



# Dosimetria da radiação cósmica em tripulações por meio da técnica de dosimetria termoluminescente (TL)

<sup>1</sup>Carmo T. A., <sup>1</sup>Lapa J., <sup>1</sup>Dias R., <sup>1</sup>Frigi F. L., <sup>1</sup>Santana G. G., <sup>2</sup>Federico C. A.

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

<sup>2</sup>Instituto de Estudos Avançados (IEAv)

**Resumo** — A dosimetria termoluminescente (TL) é uma ferramenta com grande potencial para ser aplicada em ambientes com exposição à radiação. A técnica de medição com TLD consiste em um processo técnico de baixo custo e alta efetividade, que permite quantificar a dose de radiação cósmica em diferentes órgãos e tecidos do corpo humano de forma precisa. O presente estudo foca no aprimoramento da metodologia de aquisição da dose total absorvida de radiação em tripulantes de aeronaves. Os materiais usados no desenvolvimento do estudo são: leitora TLD da Thermo Scientific modelo 3500, TLD-600H, TLD-700H e um Fantoma Antropomórfico (FA). A pesquisa será conduzida em dois momentos, sendo uma fase laboratorial e a outra em voo. Os sensores serão preparados e testados previamente com exposição à fonte de cobalto (<sup>60</sup>Co). Em seguida, será realizada a leitura dos dosímetros utilizando o software WinREMS e a montagem da matriz virtual da dose absorvida pela matriz exposta. Após a validação, será feita a medição do fluxo de nêutrons em voo, distribuindo os dosímetros no perfil complexo do Fantoma; na sequência, será realizado o voo para aquisição de dados. Em conclusão, o presente estudo se propõe a desenvolver a técnica de medição com dosímetros passivos para medição de nêutrons e validar o método de preparo e aquisição durante o voo.

## I. INTRODUÇÃO

Os dosímetros termoluminescentes (TLDs) são materiais que, ao absorverem energia da radiação ionizante, armazenam parte dessa energia em estados metaestáveis. Quando aquecidos, liberam essa energia na forma de luz, que se trata de um fenômeno conhecido como termoluminescência (TL). A intensidade da luz emitida é proporcional à dose de radiação absorvida, o que permite quantificar a dose. Devido a essa propriedade, os TLDs encontram ampla aplicação em diversas áreas da dosimetria, incluindo a dosimetria pessoal, ambiental e médica (Berger et al., 2008).

Diversos materiais termoluminescentes têm sido utilizados em dosimetria, cada um com características e aplicações específicas. O fluoreto de lítio dopado com magnésio e titânio (LiF,Ti), comercialmente conhecido como TLD-100, é um dos materiais mais amplamente utilizados. Sua sensibilidade à radiação gama e sua resposta linear em uma ampla faixa de doses o tornam ideal para dosimetria pessoal e ambiental (Noll et al., 1999). O TLD-100 também é usado em conjunto com outros TLDs, como o TLD-600 e o TLD-700, para dosimetria de nêutrons. O TLD-600, enriquecido com <sup>6</sup>Li, é altamente sensível a nêutrons térmicos, enquanto o TLD-700, enriquecido com <sup>7</sup>Li, é relativamente insensível a nêutrons. A diferença na resposta entre esses dosímetros permite a determinação da dose de nêutrons em campos de radiação mistos (Velyhan et al., 2006).

O fluoreto de lítio dopado com magnésio, cobre e fósforo (LiF,Cu,P), como o TLD-700H, é conhecido por sua alta sensibilidade, permitindo a detecção de doses muito baixas de radiação. Essa característica o torna útil em aplicações como monitoramento ambiental e dosimetria em radioterapia (Jones e Stokes, 2007). O TLD-300 (CaF<sub>2</sub>) é outro material termoluminescente amplamente utilizado. Seus picos de emissão de luz em diferentes temperaturas permitem a discriminação entre diferentes tipos de radiação, como fótons e nêutrons (Angelone et al., 1999).

Apesar de suas vantagens, a dosimetria com TLDs apresenta desafios. Um dos principais desafios é a dependência da eficiência da TL com a qualidade da radiação, especialmente para partículas carregadas pesadas (*High Charge Particles* - HCPs). A eficiência da TL é definida como a razão entre a luz emitida e a energia depositada, que pode variar significativamente com o tipo de partícula e sua energia (Berger et al., 2008). Essa variação é atribuída à distribuição espacial da energia depositada pelas partículas ionizantes, que depende de sua densidade de ionização (*Linear Energy Transfer* - LET). Diversos modelos teóricos têm sido desenvolvidos para descrever a resposta do TLD à radiação HCP, incluindo a teoria da estrutura de traços e a teoria microdosimétrica (Berger et al., 2008).

Outro desafio é o fenômeno do *fading*, que se refere à perda de sinal do TLD ao longo do tempo. O *fading* pode ocorrer na pré-irradiação, quando ocorre antes da exposição à radiação, ou na pós-irradiação, quando ocorre após a exposição. O *fading* pode ser influenciado por fatores como temperatura, umidade e tipo de radiação (Jones e Stokes, 2007).

Romanyukha et al. (2011) estudaram o efeito da irradiação com nêutrons nas propriedades dosimétricas do TLD-600H (<sup>6</sup>LiF,Cu,P). Eles observaram que a exposição a nêutrons pode afetar a sensibilidade do dosímetro e levar ao acúmulo de dose devido ao decaimento do trítio produzido na reação de captura de nêutrons pelo lítio-6. Jones e Stokes (2007) avaliaram o *fading* na pré e pós-irradiação do TLD Harshaw 8841 (LiF,Cu,P) em diferentes condições ambientais. Seus resultados mostraram que o TLD-700H e o TLD-600H apresentam boa estabilidade de sinal, com perdas mínimas em temperaturas de armazenamento de 8°C e 25°C.

Noll et al. (1999) investigaram o uso de TLDs para medir a dose equivalente em aeronaves, onde o campo de radiação é misto e inclui uma componente significativa de partículas de alta LET. Eles utilizaram o método da razão de alta temperatura (*High Temperature Ratio* - HTR), que permite a determinação da dose absorvida e do LET médio da radiação. Seus resultados indicaram que o método HTR é aplicável para a determinação da dose biológica relevante em campos de radiação mistos, como os encontrados no ambiente espacial.

## II. OBJETIVO

**Quantificar:** Medir a dose equivalente e efetiva de radiação cósmica recebida por diferentes órgãos e tecidos do corpo humano durante missões aéreas.

**Mapear:** Determinar a distribuição espacial da dose de radiação cósmica no interior do corpo humano e em diferentes órgãos.

**Avaliar:** Comparar os resultados obtidos com os dosímetros em relação aos valores de referência estabelecidos pelas diretrizes de proteção radiológica.

**Aprimorar:** Utilizar os dados obtidos para aprimorar as diretrizes de proteção radiológica, desenvolver e validar a metodologia de leitura de sensores passivos.

## III. METODOLOGIA

A pesquisa tem feito uso da infraestrutura existente no Laboratório de Dosimetria Aeroespacial (LDA) no IEAv, que possui dosímetros (TLD-600H, TLD-700H) e leitoras da Thermo Scientific 3500, bem como um Fantoma Antropomórfico (FA).

Os dosímetros TLDs serão preparados inicialmente com base nas recomendações do fabricante. Em seguida, será realizado o aquecimento dos TLDs para liberação das cargas armazenadas remanescentes.

Também é necessário preparar os dosímetros para o voo, onde serão identificados os sensores com um número ID único e distribuídos os sensores TLDs no Fantoma.

Após o voo: Leitura dos sensores (Tabela 1) e montagem da matriz virtual.

**Tabela 1:** Procedimentos recomendados para recozimento e leitura de dosímetros TLDs 600H e 700H.

Parâmetros	Com pré-aquecimento	Sem pré-aquecimento
Temperatura de pré-aquecimento (°C)	135	50
Tempo de pré-aquecimento (sec.)	10	0
Taxa de aquecimento (°C por sec.)	10	10
Temp. Máxima (°C)	240	240
Tempo de aquisição (sec.)	23 1/3	30
Temperatura de recozimento (°C)	240	240
Tempo de recozimento (sec.)	10	10

## IV. RESULTADOS ESPERADOS

Obter uma estimativa precisa da dose equivalente e efetiva de radiação cósmica recebida por diferentes órgãos e tecidos da tripulação (Fantoma).

Comparar os resultados obtidos com o TLD e os valores de referência estabelecidos pelas diretrizes de proteção radiológica.

Validar o modelo de calibração e leitura dos dosímetros TLDs 600H e 700H.

Construir o modelo virtual da dose distribuída no Fantoma.

## V. CONCLUSÃO

A técnica de dosimetria passiva contribui para o melhor entendimento da absorção de nêutrons pelo corpo humano durante voos tripulados. A metodologia aqui desenvolvida propõe uma abordagem aprimorada no tratamento dos dosímetros e na medição, visando maior precisão durante a aquisição e a redução de erros de leitura.

## VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Angelone, M., Batistoni, P., Chiti, M., Esposito, A., & Pillon, M. (1999). Study of TLD-300 as a low dose detector, and a comparison with standard high sensitivity TLDs. *Radiation Protection Dosimetry*, 85(1-4), 245-248.
- Berger, T., & Hajek, M. (2008). TL-efficiency—Overview and experimental results over the years. *Radiation Measurements*, 43(2-6), 146-156.
- Chen, J., Chuang, C., Bucci, M. K., Morin, O., Zheng, Z., Hristov, D., ... & Pouliot, J. (2004). Dose reconstruction using an amorphous-silicon detector and low-exposure MV cone-beam CT imaging. *International Journal of Radiation OncologyBiologyPhysics*, 60(1), S588-S588.
- Jones, L. A., & Stokes, R. P. (2007). Pre-irradiation and post-irradiation fading of the Harshaw 8841 TLD in different environmental conditions. *Radiation Protection Dosimetry*, 125(1-4), 241-246.
- Kry, S. F., Howell, R. M., Titt, U., Salehpour, M., & Mohan, R. (2015). The influence of neutron contamination on dosimetry in external photon beam radiotherapy. *Medical physics*, 42(11), 6509-6520.
- Noll, M., Vana, N., Schöner, W., & Fugger, M. (1999). Measurements of the equivalent dose in aircraft with TLDs. *Radiation Protection Dosimetry*, 85(1-4), 283-286.
- Romanyukha, A., Minniti, R., Moscovitch, M., Thompson, A. K., Trompier, F., Colle, R., ... & Benevides, L. A. (2011). Effect of neutron irradiation on dosimetric properties of TLD-600H (6LiF: Mg, Cu, P). *Radiation Measurements*, 46(11), 1426-1431.
- Velyhan, A., Krása, J., Bienkowska, B., Ivanova-Stanik, I. M., Juha, L., Karpinski, L., ... & Tomaszewski, K. (2006). Use of thermoluminescent dosimeters for measurement of fast-neutron spatial-distribution at the plasma focus device PF-1000. *Physica Scripta*, 2006(T123), 112.
- Yasuda, H. (1999). Glow curve analyses of 6LiF: Mg, Ti (TLD-600) and 7LiF: Mg, Ti (TLD-700) exposed to high-energy heavy ions. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 36(11), 1105-1107.