

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA

22

SBI-IFUSP



305M810T1408

DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE SÓLIDO DE  
TETRABORATO DE SÓDIO E FLUORITA BRASILEIRA  
SENSÍVEL A NÊUTRONS TÉRMICOS



LUCIANO FRATIN

*Luciano Fratin*  
*Lucia Teixeira da Cruz*  
*Otávio de Sena*

---

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO  
INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE DE  
SÃO PAULO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS.

---

ORIENTADORA:

PROF<sup>ª</sup> DR<sup>ª</sup> MARÍLIA TEIXEIRA DA CRUZ

*Defesa em 28/06/88*

SÃO PAULO  
1988

535.356

F 844 d

M

e.2

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação  
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

*Fratin, Luciano*

*Dosímetro termoluminescente sólido de tetraborato de sódio e fluorita brasileira sensível a nêutrons térmicos. São Paulo, 1988.*

*Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Departamento de Física Nuclear.*

*Área de Concentração: Física Nuclear.*

*Orientador: Profª Drª Marília Teixeira da Cruz.*

*Unitermos: 1. Dosimetria de nêutrons; 2. Termoluminescência; 3. Fluorita.*

USP/IF/SBI - 26/88

## AGRADECIMENTOS

À Marília, cuja orientação e convívio proporcionou-me um significativo amadurecimento profissional.

A Mauro da Silva Dias, Marina Koskinas e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) pelas medidas realizadas no Laboratório de Metrologia Nuclear.

Ao Instituto de Radioterapia Oswaldo Cruz pelo uso que fiz de seus aparelhos.

A Mauricio Moralles pelas medidas realizadas no Laboratório do Acelerador Linear de Elétrons do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

À Emico a quem também devo meu amadurecimento profissional.

A Carlos Roberto Marques pela confecção das figuras que ilustram este trabalho.

Ao Iran pelo inestimável serviço de datilografia.

A todos os colegas e agregados do Laboratório de Dosimetria que proporcionaram um ambiente de trabalho agradável, acolhedor e motivador, onde o ser humano é mais importante.

Finalmente ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.



## R E S U M O

O fenômeno da termoluminescência tem sido aplicado amplamente em dosimetria. As propriedades de muitos fósforos são já conhecidas, especialmente no que se refere à resposta à radiação X, gama e elétrons. Alguns deles têm sido usados na dosimetria de nêutrons, sendo o fluoreto de lítio, fabricado pela Harshaw Chemical Co. com as denominações TLD-100, TLD-600 e TLD-700, o mais sensível.

Estudaram-se neste trabalho as técnicas de compactação de misturas de tetraborato de sódio e fluorita natural, visando a produção de um dosímetro sólido sensível a nêutrons térmicos. O processo de produção dos dosímetros compreende a vitrificação do tetraborato de sódio, a trituração, mistura, prensagem a frio e a sinterização das pastilhas.

A escolha do tetraborato de sódio como aglutinante foi feita porque tal substância contém boro, cujo isótopo  $^{10}\text{B}$  (abundância natural de 19,8%) apresenta secção de choque de reação com nêutrons de 3840 barns.

Foi montado um arranjo especial para irradiação onde parafina foi usada como moderador dos nêutrons provenientes de uma fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

Duas proporções de misturas de tetraborato de sódio com fluorita apresentaram resposta linear à fluência de nêutrons térmicos na faixa de 1,0 a  $7,0 \times 10^8 \text{ n}_t \text{ cm}^{-2}$ .

Foram também produzidos dosímetros sólidos de misturas de fluorita natural e cloreto de sódio que apresentaram resposta à radiação gama similar à dos dosímetros sensíveis a nêutrons. Tais dosímetros são necessários, pois é preciso identificar a proporção da resposta termoluminescente devida à radiação gama sempre presente num campo de nêutrons.

## ABSTRACT

The phenomenon of thermoluminescence has been extensively applied in dosimetry. The properties of several phosphors are known, especially in regard to their response to X and gamma radiation and electrons. Some of them have been used in neutron dosimetry; the lithium fluoride manufactured by Harshaw Chemical Co. denominated TLD 100, TLD 600 and TLD 700 is the most sensitive.

The techniques of compacting sodium tetraborate and natural fluoride mixtures were studied in this work, with the aim of producing a solid dosimeter sensitive to thermal neutrons. The production procedure involves the vitrification of the sodium tetraborate, the grinding, mixture, cold pressing and the sinterization of the pellets. The sodium tetraborate was chosen as a binder because this substance contains boron, whose isotope  $^{10}\text{B}$  (natural abundance of 19.8%) presents a neutron reaction cross section of 3840 barns.

A special arrangement was built for irradiation where paraffin was used as moderator for neutrons from a  $^{241}\text{Am}$ -Be source.

Two different mass ratios of sodium tetraborate and fluorite showed a linear thermoluminescent response to the neutron fluence in the range of 1.0 to  $7.0 \times 10^8 \text{ n}_t \text{ cm}^{-2}$ .

Solid dosimeters, manufactured from natural fluorite and sodium chloride, showed a response to gamma radiation similar to the response of the dosimeters sensitive to neutrons. These dosimeters are need to identify the proportion of thermoluminescent response due to gamma radiation present in a neutron field.

## Í N D I C E

### "DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE SÓLIDO DE TETRABORATO DE SÓDIO E FLUORITA BRASILEIRA SENSÍVEL A NÊUTRONS TÉRMICOS"

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos do Trabalho.....	6
2. TERMOLUMINESCÊNCIA.....	8
2.1. Termoluminescência e suas Propriedades.....	8
2.2. Compreensão do Fenômeno da Termoluminescência.....	13
2.2.1. Compreensão da TL com base na Teoria de Bandas.....	13
2.2.2. Compreensão da TL com base no Modelo de Coordenadas Configuracionais.....	15
3. ANÁLISE QUALITATIVA DA INTERAÇÃO DOS NÊUTRONS COM A MATÉRIA.....	17
3.1. Secção de Choque.....	17
3.2. Classificação das Reações com Nêutrons.....	18
3.2.1. Reações de Núcleo Composto.....	18
3.2.2. Reações Diretas.....	19
3.3. Dependência da Secção de Choque com a Energia dos Nêutrons e com o Número Atômico dos Núcleos Alvo.....	20
3.3.1. Classificação dos Nêutrons em Intervalos de Energia.....	20
3.3.2. Distinção entre Núcleos.....	23
3.4. Fonte de Nêutrons Utilizada.....	25
3.4.1. Espectro de Energia dos Nêutrons.....	25
3.5. Moderação de Nêutrons.....	27
3.6. Interação dos Nêutrons Térmicos com os Elementos Constituintes dos Dosímetros Utilizados.....	29
4. MATERIAIS, MÉTODOS DE PRODUÇÃO E DE UTILIZAÇÃO DOS DOSÍMETROS.....	34
4.1. Materiais Utilizados.....	34
4.2. Produção dos Dosímetros de Fluorita.....	36
4.2.1. Produção dos Dosímetros Termoluminescentes Sólidos Sensíveis a Nêutrons Térmicos.....	37
4.2.2. Obtenção de um Dosímetro de $\text{CaF}_2$ : natural com NaCl que apresente Sensibilidade à Radiação Gama Similar àquela apresentada pelos Dosímetros de $\text{CaF}_2$ : natural com $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ .....	39
4.3. Números Atômicos Efetivos dos Dosímetros Produzidos.....	40
4.4. Recozimentos Realizados nos TLDs; Utilização e Reutilização dos Dosímetros.....	42
5. TÉCNICAS DE IRRADIAÇÃO E DE LEITURA DA TERMOLUMINESCÊNCIA.....	43
5.1. Aparelho Leitor de Termoluminescência.....	43
5.2. Técnicas de Irradiação.....	46

5.2.1.	Sistema de Irradiação para Seleção dos Dosímetros de acordo com sua Resposta TL à Radiação Gama.....	46
5.2.2.	Sistemas de Irradiação Empregados para o Levantamento das Curvas de Dependência Energética dos TLDs.....	47
5.2.3.	Sistemas de Irradiação em Nêutrons.....	49
5.2.3.1.	Espessura de Parafina Utilizada para Termalização dos Nêutrons Oriundos da Fonte de <sup>241</sup> Am-Be.....	54
6.	PROPRIEDADES TERMOLUMINESCENTES DOS DOSÍMETROS PRODUZIDOS. RESPOSTAS A RADIAÇÃO GAMA E NEUTRÔNICA.....	55
6.1.	Resposta TL à Radiação Gama dos Dosímetros Produzidos.....	55
6.1.1.	Curvas de Emissão TL num Campo de Radiação Gama.....	55
6.1.2.	Resposta TL à Radiação Gama.....	55
6.1.3.	Dependência Energética.....	61
6.2.	Resposta TL dos Dosímetros Produzidos num Campo Neutrônico.....	65
6.2.1.	Curvas de Emissão TL num Campo Neutrônico.....	65
6.2.2.	Verificação de Sensibilidade à Nêutrons.....	65
6.2.3.	Curva de Sensibilidade à Nêutrons Térmicos.....	75
6.2.4.	Determinação do Fluxo de Nêutrons Térmicos na Posição dos TLDs no Arranjo Final Utilizado para o Levantamento da Curva de Sensibilidade à Nêutrons Térmicos.....	80
7.	CONCLUSÕES.....	83
	Sugestões para Futuros Trabalhos.....	85
	Referências Bibliográficas.....	87

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1. Introdução

A dosimetria de nêutrons é bastante complexa, tendo em vista os processos de interação dos nêutrons com o meio material. Nessas interações distinguem-se processos de espalhamento e de absorção, que resultam em recuo dos núcleos alvo, partículas carregadas aceleradas e raios gama.

As secções de choque que quantificam essas interações dependem da energia dos nêutrons, ou seja, os efeitos das interações dos nêutrons num detetor dependerão do seu espectro de energia.

Assim, um dosímetro deve possibilitar a determinação do espectro de energia dos nêutrons ou ter uma resposta em função da energia semelhante à resposta do corpo humano, sistema sobre o qual fundamenta-se a proteção radiológica.

A dosimetria de nêutrons vem sendo realizada através de dosímetros pessoais e de área.

Lembre-se, entretanto, que quando uma pessoa entra num campo neutrônico, a sua presença modifica não só o espectro dos nêutrons mas também o das radiações que os acompanham. Assim, correções devem ser feitas quando se quiser inferir a dose recebida por um trabalhador através da medida fornecida por um dosímetro de área.

Os dosímetros empregados na dosimetria de área dividem-se em quatro categoriais<sup>(1)</sup>: monitores de nêutrons térmicos, monitores de nêutrons rápidos, espectrômetros e detetores tipo moderador com resposta em energia semelhante à curva de resposta apresentada pelo corpo humano.

Na detecção de nêutrons térmicos as técnicas empregadas são a ativação de folhas metálicas (utilizando ouro, índio, disprósio, manganês e cobre), contadores proporcionais a gás utilizando em geral  $\text{BF}_3$  e He, detetores de cintilação empregando cristais de LiI e dosímetros sólidos termoluminescentes.

Os detetores de nêutrons rápidos utilizam o espalhamento desses nêutrons pelo hidrogênio em câmaras de ionização, contadores proporcionais e cintiladores.

Detetores tipo moderador consistem de detetores de nêutrons térmicos envoltos em esferas ou cilindros moderadores cujas dimensões são selecionadas para que a resposta do monitor seja a mais próxima possível da resposta dada pelo corpo humano.

A espectrometria de nêutrons é realizada principalmente por cintiladores e contadores proporcionais hidrogenados. Também é comum o uso de detetores de nêutrons térmicos envoltos por substâncias moderadoras.

Na monitoração pessoal, as técnicas ora empregadas envolvem emulsões nucleares, detetores de traços e dosímetros sólidos termoluminescentes (TLDs) de emprego marcante na dosimetria de nêutrons albedo.

As emulsões nucleares<sup>(1)</sup> consistem essencialmente de uma fina camada de material gelatinoso, contendo uma suspensão de haleto de prata, depositado sobre um suporte. Traços de prótons de recuo são reduzidos quimicamente a grãos de prata metálica que podem ser contadas num microscópio. Esses detetores são insensíveis a nêutrons de energia inferior a 0,5 MeV.

Os dosímetros detetores de traço<sup>(2)</sup>, cada vez mais empregados, utilizam os danos causados num meio isolante por partículas carregadas originadas na interação dos nêutrons com esse meio. Os danos são atacados química ou eletroquimicamente por soluções cáusticas originando traços que são visíveis sob baixa magnificação. As partículas carregadas podem ser produzidas no interior do detetor ou em materiais radiadores adjacentes detetando nêutrons através de reações de fissão (n,f), reações (n, $\alpha$ ) e (n,p) e recuo de prótons e partículas pesadas.

A detecção de nêutrons por meio de dosímetros sólidos termoluminescentes (TLDs) é facultada pela presença nestes ou no meio que os envolvem de elementos que possuam elevada secção de choque de interação para nêutrons. Dessa forma, propriedades de materiais termoluminescentes (TL), bem como de conversores (n, $\alpha$ ), (n,p) e (n, $\gamma$ ) têm sido utilizadas na dosimetria termoluminescente de um campo neutrônico, destacando-se as seguintes técnicas:

a) emprego de TLDs sensíveis a nêutrons térmicos e/ou lentos na dosimetria de nêutrons albedo onde são detetados os nêutrons preferencialmente térmicos retroespalhados por um meio moderador, geralmente o corpo humano. Os detetores mais empregados são o LiF e o  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Exemplificam esse método os trabalhos de Korba e Hoy<sup>(3)</sup>, Griffith et al.<sup>(4)</sup> e Piesh e Burgkhard<sup>(5)</sup>.

b) utilização de picos da curva de emissão TL dos TLDs que apresentem dependência com o tipo de radiação neles incidente, possibilitando discriminar as componentes gama e neutrônica.

Pradham et al.<sup>(6,7 e 8)</sup> usaram tal propriedade do  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  e do  $^7\text{LiF}$  na detecção de nêutrons rápidos.

c) ativação de um ou mais elementos constituintes do TLD, medindo-se a termoluminescência auto-induzida após a irradiação. Tal processo foi utilizado por Muccilo<sup>(9)</sup> que trabalhou com a fluorita brasileira,  $\text{CaF}_2$ : natural, onde o isótopo  $^{44}\text{Ca}$  é ativado por nêutrons térmicos. Posteriormente Mayhugh et al.<sup>(10)</sup> abordaram a ativação por nêutrons térmicos dos isótopos  $^{44}\text{Ca}$  e  $^{34}\text{S}$  no  $\text{CaF}_2:\text{Dy}$  e no  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . Visando a detecção de nêutrons rápidos, Mayhugh e Watanabe<sup>(11)</sup> investigaram a produção do radioisótopo  $^{32}\text{P}$  no material TL  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  através da reação  $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$  para nêutrons de 2,7MeV.

d) incorporação no dosímetro de isótopo ou substância que tenha alta secção de choque de interação com nêutrons. Os isótopos  $^6\text{Li}$  e  $^{10}\text{B}$ , que apresentam alta secção de choque para a reação  $(n,\alpha)$ , são utilizados na detecção de nêutrons preferencialmente térmicos nos dosímetros de  $^6\text{LiF}$  e  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ .

e) envolver o TLD com materiais que possuam elementos que apresentam elevada secção de choque de interação com nêutrons. O Cd é frequentemente empregado como conversor  $(n,\gamma)$  além de filtrar nêutrons com energia inferior a 0,5eV. Radiadores ou conversores  $(n,p)$  e  $(n,\alpha)$  como o  $^6\text{Li}$  e o  $^{10}\text{B}$  são também empregados. Nakajima et al.<sup>(12)</sup> elaboraram um sistema de detecção

de nêutrons térmicos através da reação  $Cd(n,\gamma)$  aplicável a vários materiais TL.

f) materiais moderadores, em geral ricos em hidrogênio, são também usados visando termalizar nêutrons rápidos, possibilitando sua detecção através de TLDs sensíveis a nêutrons térmicos, como o  ${}^6LiF$  no centro de uma esfera de Bonner<sup>(13)</sup>.

g) misturar ou envolver o material TL com substâncias hidrogenadas como açúcar, álcool, polietileno etc. para detecção de nêutrons rápidos que produzem prótons de recuo devido ao espalhamento dos nêutrons nessas substâncias. Puite<sup>(14)</sup> obteve resposta termoluminescente para nêutrons rápidos e térmicos imergindo o  $CaF_2:Mn$  em líquidos orgânicos que originavam partículas alfa e prótons de recuo.

h) emprego de TLDs cujos elementos constituintes possuam desprezível secção de choque de interação com nêutrons para que se possa determinar a componente gama do campo neutrônico. O exemplo mais clássico é o emprego do  ${}^7LiF$ , TLD 700, fabricado pela Harshaw Chemical Co.. Tal dosímetro contém 99,93% do isótopo  ${}^7Li$  que é praticamente insensível a nêutrons térmicos. O emprego do par TLD 700 - TLD 600 (este último altamente enriquecido com o isótopo  ${}^6Li$ ) num campo de nêutrons rápidos bem como o uso do TLD 700 para estimar a componente gama num campo misto com nêutrons de diversas energias foi estudado por Furuta e Tanaka<sup>(15 e 16)</sup>.

Combinação das várias técnicas também tem sido empregada. Exemplos são os trabalhos de Sahyun<sup>(17)</sup> que adicionou KBr à fluorita brasileira, visando a detecção de nêutrons térmicos pela ativação dos isótopos  $^{41}\text{K}$ ,  $^{79}\text{Br}$  e  $^{80}\text{Br}$ ; e o de Federgrun<sup>(18)</sup> que misturou óxido de disprósio ao  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . O  $^{164}\text{Dy}$  tem significativa secção de choque de ativação para nêutrons térmicos e epitérmicos.

Uma das principais dificuldades da dosimetria de nêutrons em proteção radiológica é a ampla faixa de energia<sup>(2)</sup> ( $10^{-2}$  -  $10^7$  eV) a que pertencem os nêutrons de interesse, indicando a necessidade do uso combinado de diferentes tipos de dosímetros. Uma solução paliativa para a problemática dosimetria de nêutrons pode ser o uso da dosimetria de albedo para cobrir a região de baixa energia e detetores que detetam nêutrons a partir de um certo limiar para energias altas.

## 1.2. Objetivos do Trabalho

Este trabalho insere-se entre as atividades de pesquisa de novos materiais TL e TLDs de uso específico e geral realizados pelo grupo de dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, visando contribuir para a monitoração de nêutrons.

O objetivo é produzir um dosímetro sólido termoluminescente tendo por base a fluorita brasileira,  $\text{CaF}_2$ : natural, e utilizar como aglutinante o tetraborato de sódio,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , que contém boro, cujo isótopo  $^{10}\text{B}$  possui elevada secção de choque para nêutrons térmicos devido à reação  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ .

O conhecimento de muitas das propriedades termoluminescentes da fluorita brasileira através dos trabalhos de Okuno<sup>(19)</sup>, Cruz<sup>(20)</sup> e Trzesniak<sup>(21)</sup> entre outros, levou à escolha deste material como sensor TL neste trabalho.

Para se determinar a resposta TL devida à radiação gama, sempre presente num campo neutrônico, este trabalho objetiva também a produção de um TLD que apresente desprezível sensibilidade a nêutrons e sensibilidade à radiação gama similar àquela do TLD sensível a nêutrons térmicos. Dosímetros compactados a partir de misturas de fluorita brasileira,  $\text{CaF}_2$ : natural, com cloreto de sódio, NaCl, como aglutinante podem apresentar tal comportamento no campo de nêutrons térmicos utilizado e foram por isso confeccionados.

## 2. TERMOLUMINESCÊNCIA

### 2.1. Termoluminescência e suas propriedades

A termoluminescência (TL) caracteriza-se pela liberação de energia, previamente armazenada num material, na forma de luz quando este sofre um acréscimo de temperatura. Vários agentes externos, entre eles as radiações ionizantes<sup>\*(22)</sup> podem depositar tal energia.

Um dosímetro termoluminescente (TLD) é qualquer material que apresente a termoluminescência como o parâmetro mensurável que varia com a dose absorvida<sup>\*\* (22)</sup>. Os materiais TL utilizados em dosímetros recebem o nome de fósforos termoluminescentes.

O interesse pelo uso de um dosímetro termoluminescente é consequência de algumas de suas características como:

1. dimensões reduzidas;
2. sensibilidade às radiações ionizantes em amplo intervalo de dose absorvida e/ou exposição<sup>\*\*\* (22)</sup>;
3. possibilidade de determinação da energia da radiação incidente quando se tratar de raios-X ou gama;
4. baixo custo.

\* Radiações ionizantes consistem de partículas carregadas (ex: elétrons, pósitrons, prótons ou outros íons pesados) e ou partículas não carregadas (ex: fótons ou nêutrons) capazes de causar ionização num material por processos primários ou secundários, transferindo energia para o mesmo.

\*\* Dose absorvida, D, é o quociente de dE por dm, onde dE é a energia média cedida pela radiação ionizante ao elemento de massa dm do meio.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad \text{unidade: } \text{Jkg}^{-1}$$

\*\*\* Exposição, X, é o quociente de dQ por dm onde o valor de dQ é o valor absoluto da carga total de íons de mesmo sinal produzidos no ar quando todos os elétrons (e pósitrons) liberados por fótons no elemento de massa, dm, do ar são completamente parados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad \text{unidade: } \text{Ckg}^{-1} \quad \text{unidade especial de exposição, röntgen (R): } 1\text{R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1} \text{ (exatamente)}$$

Ao se utilizar um fósforo TL na manufatura de um TLD, se faz necessário o conhecimento de sua história térmica e radioativa bem como definir seu emprego no que se refere ao tipo e dose de radiação que se queira detetar.

Destacam-se entre as características da TL as seguintes:

#### 1. Curva de Emissão TL

É o registro da intensidade de luz emitida pelo material TL em função da variação da temperatura. A forma da curva depende da taxa de aquecimento e da história térmica e radioativa do material. A curva de emissão caracteriza-se pelo aparecimento de um ou mais picos de emissão (veja itens 6.1.1. e 6.2.1). Tanto a área sob a curva de emissão quanto a altura de um dos picos (pico dosimétrico) podem ser usados para caracterizar a resposta TL.

#### 2. Espectro de Emissão TL

É o registro da intensidade de luz proveniente da TL em função do comprimento de onda da mesma. Tal espectro pode exibir muitos picos que estão relacionados com a natureza do fenômeno e com as substâncias componentes do fósforo.

### 3. Resposta TL à radiação ionizante

A curva de resposta TL de um material como função da dose de radiação absorvida ou da exposição\* é caracterizada por uma região de crescimento que pode ser sublinear, linear ou supralinear. Para doses maiores a resposta TL não se altera, definindo uma região de saturação. Acima de uma certa dose, o fósforo TL sofre danos acarretando a diminuição da resposta TL.

O conhecimento da curva de resposta TL (curva de calibração) permite o emprego do material TL em dosimetria.

### 4. Sensibilidade

A sensibilidade TL de um fósforo é definida como a quantidade de luz emitida pelo material por unidade de dose absorvida ou por unidade de exposição.

### 5. Estabilidade

A estabilidade de um fósforo TL está ligada à perda ou não da TL entre a irradiação e a leitura da resposta TL. Essa perda da TL induzida ocorre, principalmente, nos picos da curva de emissão do material que se encontram em baixas temperaturas ou em temperaturas próximas à do ambiente.

\* A grandeza exposição só é definida para fótons e sua conversão em dose absorvida é obtida conhecendo-se como se dá a absorção da energia dos fótons no meio material.

## 6. Dependência Energética

A curva de resposta TL por exposição ou dose absorvida em função da energia da radiação X e gama é conhecida como curva de dependência energética (veja item 6.1.3).

Para raios X e raios gama, os processos significativos de interação dessas radiações ionizantes com a matéria são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. O efeito fotoelétrico predomina para fótons na região de baixa energia, abaixo de 100keV, apresentando forte dependência com o número atômico do meio. O efeito Compton é predominante entre 100keV e 1MeV, e tem pequena dependência com relação ao número atômico do meio. O processo da produção de pares também depende do número atômico do meio de maneira menos pronunciada que o efeito fotoelétrico e só aparece para fótons de alta energia.

Define-se para substâncias compostas, um número atômico efetivo<sup>(23)</sup> para a região de energia onde a interação dos fótons é fortemente dependente do número atômico do meio, ou seja, para a região onde predomina o efeito fotoelétrico. Então, fósforos TL com diferentes números atômicos efetivos respondem diferentemente a fótons nessa região de energia.

## 7. Sensibilização

Refere-se a um aumento de sensibilidade do fósforo TL, conseguida por tratamentos térmicos adequados ou por submeter o material a uma exposição ou dose elevada, seguida de recozimentos convenientes.

## 8. Influência dos recozimentos

Os tratamentos térmicos são diferenciados por serem realizados antes ou depois da utilização do fósforo TL num campo de radiação. Esses tratamentos podem determinar a sensibilidade do material TL, seja ele um cristal crescido em laboratório ou natural. Deve-se observar que também os tratamentos térmicos podem causar danos irreversíveis à sensibilidade TL de um fósforo.

É, pois, importante se conhecer a história térmica e radioativa dos materiais TL e manter sempre condições adequadas de recozimento e irradiação.

## 9. Reprodutibilidade e Reaproveitamento

Se a curva de resposta TL de um fósforo com relação à exposição ou dose absorvida for reprodutível, o material pode ser reutilizado.

A reutilização de um material TL é precedida de um recozimento específico que elimina a TL anteriormente induzida. Esse recozimento não deve alterar a sensibilidade TL a fim de garantir reprodutibilidade da resposta TL para uma futura irradiação. Se a sensibilidade TL for alterada após um ou mais recozimentos, curvas de calibração e o conhecimento da história térmica do fósforo TL permitem relacionar as diferentes respostas TL.

## 2.2. Compreensão do Fenômeno da Termoluminescência

Basicamente, encara-se a termoluminescência como sendo a energia liberada na forma de luz quando portadores de carga (elétrons e buracos), ocupando níveis metaestáveis de energia em um cristal iônico, se recombinam durante um estímulo térmico. Uma abordagem qualitativa mais elaborada é feita a seguir. O tratamento matemático do fenômeno e outros modelos específicos não são visados aqui.

### 2.2.1. Compreensão da TL com base na teoria de bandas

A abordagem do potencial periódico a que um elétron fica submetido numa rede cristalina, pela mecânica quântica, conduz ao conceito de bandas de energia permitida e proibida aos elétrons do cristal<sup>(24)</sup>.

Os fósforos TL são em geral cristais iônicos, nos quais a banda de valência se encontra repleta e separada da banda de condução, vazia, por uma larga banda de energia proibida; a presença de uma impureza ou defeito na rede cristalina modifica-a localmente, ocasionando o aparecimento de níveis de energia permitidos, metaestáveis, na banda proibida denominadas armadilhas<sup>(25)</sup>.

A interação da radiação ionizante com o cristal resulta numa transferência de energia que é suficiente para fazer com que elétrons da banda de valência sejam levados para a banda de condução deixando lacunas (buracos) na banda de valência. Esses portadores de carga vagueiam pelo cristal e se não houver recombinação, eles podem ser

capturados pelas armadilhas. Esse armadilhamento tem estabilidade dependente da "profundidade" da armadilha\* na banda proibida.

Quando o cristal irradiado é estimulado térmicamente, aumenta-se a probabilidade de haver um desarmadilhamento dos portadores de carga, que livres podem ser recapturados ou desencadear recombinações elétrons (buracos) - buracos (elétrons) armadilhados. Quando o processo de recombinação for acompanhado pela liberação de energia na forma de luz obtém-se a termoluminescência e o centro responsável pela emissão de luz é denominado centro de luminescência.

A representação pictórica da termoluminescência como descrita acima está na figura 2.1.

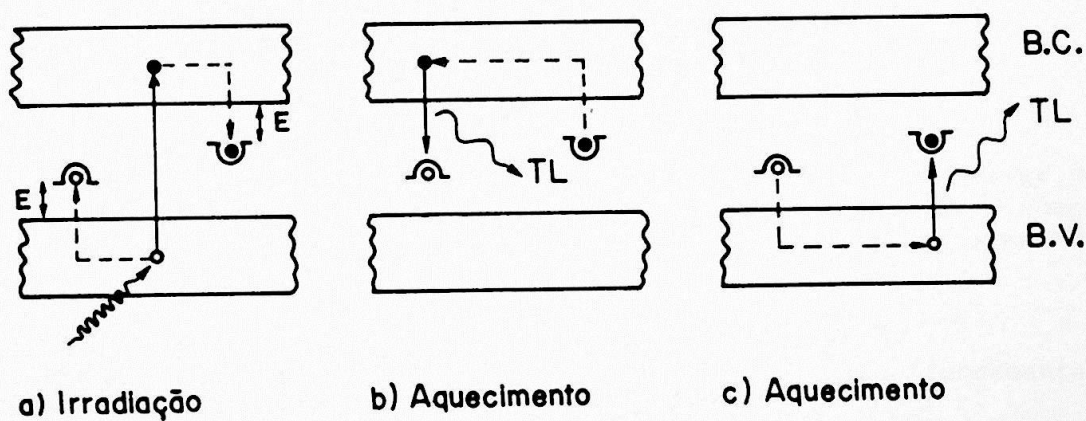


Fig. 2.1. Representação do fenômeno da termoluminescência (TL) segundo o modelo de bandas de energias num cristal. Aqui B.C. e B.V. referem-se às bandas de condução e de valência, respectivamente e E à profundidade das armadilhas.

\* Profundidade da armadilha é entendida como a separação em energia entre a banda de condução (valência) e o estado metaestável correspondente à armadilha de elétrons (buracos).

### 2.2.2. Compreensão da TL com base no modelo de coordenadas configuracionais

Considerando um centro luminescente isolado, representa-se a energia potencial de um portador de carga no sistema armadilha + rede como na figura 2.2.

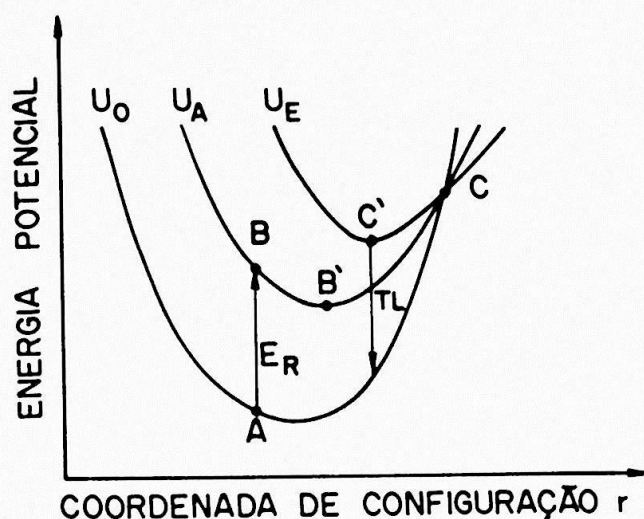


Fig. 2.2. Representação de energia potencial de um portador de carga no sistema armadilha + rede, num centro de luminescência. Adaptado de Nambi<sup>(25)</sup>. A interpretação da figura está no texto.

No diagrama  $U_A(r)$  representa o sistema no estado fundamental e  $U_E(r)$  o sistema no estado armadilhado excitado.  $U_0(r)$  representa o sistema antes de ocorrer o armadilhamento.

Quando o fósforo TL é irradiado, a radiação ionizante transfere a um portador de carga uma energia  $E_R$ , levando esta a um estado armadilhado,  $A \rightarrow B$ . Com essa nova configuração eletrônica há um rearranjo (relaxamento térmico) conduzindo o sistema a uma nova posição

de equilíbrio B', correspondendo à situação mais estável do estado fundamental armadilhado.

Um estímulo térmico leva o portador armadilhado (curva  $U_A(r)$ ) a atingir o ponto C de onde ele pode retornar ao estado anterior ao armadilhamento,  $U_0(r)$ , via relaxamento térmico sem emissão de luz, que é o processo predominante, ou passar para o estado armadilhado excitado  $U_E(r)$  de onde pode ocorrer uma transição luminescente, TL.

### 3. ANÁLISE QUALITATIVA DA INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA

#### 3.1. Secção de Choque

Se  $n$  nêutrons por unidade de volume movem-se com velocidade  $v$  em direção a  $N$  núcleos alvo, a taxa de interação,  $r$ , será dada por<sup>(26-27)</sup>:

$$r = \sigma nvN$$

O produto  $nv$  é o fluxo de nêutrons e  $\sigma$ , denominada secção de choque, relaciona o número de interações ocorridas por unidade de tempo com o fluxo de nêutrons caracterizando a probabilidade da interação ocorrer. É medida em barns ( $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

Há uma secção de choque finita para cada tipo de interação nuclear possível e esta tem forte dependência com a energia dos nêutrons. Analisando o comprimento de onda de de Broglie associado aos nêutrons, verifica-se que na região de alta energia o caráter de partícula predomina e se imagina que a interação se dá com um núcleo que seria uma esfera de raio definido. Para nêutrons de baixa energia o aspecto ondulatório predomina e a interação passa a ocorrer com um conjunto de núcleos dependendo inclusive do estado físico do meio<sup>(26-28)</sup>.

### 3.2. Classificação das Reações com Nêutrons

#### 3.2.1. Reações de núcleo composto

O nêutron incidente une-se ao núcleo alvo formando um núcleo composto excitado<sup>(26,28,29 e 30)</sup>. Verifica-se que à entrada de um nêutron corresponde um excesso de energia igual à soma da energia cinética com a energia de ligação do nêutron capturado, constituindo a energia do estado composto. A secção de choque para formação de um núcleo composto apresenta um pico, caracterizando uma ressonância, quando o nêutron tem a quantidade exata de energia para a formação do estado composto.

A cada um desses estados compostos que são níveis discretos de energia, está associado uma largura em energia<sup>(26,28,29 e 30)</sup>  $\Gamma$ , relacionada com seu tempo de vida,  $\tau$ , pelo princípio de incerteza de Heisenberg,

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

onde  $\hbar$  é a constante de Planck,  $h$ , dividida por  $2\pi$ . O inverso do tempo de vida fornece a probabilidade de transição do estado composto considerado.

O decaimento de um núcleo composto pode se dar de diversas maneiras<sup>(28)</sup>:

- 1 - Um nêutron com a mesma energia que o nêutron capturado (no referencial do centro de massa<sup>(31 e 32)</sup>) e emitido. Esse processo é chamado espalhamento elástico ou espalhamento de ressonância, (n,n).

2 - A energia de excitação de um núcleo composto é liberada por emissão de um ou vários raios gama. Esse fenômeno é chamado captura radioativa ou processo  $(n,\gamma)$ . O núcleo resultante é em geral instável, emitindo radiação  $\beta$ .

3 - Para energias de excitação suficientemente altas, o núcleo composto emite partículas carregadas ou dois nêutrons (reações  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,np)$ ,  $(n,2n)$ ).

4 - Quando um nêutron com energia cinética menor que a do nêutron incidente é emitido, o processo é chamado espalhamento inelástico. O núcleo residual permanece excitado com subsequente decaimento por emissão gama.

5 - Ocorre a fissão de um núcleo pesado.

### 3.2.2. Reações diretas

Reações nucleares podem ocorrer diretamente, ou seja, sem a formação de um núcleo composto<sup>(28)</sup>. Para a faixa de energia dos nêutrons considerada neste trabalho, a reação direta mais importante é o espalhamento elástico direto, sendo identificado por espalhamento potencial, isto é, o nêutron é espalhado por um potencial nuclear (real<sup>(28,29,31,32)</sup>) que representa a média de todas as interações com os outros núcleons.

A secção de choque total de um nuclídeo tem uma componente que varia lentamente, devida ao espalhamento potencial, e uma componente devida às reações de núcleo composto apresentando máximos nas energias de ressonância. A variação da secção de choque próxima a uma ressonância é descrita pela fórmula de Breit-Wigner<sup>(26,28,29,30)</sup>. Se as ressonâncias são muito próximas, a secção de choque para formação de um núcleo composto pode variar continuamente.

### 3.3. Dependência da Secção de Choque com a Energia dos Nêutrons e com o Número Atômico dos Núcleos Alvo

Como as secções de choque de interação dependem da energia dos nêutrons, é conveniente classificar estes últimos em intervalos de energia.

É conveniente também, fazer uma distinção entre núcleos leves, intermediários e pesados, pois o número de núcleons determina as energias de ressonância para formação do núcleo composto.

#### 3.3.1. Classificação dos nêutrons em intervalos de energia

##### 1. Nêutrons lentos e nêutrons térmicos

São nêutrons com energia menor que 1 keV. De especial interesse para este trabalho são os nêutrons térmicos que correspondem aos nêutrons que estão em equilíbrio térmico com o meio em que se

encontram inseridos. Obedecem à distribuição de Maxwell para velocidades.

De acordo com a lei de distribuição de Maxwell<sup>(28)</sup> o número de nêutrons,  $dn$ , por unidade de volume com energia,  $E$ , entre  $E$  e  $E + dE$  é

$$dn = n(E)dE = \frac{2\pi n}{(\pi kT)^{3/2}} e^{-E/kT} (E)^{1/2} dE$$

ou

$$\frac{n(E)dE}{n} = \frac{2}{(\pi)^{1/2}} \frac{e^{-E/kT}}{kT} \left(\frac{E}{kT}\right)^{1/2} \frac{dE}{kT}$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta e  $n$  é a densidade total de nêutrons. A energia média é dada por:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

Considerando  $E = \frac{1}{2} mv^2$ , a distribuição de velocidades,  $v$ ,

fica:

$$\frac{n(v)dv}{n} = \frac{4}{(\pi)^{1/2}} \frac{e^{-2kT/mv^2}}{2kT} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{1/2} dv$$

A velocidade mais provável,  $v_T$ , é dada por:

$$v_T = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \quad \text{que leva a} \quad \frac{m}{2} v_T^2 = kT = E_T$$

A distribuição do fluxo de nêutrons,  $\Phi$ , é dada por<sup>(28)</sup>:

$$\frac{\Phi(E)dE}{\Phi} = e^{-E/E_T} \frac{E}{E_T} \frac{dE}{E_T}$$

ou

$$\frac{\Phi(E)dv}{\Phi} = 2e^{-(v/v_T)^2} \left( \frac{v}{v_T} \right)^3 \frac{dv}{v_T}$$

Para  $T = 293,6\text{K}$  ( $20,4^\circ\text{C}$ ),  $E_T = 0,0253\text{eV}$  e  
 $v_T = 2.200\text{m/seg} = v_0$ .

A forma, mais importante, de interação dos nêutrons térmicos com a matéria é a captura radioativa, embora ocorram reações inelásticas muito importantes empregadas na detecção de nêutrons, como as reações  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  e  $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$  utilizadas neste trabalho.

## 2. Nêutrons intermediários

A região de energia intermediária é aqui definida como se estendendo de 1 keV a 500 keV. A secção de choque para essas energias exibe picos de ressonância e por esta razão também se emprega o termo nêutrons de ressonância. Nêutrons intermediários são obtidos pela moderação da energia de nêutrons rápidos por colisões elásticas num meio moderador.

O processo de moderação determina um fluxo de nêutrons que é inversamente proporcional à energia, ou seja, apresenta um espectro  $dE/E$ <sup>(27)</sup>. Para nêutrons intermediários, também ocorrem captura radioativa e espalhamento inelástico.

### 3. Nêutrons rápidos

São considerados nêutrons rápidos aqueles que têm energia superior a 500 keV. A interação predominante é o espalhamento potencial e a secção de choque para nêutrons rápidos varia lentamente, embora ressonâncias possam ocorrer.

Nêutrons com energia superior a 10 MeV devem ser considerados relativísticos. Suas energias excedem as energias de ligação dos núcleons e complexas reações nucleares como fragmentação tornam-se importantes. Espalhamento potencial também ocorre, sendo fortemente assimétrico no referencial do centro da massa<sup>(27)</sup>.

#### 3.3.2. Distinção entre núcleos

A distinção entre núcleos é feita considerando-se seus números de núcleons, ou seja, seus números de massa ( $A$ ) visto que deles dependem a separação média entre as energias de ressonância. Dessa forma separam-se os núcleos em leves ( $A < 25$ ), intermediários ( $25 < A < 80$ ) e pesados ( $A < 80$ ).

Os tipos de interação, dependentes das energias dos nêutrons e das massas atômicas dos núcleos, estão esquematizados na tabela 3.1.

	nêutrons lentos $E < 1 \text{ keV}$	nêutrons intermediários $1 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$	nêutrons rápidos $0,5 \text{ MeV} < E$
núcleos leves $A < 25$	espalhamento potencial	separação das ressonâncias, $D \approx 0,1 \dots 1 \text{ MeV}$ espalhamento de ressonância; reações $(n, \alpha)$ , $(n, n)$ e $(n, 2n)$	contínuo
núcleos intermediários $25 < A < 80$	espalhamento potencial	separação das ressonâncias $D \approx 1-100 \text{ keV}$ espalhamento ativo espalhamento de ressonância, captura	contínuo sobreposição de ressonâncias radioativo reações $(n, pn)$ , $(n, \alpha)$ e $(n, 2n)$ , espalhamento inelástico
núcleos pesados $A > 80$	separação das ressonâncias $D \approx 1-100 \text{ eV}$ captura radioativa	sobreposição de ressonâncias	contínuo espalhamento inelástico reações $(n, 2n)$

Tabela 3.1. Representação esquemática das interações dos nêutrons, adaptado de Berkurtz e Wirtz(28). D representa a separação média entre ressonâncias.

### 3.4. Fonte de Nêutrons Utilizada

Os nêutrons utilizados neste trabalho provêm de uma fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$ , onde ocorre a reação,  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ . O  $^{241}\text{Am}$ , o radioisótopo emissor  $\alpha$ , tem meia vida,  $T_{1/2}$ , de 458 anos.

Tal radioisótopo é disponível comercialmente na forma de óxido,  $\text{AmO}_2$ , sendo a fonte de nêutrons produzida pela compactação desse óxido com o material alvo<sup>(33)</sup>. O  $^{241}\text{Am}$  encerra todas as propriedades que são desejáveis numa fonte  $(\alpha, n)$ <sup>(33,34)</sup>, ou seja, dimensões reduzidas, alta atividade específica do emissor alfa, baixa taxa de emissão de raios gama, espectro de energia dos nêutrons reproduzível de fonte para fonte, meia vida longa e boa estabilidade mecânica. Os raios gama produzidos na fonte são devidos ao  $^{241}\text{Am}$  e tem como componente principal um gama de 60 keV.

#### 3.4.1. Espectro de energia dos nêutrons

A reação  $\text{Be}(\alpha, n)$  tem um rendimento da ordem de um nêutron para  $10^4$  partículas  $\alpha$ <sup>(34)</sup>. Essa reação dá origem a um espectro contínuo de nêutrons cujas energias dependem das energias das partículas alfa ocorrendo várias bandas de energias bem resolvidas.

Para a fonte  $^{241}\text{Am-Be}$ , a energia da alfa predominante é de 5,48 MeV<sup>(33)</sup> e seu espectro típico, obtido por Lorch<sup>(35)</sup> é o mostrado na figura 3.1.

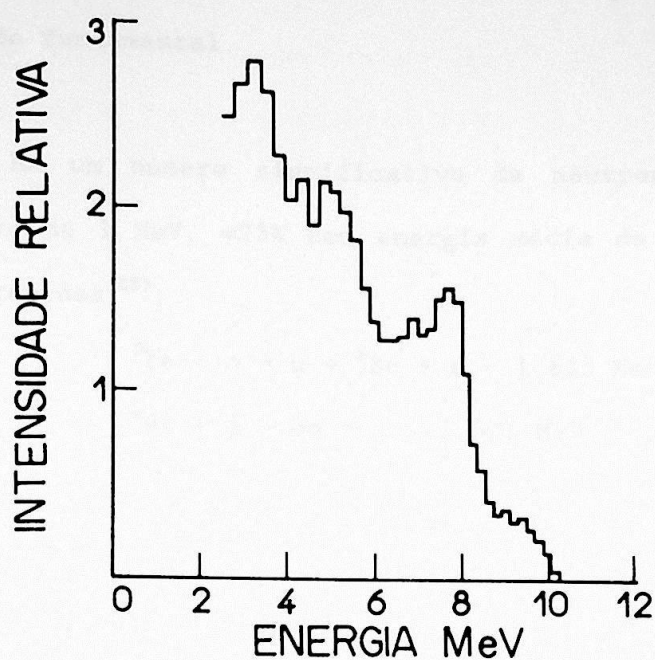


Fig. 3.1. Espectro do  $^{241}\text{Am}-\text{Be}^{(35)}$ .

A variação contínua do espectro pode ser explicada da seguinte maneira:

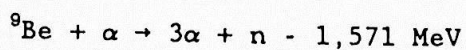
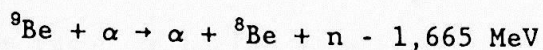
1 - Resultado da contínua perda de energia das partículas  $\alpha$  no Be, onde ocorre a reação  $(\alpha, n)^{(35)} \text{ } ^9\text{Be} + \alpha \rightarrow \text{}^{12}\text{C} + n + 5,71 \text{ MeV}$ .

2 - Para cada energia da partícula  $\alpha$ , são possíveis várias energias de nêutrons devido às diferentes direções de emissão possíveis.

3 - O núcleo produto,  $^{12}\text{C}$ , pode ser deixado em um estado excitado. Isto explica o grande número de nêutrons com energia menor que 5,71 MeV, que é a energia cinética dos nêutrons produzidos por

partículas alfa de energia cinética zero quando o  $^{12}\text{C}$  é deixado no estado fundamental.

4 - Há um número significativo de nêutrons de baixa energia, abaixo de 1 MeV,  $\approx 23\%$  com energia média de 400 keV, resultantes das reações<sup>(28)</sup>:



### 3.5. Moderação de Nêutrons

Para se caracterizar a resposta dos dosímetros utilizados a nêutrons térmicos, tornou-se necessário moderar os nêutrons provenientes da fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

A moderação é consequência das colisões, elásticas ou inelásticas, entre nêutrons e núcleos do moderador. Após vários espalhamentos sucessivos, a energia cinética dos nêutrons se aproxima da energia de agitação térmica dos núcleos, consistindo no que se chama de termalização dos nêutrons.

Enquanto há moderação, os nêutrons podem ser capturados, principalmente na região de ressonância dos núcleos do moderador. Terminando o processo de moderação, os nêutrons térmicos se difundem até serem capturados ou como também ocorre durante a moderação, escapam do meio. A captura dos nêutrons térmicos pelos núcleos do meio leva à formação de núcleos compostos que geralmente emitem raios gama.

Um bom moderador é aquele que faz com que os nêutrons percam energia sem serem fortemente absorvidos. Os bons moderadores estão entre os elementos de massa atômica baixa onde o processo de moderação se dá, principalmente, pelas colisões elásticas dos nêutrons com os núcleos do moderador.

A energia perdida por um nêutron espalhado aparece como energia cinética de recuo do núcleo espalhador. A colisão frontal de um nêutron com um núcleo, causando a máxima perda possível de energia numa colisão elástica, acarretará perda total da energia do nêutron se o núcleo alvo for o núcleo de hidrogênio. Já quando uma colisão desse tipo se der com um núcleo de carbono, a perda fracional máxima de energia sofrida será de 28%<sup>(32)</sup>.

A energia média perdida numa colisão,  $\epsilon_1$ , de um nêutron com energia cinética  $E_n$  e massa  $m$ , com um núcleo de um átomo de massa  $A_1$  é<sup>(36)</sup>:

$$\epsilon_1 = E_n \frac{2mA_1}{(m+A_1)^2}$$

Essa equação tem valor  $E_n/2$  para o hidrogênio e torna-se progressivamente menor com o aumento da massa atômica. Como já mencionado, a termalização ocorre mais rapidamente para materiais hidrogenados, onde a subsequente captura dos nêutrons térmicos pelo hidrogênio resulta na produção de raios gama de 2,2 MeV<sup>(27-36)</sup>. Esse é o caso da parafina,  $C_nH_{2n}$ , empregada como moderador neste trabalho.

### 3.6. Interação dos Nêutrons com os Elementos Constituintes dos Dosímetros Utilizados

Os dosímetros produzidos e utilizados neste trabalho, tiveram por base a fluorita brasileira,  $\text{CaF}_2$ : natural, à qual foi adicionado cloreto de sódio,  $\text{NaCl}$ , ou tetraborato de sódio,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Também foram utilizados dosímetros de fluoreto de lítio,  $\text{LiF}$ , fabricados pela Harshaw Chemical Co.. Foi assim necessário conhecer quais os tipos de interação de nêutrons térmicos que ocorrem com esses elementos.

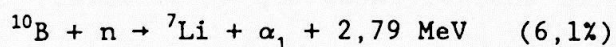
A tabela 3.2, adaptada do trabalho de Gryntakis et al.<sup>(37)</sup>, fornece a secção de choque de absorção e ativação de nêutrons térmicos para os elementos de interesse citados acima. Esses dados referem-se a nêutrons de velocidade igual a 2200m/seg, o que corresponde à energia de 0,0253 eV.

De especial interesse são as reações  $(n,\alpha)$  nos isótopos  $\text{B}^{10}$   $\text{Li}^6$ , sendo que neste último indica-se com freqüência a reação como sendo  $(n,\text{trítio})$ .

Salienta-se que o boro natural tem secção de choque de absorção de 767 barns devida ao isótopo  $^{10}\text{B}$  nele contido com abundância isotópica de 19,8%. Essa secção de choque é inversamente proporcional à velocidade do nêutron (comportamento  $1/v$ ) na região de 0 a  $10^6$  eV<sup>(38)</sup>.

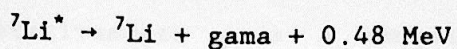
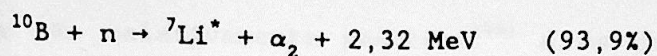
Nesse isótopo ocorrem as seguintes reações  $(n,\alpha)$ <sup>(28,32,2)</sup>

Reação 1:  $^{10}\text{B} (n,\alpha_1)$



$$E\alpha_1 = 1,78 \text{ MeV}$$

Reação 2:  $^{10}\text{B} (n, \alpha_2)$

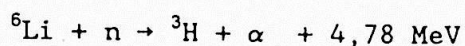


$$E\alpha_2 = 1,47 \text{ MeV}$$

onde  $E\alpha_1$  é a energia da partícula alfa,  $\alpha_1$ .

Para o lítio natural há uma secção de choque de absorção de 70,5 barns devida à reação  $(n, \alpha)$  no isótopo  $^6\text{Li}$  que apresenta abundância isotópica de 7,5% e secção de choque de absorção de 940 barns. A reação é descrita a seguir<sup>(28,32,2)</sup>.

Reação:  $^6\text{Li} (n, \alpha)$



$$E\alpha = 2,04 \text{ MeV}$$

onde  $E\alpha$  é a energia da partícula alfa.

A secção de choque para a reação  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  tem comportamento  $1/v$  na região que se estende de 0 a  $10^5$  eV, ocorrendo uma ressonância em 250 keV.

Como se pode observar na tabela 3.2., as demais reações relativas aos elementos empregados nos dosímetros utilizados, apresentam baixa secção de choque de interação para nêutrons térmicos, não devendo desempenhar papel relevante quando da exposição a nêutrons nessa faixa de energia. Salienta-se que essas reações em sua maioria de ativação, produzem raios gama de alta energia.

A possibilidade de ocorrer interação desses materiais com nêutrons de alta energia foi considerada. Todavia as secções de choque

de interação desses nêutrons com os elementos constituintes dos dosímetros são relativamente pequenas<sup>(39)</sup> e os produtos das interações não contribuirão efetivamente para a resposta TL dos dosímetros. Restringiu-se, então, o estudo à resposta TL dos dosímetros produzidos aos nêutrons térmicos.

Núcleo Alvo	Abundância (%) ou meia vida	Meia vida do núcleo A + 1	Tipo de Reação	Secção de Choque Térmica (barn)	Energia (keV) do principal Raio Gama para o núcleo A+1 (intensidade relativa %).
${}^3\text{Li}$ : natural			Ativação Absorção Ativação (n, $\alpha$ ) Ativação	0,0448 $\pm$ 0,0030 70,5 $\pm$ 0,3 0,0385 $\pm$ 0,0030 940 $\pm$ 4 0,0454 $\pm$ 0,0030	
${}^6\text{Li}$	7,5				
${}^7\text{Li}$	92,5	0,844 seg			
${}^5\text{B}$ : natural			Ativação Absorção Ativação (n, $\alpha$ ) Ativação	0,10 $\pm$ 0,09 767 $\pm$ 4 0,5 $\pm$ 0,2 3837 $\pm$ 9 0,0055 $\pm$ 0,0033	4439 (3)
${}^{10}\text{B}$	19,8				
${}^{11}\text{B}$	80,2	0,0203 seg			
${}^8\text{O}$ : natural			Ativação Ativação Ativação (n, $\alpha$ ) Ativação	(0,19 $\pm$ 0,19) $10^{-3}$ (0,190 $\pm$ 0,019) $10^{-3}$ (0,538 $\pm$ 0,065) $10^{-3}$ 0,235 $\pm$ 0,010 (0,16 $\pm$ 0,01) $10^{-3}$	110 (3) - 197 (90) 1356 (50) - 1444 (3) 1550 (2)
${}^{16}\text{O}$	99,756				
${}^{17}\text{O}$	0,039				
${}^{18}\text{O}$	0,205	27,1 seg			
${}^{19}\text{F}$ ${}^9\text{F}$	100	11,0 seg	Ativação	0,0096 $\pm$ 0,0005	1634 (100)
${}^{23}\text{Na}$ ${}^{11}\text{Na}$	100	0,02 seg* 15,03 horas	Ativação	0,530 $\pm$ 0,007	1369 (100) 2754 (100)

Tabela 3.2. continua...

Tabela 3.2. continuação...

$^{17}\text{Cl}$ : natural				Absorção	$33,5 \pm 0,3$	
$^{35}\text{Cl}$	77,75	$3,0 \cdot 10^5$ anos	$3,0 \cdot 10^5$ anos	Ativação (n,p)	$33,1 \pm 0,3$ $0,37 \pm 0,02$	
$^{36}\text{Cl}$		$3,0 \cdot 10^5$ anos		Ativação (n,p)	$43,6 \pm 0,4$	
$^{37}\text{Cl}$	24,23		1 seg*	Ativação (n, $\alpha$ )	$0,489 \pm 0,014$ $(0,08 \pm 0,04)10^{-3}$	1642 (32)
			37,19 min.	Ativação	10	2168 (44)
$^{20}\text{Ca}$ : natural				Ativação	$0,43 \pm 0,02$	
$^{40}\text{Ca}$	96,4	$1,3 \cdot 10^5$ anos	$1,3 \cdot 10^5$ anos	Ativação (n, $\alpha$ )	$0,41 \pm 0,02$ $0,0025 \pm 0,0011$	
$^{41}\text{Ca}$		$1,3 \cdot 10^5$ anos		Ativação	4	
$^{42}\text{Ca}$	0,65			Ativação	$0,630 \pm 0,070$	
$^{43}\text{Ca}$	0,14			Ativação	$6,2 \pm 0,6$	
$^{44}\text{Ca}$	2,08		165 dias	Ativação	$0,88 \pm 0,05$	
$^{45}\text{Ca}$		165 dias		Ativação	15	
$^{46}\text{Ca}$	0,003		4,54 dias	Ativação	$0,74 \pm 0,07$	489 (7) - 808 (7)
$^{48}\text{Ca}$	0,19		8,72 dias	Ativação	$1,09 \pm 0,14$	1297 (75) 3084 (92) - 4072 (7)

\* estados isômeros.

Tabela 3.2. Valores recomendados de secções de choque de absorção para nêutrons térmicos dos núclídeos componentes dos dosímetros utilizados, adaptado de Gryntakis et al. (37).

#### 4. MATERIAIS, MÉTODOS DE PRODUÇÃO E DE UTILIZAÇÃO DOS DOSÍMETROS

##### 4.1. Materiais Utilizados

Basicamente foram utilizados dois materiais termoluminescentes: o fluoreto de lítio e a fluorita brasileira de coloração verde.

##### a) fluoreto de lítio, LiF.

Os dosímetros de LiF empregados foram os denominados TLD 600 e TLD 700 fabricados pela Harshaw Chemical Co., há muito utilizados, na forma de paralelepípedos de  $3,15 \times 3,15 \times 0,85\text{mm}^3$ .

Cumprе lembrar a diferença de composição entre esses dosímetros. No TLD 600 é utilizado fluoreto de lítio enriquecido com 95,6% do isótopo  $^6\text{Li}$ , tornando-o muito sensível a nêutrons térmicos (veja sua reação característica  $(n,\alpha)$  no item 3.6). Já no TLD 700 é empregado o fluoreto de lítio contendo 99,3% do isótopo  $^7\text{Li}$  o que o torna praticamente insensível aos nêutrons aqui visados, sendo assim utilizado para a medida da componente gama do campo de nêutrons.

O emprego de dosímetros de LiF neste trabalho tem como finalidade a comparação entre os resultados experimentais obtidos.

##### b) fluorita brasileira de coloração verde proveniente de Criciúma

A escolha desse material como fósforo termoluminescente foi feita porque já se conhecem várias das suas propriedades termoluminescentes devido aos trabalhos de Okuno<sup>(19)</sup> e Cruz<sup>(20)</sup>.

Um dosímetro sólido utilizando tal fósforo e cloreto de sódio como aglutinante, desenvolvido por Trzesniak<sup>(21)</sup>, vem sendo utilizado na monitoração individual de trabalhadores submetidos à radiação gama pelo Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, local onde foi realizado este trabalho.

Como as secções de choque de interação dos componentes desse dosímetro com nêutrons é pequena (veja tabela 3.2., item 3.6.), tornou-se necessário utilizar um outro aglutinante que fosse capaz de tornar o dosímetro sensível a nêutrons térmicos.

Fez-se um levantamento das secções de choque de interação de nêutrons térmicos de diversos elementos<sup>(37)</sup>, que pudessem vir a ser misturados à fluorita, bem como a análise dos elementos comumente empregados na detecção desses nêutrons.

Optou-se então pela manufatura de um TLD compactado a partir da mistura da fluorita com tetraborato de sódio, composto este que contém boro. Tal elemento tem elevada secção de choque para a reação  $(n, \alpha)$  como descrito no item 3.6.

Para se determinar a componente gama do campo neutrônico, podem ser usados os dosímetros confeccionados com misturas de fluorita com cloreto de sódio em diferentes proporções, conforme se fizerem necessários (veja item 4.2.2.).

#### 4.2. Produção dos Dosímetros de Fluorita

A fluorita, já na granulação desejada, foi recozida a 600°C por 15 minutos com a finalidade de limpar a TL natural induzida e reduzir a sensibilidade à luz por ela apresentada. Esse recozimento é seguido de outro a 400°C por duas horas objetivando estabilizar as propriedades termoluminescentes do fósforo<sup>(21)</sup>.

O cloreto de sódio e o tetraborato de sódio (os aglutinantes utilizados para a compactação dos dosímetros), requerem cuidados especiais tanto na manipulação para a produção, quanto durante a sua utilização em dosimetria, por serem muito higroscópicos.

O tetraborato de sódio na sua forma hidratada apresenta dez águas na rede cristalina ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ). Esse composto a 75°C perde oito moléculas de água e quando atinge 320°C torna-se anidro<sup>(40)</sup>, forma na qual deve ser utilizado.

A granulação tanto da fluorita quanto dos aglutinantes foi escolhida levando-se em conta que são as partículas alfa produzidas na reação (n, $\alpha$ ) no boro que vão depositar energia na fluorita quando da irradiação dos dosímetros com nêutrons térmicos.

Utilizando-se uma regra empírica descrita por Bragg-Kleeman (com precisão dentro de 15%)<sup>(31)</sup>, estimou-se o alcance daquelas partículas alfa nos materiais de interesse (Tabela 4.1.).

Esses alcances são muito pequenos e certamente o tamanho dos grãos terá significativa influência na sensibilidade a nêutrons dos dosímetros, caso esse fato não seja levado em conta.

Grão - Substância	Energia da Partícula Alfa (MeV)	Alcance ( $\mu\text{m}$ )
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	1,758	5
	1,474	4
$\text{CaF}_2$	1,758	5
	1,474	4
ar	1,758	860.000
	1,474	720.000

Tabela 4.1. Estimativa do alcance das partículas alfa produzidas nas reações  $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ , em função de suas energias e do material em que se propagam.

Por outro lado, a sensibilidade de um fósforo TL à radiação depende de sua granulação<sup>(41)</sup>, diminuindo com a redução do tamanho dos grãos.

Outros fatores a serem levados em conta são as facilidades de se identificar uma granulação, feita através de peneiras comerciais, de se obter uma mistura homogênea e reproduzível da fluorita com seus aglutinantes, bem como a precisão dos pastilhadores.

Durante o trabalho foram utilizadas duas granulações: menor ou igual a  $74\mu\text{m}$  inicialmente e depois menor ou igual a  $37\mu\text{m}$ .

#### 4.2.1. Produção dos dosímetros termoluminescentes sólidos sensíveis a nêutrons térmicos.

No processo de fabricação dos dosímetros, estão incluídas as seguintes etapas:

#### a) Vitrificação do tetraborato de sódio

Esta etapa do processo é necessária, pois o composto é higroscópico mesmo na sua forma anidra. A vitrificação é conseguida pela fusão da substância a  $741^{\circ}\text{C}^{(40)}$  seguida pelo seu resfriamento à temperatura ambiente ao ser despejada em uma placa metálica.

#### b) Mistura e prensagem a frio

O tetraborato de sódio vítreo é triturado e peneirado. O pó resultante é adicionado, nas proporções desejadas, ao pó de fluorita, ambos com a mesma granulação pois assim, obtém-se melhor homogeneidade da mistura. Uma boa mistura é conseguida após um dia de processamento num misturador. A mistura obtida é submetida a quatro toneladas força por  $\text{cm}^2$ , num pastilhador de aço especial, resultando em pastilhas de 5,00mm de diâmetro e 0,65mm de espessura com massas  $(24\pm 2)\text{mg}$  e  $(19\pm 3)\text{mg}$  para os TLDs denominados Bo-5 e Bo-70 respectivamente (massas médias de dez pastilhas).

#### c) Sinterização

Para aumentar a rigidez e durabilidade das pastilhas, diminuindo ainda mais a higroscopicidade, processa-se uma sinterização que consiste em levar as pastilhas prensadas a frio a uma temperatura pouco abaixo do ponto de fusão de tetraborato de sódio,  $741^{\circ}\text{C}$ , durante um tempo aproximado de trinta segundos. As pastilhas resultantes têm

excelente resistência física e preservam suas características termoluminescentes.

Dessa forma, foram produzidas duas pastilhas que apresentam sensibilidade a nêutrons térmicos. Uma delas corresponde a uma mistura de 70% de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  com 30% de  $\text{CaF}_2$ :natural em massa, o que significa que esse TLD possui mais do que 70% de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  em grãos. Esse dosímetro foi denominado Bo-70. Da análise da distribuição do número de grãos de cada substância, bem como do acesso das partículas alfa produzidas num grão de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  aos grãos de  $\text{CaF}_2$ :natural, conclui-se que uma mistura de 50% em grãos de cada substância componente do TLD seria apropriada. Essa mistura corresponde a 57% de  $\text{CaF}_2$ :natural com 43% de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  em massa. Os dosímetros produzidos a partir desta última, foram denominados Bo-5.

#### 4.2.2. Obtenção de um dosímetro de $\text{CaF}_2$ :natural com NaCl que apresente sensibilidade à radiação gama similar àquela apresentada pelos dosímetros de $\text{CaF}_2$ :natural com $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Com o objetivo de discriminar a componente devido à radiação gama do campo neutrônico utilizou-se TLDs de fluorita com cloreto de sódio como aglutinante. Empregou-se durante o trabalho pastilhas que vêm sendo utilizadas normalmente no serviço de monitoração pessoal, como já mencionado, compostas de 60% de  $\text{CaF}_2$ :natural e de 40% de NaCl e granulação entre  $74\mu\text{m}$  e  $177\mu\text{m}$ . Esse TLD, foi denominado Rotina, tendo diâmetro de 5,00mm, espessura de 1,00mm e massa de  $(51\pm 1)\text{mg}$  (massa média de dez pastilhas).

Em virtude desse dosímetro apresentar uma sensibilidade à radiação gama muito maior do que aquela apresentada pelos dosímetros Bo-70 e Bo-5 sensíveis a nêutrons térmicos (veja item 6.1.2.), produziram-se novas pastilhas de fluorita com cloreto de sódio em proporções diversas e granulação menor ou igual a  $37\mu\text{m}$ .

Os dosímetros compostos pelas misturas 25% de  $\text{CaF}_2$ : natural com 75% de NaCl e 30% de  $\text{CaF}_2$ : natural com 70% de NaCl apresentaram sensibilidade adequada e foram denominados Na-75 e Na-70, respectivamente.

Os TLDs tendo como aglutinante o cloreto de sódio foram produzidos por prensagem a frio das misturas com uma pressão de 4 toneladas força por  $\text{cm}^2$ , resultando em pastilhas de 5,00mm de diâmetro, 0,60mm de espessura e massas  $(26\pm 2)\text{mg}$  e  $(27\pm 1)\text{mg}$  para os TLDs Na-75 e Na-70, respectivamente (massas médias de dez pastilhas).

#### 4.3. Números Atômicos Efetivos dos Dosímetros Produzidos

Tendo em vista que não se conhece a energia da radiação gama existente num campo neutrônico, é conveniente que os dosímetros sensíveis apenas a este tipo de radiação apresentem a mesma dependência energética que os sensíveis a nêutrons.

Sabendo-se que tal dependência é função do número atômico dos elementos constituintes dos dosímetros, procurou-se conhecer inicialmente os valores dos números atômicos efetivos de cada TLD.

Para a região de baixas energias da radiação gama e X onde predomina o efeito fotoelétrico, ou seja, onde se evidenciam diferenças

na absorção de energia pelo meio em função de seu número atômico, o número atômico efetivo é calculado a partir da expressão<sup>(23)</sup>:

$$Z_{ef} = [ a_1 Z_1^m + a_2 Z_2^m + a_3 Z_3^m + \dots ]^{1/m}$$

onde  $a_1, a_2, a_3, \dots$  são os números fracionais de elétrons por grama pertencentes aos materiais de números atômicos  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$  e  $m$  tem valor  $\approx 3$  para materiais de número atômico alto e  $\approx 3,8$  para materiais de número atômico baixo.

Na tabela 4.2. encontram-se os valores dos números atômicos efetivos calculados para os dosímetros empregados e produzidos, utilizando-se para o cálculo o valor de  $m$  como sendo 3,5.

TLD (% em massa)	Número Atômico Efetivo, $Z_{ef}$
30% $\text{CaF}_2$ : nat. 70% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Bo-70	12,7
57% $\text{CaF}_2$ : nat. 43% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Bo-5	14,7
30% $\text{CaF}_2$ : nat. 70% NaCl Na-70	15,8
25% $\text{CaF}_2$ : nat. 75% NaCl Na-75	15,8
60% $\text{CaF}_2$ : nat. 40% NaCl Rotina	16,3
LiF - TLD 600/700	8,3

Tabela 4.2. Números atômicos efetivos,  $Z_{ef}$ , dos dosímetros utilizados e produzidos.

Apesar das variações encontradas, as curvas de dependência energética medidas (veja item 6.1.3) não apresentaram variações significativas de sensibilidade.

#### 4.4. Recozimentos Realizados nos TLDs; Utilização e Reutilização dos Dosímetros

No caso dos dosímetros de fluoreto de lítio foram feitos os tratamentos térmicos usuais a 400°C durante uma hora e a seguir 100°C durante duas horas, ambos seguidos por resfriamento rápido levando-os à temperatura ambiente.

No caso dos dosímetros de fluorita, antes de qualquer irradiação foi feito um recozimento a 400°C durante 20 minutos.

O fato da fluorita ser sensível à luz exigiu manipulação especial, sempre em ambiente de luz vermelha. Exigiu também cuidados especiais durante as irradiações, tendo os dosímetros sido empacotados em embalagens plásticas pretas, seladas a quente e opacas à luz. A embalagem dos dosímetros visou também, isolá-los de um possível ambiente de elevada umidade relativa do ar.

Tais recozimentos e cuidados possibilitaram usar os TLDs diversas vezes.

## 5. TÉCNICAS DE IRRADIAÇÃO E DE LEITURA DA TERMONUMINLESCÊNCIA

### 5.1. O Aparelho Leitor de Termoluminescência

O conjunto leitor de termoluminescência está representado esquematicamente na figura 5.1.

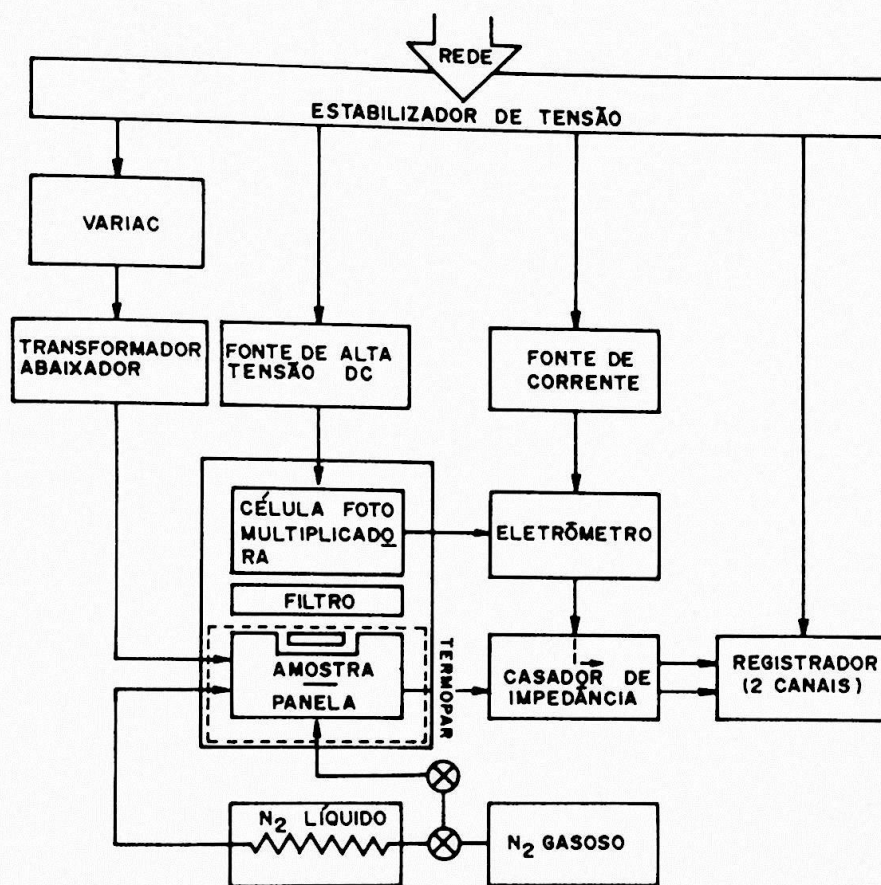


Fig. 5.1. Representação esquemática do conjunto leitor de termoluminescência empregado.

Basicamente é utilizado um sistema que possibilita o aquecimento do material TL de maneira reproduzível e registra a luz emitida durante a variação de temperatura.

O aquecimento é conseguido através da passagem de corrente elétrica por um "panela" suporte (liga de platina) onde os dosímetros são convenientemente dispostos. A corrente elétrica é obtida de um transformador cuja saída apresenta uma tensão inferior à de sua entrada que é alimentada adequadamente por um variac ligado à rede elétrica. A variação da tensão na saída do variac é um dos parâmetros que determinam a curva de aquecimento da "panela".

O registro dessa curva de aquecimento é obtido através da diferença de potencial estabelecida entre as extremidades de um termopar\*, encontrando-se uma junção fixa com solda a ponto na "panela" e outra imersa numa mistura de água e gelo. O sinal do termopar passa por uma caixa de impedância a fim de compatibilizar este sinal com a entrada correspondente do aparelho registrador.

Deve-se observar que a curva de aquecimento registrada é a da "panela" e não a da amostra.

A detecção da luz emitida pelo fósforo TL submetido ao aquecimento é feita por uma válvula fotomultiplicadora\*\* que transforma o sinal da luz num sinal de corrente elétrica proporcional. Esse sinal de corrente é medido por um eletrômetro e registrado. A célula fotomultiplicadora é alimentada por uma fonte de alta tensão DC\*\*\* (aproximadamente 1100V para as intensidades TL observadas).

Observa-se que mesmo sem nenhum sinal luminoso, o eletrômetro acusa um baixo sinal de corrente proveniente da fotomultiplicadora.

\* termopar - Chromel-Alumel

\*\* fotomultiplicadora da marca Emi-Gencom, modelo 9789 B com dinodos CsSB

\*\*\* fonte de alta tensão DC da marca Tectrol, modelo TCH3000

Essa corrente de fundo, embora aperiódica apresenta um valor médio constante. Sua interferência nas leituras da TL pode ser minimizada, injetando-se também no eletrômetro uma corrente elétrica de mesma magnitude e sinal contrário, corrente esta fornecida por uma fonte de corrente.

Em princípio o sinal luminoso registrado é constituído da TL propriamente dita e da radiação térmica da "panela" e da amostra; a incandescência é significativa apenas para temperaturas superiores às dos picos TL, tendo comprimento de onda maior que o da TL. Sendo assim, para diminuir os sinais devidos à radiação térmica, deve-se escolher uma fotomultiplicadora cuja curva de sensibilidade apresente um máximo que englobe a região do espectro correspondente à emissão TL, bem como utilizar filtros luminosos\* entre a amostra e a célula fotomultiplicadora.

A fim de se evitar a termoluminescência espúrea, não decorrente da radiação ionizante, submete-se o volume que engloba a "panela" e a amostra a um fluxo contínuo de nitrogênio gasoso, sendo este mais um parâmetro que determina a curva de aquecimento.

Um fluxo de nitrogênio gasoso resfriado ao passar por uma serpentina imersa em nitrogênio líquido é utilizado para resfriar a "panela" e a amostra, possibilitando condições iniciais de temperatura, na "panela", idênticas entre uma leitura e outra.

\* filtros utilizados: 4-70 para os TLDs de fluoreto de lítio e 5-58 para os de fluorita, ambos fabricados pela Corning Glass Co.

## 5.2. Técnicas de Irradiação

Os estudos das características dos dosímetros produzidos envolvem as análises de suas respostas termoluminescentes quando submetidos às radiações X, gama e neutrônica.

Para fins de seleção dos dosímetros em função de sua resposta à radiação gama, utilizou-se uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$ ; para medida da variação da resposta TL em função da energia da radiação eletromagnética, usou-se um aparelho de raios X terapêutico e um aparelho de cobaltoterapia; e na determinação de sensibilidade a nêutrons uma fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

Descreve-se a seguir os procedimentos usados nas diferentes técnicas de irradiação.

### 5.2.1. Sistema de irradiação para seleção dos dosímetros de acordo com sua resposta TL à radiação gama

Durante as irradiações os dosímetros devidamente embalados em plásticos pretos foram colocados, entre placas de lucite de 3,00mm de espessura, sobre uma mesa com tampo de isopor, localizado a 95,0cm do chão numa sala de 3,0m x 8,0m x 2,5m, a uma distância de 165,0cm da fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Esta estava localizada no interior de um castelo de chumbo a 16,0cm de uma abertura quadrada de 10,0cm de lado.

As exposições, X, foram calculadas pela expressão<sup>(23)</sup>:

$$X = \frac{\Gamma A \Delta t}{d^2}, \text{ onde:}$$



A - atividade da fonte em 06/1983\* - 13,84GBq (374mCi)

d - distância fonte-TLD - 165,0cm

$\Delta t$  - tempo de irradiação em horas

$$\Gamma = 2,3 \times 10^{-9} \frac{C \text{ cm}^2}{\text{kg h Bq}} \left( = 3,3 \frac{R \text{ cm}^2}{\text{h mCi}} \right)$$

- constante gama específica\*\* do  $^{137}\text{Cs}$ .

### 5.2.2. Sistemas de irradiação empregados para o levantamento das curvas de dependência energética dos TLDs

Utilizaram-se para isso fontes de radiação X e gama de diversas energias, descritas a seguir.

a) Raios X: Aparelho gerador de raios X para fins radioterápicos com as seguintes características.

marca: Siemens

modelo: Stabilipan II

kV: de 50kV a 200kV

mA: de 0 a 30mA

Cone de tratamento definindo um campo de 10,0cm x 15,0cm com 30,0cm de distância foco-pele.

\* A meia vida,  $T_{1/2}$ , do Cs-137 é 29,99 anos

\*\* A constante gama específica de um material radioativo fornece a taxa de exposição produzida por uma fonte puntual de  $3,7 \times 10^7$  Bq (1mCi) desse material a 1cm de distância.

Filtros de alumínio de 2,0 e 4,0mm de espessura, de cobre de 0,5 e 10,0mm de espessura e o filtro ThII (0,8mm de estanho + 0,25mm de cobre + 1,0mm de alumínio).

Os dosímetros foram sempre embalados em sacos plásticos pretos. Para medida da exposição a que foram submetidos os dosímetros, utilizou-se um dosímetro Farmer tipo 2570, com câmara de ionização de dedal de  $0,6\text{cm}^3$  mod. 2571, fabricados pela Nuclear Enterprises LTD.

Os dosímetros e a câmara de ionização, apoiados sobre placas de isopor para evitar retroespalhamento, foram centrados no campo de irradiação a uma distância de 50,0cm da fonte de raios X.

b) Radiação gama do  $^{60}\text{Co}$ , isótopo esse com meia vida,  $T_{1/2}$  de 5,27 anos e que emite dois tipo de fótons, um com energia 1,17MeV e outro com 1,33MeV (energia média de 1,25MeV). A fonte estava localizada num aparelho de terapia com as seguintes características.

marca: Atomic Energy of Canada LTD.

modelo: Theraton 765

atividade:  $2762 \times 10^{14}$  Bq (7466Ci) em 18/02/1977.

Durante a irradiação, os dosímetros foram embalados com plástico preto, ora entre placas de lucite de 5,0mm de espessura para produzir equilíbrio eletrônico\*, ora sem essas placas. Os TLDs e a câmara de ionização foram centrados no campo de irradiação de 15,0cm x 15,0cm distante 102,5cm da fonte de  $^{60}\text{Co}$ .

\* O equilíbrio eletrônico é alcançado quando o número de íons produzidos num elemento de massa  $\Delta m$  por elétrons (ou pósitrons) liberados fora de  $\Delta m$  é igual ao número de íons produzidos fora de  $\Delta m$  por cargas aceleradas geradas em  $\Delta m$ . Essa condição viabiliza a medida da exposição em  $\Delta m$ .



a) Arranjo inicial, figura 5.2.

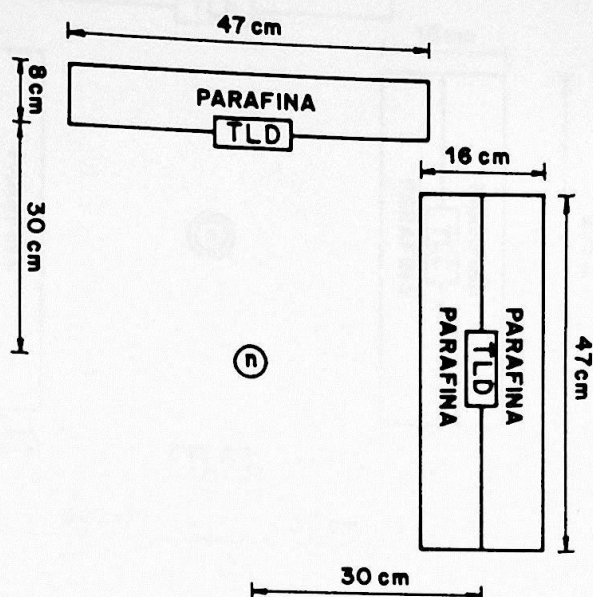


Fig. 5.2. Arranjo inicial utilizado para irradiação com nêutrons. Os blocos de parafina têm dimensões 8cm x 47cm x 25cm, n indica a posição da fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

Os dosímetros foram embalados em plástico preto e colocados nas posições indicadas na fig. 5.2. Foram também expostos os dosímetros TLD600/700 e Rotina envoltos por filtros de chumbo de 0,5mm de espessura, com a finalidade de se determinar a energia da componente gama do campo misto de nêutrons + gama.

b) Complementando o arranjo inicial, foi montado o arranjo da figura 5.3., envolvendo a fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$  em um castelo de chumbo com paredes de 3,0mm de espessura, para se reduzir a componente gama de baixa energia do campo neutrônico.

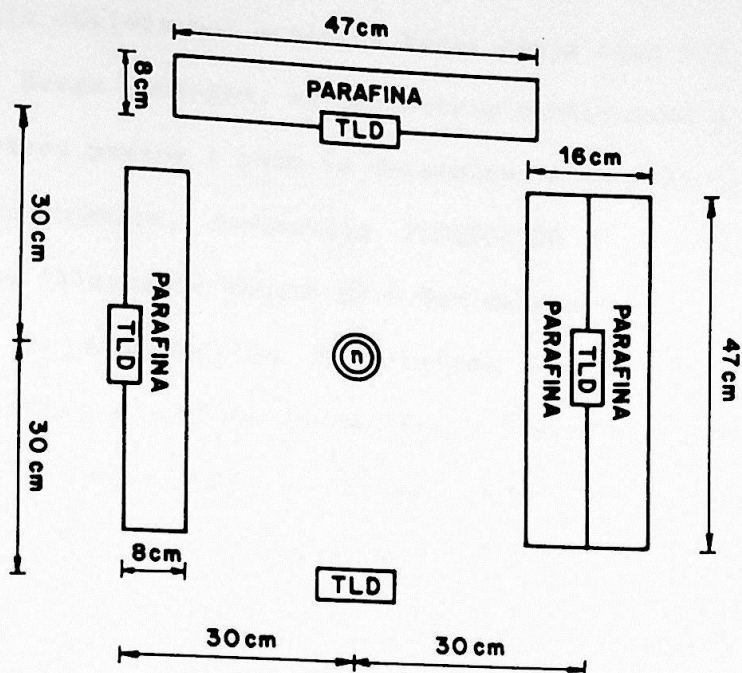


Fig. 5.3. Arranjo experimental complementar ao inicialmente utilizado com a fonte n em um castelo de Pb.

c) Arranjo final

Foi construído o arranjo esquematizado na figura 5.4.

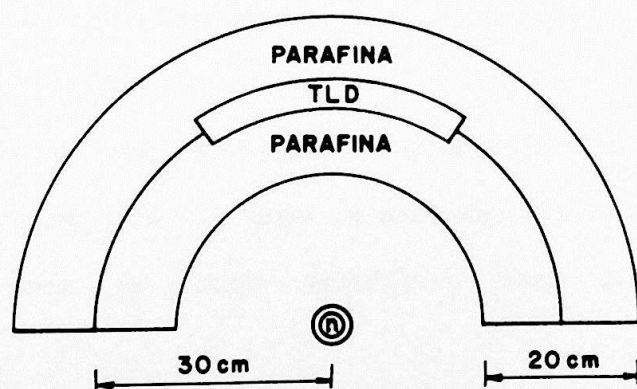


Fig. 5.4. Arranjo final utilizado, com a fonte de Am-Be colocada em um castelo de Pb. A altura dos blocos de parafina é 15cm, sendo os TLD dispostos à meia altura.

A espessura de parafina foi escolhida a partir de dados experimentais obtidos por outros autores (veja item 5.2.3.1.).

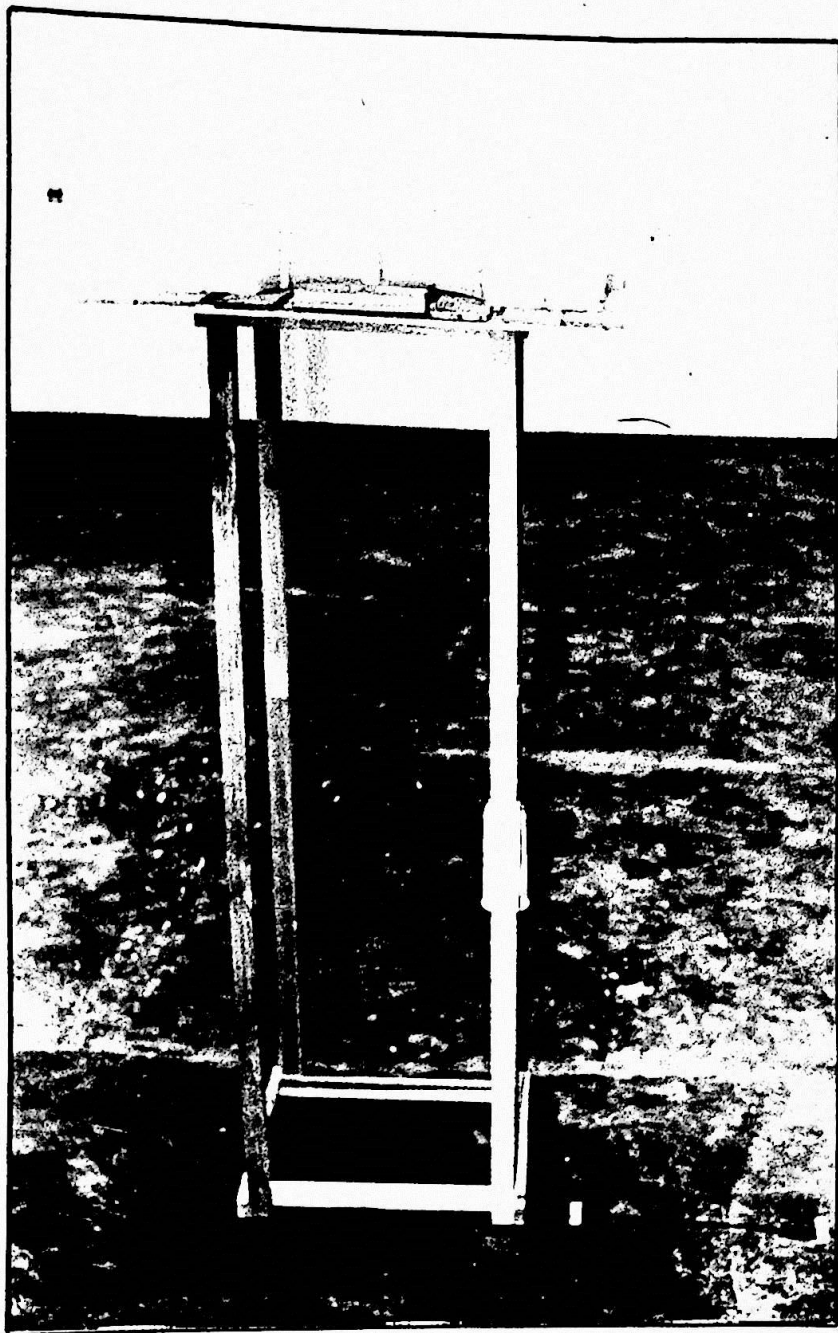
Nessa montagem, os dosímetros continuaram a ser embalados em sacos plásticos pretos e para se determinar a energia da componente gama do campo neutrônico, dosímetros TLD600/700 e Rotina foram expostos envoltos por filtros de chumbo de 0,5mm de espessura.

Os semicírculos de parafina e a fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$  foram colocados sobre um tablado de madeira a 1,80m do chão. Ao arranjo foi adaptado um termopar (uma extremidade em meio à parafina e outra imersa em água e gelo), permitindo assim controlar a temperatura durante a irradiação.

Esse arranjo foi montado no centro da sala de nêutrons do prédio de irradiação do Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, fotografia 5.1.. Essa sala tem dimensões 10m x 14m x 4m, sendo que não há forro abaixo do telhado de aço-inox. As paredes desse recinto são de alvenaria. A preocupação com as dimensões da sala, bem como com os materiais utilizados em sua construção<sup>(42)</sup> advém do fato de se procurar ter o mínimo de espalhamento dos nêutrons oriundos da fonte, o que acarretaria mudanças no espectro de energia utilizado.

No arranjo elaborado, a distância fonte-TLD leva em conta o compromisso entre o maior tempo de exposição para grandes distâncias e a não uniformidade do campo neutrônico para pequenas distâncias<sup>(42)</sup>.

Optou-se pela distância de 30cm tanto no arranjo inicial e seu complementar quanto no arranjo final.



Fotografia 5.1. arranjo final montado na sala de nêutrons do Prédio de Irradiação do Laboratório de Dosimetria.

### 5.2.3.1. Espessura de parafina utilizada para termalização dos nêutrons oriundos da fonte de $^{241}\text{Am-Be}$

A espessura do material moderador empregado, parafina, foi determinada tendo em vista resultados experimentais obtidos por Young<sup>(43)</sup> e Wallace et al.<sup>(44)</sup>. Eles levantaram curvas relacionando espessuras de parafina com as contagens de seus detetores para nêutrons de diversas energias. Utilizaram para tal, respectivamente, uma câmara revestida de boro e um contador proporcional com gás  $\text{BF}_3$  ambos envoltos em parafina. Determinaram "espessuras ótimas" de parafina para diversas energias, ou seja, espessuras onde as contagens atingiram valores máximos. Aqui no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, Yanagihara<sup>(45)</sup>, utilizou um contador proporcional revestido com boro e envolto por cilindros de parafina de diferentes espessuras, recoberto com Cd para determinar a energia média dos nêutrons existentes nas imediações do Acelerador Linear de Elétrons.

Tais resultados sugerem para a energia média dos nêutrons produzidos pela fonte aqui utilizada, uma "espessura ótima" de parafina de  $\approx 8\text{cm}$ , espessura esta utilizada nos arranjos descritos nos itens 5.2.3 a e b. Porém para o arranjo final descrito no item 5.2.3c, utilizou-se a espessura de  $10\text{cm}$  assumindo que nessa espessura os nêutrons estejam efetivamente termalizados<sup>(46)</sup>.

## 6. PROPRIEDADES TERMOLUMINESCENTES DOS DOSÍMETROS PRODUZIDOS

### 6.1. Resposta TL à Radiação Gama dos Dosímetros Produzidos

#### 6.1.1. Curvas de emissão TL num campo de radiação gama

Curvas de emissão TL dos TLDs Rotina, Na-70, Na-75, Bo-5 e Bo-70 para uma exposição de 0,760R de radiação gama do  $^{137}\text{Cs}$  são mostradas na figura 6.1.

Verifica-se, pela curva de emissão, que independente do aglutinante utilizado, NaCl ou  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , os picos de emissão são os da fluorita<sup>(19-47)</sup>. Alguma variação aparente na posição dos picos pode ser devida a alterações na taxa de aquecimento de pastilha para pastilha por apresentarem estas massas diferentes.

A altura do 3º pico de emissão, ou seja, o de temperatura mais elevada foi considerada neste trabalho como a resposta TL. Convém lembrar que as taxas de aquecimento registradas são relativas à panela e não ao TLD propriamente.

#### 6.1.2. Resposta TL dos dosímetros à radiação gama

Expuseram-se os dosímetros Bo-5 e Bo-70 a uma exposição de 0,892 R da radiação gama do  $^{137}\text{Cs}$  no arranjo descrito no item 5.2.1. junto com dosímetros do tipo Rotina e TLD600/700 (LiF). A tabela 6.1. mostra os resultados.

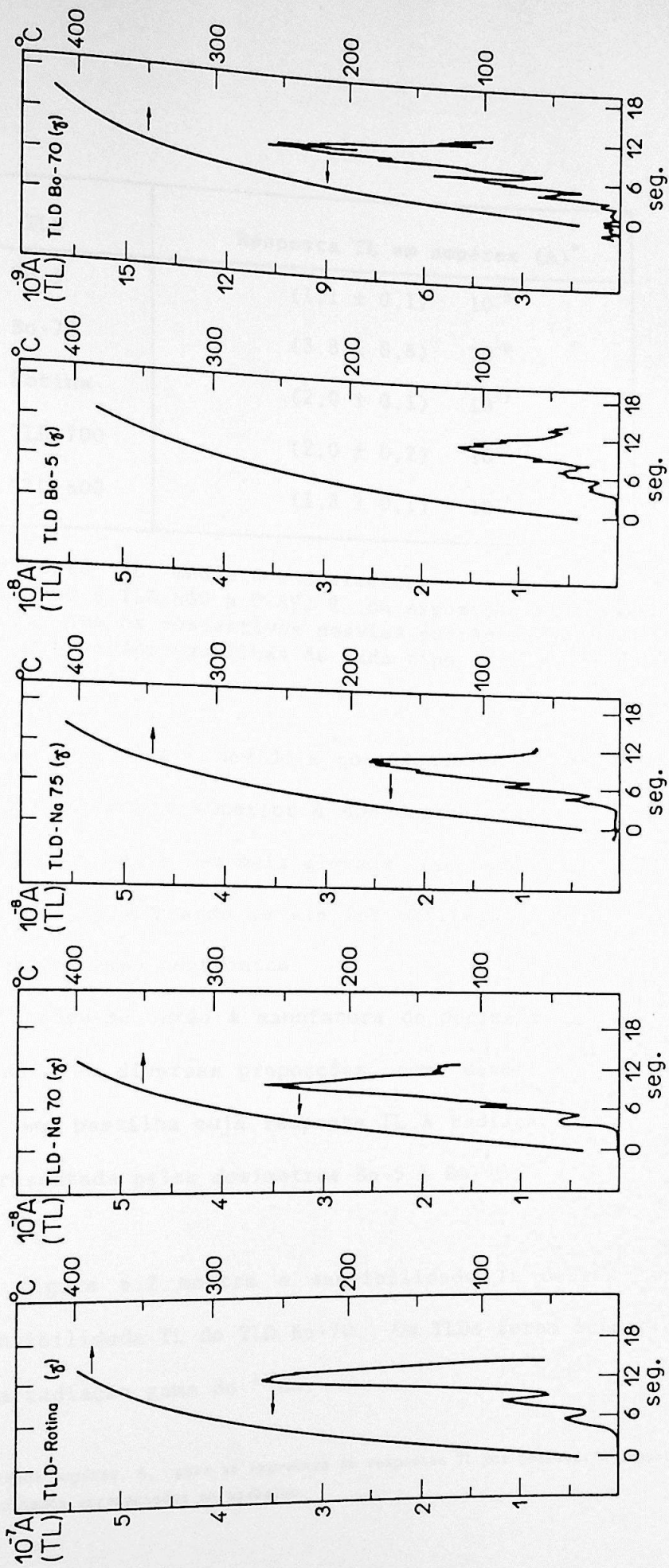


Fig. 6.1. Curvas de emissão TL dos TLDs Rotina, Na-75, Na-70, Bo-5 e Bo-70 para uma exposição de 0,760R no gama do  $^{137}\text{Cs}$ , com as respectivas curvas de aquecimento.

TLD	Resposta TL em ampères (A)*	
Bo-5	(1,1 ± 0,1)	10 <sup>-8</sup>
Bo-70	(3,8 ± 0,8)	10 <sup>-9</sup>
Rotina	(2,0 ± 0,1)	10 <sup>-7</sup>
TLD 700	(2,0 ± 0,2)	10 <sup>-7</sup>
TLD 600	(1,8 ± 0,1)	10 <sup>-7</sup>

Tabela 6.1. Resposta TL média dos dosímetros Bo-75, Bo-70, Rotina, TLD 700 e TLD 600 à 0.892 R de exposição à radiação gama do <sup>137</sup>Cs, com os respectivos desvios-padrão relativos às leituras TL de dez pastilhas de cada tipo de TLD.

Verificou-se que devido à quantidade de fluorita contida no dosímetro Rotina ser muito superior à dos dosímetros Bo-5 e Bo-70, sua resposta à radiação gama é bem mais elevada; isso implicará num fator de ajuste de sensibilidade grande se ele for utilizado para discriminar a componente gama do campo neutrônico.

Procedeu-se então à manufatura de dosímetros de misturas de fluorita com NaCl em diversas proporções, como descrito no item 4.2.2., para se obter uma pastilha cuja resposta TL à radiação gama fosse mais próxima da apresentada pelos dosímetros Bo-5 e Bo-70.

A figura 6.2. mostra a sensibilidade TL desses dosímetros relativa à sensibilidade TL do TLD Bo-70. Os TLDs foram submetidos a 1R de exposição a radiação gama do <sup>137</sup>Cs.

\* Escolheu-se a unidade ampères, A, para se expressar as respostas TL por permitir a comparação entre os diferentes resultados apresentados no trabalho.

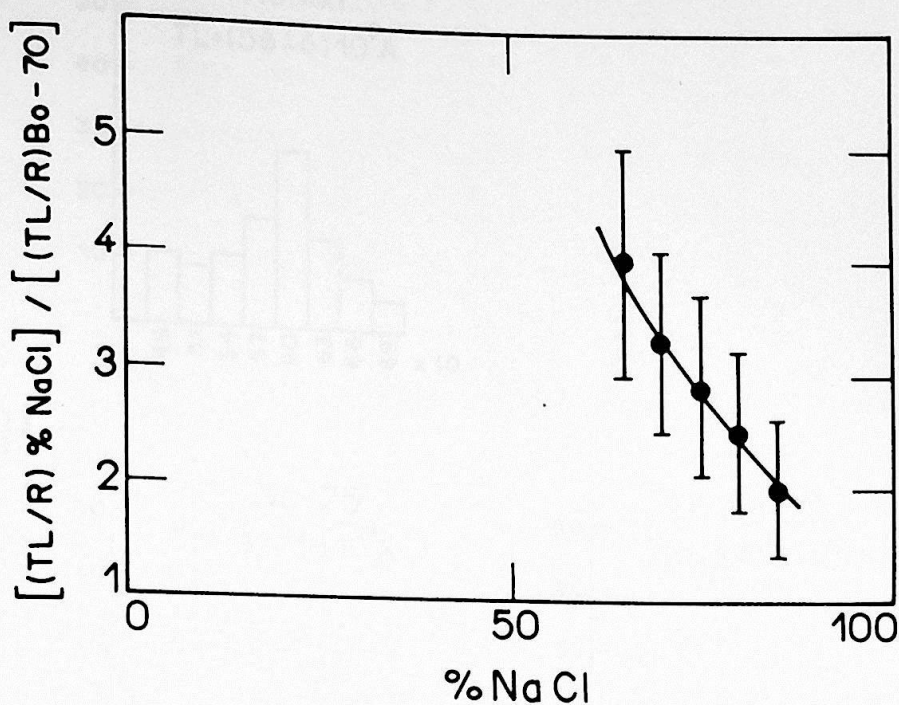


Fig. 6.2. Razão de sensibilidade à radiação gama (TL/R, termoluminescência por exposição) dos TLDs de diversas proporções de fluorita com cloreto de sódio, com relação ao TLD Bo-70. Os desvios padrão são relativos às razões das respostas TL médias de dez pastilhas de cada tipo de TLD expostas a 1R de radiação gama do  $^{137}\text{Cs}$ .

Escolheram-se as proporções 75% de NaCl com 25% de  $\text{CaF}_2$ :natural e 70% de NaCl com 30% de  $\text{CaF}_2$ : natural como TLDs de sensibilidade adequada à radiação gama; acima dessas proporções a higroscopicidade do NaCl inviabiliza o uso do TLD.

A figura 6.3. mostra a distribuição das respostas TL dos dosímetros produzidos (Rotina, Na-70, Na-75, Bo-5 e Bo-70) quando expostos a 0,770R de radiação gama dos  $^{137}\text{Cs}$ .

A análise da uniformidade de produção, através da figura 6.3., indica significativa dispersão das respostas. Os desvios padrão associados têm valores elevados para se processar uma dosimetria.

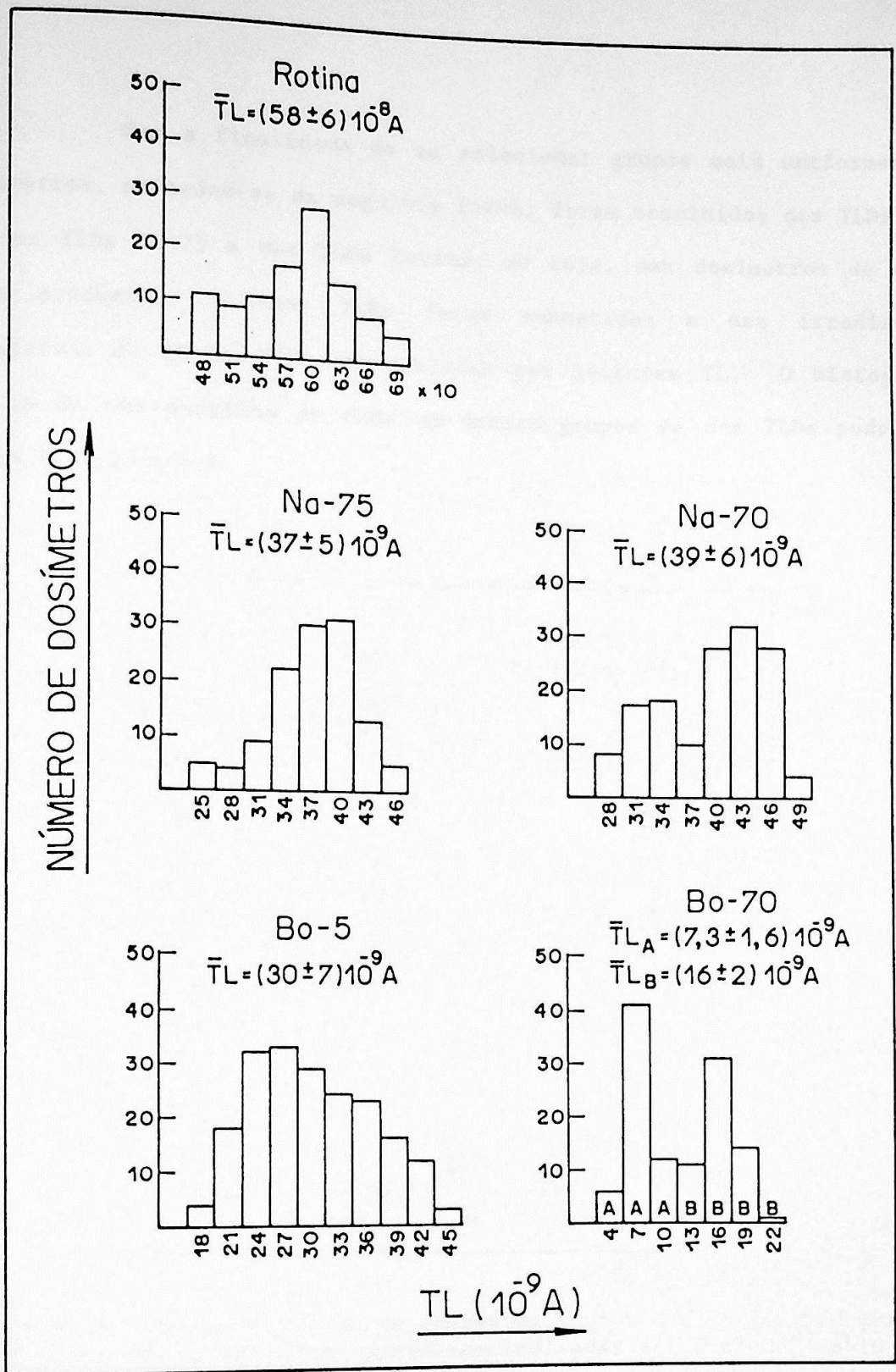


Fig. 6.3. Histogramas das respostas TL dos TLDs produzidos quando expostos a 0,77R de radiação do <sup>137</sup>Cs.

Com a finalidade de se selecionar grupos mais uniformes de dosímetros, procedeu-se da seguinte forma: foram escolhidos dez TLDs Bo-5, dez TLDs Na-75 e dez TLDs Rotina, ou seja, dez dosímetros de cada tipo produzido. Esses TLDs foram submetidos a dez irradiações sucessivas de 1R no  $^{137}\text{Cs}$  intercaladas por leituras TL. O histograma típico de uma pastilha de cada um desses grupos de dez TLDs pode ser visto na figura 6.4.

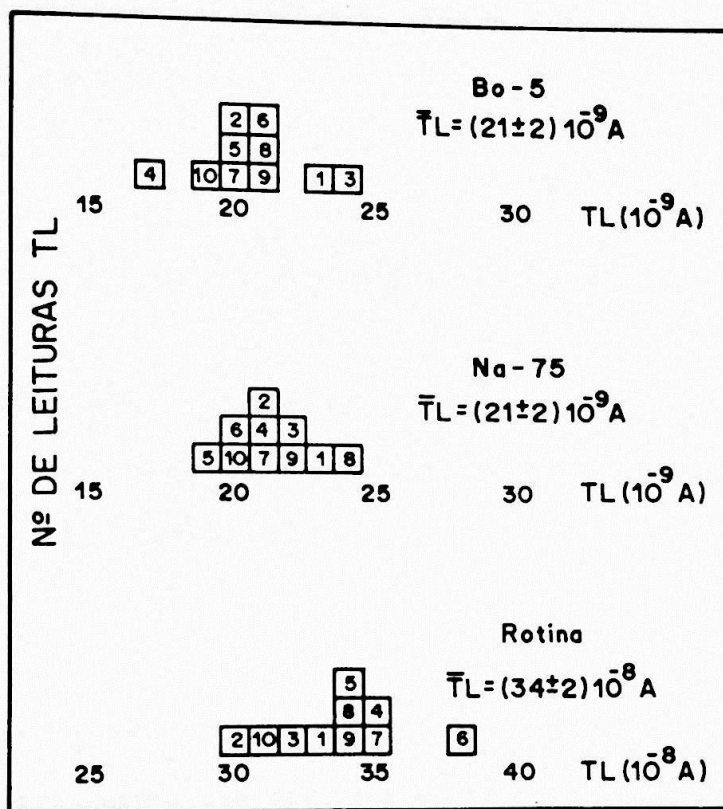


Fig. 6.4. Histogramas típicos de respostas TL dos dosímetros, submetidos a dez irradiações sucessivas indicadas pelos n° de 1 a 10.

É importante salientar que na confecção dos histogramas foram feitas correções relativas às variações das condições da leitora TL, bem como aquelas relativas às exposições recebidas pelos dosímetros.

A partir da análise dos histogramas apresentados, pode-se concluir que cada dosímetro Bo-5, Bo-70, Na-70 e Na-75 apresenta uma reprodutibilidade de resposta TL em função da exposição de  $\pm 10\%$  e  $\pm 6\%$  no caso de um TLD Rotina.

Tal resultado possibilita a seleção dos dosímetros Bo-5, Bo-70, Na-70 e Na-75 em grupos que apresentem desvio padrão de  $\pm 10\%$  e dos de Rotina de  $\pm 6\%$ . Pode-se relacionar um grupo aos demais através de fatores de normalização. Tais fatores foram usados no cálculo da componente gama do campo de nêutrons, quando esta foi medida por meio dos TLDs Na-70, Na-75 e Rotina.

#### 6.1.3. Dependência energética dos dosímetros produzidos

Utilizou-se o sistema de irradiação descrito no item 5.2.2 com o objetivo de se conhecer a resposta TL dos TLDs produzidos quando submetidos a uma mesma exposição de raios X e/ou raios gama de diversas energias.

Nas figuras 6.5., 6.6. e 6.7. encontram-se os resultados referentes às irradiações com diversas energias de raios X e raios gama para os TLDs utilizados. Nas curvas de dependência energética, o valor da razão da termoluminescência pela exposição (TL/R) na energia do  $^{60}\text{Co}$  foi tomada arbitrariamente como um e todos os demais valores são relativos a este.

Deve-se salientar que o valor utilizado como resposta dos TLDs à exposição na energia do  $^{60}\text{Co}$  foi a correspondente à situação onde

existia equilíbrio eletrônico (veja item 5.2.2). Tal procedimento foi adotado pelo fato de existir equilíbrio eletrônico nas posições dos TLDs no arranjo final utilizado, item 5.2.3c.

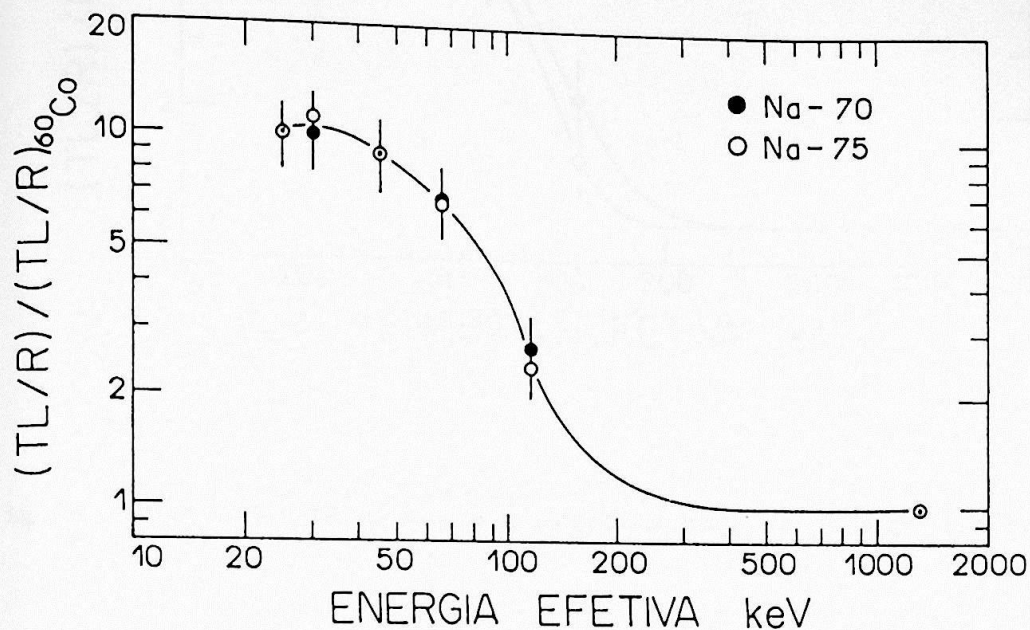


Fig. 6.5. Curva de dependência energética dos TLDs Na-70 e Na-75.

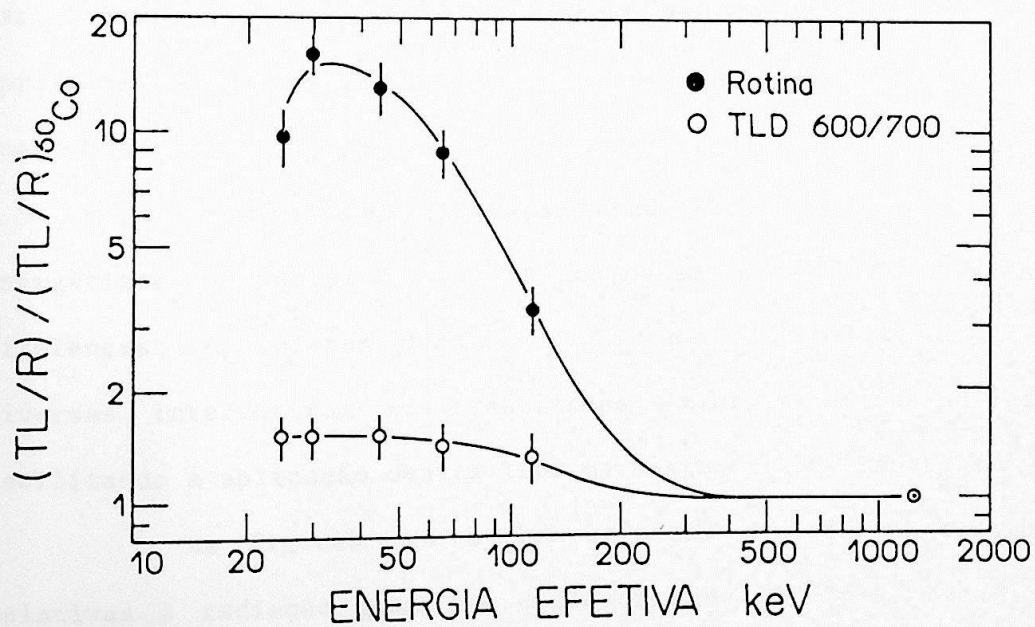


Fig. 6.6. Curva de dependência energética do TLD Rotina e dos TLDs 600/700.

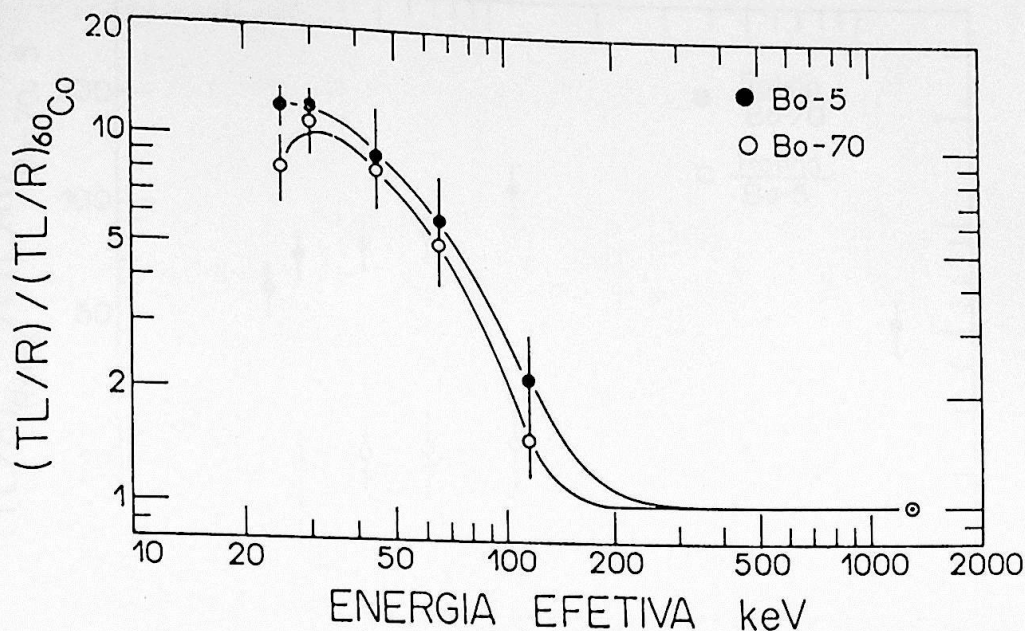


Fig. 6.7. Curva de dependência energética para os TLDs Bo-5 e Bo-70.

Como já mencionado nos capítulos 2 e 4, existe uma variação nos números atômicos efetivos ( $Z_{ef}$ ) dos vários tipos de dosímetros. Isso certamente se refletiu nas curvas de dependência energética aqui apresentadas, observando-se que a dependência energética é mais acentuada para os dosímetros de  $Z_{ef}$  maior.

Todavia, as diferenças encontradas entre as dependências energéticas dos vários dosímetros não podem ser explicadas apenas pelas diferenças dos valores dos  $Z_{ef}$ . Certamente suas sensibilidades TL diversas interferiram nos resultados, minimizando as diferenças e facilitando a aplicação destes TLDs na dosimetria de nêutrons.

As figuras 6.8 e 6.9 permitem avaliar as sensibilidades relativas à radiação gama dos dosímetros Bo-70, Bo-5, Na-70, Na-75 e Rotina, e suas variações com a energia da radiação.

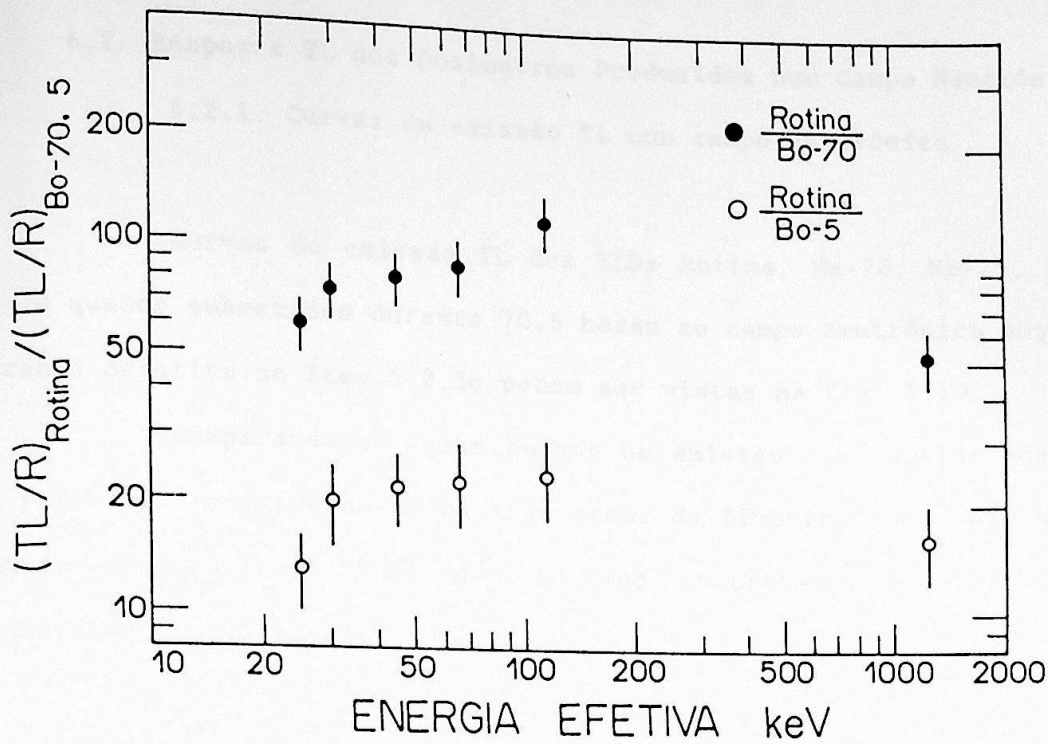


Fig. 6.8. Razão da resposta TL/R à radiação gama e X entre o TLD Rotina e os TLDs Bo-5 e Bo-70.

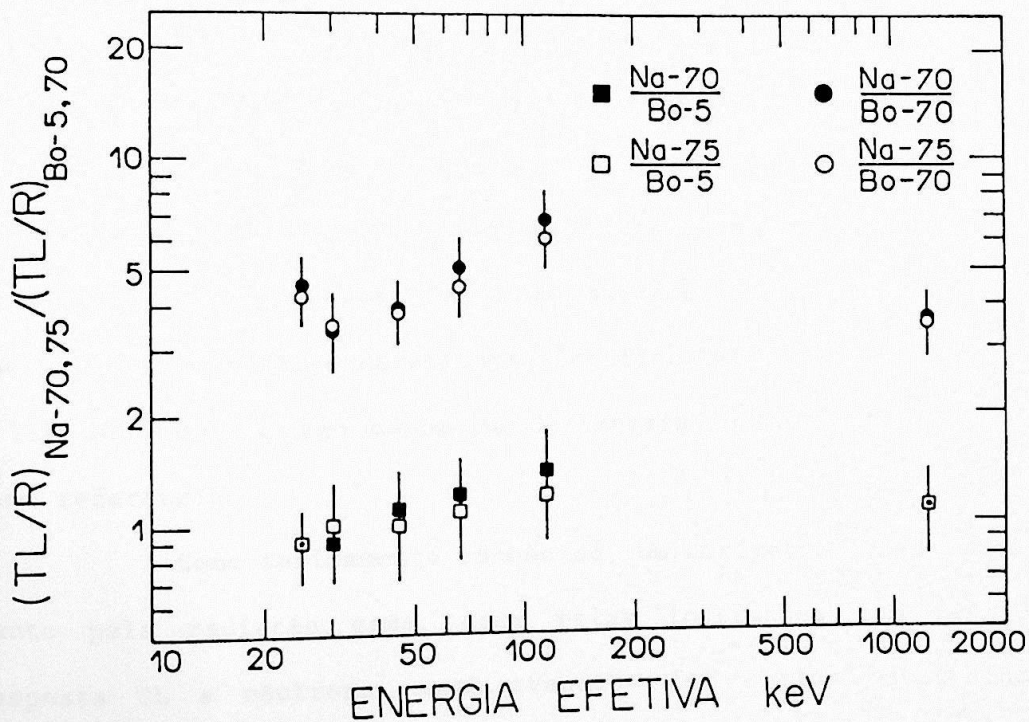


Fig. 6.9. Razão da resposta TL/R à radiação gama e X entre os TLDs Na-70 e Na-75 e os TLDs Bo-5 e Bo-70.

## 6.2. Resposta TL dos Dosímetros Produzidos num Campo Neutrônico

### 6.2.1. Curvas de emissão TL num campo neutrônico

Curvas de emissão TL dos TLDs Rotina, Na-70, Na-75, Bo-5 e Bo-70 quando submetidos durante 70,5 horas ao campo neutrônico obtido no arranjo descrito no item 5.2.3c podem ser vistas na fig. 6.10.

Comparando-se essas curvas de emissão com aquelas mostradas na figura 6.1 evidenciam-se os três picos da fluorita que, como no caso anterior, para cada tipo de TLD são localizados em temperaturas ligeiramente diferentes.

### 6.2.2. Verificação de sensibilidade a nêutrons

Com a finalidade de verificar a sensibilidade a nêutrons dos dosímetros de fluorita com tetraborato de sódio, os TLDs Bo-70, Rotina, TLD 600 e TLD 700 foram irradiados no arranjo descrito no item 5.2.3a. Esse arranjo foi elaborado tendo em vista a detecção de nêutrons albedo na situação TLD/parafina, bem como submeter os dosímetros a um fluxo exclusivamente térmico na situação parafina/TLD/parafina. O par TLD 600 - TLD 700, de emprego comum na dosimetria de nêutrons, foi utilizado como referência.

Como sabidamente conhecido, um dosímetro TLD é impressionado tanto pela radiação gama, como pelas interações com nêutrons. A resposta TL a nêutrons neste trabalho foi obtida, subtraindo-se da resposta TL total a parte referente à componente gama, determinada através dos dosímetros Na-70, Na-75 ou Rotina.

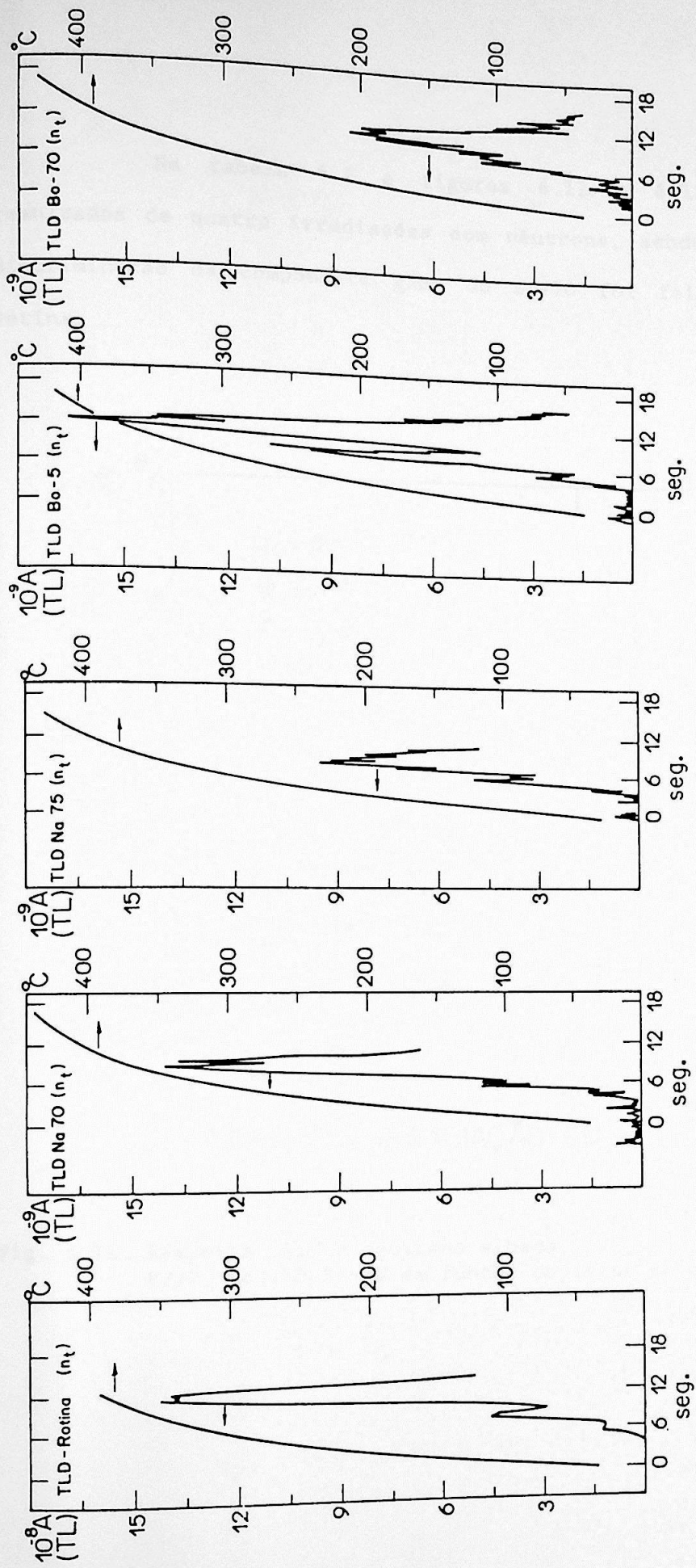


Fig. 6.10. Curvas de emissão TL dos TLDs Rotina, Na-70, Na-75, Bo-5 e Bo-70 quando expostos durante 70,5 horas a nêutrons no arranjo descrito no ítem 5.2.3c.com as respectivas curvas de aquecimento.

Na tabela 6.2. e figuras 6.11. e 6.12. encontram-se os resultados de quatro irradiações com nêutrons, sendo que neste caso a discriminação da componente gama do Bo-70 foi feita através do TLD Rotina.

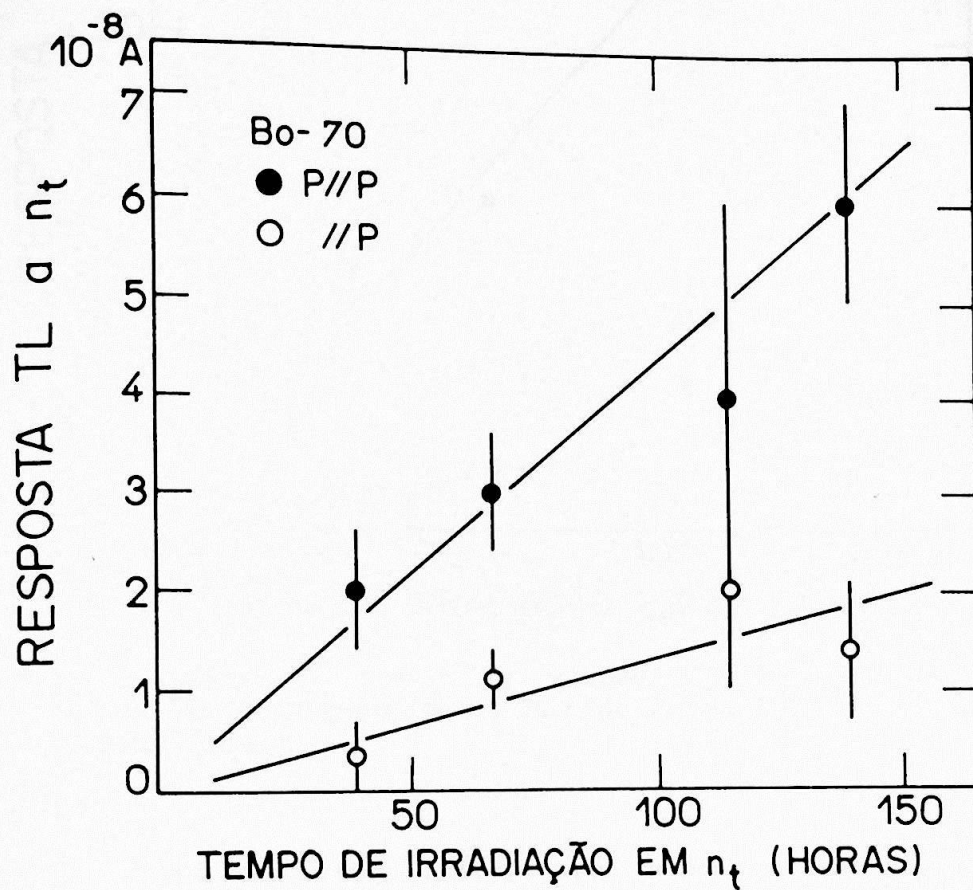


Fig. 6.11. Resposta TL a nêutrons albedo, //P, e a nêutrons térmicos, P//P, do TLD Bo-70 em função do tempo de irradiação.

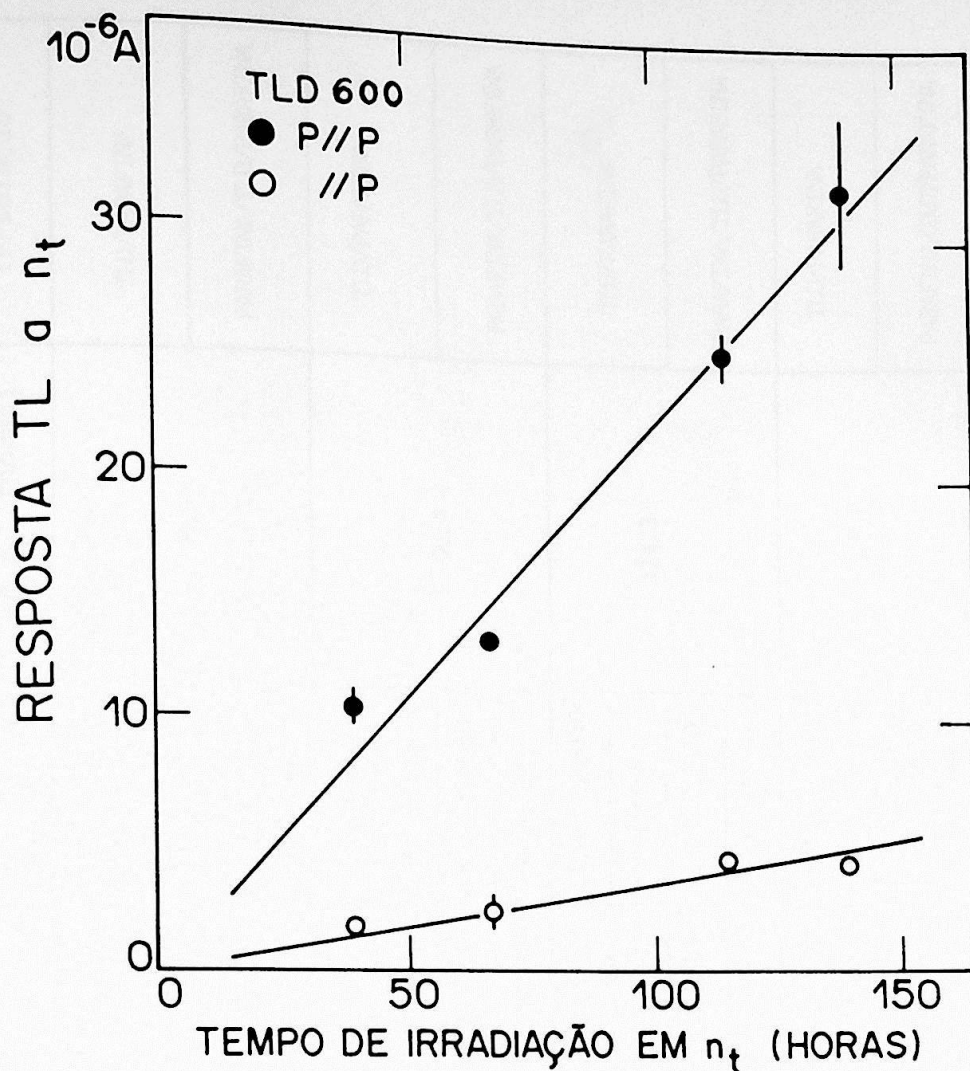


Fig. 6.12. Resposta TL a nêutrons albedo, //P, e a nêutrons térmicos, P//P, determinada pelos TLD 600-700 em função do tempo de irradiação.

Tais resultados indicam uma resposta linear em função do tempo de exposição, mas também uma baixa sensibilidade dos dosímetros que tem por base a fluorita, notadamente para a determinação da componente devida aos nêutrons albedo.

Observando-se, outrossim, os dados da tabela 6.2., pode-se notar que a fração da resposta TL total do dosímetro ( $n_t + \gamma$ ) referente à componente gama foi sempre maior que a relativa à componente neutrônica.

TL $10^{-8}$ (A)	Rotina	Bo-70	TLD 600	TLD 700	Tempo de irradiação em $n_t$ (horas)	Situação de irradiação
nt + $\gamma$	$(1,5 \pm 0,3)10^2$	$(3,9 \pm 0,6)$	$(2,4 \pm 0,2)10^2$	$(6,4 \pm 0,5)10$	38,9	TLD/PARAFTNA
nt	—	$(0,7 \pm 0,7)$	$(1,8 \pm 0,2)10^2$	—		
nt + $\gamma$	$(1,3 \pm 0,2)10^2$	$(4,7 \pm 0,5)$	$(10,5 \pm 0,6)10^2$	$(5,5 \pm 0,4)10$		
nt	—	$(2,0 \pm 0,6)$	$(10,0 \pm 0,6)10^2$	—	66,4	TLD/PARAFTNA
nt + $\gamma$	$(1,9 \pm 0,1)10^2$	$(5,1 \pm 0,2)$	$(3,1 \pm 0,3)10^2$	$(7,3 \pm 0,4)10$		
nt	—	$(1,1 \pm 0,3)$	$(2,4 \pm 0,3)10^2$	—		
nt + $\gamma$	$(2,0 \pm 0,2)10^2$	$(7,3 \pm 0,5)$	$(14,0 \pm 0,07)10^2$	$(8,0 \pm 0,7)10$	114,3	TLD/PARAFTNA
nt	—	$(3,0 \pm 0,6)$	$(13,2 \pm 0,2)10^2$	—		
nt + $\gamma$	$(3,3 \pm 0,4)10^2$	$(9 \pm 1)$	$(5,7 \pm 0,4)10^2$	$(1,22 \pm 0,06)10^2$		
nt	—	$(2 \pm 1)$	$(4,5 \pm 0,4)10^2$	—	138,9	TLD/PARAFTNA
nt + $\gamma$	$(3,2 \pm 0,5)10^2$	$(11 \pm 2)$	$(26,7 \pm 0,9)10^2$	$(1,5 \pm 0,1)10^2$		
nt	—	$(4 \pm 2)$	$(25,2 \pm 0,9)10^2$	—		
nt + $\gamma$	$(4,0 \pm 0,2)10^2$	$(9,9 \pm 0,6)$	$(5,9 \pm 0,4)10^2$	$(1,47 \pm 0,09)10^2$	138,9	TLD/PARAFTNA
nt	—	$(1,4 \pm 0,7)$	$(4,3 \pm 0,4)10^2$	—		
nt + $\gamma$	$(4,4 \pm 0,3)10^2$	$(15 \pm 1)$	$(34 \pm 3)10^2$	$(1,6 \pm 0,1)10^2$		
nt	—	$(6 \pm 1)$	$(32 \pm 3)10^2$	—		

**Tabela 6.2.** Respostas TL dos TLDs Bo-70, Rotina, TLD 600 e TLD 700 no campo misto nêutrons mais gama ( $nt + \gamma$ ), bem como resposta TL predominante a nêutrons térmicos na situação P//P e a nêutrons albedo na situação //P dos dosímetros Bo-70 e TLD 600. Os valores médios e respectivos desvios padrão referem-se à leitura de dez TLDs.

Para melhor analisar este resultado, deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- a) o campo de radiação gama incidente no dosímetro tem uma componente de baixa energia (60 keV) proveniente da fonte de <sup>241</sup>Am-Be e outra de alta energia (≈2,2 MeV) que surge da interação dos nêutrons térmicos com os núcleos de hidrogênio da parafina.
- b) os dosímetros de fluorita apresentam sensibilidade alta à componente gama de baixa energia.

Para comprovar a presença do campo misto de radiação gama, utilizou-se o método desenvolvido por Okuno e Cruz<sup>(48)</sup>.

Okuno et al.<sup>(49)</sup> mostraram que a energia efetiva de um campo de radiação gama com uma só componente pode ser determinado a partir da razão das respostas TL de dois dosímetros, um exposto entre filtros de chumbo (Pb) de 0,50mm de espessura [TL(Pb)] e outro sem filtros [TL(JA)], figuras 6.13. e 6.14.

Okuno e Cruz<sup>(48)</sup> observaram que TLDs diferentes indicam energias efetivas diferentes quando o campo gama é composto por radiação com duas energias distanciadas entre si de centenas de keV. Mostraram também, que é possível se identificar as energias e determinar a razão entre as exposições de cada uma delas, figura 6.15.

Foram então irradiados dosímetros TLD 700 e TLD Rotina no arranjo descrito no item 5.2.3a. durante 120 horas, com e sem filtros de chumbo de 0,50mm de espessura.

Os resultados obtidos para a razão  $[TL(JA)]/[TL(Pb)]$  foram  $(7,5 \pm 0,8)$  para o TLD Rotina e  $(1,7 \pm 0,2)$  para o TLD 700, valores correspondentes à média e desvio padrão da leitura TL de dez dosímetros, determinando energias efetivas de 80 keV e 200 keV, respectivamente, de acordo com as figuras 6.13 e 6.14. Esses valores e a figura 6.15 sugerem um campo de radiação gama com uma componente de energia 66 keV somada a uma componente de alta energia (referida na figura 6.15 como energia do  $^{60}Co$ ), indicando ainda que a exposição devido aos raios gama de baixa energia é o dobro daquela devida aos de alta energia.

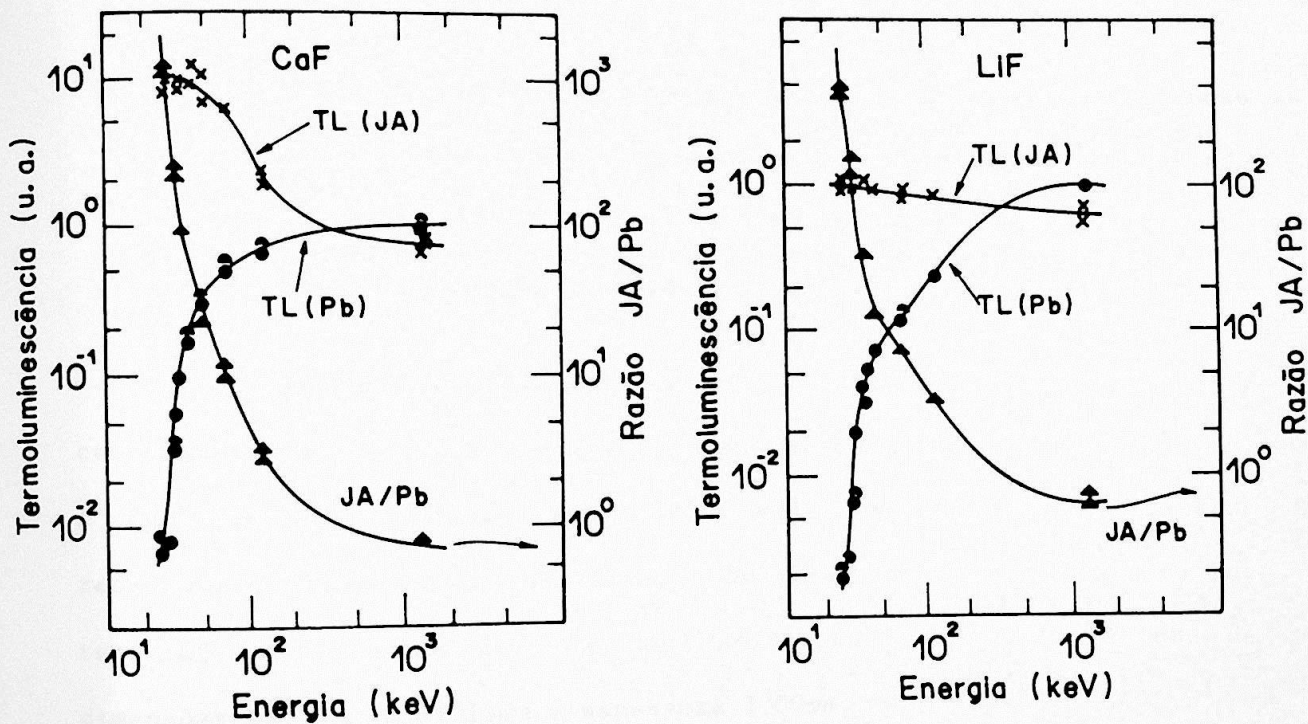


Fig. 6.13 e 6.14. Curvas de respostas TL dos TLDs Rotina e TLD 700 com e sem uso de filtros de Pb e respectivas razões dessas respostas TL. Adaptado de Okuno et al.<sup>(49)</sup>.

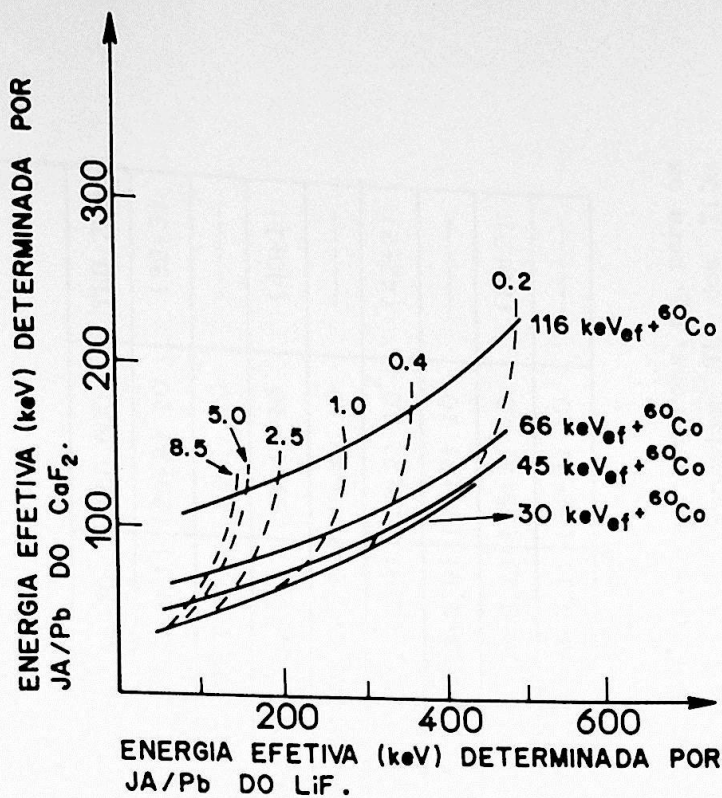


Fig. 6.15. Curvas que determinam as componentes de um campo de radiação gama misto, composto por uma componente de baixa energia e outra de alta energia. Essas curvas foram calculadas usando dados das figuras 6.13 e 6.14. Os parâmetros com valores de 0.2, 0.4, 1.0, 2.5, 5.0 e 8.5 dão a razão (exposição de baixa energia)/(exposição de alta energia) determinando suas proporções. Adaptado de Okuno e Cruz<sup>(48)</sup>.

Se for possível, através de um artifício qualquer, reduzir a componente gama de baixa energia do campo misto incidente no dosímetro, a resposta aos nêutrons tornar-se-á mais evidente, possibilitando reduzir a fluência mínima detetável. No caso deste trabalho, isto foi realizado encapsulando a fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$  num cilindro de chumbo de dimensões 65,50mm x 29,15mm e espessura 3,00mm.

Procedeu-se a seguir a uma irradiação de 121 horas no arranjo descrito no item 5.2.3b. Os resultados encontram-se na tabela 6.3.

Disposição do TLD		Resposta Termoluminescente ( $10^{-8}$ A)							
		Rotina	Na-70	Na-75	Bo-5	Bo-70	TLD 600	TLD 700	
Livre	nt + $\gamma$	(23 $\pm$ 3)	(2,2 $\pm$ 0,3)	(2,1 $\pm$ 0,1)	(2,2 $\pm$ 0,3)	(0,7 $\pm$ 0,1)	(20 $\pm$ 2) 10	(32 $\pm$ 3)	
	nt	-----	-----	-----	(0,6 $\pm$ 0,4)	(0,3 $\pm$ 0,3)	(17 $\pm$ 2) 10	-----	
TLD/PARAF.	nt + $\gamma$	(33 $\pm$ 3)	(2,4 $\pm$ 0,2)	(1,9 $\pm$ 0,2)	(2,8 $\pm$ 0,2)	(1,0 $\pm$ 0,1)	(53 $\pm$ 4) 10	(40 $\pm$ 1)	
	nt	-----	-----	-----	(0,9 $\pm$ 0,3)	(0,5 $\pm$ 0,1)	(49 $\pm$ 4) 10	-----	
PARAF/TLD/PARAF.	nt + $\gamma$	(28 $\pm$ 3)	(2,19 $\pm$ 0,04)	(1,97 $\pm$ 0,08)	(8 $\pm$ 1)	(2,7 $\pm$ 0,9)	(19 $\pm$ 2) 10 <sup>2</sup>	(42 $\pm$ 2)	
	nt	-----	-----	-----	(6 $\pm$ 1)	(2,3 $\pm$ 0,9)	(19 $\pm$ 2) 10 <sup>2</sup>	-----	
PARAF/TLD	nt + $\gamma$	(21 $\pm$ 4)	(1,9 $\pm$ 0,2)	(1,6 $\pm$ 0,2)	(2,4 $\pm$ 0,3)	(0,8 $\pm$ 0,1)	(35 $\pm$ 3) 10	(29 $\pm$ 2)	
	nt	-----	-----	-----	(1,0 $\pm$ 0,3)	(0,4 $\pm$ 0,1)	(32 $\pm$ 3) 10	-----	

**Tabela 6.3.** Respostas TL ao campo misto nêutron + gama (nt +  $\gamma$ ) e devidas somente à nêutrons, nt, para os TLDs produzidos. A componente gama foi discriminada a partir das respostas TL dos TLDs Na-70 e Na-75, no caso dos TLDs Bo-5 e Bo-70. Os dados são relativos às médias e respectivos desvios padrão das leituras TL de dez dosímetros. A irradiação foi realizada no arranjo descrito no ítem 5.2.3b. e durou 121 horas.

Como se pode notar, a resposta TL dos dosímetros tipo Rotina foi reduzida a  $\approx 10\%$  do valor obtido numa irradiação onde o chumbo não foi utilizado (tabela 6.2).

Além do mais, resultados referentes à irradiação com e sem filtros de chumbo no arranjo 5.2.3c, dão valores para a razão  $[TL(JA)]/[TL(Pb)]$  de  $(0,78 \pm 0,09)$  para o TLD Rotina e  $(0,76 \pm 0,08)$  para o TLD 700, valores estes relativos à média e desvio padrão da leitura de cinco e sete dosímetros, respectivamente. Esses valores determinam para a componente gama uma energia de 1 MeV para ambos os TLDs encontrando-se, portanto, na região de alta energia.

A redução da componente gama de baixa energia do campo de radiação, permitiu não só visualizar melhor a resposta a nêutrons dos dosímetros Bo-70, mas também possibilitou a identificação da sensibilidade a nêutrons dos dosímetros Bo-5.

Apesar destes últimos apresentarem respostas TL aos nêutrons bem maior que os Bo-70, tal resposta não havia sido detetada anteriormente. A maior quantidade de fluorita existente nesse tipo de dosímetro tornava-o muito sensível à radiação gama de baixa energia. Assim, a resposta TL total do dosímetro havia aumentado muito, fazendo com que a parte referente à resposta TL aos nêutrons ficasse com a mesma ordem de grandeza dos desvios associados às medidas e portanto passasse despercebida.

O arranjo descrito no item 5.2.3b. ainda permite expor os TLDs a nêutrons albedo (TLD/parafina), nêutrons quase que exclusivamente térmicos (parafina/TLD/parafina), nêutrons sem moderação (LIVRE) e a nêutrons moderados por 8cm de parafina (parafina/TLD).

Verifica-se, pela tabela 6.3., que os TLDs produzidos não apresentam sensibilidade significativa aos nêutrons oriundos da fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$  (LIVRE). Observa-se também que a soma das respostas das situações TLD/parafina e parafina/TLD ficam muito aquém da situação parafina/TLD/parafina ( $\approx 2.5$  vezes menor), indicando que um TLD nesta situação "vê" o nêutron térmico passar diversas vezes por ele até ser absorvido.

### 6.2.3. Curva de sensibilidade a nêutrons térmicos

A sensibilidade dos dosímetros Bo-70 e Bo-5 a nêutrons térmicos foi estudada no arranjo descrito no item 5.2.3c, que possui melhor geometria de irradiação.

Os dosímetros produzidos foram irradiados durante diferentes intervalos de tempo para os quais foi registrada a temperatura na posição dos TLDs. Os resultados dessas irradiações encontram-se na tabela 6.4 e nas figuras 6.16., 6.17., 6.18. e 6.19.

Foram também irradiados os TLDs Bo-5, Rotina, TLD 600 e TLD 700, durante 70,5 horas, envolvidos em filtros de Cadmio (Cd) com espessura de 0,65mm para verificar se os TLDs produzidos apresentam sensibilidade exclusiva a nêutrons térmicos. O Cd corta os nêutrons com energia inferior a 0,5 eV. Os resultados obtidos indicam que a resposta TL a nêutrons do Bo-5 se anula dentro do desvio experimental e que a resposta TL a nêutrons obtida a partir do TLD 600 é  $(3 \pm 1)\%$  da resposta TL do TLD sem filtros de Cd, confirmando assim a sensibilidade predominante a nêutrons térmicos dos TLDs produzidos.

TL ( $10^{-9}$ A)	Rotina 35 TLDs*	Na-70 15 TLDs*	Na-75 14 TLDs*	Bo-5 47 TLDs*	Bo-70 14 TLDs*	TLD 600 45 TLDs*	TLD 700 14 TLDs*	Fluência ( $10^8 n_t \text{ cm}^{-2}$ ) [Tempo de exposição]	Temperatura °C
nt + $\gamma$	(4,3±0,4)10 <sup>1</sup>	(3,4±0,6)	(2,5±0,4)	(6,8±0,9)	(3,7±0,6)	(23±3)10 <sup>2</sup>	(7,9±0,5)10 <sup>1</sup>	(1,2 ± 0,1)	21 a 25
nt	—	—	—	(5±1)	(2,5±0,6)	(22±3)10 <sup>2</sup>	—	[22,7 horas]	
nt + $\gamma$	(12±1)10 <sup>1</sup>	(10±2)	(8±2)	(16±2)	(10±2)	(55±7)10 <sup>2</sup>	(19±2)10 <sup>1</sup>	(2,7 ± 0,3)	20 a 22
nt	—	—	—	(12±2)	(7±2)	(54±7)10 <sup>2</sup>	—	[50,5 horas]	
nt + $\gamma$	(13±2)10 <sup>1</sup>	(10±2)	(8±1)	(16±1)	(9±2)	(94±6)10 <sup>2</sup>	(27±4)10 <sup>1</sup>	(3,8 ± 0,4)	24 a 26
nt	—	—	—	(12±2)	(6±2)	(92±6)10 <sup>2</sup>	—	[70,5 horas]	
nt + $\gamma$	(16±2)10 <sup>1</sup>	(11±2)	(10±1)	(22±3)	(13±2)	(10±1)10 <sup>3</sup>	(33±2)10 <sup>1</sup>	(5,1 ± 0,5)	23 a 27
nt	—	—	—	(16±3)	(9±2)	(10±1)10 <sup>3</sup>	—	[95,4 horas]	
nt + $\gamma$	(19±3)10 <sup>1</sup>	(12±2)	(12±2)	(30±3)	(17±3)	(12±2)10 <sup>3</sup>	(40±4)10 <sup>1</sup>	(6,2 ± 0,7)	23 a 25
nt	—	—	—	(23±3)	(12±3)	(12±2)10 <sup>3</sup>	—	[117,3 horas]	

\* número de dosímetros utilizados em cada irradiação.

Tabela 6.4. Resumo das respostas TL a nêutrons térmicos dos dosímetros produzidos quando submetidos a vários intervalos de tempo de exposição no arranjo descrito no item 5.2.3c.

Convém lembrar que a secção de choque de interação com nêutrons do isótopo  ${}^6\text{Li}$  apresenta uma ressonância em 250 keV, como foi mencionado no item 3.6. A resposta TL de  $(3 \pm 1)\%$  desses dosímetros, quando filtrados pelo Cd foi, provavelmente, devida a esse fato.

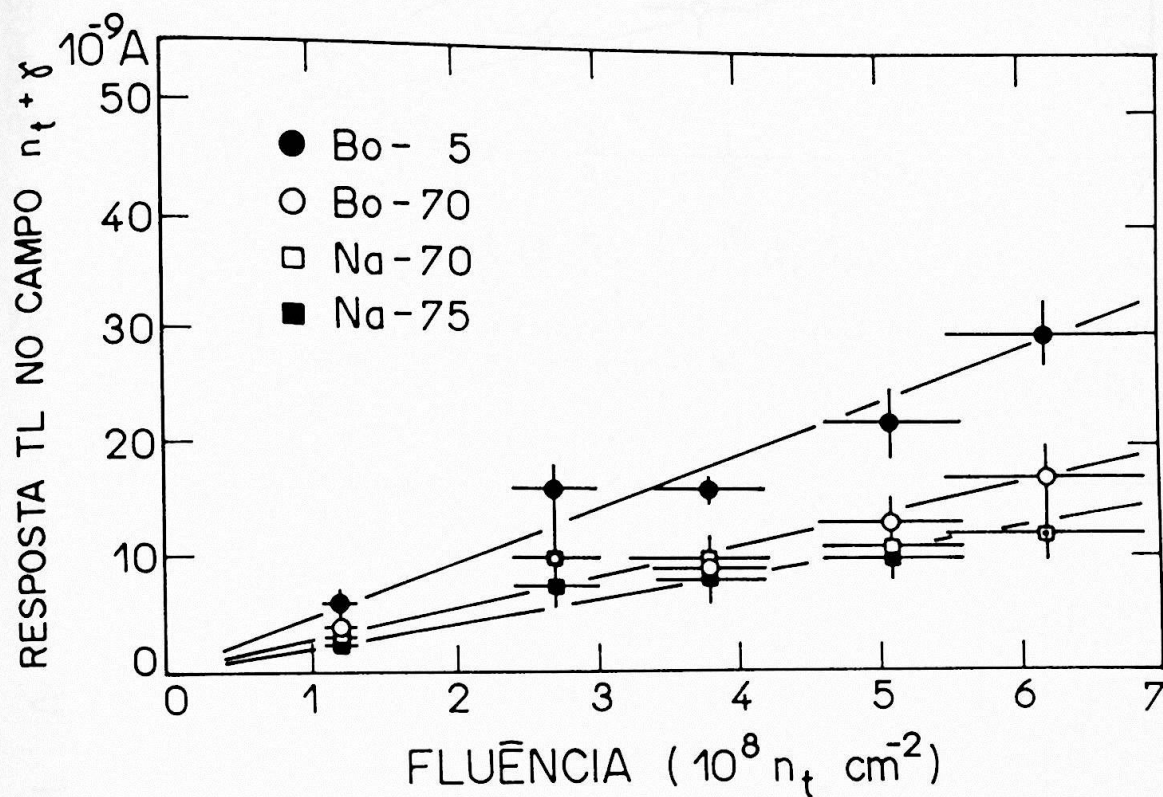


Fig. 6.16. Resposta TL no campo misto ( $n_t + \gamma$ ) dos TLDs Bo-5, Bo-70, Na-70 e Na-75 em função da fluência de nêutrons.

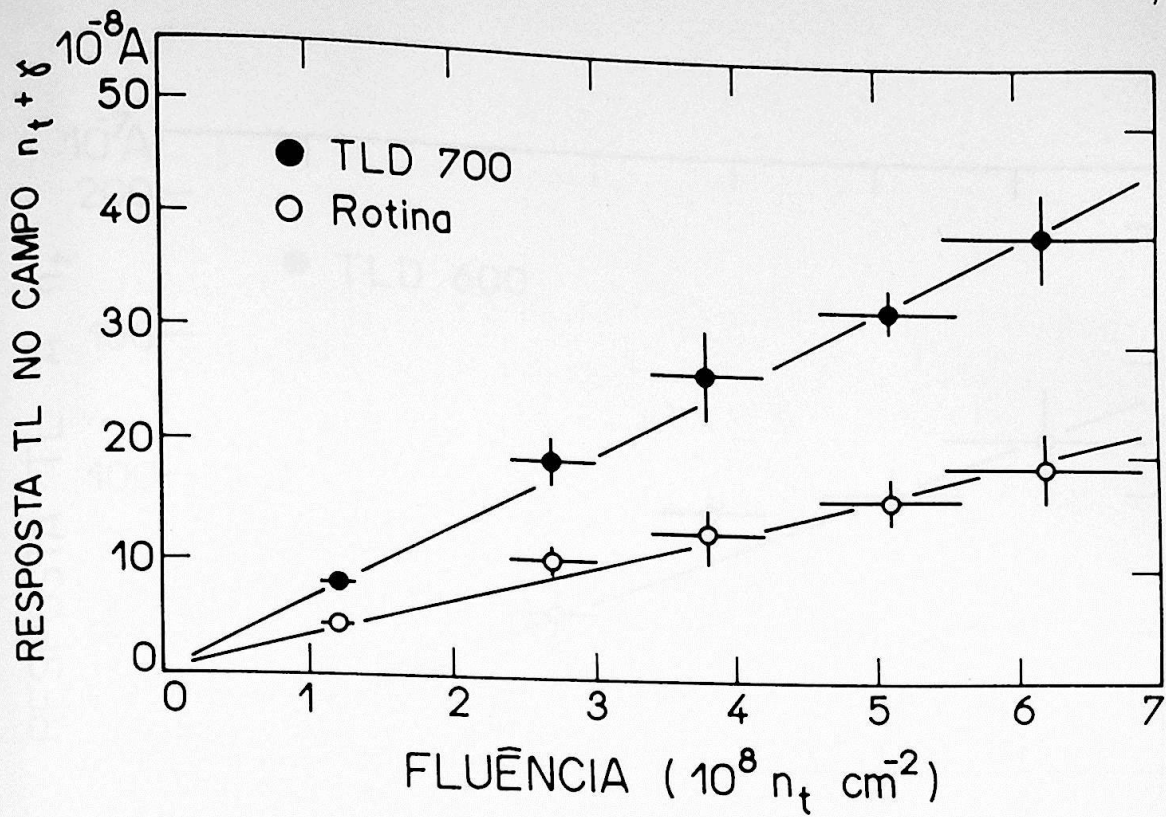


Fig. 6.17. Resposta TL no campo misto ( $n_t + \gamma$ ) dos TLDs Rotina e TLD 700 em função da fluência de nêutrons.

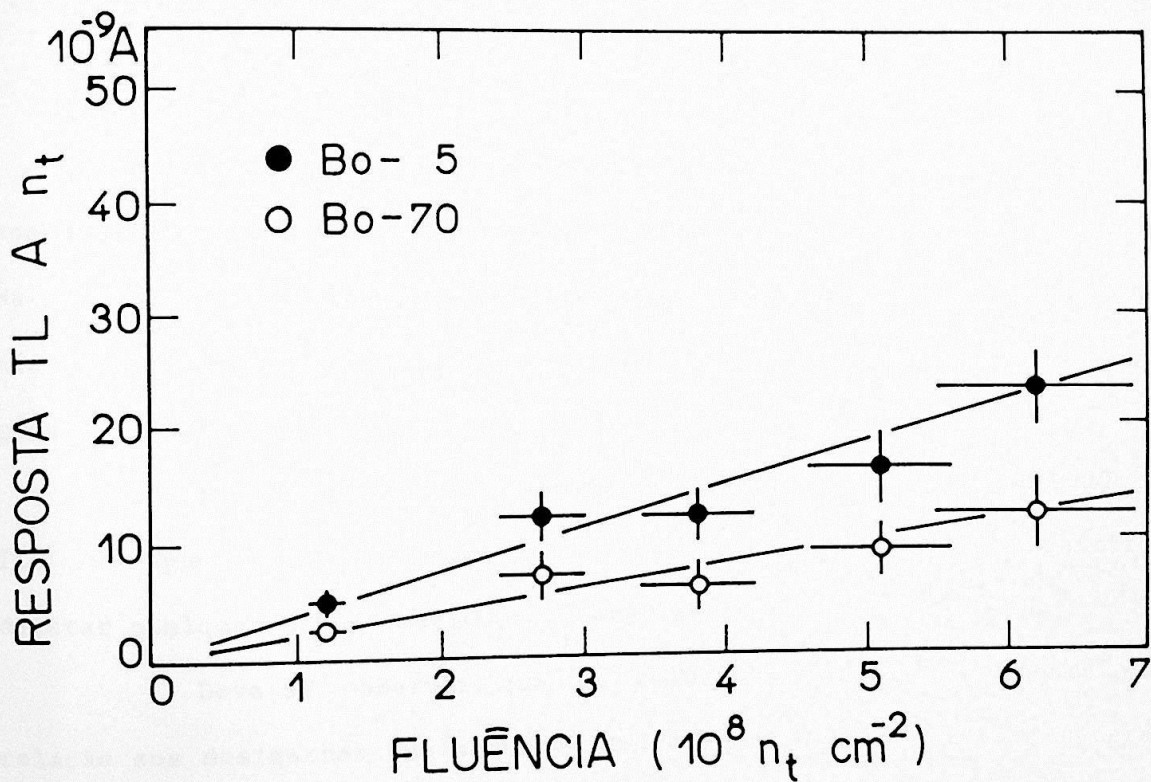


Fig. 6.18. Resposta TL a nêutrons térmicos dos TLDs Bo-5 e Bo-70 em função da fluência de nêutrons.

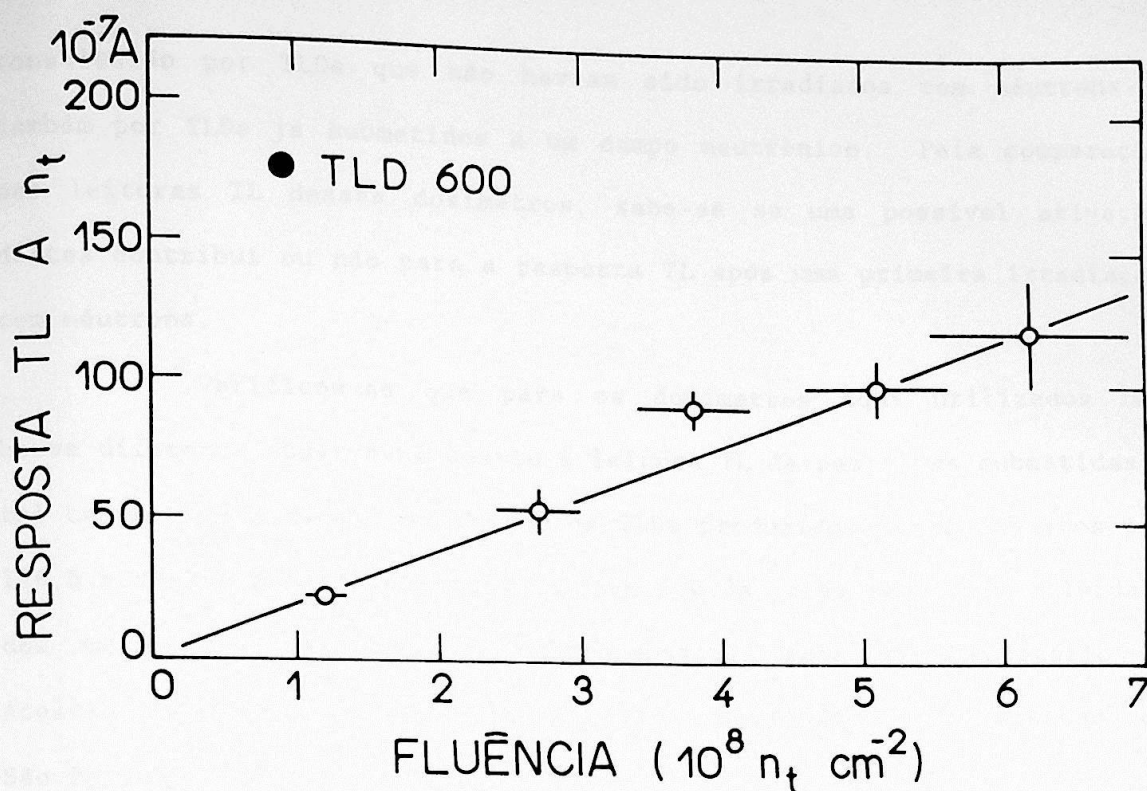


Fig. 6.19. Resposta TL a nêutrons térmicos do TLD 600 em função da fluência de nêutrons.

As respostas TL a nêutrons dos TLDs Bo-5 e Bo-70 apresentam comportamento linear na faixa de exposição a nêutrons estudada. Os TLDs Na-70, Na-75 e Rotina também apresentam tal comportamento no campo misto, indicando a linearidade da resposta TL em função da exposição gama.

Esse comportamento também é verificado para os TLD 600 e TLD 700 que por terem suas características já conhecidas permitem detetar qualquer erro cometido no procedimento experimental.

Deve-se observar que um cuidado especial foi tomado com relação aos dosímetros que serviram de referência zero. Eles receberam a radiação natural (BG) que é comum a todos os dosímetros utilizados, e que deve ser subtraída da resposta TL. Esse grupo de dosímetros foi

constituído por TLDs que não haviam sido irradiados com nêutrons e também por TLDs já submetidos a um campo neutrônico. Pela comparação das leituras TL desses dosímetros, sabe-se se uma possível ativação destes contribui ou não para a resposta TL após uma primeira irradiação com nêutrons.

Verificou-se que para os dosímetros aqui utilizados não houve diferença observável quanto à leitura TL de pastilhas submetidas a tal campo. Além dessa avaliação, os TLDs produzidos foram expostos por 126,5 horas no arranjo descrito no item 5.2.3a. e em seguida a atividade dos mesmos foi analisada por espectroscopia gama no Laboratório do Acelerador Linear de Elétrons do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

Foi constatada a presença das linhas do sódio e do cloro, ambas com intensidade menores do que a radiação natural do arranjo onde foram colocadas para se proceder a análise. Esses resultados indicam que para a fluência de nêutrons utilizada nesse trabalho não ocorre ativação das pastilhas produzidas em níveis mensuráveis.

#### 6.2.4. Determinação do fluxo de nêutrons térmicos na posição dos TLDs no arranjo final utilizado para o levantamento da curva de sensibilidade a nêutrons térmicos

O fluxo de nêutrons térmicos no arranjo descrito no item 5.2.3c foi medido pelo método de ativação de folhas de ouro, através da reação  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ , pelo Laboratório de Metrologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN/CNEN-SP).

As folhas de Au foram colocadas em meio à parafina, nas posições onde são irradiados os TLDs, como mostra a figura 6.20..

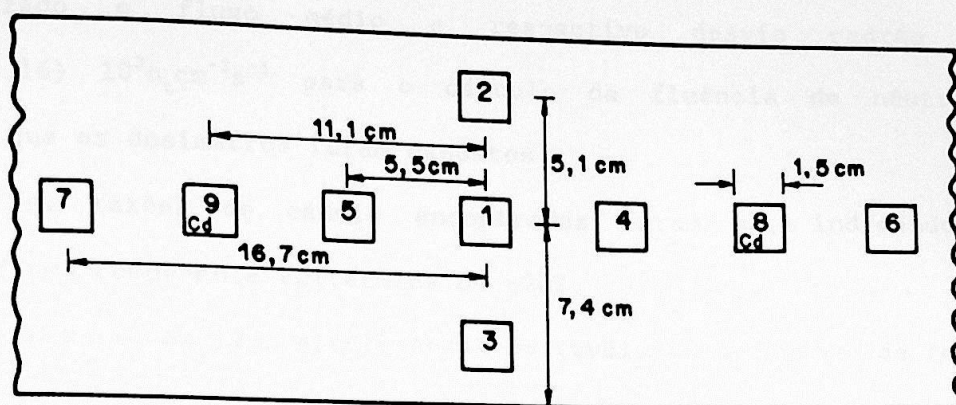


Fig. 6.20. Esquematização da disposição das folhas de Au no arranjo descrito no item 5.2.3c. nas posições onde os TLDs são irradiados (1, 4, 5, 6, 7, 8 e 9), estando as folhas 8 e 9 envoltas em Cd.

Os resultados das medidas realizadas referentes a uma irradiação de 287,1 horas, ou 4.4 meias vidas do  $^{198}\text{Au}$  estão resumidos na tabela 6.5..

Posição de irradiação	Fluxo $10^3 n_t \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Erro* (%)
1	1,707	6,4
2	0,725	17
3	0,867	10
4	1,284	13
5	1,551	10
6	1,336	10
7	1,578	3,1
8	1,309	18
9	1,566	16

\* Grau de confiança de 68% para as medidas realizadas

Tabela 6.5. Fluxo de nêutrons térmicos,  $n_t$ , nas posições indicadas na fig. 6.20..

Em virtude dos TLDs nas irradiações terem sido colocados entre as posições 1, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 esquematizadas na figura 6.20., foi utilizado o fluxo médio e respectivo desvio padrão de  $(1,48 \pm 0,16) 10^3 n_t \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  para o cálculo da fluência de nêutrons térmicos a que os dosímetros foram expostos.

As razões de cádmio encontradas foram  $\approx 5$ , indicando a presença de uma componente epitérmica de  $\approx 20\%$ .

Para se avaliar a influência do invólucro de chumbo da fonte de  $^{241}\text{Am-Be}$  no fluxo de nêutrons térmicos na posição onde os TLDs são dispostos no arranjo, este foi retirado e medidas por ativação de folhas de Au foram efetuadas nas posições 1, 4 e 5 da figura 6.20., para uma irradiação de 357,4 horas que correspondem a 5,5 meias vidas do  $^{198}\text{Au}$ .

O fluxo obtido é igual ao anterior indicando que a redução pelo invólucro de chumbo do fluxo de nêutrons térmicos obtido é desprezível.

## 7. CONCLUSÕES

Foram produzidos dois TLDs Bo-70 e Bo-5 de fluorita brasileira ( $\text{CaF}_2$ : natural) e tetraborato de sódio ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) com proporções em massa de 70% e 43% de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , respectivamente, que apresentaram sensibilidade a nêutrons térmicos.

Para a manufatura desses dosímetros foi desenvolvida uma técnica de sinterização que garante grande resistência física e contorna o problema da higroscopicidade apresentada pelo aglutinante utilizado, sem prejudicar as propriedades termoluminescentes da fluorita brasileira.

Foram também produzidos por compactação a frio dois TLDs Na-70 e Na-75 de fluorita brasileira e cloreto de sódio com proporções em massa de 70% e 75% do aglutinante  $\text{NaCl}$ , respectivamente. Estes TLDs apresentam desprezível sensibilidade a nêutrons térmicos.

O estudo da uniformidade de produção indica uma reprodutibilidade da resposta TL num campo de radiação gama de  $\approx 15\%$  para os TLDs Na-70 e Na-75 e  $\approx 20\%$  para os TLDs Bo-70 e Bo-5. Foi possível selecionar grupos de dosímetros com precisão de  $\pm 10\%$ , tendo em vista que em irradiações sucessivas cada dosímetro apresentou reprodutibilidade de resposta TL dentro dessa precisão.

As semelhanças entre as curvas de dependência energética de todos os dosímetros produzidos, quando irradiados com radiação gama, facilitou o uso dos TLDs Na-70 e Na-75 para discriminar a componente gama do campo neutrônico. Apenas um fator de ajuste de sensibilidade pode ser empregado para todas as energias da radiação gama, quando se

efetuou a subtração da parte da resposta TL dos dosímetros Bo-70 e Bo-5 correspondentes a esse tipo de radiação.

O uso de filtros de cádmio nos TLDs Bo-70 e Bo-5 quando da irradiação com nêutrons mostra que estes dosímetros apresentam sensibilidade apenas a nêutrons térmicos.

Deve-se observar, contudo, que a sensibilidade a nêutrons térmicos desses dosímetros pode passar despercebida se a componente gama do campo misto de radiação pertencer à região de baixa energia, pois nesta região a resposta TL à radiação é uma ordem de grandeza maior do que a apresentada na região de alta energia. Uma maior sensibilidade à radiação gama aumenta de maneira significativa a resposta global do dosímetro, tornando a resposta à nêutrons da ordem de grandeza dos desvios associados às leituras TL.

A resposta TL devida a nêutrons térmicos dos TLDs Bo-70 e Bo-5 mostrou-se linear com relação à fluência de nêutrons da ordem de  $10^8 n_t \text{cm}^{-2}$ , indicando sensibilidade mínima para uma fluência de  $1,0 \times 10^8 n_t \text{cm}^{-2}$ . Tal valor corresponde à fluência de nêutrons térmicos que produz a dose máxima permissível para trabalhadores em quarenta horas de atividade semanais<sup>(50)</sup>.

Tal sensibilidade não qualifica, de imediato, os TLDs Bo-70 e Bo-5 para a dosimetria pessoal. No entanto, viabiliza sua aplicação na monitoração de área.

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Utilizar na manufatura dos dosímetros boro ou tetraborato de sódio enriquecido com o isótopo  $^{10}\text{B}$ , com a finalidade de se aumentar a sensibilidade a nêutrons térmicos.
2. Aprofundar o estudo da reprodutibilidade da resposta TL dos dosímetros produzidos no campo neutrônico.
3. Analisar a resposta TL relativa entre os picos 2 e 3 da curva de emissão TL dos TLDs produzidos num campo neutrônico.
4. Determinar a fluência máxima de nêutrons térmicos a que os dosímetros Na-70 e Na-75 possam ser expostos, sem que a atividade induzida interfira na determinação da componente gama do campo neutrônico.
5. Estudar o comportamento dos dosímetros em fluências neutrônicas mais elevadas, incluindo a possibilidade de ativação de alguns dos seus componentes.
6. Estudar detalhadamente a resposta a gama dos dosímetros num campo neutrônico, observando se há eventualmente mudança de sensibilidade TL à radiação gama devido à presença de nêutrons.
7. Projetar um porta-dosímetro que permita caracterizar adequadamente um campo neutrônico, utilizando filtros apropriados. Tais filtros serviriam não apenas para se caracterizar melhor tal campo, mas também

poderiam ser usados para se reduzir a componente gama de baixa energia incidente nos dosímetros.

8. Projetar e construir um sistema de calibração dos dosímetros, onde todos os parâmetros sejam bem conhecidos.

9. Trabalhar com os TLDs  $^{70}\text{Br}$  e  $^{5}\text{Br}$  em meio a esferas moderadoras de diferentes espessuras visando utilizá-los em espectrometria de nêutrons.

REFERÊNCIAS:

1. ING, H. and PIESH, E. - Status of Neutron Dosimetry. Radiat. Prot. Dosim., 10:234-245, 1985.
2. HARRISON, K.G. and TOMMASINO, L. - Damage Track Detectors for Neutron Dosimetry: II Characteristics of Different Detection Systems. Radiat. Prot. Dosim., 10: 219-235, 1985.
3. KORBA, A. and HOY, J.E. - A Thermoluminescent Personnel Neutron Dosimeter. Health Phys., 18: 581-584, 1970.
4. GRIFFITH, R.V.; HANKINS, D.E.; GAMMAGE, R.B.; TOMMASINO, L., Recent Developments in Personnel Neutron Dosimeters-A Review. Health Phys., 36: 235-260, 1979.
5. PIESH E. and BURGHARDT, B. - Albedo Neutron Dosimetry. Radiat. Prot. Dosim., 10: 175-188, 1985.
6. PRADHAN, A.S.; RASSOW, J. and MEISSNER, P. - Dosimetry of d(14)+Be Neutrons with two-peak Method of LiF TLD-700. Phys. Med. Biol., 30: 1349-1354, 1985.
7. PRADHAN, A.S.; RASSOW, J.; OLTHOFF-MUENTER, K.; BAUMBOER, W. and MEISSNER, P. - In - Phanton Dosimetry using CaF<sub>2</sub>: Tm (TLD - 300) Ribbons. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 36: 619-625, 1985.
8. PRADHAN, A.S.; RASSOW, J. and OLTHOFF-MUENTER, K. - Additivity of Fast Neutron and Gamma Ray Induced Thermoluminescence and Reusability of CaF<sub>2</sub>:TLD-300 Ribbons. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 36 103-106, 1985.
9. MUCCILLO, R. - Dosimetria Termoluminescente de Nêutrons com CaF<sub>2</sub>: natural. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Energia Atômica, São Paulo, 1970.
10. MAYHUGH, M.R. et al. - Thermal Neutron Dosimetry by Phosphor Activation. (Informação IEA n° 258), São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1971.

11. MAYHUGH, M.R. and WATANABE, S. - Fast Neutron Detection by Phosphor Activation. (Informação IEA nº 308), São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1973.
12. NAKAJIMA, T.; TOTTI, V.; WATANABE, S.; FUJIMOTO, K.; MAUNG, S. and NISHIMURA, A. - Back-Scatter and Building-up Effects on the Thermoluminescent Sensivity of a Thermal Neutron Monitor. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 26: 153-158, 1975.
13. DISTENFELD, C.; BISHOP, W. and COLVETT, D. - Thermoluminescent Neutron-Dosimetry System. In: Luminescence Dosimetry. Proceeding of International Conference, Stanford, California (June 21-23, 1965). USAEC. Division of Technical Information Apr. 1967, p. 457-466.
14. PUIITE, K.J. - Thermoluminescent Response of  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$  Mixed with Organic Liquids in Thermal and Fast Neutron Fields. Health Phys., 17: 661-667, 1969.
15. FURUTA, Y. and TANAKA, S. - Response of  $^6\text{LiF}$  and  $^7\text{LiF}$  Thermoluminescence Dosimeters to Fast Neutrons. Nucl. Instr. Methods, 104: 365-374, 1972.
16. TANAKA, S. and FURUTA, Y. - Estimation of Gamma-Ray Exposure in Mixed Gamma-Neutron Fields by  $^6\text{LiF}$  and  $^7\text{LiF}$  Thermoluminescence Dosimeters in pair Use. Nucl. Instr. Methods, 117: 93-97, 1974.
17. SAHYUN, A. - Dosimetria de Nêutrons usando Material Termoluminescente e KBr. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1978.
18. FEDERGRUN, S.H. - Detecção de Nêutrons Epitérmicos usando  $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$  Misturado com  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ . Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Energia Atômica, São Paulo, 1978.
19. OKUNO, E. - Propriedades Termoluminescentes do Fluoreto de Cálcio Natural. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1971.
20. CRUZ, M.T. - Propriedades Termoluminescentes da Fluorita de Coloração Violeta. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1972.

21. TRZESNIAK, P. - Dosímetros Termoluminescentes Sólidos à Base de Fluorita Natural. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1985.
22. ICRU (1980). - Radiation quantities and Units. ICRU report 33. International Commission on Radiological Units and Measurements, Washington, 1980.
23. JOHNS, H.E. and CUNNINGHAM, J.R. - The Physics of Radiology. Illinois, Charles C. Thomas Publisher, 1983.
24. ASHCROFT, N.W. and MERMIN, N.D. - Solid State Physics. New York, Holt. Rinehart and Winston, 1976.
25. NAMBI, K.S.V. - Thermoluminescence: its understanding and applications. (Informação IEA nº 54), São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1977.
26. HUGHES, D.J. - Neutrons Cross Sections. London, Pergamon Press, 1957.
27. NBS Handbook 63. Protection Against Neutron Radiation up to 30 Million Electron Volts. Washington, National Bureau of Standards, 1957.
28. BECKURTS, K.H. and WIRTZ, K. - Neutron Physics. Berlin, Springer-Verlag, 1964.
29. HUGHES, D.J. - Pile Neutron Research. Cambridge, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1953.
30. CURIS, L.F. - Introduction to Neutron Physics. Princeton, D. Van Nostrand Co., Inc., 1959.
31. EVANS, R.D. - The Atomic Nucleus. New York, MacGraw-Hill Book Co., Inc., 1955.
32. KAPLAN, I. - Física Nuclear. 2ª ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A., 1978.
33. GEIGER, K.W. and HARGROVE, C.K. - Neutron Spectrum of an  $^{241}\text{Am}$ -Be ( $\alpha, n$ ) Source. Nucl. Phys., 53: 204-208, 1964.

34. De PANGHER, J. and TOCHILIN, E. - Neutron Sources. In: Radiation Dosimetry, Vol. III, 2<sup>nd</sup> ed. New York, Academic Press, 1969. p. 309-350.
35. LORCH, E.A. - Neutron Spectra of Am/B, Am/Be, Am/F, Cm/Be, Pu/C and Cf Isotopic Neutron Sources. Int.J.Appl.Radiat.Isot., 24: 585-591, 1973.
36. TOCHILIN, E. and SHUMWAY, B.W. - Dosimetry of Neutrons and Mixed n+ $\gamma$  Fields. In: Radiation Dosimetry, Vol. III, 2<sup>nd</sup> ed. New York, Academic Press, 1969. p. 247-308.
37. GRYNTAKIS, E., CULLEN, D.E. and MUNDY, G. - Thermal Neutron Cross-Section and Infinite Dilution Resonance Integrals. In: Handbook on Nuclear Activation Data. Vienna, Technical Reports, Série n° 273, IAEA, 1987. p. 199-260.
38. BÖDY, Z. - Standard Monitor Reactions For Neutrons. In: Handbook on Nuclear Activation Data. Vienna, Technical Reports, Series N° 273, IAEA, 1987. p. 29-82.
39. HUGHES, D.J. and SCHWARTZ, R. - Neutron Cross-Section. New York, BNL 325, 2<sup>nd</sup> ed. (Brookhaven National Laboratory), 1958.
40. Handbook of Chemistry and Physics. 52<sup>nd</sup> ed. Cleveland, The Chemical Rubber Co., 1971.
41. ZANELLI, G.D. - The effect of Particle Size on the Thermoluminescence of Lithium Fluoride. Phys.Med.Biol., 13: 393-399, 1968.
42. EISENHAUER, C.M.; HUNT, J.B. and SCHWARTZ, R.B. - Calibration Techniques for Neutron Personal Dosimetry. Rad.Prot.Dosim., 10: 43-57, 1985.
43. YOUNG, D.S. - Paraffin Cylinders to Measure Neutron Energies. LA-1938, 1965.
44. WALLACE, R.; MOYER, B.J.; PATTERSON, H.W.; SMITH, A.R. and STEPHENS, L.D. - The Dosimetry of High-Energy Neutrons Produced by 6.2 GeV Protons Accelerated in the Bevatron. Vienna, IAEA, Topics in Radiation Dosimetry, 1961.

45. YANAGIHARA, L.S. - Determinação da Taxa de Dose Equivalente de Neutrons nas Imediações do Acelerador Linear de Elétrons do Instituto de Física da U.S.P. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1984.
46. EMERGY, E.W. - Geiger-Mueller and Proportional Counters. In: Radiation Dosimetry, Vol. II, 2<sup>nd</sup> ed. New York, Academic Press, 1966. p. 73-122.
47. YOSHIMURA, E.M. - Determinação Simultânea de Dose e Energia Efetiva de Raios-X com Dosímetros Termoluminescentes de Fluorita Natural. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1980.
48. OKUNO, E. and CRUZ, M.T. - Proc. of the IV Japan-Brazil Symposium on Science and Technology, Vol. IV. São Paulo, 1984. p. 187.
49. OKUNO, E.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, M.T. and WATANABE, S. - Proc. of the Fifth Int. Cont. on Luminescence Dosimetry. São Paulo, 1977. p. 189.
50. IAEA Safety Series n° 42. - Radiological Safety Aspects of the Operation of Neutron Generatos. Vienna, STI/PUB/427, 1976.