

# Uso de detectores cerâmicos $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para discriminar campos de radiação beta e de fótons

## Use of ceramic $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> detectors for discriminate beta and photon radiation fields

Anna Luiza F. Silveira<sup>1</sup>, Ana Clara C. Bernacci<sup>2</sup>, Armino Santos<sup>1</sup>, Hudson R. Ferreira<sup>1</sup>, Luiz C. Meira-Belo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Brasil

<sup>2</sup>Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Belo Horizonte, Brasil.

### Resumo

Os detectores de radiação  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> monocristalinos com defeitos aniônicos, crescidos pelo método Czochralski, são amplamente utilizados para monitoração pessoal e de área. Uma metodologia para produção de cerâmicas policristalinas  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> baseadas no método sol-gel foi desenvolvida em nosso grupo de pesquisa. Estas cerâmicas foram estudadas tanto por luminescência estimulada termicamente quanto por luminescência estimulada opticamente e são utilizadas para monitoração de área em nosso instituto. Ao contrário dos detectores monocristalinos, os detectores de cerâmica utilizados neste estudo possuem baixa translucência, o que facilita a discriminação entre campos de radiação beta e de fótons. Um estudo comparativo de simulação foi feito por meio do código *Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPx)*, onde fontes de <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y e de <sup>137</sup>Cs foram modeladas, assim como a geometria do dosímetro termoluminescente em questão, para estimar a deposição de energia em profundidade no detector, que depende das características da radiação do campo incidente.

**Palavras-chave:** Detectores cerâmicos  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; discriminação de campos; termoluminescência; dosimetria das radiações.

### Abstract

Anion defective single crystal detectors  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown by the Czochralski method are widely used for personal and area monitoring. A methodology for production of polycrystalline  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics based on the sol-gel method was developed in our research group. These ceramics were studied by both thermally and optically stimulated luminescence, and they are used for area monitoring in our institute. Unlike single crystal detectors, the ceramic detectors used has low translucency, which facilitates discrimination between beta radiation fields and foton fields. A comparative simulation study was done by the Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPx) code, where the sources of <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y and <sup>137</sup>Cs were modeled, as well as the geometry of the thermoluminescent dosimeter in question, to estimate the energy deposition in depth in the detector, which may vary according to the characteristics of the incident radiation.

**Keywords:** medical ceramics  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> detectors; field discrimination; termoluminescence; radiation dosimetry.

## 1. Introdução

A dosimetria das radiações é essencial em aplicações que fazem uso de radiações ionizantes e que necessitam de proteção radiológica. Para que isso ocorra é necessário avaliar as doses absorvidas envolvidas na prática.

O processo de medição dessas radiações tem enorme importância em diversas áreas que fazem uso destes fenômenos para pesquisa e desenvolvimento na área nuclear e áreas correlatas. Para este fim, são empregados diferentes tipos de dosímetros, levando-se em conta as vantagens e desvantagem de cada tipo, sendo mais comuns as câmaras de ionização, filmes dosimétricos, dosímetros por luminescência térmica e opticamente estimulada (TLD e OSLD) e semicondutores.

Neste trabalho fizemos uso de detectores cerâmicos de alumina  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, produzidos no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), para investigar a influência da geometria no posicionamento do detector no momento da irradiação e da leitura, na avaliação da dose absorvida.

Considerando que a transferência linear de energia (LET) para a irradiação Beta é apreciavelmente menor se comparada a fontes Gama de energia próxima, foi feita a comparação do resultado da irradiação e leitura na mesma face e em faces invertidas, utilizando os detectores cerâmicos de alumina.

### 1.1. Dosimetria Luminescente

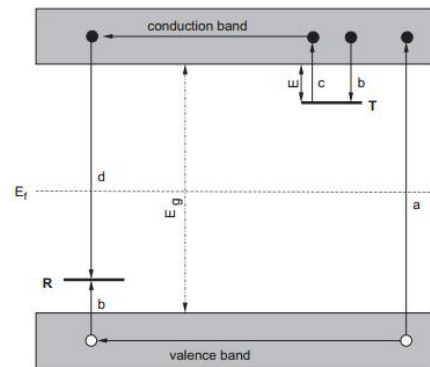
Os detectores luminescentes baseados nos efeitos de luminescência estimulada por processos térmicos (TSL) ou ópticos (OSL) pode ser explicada por meio do modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons em sólidos. Certos materiais quando aquecidos, após serem previamente expostos a campos de radiação ionizante, podem apresentar efeitos de luminescência. Esses materiais em geral são cristais isolantes, 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, conhecida como banda proibida<sup>1</sup>.

A termoluminescência (TL) é um fenômeno luminescente essencialmente diferente da incandescência. Enquanto a incandescência relaciona-se à emissão de radiação de corpo negro por materiais aquecidos a altas temperaturas, da ordem de poucos milhares de Kelvin, a emissão termoluminescente ocorre a temperaturas relativamente baixas, da ordem de centenas de Kelvin. Além disso, a emissão de luz por incandescência é um processo contínuo que perdura enquanto o aquecimento for mantido e pode ser repetida indefinidamente apenas repetindo ciclos de aquecimento-resfriamento. Contrariamente, a termoluminescência é um evento único, de duração limitada às condições de aquecimento. Para que o fenômeno se repita é condição necessária que o material seja novamente irradiado. Depois deste material ter absorvido energia do campo de radiação, se ele for aquecido a temperaturas suficientemente elevadas é novamente emitida luz, e a intensidade de luz emitida é diretamente proporcional à quantidade de radiação absorvida<sup>1</sup>.

De acordo com a teoria de bandas de energia, sabe-se que em um material semiconductor ou isolante, os elétrons residem na banda de valência e o seu modelo descreve a existência de uma banda com energia superior à de valência, conhecida como banda de condução (Figura 1). Entre estas bandas existe um intervalo no qual, em condições ideais, não há níveis de energia acessíveis a elétrons. Daí sua denominação de banda proibida. Os elétrons que se encontram na banda de valência de um material TL, quando absorvem energia na forma de radiação ionizante são excitados e, eventualmente, podem ocupar níveis de energia da banda de condução do material, deixando um portador de carga complementar ou buraco. Após o tempo característico da banda de condução deste material, o elétron sofre processos de relaxação por meio do qual pode transitar de volta à banda de valência. Isto é verdade para um cristal idealizado, no entanto, cristais reais apresentam defeitos em sua estrutura cristalina como vacâncias aniônicas e catiônicas e presença de íons intersticiais ou substitucionais intrínsecos ou extrínsecos. A existência de tais defeitos pode induzir níveis de energia na banda proibida e tais níveis podem atuar como armadilhas de portadores de carga ou como centros de recombinação. Elétrons da banda de valência, na vizinhança de armadilhas com afinidade por cargas negativas podem ser confinados por longos períodos de tempo. Reciprocamente, o buraco deixado na banda de valência pode ser ocupado por um elétron proveniente de um tipo de defeito na rede cristalina, conhecido com armadilha de buracos. Efetivamente é como se o buraco tivesse sido capturado. Quando o material TL é aquecido, os elétrons confinados podem absorver energia suficiente para então retornar à banda de condução e desta transitar para a banda de valência, retornar a uma armadilha de elétrons ou decair para uma armadilha de buracos, onde ocorrerá a recombinação do par elétron-buraco. Neste modelo, uma armadilha atua como centro

luminescente quando a probabilidade de recombinação é maior que a probabilidade de confinamento de portadores de carga<sup>2</sup>.

Figura 1. Modelo de energia de bandas.



Fonte: BOS, Adrie (2006).

No diagrama do modelo apresentado acima, vemos as transições eletrônicas de um material termoluminescente de acordo com o modelo de dois níveis, onde os círculos escuros representam elétrons e os círculos claros representam lacunas ou buracos. Em (a) ocorre a geração de pares elétron-buraco; (b) armadilhas de elétrons e buracos; (c) liberação de elétrons devido à estimulação térmica; (d) recombinação. O nível T representa armadilhas de elétrons, o nível R representa o centro de recombinação,  $E_f$  é o nível de Fermi e  $E_g$  é a energia da banda proibida<sup>2</sup>.

O mesmo modelo pode ser usado para descrever a emissão por luminescência opticamente estimulada (OSL). A exemplo da TL, a OSL corresponde à emissão luminescente de um isolante ou semiconductor quando exposto à luz em uma determinada faixa de comprimentos de onda, após ter sido irradiado. A intensidade do sinal OSL é proporcional à dose de radiação absorvida pelo detector. Embora o processo seja similar ao da termoluminescência, este difere quanto à forma de estimulação: ao invés da estimulação térmica, na OSL os defeitos são estimulados por meio óptico<sup>3</sup>.

A resposta OSL em função do tempo depende da maneira como foi feita a estimulação óptica da amostra. Sendo os principais modos de estimulação a onda contínua (*contínuos wave - CW-OSL*), a modulação linear (*linear modulation LM-OSL*) e a pulsada (*Pulsed P-OSL*)<sup>3</sup>.

### 1.2 Transferência Linear de Energia (LET)

A transferência linear de energia (*Linear Energy Transfer - LET*) provém da perda média de energia de uma partícula carregada por colisão, por unidade de comprimento. O poder de freamento (*Stopping Power*) é a resposta do meio material sobre a partícula, enquanto o LET expressa o efeito que a partícula causa no meio material (TAUHATA, 1999).

Em relação ao LET, as radiações ionizantes podem ser divididas em dois grupos, a saber: partículas de baixo LET e partículas de alto LET. As partículas de baixo LET são aquelas que causam pouca ionização

no meio material. Sendo as principais delas os raios X, raios  $\gamma$ ,  $\beta^+$  e  $\beta^-$ .

O grupo de partículas de alto LET é constituído por partículas que possuem um alto poder de ionização no meio, os principais exemplos destas as partículas  $\alpha$  e íons pesados<sup>4</sup>.

## 2. Materiais e Métodos

Todas as medidas luminescentes foram feitas utilizando um leitor RISØ TL/OSL DA-20 instalado no Laboratório de Dosimetria Luminescente da Seção de Dosimetria das Radiações LDL/SECOS/CDTN (Figura 2). As irradiações em feixe beta foram feitas com a fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  incorporada ao leitor<sup>5</sup>.

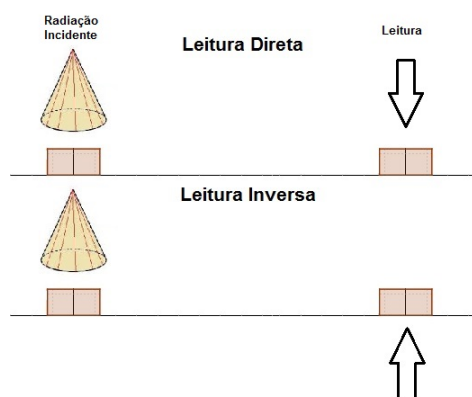
Figura 2. Leitor RISØ TL/OSL Modelo DA-20.



Fonte: Manual RISØ (2010).

Para a realização dos ensaios foi utilizado um grupo de 10 detectores previamente selecionados e preparados para uso (pré-irradiados e recozidos). Em seguida, cada um dos 10 detectores foi irradiado durante 1 segundo usando a fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  do próprio leitor, que corresponde a 12,5 mGy. A seguir, os detectores foram lidos com uma taxa de aquecimento de 5°C/s, sob fluxo de nitrogênio. A faixa utilizada de temperaturas foi de 25°C até 375°C. O mesmo procedimento de irradiação e leitura foi repetido, no entanto, os detectores foram lidos do lado oposto ao da incidência da radiação, como representado na Figura 3.

Figura 3. Esquema de leituras diretas e inversas.



Fonte: O autor (2019).

Para a leitura OSL foi utilizado estimulação por luz azul (CW-OSL) e um filtro Hoya U-340. Da mesma forma que para TL, realizamos leituras OSL direta e

inversa, ou seja, irradiação e leitura na mesma face e a seguir irradiação e leitura em faces opostas. O tempo de irradiação com a fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  foi o mesmo do caso de medidas TL, porém após as leituras OSL os detectores foram recozidos a 375°C a fim de limpar sinais de luminescência residuais.

Por fim, repetimos todos os ensaios anteriores substituindo a fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  por uma fonte Gama de  $^{137}\text{Cs}$  instalada no Laboratório de Calibração de Dosímetros LCD/SECOS/CDTN. A análise dos dados obtidos com os experimentos acima mencionados foi feita utilizando ferramentas estatísticas. Além dos dados obtidos experimentalmente, também foram realizadas simulações computacionais utilizando o código *Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPx)*.

## 3. Resultados

### 3.1 Análise das Leituras Luminescentes

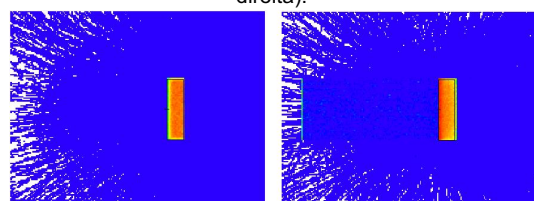
Uma característica específica dos detectores cerâmicos de óxido de alumínio produzidos no CDTN pelo processo sol-gel é sua baixa translucência, característica esta que foi de fundamental importância para a realização do presente estudo. Desse modo foi possível evidenciar a influência de fatores geométricos de posicionamento relacionados à irradiação com a fonte  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . A diferença entre a irradiação e leitura na mesma face e a irradiação e leitura em faces opostas foi de aproximadamente 35%, isto é, quando se realiza a leitura na face inversa à face de radiação incidente há uma diminuição da resposta termoluminescente.

Os resultados obtidos para irradiação com fonte de  $^{137}\text{Cs}$  não apresentaram diferenças significativas, não necessitando, portanto, definir o lado de realização da leitura. A diferença entre a irradiação e a leitura na mesma face e a irradiação e leitura na face inversa foi de aproximadamente 2%.

### 3.2 Análise das Simulações em MCNPx

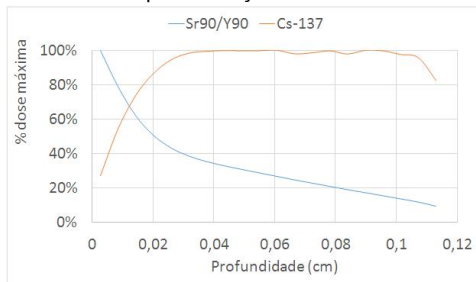
As simulações pelo método de Monte Carlo foram realizadas para se obter a relação da dose em profundidade nos detectores para ambas as fontes até então estudadas. Pode-se observar na Figura 4 que para a fonte de radiação gama a deposição de energia se dá a partir de uma espessura inicial (efeito de *Build-up*), e para a fonte de radiação beta, a deposição de energia em profundidade fica mais concentrada na face mais próxima à fonte. Essas informações são indicadas pela coloração avermelhada no detector simulado, que representa a região de maior deposição de energia no detector.

Figura 4. Modelagem para  $^{137}\text{Cs}$  (à esquerda) e  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  (à direita).



Fonte: O autor (2019).

**Figura 5.** Gráfico de Dose Absorvida em função da profundidade do TLD para radiação Beta e Gama.



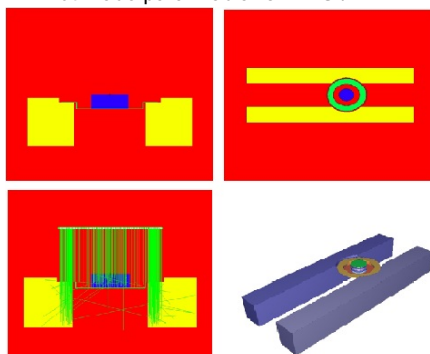
Fonte: O autor (2019).

Em seguida, foi simulado o empilhamento de dois detectores para analisar como a dose em profundidade se modificaria para uma espessura duas vezes maior. (Figura 5)

Além disso, foram modeladas também as condições experimentais específicas, tais como a geometria do carrossel do leitor, onde as amostras são irradiadas e lidas, e também o suporte onde as amostras são colocadas quando irradiadas com a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ .

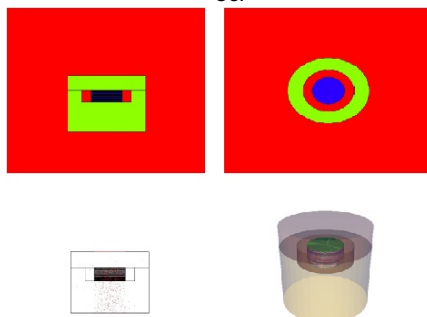
As Figuras 6 e 7 representam as geometrias simuladas para ambas as situações.

**Figura 6 .** Modelagem para o sistema de carrossel do leitor RISØ utilizado para irradiar em  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ .



Fonte: O autor (2019).

**Figura 7.** Modelagem para o suporte utilizado para irradiar em  $^{137}\text{Cs}$ .



Fonte: O autor (2019).

A altura dos dois detectores empilhados é de 0,20cm e o raio dos detectores é de 0,23 cm. A simulação avaliou 40 subdivisões no cilindro (detector simulado).

## 4. Discussão

Os resultados obtidos para as simulações mais uma vez nos mostraram que quando se trata de radiação beta, a dose em profundidade e a energia máxima depositada decrescem exponencialmente, resultando em uma diferença de leitura de cerca de 30%. Este resultado tem relação com a interação das radiações em estudo com o detector e não com a resposta do detector, ou seja, resposta TL. Além da deposição de dose diminuir exponencialmente em função da profundidade do detector, para radiação beta, pode ocorrer interações que tornem a intensidade de luz ainda menor. Portanto, a simulação permite inferirmos apenas sobre como a radiação se comporta nesse material e não o tanto que esse material responde.

## 5. Conclusões

Utilizando detectores cerâmicos de óxido de alumina que são naturalmente opacos, foi possível determinar a dependência da avaliação da dose absorvida com fatores geométricos de posicionamento relacionados à irradiação com a fonte  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . A diferença entre a irradiação e leitura na mesma face e a irradiação e leitura em faces opostas para o ensaio experimental foi de 35%.

Deste modo, a medida do sinal TL na face oposta à face de irradiação (leitura inversa) é 35% menor quando comparada à leitura direta (irradiação e leitura na mesma face do detector). Utilizando-se esta característica dos detectores cerâmicos usados neste trabalho, foi possível diferenciar a irradiação em campos beta  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  de campos gama de  $^{137}\text{Cs}$ , sem a utilização de filtrações ou algoritmos complexos, apenas mediante a comparação entre leituras direta e inversa relativas à direção de incidência da irradiação.

Para as simulações com empilhamento de dois dosímetros obtivemos uma deposição de dose na face oposta cerca de 30% menor que para a deposição na face da radiação incidente.

Diante destes resultados, podemos concluir que há necessidade de se definir as faces dos dosímetros no momento da leitura quando se trata de radiação diretamente ionizante, como para radiação Beta.

As diferenças das leituras nas duas faces para irradiação com fonte Gama foram pouco significantes, tanto experimentalmente quanto através das simulações, sendo avaliadas em torno de 2%.

## Agradecimentos

Agradecemos ao CDTN/CNEN pela estrutura que possibilitou a realização deste estudo. Agradecemos aos órgãos de fomento, CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro parcial.

## Referências

1. McKeever SW. Thermoluminescence of solids. vol. 3. Cambridge University Press; 1988.
2. Bos A. Theory of thermoluminescence. Radiation measurements. 2006; 41:S45-S56.
3. Bøtter-Jensen L, McKeever SW, Wintle AG. Optically stimulated luminescence dosimetry. Elsevier; 2003.
4. Tauhata L, Salati IP, Di Prinzio R, Di Prinzio A. Radioproteção e dosimetria. IRD/CNEN, Rio de Janeiro.
5. RISØ T, Manual OU. Guide to "The RISØ TL/OSL Reader". RISØ DTU Denmark. 2010.

## Contato:

Autor Correspondente: Anna Luiza Fraga da Silveira  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear,  
CDTN/CNEN, Seção de Dosimetria das Radiações -  
SECDOS.

Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627  
Cidade Universitária – UFMG, 31270901 - Belo  
Horizonte, MG – Brasil.  
E-mail: [anna.silveira@cdtn.br](mailto:anna.silveira@cdtn.br)

Ana Clara Camilo Bernacci  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais  
Rua Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico,  
30535-901, Belo Horizonte - MG.  
E-mail: [ana.bernacci@sga.pucminas.br](mailto:ana.bernacci@sga.pucminas.br)

Bruno Melo Mendes  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear,  
CDTN/CNEN, Seção de Dosimetria das Radiações -  
SECDOS.  
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627  
Cidade Universitária – UFMG, 31270901 - Belo  
Horizonte, MG – Brasil.  
E-mail: [bmm@cdtn.br](mailto:bmm@cdtn.br)

Armindo Santos  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear,  
CDTN/CNEN.  
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627  
Cidade Universitária – UFMG, 31270901 - Belo  
Horizonte, MG – Brasil.  
E-mail: [santosa@cdtn.br](mailto:santosa@cdtn.br)

Hudson Rubio Ferreira  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear,  
CDTN/CNEN.  
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627  
Cidade Universitária – UFMG, 31270901 - Belo  
Horizonte, MG – Brasil.  
E-mail: [Rubioh57@gmail.com](mailto:Rubioh57@gmail.com)

Luiz Cláudio Meira Belo  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear,  
CDTN/CNEN, Seção de Dosimetria das Radiações -  
SECDOS.  
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627  
Cidade Universitária – UFMG, 31270901 - Belo  
Horizonte, MG – Brasil.  
E-mail: [lcmb@cdtn.br](mailto:lcmb@cdtn.br)