



# Comportamento do sinal TL/OSL e PTTL/PTOSL após tratamento térmico pós-irradiação com fonte de $^{60}\text{Co}$ , em amostras de $\text{LiF:Mg,Ti}$ e $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$

Antonio P.L. e Caldas L.V.E.

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN/CNEN-SP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, 05508-000, São Paulo, SP, Brasil  
patrilan@ipen.br*

---

## RESUMO

Materiais diferentes são utilizados em dosimetria das radiações e podem ter o seu sinal avaliado pelas técnicas de termoluminescência (TL) e luminescência opticamente estimulada (OSL). Outras formas de avaliação são feitas iluminando as amostras com luz ultravioleta (UV) antes da medição do sinal; são as técnicas de TL fototransferida (PTTL) e OSL fototransferida (PTOSL). Para tal, o material deve ser irradiado, tratado termicamente após a irradiação, exposto à luz UV e analisado com relação aos seus sinais PTTL e PTOSL. O  $\text{LiF:Mg,Ti}$  e o  $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$  são materiais dosimétricos com dados de TL e OSL já relatados na literatura. Os objetivos deste trabalho foram estudar a presença das respostas PTTL e PTOSL nestas amostras, verificar o efeito que o tratamento térmico pós-irradiação de  $280^\circ\text{C}/15$  min pode causar nestas respostas, e observar se elas apresentam valores suficientes para permitir um prosseguimento destes estudos, para aplicá-las em dosimetria de doses altas. Inicialmente, as amostras foram irradiadas com  $^{60}\text{Co}$  (1 kGy) e analisadas com relação aos seus sinais TL e OSL. Na segunda etapa, as pastilhas foram novamente irradiadas, tratadas termicamente ( $280^\circ\text{C}/15$  min) e, então, tiveram medições TL, OSL e TL após a OSL, tomadas. Na terceira fase, as amostras foram irradiadas, tratadas termicamente, expostas à luz UV e avaliadas com relação aos sinais PTTL e PTOSL. Os resultados obtidos revelaram dados consideráveis e significativos para o prosseguimento dos estudos dos sinais PTTL e PTOSL das amostras.

*Palavras-chave: Luminescência; Fototransferência;  $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ ;  $\text{LiF:Mg,Ti}$*

---

---

**ABSTRACT**

Different materials are used in radiation dosimetry, and they can have their signal evaluated by the thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) techniques. Other evaluation procedures are done illuminating the samples with ultraviolet (UV) light before the measurement of the signal; they are the phototransferred TL (PTTL) and phototransferred OSL (PTOSL) techniques. In this case, the material has to be irradiated, thermally treated after irradiation, exposed to UV light and analyzed in relation to its PTTL and PTOSL signals. LiF:Mg,Ti and CaSO<sub>4</sub>:Dy are dosimetric materials with TL and OSL data already related in the literature. The objectives of this work were to study the occurrence of the PTTL and PTOSL responses in these samples, verifying the effect that the post-irradiation thermal treatment of 280°C/15 min can cause in these responses, and observing if they present enough values to allow continuation of these studies, in order to apply them in high-dose dosimetry. Initially, the samples were irradiated with <sup>60</sup>Co (1 kGy) and analyzed in relation to their TL and OSL signals. In the second step, the pellets were irradiated again, thermally treated (280°C/15 min) and then their TL, OSL and TL after OSL measurements were taken. In the third phase, the samples were irradiated, thermally treated, exposed to UV light and evaluated in relation to their PTTL and PTOSL signals. The obtained results revealed considerable and significant data for the continuation of the studies of PTTL and PTOSL signals of the samples.

*Keywords: Luminescence; Phototransfer; CaSO<sub>4</sub>:Dy; LiF:Mg,Ti*

---

## 1. INTRODUÇÃO

Diferentes materiais apresentam propriedades luminescentes que são aplicadas à dosimetria das radiações, e que são avaliadas usando técnicas como a termoluminescência (TL) e a luminescência opticamente estimulada (OSL). Entretanto, há outros fenômenos que podem ser empregados em dosimetria, que aplicam o uso da radiação ultravioleta (RUV) ao sinal TL e OSL das amostras; são as técnicas de TL fototransferida (PTTL) e OSL fototransferida (PTOSL), utilizadas como uma alternativa para se tentar obter um sinal mais adequado para o uso do material como um dosímetro, o que é interessante para a dosimetria das radiações, principalmente no caso onde é necessário trabalhar com doses mais altas.

O LiF:Mg,Ti é um material dosimétrico já bem estudado com relação às suas respostas TL e OSL, para diferentes aplicações. Massillon e col. [1] realizaram um trabalho sobre este material para verificar o início e a intensidade da supralinearidade do sinal dos picos 4 a 9, após exposição à radiação gama de feixes de  $^{60}\text{Co}$  (intervalo de dose estudado de 4,18 mGy a 8,21 kGy) de duas fontes diferentes. Kearfott e col. [2] estudaram a resposta OSL do LiF:Mg,Ti e de alguns outros materiais ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ ,  $\text{CaSO}_4\text{:Tm}$  e  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ ) após exposição à radiação beta de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (fonte pertencente ao sistema leitor TL/OSL Risø, modelo DA-15), com doses absorvidas no ar de 15 mGy, 150 mGy e 1,5 Gy, e após estímulo para emissão do sinal com luz de LEDs azuis e infravermelho.

O  $\text{CaSO}_4$  é outro material que possui resultados de sinal TL e OSL na literatura para uso em dosimetria [2]. Junot e col. [3] estudaram o sinal TL, e também de fotoluminescência, do  $\text{CaSO}_4$  puro, dopado com európio (Eu), e dopado com Eu e com nanopartículas de prata (Ag). Bahl e col. [4] desenvolveram e caracterizaram o  $\text{CaSO}_4\text{:Dy,Mn}$  com relação à sua resposta TL após exposição à radiação gama de  $^{137}\text{Cs}$  num intervalo de 10  $\mu\text{Gy}$  a 100 Gy.

Para se obter o sinal de fototransferência, é necessário que as seguintes etapas sejam realizadas: 1) irradiação do material, 2) tratamento térmico pós-irradiação, 3) iluminação do material, e 4) avaliação dos sinais PTTL e PTOSL. O tratamento pós-irradiação, ao qual o material é submetido para esvaziamento de suas armadilhas rasas, deve ser adequado o suficiente para que seja possível obter sinais PTTL e PTOSL após a iluminação; se ele não for adequado, pode ocorrer

esvaziamento das armadilhas rasas e profundas da amostra, eliminando todos os elétrons que forneceriam o sinal e impossibilitando, assim, a obtenção de qualquer resposta TL/PTTL ou OSL/PTOSL.

O  $\text{CaSO}_4$  já foi estudado com relação ao seu sinal PTTL, utilizando uma lâmpada de RUV. Amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  foram investigadas por Grossi [5] por meio da técnica de PTTL, utilizando luz UV (de 220 nm a 450 nm) e de laser (de 193 nm a 1.060 nm). Guckan e col. [6] estudaram a resposta PTTL de amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Mg}$ ; neste trabalho, eles utilizaram uma fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  para a irradiação com dose de 100 Gy e obtiveram picos principais de emissão TL em 145°C, 180°C e 235°C. Após tratamento térmico pós-irradiação e iluminação com LEDs azuis, chegaram a um pico de sinal PTTL único em torno de 180°C.

A resposta fototransferida também já foi relatada na literatura para outros tipos de materiais detectores de radiação. Kalita e Chitambo [7] analisaram o sinal PTTL do material  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C},\text{Mg}$  após irradiação com fonte beta ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ), diferentes temperaturas e taxas de aquecimento, e iluminação com LEDs azuis (comprimento de onda de 470 nm). Amostras de vidro de telefones celulares *touchscreen* foram avaliadas com relação ao seu sinal PTTL por McKeever e col. [8], após irradiarem o material com uma fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  do sistema leitor TL/OSL Risø. Bossin e col. [9] verificaram a resposta PTTL de substratos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com limite de detecção de 100 mGy e resposta supralinear abaixo de 10 Gy, utilizando exposição à luz azul. Gronchi e Caldas [10] estudaram a resposta PTOSL de detectores comerciais de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ , da Landauer, após irradiação do material com fonte de  $^{60}\text{Co}$ , tratamento óptico após a irradiação (utilizando duas lâmpadas fluorescentes com intensidade luminosa de 26.000 lux, em intervalos de tempo entre 10 min e 120 min) e iluminação por intervalos de tempo de 5 min a 60 min, utilizando uma lâmpada UV de mercúrio (Hg).

Assim, os objetivos deste trabalho consistem no estudo do efeito que um determinado tratamento térmico pós-irradiação pode causar na obtenção dos sinais PTTL e PTOSL de amostras de  $\text{LiF}:\text{Mg},\text{Ti}$  e  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , e na verificação da existência do fenômeno de fototransferência em ambos os materiais (após tratamento térmico e iluminação UV). Após estes dois estudos, se houver sinal de fototransferência será possível decidir se os valores obtidos são proveitosos o suficiente para dar prosseguimento aos estudos destas respostas fototransferidas para uma possível aplicação em dosimetria de doses altas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados, neste trabalho, dois materiais comerciais diferentes:  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  (produzido no Laboratório de Materiais Dosimétricos do IPEN), com dimensões de 6,0 mm de diâmetro e 0,8 mm de espessura, e  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  (comercializado como TLD-100 pela *Thermo Fischer Scientific*), com dimensões de 3,0x3,0x0,9 mm<sup>3</sup>.

Para a análise do sinal das amostras, foi utilizado o sistema leitor TL/OSL Risø, modelo TL/OSL-DA-20. No caso das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , foi utilizada a temperatura final de leitura de 350°C, numa taxa de aquecimento de 10°C/s, para a avaliação do sinal TL/PTTL; para a análise da resposta OSL/PTOSL, o estímulo para a emissão do sinal foi feito utilizando LEDs azuis, com potência óptica de 90% e durante 80 s. No caso das amostras de  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ , para a análise do sinal TL/PTTL, foi utilizada temperatura final de leitura de 400°C, também com taxa de aquecimento de 10°C/s; para a avaliação do sinal OSL/PTOSL, o estímulo para emissão de luz ocorreu também durante 80 s com potência óptica dos LEDs azuis de 90%.

Ambos os materiais foram irradiados com uma dose absorvida de 1 kGy, de uma fonte de radiação gama de <sup>60</sup>Co, *Gamma-Cell*, modelo 220, da *Atomic Energy of Canada LTD* (taxa de dose absorvida de 0,57 kGy/h, setembro de 2019), do Centro de Tecnologia das Radiações (CETER), IPEN.

Para as medições TL e OSL, foram seguidos os procedimentos normais de irradiação e leitura do sinal. Para as medições PTTL e PTOSL, as amostras foram irradiadas (dose de 1 kGy) e, em seguida, elas foram submetidas a um tratamento térmico pós-irradiação de 280°C/15 min. Logo a seguir, as amostras foram expostas a uma lâmpada de alta pressão de mercúrio, HBO 200W/2, OSRAM, parte de um sistema que apresenta uma fonte de tensão, modelo SP-200, *Bausch-Lomb*, e um monocromador, modelo GM 200, *Bausch-Lomb*. Durante o procedimento de iluminação, as condições foram: distância entre amostra e lâmpada de 10 cm, comprimento de onda de 250 nm e tempo de iluminação de 30 minutos. Por fim, as medições PTTL e PTOSL foram tomadas utilizando o sistema leitor TL/OSL Risø.

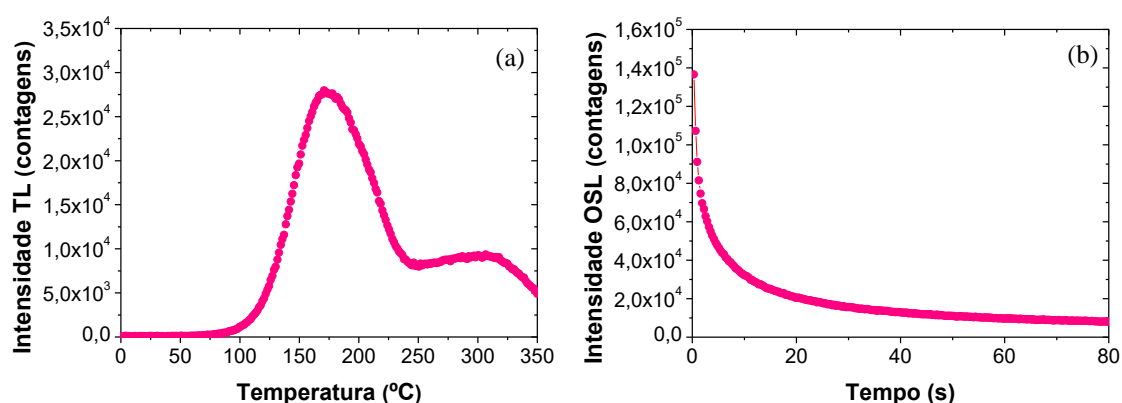
Após as medições dos sinais TL/PTTL e OSL/PTOSL, as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  foram tratadas termicamente a 300°C/3 h, e as de  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  a 400°C/1h, para sua posterior reutilização.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

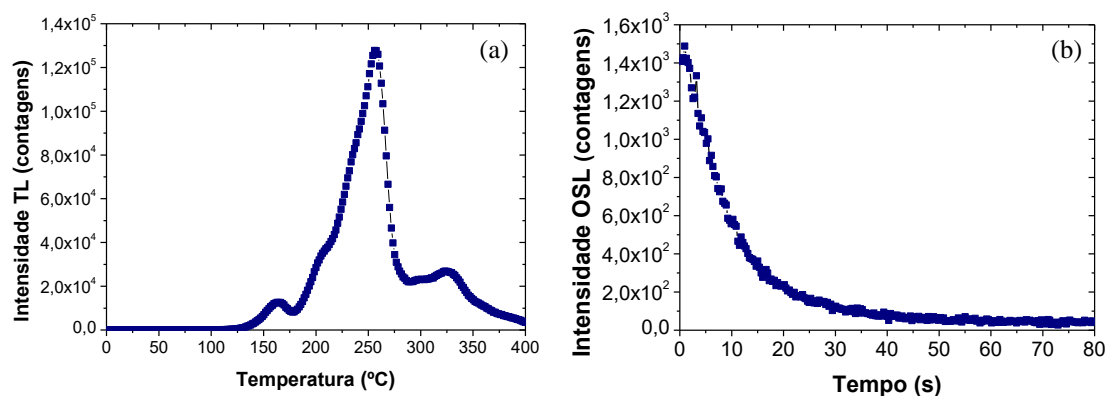
O desenvolvimento deste trabalho foi realizado em três etapas, para as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ : 1) medições TL e OSL após a irradiação; 2) medições TL e OSL após irradiação e tratamento térmico pós-irradiação; e 3) medições PTTL e PTOSL após irradiação, tratamento térmico pós-irradiação e iluminação.

#### 3.1. Medições TL e OSL após irradiação

Nesta primeira etapa do trabalho, as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  foram irradiadas com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  e dose absorvida de 1 kGy, e em seguida tiveram seus sinais TL e OSL avaliados. As Fig. 1a-b e 2a-b mostram os sinais TL e OSL obtidos para  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e  $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ , respectivamente, após o procedimento de irradiação.



**Figura 1:** Respostas TL e OSL de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ : (a) curva de emissão TL, e (b) curva de decaimento do sinal OSL (1 kGy,  $^{60}\text{Co}$ ).



**Figura 2:** Respostas TL e OSL de LiF:Mg,Ti: (a) curva de emissão TL, e (b) curva de decaimento do sinal OSL (1 kGy, <sup>60</sup>Co).

As amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy apresentaram o pico principal de emissão do sinal TL em torno de 178°C (com intensidade máxima correspondente a 2,9x10<sup>4</sup> contagens), e um segundo pico, secundário, cuja emissão localizou-se em aproximadamente 311°C (intensidade máxima de 9x10<sup>3</sup> contagens); com relação ao sinal OSL, ele apresentou início do decaimento em 1,4x10<sup>5</sup> contagens.

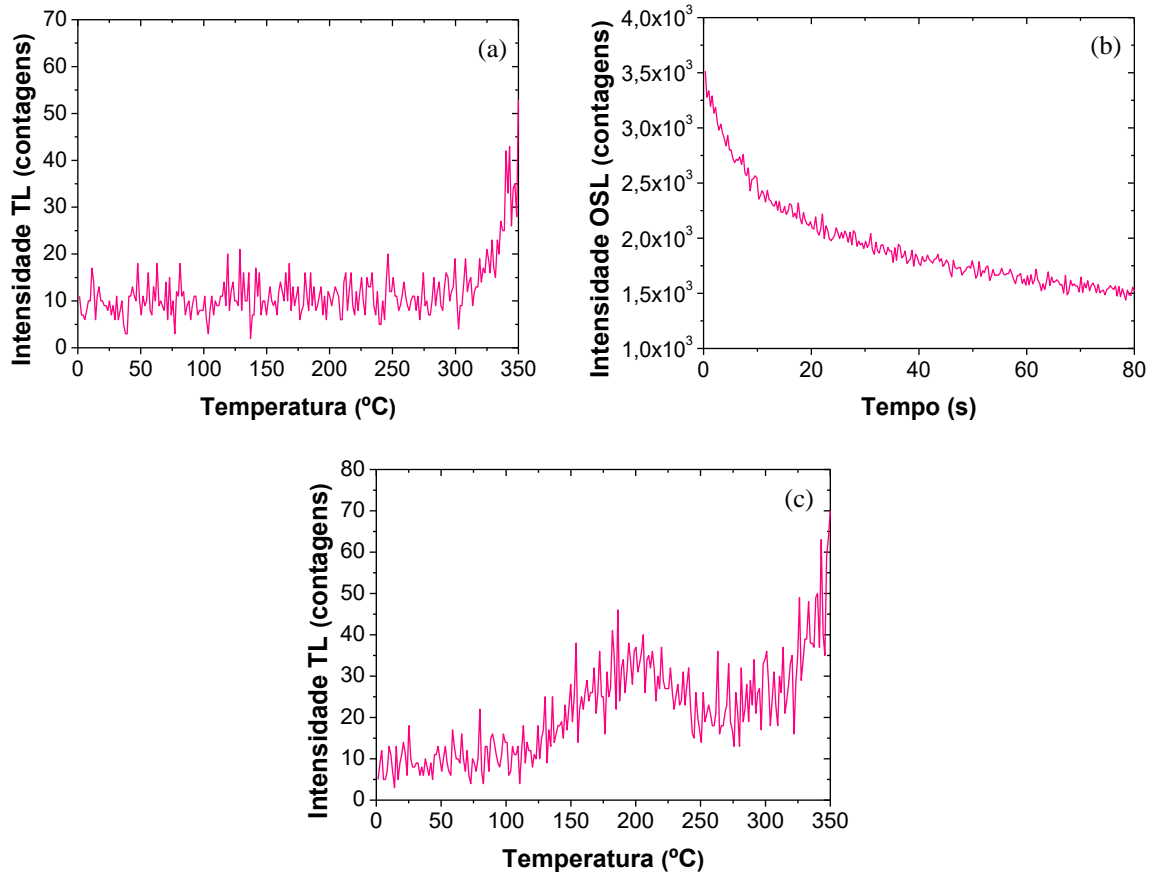
As amostras de LiF:Mg,Ti tiveram um pico principal TL à temperatura de aproximadamente 257°C, com intensidade de pico em 1,3x10<sup>5</sup> contagens, e mais dois outros picos secundários (um em torno de 163°C e outro em 325°C), e início do decaimento do sinal OSL em 1,5x10<sup>3</sup> contagens. Foi possível verificar que o sinal TL foi mais intenso para o LiF:Mg,Ti (com relação ao número de contagens correspondente à altura máxima do pico principal), e o sinal OSL foi maior para o CaSO<sub>4</sub>:Dy (em relação ao número de contagens referente ao ponto de início do decaimento do sinal).

### 3.2. Medições TL e OSL após irradiação e tratamento térmico pós-irradiação

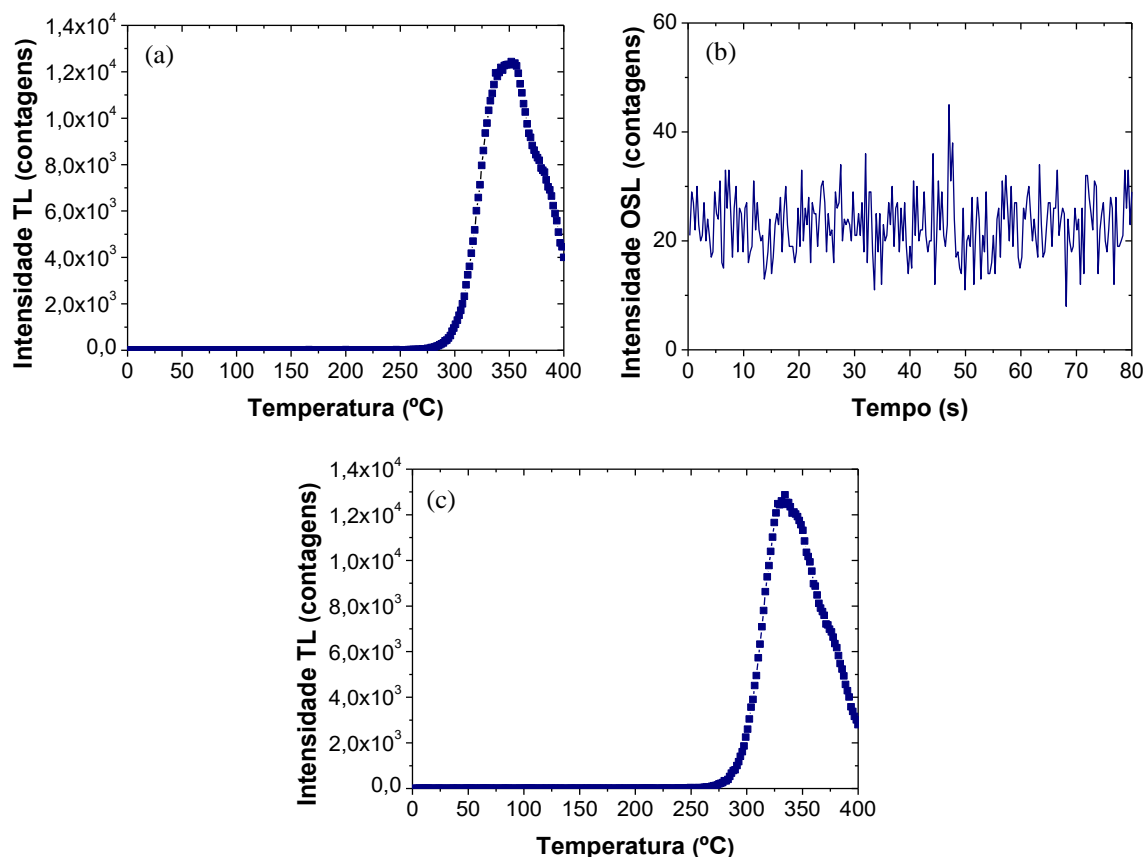
Na segunda fase, as amostras foram irradiadas com a mesma dose (1kGy, fonte de <sup>60</sup>Co), tratadas termicamente a 280°C/15 min e, então, analisadas para três respostas: 1) TL, 2) OSL e 3) TL após a OSL. As Fig. 3a-c e 4a-c mostram o comportamento destas três respostas obtidas neste estudo, para CaSO<sub>4</sub>:Dy e LiF:Mg,Ti, respectivamente.

Para o material  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , o sinal TL foi zerado e assemelha-se ao sinal de fundo do material (Fig. 3a), enquanto o sinal OSL apresenta início de decaimento em  $3,5 \times 10^3$  contagens (Fig. 3b); logo após esta leitura OSL foi feita uma medição TL na mesma amostra (Fig. 3c), e pode-se observar um leve aumento no sinal e a formação de um pico de baixa intensidade em torno de  $205^\circ\text{C}$  (altura deste pico em torno de apenas 40 contagens).

Comparando-se as Fig. 1a e 3a, de sinal TL, pode-se observar que o sinal da medição após irradiação apresentou um pico dosimétrico bem definido e de ordem de grandeza igual a  $10^4$ , mas o sinal medido após o tratamento térmico de  $280^\circ\text{C}/15$  min decaiu consideravelmente, mostrando que este tratamento culminou na liberação de elétrons presos tanto nas armadilhas rasas como nas profundas, esvaziando estas armadilhas e provocando a falta de sinal a ser emitido. Com relação ao sinal OSL, nas Fig. 1b e 3b, houve um decaimento do sinal mais lento, que diminuiu de uma ordem de grandeza de  $10^2$  (de  $1,4 \times 10^5$  contagens para  $3,5 \times 10^3$  contagens) após o tratamento térmico, o que mostra que, provavelmente, as armadilhas profundas foram apenas parcialmente esvaziadas. O aumento do sinal TL na Fig. 3c mostra que a exposição do material aos LEDs azuis, durante a leitura OSL, pode ter influenciado o movimento dos elétrons dentro da estrutura do material, e ocasionado liberação destes elétrons quando a temperatura de aquecimento das amostras chegou a  $205^\circ\text{C}$  (por isso foi possível observar uma pequena formação de um pico na Fig. 3c).



**Figura 3:** Respostas TL e OSL de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ : (a) curva de emissão TL, (b) curva de decaimento do sinal OSL, e (c) curva de emissão TL após leitura OSL (1 kGy,  $^{60}\text{Co}$ ).



**Figura 4:** Respostas TL e OSL de LiF:Mg,Ti: (a) curva de emissão do sinal TL, (b) curva de decaimento do sinal OSL, e (c) curva de emissão TL após leitura OSL (1 kGy, <sup>60</sup>Co).

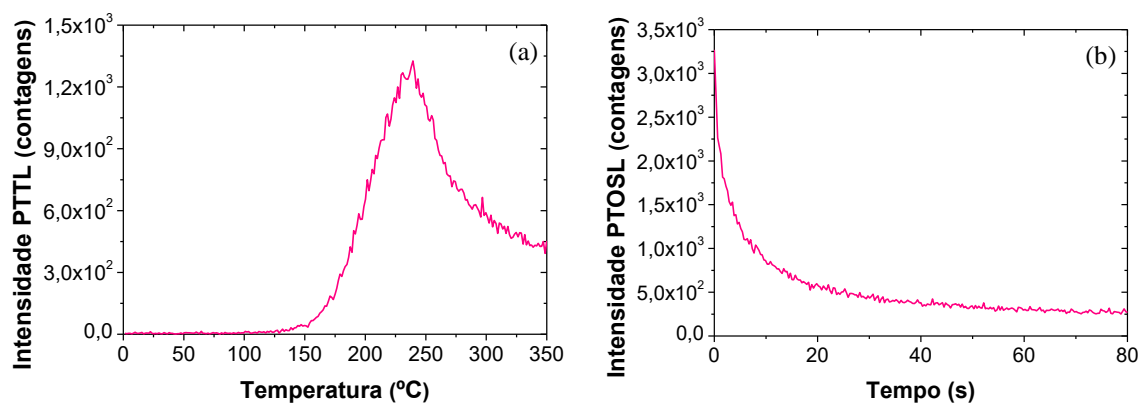
Para o LiF:Mg,Ti, a emissão do maior sinal TL ocorreu em 352°C, na intensidade de pico de 1,2x10<sup>4</sup> contagens (Fig. 4a), e o sinal OSL foi nulo, correspondente ao sinal de fundo da amostra (Fig. 4b); a leitura TL após a OSL, na mesma amostra, apresentou um pico que se manteve na região de 350°C, e com intensidade de 1,3x10<sup>4</sup> contagens (Fig. 4c).

Comparando-se as Fig. 2a e 4a, fica evidente que o sinal da amostra de LiF:Mg,Ti é mais intenso (em termos de contagens) quando medido logo após a irradiação, pois a leitura da amostra após o tratamento térmico apresentou uma redução no sinal de ordem de grandeza igual a 10; ainda assim, a resposta TL da Fig. 4a apresentou um pico TL bem definido, porém deslocado na sua temperatura (na medição após a irradiação, os picos de emissão ocorreram nas temperaturas de 163°C, 257°C e 325°C, e na medição após o tratamento térmico ele apareceu em 352°C). Ao contrário do que ocorreu no caso do CaSO<sub>4</sub>:Dy, este comportamento do sinal TL obtido para o

LiF:Mg,Ti ocorreu de maneira provável, pois um pico de emissão manteve-se mesmo após o tratamento térmico de 280°C. Com relação ao sinal OSL obtido, apresentado nas Fig. 2b e 4b, pode-se observar que a medição após o tratamento térmico pós-irradiação zerou o sinal da amostra de LiF:Mg,Ti, apresentando apenas o próprio sinal intrínseco do material, bem ruidoso. O sinal TL obtido após a leitura OSL (Fig. 4c) mostra que as armadilhas profundas podem ter sido esvaziadas (como também pode ter ocorrido com as amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy); é por este motivo que o comportamento é muito similar para ambos os casos onde as medições foram tomadas após o tratamento térmico de 280°C (Fig. 4a) e após a leitura OSL (Fig. 4c).

### 3.3. Medições PTTL e PTOSL

A terceira etapa foi de irradiação das amostras (1 kGy), tratamento térmico (280°C/15 min), exposição à luz UV (distância entre amostra e fonte de luz de 10 cm, comprimento de onda de 250 nm e tempo de iluminação de 30 min) e medição dos sinais PTTL e PTOSL. As Fig. 5a-b e 6a-b mostram os resultados obtidos.



**Figura 5:** Respostas luminescentes fototransferidas de CaSO<sub>4</sub>:Dy: (a) curva de emissão PTTL, e (b) curva de decaimento do sinal PTOSL (1 kGy, <sup>60</sup>Co, tratamento térmico de 280°C/15 min e exposição à luz UV).

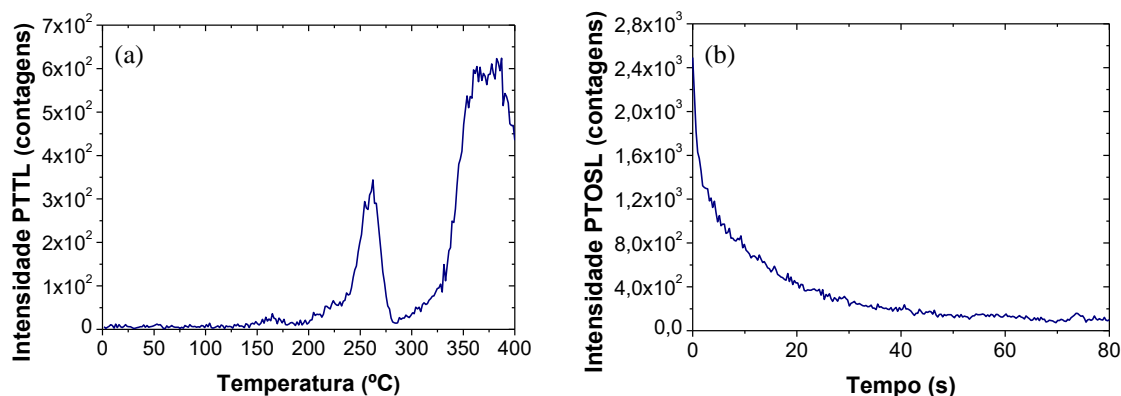
Para as amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy, o pico principal de emissão do sinal PTTL ocorreu em torno de 238°C e com intensidade correspondente a 1,3x10<sup>3</sup> contagens; com relação ao sinal PTOSL, o início do decaimento foi observado para a intensidade em torno de 3,3x10<sup>3</sup> contagens.

Analisando os dados obtidos, pode-se observar que o sinal PTTL, na Fig. 5a, apresenta um sinal um pouco menos intenso do que o sinal TL obtido logo após irradiação, na Fig. 1a, pois a ordem de grandeza diminuiu de  $10^4$  para  $10^3$ . Outro fator que se pode notar, é que a exposição da amostra à luz UV provocou um efeito que fez com que a maior emissão do sinal ocorresse a uma temperatura mais elevada, pois na Fig. 1a o pico principal ocorreu em  $178^\circ\text{C}$ , e na Fig. 5a, o pico aparece em  $238^\circ\text{C}$ .

Comparando-se as Fig. 3a e 5a, é possível afirmar que houve fototransferência durante a emissão do sinal da amostra; isso se torna evidente quando é observado que o sinal TL é praticamente nulo após o tratamento de  $280^\circ\text{C}/15$  min (Fig. 3a), mas cresce na resposta PTTL, conforme mostrado na Fig. 5a.

Amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Mg}$  foram analisadas com relação à sua resposta PTTL por Guckan e col. [6]. Embora eles tenham utilizado várias condições experimentais diferentes (dopante de Mg, fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , dose absorvida de 100 Gy, LEDs azuis para iluminação e tratamento térmico de  $600^\circ\text{C}/25$  min), eles demonstraram uma curva de emissão do sinal TL, após irradiação, e uma curva do sinal PTTL, após iluminação, como foi feito neste trabalho para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram picos principais de emissão de sinal TL em três temperaturas:  $145^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$  e  $235^\circ\text{C}$ , e após o tratamento térmico e a iluminação com luz azul, o maior sinal PTTL ocorreu num único pico ao redor de  $180^\circ\text{C}$ , temperatura intermediária às aquelas obtidas para a TL. Assim, os dados obtidos para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , com maiores emissões de sinais TL em  $178^\circ\text{C}$  e  $310^\circ\text{C}$ , e pico do sinal PTTL em  $238^\circ\text{C}$  (também uma temperatura intermediária), são compatíveis com aqueles apresentados por Guckan e col. [6].

Comparando-se os dados obtidos para o sinal OSL (Fig. 1b) e o sinal PTOSL (Fig.5b), pode-se observar que neste último caso a intensidade do decaimento inicial diminuiu para um fator de  $10^2$  e o sinal foi mais ruidoso. Entretanto, o sinal PTOSL foi mais intenso que o sinal OSL obtido após o tratamento térmico pós-irradiação (Fig. 3b), como se pode observar na intensidade do pico de cada figura, em termos de número de contagens; isso indica que ocorreu fototransferência dos elétrons durante a exposição à lâmpada UV, e foi o que contribuiu para o aumento do sinal PTOSL.



**Figura 6:** Respostas luminescentes fototransferidas de LiF:Mg,Ti: (a) curva de emissão PTTL, e (b) curva de decaimento do sinal PTOSL (1 kGy,  $^{60}\text{Co}$ , tratamento térmico de 280°C/15 min e exposição à luz UV).

Os detectores de LiF:Mg,Ti apresentaram um pico de emissão PTTL em torno de 344 contagens, à temperatura de 262°C, e um outro pico com intensidade em 600 contagens à temperatura de aproximadamente 375°C (o qual ainda está sob estudo). O início do decaimento do sinal PTOSL ocorreu em  $2,5 \times 10^3$  contagens.

A Fig. 2a apresenta um pico de emissão TL bem mais intenso do que a Fig. 6a mostra para o sinal PTTL; embora o pico dosimétrico tenha ocorrido praticamente à mesma temperatura (em torno de média 260°C), a resposta medida logo após a irradiação foi da ordem de  $10^5$  contagens, enquanto a resposta medida após a iluminação foi da ordem de  $10^2$  contagens. Entretanto, quando as Fig. 4a e 6a são comparadas, é possível observar que após a iluminação o pico da região de 350°C que aparece na Fig. 4a é mantido, e além dele, aparece um pico anterior, menor; a formação deste pico numa temperatura mais baixa explica o fenômeno de fototransferência, pois os elétrons foram transferidos de um tipo de armadilha para outra, gerando esta emissão de sinal. Assim, pode-se concluir que houve fototransferência durante a análise do sinal PTTL.

Comparando os sinais obtidos para a luminescência opticamente estimulada, com relação às Fig. 2b e 6b, pode-se observar que os decaimentos iniciais OSL e PTOSL se mantiveram aproximadamente na mesma intensidade (em termos de ordem de grandeza). Entretanto, pode-se dizer que houve fototransferência dos elétrons na amostra de LiF:Mg,Ti, pois foi possível observar

que houve um aumento do sinal quando se compara a leitura OSL após o tratamento térmico pós-irradiação (Fig. 4b), que foi nulo, e a leitura PTOSL após a iluminação (Fig. 6b).

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados, é evidente que os sinais TL e OSL são mais intensos quando são obtidos logo após a irradiação, ao invés dos medidos após o tratamento térmico de 280°C. Entretanto, mesmo após o tratamento térmico pós-irradiação e a iluminação, foi possível obter-se sinais significativos de PTTL e PTOSL de ordem de grandeza suficiente para permitir a continuidade dos estudos utilizando o tratamento de 280°C/15 min e a luz UV.

Não foi encontrado na literatura nenhum estudo comparando-se os resultados obtidos em condições similares às utilizadas neste trabalho: sinais TL/PTTL e OSL/PTOSL para CaSO<sub>4</sub>:Dy e LiF:Mg,Ti, com irradiação com fonte de <sup>60</sup>Co, tratamento térmico de 280°C e iluminação UV com lâmpada de Hg. Por este motivo, os resultados aqui apresentados ainda estão em estudo. Apenas um trabalho foi encontrado sobre a resposta PTTL para o CaSO<sub>4</sub>, porém, com dopante diferente (Mg); mesmo assim, os dados obtidos neste trabalho para o CaSO<sub>4</sub>:Dy, foram comparados aos relatados por Guckan e col. [6], pois o comportamento das curvas de emissão TL e PTTL foi semelhante.

Preliminarmente, os experimentos realizados para verificação dos sinais TL e OSL (após irradiação e após tratamento térmico), e dos sinais PTTL e PTOSL (após irradiação, tratamento térmico e exposição à luz UV), apresentaram dados satisfatórios e favoráveis, em termos de curva de emissão do sinal TL/PTTL e curva de decaimento do sinal OSL/PTOSL; foi possível observar que ambos os tipos de materiais apresentaram fototransferência tanto na resposta PTTL como na resposta PTOSL. O tratamento térmico pós-irradiação causou um efeito interessante e diferente, considerado satisfatório para a obtenção dos dados obtidos posteriores a ele, mas outros estudos experimentais são ainda necessários. Assim, pode-se concluir, por enquanto, que os dados obtidos até o presente momento permitem que seja dada uma continuidade na determinação do sinal TL/PTTL e OSL/PTOSL do CaSO<sub>4</sub>:Dy e do LiF:Mg,Ti. Como foi observado sinal de fototransferência nas amostras, novos estudos encontram-se em andamento, como a variação do sinal PTTL e PTOSL com o comprimento de onda da luz UV e o tempo de iluminação (que

permitirão a obtenção das condições mais adequadas para o iluminação e a fototransferência de cada material), além da variação da dose absorvida (que permitirá relacionar os sinais PTTL e PTOSL obtidos para aplicação em dosimetria de doses altas).

## AGRADECIMENTOS

As autoras são gratas à Eng. Elizabeth S. R. Somessari, do Centro de Tecnologia das Radiações (CETER), IPEN, por todas as irradiações feitas com a fonte de  $^{60}\text{Co}$ . Além disso, elas gostariam de expressar seus agradecimentos às agências de fomento Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo nº. 2014/12732-9), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processos nº. 301335/2016-8 e 380586/20), e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Processo 554/2018), pelo apoio financeiro parcial para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] MASSILLON-JL, G.; GAMBOA-DeBUEN, I.; BRANDAN, M. E. Onset of supralinear response in TLD-100 exposed to  $^{60}\text{Co}$  gamma-rays. **J. Phys. D. Appl. Phys.**, v. 39, p. 262-268, 2006.
- [2] KEARFOTT, K. J.; WEST, W. G.; RAFIQUE, M. The optically stimulated luminescence (OSL) properties of LiF:Mg,Ti, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, CaSO<sub>4</sub>:Tm and CaF<sub>2</sub>:Mn thermoluminescent (TL) materials. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 99, p. 155-161, 2015.
- [3] JUNOT, D. O.; RODRIGUES Jr, J. J.; SOUZA, D. N.; SANTOS, M. A. C.; NUNES, L. A. The CaSO<sub>4</sub>:Eu-Ag composite material: thermo-photoluminescence study. **Radiat. Meas.**, v. 70, p. 1-4, 2014.
- [4] BAHL, S.; LOCHAB, S. P.; KUMAR, P. CaSO<sub>4</sub>:Dy,Mn: A new and highly sensitive thermoluminescence phosphor for versatile dosimetry. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 119, p. 136-151, 2016.

- [5] GROSSI, F. B. Caracterização e padronização de um sistema dosimétrico termoluminescente para radiações ultravioleta e laser utilizando o  $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ . São Paulo: 2002. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.
- [6] GUCKAN, V.; OZDEMIR, A.; ALTUNAL, V.; YEGINGIL, I.; YEGINGIL, Z. Studies of blue light induced phototransferred thermoluminescence in  $\text{CaSO}_4\text{:Mg}$ . **Nucl. Instrum. Meth. B**, v. 448, p. 31-38, 2019.
- [7] KALITA, J. M.; CHITAMBO, M. L. Phototransferred thermoluminescence and thermally-assisted optically stimulated luminescence dosimetry using  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C,Mg}$  annealed at  $1200^\circ\text{C}$ . **J. Lumin.**, v. 205, p. 1-6, 2019.
- [8] McKEEVER, S. W. S.; MINNITI, R.; SHOLOM, S. Phototransferred thermoluminescence (PTTL) dosimetry using Gorilla glass from mobile phones. **Radiat. Meas.**, v. 106, p. 423-430, 2017.
- [9] BOSSIN, L.; BAILIFF, I. K.; TERRY, I. Phototransferred TL properties of alumina substrates. **Radiat. Meas.**, v. 120, p. 41-46, 2018.
- [10] GRONCHI, C. C.; CALDAS, L. V. E. PTOSL response of commercial  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  detectors to ultravioleta radiation. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 154 (1), p. 117-120, 2013.