

## **ESTUDO DOS PARÂMETROS RELACIONADOS AO SINAL TERMOLUMINESCENTE DOS DETECTORES DE SULFATO DE CÁLCIO E DE FLUORETO DE LÍCIO<sup>1</sup>**

*STUDY OF THE PARAMETERS RELATED TO THE THERMOLUMINESCENT SIGNAL OF CALCIUM SULFATE AND LITHIUM FLUORINE DETECTORS*

**Ana Paula Perini<sup>2</sup>**

**Marlene Silva Cabral<sup>2</sup>**

**Evamberto Garcia de Góes<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

A dosimetria das radiações ionizantes é importante para que procedimentos possam ser observados com o objetivo de maximizar os efeitos benéficos que ela pode oferecer à sociedade e minimizar seus danos. Assim, diferentes materiais detectores têm sido propostos na literatura com objetivo de realizar-se monitoração ambiental e pessoal. O objetivo deste estudo é buscar, na literatura, parâmetros importantes relacionados ao sinal termoluminescente dos detectores de sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>) e de fluoreto de lítio (LiF). A finalidade principal deste estudo é contribuir com a implantação da dosimetria termoluminescente no Laboratório de Controle de Qualidade em Imagens Médicas do Centro Universitário Franciscano.

**Palavras-chave:** dosimetria termoluminescente, sulfato de cálcio, fluoreto de lítio, sinal TL.

### **ABSTRACT**

The dosimetry of the ionizing radiators is important in order that procedures may be taken with the aim of maximizing the beneficial effects which it can offer the society and minimizing the damages which arise from it. Thus, different detector materials have been proposed in the literature with the objective of conducting environmental and personal monitoring. This study aims to search in the literature for important parameters related to the thermoluminescent signal of the calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>) and lithium fluoride (LiF) detectors. The main purpose of this study is to contribute to the implantation of the thermoluminescent dosimetry in the Quality Control Laboratory in Medical Images of the Franciscan University Center.

**Keywords:** Thermoluminescent dosimetry, calcium sulfate, lithium fluoride, TL signal.

<sup>1</sup> Trabalho Final de Graduação - TFG.

<sup>2</sup> Acadêmicos do Curso de Física, Bacharelado com ênfase em Física Médica - UNIFRA.

<sup>3</sup> Orientador - UNIFRA.

## INTRODUÇÃO

Alguns materiais, quando aquecidos, após serem expostos à radiação ionizante, apresentam a propriedade de emitir luz. Esse fenômeno é conhecido como termoluminescência e o material que apresenta esta característica é denominado material termoluminescente (TL).

O fenômeno da termoluminescência já é conhecido há bastante tempo. Em 1663, Robert Boyle já notificava à “Royal Society”, em Londres, haver observado a emissão de luz por um diamante, quando este fora aquecido no escuro (SCHARMANN *et al.*, 1981). A partir de então, um grande número de cientistas, alguns famosos, como Henry Becquerel, passaram a trabalhar com o fenômeno. Em 1904, Marie Curie observou que as propriedades TL dos cristais podiam ser restauradas, expondo-os aos efeitos do rádio (MCKEEVER *et al.*, 1985). Entre 1930 e 1940, Urbach realizou trabalhos experimentais e teóricos com termoluminescência (SCHARMANN *et al.*, 1981) e, em 1945, Randall e Wikins desenvolveram um primeiro modelo que permitiu cálculos quantitativos da cinética termoluminescente. Posteriormente, baseados no modelo de Randall e Wikins, desenvolveram-se novos modelos com o objetivo de se conseguir um melhor ajuste da teoria com os resultados experimentais.

A aplicação da termoluminescência, na dosimetria das radiações ionizantes, data de 1940. A partir dessa data, houve um aumento no número de trabalhadores com exposição à radiação e, em consequência disso, um aumento nos esforços a fim de se desenvolverem novos tipos de detectores. Entre os pioneiros da dosimetria termoluminescente, destacam-se, Daniels, a partir de 1953, Cameron, a partir de 1961, com suas pesquisas sobre o uso do fluoreto de lítio (LiF) como dosímetro termoluminescente.

O objetivo do presente estudo foi a realização de um levantamento na literatura sobre os parâmetros envolvidos no sinal TL, emitido pelo detector sulfato de cálcio ativado com disprósio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ) e pelo detector fluoreto de lítio (LiF) como resposta à absorção da energia emitida por fontes radioativas. A motivação para a realização deste estudo foi a contribuição para a implantação da dosimetria termoluminescente no Laboratório de Controle de Qualidade em Imagens Médicas do Centro Universitário Franciscano.

## METODOLOGIA

O trabalho de muitos físicos, no domínio da física das radiações ionizantes, tem sido o de investigar diversos materiais termoluminescentes, com base nos processos físicos envolvidos na interação da radiação com a

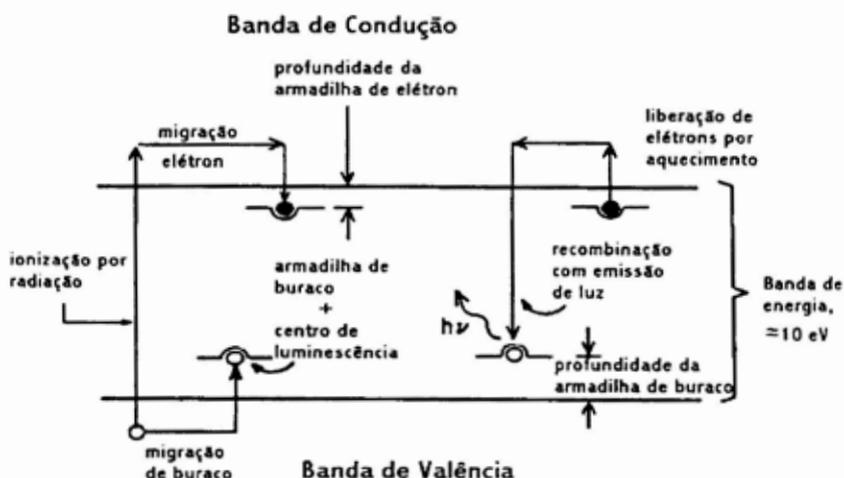
matéria. Para alcançar o objetivo proposto no presente estudo, realizou-se uma investigação na literatura especializada em dosimetria termoluminescente para se obter informações sobre as propriedades termoluminescentes dos detectores  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{LiF}$ .

## PROCESSO TERMOLUMINESCENTE

O fenômeno da termoluminescência é explicado, teoricamente, utilizando-se o conceito de bandas em relação aos níveis eletrônicos de energia nos sólidos (Figura 1).

Quando um cristal termoluminescente é exposto à radiação ionizante, os elétrons da banda de valência podem absorver energia em quantidade suficiente para migrarem para a banda de condução, deixando um buraco na banda de valência. Os elétrons e os buracos movem-se através do cristal e isso pode possibilitar uma recombinação entre eles, ou uma captura deles, nos estados metaestáveis de energia, denominadas armadilhas, que se localizam na banda proibida. Quando o cristal é aquecido, os elétrons armadilhados absorvem energia e, então, migram para a banda de valência. Se as armadilhas dos elétrons forem mais rasas que as dos buracos, os elétrons escapam antes que as dos buracos e vão para a banda de condução. Nesta condição, eles podem movimentar-se pelo cristal até recombinarem-se com os buracos armadilhados, emitindo um fóton TL. Se as armadilhas de buracos forem mais rasas, estes escapam antes dos elétrons e vão para a banda de valência. Nessa banda, eles podem movimentar-se pelo cristal e recombinarem-se com os elétrons armadilhados, emitindo também um fóton TL (MORAES, 1999).

Os cristais iônicos são transparentes na região do espectro visível. Para minimizar esse problema, introduzem, no cristal, impurezas ou defeitos na rede cristalina. Essas impurezas (imperfeições) estão associadas às armadilhas ou níveis de energia metaestáveis, localizados na banda proibida. Isso confere ao cristal a propriedade de armazenar a energia transferida pela radiação durante a interação, a qual é liberada na forma de luz, quando o material é aquecido.



**Figura 1.** Processo Termoluminescente (CAMERON *et al.*, 1968).

#### SISTEMA DE LEITURA TLD

O aparelho usado, para aquecer o detector termoluminescente (TLD) e medir a luz termoluminescente emitida, é chamado leitor termoluminescente. Esse aparelho, disponível comercialmente, é constituído basicamente de um dispositivo para aquecer o detector e uma fotomultiplicadora para captar a luz emitida e amplificar o sinal relativo. A adoção de filtros, entre a fonte de radiação e o detector TL, permite a discriminação da influência de sinais espúrios e da emissão de luz infravermelha por parte dos elementos submetidos a temperaturas elevadas (MCKEEVER *et al.*, 1985).

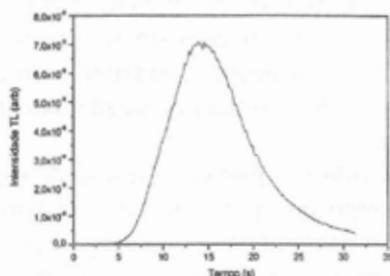
#### REUTILIZAÇÃO DO MATERIAL TERMOLUMINESCENTE

O material termoluminescente pode ser reutilizado para novas medidas de dose de radiação mediante um tratamento térmico (tratamento térmico pré-irradiação). Esse tratamento tem por objetivo devolver ao material as propriedades TL que ele possuía antes de ser exposto à radiação. Desse modo, eliminam-se as informações da dose (energia absorvida) registrada no material, assegurando-se a reprodutibilidade das futuras medidas de dose de radiação.

O tratamento térmico, após a irradiação (tratamento térmico pós-irradiação), visa a eliminar aqueles sinais TL que são emitidos, normalmente, à temperatura ambiente. Esse tratamento consiste em aquecer os detectores, após a irradiação, a uma temperatura abaixo daquele valor utilizado no tratamento térmico pré-irradiação.

## CURVA DE EMISSÃO TERMOLUMINESCENTE

A curva de emissão termoluminescente, característica de um material TL, representa a luz emitida pelo cristal como função da temperatura ou do tempo de aquecimento. Essa curva é formada, em geral, por vários picos. Cada um desses picos está associado a uma determinada armadilha que pode ser de elétrons ou buracos. Esses picos são caracterizados pela temperatura em que ocorre um máximo de intensidade de emissão de luz. As armadilhas podem capturar e segurar os portadores de carga num poço de potencial por períodos longos de tempo. A formação de um pico de emissão TL está relacionada à probabilidade de escape do elétron ou do buraco da armadilha correspondente. Ou seja, quando a temperatura do material é menor que aquela característica do pico considerado, poucos portadores de carga (elétrons ou buracos) são liberados da armadilha e, assim, a luz emitida tem baixa intensidade (baixo valor de sinal TL). A probabilidade de os elétrons ou buracos escaparem das armadilhas aumenta com o aumento da temperatura do material, causando um aumento de emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade do sinal TL decresce devido à redução de portadores armadilhados. A forma da curva de emissão depende dos tipos de armadilhas e dos centros de luminescência existentes no cristal, da razão de aquecimento e do aparelho detector utilizado. A figura 2 exemplifica a curva de emissão TL dos detectores  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e Teflon.



**Figura 2.** Curva de emissão TL típica dos detectores  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (MORAES *et al.*, 1999).

## O DETECTOR SULFATO DE CÁLCIO

O sulfato de cálcio, dopado com disprósio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ), possui excelentes propriedades dosimétricas. Ele é um dos materiais TL mais sensíveis já avaliados. Devido à essa sensibilidade, esse detector é utilizado em diversas práticas, envolvendo radiação ionizante, como por exemplo, a dosimetria pessoal. No Brasil, este detector é fabricado pela MRA – Indústria de Equipamentos Eletrônicos Ltda (Ribeirão Preto-SP) e pelo IPEN-USP (São Paulo-SP).

## O DETECTOR FLUORETO DE LÍTIO

O fluoreto de lítio ( $\text{LiF}$ ) exibe, relativamente pouca termoluminescência, na sua forma pura. A presença de impurezas no  $\text{LiF}$  parece ser necessária para aumentar a sua resposta em termos de sinal TL. A indústria Harshaw Chemical Co (Solon, OH, USA) desenvolveu diversas categorias de detectores de  $\text{LiF}$ . A tabela 1 apresenta a composição de alguns detectores de  $\text{LiF}$ , conhecidos comercialmente, como  $\text{LiF-100}$ ,  $\text{LiF-600}$  e  $\text{LiF-700}$ .

**Tabela 1.** Composição do isotopo de alguns detectores  $\text{LiF}$ .

Isótopos	TLD-100	TLD-600	TLD-700
6Li	7,5%	95,6%	0,01%
7Li	92,5%	4,4%	99,99%

## OBTENÇÃO DAS PASTILHAS DE $\text{CaSO}_4$ ATIVADA COM DISPRÓSIO E TEFLON

Segundo Leticia L. Campos (CAMPOS & LIMA., 1983), o método de obtenção dos cristais de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  consiste de um sistema de evaporação selado e acoplado a frascos lavadores, contendo solução de  $\text{NaOH}$ , para neutralizar o vapor de ácido. Esse processo utiliza fluxo de nitrogênio gasoso para arraste desse vapor.

Esse método permite um melhor controle de todos os parâmetros envolvidos no crescimento do cristal. Nesse processo, a cristalização é controlada pela variação da temperatura de evaporação e do fluxo do gás. Essa metodologia também permitiu aumentar a sensibilidade TL do material por meio do controle das impurezas no cristal.

Também foi desenvolvida uma metodologia para a obtenção de pastilhas sintetizadas (CAMPOS & LIMA., 1983) que utiliza teflon como

material agregante. Essa metodologia eliminou problemas de fragilidade e higroscopicidade do detector e permitiu a obtenção de detectores de  $\text{CaSO}_4$  com espessura menor.

## PREPARO DAS PASTILHAS

As pastilhas são obtidas pela prensagem a frio e sinterização de uma mistura de  $\text{CaSO}_4$ : Dy + Teflon ( $Z=8,5$ ), ambas na forma de pó. A melhor proporção fósforo-agregante é de 1:2, respectivamente. As pastilhas são produzidas com espessuras entre 0,10 mm e 0,80 mm, com massa entre 15 e 50 mg, respectivamente e com diâmetro de 6 mm (CAMPOS & LIMA, 1987).

## PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS DO $\text{CaSO}_4$ :DY E LIF

### Resposta TL em Função da Dose

A resposta do detector à radiação é definida como uma dependência funcional da intensidade da resposta TL em função da dose absorvida. O ideal é que o material apresente uma resposta linear em um largo intervalo de dose. Entretanto, muitos materiais apresentam uma variedade de efeitos não lineares. Para o uso prático, define-se a função de dose-resposta normalizada, ou índice de supralinearidade, como

$$f(D) = \frac{[F(D)/D]}{[F(D_1)/D_1]} \quad (1)$$

em que  $f(D)$  é o índice de supralinearidade,  $F(D)$  é a dose-resposta para a dose  $D$  e  $F(D_1)$  é a dose-resposta para a dose  $D_1$ , sendo  $D$  a menor dose para a qual a resposta é linear. O valor de  $f(D)$  fornece o grau de linearidade da resposta:  $f(D)=1$  corresponde ao intervalo de linearidade;  $f(D)>1$ , supralinearidade;  $f(D)<1$ , sublinearidade.

A curva resposta de um detector TL ideal deve ser linear no intervalo de dose utilizado nas práticas com radiação. Em geral, em medicina, utiliza-se um intervalo de dose entre 0-10 Gy.

### Resposta em Função da Energia

A resposta com a energia é a variação do sinal TL, para uma determinada dose, como função da energia da radiação incidente. Essa variação depende da interação da radiação com o material. Para a radiação envolvendo fótons, a resposta com a energia é definida como

$$S_E(E) = \frac{(\text{Men} / \bar{n})_{\text{mat}}}{(\text{Men} / \bar{n})_{\text{ref}}} \quad (2)$$

em que  $\text{Men}/\rho$  é o coeficiente de absorção de energia e massa e REF é o material de referência, geralmente o ar; mat é o material termoluminescente utilizado.

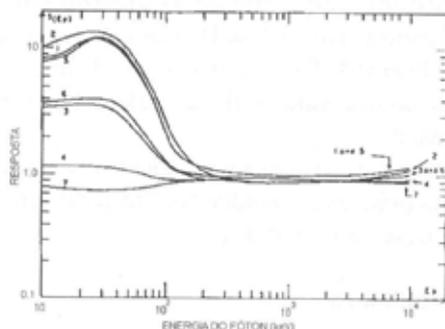
Na prática, a resposta TL para a irradiação com fótons é fornecida calculando-se a resposta relativa com a energia (RER), definida com relação à resposta do material à radiação gama do Cobalto-60 (1,25 MeV). Então,

$$(\text{RER})_E = S_E(E)/S_E(1,25\text{MeV}) \quad (3)$$

O processo de absorção fotoelétrico é usualmente predominante em energias inferiores a 100 KeV. Esse processo, que envolve os elétrons mais internos, é dependente do número atômico  $Z$  dos átomos que constituem o material alvo. Conseqüentemente, os detectores com alto número atômico têm um aumento na resposta TL para fótons de baixa energia.

Existem dois modos de determinar a curva resposta para os detectores TL: pelo uso de valores determinados experimentalmente, baseados no KeV efetivo, que é definido como a energia do fóton monoenergético que tem a mesma camada semi-redutora que o feixe de raios X em questão (JOHNS,1961), para várias fontes de raios X e raios gama, ou pelo uso de valores determinados, teoricamente, para avaliar os coeficientes de absorção para várias energias de fótons. A figura 3 mostra a curva resposta em energia que foi calculada pela comparação de coeficientes de vários detectores TL com energia depositada no tecido.

A resposta de energia está usualmente relacionada, com a exposição ao ar do que a dose no tecido.



**Figura 3.** Sensibilidade teórica de fósforos TL como função da energia do fóton, calculada como a razão entre a energia depositada no fósforo e a energia depositada no tecido: (1)  $\text{CaSO}_4$ ; (2)  $\text{CaF}_2$ ; (3)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (4)  $\text{LiF}$ ; (5)  $\text{CaCO}_3$ ; (6)  $\text{SiO}_2$ ; e (7)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , (CAMERON *et al.*; 1968).

### **Resposta TL em Função da Taxa de Dose**

Muitos detectores de radiação mostraram modificação na resposta em função da taxa de dose. Em geral, detectores TL não mostraram qualquer dependência da resposta TL em função da taxa de dose (CAMERON *et al.*, 1968).

Observou-se que a resposta TL do detector LiF é independente da taxa de dose para valores superiores a  $10^{10}$  rads/segundo (CAMERON *et al.*, 1968).

### **Sensibilidade**

A sensibilidade TL pode ser definida como a quantidade de luz liberada pelo cristal por unidade de exposição à radiação (CAMERON *et al.*, 1968). O limite inferior da sensibilidade útil depende das características do cristal e do leitor TLD. A maioria dos leitores TLD comerciais pode medir exposições menores que 100 mR. O limite superior do intervalo útil é geralmente limitado apenas pelo cristal.

Na prática, a sensibilidade relativa de um detector é obtida através da comparação do sinal TL do material em questão com a resposta TL do Fluoreto de Lítio (LiF-100), conforme a equação 4. Nesse processo, assume-se um valor de sensibilidade igual a um para o detector LiF.

$$S_E(E) = \frac{(\text{Men} / \rho)_{\text{mat}}}{(\text{Men} / \rho)_{\text{ref}}} \quad (4)$$

em que TLD-100 é o LiF: Mg, Ti e  $F(D)_{\text{TLD-100}}$  é igual a 1.

### **Estudo da Emissão do Sinal TL do Detector $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ + Teflon**

No estudo realizado por Campos (CAMPOS & LIMA., 1987) sobre os parâmetros envolvidos na emissão do sinal TL pelo detector  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$  + TEFLON foi utilizado um sistema leitor termoluminescente produzido pela Harshaw Chem. Co, modelo 2000, módulos A e B. A velocidade de aquecimento em todas as medidas foi de  $10^\circ \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  e a luz emitida foi integrada no intervalo de temperatura entre  $180$  e  $350^\circ \text{C}$ .

Os detectores foram irradiados com radiação gama utilizando-se uma fonte de Cobalto-60 com atividade de 1GBq. O estudo foi realizado sob a condição de equilíbrio eletrônico.

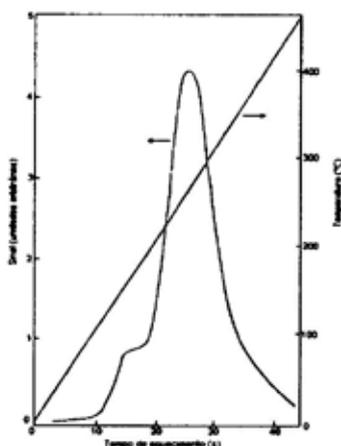
Os detectores também foram irradiados com uma fonte de radiação beta, utilizando-se o Sistema Padrão Secundário Beta do Laboratório de Calibração do IPEN-USP.

Todas as medidas foram efetuadas 24 horas após a irradiação. O tratamento térmico padrão para a reutilização das pastilhas foi de 300° C durante 3 horas.

### *Curva de Emissão e Sensibilidade dos Detectores*

#### Sulfato de Cálcio

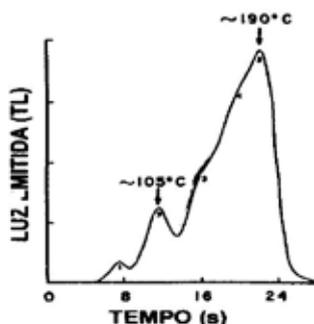
A figura 4 mostra a curva de emissão TL típica dos detectores  $\text{CaSO}_4$ : DY + Teflon (CAMPOS & LIMA, 1987). O pico principal, que é chamado de pico dosimétrico, aparece em 250°C. O pico de menor temperatura é observado em 145°C. A sensibilidade média, expressa como a magnitude do sinal elétrico no tubo fotomultiplicador produzido por  $2.58 \times 10^{-4} \text{ CKg}^{-1}$  (1R) de exposição em 1mg de uma amostra, foi de  $1.30 \text{ nCR}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ .



**Figura 4.** Curva de emissão típica de  $\text{CaSO}_4$ : Dy + Teflon (CAMPOS, *et al.*, 1987).

#### Fluoreto de Lítio

A figura 5 apresenta uma curva de emissão em função do tempo para o detector LiF. Após a irradiação, os picos de 1 a 5, apresentados na figura 5, decaem à temperatura ambiente com vidas médias de, aproximadamente, 5 minutos, 10 horas, 5 anos, 7 anos e 80 anos, respectivamente.

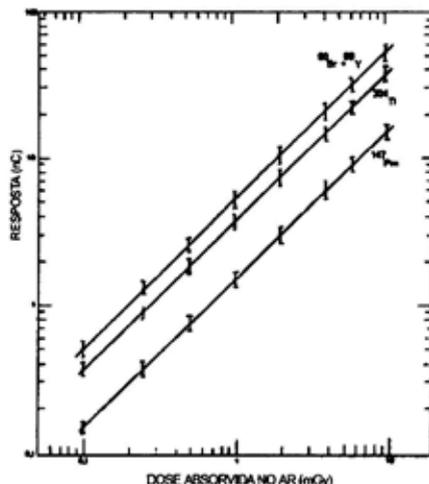


**Figura 5.** Curva de emissão TL do detector LiF em função do tempo (CAMEROM *et al.*, 1965).

### *Respostas dos Detectores em Função Da Dose*

#### Sulfato de cálcio

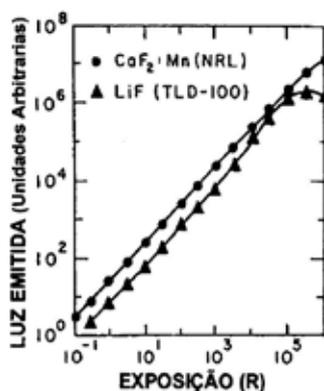
A resposta TL do detector  $\text{CaSO}_4$ : DY + TEFLON, em função da dose absorvida no ar, foi determinada, utilizando-se as fontes de radiação  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{204}\text{TI}$  e  $^{147}\text{Pm}$  (CAMPOS & LIMA, 1987). Utilizou-se uma dose entre 0,1 e 10 mGy. O resultado da linearidade da resposta, em função desse intervalo de dose, é mostrado na Figura 6.



**Figura 6.** Resposta TL das pastilhas de  $\text{CaSO}_4$ : Dy + teflon em função da dose absorvida para a Radiação beta das fontes de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{204}\text{TI}$  e  $^{147}\text{Pm}$  (CAMPOS & LIMA, 1987).

## Fluoreto de Lítio

A curva resposta de dose de um cristal TL ideal deve ser linear na faixa de exposição usual, intervalo entre 0-10 Gy. Alguns cristais não apresentam resposta linear devendo, portanto, ser calibrados no intervalo de dose de interesse. A curva resposta da exposição, para o TLD LiF (fabricado pela indústria Harschaw Chemical Co. com o nome comercial LiF-100), é mostrada na figura 7. Observa-se que a resposta do LiF, em relação à exposição, é linear para, até  $10^5$ R, aproximadamente 10 Gy. Além deste valor de dose, o LiF apresenta uma resposta supralinear que atinge o valor máximo em  $5 \times 10^5$  R, aproximadamente, e então decresce para valores superiores a  $5 \times 10^5$  R (CAMERON *et al.*, 1964).



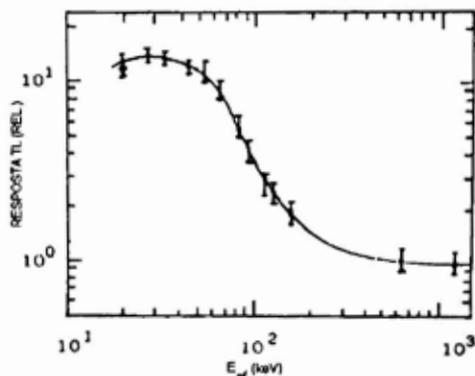
**Figura 7.** Resposta do detector LiF em função da dose (CAMERON *et al.*, 1964).

## Respostas dos Detectores em Função da Energia

### Sulfato de cálcio

A resposta TL dos detectores  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{DY} + \text{TEFLON}$  em função da energia foi obtida utilizando-se fontes de raios X com energias entre 20 e 155 KeV e uma fonte de radiação gama  $^{137}\text{Cs}$ , com energia de 0,662 MeV. A Figura 8 apresenta os resultados da resposta TL em função dessas energias utilizadas (CAMPOS & LIMA; 1987).

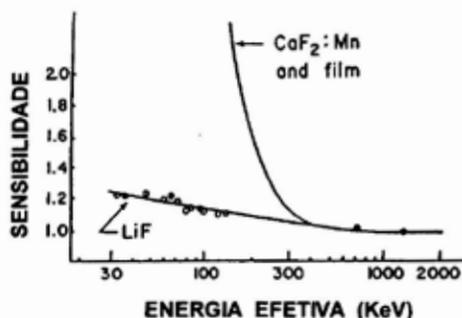
Observou-se que existe uma dependência da resposta TL com a energia para valores inferiores a 200 KeV. Isso pode ser atribuído ao alto valor do número atômico efetivo do  $\text{CaSO}_4$ . Nesse intervalo de energia, o tipo de interação da radiação, com a matéria predominante é o efeito fotoelétrico, que depende, fortemente, de Z, que confere uma maior absorção de energia pelo material.



**Figura 8.** Resposta TL das pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  em função da energia da radiação gama e X incidente (CAMPOS & LIMA, 1987).

#### Fluoreto de Lítio

A absorção fotoelétrica é, usualmente, o processo dominante na interação de fótons com energia abaixo de 100 KeV com a matéria. A probabilidade dessa interação aumenta para materiais constituídos de átomos com alto valor de número atômico. Conseqüentemente, para baixos valores de energia, os detectores construídos com materiais de número atômico elevado apresentam uma resposta TL superior em relação àqueles detectores constituídos de átomos com baixo número atômico. A figura 9 apresenta a resposta TL do LiF em função da energia (CAMERON *et al.*, 1964). O aumento na resposta TL do detector, para baixos valores de energia dos fótons é devido ao aumento da seção de choque fotoelétrica.



**Figura 9.** Resposta do detector LiF em função da energia (CAMERON *et al.*, 1964).

## Respostas dos Detectores em Função da Taxa de Dose

### Sulfato de cálcio

A dependência da resposta TL do Detector  $\text{CaSO}_4$ : DY + TEFLON em função da taxa de exposição à radiação gama, bem como com a taxa de exposição à radiação beta, foi investigada. Não foi observada qualquer dependência da resposta TL, para a incerteza de 2%, para taxas de exposição entre  $2,58 \times 10^{-6} \text{ C.Kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$  ( $10 \text{ mR min}^{-1}$ ) e  $5,28 \times 10^{-1} \text{ C.Kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$  ( $20,5 \text{ R min}^{-1}$ ), nem para taxas de dose absorvida de radiação beta entre  $2 \mu\text{Gys}^{-1}$  e  $130 \mu\text{Gys}^{-1}$  (CAMPOS & LIMA, 1987).

### Fluoreto de Lítio

Muitos detectores de radiação mostram uma mudança na resposta TL em função da variação da taxa de dose. A figura 10 apresenta a resposta TL em função da taxa de dose para três diferentes sistemas de detecção. Observa-se, pela figura, que a resposta do LiF independe da variação da taxa de dose. Não se observa dependência da resposta TL do detector LiF para taxas de dose, com valor superior a  $10^{10} \text{ rad/segundos}$  (CAMERON *et al.*, 1964).

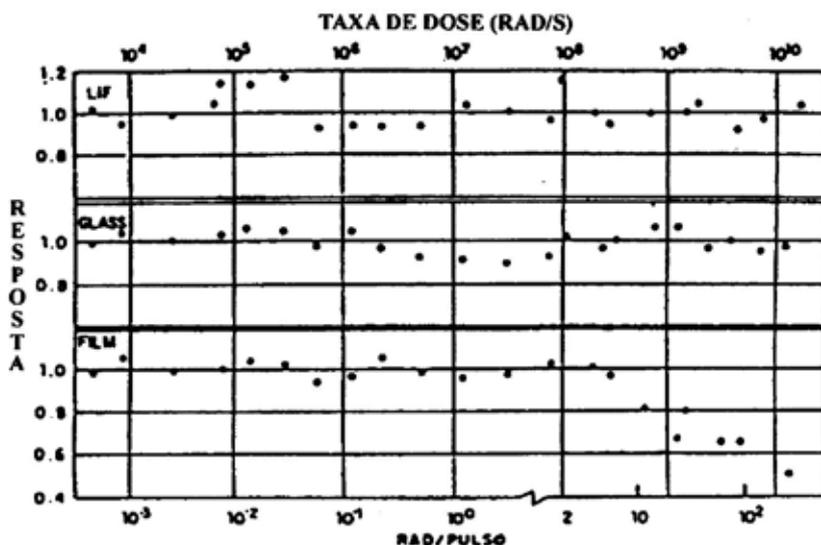
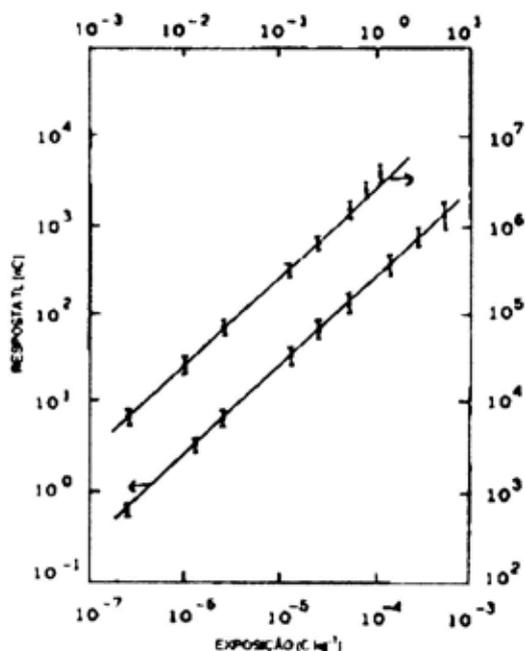


Figura 10. Resposta dos detectores LiF, filme e vidro em função da variação da taxa de dose (CAMERON *et al.*, 1964).

## Respostas dos Detectores em Função da Exposição

### Sulfato de Cálcio

A resposta TL do detector  $\text{CaSO}_4$ : DY + TEFLON, em função da exposição à radiação gama de  $^{60}\text{Co}$ , foi avaliada entre  $2,58 \times 10^{-7} \text{ C.kg}^{-1}$  (1 mR) e  $1,032 \text{ C.kg}^{-1}$  ( $4 \times 10^3 \text{ R}$ ), conforme a Figura 11 (CAMPOS & LIMA 1987). Verificou-se que a resposta TL torna-se supralinear para valores de exposição superiores a  $2,58 \times 10^{-7} \text{ C.Kg}^{-1}$  ( $10^3 \text{ R}$ ). Isto não impede o uso desse dosímetro nessa faixa de exposição.



**Figura 11.** Resposta TL das pastilhas de  $\text{CaSO}_4$ : Dy + Teflon em função da exposição à radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  (CAMPOS & LIMA; 1987).

## DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Baseado neste estudo, conclui-se que os detectores de  $\text{CaSO}_4$  e LiF são apropriados para utilização em procedimentos envolvendo a dosimetria das radiações ionizantes. A independência da resposta TL dos detectores LiF e  $\text{CaSO}_4$  em função da energia, da dose e da taxa de dose viabiliza o uso destes materiais na dosimetria pessoal.

Os procedimentos de proteção radiológica, aplicados na rotina, têm por objetivo minimizar as exposições no trabalhador e no meio ambiente decorrentes das práticas que utilizam a radiação ionizante. Assim, é importante a utilização de detectores de alta sensibilidade tanto na dosimetria pessoal quanto na dosimetria ambiental. Conclui-se neste estudo que as propriedades TL apresentadas pelos detectores  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{LiF}$ , viabilizam o uso desses na detecção da radiação em procedimentos que envolvam o levantamento radiométrico das radiações ionizantes X e gama.

O detector  $\text{CaSO}_4$  é fabricado pela indústria brasileira a custos inferiores em relação àqueles produzidos em outros países. Devido às propriedades mencionadas anteriormente e ao baixo custo, o detector de  $\text{CaSO}_4$  pode ser utilizado em laboratórios didáticos de dosimetria das radiações ionizantes, complementando assim, as práticas didáticas que envolvem o uso de outros tipos de detectores de radiação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMERON, J. R.; SUNTHARALINGAM, N.; KENNEY, G. N. **Thermoluminescent Dosimetry**. The University of Wisconsin Press, 1968.

CAMPOS, Leticia Lucente; LIMA, Mariana Ferreira. Preparation of  $\text{CaSO}_4$ : Dy TL single crystals. **J. Luminescence**, V. 28, p. 3, 1983.

CAMPOS, Leticia Lucente; LIMA, Mariana Ferreira. Thermoluminescent  $\text{CaSO}_4$ : Dy + teflon pellets for beta radiation detection. **Radiation Protection Dosimetry**, V. 60, p. 8, 1987.

JOHNS, H. E; CUNNINGHAM, J. R. 1961. **The Physics of Radiology**. Illions: Charles e Thomas Publisher.

MCKEEVER, S. W. S. **Thermoluminescence of Solids**. Cambridge University Press, p. 8, 1985.

MORAES, C. V. **Avaliação da Resposta de Dose de um Dosímetro individual Multi-Filtro para Radiações X e Gama**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto – Departamento de Física e Matemática, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1999.

SCHARMANN, A. "History", in **Applied Thermoluminescence Dosimetry Lectures of course held at Ispra**. Italy. Eds. M. Oberhofer, A. Scharmann, Bristol, England, Adom Hilger, 1981.