

**Max da Silva Ferreira**

**FONTES DE INCERTEZA EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL PARA  
AS TÉCNICAS DE DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA, TL E OSL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Prof. Everton Rodrigues da  
Silva  
IRD/CNEN

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2014

539.77

F383f

Ferreira, Max da Silva

Fontes de incerteza em monitoração individual para as técnicas de dosimetria fotográfica, TL e OSL / Max da Silva Ferreira – Rio de Janeiro: IRD, 2014.

IX, 40 f.: 3 il.; 2 tab.; 29cm.

Orientador: Everton Rodrigues da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato-Sensu) em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) - Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2014.

Referências bibliográficas: f. 30-40

1. Monitoração individual. 2. Fontes de incerteza da medição. 3. Técnicas dosimétricas. I. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. II. Título.

**Max da Silva Ferreira**

**FONTES DE INCERTEZA EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL PARA  
AS TÉCNICAS DE DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA, TL E OSL**

Rio de Janeiro, 29 de Setembro de 2014.

---

*Prof. Everton Rodrigues da Silva – IRD/CNEN*

---

*Prof. Dra. Cláudia Lúcia P. Maurício – IRD/CNEN*

---

*Prof. Dr. Marcelo Marques Martins – IRD/CNEN*

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação do Prof. Everton Rodrigues da Silva.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sobre tudo que tem feito em minha vida.

A toda a minha família e parentela que estiveram ao meu lado, confiando, acreditando, sendo meu alicerce para que eu pudesse concluir o curso e desenvolver este trabalho. Em especial, aos meus pais, Carlos Magno Ferreira e Marly Inêz da Silva Ferreira, pelo esforço, zelo, carinho e amor presente em toda a minha vida.

Ao Prof. Everton Rodrigues, pela orientação segura durante todo o processo de elaboração deste trabalho, pelo conhecimento transmitido, pela atenção, paciência, apoio, incentivo, leitura e discussão deste trabalho.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear (IRD/CNEN), pela infraestrutura, pela oportunidade de realizar este curso e absorver conhecimentos oferecidos pelo seu corpo docente.

Ao diretor Dr. Aucyone Augusto da Silva e ao coordenador do curso Dr. Almir Faria Clain pelas ajudas, críticas e conselhos que fortaleceram a formação de profissionais competentes e na complementação de importantes ideais como cidadãos.

Ao Laboratório de Dosimetria Termoluminescente (LDT) e o Laboratório de Dosimetria Fotográfica (LDF) do IRD que disponibilizaram seus espaços para a realização desta pesquisa.

Ao corpo docente da pós-graduação, pelo profissionalismo, cordialidade, confiança e respeito em todos os momentos.

A todos os colegas de classe, professores, pesquisadores e funcionários do Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Aos alunos do Curso de Pós-Graduação Lato-Sensu 2014, pela companhia harmoniosa e vibrante, durante todos os meses deste curso. Obrigado à Angela Cristina Fortes Leal Borges, Antonio Pires Filho, Cleunício Gomes Dias, Felipe Luz de Oliveira, Gisele da Silva Cid, Janayna Dias Motta, Ricardo Pedro Mussica e à Viliene da Silva Pinto.

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar a influência das fontes de incertezas associadas às técnicas de dosimetria fotográfica, Termoluminescente (TL) e Luminescência Ópticamente Estimulada (OSL), considerando a avaliação de doses ocupacionais de corpo inteiro para exposição a fótons. Isso permite um maior conhecimento sobre cada etapa do processo e de como cada uma das fontes de incerteza pode influenciar o resultado final, contribuindo para a sua melhor interpretação. Para identificação das fontes de incertezas, foi realizada uma revisão bibliográfica em literaturas específicas que abordam aspectos procedimentais de cada técnica e as incertezas associadas a elas. Posteriormente, foram realizadas visitas técnicas a Serviços de Monitoração Individual para auxiliar nessa identificação. As fontes de incerteza foram categorizadas e as suas contribuições expressas em modo qualitativo. A análise das fontes de incerteza que mais interferem no resultado da medição pode colaborar para o entendimento sobre cada técnica, revelando as vantagens e desvantagens de cada uma. Para as três técnicas estudadas o fator de calibração do sistema revela-se como uma fonte de incerteza importante, logo o processo de calibração e o algoritmo para cálculo de dose utilizado são pontos chave para a obtenção de resultados mais confiáveis. Também é essencial observar os critérios de desempenho do monitor, como a sua dependência energética e angular.

Palavras chaves: dosimetria fotográfica, TLD, OSL, fontes de incertezas, monitoração individual.

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze the influence of the sources of uncertainties associated with photographic dosimetry techniques, TL and OSL, considering the evaluation of occupational doses of whole-body exposure to photons. This allows a better understanding of each step of the process and how each source of uncertainty can influence the result, contributing to its better interpretation. To identify the sources of uncertainty it was conducted a bibliographic review in specific documents that deal to procedural aspects of each technique and the uncertainties associated to them. Subsequently, technical visits to Individual Monitoring Services were conducted to assist in this identification. The sources of uncertainty were categorized and their contributions expressed in qualitative way. The analysis of the sources of uncertainty that most affect the measuring result can cooperate for the understanding of each technique, revealing the advantages and disadvantages of each one. For the three techniques studied the calibration factor of the system reveals itself as an important source of uncertainty, so the calibration process and the algorithm used for dose calculation are key points to obtain more reliable results. It is also essential to observe the monitor performance criteria, as its energy and angular dependence.

Key words: photographic dosimetry, TLD, OSL, sources of uncertainty, individual monitoring.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	1
<b>2 TÉCNICAS DE DOSIMETRIA DE FÓTONS UTILIZADAS EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL PARA CORPO INTEIRO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1 Filme dosimétrico.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1.1 Processamento do filme.....</b>	<b>5</b>
A) <i>Revelação.....</i>	5
B) <i>Interrupção.....</i>	5
C) <i>Fixação.....</i>	5
D) <i>Lavagem e secagem.....</i>	5
<b>2.1.1.2 Procedimentos básicos para dosimetria fotográfica.....</b>	<b>6</b>
A) <i>Processo de calibração.....</i>	6
B) <i>Leitura do filme.....</i>	6
<b>2.1.1.3 Homogeneidade do lote de filmes dosimétricos.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1.4 Linearidade da resposta do filme dosimétrico.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1.5 Dependência energética.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.1.6 Dependência angular.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.7 Estabilidade.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.8 Desvanecimento.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1.9 Precisão, exatidão e sensibilidade de um sistema de dosimetria fotográfica.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1 Termoluminescência.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2 Dosimetria Termoluminescente.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2.1 Procedimentos básicos para dosimetria TL.....</b>	<b>12</b>

A)	<i>Tratamento térmico Pré-irradiação.....</i>	<i>12</i>
B)	<i>Calibração.....</i>	<i>13</i>
C)	<i>Leitura do TLD.....</i>	<i>13</i>
D)	<i>Tratamento térmico Pós-irradiação.....</i>	<i>13</i>
2.2.2.2	<i>Homogeneidade do lote.....</i>	<i>13</i>
2.2.2.3	<i>Reprodutibilidade.....</i>	<i>13</i>
2.2.2.4	<i>Linearidade.....</i>	<i>14</i>
2.2.2.5	<i>Dependência energética.....</i>	<i>14</i>
2.2.2.6	<i>Dependência angular.....</i>	<i>14</i>
2.2.2.7	<i>Estabilidade.....</i>	<i>14</i>
2.2.2.8	<i>Sensibilidade à luz.....</i>	<i>15</i>
2.2.2.9	<i>Sinal residual.....</i>	<i>15</i>
2.2.2.10	<i>Precisão, exatidão e sensibilidade de um sistema de dosimetria TL.....</i>	<i>15</i>
2.2.2.11	<i>Curva de emissão.....</i>	<i>16</i>
2.3	<b>DOSÍMETRO OPTICAMENTE ESTIMULADO.....</b>	<b>16</b>
2.3.1	<b>Luminescência opticamente estimulada.....</b>	<b>17</b>
2.3.1.1	<i>Procedimentos básicos para dosimetria OSL.....</i>	<i>18</i>
A)	<i>Calibração.....</i>	<i>18</i>
B)	<i>Leitor.....</i>	<i>18</i>
2.3.1.2	<i>Homogeneidade do lote.....</i>	<i>19</i>
2.3.1.3	<i>Reprodutibilidade.....</i>	<i>19</i>
2.3.1.4	<i>Linearidade.....</i>	<i>20</i>
2.3.1.5	<i>Dependência energética.....</i>	<i>20</i>
2.3.1.6	<i>Dependência angular.....</i>	<i>20</i>
2.3.1.7	<i>Instabilidade do sinal OSL.....</i>	<i>20</i>
2.3.1.8	<i>Desvanecimento do sinal OSL.....</i>	<i>20</i>

<b>3 INCERTEZA EM DOSIMETRIA DE RADIAÇÕES IONIZANTES.....</b>	<b>21</b>
3.1 INCERTEZA.....	21
3.1.1 Avaliação da incerteza.....	21
3.1.1.1 Incerteza padrão Combinada ( $u_c$ ).....	22
3.1.1.2 Incerteza Expandida ( $U$ ).....	22
3.1.2 Incerteza na dosimetria.....	23
3.1.2.1 Metodologia para o cálculo da incerteza.....	24
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>26</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>30</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Uma das formas usadas para controlar a segurança radiológica de um indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) à radiação ionizante, durante a realização das suas atividades, é a monitoração individual externa do trabalhador. Esta tem o objetivo de fornecer informações necessárias para avaliar a dose efetiva e/ou equivalente recebida pelo IOE, considerando as exposições rotineiras e acidentais (ALONSO, 2005; SANTORO et al., 2013). Na monitoração individual são usados dosímetros, compostos essencialmente por detectores de radiação utilizados na medição da dose recebida pelo IOE durante a realização das suas atividades. Para isso, atualmente três técnicas são muito utilizadas em fótons para corpo inteiro: dosimetria fotográfica, dosimetria termoluminescente (TL) e dosimetria por luminescência opticamente estimulada (OSL). As três técnicas possuem características e vantagens que permitem a sua utilização na prestação de serviço em monitoração individual oferecidas por laboratórios especializados, atendendo requisitos legais e de qualidade, principalmente a exatidão, precisão e reprodutibilidade das medidas (DALTRO, 1994; BAZANI, 2008).

O resultado de uma medida é apenas uma estimativa do valor da grandeza dosimétrica mensurada, estando completo apenas quando acompanhado pelo valor da incerteza (NIST, 1994). Mesmo com a evolução das técnicas dosimétricas, existem fontes de incertezas difíceis de eliminar ou de ter sua contribuição reduzida, pois são inerentes ao processo de avaliação, estando intrinsecamente ligadas aos procedimentos adotados (CAMPOS, 1998; FUKUMORI, 2012). Mesmo que a incerteza da medida seja uma estimativa, a identificação das fontes de incertezas, com as suas respectivas influências, é essencial para a qualidade dos resultados relatados por um laboratório (BERMANN, 1991; AKSELROD et al., 1998; BATISTA, 2011).

Apesar das três técnicas utilizadas em monitoração individual supracitadas possuírem algumas etapas similares no processo de avaliação das doses, cada uma apresenta peculiaridades que acarretam em fontes e valores de incertezas distintos. Assim, este trabalho realiza um estudo para identificar as fontes de incertezas associadas a cada uma das três técnicas, analisando quais são as mais relevantes e a contribuição dessas para a incerteza da medida relatada por um laboratório de dosimetria.

A análise sobre as fontes de incertezas apresentada neste trabalho foi fundamentada em uma revisão de literatura na área de monitoração individual e no acompanhamento dos

procedimentos realizados pelos laboratórios do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) que prestam serviço de monitoração individual. Como no Brasil, ainda não existe laboratório prestando serviço de dosimetria utilizando a técnica OSL, a identificação das fontes de incertezas para essa técnica foi baseada na literatura e na experiência com as outras duas técnicas.

Neste trabalho, as fontes de incertezas estudadas são aquelas relacionadas principalmente às etapas da monitoração individual realizadas nos laboratórios de dosimetria. Devido a esta restrição, é importante ressaltar que, se consideradas as incertezas relacionadas ao uso do monitor, o número de fontes de incerteza e sua contribuição à avaliação da dose devem ser significativamente maiores do que foi apontado neste estudo.

Para a identificação das fontes de incerteza associadas a cada técnica, faz-se necessário o entendimento não só dos fundamentos teóricos, mas também sobre os aspectos procedimentais associados a elas. Este embasamento é apresentado no capítulo 2. A avaliação das incertezas em dosimetria está fundamentada no capítulo 3. No capítulo 4 é apresentada a estratégia metodológica adotada neste trabalho. Finalmente, no capítulo 5, como resultado desse estudo, as fontes de incerteza associadas a cada técnica são descritas, com discussão sobre aquelas mais relevantes. O capítulo 6 apresenta as conclusões gerais desse trabalho.

## **2 TÉCNICAS DE DOSIMETRIA DE FÓTONS UTILIZADAS EM MONITORAÇÃO INDIVIDUAL PARA CORPO INTEIRO**

### **2.1 DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA**

Após o pioneiro uso dos filmes fotográficos na descoberta da radioatividade natural em 1896 por Henri Becquerel, naturalmente esses se tornaram os primeiros detectores de radiação ionizante. Nesta descoberta, foi medida a resposta do filme irradiado, e as características do enegrecimento presente no filme foram analisadas visualmente. Ao seguir dos anos, a dosimetria foi explorada e evoluída, aparecendo novas técnicas de avaliação da radiação em ambiente ocupacional (WANG, 2005; TAUHATA et al., 2013).

O avanço das técnicas empregadas na dosimetria fotográfica tornou as medidas confiáveis, possibilitando a sua utilização em monitoração individual de trabalhadores. O dosímetro fotográfico é bem aceito na dosimetria ocupacional pela sua facilidade no manuseio e a sua característica de conservar o registro da dose no próprio detector por um longo período de tempo (ALONSO, 2005; PAI et al., 2007).

O dosímetro fotográfico pode ser considerado historicamente como a primeira escolha para monitoração individual. Mesmo com o desenvolvimento de outros sistemas dosimétricos, o detector fotográfico ainda oferece algumas vantagens importantes: duradouro registro da informação no detector; custo relativamente barato; obtenção de informações sobre as características da irradiação (SANCHES, 2001; DE OLIVEIRA; DE AZEVEDO; CARVALHO, 2002; SANTORO et al., 2013).

#### **2.1.1 Filme dosimétrico**

São usados dois tipos de detectores (filmes), um mais sensível, usado para baixas doses e outro menos sensível, para altas doses. Estes filmes são colocados em um envelope à prova de luz, que é posto em um porta-filme feito de plástico e com algumas áreas sensíveis cobertas por filtros metálicos (cobre e chumbo), conforme apresentado na figura 1. Esses filtros são usados para indicar se o dosímetro fotográfico foi exposto a

diferentes energias e melhorar a sensibilidade do filme para energias mais altas (SANTORO, 2007; SANTORO et al., 2013; TAUHATA et al., 2013). O filme dosimétrico tem dimensão de alguns centímetros quadrados (IZEWSKA; RAJAN, 2007; TAUHATA et al., 2013).

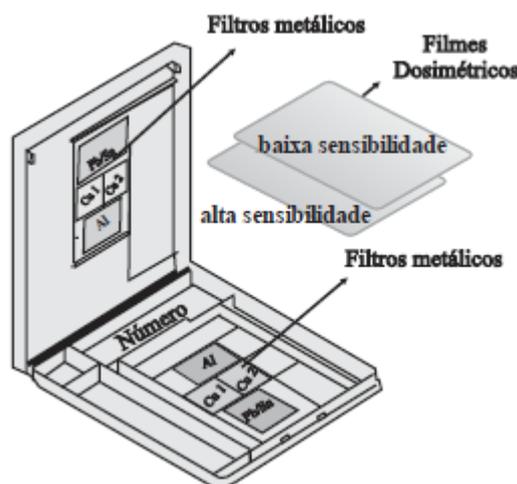


Figura 1 - Um dos modelos de monitores individuais indicando a posição dos detectores e dos filtros metálicos no porta-filme (TAUHATA et al., 2013).

Os filmes possuem uma emulsão gelatinosa contendo grãos de brometo de prata ( $\text{Ag}^+\text{Br}^-$ ) com aproximadamente  $10^{10}$  átomos de  $\text{Ag}^+$  cada. A emulsão é produzida de forma a permanecer firme nas duas faces de uma película de material plástico transparente, flexível e resistente. Toda esta estrutura é protegida por uma camada de gelatina pura que tem a finalidade de proteger a emulsão de agentes externos (DALTRO, 1994; TAUHATA et al., 2013).

A ionização dos grãos de  $\text{Ag}^+\text{Br}^-$ , como resultado da interação da radiação ionizante, sensibiliza a emulsão, transformando a  $\text{Ag}^+$  em prata metálica ( $\text{Ag}^0$ ). O conjunto desta  $\text{Ag}^0$  forma a chamada imagem latente, que é a imagem que está no detector, porém ainda não é visível (BECKER, 1966; DUDLEY, 1966; SULTAN, 1970; IZEWSKA; RAJAN, 2007; TAUHATA et al., 2013).

### ***2.1.1.1 Processamento do filme***

O processo químico ao quais os detectores são submetidos após a exposição à radiação ionizante pode ser dividido em cinco fases: revelação, interrupção, fixação, lavagem e secagem (CUNHA; LEÃO, 1975; AGFA GEVAERT, 1978).

#### ***A) Revelação***

O revelador é uma solução química que converte a imagem latente em uma imagem visível composta pela acumulação de mais partículas de  $\text{Ag}^\circ$ . A substância química reveladora reduz os íons  $\text{Ag}^+$  transformando em átomos de  $\text{Ag}^\circ$ , por ações dos seguintes agentes:

- agente revelador, que reduz os grãos de  $\text{Ag}^+$  em  $\text{Ag}^\circ$ ;
- agente acelerador, responsável por uma reação alcalina que acelera a revelação;
- agente preservador, que previne a oxidação da solução devido ao contato com o ar e impede a formação dos produtos de oxidação;
- agente controlador, que age nos grãos de  $\text{Ag}^+$  que não foram expostos adequadamente. Geralmente a ação é sobre uma pequena fração do filme em que surge uma região com baixo nível de enegrecimento durante o processo. Esta região de baixo enegrecimento é chamada de névoa (DALTRO, 1994; PAI et al., 2007).

#### ***B) Interrupção***

Após a revelação, o detector fotográfico é colocado em uma substância para terminar a fase de revelação, que ainda está em ação pela considerável quantidade de revelador retida na camada gelatinosa (PAI et al., 2007).

#### ***C) Fixação***

O fixador prossegue na eliminação da  $\text{Ag}^+$  e endurece a camada gelatinosa, fixando-a, tornando o detector resistente para lavar e secar (PAI et al., 2007; SANTORO, 2007).

#### ***D) Lavagem e secagem***

A lavagem e a secagem são feitas em local apropriado, temperatura controlada e livre de poluição, para que remova substâncias químicas sem adicionar outras. Esta etapa é necessária para que haja apenas a prata revelada na emulsão, de forma que nem a

luminosidade e nem os agentes químicos interferiram na informação revelada (SANTORO, 2007).

### 2.1.1.2 Procedimentos básicos para dosimetria fotográfica

#### A) Processo de calibração

Este processo deve ser bem controlado e utiliza filmes de calibração. É realizada para a obtenção de uma referência para um determinado lote. O filme é irradiado com uma dose conhecida nas mesmas condições utilizadas para a determinação da curva de calibração padrão. A avaliação das doses deve dar a resposta dos dosímetros na mesma grandeza da calibração (MOTA et al., 1990; IZEWSKA; RAJAN, 2007).

#### B) Leitura do filme

Quando um filme é exposto, os grãos de prata enegrecem o detector de modo proporcional à quantidade de radiação que absorveu. O grau de enegrecimento produzido em um filme exposto, revelado e fixado, pode ser medido pela densidade óptica do detector. A Densidade Óptica (D.O) é definida como o logaritmo da opacidade:

$$D. O. = \text{Log } I_0/I \text{ (Equação 1),}$$

em que  $I_0$  é a intensidade de luz do densitômetro que incide sobre o filme e  $I$  é a intensidade da mesma luz que consegue atravessar o detector, conforme representado na figura 2 (SICARDY, 1985; SANCHES, 2001; SALLES, 2004).

Este valor é aproximadamente proporcional ao número de grãos revelados por unidade de área do filme (BERMANN, 1991; IZEWSKA; RAJAN, 2007).

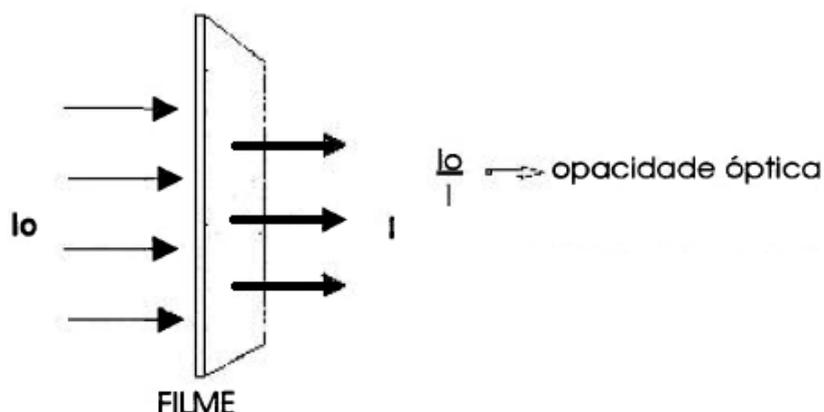


Figura 2 – Luz incidindo sobre o filme dosimétrico para leitura da sua densidade óptica (DALTRO, 1994).

O densitômetro é um aparelho constituído basicamente por um emissor de luz, um colimador e um detector de luz (fotodiodo), responsável pela determinação da D.O. Quando o fotodiodo detecta a luz colimada após atravessar o filme, a razão entre a intensidade da luz de entrada e de saída é calculada, e conseqüentemente obtém-se a D.O., que por sua vez é proporcional a dose absorvida pelo dosímetro (SANCHES, 2001; PAI et al., 2007). É importante ressaltar que a densidade óptica do filme, para uma determinada exposição, varia de acordo com a energia da radiação (WOHNI, STRANDEN, 1985).

#### ***2.1.1.3 Homogeneidade do lote de filmes dosimétricos***

É fundamental determinar as variações da resposta que os dosímetros podem demonstrar sendo do mesmo lote (IAEA, 2002). Para este parâmetro ser conhecido é realizado um determinado número de irradiações nas mesmas condições e dose. Em condições consideradas idênticas, os dosímetros são analisados pela mesma técnica em um curto período (PAI et al., 2007).

#### ***2.1.1.4 Linearidade da resposta do filme dosimétrico***

A principal desvantagem do filme dosimétrico é que a sua resposta em relação à dose não é linear. Quando o dosímetro não possui este parâmetro adequado, para determinadas doses, se não corrigir, terá pouca confiança na resposta (ALONSO, 2005). A dosimetria fotográfica não apresenta boa linearidade comparada a outras técnicas como TL e OSL.

#### ***2.1.1.5 Dependência energética***

A emulsão fotográfica possui a característica de absorver mais partículas carregadas ou fótons de baixa energia, principalmente por efeito fotoelétrico. A dependência energética pode ser percebida pela diferença do enegrecimento no detector quando são usados filtros metálicos. As regiões cobertas pelos filtros é comparada à parte nua do filme. A sensibilidade do filme é maior para fótons de baixa energia (KNOLL, 1989; IZEWSKA; RAJAN, 2007).

#### ***2.1.1.6 Dependência angular***

A dependência angular se torna significativa quando a variação na angulação em relação ao feixe pode causar o aumento da atenuação realizada pelo filtro, alterando a resposta do filme (DALTRO, 1994).

#### ***2.1.1.7 Estabilidade***

A densidade óptica do detector dará resultados inadequados ou será impossibilitado de ser avaliado se o filme for muito sensível a efeitos como a temperatura, umidade, luz ou por outras condições ambientais desfavoráveis. Entretanto, há medidas preventivas que podem minimizar esses efeitos, não invalidando a utilização do filme dosimétrico (ATTIX, 1986; DALTRO, 1994).

#### ***2.1.1.8 Desvanecimento***

O desvanecimento na dosimetria fotográfica está relacionado à perda da informação na imagem latente em um intervalo de tempo entre a irradiação e o processamento. O desvanecimento é visto no detector como perda da densidade óptica (WOHNI; STRANDEN, 1985; DALTRO, 1994).

#### ***2.1.1.9 Precisão, exatidão e sensibilidade de um sistema de dosimetria fotográfica***

Uma precisão adequada na dosimetria pode ser relacionada a uma baixa incerteza, o que pode ser associado a uma boa reprodutibilidade. A exatidão refere-se ao grau de concordância entre o resultado de uma medida e o valor do mensurando. A sensibilidade do filme em relação à dose deve ser adequada ao intervalo da dose a ser medido e à energia do feixe, o que pode ser melhorado com a aplicação de filtros de diferentes materiais e de diferentes espessuras (SANTORO, 2007).

## 2.2 DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE

A história do dosímetro termoluminescente começa no mesmo ano da descoberta do raio X, feita por C. W. Roentgen em 1895 (RONTGEN, 1898). Porém, já em 1663, em uma apresentação na “*Royal Society*” (Sociedade Real), Robert Boyle, um dos fundadores da química moderna, relatou o fenômeno quando um diamante emitia luz ao ser aquecido em um local escuro (OBERHOFER; SCHARMANN, 1981).

Os primeiros trabalhos que embasaram o uso da dosimetria Termoluminescente foram realizados por F. Daniels, no início da segunda metade do século vinte. Na ocasião, Daniels propôs o uso da termoluminescência para a datação geológica e descreveu o que parece ter sido a primeira aplicação clínica do fósforo TL de fluoreto de lítio (LiF). Neste caso, cristais de LiF foram ingeridos por um paciente que havia recebido uma injeção contendo isótopos radioativos. Posteriormente, esses cristais foram recolhidos para avaliação da dosagem de radiação acumulada neles por meio da medida da intensidade do seu sinal TL, previamente calibrado para uma dosagem de radiação conhecida. A partir de então, a técnica TL desenvolveu-se e passou a exercer um papel importante na dosimetria para atividades médicas e ocupacionais, através da utilização de dosímetros termoluminescente (TLD) (DANIELS; BOYD; SAUNDERS, 1953; MCKINLAY, 1981).

O TLD possui aspectos importantes que o tornaram amplamente utilizados na dosimetria, como a possibilidade da reutilização de um mesmo cristal inúmeras vezes e o número atômico próximo ao do tecido humano, o que diminui a dependência energética (CAMPOS, 1998; DE MORAES; PELÁ; BRUÇÓ, 2002; FUKUMORI, 2012).

### 2.2.1 Termoluminescência

A termoluminescência (TL) é um fenômeno de emissão luminescente após o aquecimento de um material. Ou seja, ao aquecer o material este emite luz. Esta capacidade do material de emitir luz é uma consequência do fornecimento de energia a este material, por exemplo, através de sua irradiação com radiações ionizantes. Esse ganho de energia altera o estado de equilíbrio termodinâmico do material para um equilíbrio metaestável. Esse estado metaestável caracteriza a termoluminescência como um fenômeno fosforescente, pois a emissão de luz ocorre após ter transcorrido um tempo longo depois da irradiação do material. Na termoluminescência, o aquecimento faz o

material sair do estado metaestável e voltar para o estado de equilíbrio termodinâmico, havendo a liberação de energia na forma de luz (MAURÍCIO, 1998).

Para aplicação da termoluminescência em dosimetria, deve-se utilizar um material isolante ou semicondutor como dosímetro TL (MCKEEVER, 2005). A rede cristalina desse material é caracterizada por uma banda de energia formada por elétrons de valência (banda de valência) e por outra banda de energia permitida em que os elétrons podem movimentar-se livremente (banda de condução) (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979; CAMPOS, 1998; FUKUMORI, 2012; NUNES, 2012). Entre essas bandas há um gap (banda proibida) em que há estados energéticos inacessíveis aos elétrons. Porém, defeitos na rede cristalina (intrínsecos ou extrínsecos) podem criar estados energéticos possíveis nessa banda proibida. Esses estados podem ser chamados de armadilhas, que podem ser de elétrons ou de buracos (ausência de elétrons) (MAURICIO, 2000).

A irradiação de um material TL pode fornecer energia suficiente para os elétrons da banda de valência migrarem para a banda de condução e depois caírem em armadilhas pertencente ao cristal. Buracos também podem surgir em defeitos da rede. O número de elétrons e buracos em armadilhas é proporcional à energia depositada pela radiação. À temperatura ambiente, a maior parte dessas armadilhas fica preenchida e com o aquecimento do material elas são esvaziadas, havendo a emissão de luz (OBERHOFER; SCHARMANN, 1981; HIGGINBOTHAM, 1996).

A probabilidade dos elétrons presos na armadilha serem libertos e das lacunas serem preenchidas aumenta em função da temperatura. Assim, o aquecimento do cristal permite o seu retorno ao estado de equilíbrio, havendo a liberação de energia na forma de luz, com intensidade proporcional à energia da radiação a que o cristal foi exposto (ATTIX et al., 1986; CAMPOS, 1998; OBERHOFER; SCHARMANN, 1981; MCKEEVER; MOSCOVITCH; TOWNSEND, 2005; FUKUMORI, 2012). A figura 3 apresenta as etapas básicas do modelo da termoluminescência descrito.

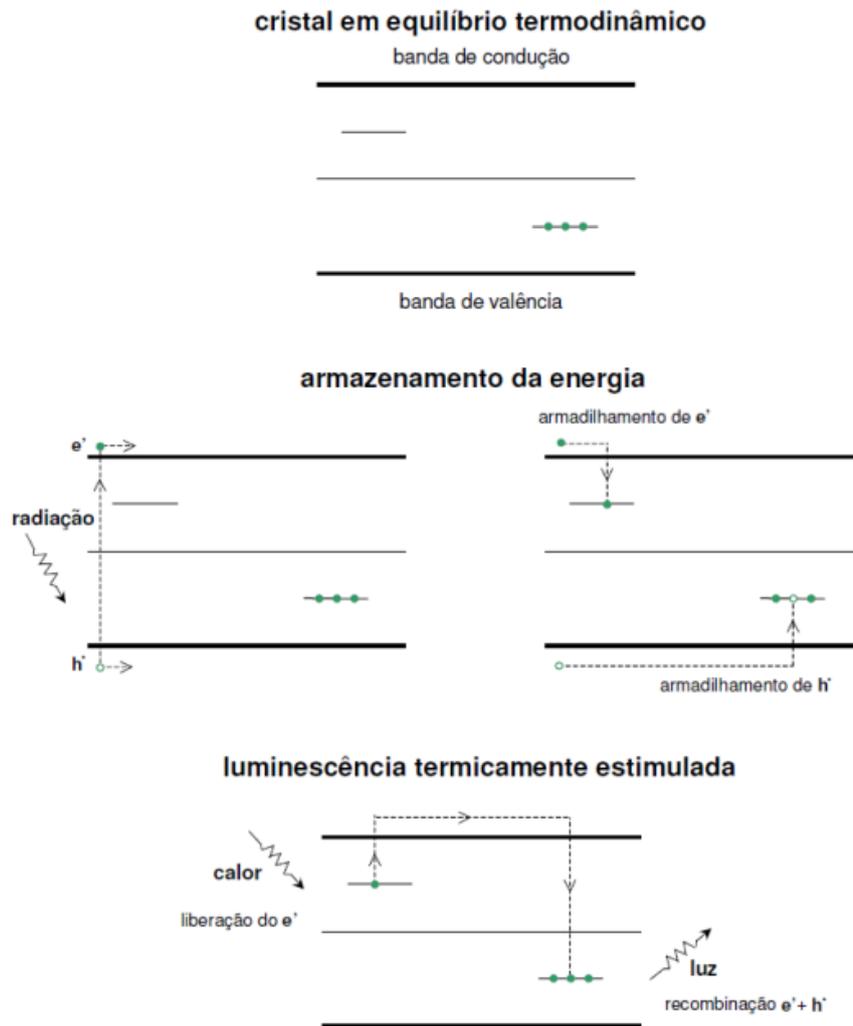


Figura 3 Modelo simplificado da termoluminescência (MAURICIO, 2001).

Uma característica dos materiais termoluminescentes é que após o aquecimento ter estimulado sua luminescência, eles perdem a resposta TL, podendo ser utilizados novamente (ATTIX, 1986).

### 2.2.2 Dosimetria Termoluminescente

Conforme já explicitado, como a intensidade da emissão luminosa de um material TL é proporcional à quantidade de irradiação recebida durante a exposição radioativa do TLD, essa técnica pode ser utilizada para fins de monitoração individual. Para isso, é necessário definir uma grandeza dosimétrica de interesse, correlacionada à intensidade de luz através de um processo de calibração (ATTIX, 1986; ZAMAN et al., 2011).

O sistema dosimétrico apresenta diferentes respostas em função do material do detector e da energia da radiação incidente. Seguindo os conceitos dos efeitos da radiação com a matéria, é preferencial usar detectores que tenham o número atômico próximo o do tecido humano (DE MORAES; PELÁ; BRUCÓ, 2002).

A escolha de um material TL para uso como dosímetro depende do planejamento específico da dosimetria e de suas propriedades. As principais propriedades que devem ser conhecidas para implementação de um sistema de dosimetria TL são: homogeneidade do lote de material; reprodutibilidade de um mesmo TLD; faixa de linearidade em função da grandeza dosimétrica de interesse; dependência energética; dependência angular; estabilidade, em diferentes condições climáticas; efeito da luz; sinal residual e outros efeitos (taxa de dose, auto-irradiação, triboluminescência; quimioluminescência; sinais espúrios etc) (LEE; KIM; CHANG, 2004; STOCHIOIU; MIHAI; SCARLAT, 2006).

O desempenho de um sistema de dosimetria TL é medido principalmente pelas seguintes características: reprodutibilidade, linearidade, dependência energética e angular, limite inferior de detecção, estabilidade da informação armazenada e efeitos de condições ambientais. Este desempenho depende não só das propriedades individuais ou do lote de TLD, mas também: do armazenamento dos TLD; dos materiais usados como suportes nos monitores; do sistema de calibração; dos algoritmos aplicados para obtenção da dose; dos procedimentos de leitura; e dos tratamentos térmicos realizados antes e pós-leitura (THANH et al., 2008; PITALÚA; QUINTERO; FLÓREZ, 2013).

#### ***2.2.2.1 Procedimentos básicos para dosimetria TL***

A seguir são apresentadas as etapas básicas que devem ser realizadas para avaliação da dose recebida por um usuário de um monitor com TLD.

##### *A) Tratamento térmico Pré-irradiação*

Também chamado de “annealing”, o tratamento pré-irradiação tem como objetivo principal reduzir possíveis sinais TL existentes no TLD devido à irradiação de background ou a irradiações anteriores por outras fontes (BARSANELLI, 2003; DE OLIVEIRA, 2011).

### *B) Calibração*

A irradiação de um lote de TLD tem como objetivo principal a exposição dos dosímetros a doses conhecidas na grandeza operacional escolhida para embasar e elaborar a curva de calibração e conseqüentemente o fator de calibração do sistema.

Variáveis importantes que influenciam a exatidão das medidas em dosimetria TL estão associadas com a calibração do sistema e com o comportamento do dosímetro quando exposto a diferentes campos de radiação. Assim, é necessário que se faça calibrações em campos de mesma qualidade de radiação ou, conhecendo-se as diferenças entre os campos, utilizar fatores de correções, filtros e/ou algoritmos que minimizem a variação da resposta do monitor (IAEA, 2002; BARSANELLI, 2003).

### *C) Leitura do TLD*

A leitura dos dosímetros tem como objetivo encontrar o valor de uma determinada grandeza, por exemplo, carga elétrica, que possa ser associada ao valor da dose determinada em uma grandeza operacional de dosimetria (ATTIX, 1986).

### *D) Tratamento térmico Pós-irradiação*

O tratamento pós-irradiação tem como objetivo principal eliminar os picos de sinal TL menos estáveis, reduzindo a influência do “fading”, garantindo uma maior independência entre o valor da dose avaliado e o tempo entre a irradiação e a leitura do dosímetro (BARSANELLI, 2003).

#### **2.2.2.2 Homogeneidade do lote**

Para que não seja necessário o uso de fatores de calibração diferentes para cada TLD, as sensibilidades dos TLD de um mesmo lote têm que ser muito próximas, com as respostas TL podendo ser consideradas iguais. Assim, a sensibilidade pode variar entre os lotes, mas a forma e o comportamento da emissão TL tem que ser os mesmos para determinado material (IAEA, 2002; ROCHA, 2012).

#### **2.2.2.3 Reprodutibilidade**

Se a resposta de TL de um material não for reprodutiva é impossível usá-lo em dosimetria, pois não será possível fazer sua calibração (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979).

#### ***2.2.2.4 Linearidade***

A linearidade indica a proporcionalidade entre a intensidade do sinal TL e a dose absorvida pelo detector. A constante de proporcionalidade deve ser independente da taxa de dose. Existem três regiões em uma curva de resposta do TLD em relação à dose, a região linear, supralinear e a sublinear. A resposta linear é a de maior interesse, pois a relação entre a intensidade do sinal TL e a dose absorvida é proporcional. Nas outras regiões a resposta TL deixa de ser proporcional a dose (MASSEY, 1970; BARSANELLI, 2003; RÊGO, 2010; BATISTA, 2011).

#### ***2.2.2.5 Dependência energética***

Há detectores otimizados que possuem interação com a energia equivalente a um tecido humano (tecido equivalente) para que a interação da energia com o dosímetro tenha uma resposta semelhante a um indivíduo (BATISTA, 2011).

A dependência energética é definida como uma medição da energia absorvida pelo TLD em comparação com a energia absorvida por um material de referência estando em mesmas condições de exposições (BARSANELLI, 2003, JONES, 2003).

#### ***2.2.2.6 Dependência angular***

É preciso conhecer qual a influência do ângulo de incidência da radiação sobre a resposta TL do material que se quer usar. Nas aplicações práticas, o TLD é colocado em algum suporte, assim a dependência angular da resposta TL de um TLD depende do tipo e geometria dos materiais destes suportes (BARSANELLI, 2003; CAVINATO, 2009).

#### ***2.2.2.7 Estabilidade***

A característica de um dosímetro deve ser estável ao longo do tempo de utilização. A estabilidade está relacionada com a capacidade de aprisionar as cargas, estando independente da influência de fatores externos como temperatura, oxigênio atmosférico, umidade, pressão e luz (ATTIX, 1986; RÊGO, 2010, BATISTA, 2011).

Quando o sinal TL é instável, diminui com o tempo, em um fenômeno denominado desvanecimento do sinal TL (fading). A liberação da energia absorvida, sob forma de luz, depende da temperatura na qual o detector é submetido, podendo ocorrer entre o momento

da exposição do TLD à radiação e a sua avaliação. Esse *fading* é causado principalmente pela liberação de elétrons que estão nas armadilhas rasas (instáveis em temperatura mais baixas) (FERREIRA, 1979; PERKS; BULL, 1986; BARSANELLI, 2003).

#### **2.2.2.8 Sensibilidade à luz**

O desvanecimento óptico é causado pela absorção de energia dos fótons provenientes de uma fonte de luz que podem estimular as transições eletrônicas no material, com a liberação de elétrons que estão em armadilhas (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979; BARSANELLI, 2003; DE OLIVEIRA, 2011).

Também pode ocorrer um efeito contrário ao efeito de *fading* em que a luz pode induzir um sinal TL no material (sinal espúrio) através da transferência de elétrons para níveis energéticos de armadilhas envolvidas no processo TL do material (MAURICIO, 2001).

#### **2.2.2.9 Sinal residual**

A irradiação de materiais TL com doses altas pode gerar defeitos no material que não possam mais ser revertidos. Com isso, a resposta dos TLD não irradiados aumenta. Outrossim, após vários ciclos de irradiação e aquecimentos, sempre há um sinal residual crescente. A sensibilidade dos TLD também é modificada com o acúmulo de ciclos de aquecimento, de irradiação e com a exposição a doses elevadas (BARSANELLI, 2003).

#### **2.2.2.10 Precisão, exatidão e sensibilidade de um sistema de dosimetria TL**

Através de medidas repetidas pode-se estimar a precisão do sistema, usualmente representada em termos de desvio padrão. A alta precisão está relacionada com um pequeno desvio padrão que, calculado através de um conjunto de medidas com as mesmas condições de exposições e leituras, permite a avaliação não só da precisão, mas também da reprodutibilidade do sistema (OBERHOFER; SCHARMANN, 1979; ATTIX, 1986; RÊGO, 2010). A exatidão reflete os efeitos das fontes de incerteza e de erro que influenciam na medição (RÊGO, 2010).

A sensibilidade é definida como a relação entre a quantidade do sinal emitido por unidade de dose absorvida pelo material, dependendo fortemente das características do detector (FERREIRA, 1979; RÉGO, 2010; FUKUMORI, 2012).

#### **2.2.2.11 Curva de emissão**

A curva de emissão termoluminescente representa a intensidade da luz emitida pelo detector durante o aquecimento, resultado de uma função da temperatura. Esta curva pode conter um ou mais picos máximo de emissão, onde cada pico, máximo ou não, está associado a uma determinada armadilha pertencente ao detector, tendo em consideração a sua profundidade. O interessante para dosimetria são os picos de emissão em temperaturas mais elevadas (geralmente, acima de 200° C). Destes são extraídas as principais informações para obtenção da resposta do TLD, relacionada a sua exposição à radiação (FERREIRA, 1979; BARSANELLI, 2003; LEAL, 2011).

### **2.3 DOSÍMETRO OPTICAMENTE ESTIMULADO**

A aplicação da dosimetria com o uso da luminescência opticamente estimulada (OSL) foi iniciada nas décadas de 50 e 60 do século XX com Antonov-Romanovski e outros colaboradores (BENOIT et al., 2007; GIGLIOTI, 2010).

OSL é um fenômeno característico de um material isolante ou semicondutor que possui a capacidade de emitir luz quando exposto a uma luz incidente. Se essa luz emitida for proporcional à quantidade da dose de radiação absorvida por um período, considerando a radiação de baixa transferência linear de energia (LET), há a possibilidade deste material ser utilizado na dosimetria. Os dosímetros OSL apresentam estrutura similar aos de TLD, sendo distinta, no entanto, a forma de estímulo ao detector (MARIN, 2010; KALNIS et al., 2011).

Um ponto forte da dosimetria OSL é a possibilidade de releitura do sinal OSL, sendo assim permitida a reavaliação da dose (MCKEEVER, 2006; DE SOUZA, 2009).

### 2.3.1 Luminescência opticamente estimulada

OSL é sinal luminescente emitido por um material isolante ou semicondutor que foi irradiado e posteriormente exposto a uma luz incidente. A intensidade da luz dado pelo material é uma função da dose de radiação que absorveu. Tendo esta característica este material é usado como base para detector para dosimetria (DE FREITAS NASCIMENTO, 2007; GIGLIOTI, 2010; TIEN et al., 2012).

O fenômeno OSL pode ser explicado através do modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos sólidos, de forma muito semelhante à apresentada para TLD, com a diferença que, ao invés do calor, a luz é o principal estímulo para o esvaziamento das armadilhas (JURSINIC, 2007; MARIN, 2010).

O detector de OSL possui quatro tipos de armadilhas que são classificados segundo a energia a qual comporta. Nível 1 são as superficiais ou rasas, que se encontram perto da banda de condução, que segundo alguns autores são sensíveis à baixa estimulação, incluindo a do meio externo. Nível 2 são as dosimétricas, onde são guardadas as informações que são liberadas para formar o sinal OSL. Nível 3, as profundas, requerem uma maior energia do estímulo para soltar as cargas. Nível 4 são as armadilhas para lacunas que se localizam próximo a banda de valência (SOUZA, 2009; MARIN, 2010; SHUCH, 2012).

Quando uma radiação interage com os elétrons da banda de valência do detector, são criados pares conhecidos como elétron/lacuna. Os elétrons e as lacunas são presos pelas armadilhas (SOUZA, 2009; KALNIS et al., 2011). Ao expor o detector ao estímulo luminescente, os elétrons e lacunas nas armadilhas absorvem esta energia luminosa. Deste modo, as armadilhas se esvaziam, liberando os elétrons e lacunas, ocorrendo a recombinação que origina a luminescência. A intensidade desta luz emitida pelo detector é proporcional à dose absorvida pelo dosímetro. Por este motivo o detector OSL pode ser usado na dosimetria (MCKEEVER, 2006; SOUZA, 2009; AMORIM, 2012).

A emissão está diretamente relacionada com a quantidade de elétrons e lacunas presas nas armadilhas. A luminescência emitida pelo detector cresce em função da exposição e da intensidade da luz incidente, até atingir um pico máximo da informação armazenada. Quanto maior for o estímulo maior será a probabilidade das cargas saírem das armadilhas e se recombinarem (SOUZA, 2009; PARISOTO; MORO, 2010).

### ***2.3.1.1 Procedimentos básicos para dosimetria OSL***

#### ***A) Calibração***

Assim como a calibração em TL, a irradiação de um lote de dosímetros OSL tem como objetivo a exposição com doses conhecidas na grandeza operacional escolhida, embasando a elaboração da curva de calibração e conseqüentemente a obtenção do fator de calibração do sistema. A técnica de calibração usada depende da forma do dosímetro e da exatidão exigida (BARSANELLI, 2003).

#### ***B) Leitor***

O leitor é feito para capturar as informações contidas no dosímetro OSL e possui uma fonte emissora de luz e um tubo fotomultiplicador. São utilizados filtros para ter um intervalo de comprimento de onda adequado para o estímulo do dosímetro e para a leitura. Os filtros também são usados para discriminar a luz produzida pelo leitor e a emitida, não deixando que a luz espalhada chegue até a fotomultiplicadora e nem ao detector (SCHUCH, 2012).

- Os filtros são utilizados para selecionar o intervalo de comprimento de onda para obter o sinal adequado às conversões no tubo fotomultiplicador e impedir que a luz espalhada alcance o detector. Também usado quando o estímulo possui a intensidade maior do que o sinal OSL. No todo, garantirá que o sinal tenha uma captura adequada para o leitor, o que proporciona maior confiabilidade nos resultados (MARIN, 2010; SCHURCH, 2012).

- A luz usada no serviço de monitoração individual na técnica OSL como estímulo da luminescência é caracterizada por uma excelente estabilidade da intensidade da luz de saída. No geral existem três formas de estimular um detector OSL, por onda contínua, pulsada ou por modulação linear (BOONS; IERSEL; GENICOT, 2011).

No estímulo por onda contínua também chamado de CW-OSL, o detector é estimulado com uma intensidade de luz constante, enquanto o sinal OSL está sendo registrado. Neste modo, há a necessidade de usar filtros, pois eles servem para discriminar o estímulo da luminescência emitida pelo detector, evitando que chegue luz espalhada ao detector. A leitura só termina quando o leitor recebe um sinal de luz em nível de fundo constante (SOUZA, 2009; SCHUCH, 2012).

O estímulo por onda pulsada, conhecido como POSL, é usado para avaliar a intensidade luminosa dos dosímetros expostos a baixas doses. O detector é bombardeado por discretos pulsos luminosos produzidos por um laser, e no intervalo entre esses pulsos é realizada a verificação da intensidade de cada sinal emitido pelo cristal. Este também necessita do uso de filtros (SOUZA, 2009; SCHUCH, 2012).

Na modulação linear, chamada de LM-OSL, a intensidade da luz de estímulo aumenta linearmente com o tempo. Possui a característica de cortar o estímulo luminoso para que o sinal emitido seja capturado. Como o estímulo inicia-se em baixa intensidade, a soltura das cargas é proporcional, aumentando com tempo até que uma intensidade máxima seja capturada. Este método é bem eficaz para registrar o sinal por níveis de armadilha (SOUZA, 2009; SCHUCH, 2012).

- O tubo fotomultiplicador é um detector muito sensível à luz e é usado nos sistemas de medidas luminescente (SOUZA, 2009; BOONS; IERSEL; GENICOT, 2011). Tem a função de captar e transformar o sinal OSL em corrente elétrica. No interior do tubo, especificamente na entrada, há um cátodo fotossensível e vários diodos que servem para multiplicar os elétrons produzidos através do efeito fotoelétrico. Na parte posterior do tubo, há um anodo com aproximadamente  $10^3$  V. O interior do tubo apresenta vácuo (SOUZA, 2009; MARIN, 2010).

### ***2.3.1.2 Homogeneidade do lote***

É selecionado um lote de dosímetros que são irradiados nas mesmas condições de exposição: mesma dose, qualidade do feixe e distância. A metodologia do teste da homogeneidade deste lote varia para cada instalação, sendo que ao fim são calculadas a média e o desvio padrão dos sinais OSL dos detectores (SCHUCH, 2012).

### ***2.3.1.3 Reprodutibilidade***

Esta propriedade está ligada ao poder da releitura em uma série contínua do sinal OSL no mesmo detector, sem que ocorra uma mudança significativa da informação armazenada (MARIN, 2010).

#### ***2.3.1.4 Linearidade***

A luz emitida deve apresentar linearidade com a dose absorvida pelo detector, o que facilita a calibração e interpretação das medidas. (MARIN, 2010).

#### ***2.3.1.5 Dependência energética***

É comum que os detectores apresentem dependências com a energia do feixe ao qual foi submetido, isto traz necessidade de avaliar a resposta do detector em diferentes qualidades de feixe (DE OLIVEIRA, 2011).

#### ***2.3.1.6 Dependência angular***

É tomada como a relação da resposta OSL do detector que recebeu uma dose de radiação liberada em um ângulo específico de irradiação, com a resposta OSL referente a uma dose liberada na condição de referência, ou seja, ângulo de irradiação a 0° (SOUZA, 2009).

#### ***2.3.1.7 Instabilidade do sinal OSL***

Os dosímetros OSL apresentam uma instabilidade no sinal quando a leitura é feita logo após a irradiação do dosímetro. Para evitar este efeito indesejado, é indicado que o intervalo de tempo entre a irradiação e a leitura seja depois de 6 a 10 minutos, dependendo do material (SOUZA, 2009).

#### ***2.3.1.8 Desvanecimento do sinal OSL***

A perda do sinal OSL em função do tempo decorrido após a irradiação denomina-se desvanecimento. Para corrigir este processo é utilizado o cálculo de um fator de correção (BENEVIDES et al., 2010, DE OLIVEIRA, 2011).

## **3 INCERTEZA EM DOSIMETRIA DE RADIAÇÕES IONIZANTES**

### **3.1 INCERTEZA**

Para a medição de uma determinada grandeza, mesmo quando todas as correções adequadas forem aplicadas a erros conhecidos, ainda haverá dúvidas sobre a confiança daquele resultado medido em relação ao valor do mensurando (BIPM, 2008; GUM, 2011). O resultado da medição, de uma forma geral, é apenas uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando. Este resultado deve estar acompanhado de uma quantificação da qualidade do resultado, expondo a confiabilidade daquela medida. Para isso, é necessário um componente de fácil compreensão, de uso imediato e ampla aceitação para caracterizar a qualidade do resultado da medição: a incerteza da medida (TAYLOR; KUYATT, 1994; DEWERD et al., 2011).

Geralmente a incerteza do resultado de uma medida consiste de componentes que podem ser avaliados conforme os seus aspectos, categorizados em dois tipos: tipo A e tipo B. A do tipo A são aqueles componentes que são avaliados através de métodos de análise estatísticos de uma série de observações, que calculam a distribuição dos valores em torno de uma média. A incerteza que se obtém por qualquer outro método é denominada do tipo B. Para isto, os principais métodos utilizados são o conhecimento de especificações, certificados e a experiência (TAYLOR; KUYATT, 1994; GARCIA-ALVES et al., 2009; GUM, 2011). O propósito da classificação em Tipo A e Tipo B é apenas indicar duas maneiras diferentes de avaliar os componentes de incerteza, não se propondo a indicar qualquer diferença na natureza dos componentes resultantes dos dois tipos de avaliação. Esses tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade, funções que determinam a probabilidade de uma variável aleatória assumir qualquer valor dado ou pertencer a um dado conjunto de valores (distribuição normal, retangular, triangular etc..) (IAEA, 2000; GUM, 2011).

#### **3.1.1 Avaliação da incerteza**

De forma simplificada, a incerteza significa a quantificação da dúvida do resultado de uma medida, e a partir dessa, é possível estabelecer um intervalo de confiança dos resultados obtidos (BIPM, 2008; VAN DIJK, 2010; CNSC, 2011).

Qualquer valor medido só está completo quando estiver acompanhado da indicação da incerteza em uma forma quantificada (ISO/IEC, 2005). E para obter o valor da incerteza é preciso conhecer e identificar as principais fontes de incerteza associada à medição, e essas informações serão usadas para calcular a influência de cada uma dessas (LEWIS et al., 2005; SILVA; MARTINS; MAURICIO, 2014).

#### **3.1.1.1 Incerteza padrão Combinada ( $u_c$ )**

A incerteza padrão combinada é a representação da estimativa do desvio padrão do resultado, obtida analisando a combinação das contribuições das fontes de incertezas individuais que interferem na medição associadas à grandeza do valor do mensurando (LEWIS et al., 2005; BIPM, 2008). Podem ser associada tanto para incertezas do tipo A como do tipo B (NIST, 1994; DE CAMPOS, 2005; GARCIA-ALVES et al., 2009).

#### **3.1.1.2 Incerteza Expandida ( $U$ )**

Embora a incerteza padrão combinada seja para expressar a incerteza da medição de vários resultados em um único produto, muitas vezes é necessário uma medida de incerteza que defina um intervalo em torno da medida do resultado “ $Y$ ”, em que o valor da grandeza do mensurando é confiável. Isso é obtido através da incerteza expandida ( $U$ ). Essa é obtida pela multiplicação da  $u_c(y)$  por um fator de abrangência ( $k$ ) medição (NIST, 1994; GUM, 2011).

Quando o resultado da medição é expressa como  $Y = y \pm U$ , o  $y$  é a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando  $Y$  e  $U$  define um intervalo de abrangência do resultado. Este intervalo pode ser representado como  $y - U \leq Y \leq y + U$ . Em outras palavras a incerteza expandida pode ser definida como sendo uma grandeza que expressa um aumento no intervalo ao redor do resultado da medição (NIST, 1994; LEWIS et al., 2005; GUM, 2011).

### **3.1.2 Incerteza na dosimetria**

Um dos aspectos que garantem qualidade da investigação da dose ocupacional é a avaliação da “qualidade dos resultados da medição”. Este aspecto está relacionado às fontes de erros possíveis e à dúvida sobre o valor avaliado (DE CAMPOS, 2005). É importante garantir que o valor medido está dentro de um intervalo definido que contém o valor verdadeiro, considerando uma determinada confiança ou probabilidade. A qualidade requerida pode ser expressa como a incerteza padrão combinada ou como a incerteza expandida com um fator de abrangência, normalmente 2, ou em uma abordagem probabilística, por um intervalo de abrangência, normalmente de 95%. Na avaliação da incerteza deve ser levado em consideração todo o conhecimento sobre o sistema, incluindo os resultados de testes de tipo e de desempenho, bem como a experiência e observação (EC, 2009).

Na monitoração individual, se os valores da incerteza não são reportados para todas as doses medidas, as fontes de incerteza e suas contribuições devem ser conhecidas (EC, 2009). Esta informação deve ser transmitida aos clientes/usuários de forma a torná-los conscientes da qualidade daquele resultado (ISO/IEC, 2005). Porém, não é possível conhecer as exatas condições do uso dos monitores durante a rotina de trabalho, o que dificulta o cálculo da incerteza. Assim, é importante que o serviço de monitoração individual conheça as fontes de incertezas associadas aos procedimentos realizados em seu laboratório para reduzir o erro da avaliação. A avaliação da incerteza depende do tipo de monitor utilizado, de suas características de desempenho, das informações sobre as condições de medida (AMBROSI, 2006).

Para conhecer a qualidade dos resultados medidos na dosimetria, devem ser identificados e considerando todas as fontes de incertezas com as suas respectivas quantificações e influências encontradas na dosimetria. O conhecimento do tipo de detector, do sistema de leitura, do algoritmo para avaliação de doses aplicado, das condições de exposição e de armazenamento, são alguns componentes que devem ser considerados como fontes de incertezas (DE CAMPOS, 2005; STANFORD, 2007; SILVA; MARTINS; MAURICIO, 2014).

### ***3.1.2.1 Metodologia para o cálculo da incerteza***

A avaliação da incerteza pode ser dividida em dois estágios: formulação e cálculo. Os passos para o estágio de formulação são:

- definição da grandeza de saída (normalmente  $H_x$  ou  $H_p(10)$ );
- determinação das grandezas de entradas e das grandezas de influência na resposta, baseados em teste prévios sobre o sistema de dosimetria utilizado;
- descrição do modelo relacionando as grandezas de entrada e a de saída;
- identificação das funções de distribuição de probabilidade;

O estágio de cálculo compreende a propagação das incertezas padrão de todas as grandezas de entrada e de influência através da função de saída.

Os procedimentos para o cálculo da incerteza dependem do algoritmo usado e são específicos para um determinado sistema dosimétrico. Geralmente, o cálculo envolve também suposições e aproximações estatísticas. (EC, 2009).

## 4. METODOLOGIA

Para identificação das fontes de incertezas para as técnicas de dosimetrias estudadas neste trabalho, foi realizada uma pesquisa em fontes bibliográficas em literatura específica que abordam aspectos dos procedimentos de cada técnica e as incertezas associadas a elas. Posteriormente, foram realizadas visitas técnicas aos Serviços de Monitoração Individual Externa (SMIE) do IRD: Laboratório de Dosimetria Fotográfica (LDF) e Laboratório de Dosimetria Termoluminescente (LDT). Nestas visitas, foi realizado o acompanhamento dos procedimentos realizados, identificando-se potenciais fontes de incertezas. Informações específicas sobre esses procedimentos foram fornecidas pelos laboratórios, para auxiliar na determinação das fontes mais relevantes. Esta etapa de visita não pôde ser realizada para a técnica OSL, pois no Brasil ainda não existe laboratório de SMIE utilizando esta técnica. Assim, para OSL, as fontes de incertezas foram identificadas através da revisão de literatura, e a partir da experiência obtida com o estudo sobre as outras técnicas.

Por razões didáticas, a metodologia utilizada no estudo das incertezas para as três técnicas está apresentada em etapas:

- 1) Categorização das incertezas: para facilitar a identificação das fontes de incertezas, essas foram categorizadas em grupos: detector; leitura; calibração e algoritmo; monitores. Para filmes, há ainda o grupo denominado processamento, que engloba as etapas da revelação.
- 2) Identificação das incertezas: após a definição das categorias, foi realizada uma etapa de acompanhamento e avaliação das atividades realizadas para identificação das fontes de incerteza. Essa etapa permitiu a categorização das fontes nos grupos já explicitados.
- 3) Determinação das fontes de incertezas mais relevantes: Após a identificação das fontes, foram determinadas aquelas com contribuição mais importantes para avaliação das doses, baseando-se nos documentos pesquisados e na experiência dos laboratórios.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1, são apresentadas as fontes de incerteza para a técnica de dosimetria fotográfica, identificadas neste estudo, divididas em categorias, conforme descrito na metodologia. Ao lado de cada fonte de incerteza, há uma sinalização sobre a contribuição de cada uma para a incerteza expandida através do critério qualitativo: fraca, média e forte.

**Tabela 1 Fontes de incerteza para a técnica de dosimetria fotográfica.**

	Fonte de incerteza	Contribuição
<b>Detector</b>	Condições ambientais de armazenamento e para o manuseio	Fraca
	Fading	Média
	Alterações na estrutura física (densidade óptica, espessura)	Fraca
	Enegrecimento ao longo do tempo (fog)	Média
	Homogeneidade do lote	Média
	Sensibilidade do filme	Média
	Linearidade da resposta	Forte
<b>Processamento</b>	Reprodutibilidade do processamento (temperatura das soluções reveladora, tempo de revelação, temperatura das soluções fixadora, tempo de fixação, lavagem e secagem)	Forte
	Homogeneidade da revelação (relacionada à agitação do revelador)	Fraca
<b>Leitura</b>	Estabilidade eletrônica do densitômetro (ruído, variações elétrica, etc)	Fraca
	Estabilidade da luz do densitômetro	Fraca
	Estabilidade do sistema de detecção da luz do densitômetro	Fraca
<b>Calibração e algoritmo</b>	Condições ambientais da irradiação	Fraca
	Fonte de irradiação (correção do decaimento, calibração e rastreabilidade...)	Média
	Posição do monitor durante a irradiação	Fraca
	Fator de calibração	Forte
<b>Monitor</b>	Características de desempenho (dependência angular, dependência energética, linearidade...)	Forte
	Homogeneidade do lote	Média
	Condições ambientais de armazenamento e para o manuseio	Fraca

Como diversas etapas do processo de avaliação de doses para TLD e OSL são muito semelhantes, na tabela 2 são apresentadas as fontes de incerteza para as duas técnicas, sendo sinalizadas as fontes específicas para OSL. Também foi realizada a indicação sobre a contribuição de cada uma das fontes para a incerteza expandida através do critério qualitativo: fraca, média e forte.

**Tabela 2 Fontes de incerteza para as técnica de TL e OSL.**

	<b>Fonte de incerteza</b>	<b>Contribuição</b>
<b>Detector</b>	Condições ambientais de armazenamento e para o manuseio	Fraca
	Fading	Média
	Fator de calibração individual (quando aplicado)	Média
	Contaminação não radioativa	Fraca
	Alterações na estrutura física do detector (opacidade, massa, tamanho, etc)	Fraca
	Sinal residual	Média
	Homogeneidade do lote	Média
	Reprodutibilidade	Média
	Sensibilidade do detector	Média
	Linearidade da resposta do detector	Fraca
	Tratamento térmico	Forte
	Tratamento óptico (branqueamento) – para OSL	Forte
	Instabilidade do sinal - para OSL	Fraca
	Releitura do detector – para OSL	Forte
<b>Leitura</b>	Estabilidade eletrônica do leitor (ruído, variações elétrica, etc)	Fraca
	Estabilidade da resposta do leitor	Média
	Quimioluminescência na cavidade de leitura	Fraca
	Condições geométricas do detector na cavidade de leitura	Fraca
<b>Calibração e algoritmo</b>	Condições ambientais da irradiação	Fraca
	Fonte de irradiação (correção do decaimento, calibração e rastreabilidade...)	Média
	Posição do monitor durante a irradiação	Fraca
	Fator de calibração	Forte
<b>Monitor</b>	Características de desempenho (dependência angular, dependência energética, linearidade...)	Forte
	Homogeneidade do grupo	Média
	Condições ambientais de armazenamento e para o manuseio	Fraca

Para a dosimetria fotográfica, diversas fontes de incertezas, reunidas neste trabalho como “reprodutibilidade do processamento”, estão presentes no processo de revelação, incluindo também as etapas de fixação, lavagem e secagem. Essas fontes possuem contribuição significativa para a incerteza para medição. Para esta técnica, a linearidade da resposta do filme também é uma fonte de incerteza importante, pois o enegrecimento do filme de acordo com a sua exposição não apresenta uma boa linearidade, sendo esta fortemente dependente do valor da dose. Finalmente, o fator de calibração que associa a densidade óptica do filme com um valor de dose, obtido através do processo de calibração, pode ser considerado uma das principais fontes de incerteza. Dentre as características de desempenho do monitor para filmes, a dependência energética é uma fonte com contribuição elevada para a incerteza.

Para as técnicas de dosimetria TL e OSL, o fator de calibração é uma fonte de incerteza muito relevante, assim como as características de desempenho do monitor, especialmente dependência energética, dependência angular e linearidade. O tratamento térmico, especialmente a sua reprodutibilidade, é muito importante para obtenção de resultados mais confiáveis e precisos em dosimetria TL, assim como o tratamento óptico em OSL. Especificamente para OSL, como esta técnica possibilita a releitura do dosímetro, a incerteza deste processo torna-se relevante.

## 6. CONCLUSÕES

Dentro das muitas fontes de incertezas que podem ser identificadas no processo de medição para a dosimetria de corpo inteiro para exposição a fótons, a maior parte não apresenta uma contribuição significativa para a incerteza expandida. Porém, as fontes de incertezas mais relevantes devem ser estudadas e quantificadas. Métodos para redução da contribuição destas devem ser considerados.

Para as três técnicas estudadas o fator de calibração do sistema revela-se como uma fonte de incerteza importante, logo o processo de calibração e o algoritmo para cálculo de dose utilizado são pontos chaves para a obtenção de resultados mais confiáveis. Também é essencial observar os critérios de desempenho do monitor, como a sua dependência energética e angular.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGFA GEVAERT. III **Películas y papel para radiografias industriales- Productos químicos**. Mortsel, Bélgica, 1978.

AKSELROD, M. S. et al. **Optically stimulated luminescence of  $Al_2O_3$** , Radiat. Meas., vol. 29, n. 3-4, p. 391-399, 1998.

ALONSO, T. C. **Investigação das doses ocupacionais da equipe médica em procedimentos hemodinâmicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, p. 7 - 8, 26, 2005.

AMBROSI, P. **Uncertainties in Workplace External Dosimetry an Analytical Approach**. Radiation Protection Dosimetry, Germany, vol. 121, n. 1, 24–30, 2006.

AMORIM, R. A. P. O. **Caracterização de Detectores de Radiação de Espodumênio**. Tese (Doutorado em Física) – Núcleo de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão/SE, p. 25-26, 2012.

ATTIX, F. H., ROESCH, W. C.; TOCHILIN, E. **Radiation Dosimetry**. New York: Academic, vol. 1, 3<sup>th</sup> ed., p. 282, 1986.

ATTIX, H. F. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. University of Wisconsin Medical School, Madison, Wisconsin, p. 15, 49, 395-396, 401, 410, 1986.

BARSANELLI, C. **Metodologia de Calibração de Dosímetros Termoluminescentes**. Universidade Estadual de Campinas, p. 7-9, 10-11, 2003.

BATISTA, B. J. B. **Avaliação de dosímetros termoluminescentes para uso em radioterapia com fótons de alta energia.** Dissertação (Mestrado em Ciências) Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 11, 2011.

BAZANI, D. L. M. **Caracterização de polímeros semicondutores para uso em sensores de radiação gama.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, p. 13, 2008.

BECKER, K. **Photographic Film Dosimetry.** London, Focal, 1966.

BENEVIDES, L.; ROMANYUKHA, A.; HULL, F.; DUFFY, M.; VOSS, S.; MOSCOVITCH, M. **Light Induced Fading in the OSL Response of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C.** Journal Homepage: [www.elsevier.com/locate/radmeas](http://www.elsevier.com/locate/radmeas), USA, p. 523, 2010.

BENOIT, D. et al. **Optically Stimulated Luminescence Dosimetry.** Institut d'Électronique du Sud (IES) - First Workshop on Instrumentation for Charged Particle Therapy in London, United Kingdom, p. 2, 2007.

BERMANN, F. **Participation of the Laboratories d'Exploitation Dosimetrique du Centre d'Etudes Nucleaires de Fontenay aux Roses in the IAEA intercomparison program.** Viena, vol. 1, p. 194-203 (PTB – DO – 20), 1991.

BIPM, 2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008, Paris.

BOONS, R.; IERSEL, M. V.; GENICOT, J. L. **External and Environmental Radiation Dosimetry with Optically Stimulated Luminescent Detection Device Developed at the SCK-CEN.** World Journal of Nuclear Science and Technology, Belgian Nuclear Research Center, Mol, Belgium, p. 12, 2011.

CAMPOS, L. L. **Termoluminescência de materiais e aplicação em dosimetria da radiação.** Scielo Brasil, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, São Paulo, p. 2, 3, 1998.

CNSC **Introduction to Dosimetry.** Published by the Canadian Nuclear Safety Commission, PWGSC, p. 30, 2011.

CUNHA, P. G. & LEÃO, J. L. B. **Serviço de Dosimetria Fotográfica do IRD. In: Physics in Medicine and Radiation Protection: Proceeding of Second Conference on...** held in Belo Horizonte. Brasil. p. 235-240, 1975.

DALTRO, T. F. L. **Desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo de dose em dosimetria fotográfica.** Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN), CNEN/SP, SP, p. 12, 15-17, 26-29, 35, 43-44, 76-77, 1994.

DANIELS, F.; BOYD, C.; SAUNDERS, D. **Thermoluminescence as a Research Tool.** Department of Chemistry, University of Wisconsin, Madison, vol. 117, 343-349, 1953.

DE CAMPOS, V. P. **Desenvolvimento e Avaliação de um novo Porta Detector/Filtro para Monitoramento Termoluminescente com CaSO<sub>4</sub>:Dy/PTDE.** Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - IPEN, SP, p. 16-17, 2005.

DE FREITAS NASCIMENTO, L. **Dosimetria usando Luminescência Ópticamente Estimulada: aplicações, propriedades físicas e caracterização de materiais dosimétricos.** Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Instituto de Física São Carlos, USP, São Carlos, SP, p. 21, 2007.

DE MORAES, C. V.; PELÁ, J. L.; BRUÇÓ, J. L. **Resposta de dose de um dosímetro individual multifiltro para radiações X e gama. Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção.** Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, USP, Ribeirão Preto, SP, Brasil, vol. 18, n. 1, p. 27, 29-30, 2002.

DE OLIVEIRA, S. R.; DE AZEVEDO, A. C. P.; CARVALHO, A. C. P. **Elaboração de um Programa de Monitoração Ocupacional em Radiologia para o Hospital Universitário Fraga Filho.** UFRJ, RJ, p. 28, 2002.

DE OLIVEIRA, V. H. **Estudo da Luminescência do Material LaAlO<sub>3</sub> Dopado com Íons Trivalentes Opticamente Ativos, para Aplicação em dosimetria das Radiações Gama e UV.** CDTN/CNEN, Belo Horizonte, MG, p. 4, 17, 2011.

DEWERD, L. A.; IBBOTT, G. S.; MEIGOONI, A. S.; MITCH, M. G.; RIVARD, M. J.; STUMP, K. E.; THOMADSEN, B. R.; VENSELAAR, J. L. M. **A Dosimetric Uncertainty Analysis for Photon-emitting Brachytherapy Sources: Report of AAPM Task Group No. 138 and GEC-ESTRO.** American Association of Physicists in Medicine, vol. 38, n. 2, p. 784, 2011.

DUDLEY, R. A. **Dosimetry with Photographic Emulsions, in Radiation Dosimetry.** In: ATTIX, F. H.; ROESCH, W. C., eds. The Dosimetry of Ionizing Radiation. New York, N. Y., Academic, vol. 2, p. 325, 1966.

EC. **Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation.** GAEC and EURADOS, European Commission, Luxembourg, 2009.

FERREIRA, M. M. **CaSO<sub>4</sub>: Dy e/ou Tm: Estudo de suas Propriedades para Aplicação em Dosimetria.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Energia Atômica, São Paulo, p. 4-5, 1979.

FUKUMORI, D. T. **Desenvolvimento e Estudo de Materiais Termoluminescentes Baseados em Óxido de Alumínio para Aplicação em Dosimetria.** Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, São Paulo, p. 20, 23-24, 52, 2012.

GARCIA-ALVES, J. et al. **Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation.** Radiation Protection No 160. European Commission, Luxemburg, p. 52, 2009.

GIGLIOTI, R. **Utilização da Dosimetria Opticamente Estimulada (OSL) na Avaliação de Parâmetros de Qualidade de Feixe em Radioterapia.** Dissertação (Mestrado em Ciências, Área: Física Aplicada à Medicina e Biologia) – Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto, São Paulo, p. 23, 2010.

**GUM** – And its Possible Use in Geodata Quality Assessment, p. 2, 2011.

HIGGINBOTHAM, J. **Applications of New Technology External Dosimetry.** Madison: Medical Physics Publishing, 1996.

IAEA **Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water.** Technical Report Series 398, International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 9, 2000.

IAEA **Dosimetry for Food Irradiation.** Technical Reports Series no. 409, Vienna, p. 27, 2002.

**ISO/IEC General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories.** International Standard, Published in Switzerland, p. 13, 2005.

IZEWSKA, J.; RAJAN, G. **Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students.** IAEA, p. 27-28, 2007.

JONES, A. K.; HINTENLANG, D. E.; BOLCH, W. E. **Tissue-equivalent Materials for Construction of Tomographic Dosimetry Phantoms in Pediatric Radiology.** Med. Phys. 30, p. 2072-2081, 2003.

JURSINIC, P. A. **Characterization of optically stimulated Luminescent dosimeters, OSLDs, for Clinical Dosimetric Measurements.** American Association of Physicists in Medicine, West Michigan Cancer Center, Kalamazoo, Michigan, vol. 38, n. 12, p.4595, 2007.

KALNINS, C. A. G. et al. **Radiation Dosimetry Using Optically Stimulated Luminescence in Fluoride Phosphate Optical Fibres.** Optical Society of America, University of Adelaide, Australia, vol. 2, n. 1/OPTICAL MATERIALS EXPRESS 64, 2011.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement.** New York, N. Y., John Wiley & Sons, 1989.

LEAL, M. A. **Procedimentos para Dosimetria In Vivo com TLD-100 e Diodos Semicondutores em Tratamento de Câncer na Região Pélvica com Feixes Externos de Fótons.** Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 16, 2011.

LEE, J. I.; KIM, J. L.; CHANG, S. Y. **Thermoluminescent Characteristics of Newly Developed LiF:Mg,Cu,Na,Si TL Detectors.** Journal of the Korean Nuclear Society, Korea Atomic Energy Research Institute, vol. 36, n. 1, p. 48, 2004.

LEWIS, V. et al. **The Assessment of Uncertainty in Radiological calibration and Testing.** Measurement Good Practice Guide, Reproduced by permission of the Controller of HMSO, n. 49, p. 1, 2005.

MARIN, A. V. **Caracterização de um Sistema Dosimétrico Baseado na Técnica de Luminescência Opticamente Estimulada para uso em Dosimetria In Vivo em Radioterapia.** Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 7-8, 18, 2010.

MASSEY, J. B. **Manual of Dosimetry in Radiotherapy.** Technical Reports Series n° 110, International Atomic Energy Agency, Vienna, p. 18, 1970.

MAURÍCIO, C.L.P. **Monitoração Individual Externa.** Apostila de curso, IRD/CNEN. 2001.

MAURÍCIO, C. L. P. **Produção de Filmes de LiF para Aplicação em Dosimetria Termoluminescente.** PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2000.

MCKEEVER, S. W. S.; MOSCOVITCH, M.; TOWNSEND, P. D. **Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses.** Nuclear Technology Publishing, Ashford, 2005.

MCKEEVER, S. W. S. **Passive Space Radiation Dosimetry using Optically and Thermally Stimulated Luminescence.** Oxford University, 2006.

MCKINLAY, A. F. **Thermoluminescence Dosimetry**. Bristol series of Medical Physics Handbooks, 5. Bristol: Adam Hilger, 1981.

MOTA, H. C. et al. **Um Sistema Multi-filtro para Dosimetria fotográfica**. Rio de Janeiro, IRD/CNEN, 1990.

NUNES, M. G. **Desenvolvimento do Dosímetro Termoluminescente de CaSO<sub>4</sub>: CE, EU para a Monitoração Individual e a Dosimetria Clínica de Fótons e Elétrons**. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - IPEN, São Paulo, p. 31-32, 2012.

OBERHOFER, M.; SCHARMANN, A. **Applied Thermoluminescence Dosimetry**. Ispra Courses, Published for the Commission of the European Communities, Italia, p. 11, 21, 86, 91, 94, 1981.

PAI, S. et al. **TG-69: Radiographic Film for Megavoltage Beam Dosimetry**. American Association of Physicists in Medicine, vol. 34, n. 6, p. 2234, 2239, 2249, 2007.

PARISOTO, M. F.; MORO, J. T. **Aplicações do Eletromagnetismo, Óptica, Ondas, da Física Moderna e Contemporânea na Medicina (2º Parte)**. Textos de Apoio ao Professor de Física, Instituto de Física, UFRGS, Porto Alegre, RS, p. 52, 2010.

PERKS, C. A.; BULL, R. K. **Fading of Thermoluminescence in Materials Exhibiting Second Order Kinetics**. Harwell Laboratory, Oxfordshire, U.K., Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part D., Nucl. Tracks Radiat. Meas., vol. 11, n. 6, p. 327-328, 1986.

PITLALÚA, R. C.; QUINTERO, J. S.; FLÓREZ, O. G. **Dosimetric and Thermoluminescent Characteristics of Sintered Samples Based on Li<sub>2</sub>OAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>nSiO<sub>2</sub> Systems**. Revista Mexicana de Física, p. 152-153, 2013.

**RÊGO, F. M. Desenvolvimento de Dosímetros de Estado Sólido para Dosimetria em Radiologia e Braquiterapia.** Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, p. 37-39, 74, 2010.

**ROCHA, A. M. G. Estudo do Campo de Radiação Neutrônica em Torno do Cíclotron GE PETtrace-8 de 16.5 MeV do CDTN.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, CDTN/CNEN, Belo Horizonte, p. 40, 2012.

**RONTGEN, C. W. Uber eine neue Art Von Strahlen. Vorlaufige Mitteilung.** Sitzungsberichite der Physikalisch Medizinischen Gesellschaft Wurzburg, 137-147 (1895). Reprinted in Ann. Phys. Chem. 64, 1-11, 1898.

**SALLES, F. A Emulsão Fotográfica – Os filmes.** Apostila de Cinematografia, p. 50, 2004.

**SANCHES, M. P. Fundamentos de Radioproteção - Conceitos Básicos - Programa Específico de treinamento - Proteção Radiológica.** IPEN, CNEN/SP, 2001.

**SANTORO, C. Adaptação de um Sistema de Monitoração Individual Externa para Raios X e Gama para Avaliação do Equivalente de Dose Pessoal “Hp(10)”, Utilizando a Técnica da dosimetria Fotográfica.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Departamento de Energia Nuclear, UFP, Recife, Pernambuco, p. 39, 42, 2007.

**SANTORO, C.; SANTOS, M. A. P.; FILHO, L. C. G.; FILHO, J. A. Calibração de Dosímetros Fotográficos para Avaliar o Equivalente de Dose Pessoal, Hp(10), Irradiados por Diferentes Qualidades de Radiação e Ângulos de Incidência.** IX Latin

American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety, RJ, Brazil, Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica, IRPA, 2013.

SCHUCH, F. F. **Estudo e Desenvolvimento de Dosímetro Ópticamente Estimulados para Aplicações em Radioterapia.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP, São Paulo, p. 18, 23, 35, 2012.

SICARDY, O. **Application de Quelques Techniques de Controle non Destructif à La Caracterisation des Roches Calcaires Ultrasons, Radiographie, Tomographie, Neutronographie.** Grenoble, Centre d'Etudes Nucleaires (CEA 5336), 1985.

SILVA, E. R., MARTINS, M. M.; MAURICIO, C. L. P. **Discussion on Sources Uncertainty for Two TLD Albedo Dosimetry Systems in a Comparison of Individual monitors in a reference  $^{241}\text{Am-Be}$  Field.** Radiat. Meas., 2014.

SOUSA, L. O. **Caracterização de Sistema Dosimétrico de Luminescência Ópticamente Estimulada (OSL) para Doses Liberada na Cobaltoterapia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, p. 2, 20-21, 27-28, 33-34, 47, 2009.

STANFORD, N. **Back to Basics – Uncertainty.** CHP, Stanford Dosimetry LLC, p. 5, 2007.

STOCHIOIU, A.; MIHAI, F.; SCARLAT, F. **A New Passive Dosimetric System with Thermoluminescent LiF:Mg,Cu,P Detectors applied in Individual Radiation Monitoring.** Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Bucharest, Romania, vol. 8, n. 4, p. 1545-1546, 2006.

SULTAN, J. **Action des Rayonnements sur les Couches Photographie.** Nucleus, 1:46, 1970.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**. NIST Technical Note 1297, Physics Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, p. 1, 1994.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9<sup>o</sup> revisão, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, p. 186-187, 2013.

THANH, N. Q. et al. **Thermoluminescence properties of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu Material**. VNU Journal of Science, Mathematics, Physics 24, Vietnam, p. 97-98, 2008.

TIEN, C. J. et al. **Optically Stimulated Luminescent Dosimetry for High Dose Rate Brachytherapy**. Rhode Island Hospital, USA, vol. 2, art. 91, p. 1, 2012.

VAN DIJK, J. W. E. **Developments in Uncertainty Analysis for Individual Monitoring**. Radiation Protection Dosimetry, Netherlands, vol. 144, n. 1-4, p. 56-61, 2010.

WANG, Y. **Digital Film dosimetry in Radiotherapy and the Development of analytical Applications Software**. Thesis (Doctorate in Philosophy) - University of Wollongong, p. 13, 2005.

WOHNI, T.; STRANDEN, E. Film dosimetry. In: MAHESH, K.; VIJ, D. R. **Techniques of Radiation Dosimetry**. New Delhi, Wiley Eastern, vol. 1, p. 305-21, 1985.

ZAMAN, M. U. et al. **Radiation Dosimetry: From Thermoluminescence Dosimeter (TLD) to Optically Stimulated Luminescence Dosimeter (OSLD)**. Pakistan Journal of Radiology, Section of Nuclear Medicine, Aga Khan University Hospital, Pakistan, p. 108, 2011.