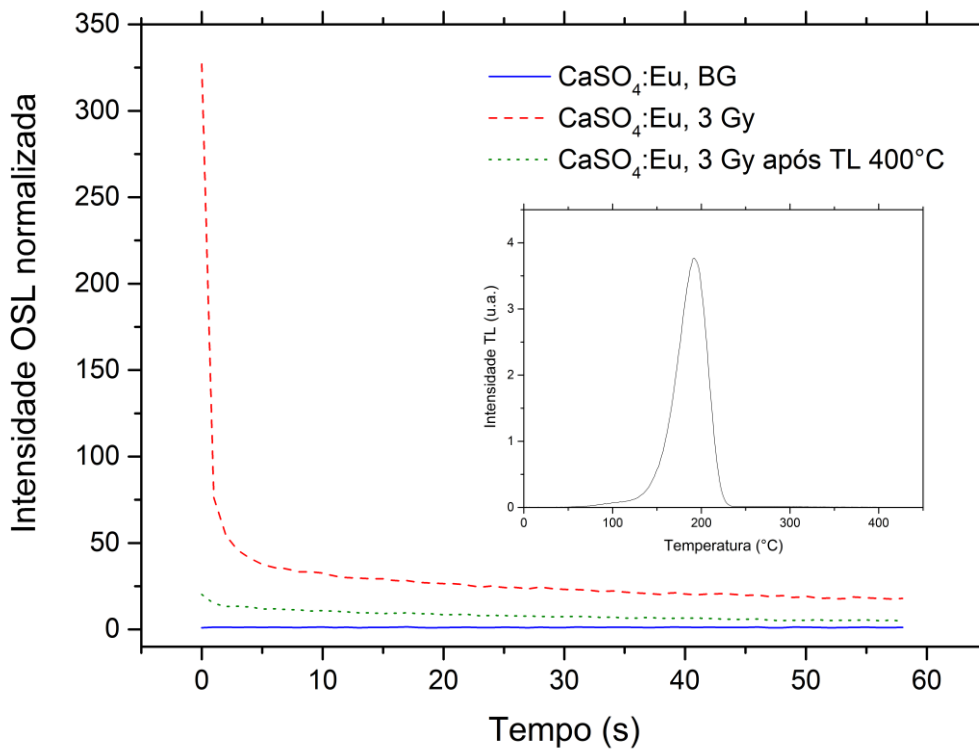
O estudo do sinal OSL de cada material após a leitura TL também foi realizado. As Figuras 47, 48 e 49 expõem o sinal OSL antes e depois de leitura TL das pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ e do $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ em pó, respectivamente.

Figura 47 - Sinais OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ – BG, logo após irradiação de 0,1 Gy, após irradiação e TL 100°C e após irradiação e TL 400°C. Inserção: curva TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtida com taxa de aquecimento de 5°C/s.



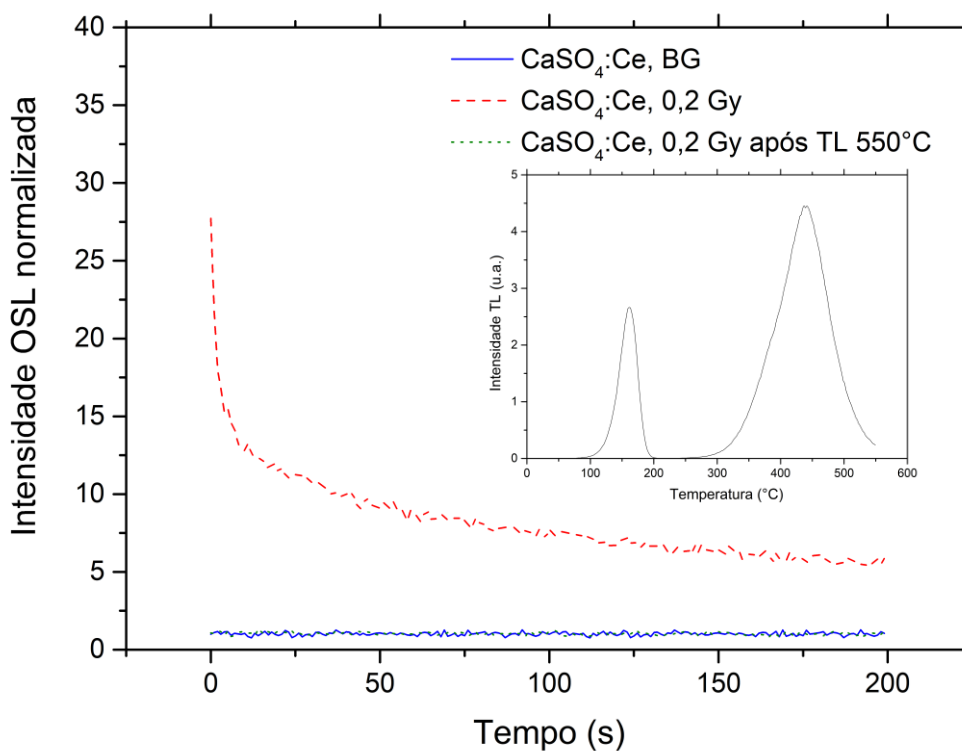
Fonte: Autora

Figura 48 – Sinais OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ – BG, logo após irradiação de 3 Gy, após irradiação e TL 100°C e após irradiação e TL 400°C.



Fonte: Autora

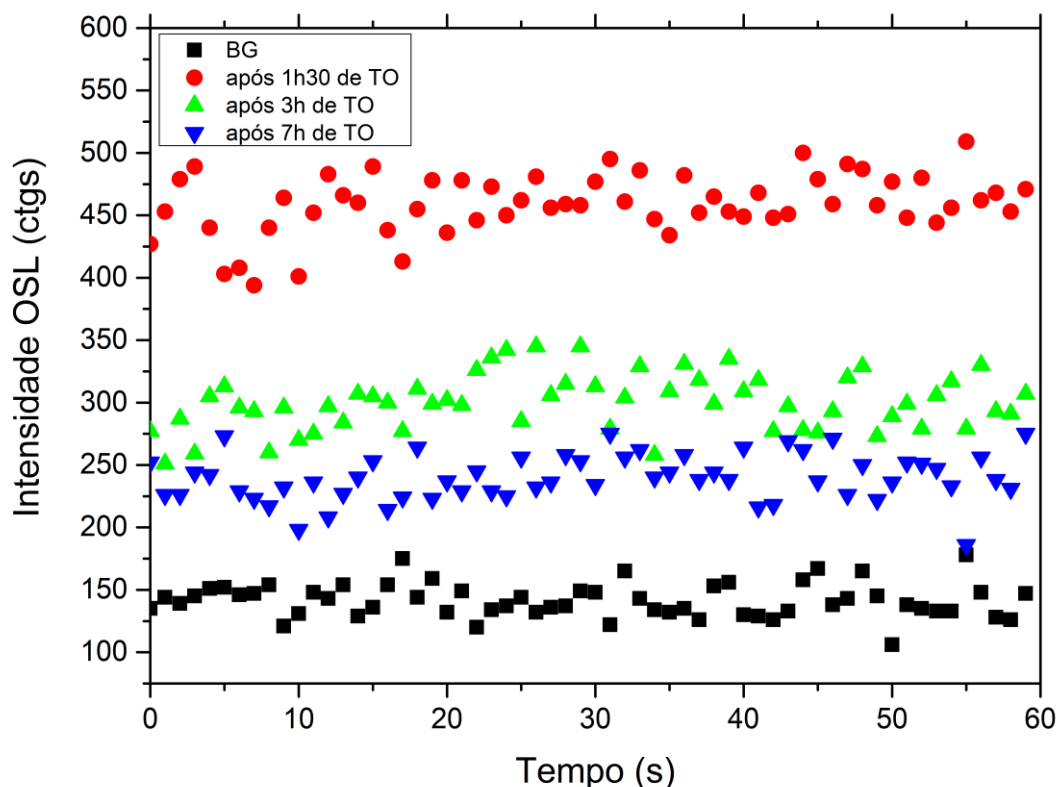
Figura 49 - Sinais OSL de $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ em pó – BG, logo após irradiação de 0,2 Gy, e após irradiação e TL 550°C. Inserção: curva TL do $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$ obtida com taxa de aquecimento de 5°C/s.



Fonte: Autora

Com relação ao estudo de tratamento óptico dos materiais detectores, as Figuras 50 e 51 mostram os sinais OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e do $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$, lidos após diferentes períodos de tratamento óptico na caixa de *bleaching*.

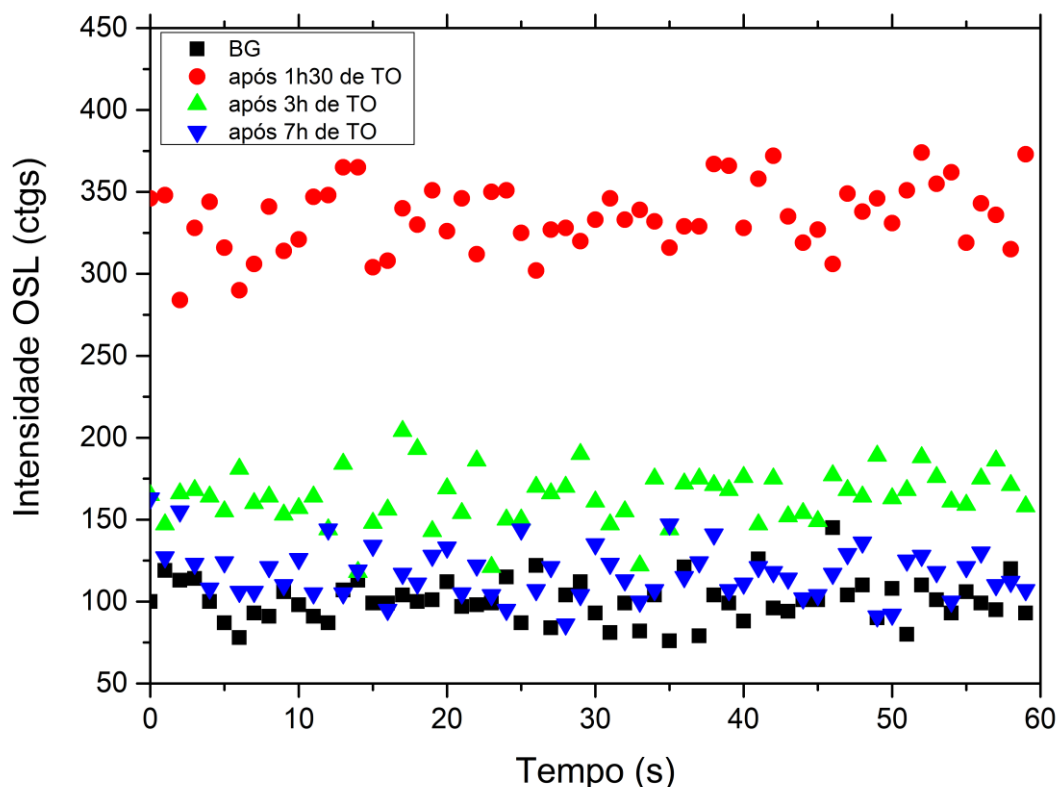
Figura 50 - Sinal OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ sem irradiação prévia (BG), e após irradiação com dose de 20 Gy seguida de tratamentos ópticos (TO) pelos períodos de 1h30min, 3h e 7h.



Fonte: Autora

Foi observado que o sinal OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ pode ser limpo apenas com *tratamento óptico* do detector, sem necessidade de tratamento térmico. Já o sinal OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ não foi totalmente limpo após 7h na caixa de *bleaching* e, possivelmente, necessita de tratamento térmico quando irradiado com doses altas (aproximadamente 20 Gy). Com relação ao $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$, foi verificado que, mesmo para doses menores, não foi possível limpar o sinal com tratamento óptico. Além disso, como mencionado, esse material na concentração utilizada apresentou baixa sensibilidade OSL, sendo desconsiderado seu uso para confecção do filme OSLD.

Figura 51 - Sinal OSL de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ sem irradiação prévia (BG), e após irradiação com dose de 20 Gy seguida de tratamentos ópticos (TO) pelos períodos de 1h30min, 3h e 7h.



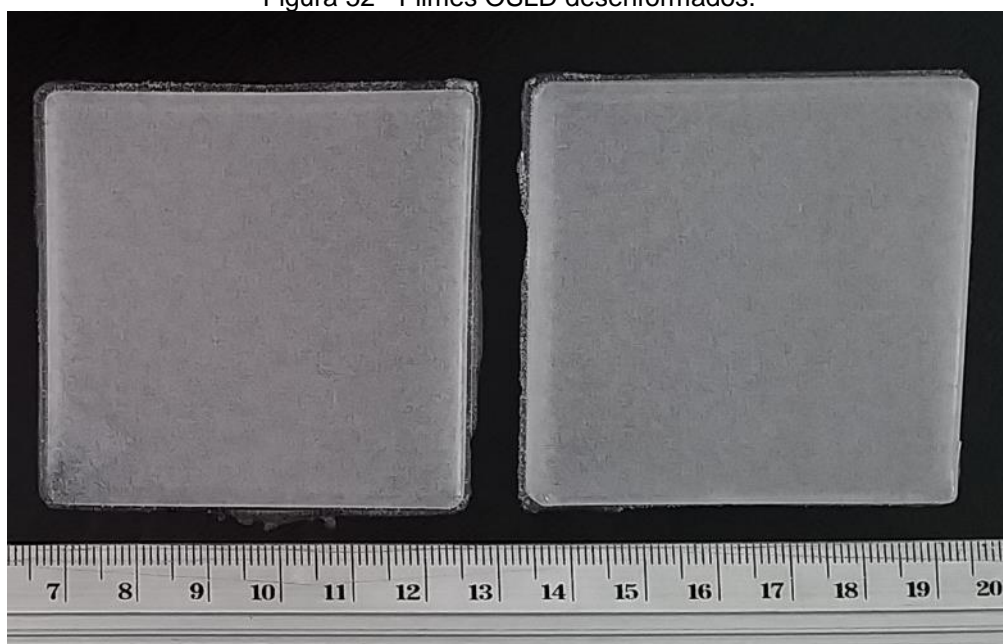
Fonte: Autora

Concluiu-se que o $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ é o material detector mais adequado, dentre os três estudados, para ser utilizado no filme OSLD. A proposta de um filme OSLD que pode ser reutilizado após tratamento óptico é muito favorável pela praticidade, pois não precisa de fornos de alta temperatura e aparatos de alta resistência térmica para manipulação, o que acaba sendo uma limitação em ambientes clínicos, por exemplo.

7.5 Método de produção do filme OSLD

A Figura 52 apresenta os dois filmes OSLD de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ produzidos seguindo a metodologia descrita anteriormente. Cada filme produzido tinha inicialmente $6,2 \times 6,2 \text{ cm}^2$, sendo que as bordas foram desprezadas e cortadas com padrão de grade, régua e bisturi. Assim, a área útil desses filmes OSLD era de $5 \times 5 \text{ cm}^2$.

Figura 52 - Filmes OSLD desenformados.

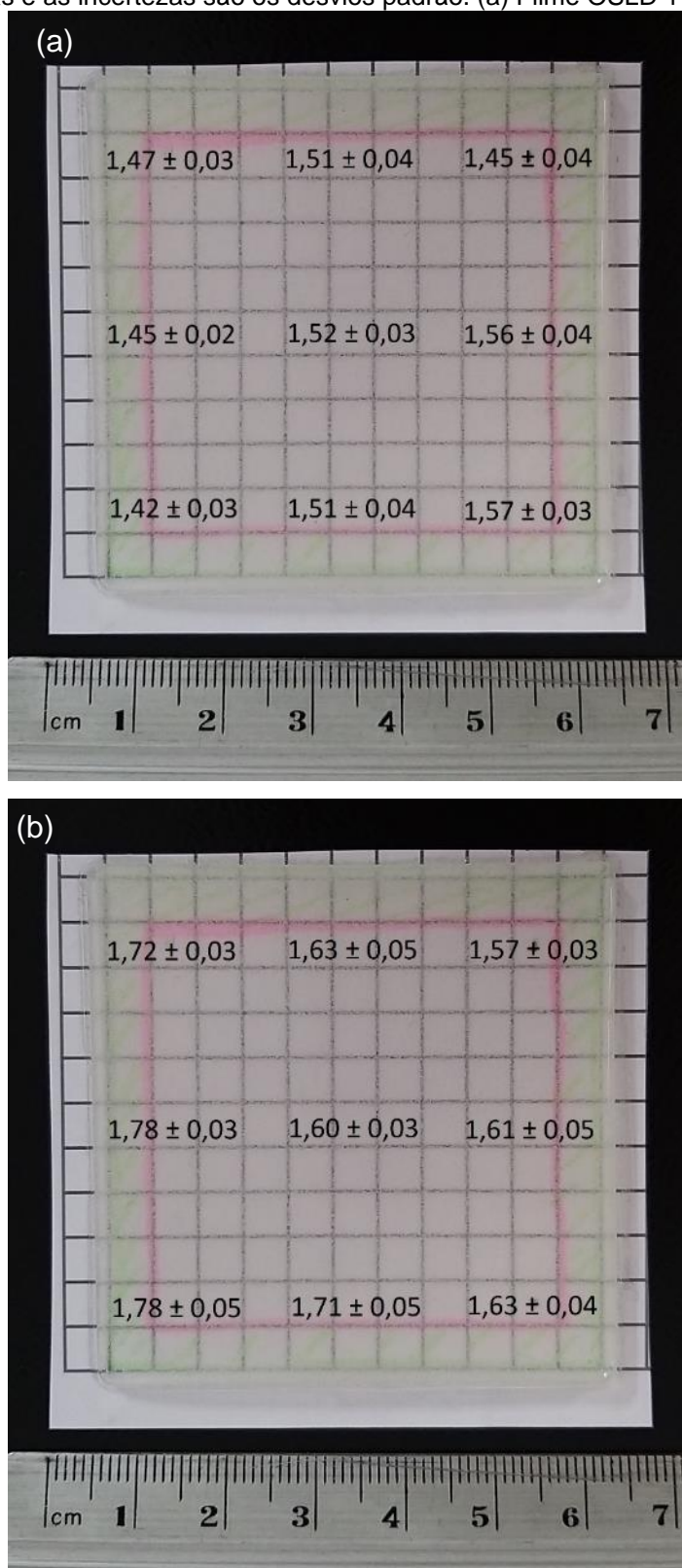


Fonte: Autora

Um micrômetro digital foi utilizado para avaliar a espessura dos filmes OSLD. A Figura 53 mostra os resultados obtidos, sendo que cada espessura (em milímetros) indicada corresponde à média de 3 medidas realizadas e a incerteza associada é o desvio padrão.

Os resultados mostram uma variação de espessura ao longo de cada filme OSLD, com coeficiente de variação de até 5%. A espessura média do filme 1 e do filme 2 é, respectivamente, $(1,50 \pm 0,05)$ mm e $(1,67 \pm 0,08)$ mm.

Figura 53 - Indicação das espessuras medidas, em mm, nos pontos indicados. Correspondem à média de 3 medidas e as incertezas são os desvios padrão. (a) Filme OSLD 1 e (b) Filme OSLD 2.



Fonte: Autora

7.6 Avaliação de propriedades dosimétricas do filme OSLD

7.6.1 Repetibilidade

Para avaliar a repetibilidade, foram utilizadas 9 amostras e cada uma foi irradiada e lida três vezes. A Tabela 3 lista, para cada amostra, a intensidade OSL inicial média dos três ciclos e o respectivo coeficiente de variação.

Tabela 3 - Intensidades OSL iniciais médias e respectivos coeficientes de variação das amostras avaliadas em três ciclos de irradiação e leitura OSL.

| Amostra de filme OSLD | Intensidade OSL inicial média (contagens) | Coefficiente de variação (%) |
|-----------------------|---|------------------------------|
| 1 | 13790 ± 353 | 2,6 |
| 2 | 15102 ± 152 | 1,0 |
| 3 | 13862 ± 298 | 2,1 |
| 4 | 16634 ± 330 | 2,0 |
| 5 | 17838 ± 324 | 1,8 |
| 6 | 16342 ± 112 | 0,7 |
| 7 | 17641 ± 335 | 1,9 |
| 8 | 16312 ± 311 | 1,9 |
| 9 | 22339 ± 162 | 0,7 |

Fonte: Autora

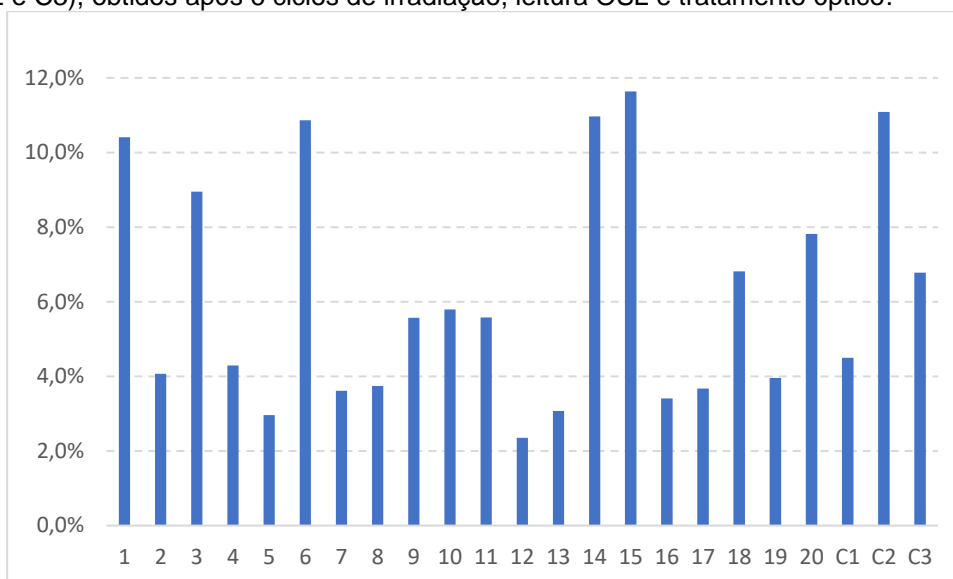
Pode ser observado que o coeficiente de variação máximo em relação ao valor médio foi de 2,6%, desse modo, o filme apresenta uma repetibilidade satisfatória.

7.6.2 Reprodutibilidade

A reprodutibilidade de 20 amostras do filme OSLD foi avaliada em seis ciclos de irradiação e leitura OSL, em dias diferentes, com tratamento óptico entre um ciclo e outro. Foram incluídas 3 amostras de controle, que são pastilhas de CaSO₄:Dy utilizadas no IPEN.

A Figura 54 mostra o coeficiente de variação obtido com cada amostra.

Figura 54 - Coeficientes de variação de 20 amostras de filme OSLD e de 3 pastilhas de controle (C1, C2 e C3), obtidos após 6 ciclos de irradiação, leitura OSL e tratamento óptico.



Fonte: Autora

Comparando os resultados do teste de reprodutibilidade realizado com 20 amostras, o menor coeficiente de variação dispersão obtido foi 2,4% e o máximo foi 11,6%. O coeficiente de variação médio é $(6 \pm 3) \%$.

Esse resultado está dentro do esperado em relação às amostras de controle, cujo coeficiente de variação médio foi $(7 \pm 3) \%$.

Assim, considerando as flutuações do próprio equipamento leitor, esse estudo corrobora com a reprodutibilidade do filme OSLD.

7.6.3 Homogeneidade do filme OSLD

A Tabela 4 apresenta a intensidade OSL inicial média de cada região do filme OSLD para o teste de homogeneidade.

Tabela 4 - Intensidade OSL inicial média e respectivo coeficiente de variação para cada região do filme.

| Região do filme OSLD | Intensidade OSL inicial média (contagens) | Coeficiente de variação (%) |
|----------------------|---|-----------------------------|
| 1 | 14251 \pm 737 | 5,2 |
| 2 | 16938 \pm 793 | 4,7 |
| 3 | 17968 \pm 747 | 4,2 |

Fonte: Autora

Pode ser observado que, em cada uma das três regiões, a variação da sensibilidade OSL é em torno de 5%.

Por outro lado, comparando as três regiões, obteve-se coeficiente de variação de 12%.

7.6.4 Sensibilidade

Conforme observado no estudo anterior, houve uma variação de sensibilidade ao longo do filme de 12%. Neste estudo, foram avaliadas 24 amostras de diferentes regiões de todo o filme OSLD. Considerando-se a intensidade OSL inicial, o valor médio de sensibilidade das 24 amostras foi de (5.677 ± 751) contagens. Gy^{-1} e o coeficiente de variação é 13%. Esse valor está em concordância com o obtido no estudo anterior, de apenas 3 regiões.

Devido a essa diferença de sensibilidade entre amostras do mesmo filme, e por não se ter material suficiente para fazer prévia seleção por sensibilidade, optou-se por corrigir os resultados deste trabalho (apresentados na sequência) pela sensibilidade de cada amostra.

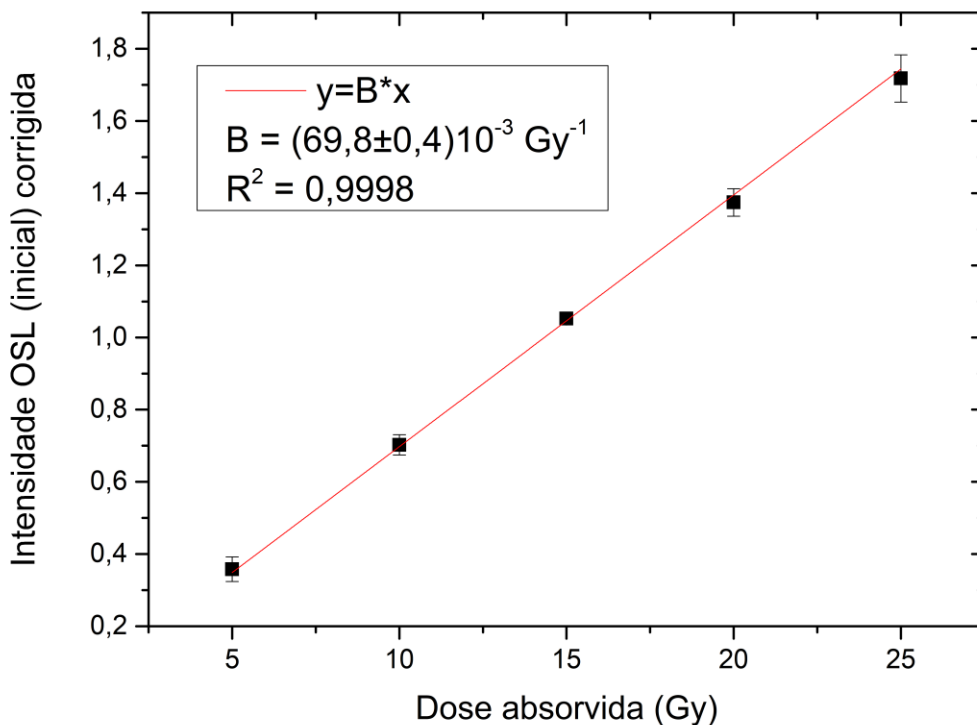
A massa das amostras variou entre 42 e 49 mg. A sensibilidade de cada amostra foi dividida pela sua massa individual e obteve-se a sensibilidade intrínseca de cada uma das 24 amostras. O valor médio de sensibilidade intrínseca foi de (125.151 ± 17.143) contagens. g.Gy^{-1} e o coeficiente de variação foi de 14%.

Esses resultados demonstram que o filme OSLD tem sensibilidade para ser utilizado em diferentes aplicações de dosimetria de radiações, principalmente para doses na faixa de cGy a Gy, como é o caso da radioterapia, por exemplo. Foi observado que a correção dos resultados pela massa de cada detetor não altera o coeficiente de variação, assim, neste trabalho foi adotada a correção pela sensibilidade individual da amostra.

7.6.5 Resposta em função da dose

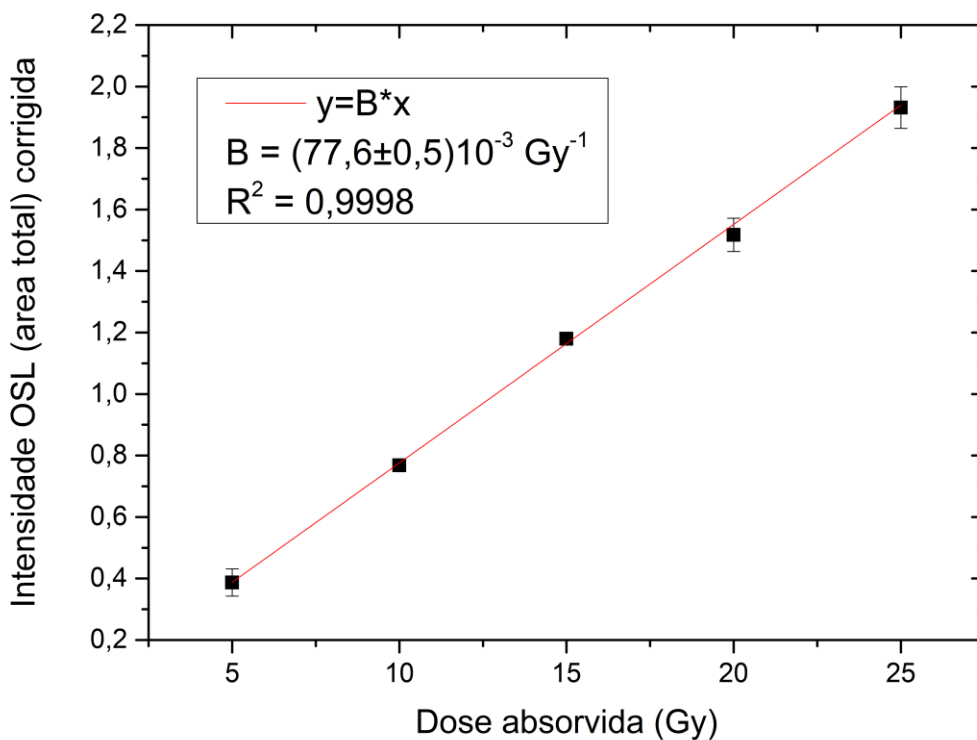
A resposta em função da dose dos filmes OSLD foi gerada tanto utilizando-se a intensidade OSL inicial (Figura 55) quanto a área OSL total (Figura 56). Em ambos os casos, o sinal OSL foi corrigido pela sensibilidade de cada amostra.

Figura 55 - Dose resposta do filme OSLD, em termos da intensidade OSL inicial corrigida pela sensibilidade. Cada ponto corresponde à média de três amostras e as barras de erro são os desvios padrão.



Fonte: Autora

Figura 56 - Dose resposta do filme OSLD, em termos da área total do sinal OSL corrigido pela sensibilidade. Cada ponto corresponde à média de três amostras e as barras de erro são os desvios padrão.



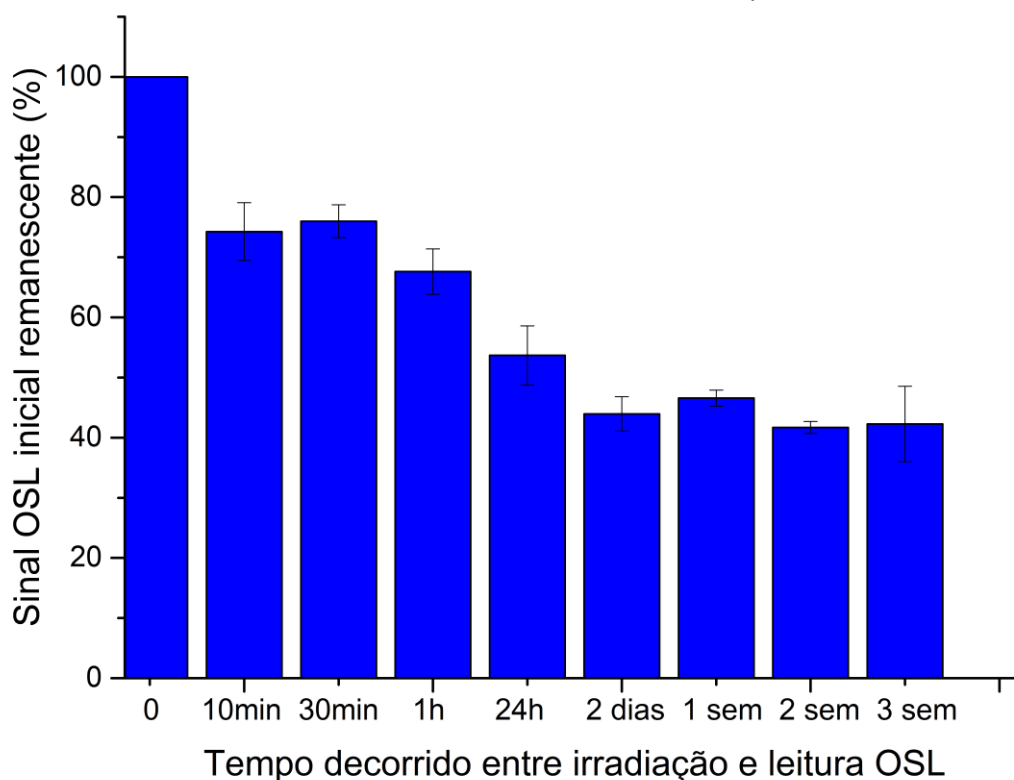
Fonte: Autora

Pode ser observada a linearidade da dose resposta dos filmes OSLD produzidos no intervalo de dose de 5 a 25 Gy.

7.6.6 Desvanecimento do sinal OSL

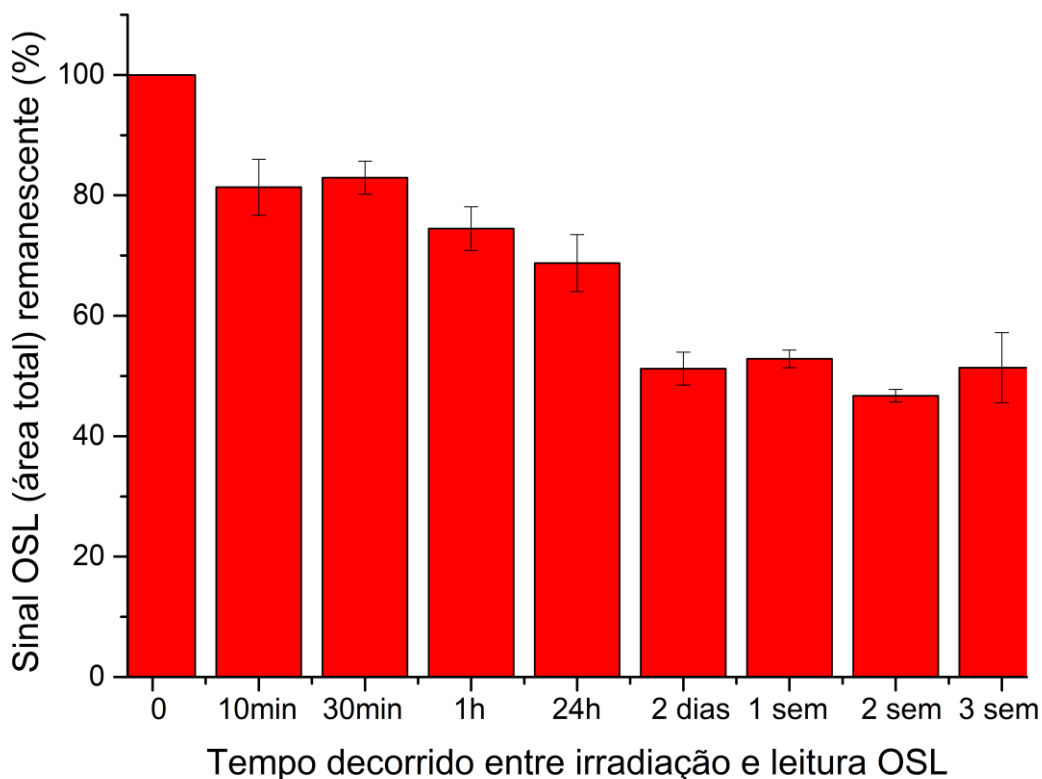
O resultado do estudo de desvanecimento do sinal OSL para armazenamento no escuro foi calculado pelo sinal remanescente médio (5 amostras) e seu desvio padrão para cada período (10min, 30min, 1h, 24h, 2 dias, 1 semana, 2 semanas e 3 semanas). Utilizou-se tanto a intensidade OSL inicial (Figura 57), quanto a área OSL total (Figura 58).

Figura 57 - Sinal remanescente médio após diferentes períodos, obtido da intensidade OSL inicial de 5 amostras mantidas no escuro. As barras de erro são os desvios padrão.



Fonte: Autora

Figura 58 - Sinal remanescente médio após diferentes períodos, obtido da área total do sinal OSL de 5 amostras mantidas no escuro. As barras de erro são os desvios padrão.



Fonte: Autora

Os resultados demonstram que nas primeiras 24h há uma perda significativa do sinal OSL e esse desvanecimento do sinal OSL se estabiliza 2 dias após a irradiação.

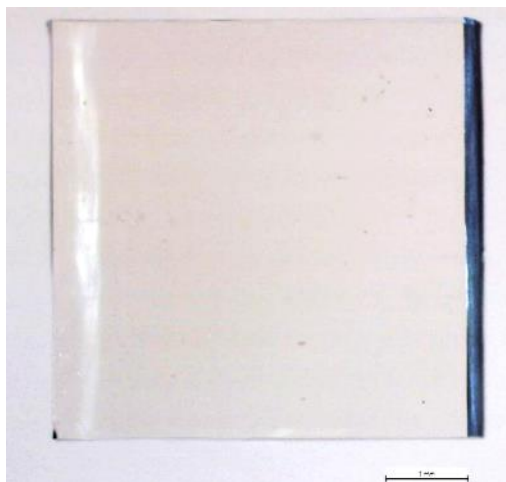
Nas aplicações dos filmes OSLD, é possível utilizar um fator de correção para o desvanecimento do sinal. De qualquer forma, esses filmes são interessantes para mapeamento 1D e 2D de doses e aplicações nas quais interessa a distribuição relativa de doses e não necessariamente a dosimetria absoluta. Caso sejam utilizados para dosimetria absoluta, recomenda-se aguardar no mínimo 24h para minimizar a influência do desvanecimento óptico do sinal.

7.7 Avaliação morfológica do filme OSLD

Inicialmente, as amostras de filme OSLD e de filme puro (apenas silicone elastômero, sem material dosimétrico) foram observadas em lupa, tanto com luz transmitida quanto refletida. A Figura 59 apresenta uma amostra de filme puro e a

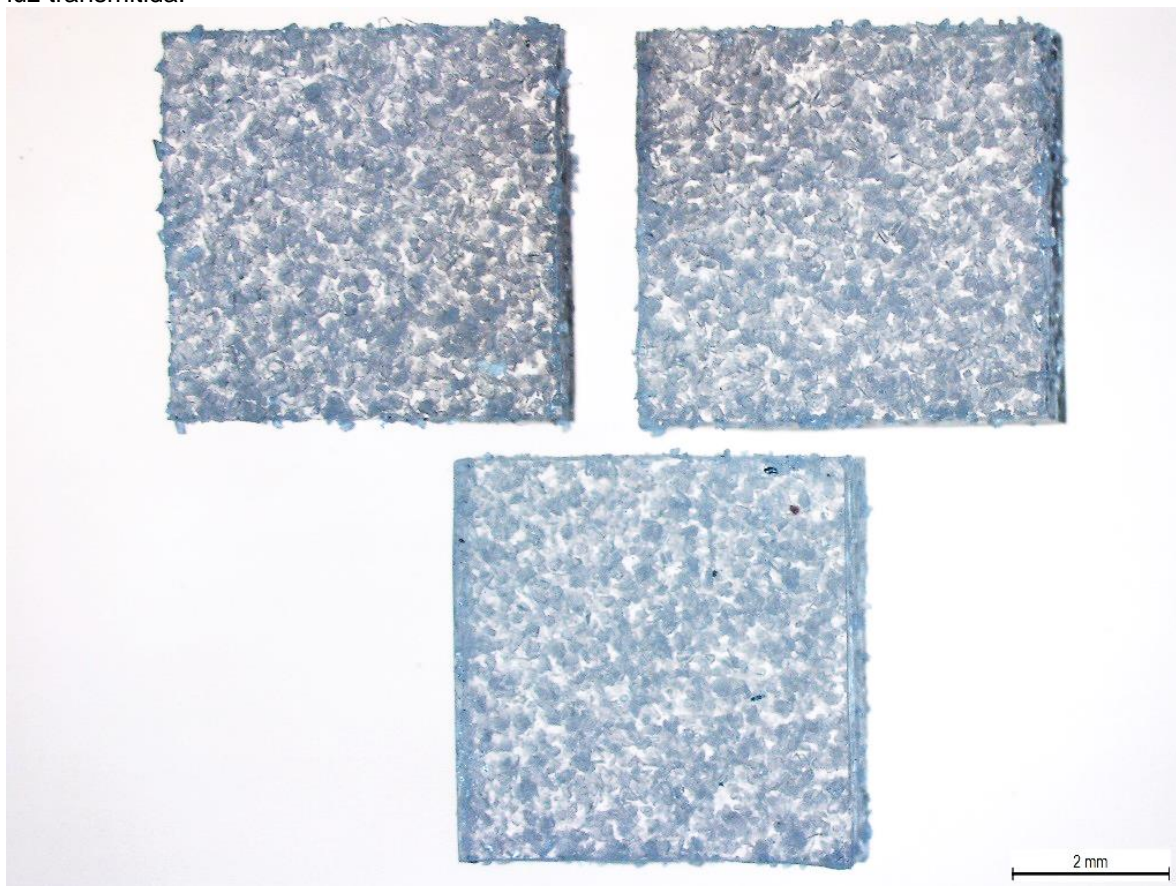
Figura 60 mostra as imagens de três amostras de filme OSLD, todas observadas com luz transmitida.

Figura 59 - Filme de silicone-borracha pura, sem material dosimétrico, observado em lupa STEMI com luz transmitida.



Fonte: Autora

Figura 60 - Três amostras, de três regiões distintas de filme OSLD, observadas em lupa STEMI com luz transmitida.



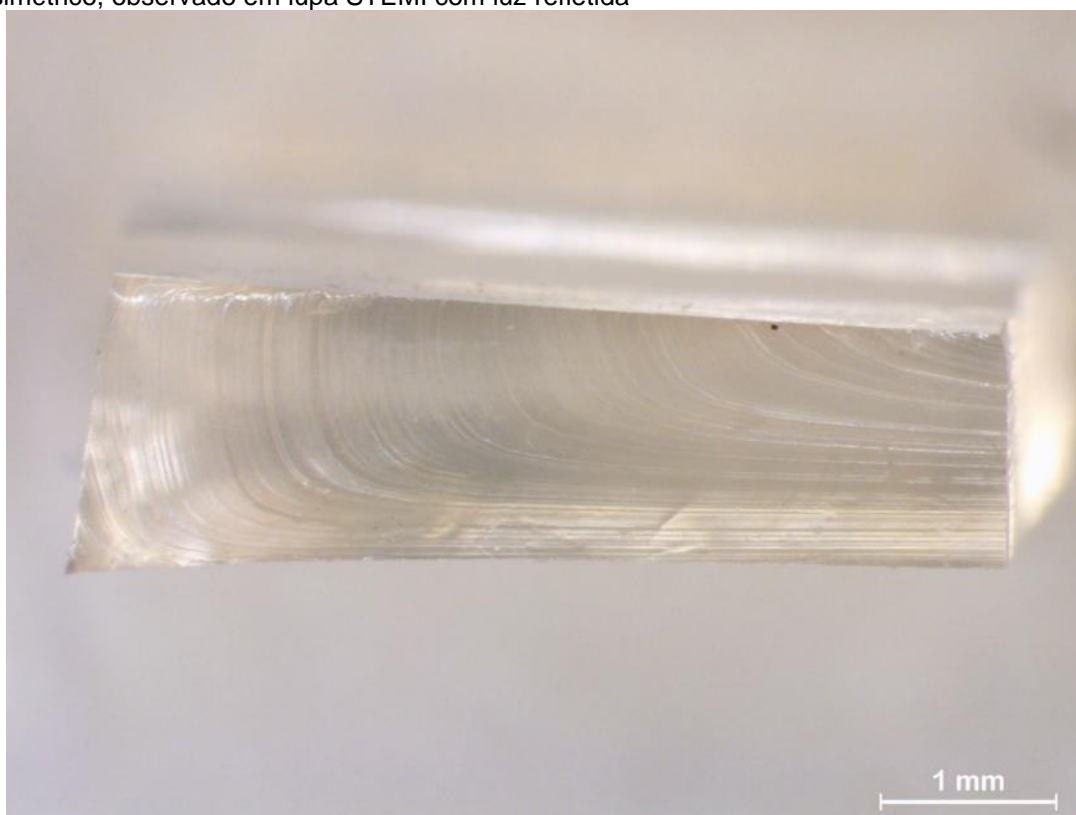
Fonte: Autora

Como as amostras são relativamente espessas (aproximadamente 1,5 mm), observou-se vários planos focais. Foi possível observar a disposição dos cristais de sulfato de cálcio no filme OSLD. Eles aparentam estar dispostos uniformemente pelo filme OSLD.

Para avaliação mais assertiva dessa distribuição dos cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ no filme OSLD, cada uma dessas imagens de uma região do filme foi processada no software Leica Application Suite (LAS). Foi realizada a binarização de cada uma e computada a fração de preto (cristais) em relação ao branco (matriz). A comparação das três frações resultou em coeficiente de variação de 4,2%, o que indica uniformidade na distribuição dos cristais no filme OSLD produzido.

Os cortes transversais das amostras também foram avaliados. A Figura 61 apresenta a seção transversal de uma amostra de filme puro observado com luz refletida.

Figura 61 - Corte transversal de filme de silicone-borracha pura (material A), sem material dosimétrico, observado em lupa STEMI com luz refletida

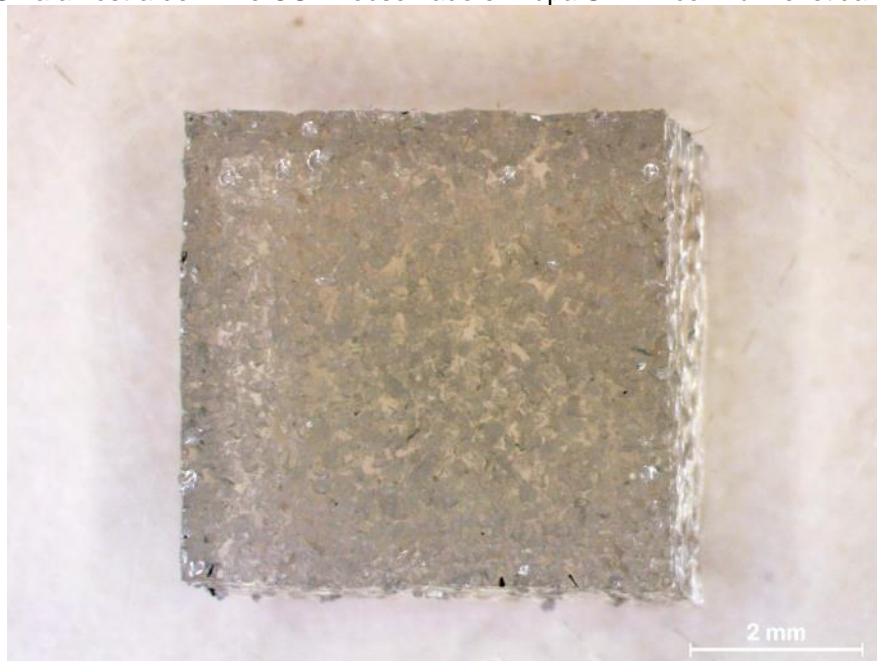


Fonte: Autora

Essa imagem evidencia estrias da formação do polímero na seção transversal das amostras, provavelmente provenientes da própria forma de cura desse elastômero.

Uma imagem de amostra de filme OSLD observada na lupa com luz refletida é apresentada na Figura 62.

Figura 62 - Uma amostra de Filme OSLD observado em lupa STEMI com luz refletida.

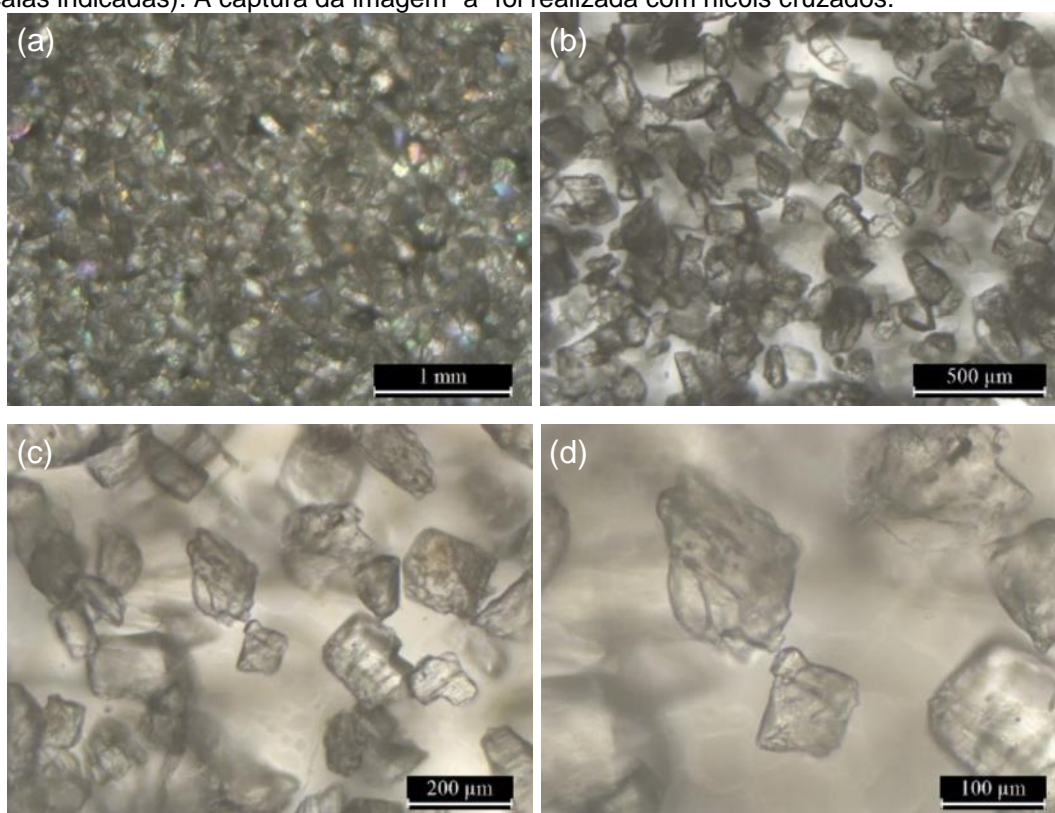


Fonte: Autora

Em segundo momento, as amostras foram observadas em microscópio óptico AX2. A Figura 63 apresenta imagens do microscópio óptico, com diferentes aumentos, da amostra de filme OSLD observadas em lupa (Figura 62).

Nessas imagens, foi possível avaliar os tamanhos dos grãos de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$. Eles apresentam tamanhos variados, desde aproximadamente $50\ \mu\text{m}$ até maiores, ao redor de $200\ \mu\text{m}$, o que está de acordo com a produção deles, na qual a granulometria era $75 - 180\ \mu\text{m}$.

Figura 63 - Amostra de filme OSLD observada em microscópio óptico com diferentes aumentos (escalas indicadas). A captura da imagem "a" foi realizada com nicóis cruzados.

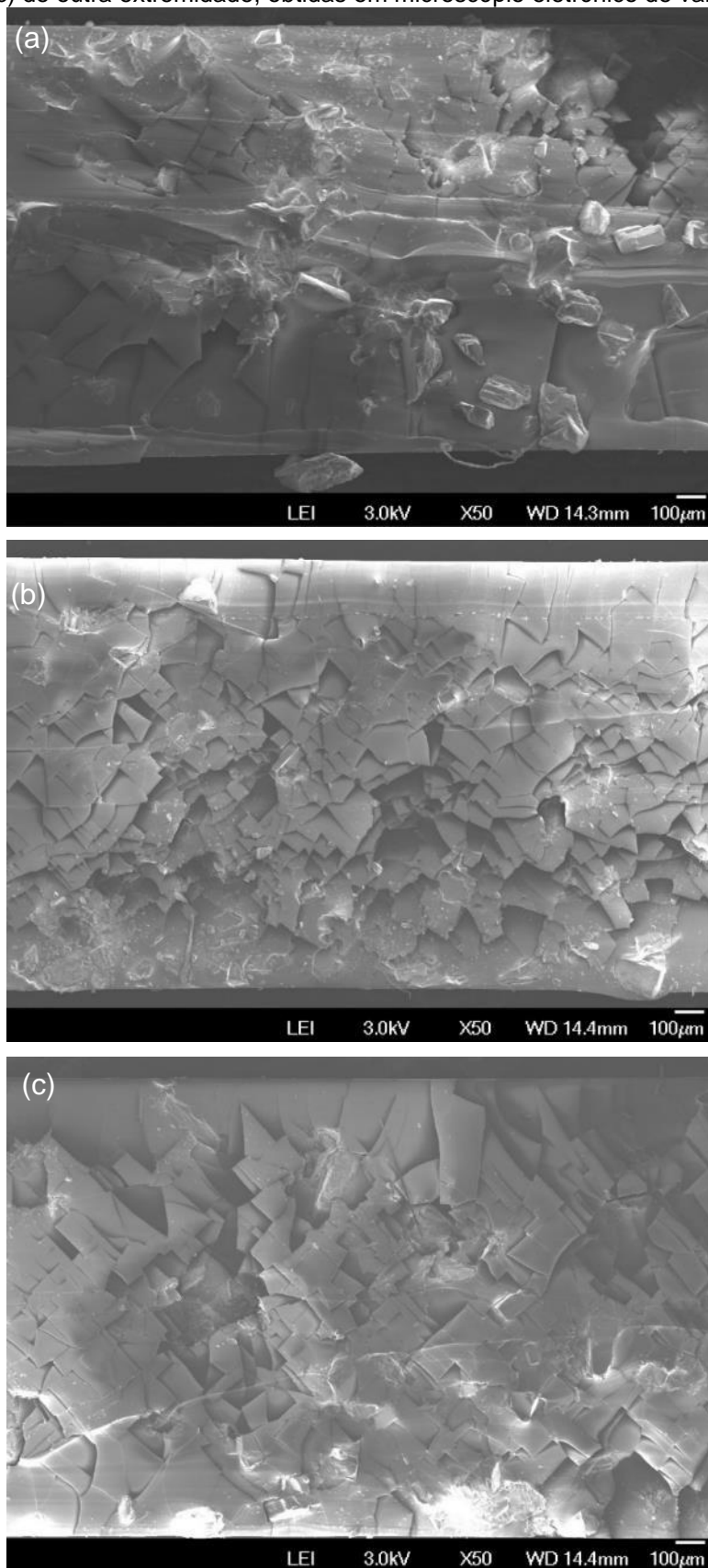


Fonte: Autora

Por fim, as amostras de filme OSLD foram analisadas no MEV. Foram observadas tanto a superfície quanto uma seção transversal de cada amostra, ambas recobertas com carbono.

A fim de continuar a avaliação da homogeneidade do filme OSLD produzido, foram observadas três amostras de diferentes regiões do filme (centro e duas extremidades). A Figura 64 mostra as imagens obtidas com MEV das regiões 1, 2 e 3 (Figura 18), respectivamente, do filme OSLD produzido neste trabalho.

Figura 64 - Imagens de seções transversais de amostras de filme OSLD (a) do centro, (b) de uma extremidade e (c) de outra extremidade, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

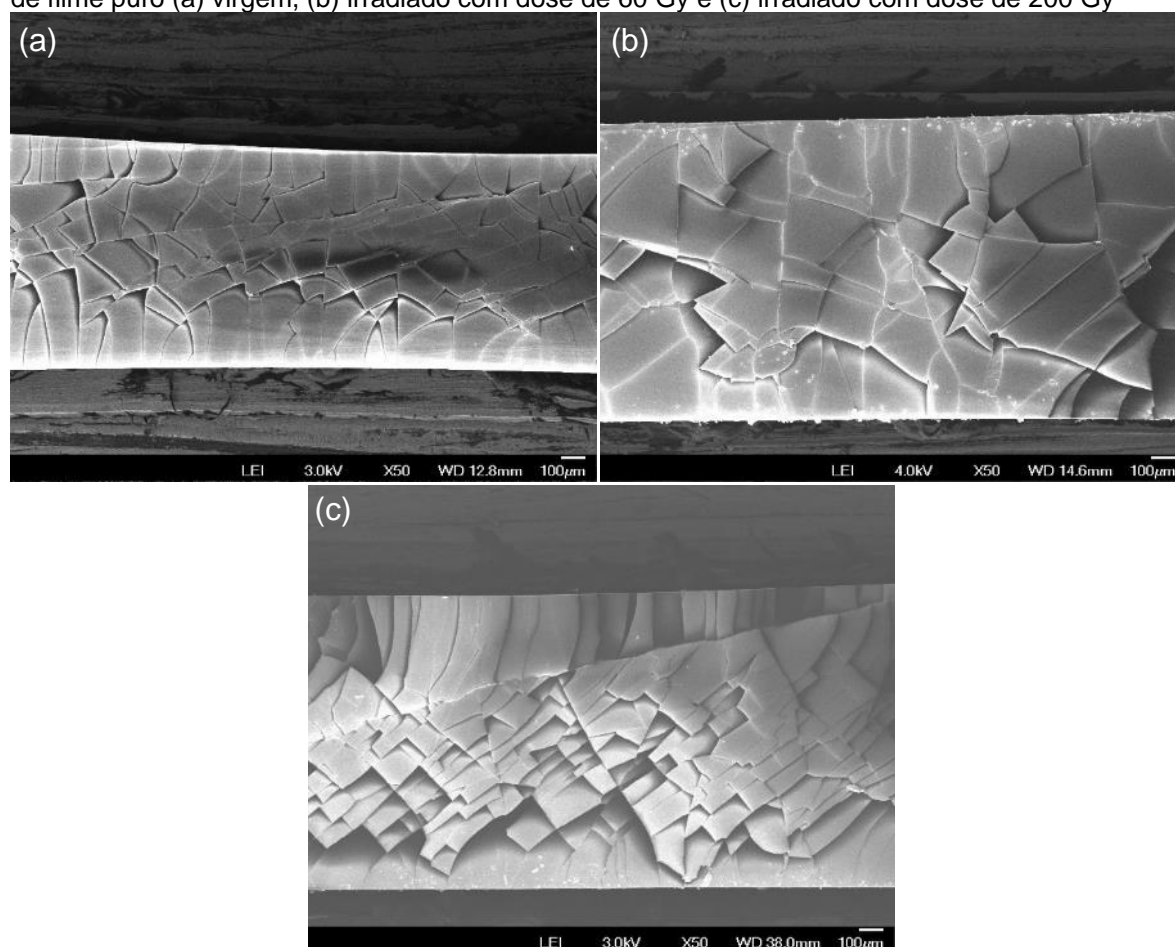


Fonte: Glauson Machado, IPEN

As imagens obtidas em MEV confirmam a distribuição dos cristais e os tamanhos deles previamente observados no microscópio óptico. Não há evidência de heterogeneidade na comparação das três regiões do filme OSLD.

Também foram observadas amostras de filme de silicone-borracha puro (sem material dosimétrico), cinco de cada para comparação: virgens (Figura 65a), irradiadas com dose de 60 Gy (Figura 65b) e irradiadas com dose de 200 Gy (Figura 65c).

Figura 65 - Imagens, obtidas com MEV (elétrons secundários), de seção transversal de amostras de filme puro (a) virgem, (b) irradiado com dose de 60 Gy e (c) irradiado com dose de 200 Gy



Fonte: Glauson Machado, IPEN

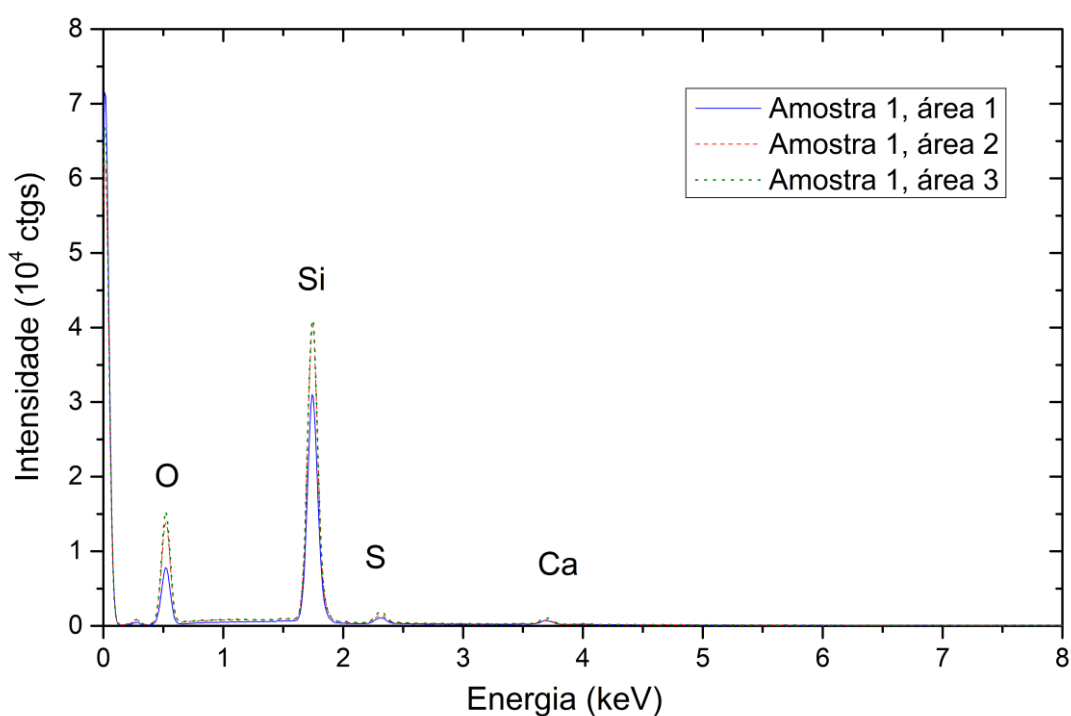
A princípio, esses resultados não indicam alteração morfológica das amostras irradiadas em relação às virgens e estão em concordância com o resultado do teste de resistência mecânica dessas amostras, que indicam que os mesmos filmes poderiam ser reutilizados pelo menos 10 vezes, para doses de 20 Gy.

7.8 Estimativa de número atômico efetivo do filme OSLD

A utilização de EDS-MEV permitiu avaliar a composição química das amostras de filme OSLD e fazer uma estimativa do número atômico efetivo do filme OSLD produzido neste trabalho.

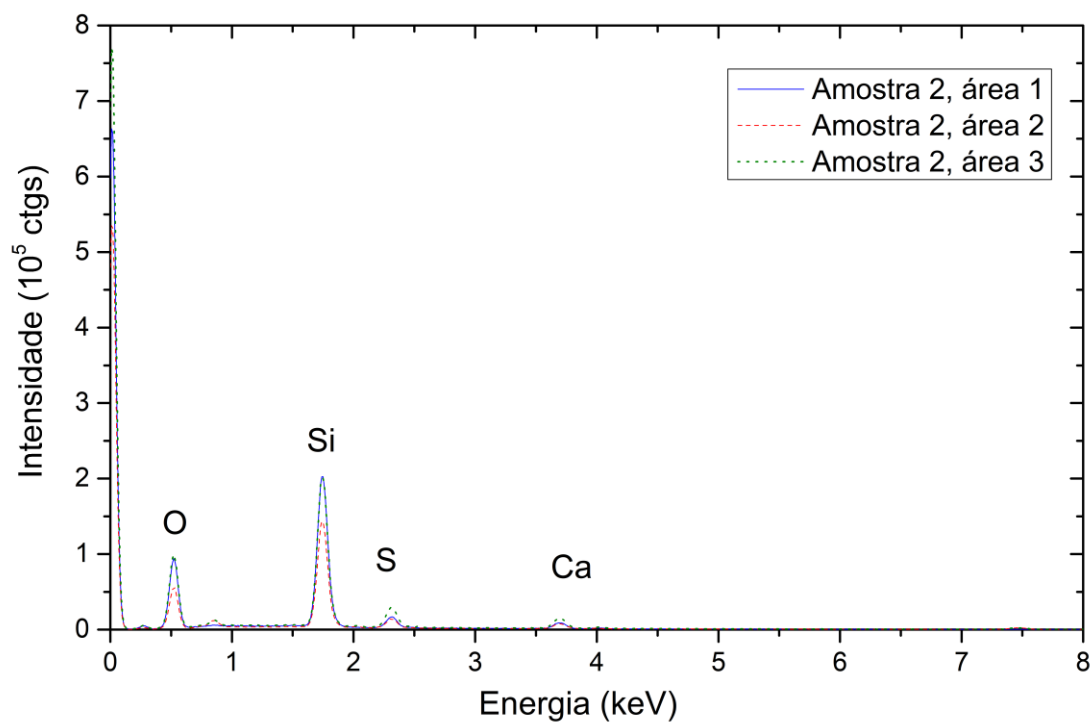
As Figuras 66, 67 e 68 ilustram os espectros de EDS obtidos para cada amostra de filme OSLD. No total, foram avaliadas 3 áreas de cada uma das três amostras.

Figura 66 - Espectro por EDS de amostra de região 1 (centro) de filme OSLD.



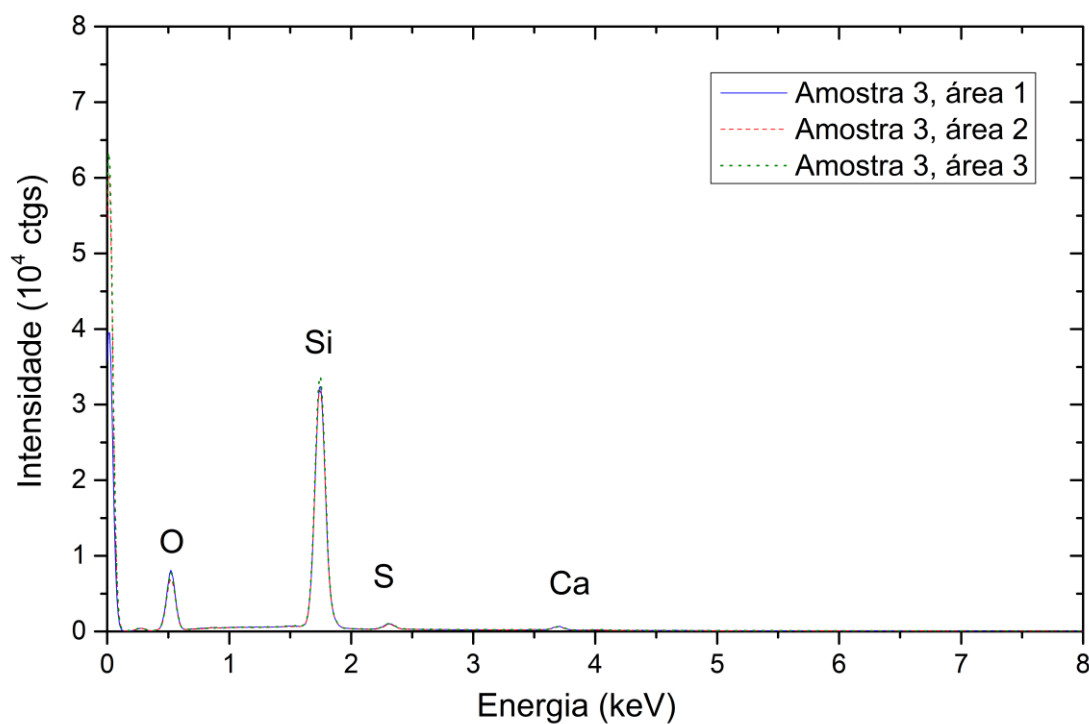
Fonte: Autora

Figura 67 - Espectro por EDS de amostra de região 2 (superior esquerda) de filme OSLD.



Fonte: Autora

Figura 68 - Espectro por EDS de amostra de região 3 (inferior direita) de filme OSLD.



Fonte: Autora

Primeiramente, o BG, resultante da radiação contínua, foi removido do espectro para não influenciar a quantificação dos elementos. Depois, foram utilizadas as porcentagens em massa de cada elemento obtidas pelo software de análise, conforme a proporção das intensidades de sinal medidas. A porcentagem em massa de cada elemento foi multiplicada pelo número atômico do elemento e a soma desses valores corresponde ao número atômico obtido para cada uma das 9 regiões avaliadas (Tabela 5).

Tabela 5 - Número atômico efetivo estimado, usando EDS-MEV, para cada região das três amostras de filme OSLD avaliadas.

| | Número atômico efetivo | | |
|----------|------------------------|-----------|-----------|
| | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 |
| Região 1 | 12,13 | 12,05 | 11,63 |
| Região 2 | 12,03 | 11,67 | 11,90 |
| Região 3 | 12,14 | 12,13 | 11,83 |

Fonte: Autora

Observando os valores obtidos para cada amostra, os coeficientes de variação foram 0,5%, 2,1% e 1,2%, respectivamente. E o Z_{ef} médio do filme OSLD é $11,95 \pm 0,20$.

Alguns aspectos que influenciam os resultados devem ser levados em consideração. Primeiro, não há uma amostra padrão com a composição conhecida para comparação com os filmes OSLD estudados. Foi adotada a intensidade medida dos raios X característicos gerados para cada elemento como proporcional à concentração desses elementos, sendo que ocorrências de absorção e de fluorescência da radiação pela amostra modificariam os valores reais de intensidade.

Segundo, a amostra não é homogênea em todo o volume de interação, uma vez que é composta de cristais distribuídos na matriz de elastômero, o que diminui consideravelmente a resolução espacial da técnica. Terceiro, a superfície da amostra em estudo não é plana e polida como se espera, porque é a seção transversal do filme OSLD.

Com isso, as irregularidades da superfície da amostra podem influenciar a interação do feixe de elétrons e dos raios X característicos. Por fim, há fatores inerentes ao instrumento, como eventual diferença na eficiência do espectrômetro em função da energia da radiação.

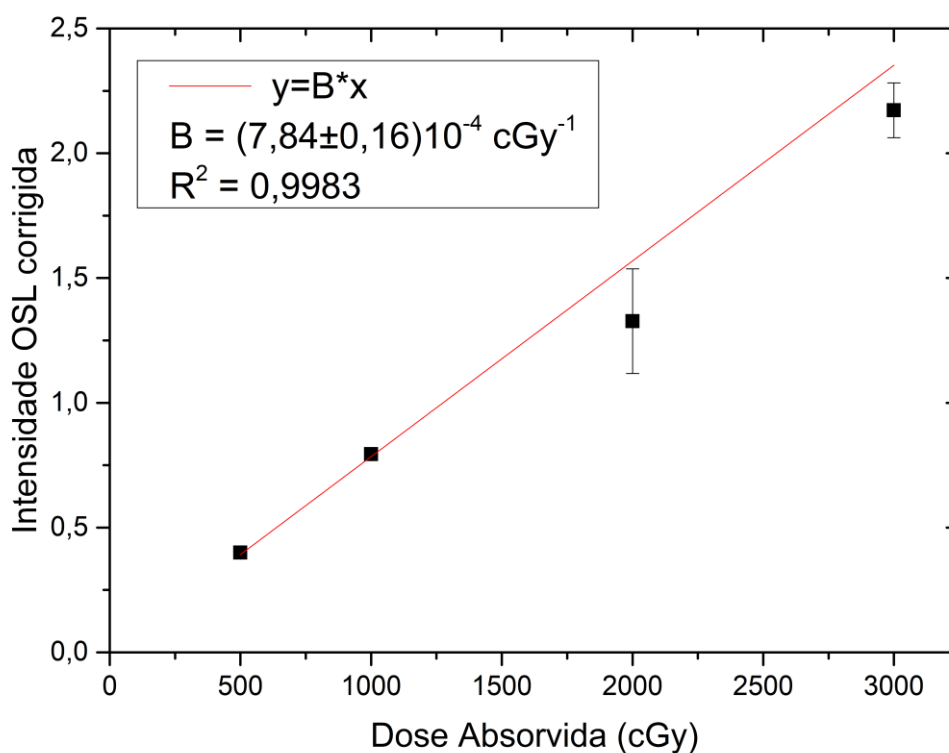
Dessa forma, o valor de Z_{ef} obtido não pode ser considerado como valor exato e sim uma estimativa. Nesta análise, o desvio padrão dos 9 resultados obtidos é relativamente baixo, sendo o coeficiente de variação de 1,7%. A literatura reporta desvio padrão relativo de até 8% estimado para medidas de amostras polidas em análises com EDS (MILER; MIRTIC, 2013).

7.9 Avaliação da possibilidade de aplicação do filme OSLD em radiocirurgia

7.9.1 Calibração do filme OSLD no feixe clínico

A Figura 69 apresenta a resposta com a dose dos filmes OSLD para a calibração do filme OSLD nas condições clínicas em feixe de fótons de 6 MV. A intensidade OSL inicial foi corrigida pela sensibilidade de cada amostra e os pontos representam o valor médio de 4 amostras.

Figura 69 - Calibração do filme OSLD no feixe clínico de fótons de 6 MV. Cada ponto corresponde à média da intensidade OSL inicial corrigida pela sensibilidade de 4 amostras e as barras de erro são os respectivos desvios padrão.



Fonte: Autora

O filme OSLD apresentou resposta linear em função da dose, nas condições clínicas, para a faixa de dose de 500 cGy a 3000 cGy.

7.9.2 Mapeamento de dose com filme OSLD em radiocirurgia

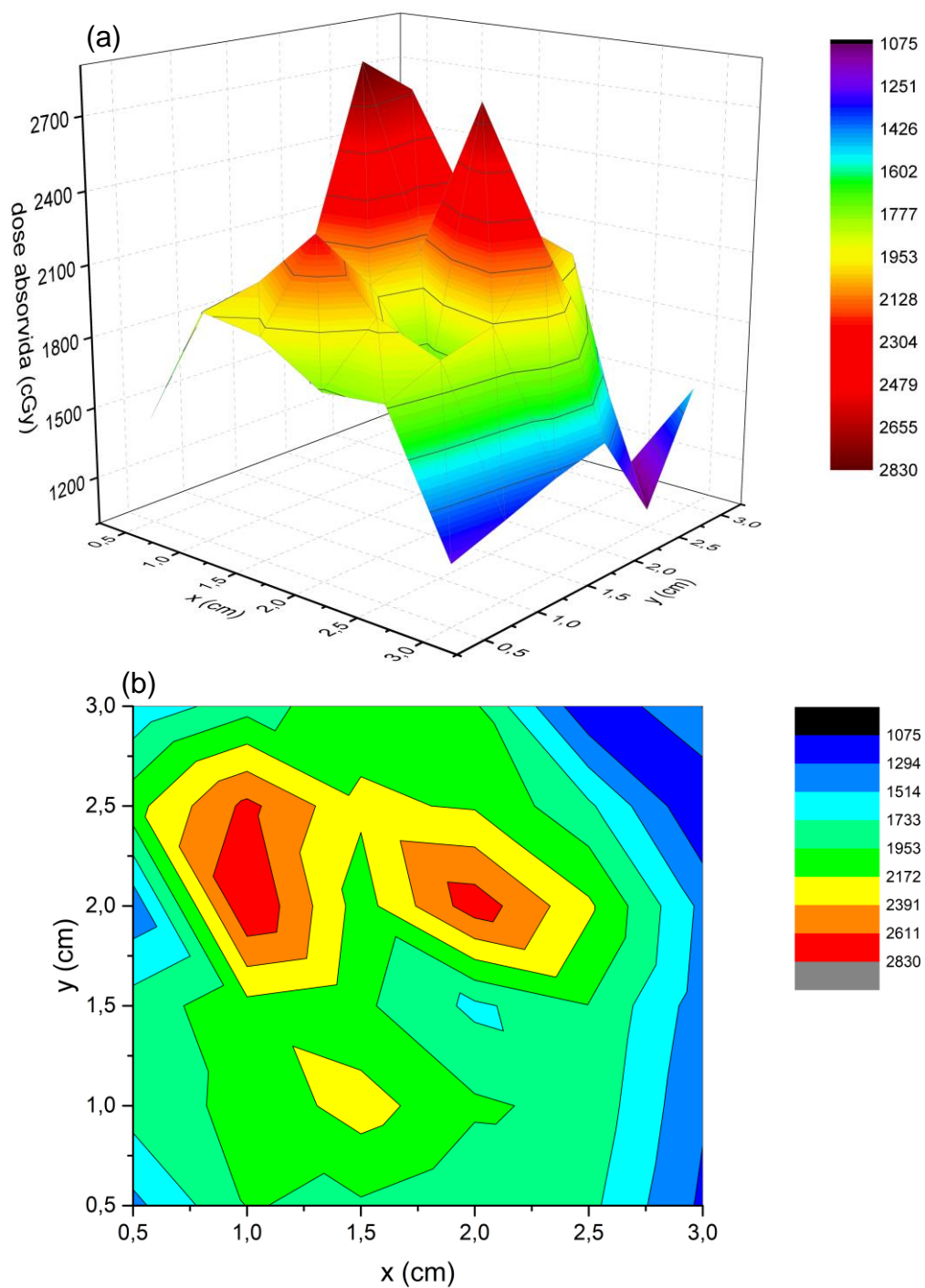
Uma amostra de filme OSLD de 3 x 3 cm² foi irradiada no centro do simulador com a dose planejada de 2100 cGy. No laboratório escuro, esse filme foi cortado em 36 amostras. Foi obtida a intensidade OSL inicial, corrigida pela sensibilidade, de cada amostra. Esse valor foi convertido em cGy, utilizando a calibração anterior (Figura 69) e apresentado na Figura 70.

O resultado obtido demonstra que é possível a utilização dos filmes OSLD propostos neste trabalho para verificar a distribuição de dose do planejamento radiocirúrgico. Foram observados “vales” nas regiões de isodose porque o filme OSLD teve de ser cortado para leitura no Risø e, muito provavelmente, o corte ocorreu nessas áreas, ocasionando os “vales” de dose.

Os níveis de dose máximo medidos são compatíveis com a distribuição de doses prevista no planejamento do tratamento (Figura 71).

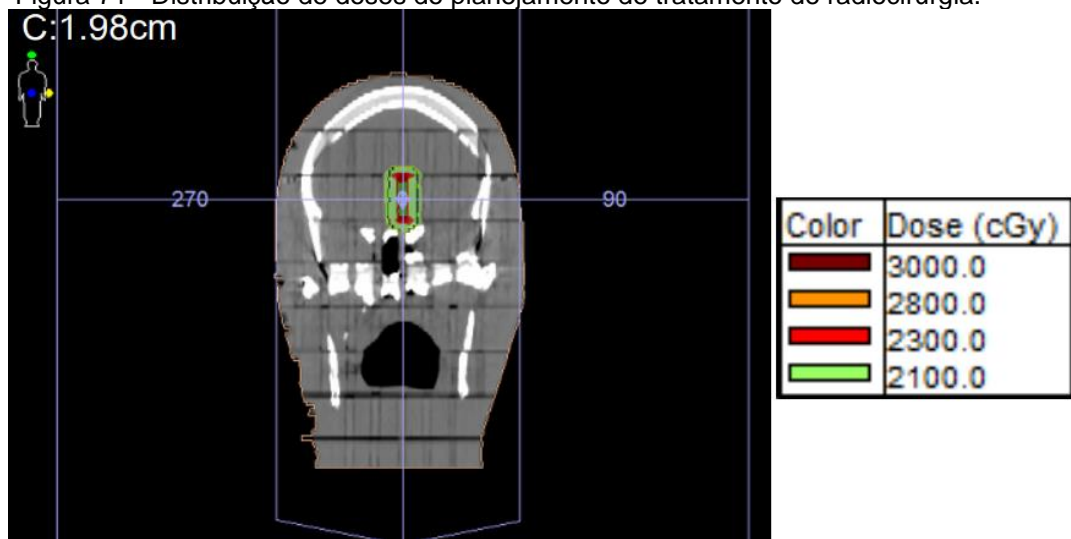
Os valores obtidos no controle de qualidade tanto com câmara de ionização (2291 ± 46 cGy) quanto com filme OSLD, concordam com a distribuição de dose planejada, o que demonstra a aplicabilidade dos filmes OSLD em dosimetria de campos pequenos.

Figura 70 - Mapeamento bidimensional de dose absorvida obtido com filme OSLD em controle de qualidade de um tratamento de radiocirurgia na região da cabeça: (a) mapa bidimensional, (b) vista superior.



Fonte: Autora

Figura 71 - Distribuição de doses do planejamento de tratamento de radiocirurgia.



Fonte: Michele Torquato, Clinirad

8 CONCLUSÕES

O material polimérico mais adequado para a matriz é o silicone-borracha à base de platina modelo T2, da Dow Corning, na produção de filmes OSLD porque sua viscosidade permite a mistura de cristais, sendo flexível após a cura e não emite luminescência. Adicionalmente, uma avaliação preliminar indica que esse material resiste mecanicamente a 10 ou mais ciclos de irradiação com doses de 20 Gy.

Dentre os materiais detectores estudados ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Ce}$), o $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ se mostrou mais adequado para compor o filme OSLD porque seu sinal pode ser limpo com tratamento óptico, o que é mais prático especialmente em ambientes clínicos.

Foi desenvolvida uma metodologia relativamente simples de produção de filmes OSLD em laboratório, com a matriz polimérica e o detector OSL mencionados anteriormente. A partir dela, foram produzidos esses filmes OSLD no SEGMR-IPEN, os quais são uma alternativa financeiramente acessível quando comparados com os detectores OSL disponíveis comercialmente.

Os resultados demonstram que o filme OSLD tem sensibilidade para ser utilizado em diferentes aplicações de dosimetria das radiações, principalmente para doses na faixa de cGy a Gy, como é o caso da radioterapia.

As propriedades dosimétricas dos filmes OSLD avaliadas mostraram uma repetibilidade menor que 3% e linearidade para a faixa de dose de 5 a 25 Gy. Embora o desvanecimento do sinal OSL seja alto nas primeiras 24h, os resultados apontam que ele é estável após 2 dias da irradiação.

A aplicabilidade dos filmes OSLD em dosimetria clínica foi testada em radioterapia com campos pequenos em tratamentos de radiocirurgia. Foi verificado que é possível calibrar o filme e realizar mapeamento bidimensional de doses de tratamento radioterápico. Nessa avaliação preliminar, o filme OSLD precisou ser cortado, o que afetou o resultado do mapeamento, mas não o invalidou. Já há estudos propondo leitores OSL confeccionados em laboratório para leitura OSL bidimensional, os quais, a princípio, podem ser reproduzidos e utilizados para leitura do filme OSLD proposto neste trabalho.

Vale ressaltar que ainda não há filme OSLD comercial, apenas protótipos experimentais e em desenvolvimento. O presente trabalho utilizou o sulfato de

cálcio produzido no IPEN, que pode ser facilmente adquirido no país e não há toxicidade em sua manipulação. Foi adotada uma metodologia de produção relativamente simples.

Considerando as aplicações da técnica OSL em dosimetria 2D, as principais contribuições deste trabalho foram a produção de filmes OSLD flexíveis, relativamente resistentes a vários ciclos de irradiação e leitura OSL, e que podem ser, a princípio, produzidos de diferentes tamanhos e ser reutilizados após tratamento óptico. Até onde se tem conhecimento, essas características, em especial o tratamento de reutilização utilizando luz, não são encontradas em detectores OSL atualmente disponíveis no mercado comercial.

Além disso, foi realizada a caracterização dosimétrica desses filmes e demonstrada a possibilidade de mapeamento de dose bidimensional e em diferentes geometrias com boa resolução espacial. Vale destacar que outros detectores amplamente utilizados em radioterapia, como os filmes radiocrômicos e as câmaras de ionização, possuem limitações, por exemplo apresentam baixa resolução espacial em campos pequenos.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, o filme OSLD de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ se apresenta como promissor para aplicação em dosimetria 2D para doses relativamente altas (da ordem de Gy); conclui-se que este pode ser aplicado em dosimetria na área de radioterapia, principalmente na garantia de qualidade do paciente, na qual é requerida precisão da dose entregue e conhecimento do campo de radiação.

9 PRETENSÕES FUTURAS

Uma avaliação que estava prevista, e que por conta de paralisações devido à pandemia de Covid-19 não foi possível de ser realizada neste trabalho, foi da resposta do filme OSLD em função da energia dos fótons.

Outros estudos pensados durante a elaboração deste trabalho, em decorrência de inconvenientes da pandemia de Covid-19, ficaram como trabalho futuro. São eles:

- No lugar de 2 filmes OSLD no mesmo lote, o ideal é fazer 1 único filme OSLD maior e cortá-lo. Dessa forma, diminui o tempo entre misturar os componentes e derramar a mistura na forma, porque a matriz inicia sua cura rapidamente;

- Elaborar e produzir um molde com tampa superior para prensar o filme durante a cura, de forma a favorecer a uniformidade da espessura, o que por sua vez deve melhorar ainda mais a uniformidade da sensibilidade do filme OSLD;

- Produzir cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$ de tamanho menor e menor faixa de gramatura, o que possivelmente também aumentará a uniformidade da sensibilidade do filme OSLD;

- Aumentar a concentração de material detector no filme, provavelmente 50%, para aumentar a sensibilidade do filme OSLD, o que favorecerá sua aplicação para faixas de dose menores; e

- Implementar a leitura de filme OSLD em leitor OSL 1D e 2D.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M F; SHRESTHA, N.; AHMAD, S.; SCHNELL, E.; AKSELROD, M. S.; YUKIHARA, E. G. Demonstration of 2D dosimetry using Al₂O₃ optically stimulated luminescence films for therapeutic megavoltage x-ray and ion beams. *Radiation Measurements*, v. 106, p. 315–320, 2017.

AHMED, M F; SHRESTHA, N.; SCHNELL, E.; AHMAD, S.; AKSELROD, M. S.; YUKIHARA, E. G. Characterization of Al₂O₃ optically stimulated luminescence films for 2D dosimetry using a 6 MV photon beam. *Physics in Medicine and Biology*, v. 61, p. 7551–7570, 2016.

AHMED, Md. F; ELLER, S.; SCHNELL, E.; AHMAD, S.; AKSELROD, M. S.; YUKIHARA, E. G. Development of a 2D dosimetry system based on the optically stimulated luminescence of Al₂O₃. *Radiation Measurements*, v. 71, p. 187–192, 2014.

AKSELROD, M. S.; MCKEEVER, S. W. S. A radiation dosimetry method using pulsed optically stimulated luminescence. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 81, p. 167–176, 1999.

ALBRECHT, H. O.; MANDEVILLE, C. E. Storage of energy in beryllium oxide. *Physical Review*, v. 101, n. 4, p. 1250–1252, 1956.

BACCI, C.; CALICCHIA, A.; PUGLIANI, L.; SALVADORI, P.; FURETTA, C. A Preliminary Study on the Dosimetric Properties of CaSO₄. *Health Physics*, v. 38, n. 1, p. 21–24, 1980.

BAHL, S.; KUMAR, V.; BIHARI, R. R.; KUMAR, P. Investigations of OSL properties of CaSO₄:Mn phosphor exposed to gamma and beta radiations. *Journal of Luminescence*, v. 181, p. 36–43, 2017.

BAHL, S.; LOCHAB, S. P.; KUMAR, P. CaSO₄:Dy,Mn: A new and highly sensitive thermoluminescence phosphor for versatile dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 119, p. 136–141, 2016.

BHATT, B. C.; SONI, A.; POLYMERIS, G. S.; KOUL, D. K.; PATEL, D. K.; GUPTA, S. K.; MISHRA, D. R.; KULKARNI, M. S. Optically stimulated luminescence (OSL) and thermally assisted OSL in Eu²⁺ - Doped BaSO₄ phosphor. *Radiation Measurements*, v. 64, p. 35–43, 2014.

BOS, A. J. J.; PROKIĆ, M.; BROUWER, J. C. Optically and thermally stimulated luminescence characteristics of MgO:Tb³⁺. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 119, n. 1–4, p. 130–133, 2006.

BUTLER, D. J.; KURASAWA, T.; LITWIN, M.; MAZARAKI, J.; SAITO, N. Comparison Of Personal Dose Equivalent Hp(10) In (Cs)-C-137 Radiation Between The Primary Standards Laboratories Of Japan And Australia Using BeO OSL Personal Dosimeters. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 178, n. 2, p. 235–241, 2018.

CAMPOS, L. L.; LIMA, M. . Dosimetric Properties of CaSO₄:Dy Teflon Pellets Produced at IPEN. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 14, n. 4, p. 333–335, 1986.

CRIJNS, W.; VANDENBROUCKE, D.; LEBLANS, P.; DEPUYDT, T. A reusable OSL-film for 2D radiotherapy dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*, v. 62, p. 8441–8454, 2017.

DE ROOVER, R.; BERGHEN, C.; DE MEERLEER, G.; DEPUYDT, T.; CRIJNS, W. Extended field radiotherapy measurements in a single shot using a BaFBr-based OSL-film. *Physics in Medicine and Biology*, v. 64, n. 16, , 2019.

DOTZLER, C.; WILLIAMS, G. V. M.; EDGAR, A.; SCHWEIZER, S.; HENKE, B.; SPAETH, J. M.; BITTAR, A.; HAMLIN, J.; DUNFORD, C. The effect of x-ray, γ -ray, and UV radiations on the optical properties of RbCdF₃: Mn²⁺. *Journal of Applied Physics*, v. 100, n. 3, p. 033102, 2 ago. 2006.

DOTZLER, C.; WILLIAMS, G. V. M.; RIESER, U.; EDGAR, A. Optically stimulated luminescence in NaMg F₃: Eu²⁺. *Applied Physics Letters*, v. 91, n. 12, p. 121910, 17 set. 2007.

DOUGUCHI, Y.; NANTO, H.; SATO, T.; IMAI, A.; NASU, S.; KUSANO, E.; KINBARA, A. Optically stimulated luminescence in Eu-doped KBr phosphor ceramics. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 84, n. 1–4, p. 143–148, 1999.

DRAŽIČ, G.; TRONTELJ, M. Sintered CaSO₄: Dy TL dosimeters. *The International Journal Of Applied Radiation And Isotopes*, v. 34, n. 12, p. 1633–1637, 1 dez. 1983.

DUSSEAU, L.; POLGE, G.; ALBERT, L.; MAGNAC, Y.; BESSIÈRE, J. C.; FESQUET, J.; GASLOT, J. Irradiated integrated circuits dose-attenuation mapping using optically stimulated phosphor for packaging dosimetry. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 45, n. 6, p. 2695–2699, 1998.

DUSSEAU, L.; RANCHOUX, G.; POLGE, G.; PLATTARD, D.; SAIGNE, F.; BESSIERE, J. C.; FESQUET, J.; GASLOT, J. High energy electron dose-mapping using optically stimulated luminescent films. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Part 1, v. 46, n. 6, p. 1757–1761, 1999.

ERFURT, G.; KRBETSCHKEK, M. R. A radioluminescence study of spectral and dose characteristics of common luminophors. *Radiation Protection Dosimetry*, Erfurt, G Krbetschek, MR13th International Conference on Solid State Dosimetry Jul 09-13, 2001 Athens, greece, v. 100, n. 1–4, p. 403–406, 2002.

EZZELL, G. A.; BURMEISTER, J. W.; DOGAN, N.; LOSASSO, T. J.; MECHALAKOS, J. G.; MIHAILIDIS, D.; MOLINEU, A.; PALTA, J. R.; RAMSEY, C. R.; SALTER, B. J.; SHI, J.; XIA, P.; YUE, N. J.; XIAO, Y. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparison, a report from AAPM Task Group 119. *Medical Physics*, v. 36, n. 11, p. 5359–5373, 2009.

GASPARIAN, P. B. R.; FACURE, A. , 2020. . Sao Paulo, Brasil: [s.n.]

GASPARIAN, P. B. R.; RUAN, C.; AHMAD, S.; KALAVAGUNTA, C.; CHENG, C. Y.; YUKIHARA, E. G. Demonstrating the use of optically stimulated luminescence dosimeters (OSLDs) for measurement of staff radiation exposure in interventional fluoroscopy and helmet output factors in radiosurgery. *Radiation Measurements*, v. 45, n. 3–6, , 2010.

GROBE, H.; SOMMER, M.; KOCH, A.; HIETSCHOLD, V.; HENNIGER, J.; ABOLMAALI, N. Dose reduction in computed tomography: the effect of eye and testicle shielding on radiation dose measured in patients with beryllium oxide-based optically stimulated luminescence dosimetry. *European Radiology*, v. 19, n. 5, p. 1156–1160, 2009.

GUÇKAN, V.; ALTUNAL, V.; NUR, N.; DEPCI, T.; OZDEMIR, A.; KURT, K.; YU, Y.; YEGINGIL, I.; YEGINGIL, Z. Studying CaSO₄:Eu as an OSL phosphor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, v. 407, p. 145–154, 15 set. 2017.

GUSTAFSON, T. D.; MILLIKEN, E. D.; JACOBSON, L. G.; YUKIHARA, E. G. Progress and challenges towards the development of a new optically stimulated luminescence (OSL) material based on MgB₄O₇:Ce,Li. *Journal of Luminescence*, v. 212, p. 242–249, 2019.

HARTMANN, B.; MARTIŠÍKOVÁ, M.; JÄKEL, O. Technical note: Homogeneity of gafchromic® EBT2 film. *Medical Physics*, v. 37, n. 4, p. 1753–1756, 2010.

IDRI, K.; SANTORO, L.; CHARPIOT, E.; HERAULT, J.; COSTA, A.; AILLERES, N.; DELARD, R.; VAILLE, J. R.; FESQUET, J.; DUSSEAU, L. Quality control of intensity modulated radiation therapy with optically stimulated luminescent films. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Part 2, v. 51, n. 6, p. 3638–3641, 2004.

IZEWSKA, J.; ANDREO, P.; VATNITSKY, S.; SHORTT, K. R. The IAEA/WHO TLD postal dose quality audits for radiotherapy: a perspective of dosimetry practices at hospitals in developing countries. *Radiotherapy and Oncology*, v. 69, p. 91–97, 2003.

JAHN, A.; SOMMER, M.; HENNIGER, J. 2D-OSL-dosimetry using beryllium oxide. *Radiation Measurements*, v. 45, n. 3–6, p. 674–676, 2010.

JAHN, A.; SOMMER, M.; LIEBMANN, M.; HENNIGER, J. Progress in 2D-OSL-dosimetry with beryllium oxide. *Radiation Measurements*, v. 46, p. 1908–1911, 2011.

JAHN, A.; SOMMER, M.; ULLRICH, W.; WICKERT, M.; HENNIGER, J. The BeOmax system - Dosimetry using OSL of BeO for several applications. *Radiation Measurements*, v. 56, p. 324–327, 2013.

KIM, T. J.; JUNG, K. O.; FAHIMIYAN, B.; PRATX, G. Flexible optically stimulated luminescence band for 1D in vivo radiation dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*, v. 63, n. 16, , 2018.

KLEIN, D. M.; MCKEEVER, S. W. S. Optically stimulated luminescence from KBr:Eu as a near real-time dosimetry system. *Radiation Measurements*, v. 43, p. 883–887, 2008.

KULKARNI, M. S.; PATIL, R. R.; PATLE, A.; RAWAT, N. S.; RATNA, P.; BHATT, B. C.; MOHARIL, S. V. Optically stimulated luminescence from CaSO₄:Eu - Preliminary results. *Radiation Measurements*, v. 71, p. 95–98, 2014.

LAKSHMANAN, A. DEVELOPMENT AND APPLICATION OF SOLID FORMS OF CaSO₄:Dy THERMOLUMINESCENT DOSEMETERS IN RADIATION PROTECTION DOSIMETRY—A REVIEW. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 181, n. 2, p. 57–99, 2018.

LAKSHMANAN, A. R. A new high sensitive CaSO₄:Dy thermostimulated luminescence phosphor. *physica status solidi a*, v. 186, p. 153–166, 2001.

LALIC, S. D. S.; SOUZA, D. D. N.; BAFFA, O.; D'ERRICO, F. Novos Materiais Dosimétricos para Aplicações em Física Médica. *Revista Brasileira de Física Médica*, v. 13, n. 1, p. 24, 2019.

LAPRAZ, D.; PREVOST, H.; IACCONI, P.; GUIGUES, C.; BENABDESSELAM, M.; BRIAND, D. On the luminescence properties of CaSO₄:Ce. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 100, p. 365–368, 2002.

LE MASSON, N. J. M.; BOS, A. J. J.; CZAPLA, Z.; BROUWER, J. C.; VAN EIJK, C. W. E. Fast-neutron OSL sensitivity of thallium-doped ammonium salts. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 110, n. 1–4, p. 319–323, 2004.

LE MASSON, N. J. M.; BOS, A. J. J.; WINKELMAN, A. J. M.; VAN EIJK, C. W. E. Optically stimulated luminescence in KMgF₃:Ce³⁺ comparison of dosimetric characteristics with Al₂O₃:C. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Part 1, v. 48, n. 4, p. 1143–1147, 2001.

LI, H. H.; DRIEWER, J. P.; HAN, Z.; LOW, D. A.; YANG, D.; XIAO, Z. Two-dimensional high spatial-resolution dosimeter using europium doped potassium chloride: a feasibility study. *Physics in Medicine and Biology*, v. 59, p. 1899–1909, 2014.

MALTHEZ, A. L. M. C.; FREITAS, M. B.; YOSHIMURA, E. M.; BUTTON, V. L. S. N. Application of optically stimulated luminescence technique to evaluate simultaneously accumulated and single doses with the same dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 95, p. 134–136, 2014.

MALTHEZ, A.; MARCZEWSKA, B.; FERREIRA, F.; UMISEDÓ, N. K.; NOWAK, T.; BILSKI, P.; YOSHIMURA, E. M. OSL dosimetric properties and efficiency of Brazilian natural calcium fluoride pellets. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 135, p. 166–170, 2018.

MALTHEZ, A.; MARCZEWSKA, B.; KULIG, D.; BILSKI, P.; KLOSOWSKI, M. Optical and thermal pre-readout treatments to reduce the influence of fading on LiMgPO₄ OSL measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 29494944, v. 136, p. 118–120, 2018.

MANDEVILLE, C. E.; ALBRECHT, H. O. Luminescence of beryllium oxide. *Physical Review*, v. 94, n. 2, p. 494–495, 1954.

MANDLIK, N. T.; RONDIYA, S. R.; DZADE, N. Y.; KULKARNI, M. S.; SAHARE, P. D.; BHATT, B. C.; DHOLE, S. D. Thermoluminescence, photoluminescence and optically stimulated luminescence characteristics of CaSO₄:Eu phosphor: Experimental and density functional theory (DFT) investigations. *Journal of Luminescence*, v. 221, p. 117051, 2020.

MANOEL BEZERRA SILVA, A. DA. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE CaSO₄:Tb,Ag PARA FINS DOSIMÉTRICOS**. 2019. CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA, 2019.

MARTINS, M. T.; SOBOLL, D.; HORST, I.; PAGOTTO, I.; YOSHIMURA, E. M.; UMISED, N.; MALTHERZ, A. L. M. C. Validação do controle de qualidade em radiocirurgia utilizando folhas detectoras OSL baseadas na fluorita brasileira. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 8, n. 2, 2020.

MCKEEVER, S. W.S. Optically stimulated luminescence: A brief overview. *Radiation Measurements*, 2011, v. 46, p. 1336–1341.

MCKEEVER, S W S; MOSCOVITCH, M. On the advantages and disadvantages of optically stimulated luminescence dosimetry and thermoluminescence dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 104, p. 263–270, 2003.

MCKEEVER, Stephen W S; BLAIR, M. W.; BULUR, E.; GAZA, R.; GAZA, R.; KALCHGRUBER, R.; KLEIN, D. M.; YUKIHARA, E. G. Recent advances in dosimetry using the optically stimulated luminescence of Al₂O₃:C. *Radiation protection dosimetry*, v. 109, p. 269–276, 2004.

MILER, M.; MIRTIC, B. Accuracy and precision of EDS analysis for identification of metal-bearing minerals in polished and rough particle samples. *Geologija*, v. 56, n. 1, p. 5–17, 2013.

MITTANI, J. C.; PROKIĆ, M.; YUKIHARA, E. G. Optically stimulated luminescence and thermoluminescence of terbium-activated silicates and aluminates. *Radiation Measurements*, v. 43, p. 323–326, 2008.

NAKHAEI, O.; SHAHTAHMASSEBI, N.; REZAEEROKNABADI, M.; BAGHERI MOHAGHEGHI, M. M. Synthesis, characterization and study of optical properties of polyvinyl alcohol/ CaF₂ nanocomposite films. *Scientia Iranica*, v. 19, n. 6, p. 1979–1983, 2012.

NAKHAEI, Omolfajr; SHAHTAHMASSEBI, N. Study structural and up-conversion luminescence properties of polyvinyl alcohol/CaF₂:erbium nanofibers for potential medical applications. 2015.

NAMBI, K. S. V.; BAPAT, V. N.; GANGULY, A. K. Thermoluminescence of CaSO₄ doped with rare earths. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, NAMBI, KSV BAPAT, VN GANGULY, AK, v. 7, n. 23, p. 4403–4415, 1974.

NANTO, H.; MURAYAMA, K.; USUDA, T.; TANIGUCHI, S.; TAKEUCHI, N. Optically stimulated luminescence in KCl:Eu single crystals. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 47, n. 1/4, p. 281–284, 1993.

NUNES, M. G. **DESENVOLVIMENTO DO DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE DE CASO 4 :CE,EU PARA A MONITORAÇÃO INDIVIDUAL E A DOSIMETRIA CLÍNICA DE FÓTONS E ELÉTRONS** Maíra Goes Nunes. 2012. Universidade de Sao Paulo, 2012.

OLIVEIRA JUNOT, D. **Aprimoramento de rotas e produção de dosímetros à base de CaSO 4 com dopagens não usuais**. 2017. Universidade Federal de Sergipe, 2017.

OLIVEIRA, L. C.; YUKIHARA, E. G.; BAFFA, O. MgO:Li,Ce,Sm as a high sensitive material for Optically Stimulated Luminescence dosimetry. *Scientific Reports*, v. 6, p. 24348, 2016.

OLKO, P. Advantages and disadvantages of luminescence dosimetry. *Radiation Measurements*, 2010, v. 45, p. 506–511.

OMANWAR, S. K.; PALAN, C. B. Synthesis and preliminary OSL studies of Ce³⁺ activated calcium sulfate (CaSO₄) for radiation dosimetry. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, Omanwar, S. K. Palan, C. B.1573-482x, v. 29, n. 9, p. 7388–7392, 2018.

PAGOTTO, I.; MALTHERZ, A. L. M. C.; UMISED, N. K.; YOSHIMURA, E. M. Energy response of CaF₂ detectors using deconvolution of OSL signal. In: 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE DOSIMETRY, 2019, Hiroshima, Japan. p. 293–294.

PATLE, A.; PATIL, R. R.; MOHARIL, S. V.; KULKARNI, M. S. Effect of particle size on OSL response of CaSO 4 :Eu. In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 2019, v. 2104, p. 020002.

PRADHAN, A. S.; AYYANGER, K. Radiation dosimetry by photostimulated luminescence of CaSO₄:Dy. *International Journal of Applied Radiation Isotopes*, v. 28, n. 534–535, , 1977.

PRADHAN, A. S.; BHATT, R. C. Photostimulated luminescence and thermoluminescence in CaSO₄:Dy. *physica status solidi a*, v. 68, p. 405–411, 1981.

PRADHAN, A. S.; CHANDRA, B.; BHATT, R. C. Phosphorescence and Photostimulated Luminescence of CaSO₄:Dy Embedded Polyethylene Discs at Elevated Temperature for Fast Neutron Dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 5, n. 3, p. 159–162, 1983.

PRADHAN, A. S.; LEE, J. I.; KIM, J. L. Recent developments of optically stimulated luminescence materials and techniques for radiation dosimetry and clinical applications. *Journal of Medical Physics*, v. 33, n. 3, p. 85–99, 2008.

PROKIC, M. Thermoluminescent Characteristics of Calcium Sulphate Solid Detectors. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 37, n. 4, p. 271–274, 1991.

PROKIĆ, M. Development of highly sensitive CaSO₄:Dy/Tm and MgB₄O₇:Dy/Tm sintered thermoluminescent dosimeters. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 175, p. 83–86, 1980.

PROKIĆ, M. Improvement of the thermoluminescence properties of the non-commercial dosimetry phosphors CaSO₄: Dy and CaSO₄:Tm. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 151, n. 3, p. 603–608, 15 maio. 1978.

RAMOS, F. D. S.; VASCONCELOS, R. D. S.; GONÇALVES, M. D. S.; OLIVEIRA, M. V. L. De. Análise comparativa dos testes de controle de qualidade em tomografia computadorizada de acordo com as legislações nacional e internacional. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 3, n. 1A, , 2015.

REWAY, A.; MACHADO, T.; UMISED, N.; YOSHIMURA, E.; BEZERRA JR, A.; MALTHERZ, A. Silver nanoparticles application for enhancement of efficiency in OSL detectors based on Brazilian natural calcium fluoride. In: 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE DOSIMETRY, 2019, Hiroshima, Japan. p. 149–150.

RHYNER, C. R.; MILLER, W. G. Radiation dosimetry by optically stimulated luminescence in BeO. *Health Physics*, v. 18, p. 681–684, 1970.

ROMAN, J.; RIVERA, T.; LOZANO, I. B.; SOSA, R.; ALARCÓN, G. Luminescent characteristics of CaSO₄:Dy films obtained by spray pyrolysis method. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 70, n. 7, p. 1403–1406, 2012.

SADEL, M.; BILSKI, P.; KŁOSOWSKI, M.; SANKOWSKA, M. A new approach to the 2D radiation dosimetry based on optically stimulated luminescence of LiF:Mg,Cu,P. *Radiation Measurements*, v. 133, , 2020.

SADEL, M.; BILSKI, P.; SANKOWSKA, M.; GAJEWSKI, J.; SWAKOŃ, J.; HORWACIK, T.; NOWAK, T.; KŁOSOWSKI, M. Two-dimensional radiation dosimetry based on LiMgPO₄ powder embedded into silicone elastomer matrix. *Radiation Measurements*, v. 133, , 2020.

SANTOS, A. M. C.; MOHAMMADI, M.; AFSHAR V., S. Energy dependency of a water-equivalent fibre-coupled beryllium oxide (BeO) dosimetry system. *Radiation Measurements*, v. 73, p. 1–6, 2015.

SANTOS, A. M. C.; MOHAMMADI, M.; ASP, J.; MONRO, T. M.; AFSHAR V., S. Characterisation of a real-time fibre-coupled beryllium oxide (BeO) luminescence dosimeter in X-ray beams. *Radiation Measurements*, v. 53–54, p. 1–7, 2013.

SAWAKUCHI, G. O.; SAHOO, N.; GASPARIAN, P. B. R.; RODRIGUEZ, M. G.; ARCHAMBAULT, L.; TITT, U.; YUKIHARA, E. G. Erratum: Determination of average LET of therapeutic proton beams using Al₂O₃:C optically stimulated luminescence (OSL) detectors (Physics in Medicine and Biology (2010) 55 (4963)). *Physics in Medicine and Biology*, v. 59, n. 12, , 2014.

SCHUYT, J. J.; WILLIAMS, G. V. M. Development of a 2D dosimeter using the optically stimulated luminescence of NaMgF₃:Eu with CCD camera readout. *Radiation Measurements*, v. 121, p. 99–102, 2019.

SOMMER, M.; FREUDENBERG, R.; HENNIGER, J. New aspects of a BeO-based optically stimulated luminescence dosimeter. *Radiation Measurements*, v. 42, p. 617–620, 2007.

SOMMER, M.; HENNIGER, J. Investigation of a BeO-based optically stimulated luminescence dosimeter. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 119, n. 1–4, p. 394–397, 2006.

SOMMER, M.; JAHN, A.; HENNIGER, J. Beryllium oxide as optically stimulated luminescence dosimeter. *Radiation Measurements*, v. 43, p. 353–356, 2008.

SOUZA, L. F.; SILVA, A. M. B.; ANTONIO, P. L.; CALDAS, L. V. E.; SOUZA, S. O.; D'ERRICO, F.; SOUZA, D. N. Dosimetric properties of MgB₄O₇:Dy,Li and MgB₄O₇:Ce,Li for optically stimulated luminescence applications. *Radiation Measurements*, v. 106, p. 196–199, 2017.

SOUZA, L. F.; SOUZA, D. N.; RIVERA, R. B.; VIDAL, R. M.; CALDAS, L. V. E. Dosimetric characterization of MgB₄O₇:Ce,Li as an optically stimulated dosimeter for photon beam radiotherapy. *Perspectives in Science*, v. 12, p. 100397, 2019.

SOUZA, S. O.; D'ERRICO, F.; AZIMI, B.; BALDASSARE, A.; ALVES, A. V. S.; VALENCA, J. V. B.; BARROS, V. S. M.; CASCONI, M. G.; LAZZERI, L. OSL films for in-vivo entrance dose measurements. *Radiation Measurements*, v. 106, p. 644–649, 2017.

SUNTA (INVITED), C. M. A Review of Thermoluminescence of Calcium Fluoride, Calcium Sulphate and Calcium Carbonate. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 8, n. 1–2, p. 25–44, 1984.

TEICHMANN, T.; GONZALEZ TORRES, M. J.; VAN GOETHEM, M. J.; VAN DER GRAAF, E. R.; HENNIGER, J.; JAHN, A.; KIEWIET, H. H.; SOMMER, M.; ULLRICH, W.; WEINHOLD, C.; KORMOLL, T. Dose and dose rate measurements in proton beams using the luminescence of beryllium oxide. *Journal of Instrumentation*, v. 13, p. P10015, 2018.

TORQUATO, M. **VALIDAÇÃO DE FOLHAS DETECTORAS OSL DE CaF₂ PARA APLICAÇÕES EM RADIOCIRURGIA**. 2019. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

TWARDAK, A.; BILSKI, P.; MARCZEWSKA, B.; LEE, J. I.; KIM, J. L.; GIESZCZYK, W.; MROZIK, A.; SADEL, M.; WROBEL, D. Properties of lithium aluminate for application as an OSL dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 104, p. 76–79, 2014.

WROBEL, D.; BILSKI, P.; MARCZEWSKA, B.; KLOSOWSKI, M.; IEEE. **TL and OSL Properties of LiMgPO₄:Tb,B**. [S.l: s.n.], 2014. 255–256 p.

YAMASHITA, T.; NADA, N.; ONISHI, A.; KITAMURA, S. Calcium sulfate phosphor activated by rare earth. In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON LUMINESCENCE DOSIMETRY, 1968, Gatlinburg, TN, USA. p. 4–17.

YOSHIMURA, E. M.; YUKIHARA, E. G. Optically Stimulated Luminescence: searching for new dosimetric materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 250, p. 337–341, 2006. a

YOSHIMURA, E. M.; YUKIHARA, E. G. Optically stimulated luminescence of magnesium aluminate (MgAl₂O₄) spinel. *Radiation Measurements*, v. 41, p. 163–169, 2006. b.

YUKIHARA, E. G.; GASPARIAN, P. B. R.; SAWAKUCHI, G. O.; RUAN, C.; AHMAD, S.; KALAVAGUNTA, C.; CLOUSE, W. J.; SAHOO, N.; TITT, U. Medical applications of optically stimulated luminescence dosimeters (OSLDs). ***Radiation Measurements***, 2010, v. 45, p. 658–662.

YUKIHARA, E.G.; RUAN, C.; GASPARIAN, P. B. R.; CLOUSE, W. J.; KALAVAGUNTA, C.; AHMAD, S. An optically stimulated luminescence system to measure dose profiles in x-ray computed tomography. ***Physics in Medicine and Biology***, v. 54, n. 20, , 2009.

YUKIHARA, E G. A review on the OSL of BeO in light of recent discoveries: the missing piece of the puzzle? ***Radiation Measurements***, v. in press, , 2020.

YUKIHARA, E G. Luminescence properties of BeO optically stimulated luminescence (OSL) detectors. ***Radiation Measurements***, v. 46, p. 580–587, 2011.

YUKIHARA, E G. Observation of strong thermally transferred optically stimulated luminescence (TT-OSL) in BeO. ***Radiation Measurements***, v. 121, p. 103–108, 2019.

YUKIHARA, E G; DOULL, B. A.; GUSTAFSON, T.; OLIVEIRA, L. C.; KURT, K.; MILLIKEN, E. D. Optically stimulated luminescence of MgB₄O₇:Ce,Li for gamma and neutron dosimetry. ***Journal of Luminescence***, v. 183, p. 525–532, 2017.

YUKIHARA, E G; MCKEEVER, S. W. S.; AKSELROD, M. S. State of art: optically stimulated luminescence dosimetry - frontiers of future research. ***Radiation Measurements***, v. 71, p. 15–24, 2014.

YUKIHARA, E G; WHITLEY, V. H.; MCKEEVER, S. W. S.; AKSELROD, A. E.; AKSELROD, M. S. Effect of high-dose irradiation on the optically stimulated luminescence of Al₂O₃:C. ***Radiation Measurements***, v. 38, p. 317–330, 2004.

YUKIHARA, Eduardo G.; MCKEEVER, S. W. S. ***Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications***. [S.l: s.n.], 2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
