

Termoluminescência de materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação

(Thermoluminescence of materials and its application on radiation dosimetry)

Leticia L. Campos

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
C.P. 11049, Pinheiros, 05422-970, S. Paulo, S.P.*

Resumo

A dosimetria termoluminescente é uma ferramenta versátil para a avaliação da dose de radiação ionizante. A grande variedade de materiais cerâmicos e suas diferentes formas físicas permitem a determinação da qualidade da radiação em um intervalo de doses de μGy a kGy . Algumas das maiores vantagens dos dosímetros TL são as suas pequenas dimensões e o fato de não necessitarem de cabos ou equipamentos auxiliares durante a medida da dose. Como consequência disso, eles são adequados para um grande número de aplicações. Esse artigo tem como objetivo apresentar uma breve revisão dos princípios básicos, dos cálculos teóricos da TL, o modelo simplificado de termoluminescência, algumas aplicações na dosimetria das radiações ionizantes e os trabalhos desenvolvidos no IPEN nessa área.

Palavras-chave: termoluminescência, dosimetria, cerâmica.

Abstract

Thermoluminescence dosimetry is a versatile tool for the assessment of dose from ionizing radiation. The wide variety of TLD ceramic materials and their different physical forms allow the determination of different radiation qualities at dose levels from μGy to kGy . Major advantages of TL dosimeters are their small physical size and that no cables or auxiliary equipment is required during dose measurement. This makes them well suited for a wide range of applications. This article aims to present a short review of basic principles and a theoretical approach to thermoluminescence, the usual basic thermoluminescence model, some applications to dosimetry of ionizing radiations and the research developed at IPEN in this area.

Keywords: thermoluminescence, dosimetry, ceramics.

INTRODUÇÃO

Alguns materiais cerâmicos, quando aquecidos, após serem expostos à radiação ionizante, apresentam a propriedade de emitir luz. Este fenômeno é conhecido como radio-termoluminescência, ou, simplesmente, 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 [1-4]. A partir de então um grande número de cientistas, alguns famosos como Henry Becquerel, passaram a trabalhar com o fenômeno e em 1904 Marie Curie observou que as propriedades TL dos cristais podiam ser restauradas expondo-os à radiação do rádio [3, 4]. Entre 1930 e 1940 Urbach realizou trabalhos experimentais e teóricos com termoluminescência [1-4] e em 1945 Randall e Wilkins desenvolveram um primeiro modelo [1-5] que permitiu cálculos quantitativos da cinética termoluminescente. Posteriormente, foram desenvolvidos outros modelos, baseados no de Randall e Wilkins, na tentativa de ajustar melhor a teoria aos resultados experimentais, como, por exemplo, o modelo de dipolos [6] e o modelo de competição de armadilhas [7].

A aplicação da termoluminescência à dosimetria das radiações ionizantes data de 1940, quando o número de trabalhadores expostos a estas radiações aumentou e foram iniciados esforços no sentido de se desenvolver novos tipos de dosímetros [4]. Entre os pioneiros da dosimetria termoluminescente, os mais importantes foram, inquestionavelmente, Daniels, a partir de 1953, e Cameron, a partir de 1961, com suas pesquisas sobre o uso do fluoreto de lítio, LiF , como dosímetro termoluminescente [1-4].

TERMOLUMINESCÊNCIA

Qualitativamente, o fenômeno de termoluminescência é explicado com a utilização do modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos sólidos. Os materiais termoluminescentes são, em geral, policristais, iônicos, nos quais a banda de valência se encontra repleta de elétrons e a banda de condução vazia, ambas separadas por uma faixa larga de estados energéticos não permitidos aos elétrons e denominados, portanto, banda proibida.

Quando o policristal é exposto à radiação ionizante, são produzidos pares de elétrons e buracos, que migram através do mesmo, até se recombinarem ou serem capturados em estados meta-estáveis de energia, localizados na banda proibida, denominados ar-

madilhas. Aquecendo-se posteriormente a amostra, os elétrons, ou buracos, conforme o tipo de armadilha, absorvendo energia térmica, escapam das armadilhas, indo os elétrons para a banda de condução e os buracos para a de valência. Sendo as armadilhas de elétrons mais rasas, os elétrons escapam das mesmas antes que os buracos adquiram energia suficiente para se libertarem das suas armadilhas. Esses elétrons vão, então, para a banda de condução e podem movimentar-se livremente no cristal até a recombinação com os buracos armadilhados, eventualmente havendo a emissão de luz. No caso das armadilhas de buracos serem mais rasas, estes são liberados antes dos elétrons, seguem para a banda de valência e podem movimentar-se com liberdade pelo cristal até se recombinarem com os elétrons armadilhados, podendo, portanto, também, haver a emissão de luz. A liberação simultânea de elétrons e buracos é, ainda, possível, acontecendo a sua recombinação em centros de recombinação, ou centros de luminescência, quando, então, ocorre a emissão de luz. Um modelo simplificado do fenômeno [8] é mostrado na Fig. 1.

A quantidade de luz emitida é mensurável, aumentando a sua intensidade com a população de elétrons ou buracos armadilhados, conforme o tipo de armadilha. Ela cresce com a dose absorvida pelo cristal até atingir um máximo. Desta forma, a luz medida na emissão termoluminescente depende da população de elétrons, ou buracos, que, por sua vez, depende da dose absorvida pelo cristal. Em alguns materiais termoluminescentes a quantidade de luz emitida cresce, de início, linearmente com a dose absorvida de radiação, observando-se posteriormente um crescimento mais rápido do que o linear. A este último comportamento dá-se o nome de supralinearidade, que é representado na Fig. 2.

CURVA DE EMISSÃO TERMOLUMINESCENTE

A curva de emissão é a melhor característica de um material TL. Representa a luz emitida pelo policristal como função da temperatura ou do tempo de aquecimento e consiste, em geral, de vários picos (Fig. 3). Cada um deles está associado a uma determinada armadilha, que pode ser de elétrons ou buracos, de profundidade E e é caracterizado pela temperatura onde ocorre o máximo de emissão. A formação de um pico de emissão TL está relacionada com a probabilidade de escape do elétron, ou buraco, da armadilha correspondente, ou seja, quando a temperatura do material é menor que a do pico considerado, poucos portadores de carga (elétrons ou buracos) são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando um aumento da emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade decresce, em seguida, devido à redução de portadores de carga armadilhados.

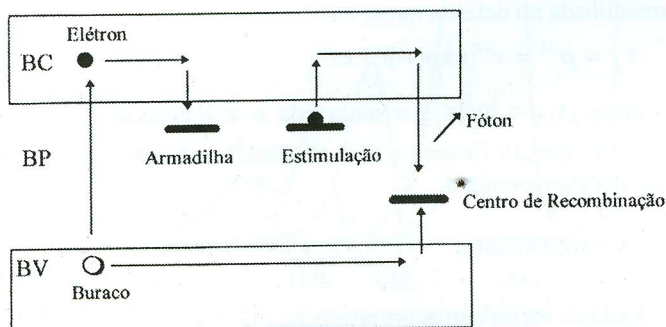


Figura 1: Diagrama esquemático de excitação e estimulação térmica em um fósforo TL [8].

trons ou buracos) são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando um aumento da emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade decresce, em seguida, devido à redução de portadores de carga 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 presença de mais de um pico na curva revela a existência de mais de um tipo de armadilha.

DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE

Muitos compostos cerâmicos possuem propriedades termoluminescentes. Entretanto, um material termoluminescente só pode ser utilizado como dosímetro se combinar algumas características específicas. Esta exigência limita bastante o número dos materiais TL passíveis de emprego na dosimetria das radiações. Como características específicas que um dosímetro termoluminescente deve apresentar podem ser citadas as seguintes [8, 9]:

- Alta concentração de elétrons ou buracos e alta eficiência de emissão de luz associada com o processo de recombinação;
- Estabilidade de armadilhamento dos elétrons ou buracos nas armadilhas à temperatura em que o material vai ser utilizado (decaimento térmico);
- Um espectro de emissão TL dentro da sensibilidade da válvula fotomultiplicadora para evitar interferência da emissão incandescente, infravermelha, do próprio equipamento de medida. O recomendado é um espectro com comprimentos de onda entre 300 e 500 nm;
- Temperatura do pico principal entre 180 e 250 °C;
- Uma curva de emissão simples, de preferência com um único pico, para maior facilidade de operação e interpretação da leitura.
- Fácil tratamento térmico de reutilização;
- Resistência a diversos fatores ambientais tais como luz, umi-

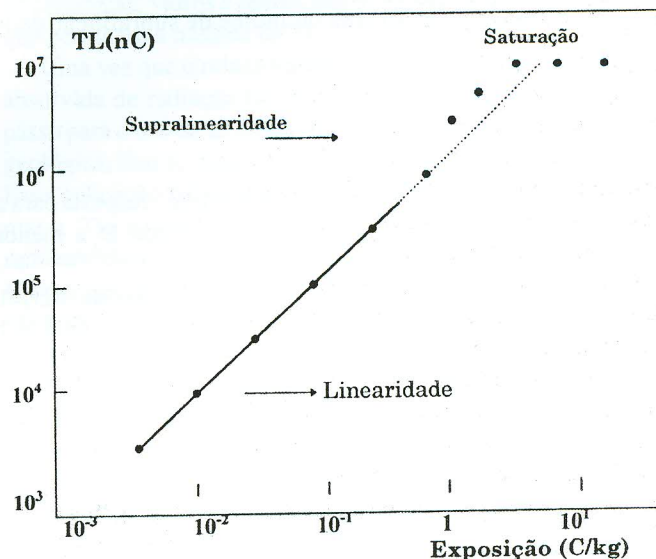


Figura 2: Curva típica de Resposta TL de um material em função da Exposição à radiação.

dade, solventes orgânicos, poluição e gases;

- Uma resposta que varie linearmente para um amplo intervalo de dose absorvida;

- Baixo custo e facilidade de obtenção.

Obviamente, é difícil encontrar todas estas características em um único material detetor. Os dosímetros TL comumente utilizados apresentam, quando muito, um compromisso razoável entre as características enumeradas.

A natureza nos fornece alguns materiais cerâmicos adequados para aplicação em termoluminescência, como BeO, Al₂O₃, CaF₂ (fluorita) mas, muitos materiais requerem a adição de impurezas para a criação de armadilhas e centros luminescentes, isso faz com que o número de materiais TL aumente, uma vez que podem ser utilizados diferentes tipos de dopantes. Os materiais mais populares produzidos em laboratório são LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,P,Cu, CaF₂:Mn, CaF₂:Dy, CaSO₄:Dy, CaSO₄:Mn, Li₂B₄O₇:Mn, Li₂B₄O₇:Cu e MgB₄O₇:Dy.

O uso de isótopos permite ampliar as aplicações dos materiais, como por exemplo, a utilização dos isótopos naturais do lítio, ⁶Li e ⁷Li, cujas secções de choque para nêutrons térmicos são 940 e 0,04 b, respectivamente. Essa grande diferença na secção de choque leva a uma diferença similar na sensibilidade do ⁶LiF e ⁷LiF como detetor para a dosimetria de nêutrons [10].

PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS

Além de preencher os requisitos acima, o material deve apresentar também algumas propriedades dosimétricas, que são fundamentais para a sua aplicação em dosimetria [8, 9, 11]:

resposta com a dose - F(D)

A resposta com a dose é definida como uma dependência funcional da intensidade da resposta TL com a dose absorvida. O ideal é que o material apresente uma resposta linear em uma ampla faixa de dose; todavia, na prática muitos materiais apresentam uma variedade de efeitos não lineares, como mostrados na Fig. 2. Para o uso prático define-se a função dose - resposta normalizada ou índice de supralinearidade como:

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

onde: f(D)=índice de supralinearidade; F(D)=dose - resposta para a dose D; F(D₁)=dose - resposta para a dose D₁, sendo D₁ 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 intervalo de linearidade; f(D) > 1 supralinearidade; f(D) < 1 sublinearidade

sensibilidade - S(D)

A sensibilidade de um material é definida como a intensidade do sinal TL emitido por unidade de dose absorvida. Na prática, define-se a sensibilidade relativa, isto é, compara-se o sinal TL do material com a resposta TL do LiF (TLD - 100), que é considerado com sensibilidade igual a 1.

$$S(D) = \frac{F(D)_{mat}}{F(D)_{TLD-100}}$$

onde: TLD100 = LiF:Mg,Ti e F(D)_{TLD-100} = 1

resposta com a energia - SE(E)

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 radiação de fótons a resposta com a energia é definida como:

$$S_E(E) = \frac{(\mu_{en} / \rho)_{mat}}{(\mu_{en} / \rho)_{REF}}$$

onde: μ_{en} / ρ = coeficiente de absorção de energia e massa e REF=material de referência, geralmente o ar; MAT=material TL utilizado.

Na prática a resposta TL para radiação de fótons é fornecida calculando-se a resposta relativa com a energia (RER), definida com relação à resposta do material à radiação gama do ⁶⁰Co (1,25 MeV), então:

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

tratamento térmico de reutilização

Uma das grandes vantagens e facilidade dos materiais TL é o fato de os mesmos poderem ser utilizados inúmeras vezes, sem perda de suas propriedades dosimétricas. Para isso, são indicados tratamentos térmicos, específicos para cada material, que restauram as suas propriedades originais, isto é, eliminam sinais residuais, permitindo a sua reutilização. Existem diferentes tipos de tratamentos: tratamento pré irradiação com ou sem resfriamento rápido; tratamento pós irradiação com ou sem resfriamento rápido; ou ainda a combinação de diferentes tratamentos térmicos.

decaimento térmico

Se o sinal TL de um material é instável ao longo do tempo, isto é, se decresce com o tempo decorrido após a irradiação, o sinal é dito ter decaído. Esse decaimento na amplitude do sinal (fading) pode ter várias causas, mas a mais importante é o decaimento térmico, isto é, em função da temperatura. Determina-se a constante de tempo para a liberação termicamente induzida da carga armadilhada no defeito, que é dada por:

$$\tau_f = p^{-1} = s^{-1} \exp(-E / kT)$$

onde: $\tau_{1/2} = \ln 2 \tau_f$ = meia vida e τ_f = constante de tempo

Essa equação fornece a taxa de decaimento do sinal TL em função da temperatura.

outras propriedades

Existem várias outras propriedades que devem ser avaliadas na escolha do material, entre elas a sensibilidade à luz, à umidade, a fatores ambientais, à poluição, a vapores químicos, etc. porém, todas fáceis de controlar, encapsulando ou selando os dosímetros

com material adequado.

Algumas características gerais dos fósforos TL mais usados são fornecidas na Tabela I [8, 9, 11], onde é feita uma comparação de suas sensibilidades.

SISTEMA DE DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE

Um sistema dosimétrico termoluminescente constitui-se dos dosímetros (detetores), do porta-dosímetro e dos sistemas de aquecimento e leitura. Os dosímetros termoluminescentes podem ser utilizados sob formas físicas variadas dependendo do tipo de medida a que se destinam. As formas mais utilizadas são:

- Material particulado;
- Material compactado: muitos materiais, após a compactação, já possuem resistência mecânica suficiente para serem manuseados, não necessitando, portanto, de tratamento térmico de sinterização, o que implica em redução de custos;
- Material prensado a quente: em alguns casos, por exemplo do LiF, o processo mais indicado é a prensagem a quente, na qual a cerâmica adquire resistência adequada.
- Material prensado em temperatura ambiente e posteriormente sinterizado: é aplicado, principalmente, nos casos em que é necessária a adição de um material agregante, por exemplo, o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + teflon, produzido no IPEN;
- Material em forma de pó encapsulado a vácuo em capilares de vidro.

A instrumentação necessária para se observar a termoluminescência emitida por estes materiais é, basicamente, muito simples. Constitui-se de um dispositivo para aquecer o dosímetro e uma válvula fotomultiplicadora para captar a luz por

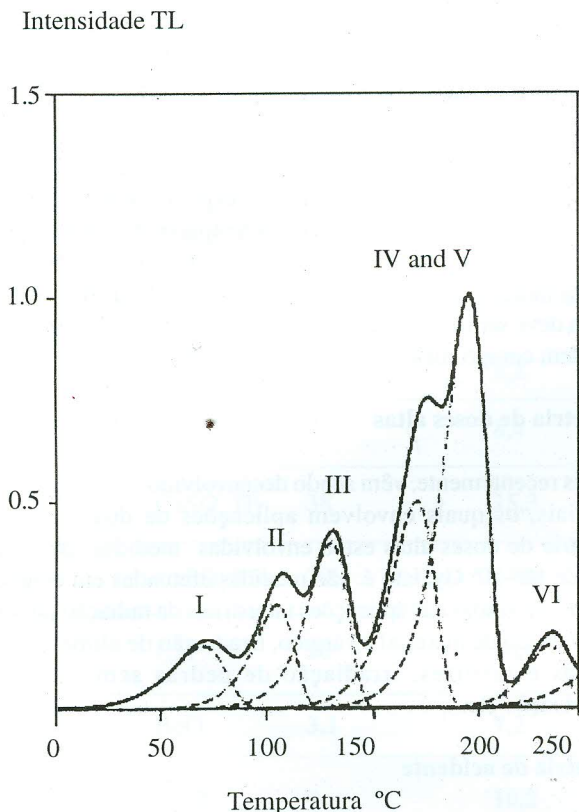


Figura 3: Curva de emissão TL típica do LiF(TLD100).

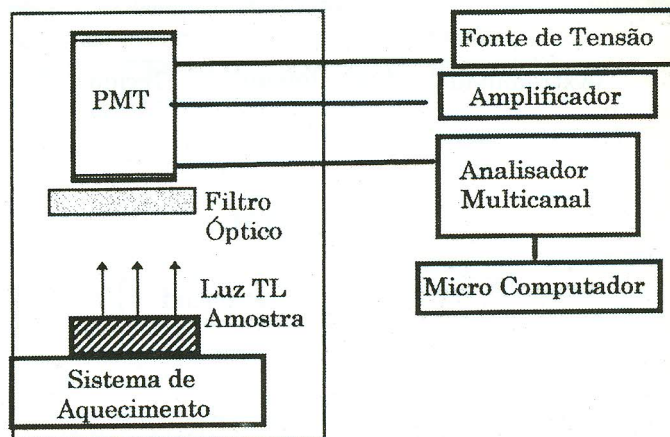


Figura 4: Esquema simplificado do sistema leitor termoluminescente.

ele emitida. A adoção de filtros permite a discriminação da influência de sinais espúrios e da emissão de luz infravermelha por parte dos elementos submetidos a temperaturas elevadas [8, 9, 12].

Dois métodos são, normalmente, utilizados no aquecimento de um dosímetro TL. O primeiro consiste em colocar o material sobre uma lâmina metálica e fazer o aquecimento através da passagem de uma corrente elétrica. No outro, a temperatura da amostra é aumentada submetendo-a a um fluxo de gás inerte aquecido. A maioria dos leitores TL comerciais utilizam o aquecimento em lâmina (Fig. 4).

APLICAÇÕES DA TERMOLUMINESCÊNCIA

Muita pesquisa foi, e ainda é realizada para o desenvolvimento de novos dosímetros TL e a ampliação das suas aplicações.

A aplicação mais estudada da termoluminescência é, sem dúvida, no que se refere ao seu uso na dosimetria das radiações (TLD), a qual se expande nas áreas de saúde, ciências biomédicas, proteção radiológica, controle, e datação geológica e arqueológica. Interessantes, mas ainda não suficientemente desenvolvidas, são as aplicações nas ciências forenses, na identificação de falsificação de cerâmicas, vidros e outros materiais que possuam componentes que permitam a medida da TL.

Uma vez que o relacionamento entre a intensidade TL e a dose absorvida de radiação foi estabelecido, foi somente um pequeno passo para o uso da termoluminescência como um meio de datação geológica, isto é, determinação da idade de amostras geológicas. Essa aplicação foi sugerida por Daniels, que partiu da premissa que a TL natural das rochas é diretamente proporcional à radioatividade do urânio, tório e potássio presentes no material. Mas, a aplicação da termoluminescência para a determinação da idade de materiais e peças somente teve início após a descoberta da termoluminescência natural de cerâmicas antigas, em 1960, por Kennedy & Knopff [8]. Essa observação levou ao desenvolvimento imediato da termoluminescência como um meio de datação arqueológica.

Os dosímetros TL têm sido aplicados na dosimetria das radiações de diferentes tipos e qualidades:

- Fótons de energia alta (raios X e gama);
- Fótons de energia baixa (raios X moles);
- Partículas carregadas de baixa transferência linear de energia - LET (partículas beta e prótons de energias altas);

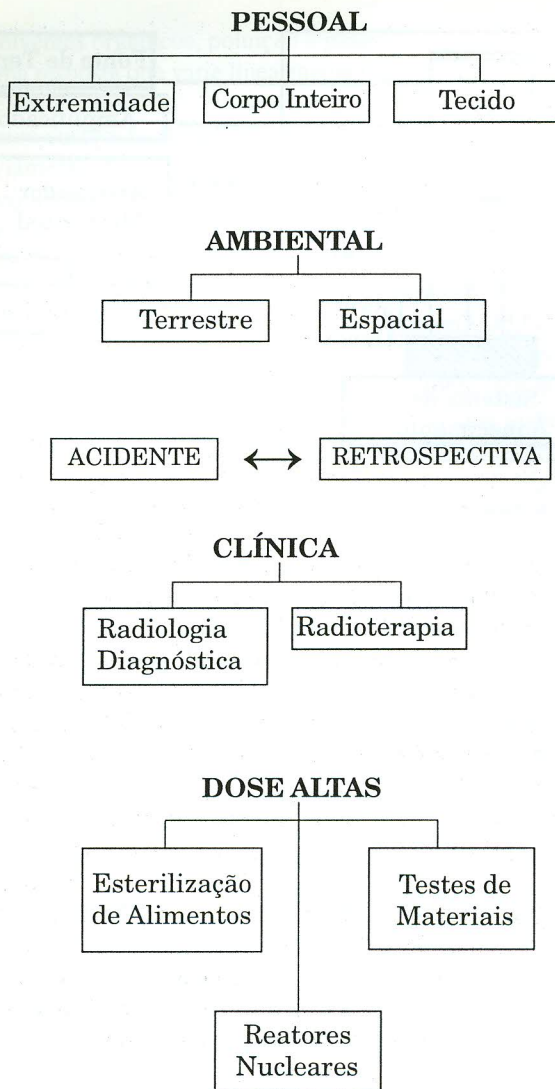


Figura 5: Aplicações da dosimetria termoluminescente [6].

- Partículas carregadas pesadas (partículas alfa, prótons de energia baixa e fragmentos de fissão);
- Nêutrons (rápidos e térmicos);
- Radiações não ionizantes (UV e Laser).

Muitas outras aplicações têm surgido nos últimos 40 anos, uma vez que a TL é uma técnica com imensa versatilidade. As principais aplicações atuais podem ser agrupadas como mostrado na Fig. 5 [8].

A faixa de doses típica coberta pelos dosímetros TL é de 10^{-6} a 10^3 Gy (Gray é a unidade da grandeza dosimétrica Dose Absorvida, que quantifica a energia depositada em um órgão ou material de interesse por unidade de massa. 1 Gy equivale a 1 J.kg⁻¹).

dosimetria pessoal

O objetivo primário da dosimetria pessoal é a monitoração da dose de radiação recebida pelo trabalhador durante exposição ocupacional de rotina. A faixa de dose de interesse é de 10^{-5} a 10^{-1} Sv, com uma incerteza no cálculo da dose de $\pm 10-20\%$.

Preferencialmente, o dosímetro deve ser tecido-equivalente, isto é, possuir número atômico efetivo próximo ao do tecido humano

mole ($\approx 7,6$). Os materiais TL mais utilizados na monitoração individual são LiF:Mg,Ti, LiF:Mg,Cu,P e Al_2O_3 , por possuírem número atômico efetivo próximo ao do tecido, e CaF_2 e $CaSO_4:Dy$, por sua alta sensibilidade. Os dosímetros devem ser acondicionados em porta-dosímetros plásticos, contendo filtros metálicos, que permitem a discriminação do tipo e da energia radiação incidente.

No decorrer dos últimos anos, os dosímetros TL vêm substituindo os filmes dosimétricos, principalmente na monitoração individual, uma vez que estes possuem algumas limitações tais como o desvanecimento da imagem, sensibilidade à umidade, reprodutibilidade pobre, intervalo limitado de dose e de sensibilidade, e necessitam de sala escura para a sua revelação.

dosimetria ambiental

A dosimetria ambiental se aplica nas cercanias de instalações radioativas e nucleares, de modo a monitorar a liberação de gases e efluentes radioativos dessas instalações. O seu objetivo é a monitoração da dose de radiação recebida pelo indivíduo do público, ou seja, pela população que reside ou trabalha próximo à instalação. Quando a dosimetria é efetuada dentro da instalação, é denominada dosimetria de área, e tem como objetivo a monitoração do local de trabalho.

Com o aumento das viagens espaciais, surgiu também a necessidade da monitoração da radiação a que os astronautas estão sujeitos, e, esse tipo de dosimetria é denominada dosimetria espacial.

Os níveis de radiação medidos são da ordem de 10^{-6} Gy, sendo que a radiação natural de fundo varia entre 10^{-2} e 10^{-3} Gy / ano. Os materiais cerâmicos mais utilizados são $CaSO_4:Dy$, $CaF_2:Mn$ e LiF:Mg,Cu,P, por apresentarem alta sensibilidade, com limites mínimos de detecção da ordem de μ Gy.

dosimetria clínica

A dosimetria clínica é empregada no controle das doses derivadas de práticas médicas, requer materiais tecido-equivalente de preferência, e de tamanho reduzido, para serem posicionados em fantasmas ou no corpo humano, antes de expor o paciente à radiação durante o diagnóstico (radiologia) ou a terapia (radioterapia) [8, 13]. As doses envolvidas vão desde mGy a 10^{-1} Gy em radiologia e até 10 Gy na radioterapia. A precisão na determinação da dose em radioterapia deve ser melhor que $\pm 3\%$, uma vez que erros superiores a 3% podem comprometer o sucesso do tratamento.

dosimetria de doses altas

Mais recentemente, vêm sendo desenvolvidos vários processos industriais, os quais envolvem aplicações de doses altas. Na dosimetria de doses altas estão envolvidas medidas de dose da ordem de 10^2-10^6 Gy, isto é, são medidas efetuadas em condições extremas, derivadas das aplicações industriais da radiação tais como a esterilização de material cirúrgico, irradiação de alimentos, cura de tintas e vernizes, irradiação de pedras semi preciosas, polimerização etc.

dosimetria de acidente

A necessidade da dosimetria de acidente e a retrospectiva surgiu após os acidentes de Chernobyl e Techa River na Rússia (0,1

Gy-10 Gy); Hiroshima, Nagasaki (>30 Gy); Nevada Test Site USA (<100 mGy) e outros [8]. Nesse tipo de dosimetria são utilizados materiais naturais disponíveis no local do acidente, para a determinação da dose no momento do acidente. Dentre os dosímetros naturais estão quartzo, feldspato e alumina, encontrados em tijolos, telhas, porcelanas e cerâmicas, e hidroxiapatita extraída de ossos e dentes, CaCO₃ encontrado em casca de ovos e conchas, açúcar, encontrado em qualquer residência, etc..

DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE

O princípio da TLD pode ser sumarizado na seguinte equação [10]:

$$I_{ir} = f I_{vi}$$

com I_{ir} =intensidade da radiação ionizante incidente no material TL; I_{vi} =intensidade da luz visível emitida pelo cristal TL; f =função complexa do material TL, da geometria do dosímetro, da história térmica e radioativa do material TLD, do tempo entre a irradiação e a leitura, da dose total, da taxa de dose, e da qualidade da radiação.

A dose absorvida D em qualquer meio de interesse é, então, dada por:

$$D = f_D \cdot I_{ir} = f_D \cdot f \cdot I_{vi} = f_D \cdot f \cdot f_R \cdot R$$

onde: R =leitura do equipamento de medida; f_D =fator de conversão da radiação detetada pelo dosímetro TL em dose no meio; f_R representa todos os fatores que influenciam na cadeia de leitura.

APLICAÇÕES NO IPEN

Nos últimos 30 anos o IPEN tem desenvolvido intensa pesquisa tanto no estudo do fenômeno da termoluminescência, como no desenvolvimento de modelos teóricos, sua aplicação no estudo de

defeitos em materiais, desenvolvimento de novos materiais e aplicações, gerando patentes, dissertações de mestrado, teses de doutorado, participações em congressos e publicação de trabalhos em periódicos nacionais e internacionais.

No campo de desenvolvimento de novos materiais cerâmicos, foram desenvolvidos e patenteados métodos de produção de CaSO₄:Dy [14, 15] e LiF:Mg,Ti [16]; foram também desenvolvidos outros materiais cerâmicos como CaSO₄:Tm [17]; Li₂B₄O₇:Tm [18]; Mg₂B₄O₇:Dy [19, 20]; LiF:Mg,Cu,P [21].

Grande ênfase foi dada ao desenvolvimento de modelos teóricos para interpretação da resposta TL de diversos materiais [22-26] e ao estudo de propriedades dosimétricas e caracterização de materiais [27, 28].

Foram desenvolvidos métodos de medida para aplicação da TL em datação [29], nas áreas de dosimetria da radiação gama e X [37, 42], de nêutrons [43-46]; da radiação beta [39, 41, 42, 47-50], da radiação X de energia baixa [55, 56], da radiação de elétrons [54], da radiação não-ionizante [55, 56], sendo também desenvolvidos novos porta-dosímetros, adequados para uso dos materiais desenvolvidos [42, 57].

Atualmente, o IPEN possui um Laboratório de Materiais Dosimétricos que pesquisa, desenvolve e produz, para venda, materiais dosimétricos. No ano de 1997, foram produzidos e vendidos aos Serviços de Monitoração Individual credenciados pela CNEN, 36.000 dosímetros de CaSO₄:Dy. Mantém, também, um Laboratório de Dosimetria Termoluminescente que presta serviço de dosimetria pessoal, ambiental e de área ao IPEN, e a outras instalações como Furnas, Poços de Caldas e outros locais de interesse. Estão em andamento projetos de pesquisa nas áreas de física médica, doses altas, dosimetria de elétrons de energias altas, monitoração ambiental na Antártida, desenvolvimento de um dosímetro de extremidade e outros.

Tabela I: Características gerais dos fósforos TL [6-8].

Fósforo TLD	Sensibilidade gama relativa	Número Atômico Efetivo	Dependência Energética 30 keV	Decaimento Térmico do Sinal TL	Decaimento Óptico
LiF:Mg,Ti	1	8,2	1,3	10%	não
MgB ₄ O ₇ :Dy	7	8,4	1,5	10%/2 meses	não
CaSO ₄ :Dy	38	15,3	11,5	3%	não
CaSO ₄ :Mn	70	15,0	11,5	60%/dia	—
CaF ₂ :Dy	16	16,0	15,6	12%	sim
BeO	3,1	7,2	0,87	5%	sim
Al ₂ O ₃	5	10,2	4,5	5%/2 sem.	sim

CONCLUSÃO

A termoluminescência é uma ferramenta versátil para a determinação da dose e outras aplicações. Este artigo procurou fornecer informações básicas, necessárias para o uso, com sucesso, da dosimetria TL, utilizando materiais cerâmicos.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Scharmann, "History", in Applied Thermoluminescence Dosimetry Lectures of a Course held at Ispra, Italy, 12-16 November 1972, Eds. M. Oberhofer, A. Scharmann, Bristol, England, Adam Hilger, 1981.
- [2] Y. S. Horowitz, "Introduction", in Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry, Ed. Y. S. Horowitz, Florida, USA, CRC Press, 1984.
- [3] S. W. S. McKeever, Thermoluminescence of Solids, Cambridge, England, Cambridge University Press, p.8, 1985.
- [4] R. K. Bull, Nucl. Tracks Radiat. Meas. 11 (1986) 105.
- [5] J. T. Randall, M. H. F. Wilkins, Proc. Royal Soc. Lond. A 184 (1945) 366.
- [6] R. M. Grant, J. R. Cameron, J. Appl. Phys. 37 (1966) 3791.
- [7] M. R. Mayhugh, R. W. Christy, N. M. Johnson, Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, Gatlinburg, USAEC Conf. 680920 (1968) p. 294.
- [8] S. W. S. McKeever, M. Moscovitch, P. D. Townsend, "Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses", Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, England 1995.
- [9] K. Mahesh, P. S. Weng, C. Furetta, Thermoluminescence in Solids and its Applications, Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, England 1989.
- [10] T. Kron, Thermoluminescence Dosimetry and its Applications in Medicine, Part 1: Physics, Materials and Equipment, Australasian Phys. & Eng. Sci. in Medicine 17, 4 (1994) 175-199.
- [11] D. Lapraz, P. Iacconi, "Dosimétrie par Thermoluminescence. Principes de Base", Radioprotection 25, 2 (1990) 117-133.
- [12] J. Barthe, G. Portal, "Technologie des Lecteurs de Dosimètres Thermoluminescents", Radioprotection 25, 2 (1990) 135-156
- [13] T. Kron, Thermoluminescence Dosimetry and its Applications in Medicine, Part 2, History and Applications, Australasian Phys. & Eng. Sci. in Medicine 18, 1 (1995) 1-25.
- [14] L. L. Campos, J. Lum. 28 (1983) 481.
- [15] L. L. Campos, P. H. Frutuoso, V. I. Souto, "Aperfeiçoamento do método de crescimento de monocristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ", Publ. IPEN, 265 (1989).
- [16] L. L. Campos, B. M. Rzycki, A. A. Suarez, Rad. Prot. Dosim. 11, 3 (1985) 189.
- [17] M. M. Ferreira, " $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e/ou Tm: Estudo de suas propriedades para aplicação em dosimetria", Dissertação de Mestrado, IEA, SP (1978).
- [18] B. M. Rzycki, "Desenvolvimento de um Dosímetro Termoluminescente de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Tm}$. Produção, Caracterização e Estudos Físicos" Tese de Doutorado, IPEN, SP (1982).
- [19] O. O. Fernandes Filho, L. L. Campos, "Obtenção de $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{TR}$ e/ou $\text{CaB}_4\text{O}_7:\text{TR}$ para fins dosimétricos", Publ. IPEN, 200 (1988).
- [20] L. L. Campos, O. O. Fernandes Filho, Rad. Prot. Dosim. 33 (1990) 111.
- [21] T. de M. da Silva, L. L. Campos, 11th Proc. Int. Conf. Solid State Dosimetry, Budapest, Hungary (July 10-14, 1995) p. d10.
- [22] S. P. Morato, "Modelo contínuo para armadilhas termoluminescentes", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1970).
- [23] W. C. Las, "Mecanismo proposto de termoluminescência induzida pela luz no fluoreto de cálcio natural", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1975).
- [24] R. Muccillo, "Contribuição ao estudo dos mecanismos responsáveis pela formação radiativa de centros de cor em cristais de KBr dopados com impurezas de terra alcalina: propriedades elétricas e óticas", Tese de Doutorado, Univ. S. Paulo, SP (1976).
- [25] W. C. Las, "Thermoluminescent mechanism in MgO exposed to ultraviolet radiation", Thesis, Univ. Washington, USA (1980).
- [26] W. C. Las, Rad. Prot. Dosim. 8, (1984) 45.
- [27] S. Watanabe, "Propriedades de termoluminescência do LiF:Mg ", Tese de Livre Docência, Univ. S. Paulo, SP (1969).
- [28] S. F. Deus, "Estudo comparativo de dosimetria fotográfica, termoluminescente e radiofotoluminescente", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1971).
- [29] L. V. E. Caldas, "Termoluminescência radio e fotoestimulada do LiF:Mg ", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1973).
- [30] S. P. Kathuria, L. L. Campos, A. M. P. L. Gordon, "Dosimetric characteristics and radiation monitoring with $\text{CaSO}_4(\text{Dy}) + \text{NaCl}$ Pellets", Publ. IEA, 32 (1980).
- [31] S. P. Kathuria, A. M. P. L. Gordon, L. L. Campos, "Some TL characteristics of $\text{CaSO}_4(\text{Dy}):\text{NaCl}$ pellets", I.E.A. Inf. 11 (1980).
- [32] S. P. Morato, L. L. Campos, V. N. Bapat, et al., Nucl. Instr. Meth. 200 (1982) 449.
- [33] L. L. Campos, M. F. Lima, Rad. Prot. Dosim. 14, 4 (1986) 333.
- [34] L. L. Campos, Appl. Rad. and Isotopes 39, 3 (1988) 233.
- [35] L. A. R. da Rosa, "Termoluminescência do LiF:Mg,Ti entre 66 e 315 K", Tese de Doutorado, Univ. S. Paulo, SP (1989).
- [36] M. Miyamoto, "Estudo e aplicação da dosimetria termoluminescente na datação", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1973).
- [37] L. L. Campos, L. A. R. da Rosa, Rad. Prot. Dosim. 25, 1 (1988) 55.
- [38] L. L. Campos, L. A. R. da Rosa, "Determinação simultânea das doses absorvidas devido às radiações beta e gama com CaSO_4 produzido no IPEN", Publ. IPEN, 143 (1988).
- [39] M. R. Tridenti, L. L. Campos, Proc. I ENAN, Maio 28-31, 1991, p. 235, Recife, Pernambuco.
- [40] L. L. Campos, Rad. Prot. Dosim. 48, 2 (1993) 205.
- [41] A. J. Potiens Jr, L. L. Campos, Phys. Med. Biol. 39a (1994) 802.
- [42] T. F. L. Daltro, "Desenvolvimento de um sistema dosimétrico para monitoração individual em campos mistos beta/gama", Tese de Doutorado, IPEN, SP (1996).
- [43] R. Muccillo, "Dosimetria termoluminescente de nêutrons com CaF_2 natural", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1970).
- [44] B. M. Rzycki, "Dosimetria de nêutrons rápidos", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1976).
- [45] A. M. L. Gordon, "Dosimetria termoluminescente de nêutrons térmicos com $\text{CaF}_2 + \text{KBr}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{KBr}$ ", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1978).
- [46] E. N. Santos, "Estudo de emissões termoluminescentes de fósforos dosimétricos: detecção de nêutrons intermediários", Dissertação de Mestrado, Univ. S. Paulo, SP (1978).
- [47] L. V. E. Caldas, "Alguns métodos de calibração e dosimetria

- da radiação beta”, Tese de Doutorado, Univ. S. Paulo, SP (1980).
- [48] L. L. Campos, M. F. Lima, Rad. Prot. Dosim. 18, 2 (1987) 95.
- [49] L. L. Campos, M. F. Lima, "Pastilhas dosimétricas de CaSO_4 : Dy + teflon para detecção da radiação beta, X e gama", Publ. IPEN, 120 (1987).
- [50] P. W. Fajardo, L. L. Campos, L. A. R. da Rosa, "Beta and gamma individual monitoring at the ciclotron of IEN", Publ. IPEN, 364 (1992).
- [51] L. L. Campos, Appl. Rad. and Isotopes 39, 2 (1988) 173.
- [52] L. L. Campos, L. V. E. Caldas, "Determinação de taxas de exposição de televisores à cores", Publ. IPEN, 134 (1988).
- [53] L. L. Campos, C. N. Souza, Proc. Fifth Latin Am. Conf. on Med. Phys., Oct. 7-12, 1990, Rib. Preto, SP, Brasil.
- [54] M. Toivonen, H. Jarvinen, L. L. Campos, W. C. Las, Rad. Prot. Dosim. 34 (1990) 249.
- [55] M. S. Nogueira, L. L. Campos, Phys. Med. Biol. 39a (1994) 384.
- [56] T. A. Silva, L. A. R. da Rosa, L. L. Campos, Rad. Prot. Dosim. 58, 1 (1995) 17.
- [57] A. J. Potiens Jr, L. L. Campos, Rad. Prot. Dosim. 66, (1996) 95. (Rec.05/98, Ac. 08/98)
(Publicação financiada pela FAPESP)