



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM NOVO PORTA
DETECTOR/FILTRO PARA MONITORAMENTO
TERMOLUMINESCENTE COM $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$

VICENTE DE PAULO DE CAMPOS

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Aplicações.

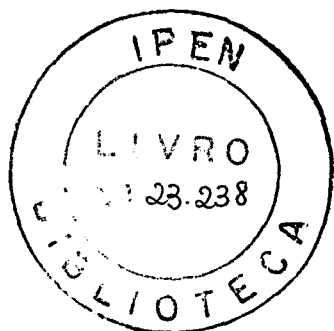
Orientador:
Dr. José Eduardo Manzoll

São Paulo
2005

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM NOVO PORTA
DETECTOR/FILTRO PARA MONITORAMENTO TERMOLUMINESCENTE
COM CaSO₄:Dy/PTFE.**

VICENTE DE PAULO DE CAMPOS



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

**Orientador:
Dr. José Eduardo Manzoli**

SÃO PAULO
2005

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM NOVO PORTA
DETECTOR/FILTRO PARA MONITORAMENTO TERMOLUMINESCENTE
COM CaSO₄:Dy/PTFE.**

VICENTE DE PAULO DE CAMPOS

RESUMO

A utilização de dosímetros termoluminescentes (TLDs) produzidos com o fósforo de CaSO₄:Dy pelo Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN) ocorre há muitos anos, graças ao trabalho de seus pesquisadores e colaboradores principalmente nas décadas de 1970 e 1980. As vantagens desse fósforo, produzido pelo próprio IPEN, começam a ser mais solicitadas e suas desvantagens mais evidenciadas com o mercado cada vez mais exigente e competitivo. Esse fósforo foi utilizado inicialmente em *monitoração ambiental e de área* no IPEN e em instituições externas, uma vez que esse apresenta maior sensibilidade que vários outros fósforos, tal como o LiF:Mg. A principal desvantagem deste sulfato está em sua *dependência energética* com a radiação ionizante incidente, a qual deve ser corrigida para sua aplicação em campos de radiação diversos. Este fósforo tem sido utilizado dentro de um suporte denominado *porta-dosímetro*, que é uma adaptação do porta-dosímetro anterior que utilizava filmes fotográficos. Este porta-dosímetro permite uma correção razoável na dependência energética apenas se a incidência do feixe de radiação ocorrer ortogonalmente. Com o objetivo de melhorar este desempenho e diminuir a dependência energética sob qualquer ângulo de incidência, reduzindo a incerteza da medição da dose individual avaliada, este trabalho apresenta estudo de um novo porta-dosímetro, com uma geometria de filtração inovadora, e seu desempenho foi comparado aos dosímetros atualmente em uso, com melhoria significativa nos resultados. Irradiações com radiação Gama do Cobalto 60 e com raios X de 25,1; 33; 37,3 e 82,1 keV, sob ângulos de incidência de 0°, 30°, 45° e 90° foram ensaiados nas condições dos serviços de irradiação disponíveis. Simulações computacionais semi-empíricas utilizando diferenças finitas em três dimensões indicaram qual a espessura e a largura (para esta geometria) ideais para otimizar a correção à dependência energética quando irradiados com feixes de raios-X de 33, 48, 118 e 1250 keV sob vários ângulos de incidência.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A NEW BADGE/FILTER FOR THERMOLUMINESCENT MONITORING WITH $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ /PTFE.

VICENTE DE PAULO DE CAMPOS

ABSTRACT

Calcium Sulfate ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$) phosphor Thermoluminescent Dosimeter (TLD) has been used by the Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN) since 70's and 80's, due to important work of its researchers and collaborators. This phosphor advantages, beside the fact that it is produced by IPEN itself, begin to be more required and its disadvantages have become more apparent, in a global market more and more competitive. This phosphors was used primarily in environmental and area monitoring at IPEN facilities and in a few external institutions, once it presents more sensibility than other phosphors, like LiF:Mg . Its mainly disadvantage is a strong energetic dependence response to ionizing radiation, which must be corrected for its application in every radiation field. This phosphor has been used inside a badge which is an adaptation from photographic film badges used in the past. This badge permits a reasonable correction in the energetic dependence, only for orthogonal beam incidence. With the objective of improve the performance and reduce the energetic dependence on any incidence angle, reducing the dose measurement uncertainty too, this work presents a study on a new badge, with a new filter geometry, and its performance was compared to the actual dosimeter in use, with significant improve on results. Gamma irradiations of ^{60}Co and x-rays of 25,1; 33; 37,3 and 82,1 keV, on incidence angles of 0° , 30° , 45° and 90° were done at facility conditions of IPEN. Semi-empirical computational simulation using finite differences in three dimensions were done. The results pointed out the best filter thickness and width for initiate the prototype production, in order to optimize the correction on energetic dependence on irradiation of photons of 33, 48, 118 and 1250 keV energies under many incidence angles.

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract	ii
Sumário	iii
Dedicatória	v
Agradecimentos	vii
1. Introdução	1
2. Objetivos	8
3. Considerações Teóricas	9
3.1. Termoluminescência	9
3.2. Dependência Energética	12
3.3. Monitoração Individual Externa	15
3.4. Incerteza de Medição da Termoluminescência	16
4. Materiais e Métodos	21
4.1. Desenvolvidos neste Trabalho	21
4.1.1. Selecionamento dos Detectores	21
4.1.2. Limite Mínimo de Detecção (LMD)	23
4.1.3. Simulação Numérica Semi-Empírica	25
4.2. Materiais e métodos utilizados neste Trabalho	29
4.2.1. Leitura TL	29
4.2.2. Detectores TL de CaSO₄:Dy / PTFE	32
4.2.3. Irradiações X e Gama	34
4.2.4. TLDi, Dosímetros Pessoais do LDT/IPEN	38
4.2.5. Tratamento térmico	40
5. Resultados e Discussões	42
5.1. Do Selecionamento	42
5.2. Do Limite Mínimo de Detecção	43
5.3. Dependência energética do porta-dosímetro TLDC	45
5.4. Produção do Porta-detector e do Filtro	46
5.5. Da Simulação Numérica Semi-Empírica	48

5.6. Respostas TL Sob Ângulos Diferentes	50
5.6.1. Irradiação com Radiação Gama de ⁶⁰Co.....	52
5.6.2. Irradiação com Raios-X de 82,1 keV.....	53
5.6.3. Irradiação com Raios-X de 37,3 keV.....	54
5.6.4. Irradiação com Raios-X de 33 keV.....	55
5.6.5. Irradiação com Raios-X de 25 keV.....	56
6. Conclusões	57
Referências Bibliográficas	58
Anexo - Programa Fonte da Simulação	61
Apêndice - Trabalhos Gerados durante o (e por causa do) Projeto.....	69

Dedico este trabalho as minhas irmãs,
Maria, Lurdes, Bia, Ana, Izildinha, Vera e Regina,
e ao meu pai Raul de Campos,

Que com suas determinações, dedicações, me ensinaram que estudar é querer bem a si
mesmo e a quem amamos.

Ó Mestre, fazei que eu procure mais:
consolar, que ser consolado;
compreender, que ser compreendido;
amar, que ser amado.
Pois é dando que se recebe.
É perdoando que se é perdoado.
E é morrendo que se vive para a vida eterna.

São Francisco de Assis

Aprender uma coisa significa entrar em contato com um mundo do qual não se tem a menor
idéia. É preciso ser humilde para aprender.

Paulo Coelho

Ó Mestre,

Ó Mestre, fazei que em nosso interior ressoe vossa sabedoria e o exemplo de vossa
coerência até a morte. Que sejamos vossos discípulos fiéis na medida em que realizarmos o
que nos ensinais para sermos verdadeiramente instrumentos de amor e de paz.

Papa João Paulo II

“Ter problemas na vida é inevitável, ser derrotado por eles é opcional.”

Roger Crawford

Há três coisas na vida que nunca voltam atrás: a flecha lançada, a palavra pronunciada e a
oportunidade perdida.

Provérbio Chinês

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela iluminação e proteção em toda minha vida.

Ao Dr. José Eduardo Manzoli pela orientação, incentivo e apoio durante estes anos de trabalho.

A Dra. Linda V. E. Caldas, gerente do Centro de Metrologia das Radiações do IPEN por permitir a realização deste trabalho.

A Dra. Leticia L. C. Rodrigues, gerente adjunto de serviços do Centro de Metrologia das Radiações do IPEN pelo incentivo e apoio para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Cláudio Rodrigues, superintendente do IPEN, por permitir o uso da infraestrutura dos Centros adjuntos na realização deste trabalho.

Aos pesquisadores do Centro de Metrologia das Radiações do IPEN, Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), Dra. Maria da Penha A. Potiens, MSc. Vitor Vivolo pelo carinho e rapidez na exposição das amostras.

A Dra. Áurea Beatriz Cerqueira Geraldo do Centro de Radiofarmácia, Celso Vieira de Moraes e Nildemar Aparecido Messias do Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais pela colaboração na microscopia eletrônica do material termoluminescente.

Aos colegas e amigos de trabalho Maria de F. Martins, Osvaldo C. Alípio, Salomão A. de Medeiros e Eliomar J. G. de Cerqueira, pelas discussões, apoio e pronto atendimento nas inúmeras solicitações ao Laboratório de Dosimetria Termoluminescente.

Ao Dr. Alberto S. Todo e Dr. Orlando Rodrigues Jr. pelo incentivo e paciência com o barulho causado na confecção das amostras para este trabalho.

Aos meus pais, Raul de Campos e Benedita C. de Campos (in memoriam), sem vocês, Deus não teria soprado a vida sobre mim.

A minha segunda família Paulo da C. Pinto e Margarida O. Pinto, meu irmão e minha segunda mãe, pelas horas de luzes acesas e noites mal dormidas, paciência e carinho que sempre pude contar.

A todos que diretamente ou indiretamente ajudaram-me na execução deste trabalho.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço das aplicações das radiações ionizantes, nas atividades de geração de energia (reatores de potência), em reatores de pesquisa, na radioesterilização, na radioterapia, em radiodiagnósticos etc., a preocupação com a segurança radiológica (radioproteção) dos indivíduos ocupacionalmente expostos também tem aumentado. Nestas atividades, há o risco dos trabalhadores receberem quantidade de radiação além dos limites adequados, o que leva à procura por métodos de detecção cada vez melhores, capazes de mensurar com maior precisão, exatidão e confiabilidade, além de facilidade.

Para esta segurança existem procedimentos e formas de monitoramento que avaliam a dose recebida, tais como: monitoração de área, monitoração ambiental, monitoração de corpo inteiro, dosimetria citogenética e monitoração individual externa^[1,2]. Todo indivíduo que trabalhe ou utilize material e equipamento emissor de radiação ionizante deve ser monitorado individualmente^[3], e esta deve ser uma atividade simples e de baixo custo, sem lhe causar nenhum transtorno na sua ocupação.

Mas a monitoração individual externa (M.I.E.) é uma atividade complexa onde estão envolvidos vários aspectos metrológicos, tais como a utilização de diferentes grandezas físicas, unidades de medição e o inter-relacionamento entre as mesmas. Além disso, a M.I.E. envolve o estudo de Ciência dos Materiais, algoritmos e aspectos administrativos. As atividades ou ocupações que envolvem potencial exposição à radiação ionizante, implicam no uso diário de monitores ou dosímetros individuais na rotina do trabalhador. As interpretações dos resultados destes monitores demandam metodologias e medidas para a avaliação final da dose que o trabalhador recebeu e, por último, o registro oficial destes valores. No Brasil é admitido legalmente apenas utilizar dois processos de monitoração individual externa^[4]: através da velação de filmes fotográficos (dosimetria fotográfica), e através do fenômeno da termoluminescência (dosimetria termoluminescente, ou dosimetria TL).

A dosimetria TL é realizada por instrumentos denominados dosímetros pessoais, monitores pessoais, dosímetros TL ou TLDs (sigla do inglês, *Thermoluminescence Dosimeter*) que são utilizados sobre o tórax do trabalhador e medem a radiação de forma passiva, ou seja, a medição ocorre após o seu uso, normalmente depois de um mês. Os dosímetros pessoais são constituídos de um suporte chamado de porta-detector ou porta-dosímetro, no qual são colocados materiais que apresentam propriedades termoluminescentes (fósforos ou detectores TL). Estes detectores permitem relacionar, através de equipamentos adequados e mediante processos de calibração, sua luminosidade emitida termoluminescentemente com a grandeza operacional estabelecida para quantificação da radiação no ensaio de M.I.E. No Brasil, esta grandeza é a *Dose Individual para Fótons*, $H_x^{[4,5]}$, na qual é exigida a detecção apenas de fótons, com energia entre 20 e 1250 keV.

A avaliação do material termoluminescente do TLD é realizada por instrumentos, chamados *leitores*¹ *termoluminescentes*, constituídos basicamente de duas partes: um sistema aquecedor com controle preciso das taxas de aquecimento e um sistema de detecção da luz emitida pelo material termoluminescente. Ambas as partes são controladas de maneira eletrônica. A luz emitida é detectada por um tubo fotomultiplicador ou por um fotodiodo, dependendo do modelo, que produz sinais elétricos (correntes) que são coletados por outros dispositivos. Estas correntes são integradas no tempo e geram a resposta final, em unidades de carga elétrica. A associação desta carga com a dose gera a *curva de calibração* do processo. Um exemplo desta curva de calibração é mostrada na FIG.1. Através da intensidade da luz emitida em função do tempo de aquecimento obtém-se a *curva de emissão* gerada pelo material termoluminescente dos TLDs, que é uma característica importante para estudos mais detalhados da estrutura eletrônica do fósforo. Uma curva de emissão típica é apresentada na FIG.2.

O chamado *sistema* de monitoração individual termoluminescente é o conjunto formado pelos dosímetros pessoais, pelo equipamento de leitura TL e demais processos preparativos, como o tratamento térmico. Através de um algoritmo apropriado, que utiliza diversas informações, como as obtidas nas curvas de calibração e de emissão, obtém-se a dose individual a que um trabalhador esteve sujeito, independentemente da energia do fóton a que tenha sido submetido.

¹ Por isto a avaliação TL é também chamada de "leitura TL".

É indispensável o conhecimento das propriedades da resposta TL dos dosímetros pessoais e do material termoluminescente para utilizá-lo com fins dosimétricos. O Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa (CASMI/IRD) é responsável pela certificação e avaliação dos serviços de monitoração individual externa no Brasil e define, nos documentos IRD-RT nº 001 ao 005.01/95^[4], os critérios de aceitação dos detectores e do sistema para sua utilização em M.I.E. no Brasil.

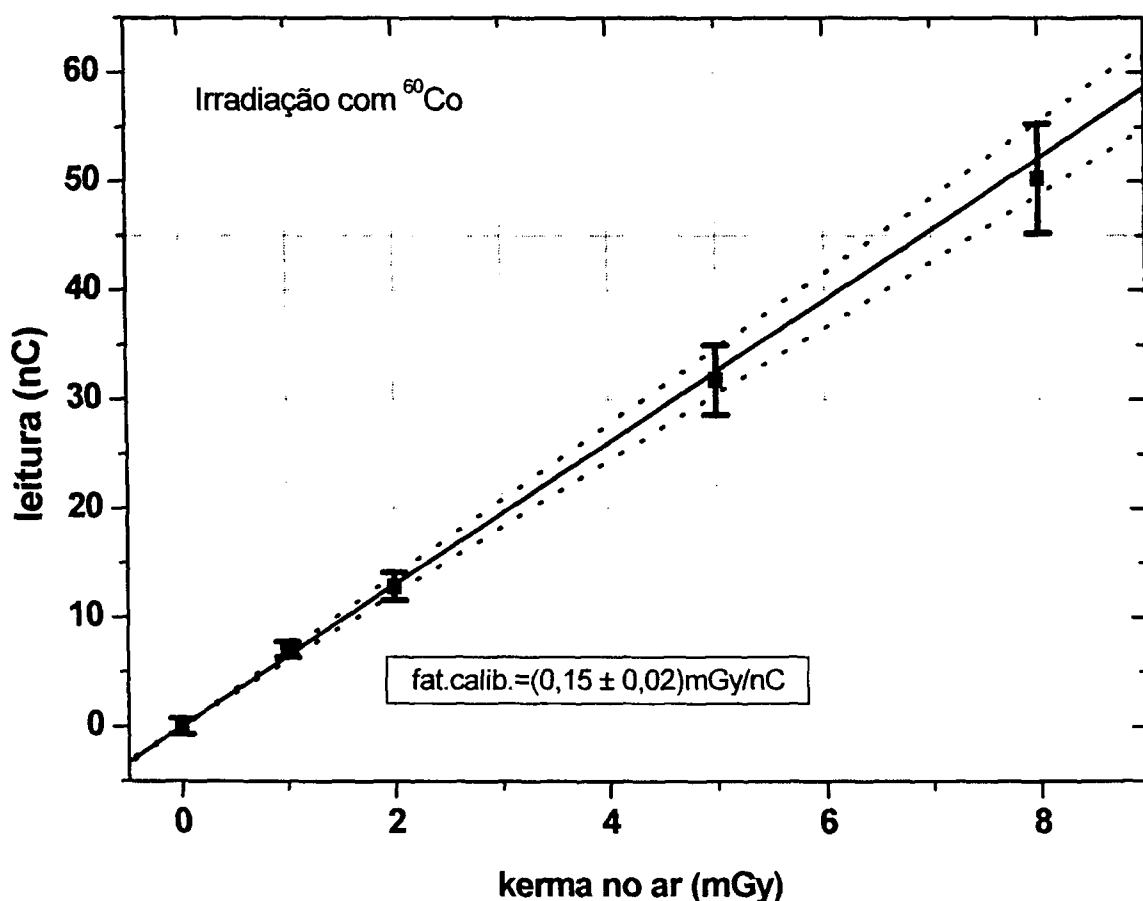


FIGURA 1: Curva de Calibração (linha cheia) de um lote de pastilhas ou detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ / PTFE, com seu intervalo fiducial (95%) (linha pontilhada). Para sua utilização, é estabelecida a relação da grandeza *kerma no ar* com H_x , através do fator de calibração (inverso do coeficiente angular da reta), em destaque. A incerteza de medição de cada ponto experimental é estabelecida com 5 dosímetros, e chega a superar 10% em lotes re-utilizados várias vezes.

O sulfato de cálcio dopado com disprósio, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, numa matriz de politetrafluoretileno (PTFE) tem propriedades interessantes quando comparado com outros fósforos, como o baixo desvanecimento², que é de 7% em três meses^[6] e para um período de 30 dias (utilizado na monitoração pessoal) o desvanecimento é de apenas 3%. Também sua sensibilidade é elevada^[7], que o beneficia em aplicações de medições de baixas doses, como em dosimetria ambiental.

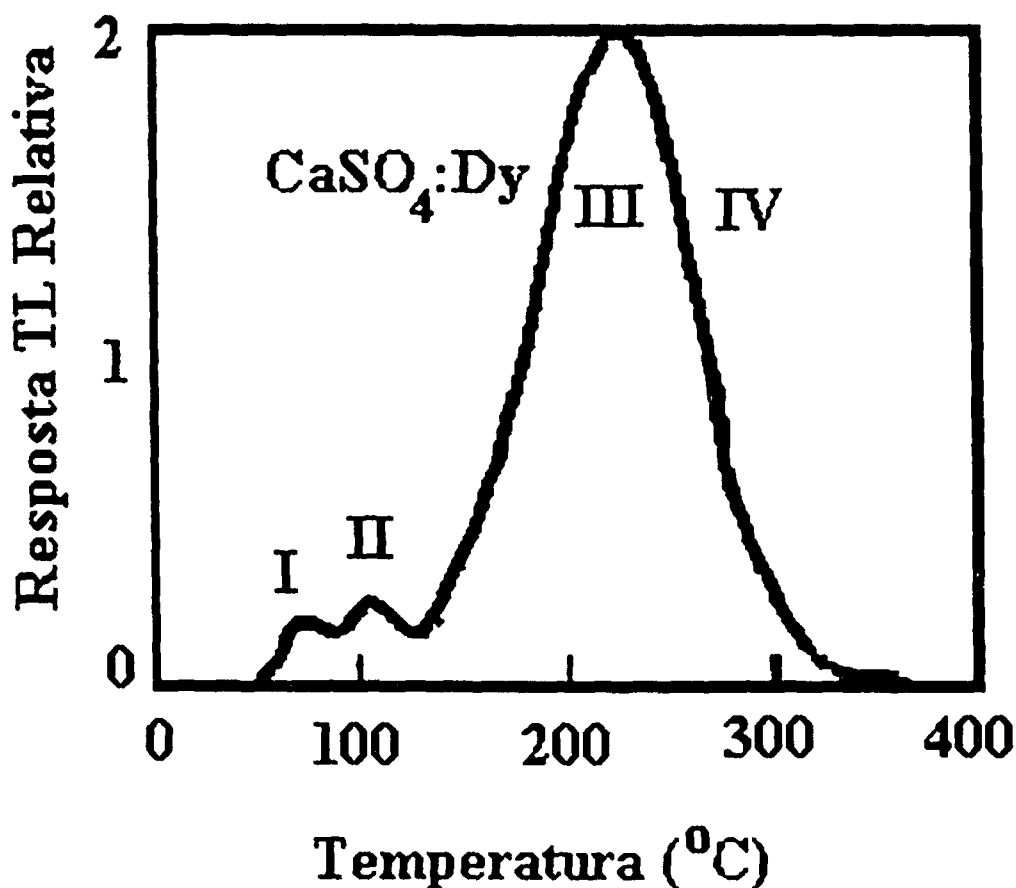


FIGURA 2: Curva de emissão do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ submetido à irradiação de 1 mGy de ^{137}Cs . A taxa de aquecimento foi de $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$. A dosimetria utiliza os picos III e IV. Os picos I e II, de 80°C e 110°C , desvanecem rapidamente e por isso não são utilizados^[8].

²“Desvanecimento” significa “perda de resposta TL”. Também chamado de “fading”

Mas assim como todos os materiais termoluminescentes, este também tem suas desvantagens. Uma desvantagem do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ é sua reprodutibilidade³ não tão eficiente em doses ao nível de radioproteção (poucos-milisieverts). Bakshit&Pradan^[9] demonstraram que o tamanho excessivo ou a não homogeneidade dos grãos dos cristais do sulfato dentro da matriz de PTFE tem grande influência nesta reprodutibilidade. Para que um material termoluminescente, já na forma dos detectores TL, possa ser utilizado num dosímetro pessoal é preciso obter lotes que tenham sempre uma mesma resposta TL, quando expostos a uma mesma dose de radiação, sendo que uma reprodutibilidade ruim é o principal problema no estabelecimento destes lotes. Para o selecionamento de detectores TL devem ser analisadas criteriosamente a sua sensibilidade de resposta TL e sua viabilidade para o uso na M.I.E^[10], pois não é possível, em geral, o uso de fatores de calibração individuais para cada detector num serviço com milhares de usuários.

Outra desvantagem do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ é a sua forte *dependência energética*, ou seja, aplicando-se duas mesmas doses de radiação de fótons em detectores diferentes do mesmo lote, estes apresentarão respostas TL diferentes, se a energia dos fótons que as compuseram não forem as mesmas. Esta dependência é causada pelo alto número atômico efetivo do material termoluminescente ($Z \cong 15,6$ u.m.a), o que será melhor explicado no capítulo 3.2.. Esta dependência energética deve ser corrigida para a sua aplicação em M.I.E., pois a calibração é feita com uma única energia de irradiação, normalmente a energia média dos fótons emitidos pelo isótopo 60 do cobalto (^{60}Co), e o TLD deve ser capaz de mensurar a dose de qualquer energia de irradiação no intervalo normativo. A influência da dependência energética na M.I.E é maior quando a energia dos fótons utilizados é de poucas dezenas de keV. Num S.M.I.E. típico, como do IPEN, a porcentagem de usuários que trabalham nesta faixa de energia é de cerca de 30%. Nos estudos desta correção da dependência energética utilizam-se filtros de metais, tais como cobre, alumínio, estanho e chumbo^[11,12]. Se a geometria do TLD e do filtro não é esférica, há uma grande influência causada pelo *ângulo de incidência* da radiação sobre o TLD, na avaliação da dose. É o caso do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ na geometria do filtro de radiação tipo "chumbo furado", ilustrado na FIG.3, utilizado para a correção da dependência energética. Seu funcionamento é explicado no item 4.2.4.

³ Não se define "repetitividade" para ensaios destrutivos

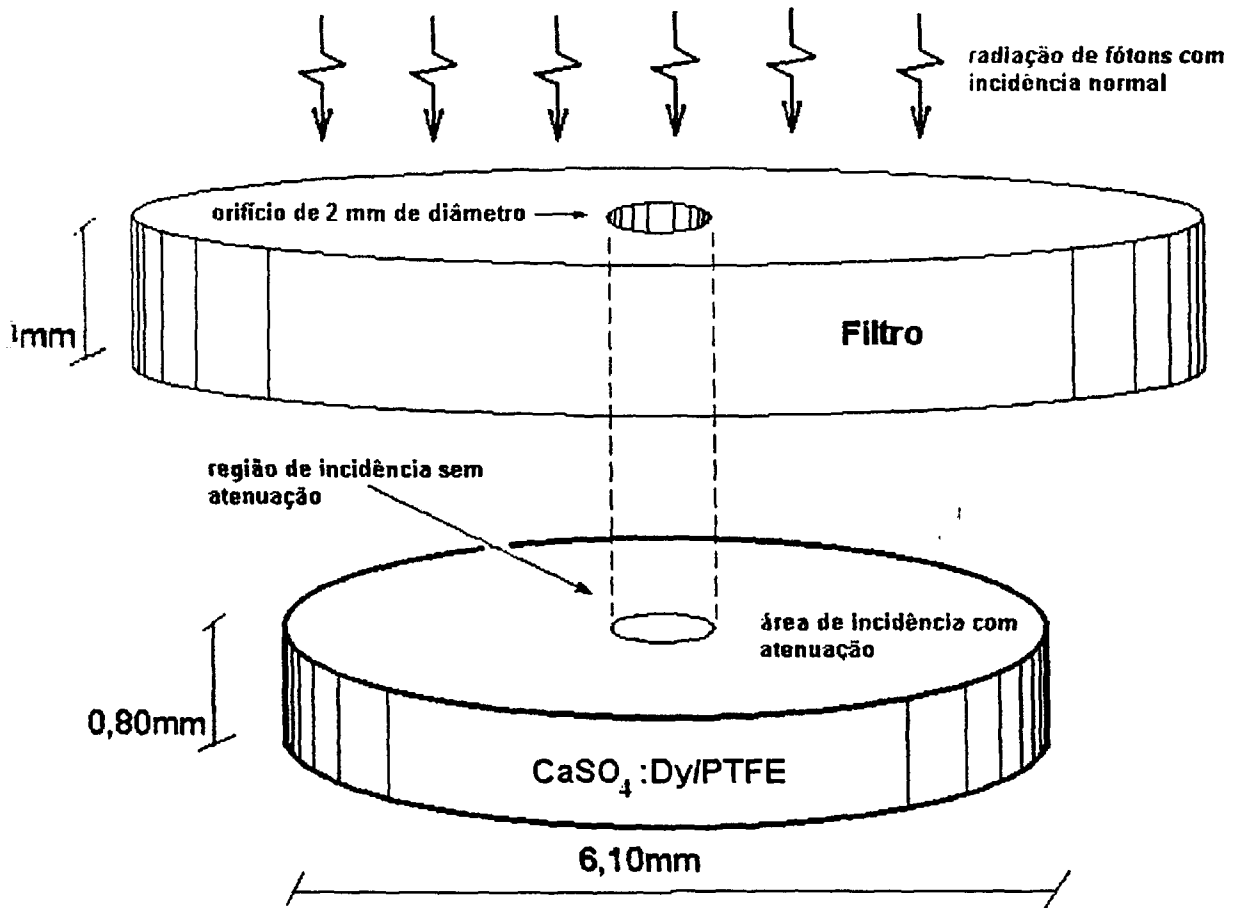


FIGURA 3: Filtro de chumbo referenciado neste trabalho como TLDi e pastilha termoluminescente de CaSO₄:Dy utilizados no IPEN. A *área de incidência com atenuação* emite luz, no processo termoluminescente, menos intensa que a *região de incidência sem atenuação*. O filtro apresenta um diâmetro de 13 mm.

A resposta TL do material depende da sua própria composição química e da sua geometria, além da composição química e geometria dos filtros utilizados no suporte ou porta-dosímetro. Seria desejável ter uma mesma resposta TL para quaisquer ângulos de incidência da radiação, uma vez que estes TLDs serão utilizados na monitoração individual por trabalhadores e poderão sofrer irradiações em todos os ângulos possíveis. Para a geometria de filtro como o da FIG.3, acima de 45° a resposta TL não é satisfatória^[13], ou seja, há uma *dependência angular*.

Além de estudos tecnológico, para atender às normas internacionais e nacionais^[14] e procurando melhorar a qualidade dos serviços prestados pelos serviços de M.I.E.(S.M.I.E.) aos seus usuários, este trabalho desenvolveu e avaliou várias características pertinentes à dosimetria TL e à M.I.E. de um novo TLD mais ergonômico,

menor, que dispensa parte do processo de montagem do dosímetro atual (processo de selagem⁴), com uma inovação na geometria dos filtros minimizando, como escopo principal, a dependência angular e energética.

No item 3.4. fez-se considerações teóricas sobre a metrologia envolvida quanto aos leitores TL e quanto ao fósforo utilizado. Acreditamos que seja importante uma noção, aos pesquisadores futuros, de como proceder à luz dos atuais conceitos metroológicos, para a avaliação da incerteza de medição com fósforos TL. No item 3.2. as causas da dependência energética e da atenuação foram um pouco mais discutidas, não transpondo o nível da engenharia da produção dos TLDs. No capítulo 4. introduziu-se uma metodologia e procedimento para a avaliação dos detectores, antes de sua utilização no S.M.I.E. No item 4.1.1. é apresentado um novo procedimento para o selecionamento dos detectores. Em 4.1.2. avaliou-se o limite de detecção do S.M.I.E. Com objetivo de determinar as dimensões dos novos filtros foram feitas simulações numéricas semi-empíricas, expostas no item 4.1.3., com resultados em 5.5. No item 5.4. é apresentada a produção do portadector com os filtros inovadores aqui propostos, chamados de TLDc. No item 5.6. apresentamos o desempenho das geometrias de filtros estudadas, sob diferentes ângulos e energias.

⁴ Selagem é “envolver os detectores com plástico de poliestireno”

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar as respostas termoluminescentes de dosímetros com uma geometria de filtro de chumbo para radiação envolvendo o detector de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ que diminua a dependência energética e angular destas respostas em relação ao tipo de fóton incidente. Para atingir este objetivo foram desenvolvidos materiais e métodos com objetivos secundários de estabelecer procedimentos para o selecionamento dos detectores, para a fabricação dos filtros, para a determinação de seu limite mínimo de detecção e para o cálculo da geometria do filtro mais adequada, onde criou-se um algoritmo utilizando diferenças finitas para simulação computacional.

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1 - Termoluminescência

Em 28 de outubro de 1663, Sir Robert Boyle, um dos fundadores da Química moderna, descreveu pela primeira vez o fenômeno da termoluminescência (TL) à “Royal Society” de Londres. Ele relatou a observação da emissão de uma luz estranha por um diamante, quando o aqueceu na escuridão do seu quarto. Desde então outros cientistas estudaram esse efeito em outros materiais. Somente em 1904, com Marie Curie, soube-se que era possível restaurar propriedades TL de cristais expondo-os à radiação ionizante^[15]. Além disto, propriedades de outros fósforos foram estudados por Wiedemann e G. Schmidt^[16] que descreveram o uso da termoluminescência na detecção de raios catódicos, termo utilizado para feixes de elétrons antes destas partículas serem descobertas como tais.

Embora o fenômeno da termoluminescência seja conhecido por mais de três séculos, a primeira compreensão matemática foi dada por Randall e Wilkins somente em 1945 e sua aplicação como uma ferramenta de pesquisa e na dosimetria da radiação foi proposta subsequente, em 1950, por Daniels que com seu grupo de pesquisa desenvolveram instrumentos para este propósito^[17].

Sua aplicação na determinação da dose de radiação ionizante (dosimetria) tornou-se uma ferramenta muito utilizada nos dias de hoje com os trabalhos pioneiros de Cameron, na década de 1960 ^[15]. Note-se que um dos principais problemas encontrados por Cameron no início, que atrapalhavam o desenvolvimento de um detector TL com utilidade prática, foi atingir uma boa reprodutibilidade, como verificado pelas próprias palavras de Cameron (home-page consultada em 24/08/05)⁵ : “I wil mention only the most difficult problem. It involved getting a reproducible TLD phosphor”; em português: “Vou mencionar somente o problema mais difícil. Envolveu a obtenção de um fósforo TLD reprodutível”.

⁵ <http://www.medphysics.wisc.edu/~jrc/art4.htm>

Já há décadas existem bons livros sobre TL^[8,15,17]. Aqui é apresentada uma consideração teórica simplificada, um modelo suficiente para a compreensão dos resultados que permitiram atingir os objetivos desta Dissertação.

Um processo físico simplificado da radiotermoluminescência é ilustrado na FIG.4.

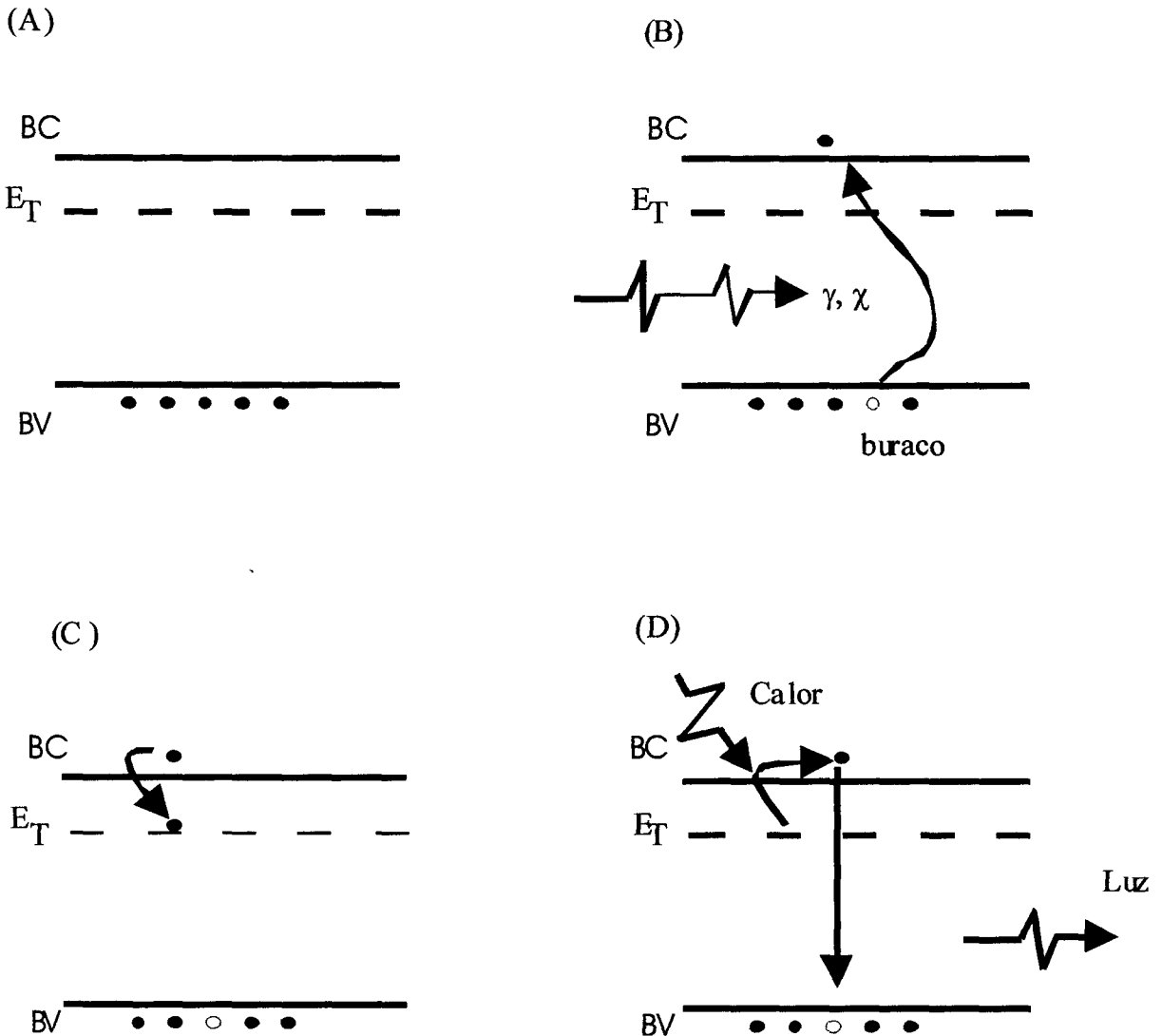


FIGURA 4: Processo físico simplificado da radiotermoluminescência. Em (A), diagrama de bandas de energias do fósforo dielétrico, onde BV é a banda de valência, BC é a banda de condução e E_T é o nível energético gerado pela impureza, que no caso de CaSO_4 , é gerado pelo disprósio (Dy). Em (B), transição energética do elétron provocada pela interação da radiação com o material. Em BV fica um buraco portador. Em (C), aprisionamento de elétron no nível energético (E_T). Em (D), retorno do elétron para BC por aquecimento e emissão de luz termoestimulada devido à recombinação elétron-buraco.

A termoluminescência é um fenômeno luminescente termicamente estimulado. O fenômeno que inclui a irradiação do fósforo, mais apropriadamente chamada de radiotermoluminescência pode ser descrito como que um processo composto por dois estágios. No primeiro estágio, o material é exposto a uma fonte externa de energia (irradiação), passando de um estado de equilíbrio termodinâmico para um estado metaestável (armazenamento de energia). No segundo estágio, o material é aquecido e sofre uma relaxação termo-estimulada (retorna ao equilíbrio, liberando energia), conforme FIG.5.

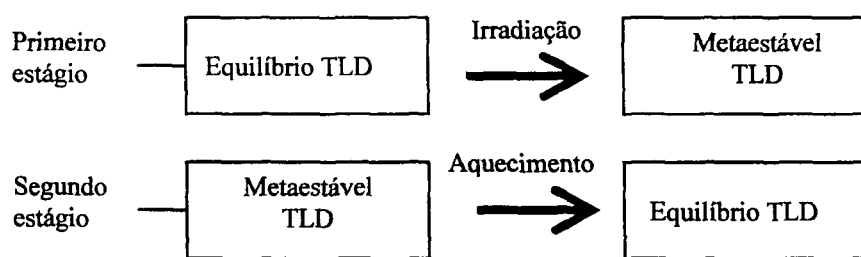


FIGURA 5: Representação esquemática dos dois estágios da produção do fenômeno da termoluminescência. O primeiro estágio envolve o armazenamento da energia do campo de radiação induzindo a um metaestado. O segundo estágio envolve a estimulação térmica e a volta ao estado de equilíbrio, com a emissão de luz.

Após uma irradiação é desejável que, o material termoluminescente retorne à sua condição inicial, sendo necessário submetê-lo a um aquecimento adequado, se este pretende ser re-utilizado para produzir TL, como ilustrado na FIG.4 item (D).

O primeiro estágio necessita da absorção de energia externa pelo material, que causa um estado de desequilíbrio; a fonte desta energia externa é a radiação ionizante, embora outras fontes, como choques mecânicos e radiações não-ionizantes, possam influenciar de maneira indesejada para a dosimetria. O objetivo central da dosimetria TL é a determinação da quantidade desta energia por unidade de massa que foi absorvida pelo material durante o processo. Isto é realizado pela medição da intensidade de luz emitida termo-estimulada conseqüência da energia absorvida. A emissão de luz (luminescência) é um resultado do relaxamento de cargas eletrônicas excitadas.

A luz emitida pelo material termoluminescente após receber a irradiação ocorre em função da temperatura ou do tempo de aquecimento (conhecida a taxa de aquecimento) e consiste, em geral, de vários picos presentes no espectro da *curva de emissão*, um exemplo é apresentado na FIG.2. Estes picos, ou a área sob estes, aumentam com a quantidade de radiação até atingirem um valor de saturação, que não aumenta mais com a dose. Em alguns materiais essa resposta inicial é linear observando-se depois, com o aumento da quantidade da radiação, um crescimento mais rápido do que o linear. A este último comportamento dá-se o nome de supralinearidade.

A sensibilidade TL do cristal pode ser influenciada também pelo tratamento térmico, dependendo da duração e da temperatura do mesmo [15,18].

Para a dosimetria e, particularmente, para os S.M.I.E.s utiliza-se normalmente a integral (área sob a curva) da função matemática que se ajusta a este espectro, desde uma temperatura inicial T_i até uma final T_f , de forma que o principal pico esteja compreendido entre ambas. Esta integral, que basicamente é a integral da corrente elétrica gerada pela fotomultiplicadora entre dois instantes (tempos) da “rampa de aquecimento”, tem como grandeza física a “carga elétrica”. Assim, a “carga” gerada no leitor TL é linearmente proporcional à dose individual até a supralinearidade, num gráfico da resposta TL (na ordenada) contra o valor verdadeiro convencional da dose (na abscissa), e o seu “coeficiente angular” é o inverso do “fator de calibração” do lote de detectores.

A dose individual a que um detector foi submetido é obtida multiplicando-se a carga lida no leitor TL pelo fator de calibração. Algumas correções extras podem ser necessárias, como o “fator de desvanecimento”, a subtração de radiação espúria, não desejada, e a correção quanto à dependência energética^[19].

3.2. Dependência Energética

A resposta TL é consequência direta da interação da radiação ionizante incidente com o material fósforo. Particularmente, esta resposta TL é proporcional ao coeficiente de absorção da energia do fóton. Embora diversas possibilidades de mecanismo de interações da radiação ionizante com a matéria sejam conhecido^[20], três tipos apresentam os principais papéis na medição da radiação: o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares. Todos estes efeitos levam a uma

transferência parcial ou completa da energia do fóton para o material. Cada um destes efeitos apresenta-se mais ou menos predominante sobre os demais, dependendo principalmente do número atômico efetivo do material e da energia do fóton da radiação incidente, como ilustrado na FIG.6. Materiais com maior número atômico efetivo (Z_{ef}) apresentam o efeito fotoelétrico tornando-se mais pronunciado para energias de fótons abaixo de 100 keV.

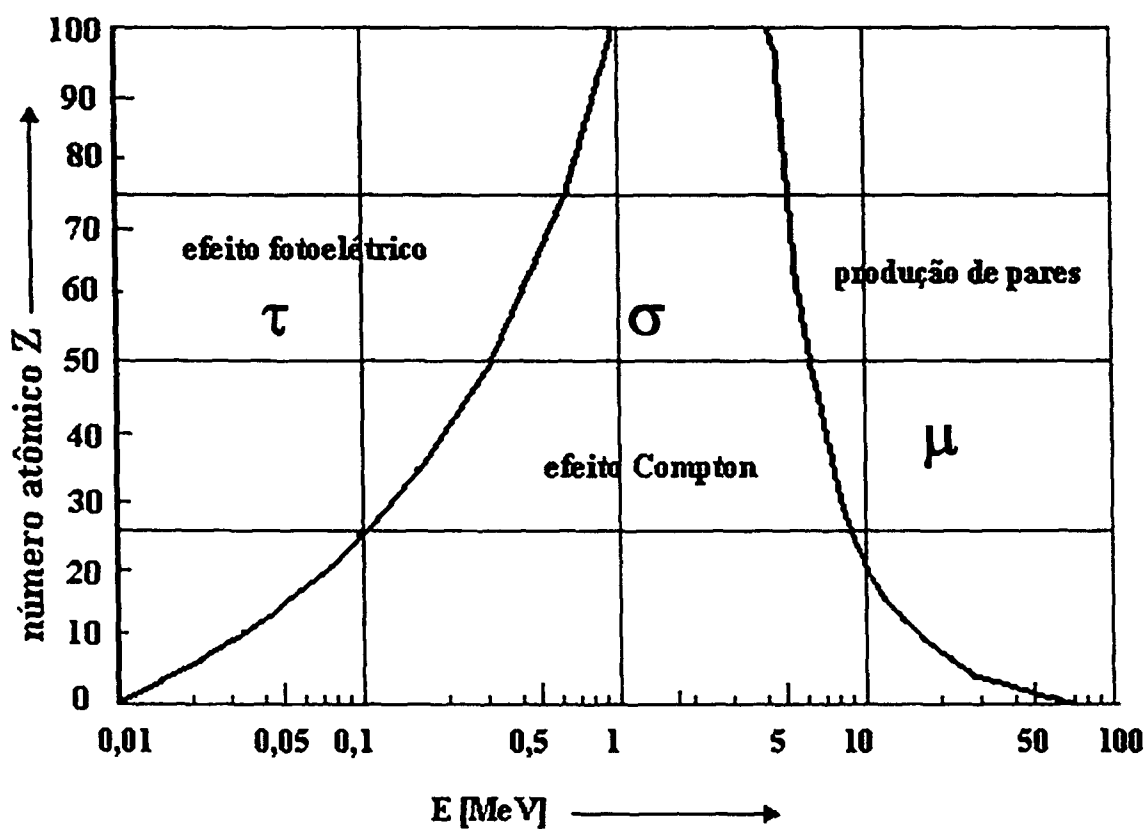


FIGURA 6: Efeitos predominantes na interação da radiação ionizante de fótons com o material, de número atômico efetivo representado no eixo das ordenadas. As curvas indicam os pontos para os quais as probabilidades dos processos são iguais^[21].

Materiais com números atômicos menores, da ordem de 7, são mais interessantes para a detecção em Radioproteção, por estarem próximos aos dos tecidos biológicos. Uma aproximação empírica para o coeficiente de absorção, τ , da energia na interação é proporcional à razão entre o número atômico do material e a energia da radiação E_γ , dada pela equação 01^[20] seguinte:

$$\tau \cong \text{constante} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \quad (\text{Eq. 01})$$

onde: $n =$ varia entre 4 e 5

$Z =$ n.º atômico efetivo do material

$E_\gamma =$ energia da radiação gama

Assim, como a resposta TL é proporcional à absorção da energia do fóton, a resposta TL de um cristal apresentará também a proporção dada pelo lado direito da (Eq. 01). Todos os fósforos apresentam esta dependência energética, em maior ou menor grau. Na FIG.7. são ilustrados alguns materiais termoluminescente com sua variação de resposta TL com a energia do fóton.

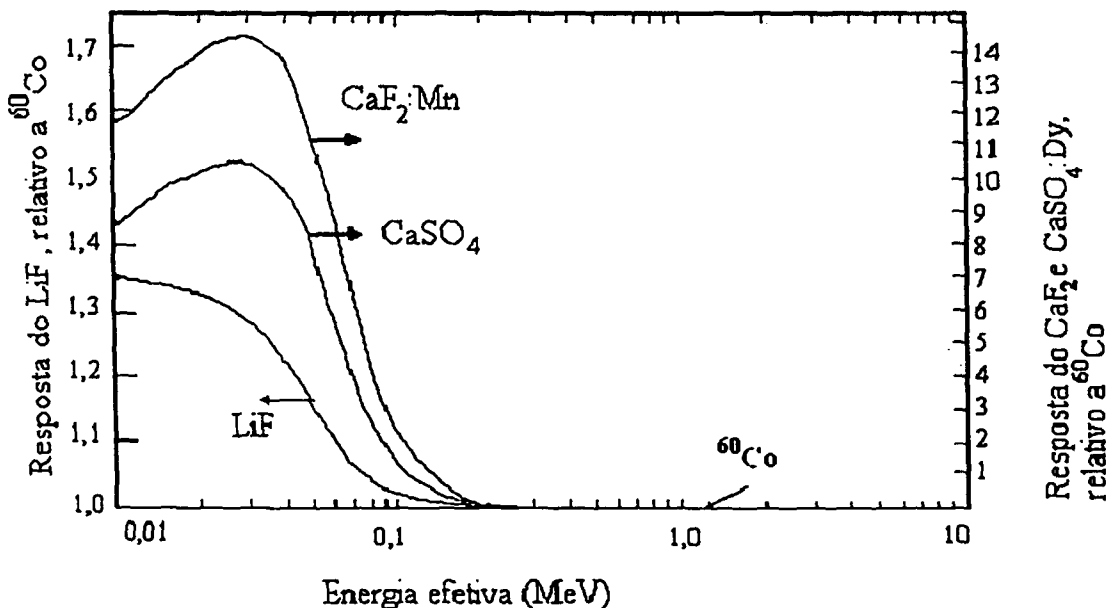


FIGURA 7: Variação da resposta termoluminescente para irradiação com diferentes energias de fótons. Note a diferença de escala para o LiF comparado com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e outros materiais^[8].

Deve-se considerar que é desejável que o fósforo tenha uma interação com a radiação semelhante àquela que ocorreria no tecido biológico, sobre o qual se deseja avaliar os *efeitos biológicos* da radiação. Os tecidos biológicos apresentam, em média, Z_{ef} próximo de 7. Esta é uma das razões da “popularidade” do LiF, fósforo mais utilizado mundialmente, com Z_{ef} igual a 8,31 u.m.a. e, além disso, menor dependência energética.

A interposição de filtros permite correções da dependência energética porque:

- 1- radiações de baixa energia são mais intensamente atenuadas por estes filtros do que as maiores
- 2- embora gerem maior sinal TL, devido a 1; os feixes de fótons de baixa energia atingem o material com intensidade menor.

Assim, os efeitos 1 e 2 diminuem a dependência energética. Utilizar estes efeitos para corrigir a dependência energética, ainda que pareça simples, na prática é um problema difícil de engenharia de materiais. Há que se avaliar não só o tipo de material (coeficiente de atenuação), como também sua espessura ou geometria para tornar o TLD prático.

A dependência energética deve ser conhecida e corrigida. Principalmente para detectores termoluminescentes com Z_{ef} maior, como o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($\cong 15$ u.m.a.).

3.3. Monitoração Individual Externa

O objetivo primário da M.I.E. é mensurar a quantidade de radiação recebida por um trabalhador durante sua exposição ocupacional de rotina às fontes externas de radiação. A M.I.E. baseia-se nas recomendações da “International Commission on Radiological Protection” – ICRP. A ICRP recomenda, em sua publicação n.º.60^[22], um sistema de limitação de dose baseado nos três princípios básicos: justificação, otimização e limitação. Este sistema visa garantir que nenhuma exposição à radiação seja injustificada em relação a seus benefícios, que todas elas sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exequíveis e que as doses equivalentes individuais recebidas não excedam determinados limites estabelecidos. Estas doses limites são consideradas insuficientes para produzir danos apreciáveis para uma pessoa durante sua vida. Estas recomendações estão incorporadas à norma CNEN-NE-3.01 de janeiro de 2005: Diretrizes Básicas de Radioproteção^[3].

A função da M.I.E. é a de avaliar, para poder limitar, as doses absorvidas pelos trabalhadores individualmente. Adicionalmente, ela serve para dar informação suplementar sobre práticas de trabalho e tendências de dose, além de dar suporte na determinação da dose absorvida no caso de uma superexposição acidental.

Por monitoração entende-se mais especificamente a medida da radiação com a finalidade de se estimar, confirmar ou acompanhar a exposição e a interpretação dos resultados. O programa de monitoração representa mais do que medições. Ele envolve também a interpretação dos regulamentos e normas internas de cada país e das recomendações internacionais. O acompanhamento e a análise das doses recebidas pelos trabalhadores fornecem subsídios importantes para discussão a respeito do sistema de limitação de dose.

No Brasil, os critérios de aceitação para monitores individuais estão estabelecidos até o momento apenas para irradiações de corpo inteiro (utilizando dosímetros pessoais para tórax) para fótons de 20 a 1250 keV e foram definidos no documento IRD-RT-nº 002.01/95^[4]. A grandeza operacional adotada no país para estimar o equivalente de dose no corpo inteiro é a *dose individual para fótons*, $H_x^{[4,5]}$, definida como o valor avaliado pelo detector, calibrado em exposição ou kerma no ar, multiplicado pelo fator $f = 0,01 \text{ Sv/R}$, para exposição, ou $f = 1,14 \text{ Sv/Gy}$, para kerma no ar.

3.4. Incerteza de Medição da Termoluminescência

Os resultados das medições estão afetados de erros que devem ser tratados convenientemente. Considerando que os erros não podem ser perfeitamente conhecidos, é possível afirmar que os resultados estão afetados de uma dúvida (incerteza). As informações são confiáveis desde que os resultados das medições venham acompanhados da respectiva incerteza.

A *incerteza da medição* expressa a qualidade de uma medição e esta deve vir acompanhada da sua *probabilidade de abrangência* (antes chamado *nível de confiança*). Exemplo: o volume de um frasco deve ser expresso como: $V = (20,00 \pm 0,05) \text{ ml}$, com probabilidade de abrangência de 95%. Neste exemplo, embora o volume exato não seja conhecido, é possível afirmar com 95% de probabilidade que este está no intervalo de 19,95 ml até 20,05 ml.

Para se obter uma forma confiável da incerteza de medição há necessidade de conhecimentos metrológicos na área do conhecimento específica da medição, experiência e conhecimento da metodologia da avaliação da incerteza baseado nos procedimentos recomendados, como, por exemplo, pela ISO GUM-1995^[23], e por outros guias nacionais e internacionais^[24].

As fontes de incertezas do tipo B nos ensaios termoluminescentes são obtidas por meios que não envolvem a análise estatística, tais como certificados de calibração ou de dosimetria dos campos de irradiação, especificações e padrões dos instrumentos leitores TL, dados técnicos de fabricantes dos detectores ou dos leitores, resoluções, livros e manuais técnicos, estimativas baseadas na experiência^[24].

Para as incertezas do tipo A deve-se observar que a termoluminescência é um ensaio destrutivo, no sentido de que a informação lida não pode ser re-lida. Assim, não existe repetitividade no processo de medição e, portanto, em nenhuma situação se pode utilizar a grandeza *desvio padrão do valor médio*^[25] para avaliar a dispersão de resultados. Pode-se apenas se utilizar o *desvio padrão experimental* ou *amostral*.

Para a avaliação da *incerteza padrão combinada* do ensaio termoluminescente é necessário a análise de todas as suas fontes de incerteza de medição. A organização destas fontes na forma de um diagrama de Ishikawa ou "de causa e efeito" é muito útil, como ilustrado na FIG.8.

Cada uma destas componentes *padrão* (intervalo de abrangência de 68%) deve ser avaliada e combinada, obtendo-se a *incerteza padrão combinada*. Esta pode ser convertida para o intervalo de abrangência desejado, desde que se avalie o número de graus de liberdade do método pela equação de Welch Sattethrwaite^[24] e se determine o fator de abrangência. Assim obtém-se a *incerteza expandida* do método. Uma ferramenta útil nesta avaliação é sua organização na forma de uma planilha de cálculo, como ilustrada na TAB.1.

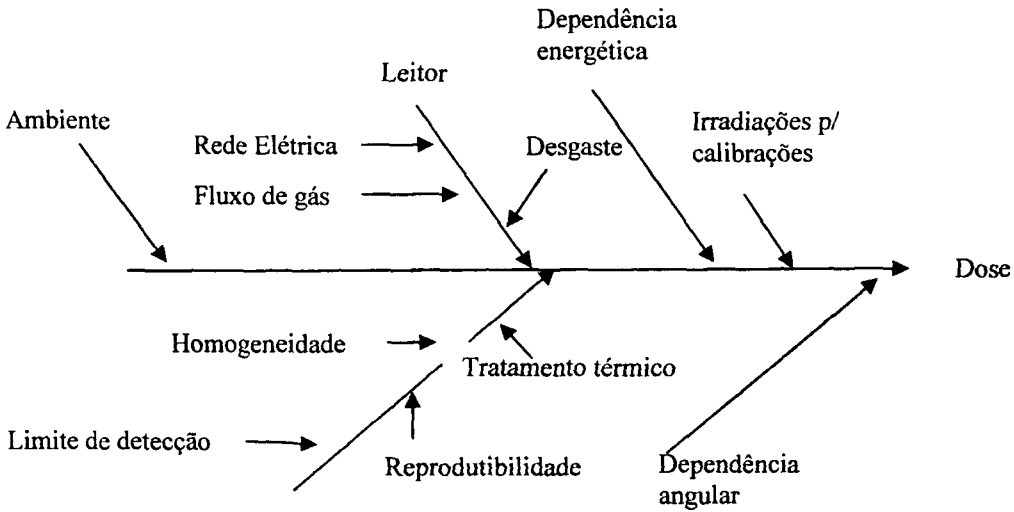


FIGURA 8: Diagrama de causa-efeito (Ishikawa) para avaliação das incertezas na obtenção da resposta de um TLD e na avaliação da dose final. Cada uma das fontes de incerteza indicadas deve ser avaliada e combinada com as demais.

TABELA 1 - Planilha utilizada para avaliação da incerteza de medição do ensaio de termoluminescência para uma medição de 5 mSv utilizando algumas fontes de incerteza. Sua utilização consta no procedimento interno do LDT^[26]

Símbolo	Coeficiente de Incerteza		Tipo	Distrib. Probab.	Divisor	Coef. Sensibilidade, C_i		Incerteza Padrão, u_i	Graus de liberdade ν_i	Porcentual Contribuição [%]
	Nome	Valor (\pm)				Unidade	Valor			
	Luz de referência	0,3	nC	A	N	1/0,151	1	0,0453	29	
	Ruído	0,03	nC	A	N	1/0,151	1	0,00453	29	
	Reprodutibilidade da pastilha	0,15x5	mSv	A	N	2	1	0,375	189-4	
	Operador	0,04x5	mSv	A	R	$\sqrt{3}$	1	0,1155	11	
	Limite de Detecção	4,5	μ Sv	A	N	1	0,001	0,0045	89	
	Fluxo de gás	L.D.								
	Tratamento Térmico	L.D.								
	Cond. Ambientais na irradiação	L.D.								
	Cond. Ambientais durante leitura	L.D.								

*L.D. menor que o limite de detecção

u_c , incerteza combinada \rightarrow 0,395042 mSv
U_{95} , incerteza expandida (aprox. 95%) \rightarrow 0,79 mSv
v_{eff} , graus de lib. efetivo \rightarrow 198
k, fator de abrangência \rightarrow 2
Observação: incerteza para avaliação de 5 mSv.

Como indicado na TAB.1, neste trabalho foram avaliadas as fontes de incerteza tratamento térmico, reprodutibilidade e limite de detecção de detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, sob incidência normal e com equilíbrio eletrônico. Fontes devido ao ambiente, à rede elétrica, ao leitor, ao fluxo de gás e aos desgastes não foram quantificadas. O local das leituras apresenta temperatura controlada, a rede elétrica e o leitor recebem manutenção preventiva e corretiva periodicamente, que são indícios de que a contribuição destas fontes não seja tão expressiva, embora haja necessidade de estudos mais detalhados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvidos neste Trabalho

Ao tentar-se aplicar metodologias ou procedimentos utilizados em estudos de outros materiais fósforos, e mesmo no $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ num compósito diferente, foram verificadas algumas inaplicabilidades, principalmente quanto aos aspectos metrológicos modernos. Sendo assim, foram desenvolvidas novas metodologias e/ou procedimentos necessários para se atingir os objetivos deste estudo, sendo estes expostos neste sub-item.

4.1.1. Selecionamento dos Detectores ^[10]

Os detectores utilizados neste trabalho foram produzidos pelo *Laboratório de Produção de Materiais Termoluminescentes*, LMT-IPEN. No LDT, estes detectores passaram por uma *seleção mecânica*, ou seja, uma inspeção das dimensões dos detectores, para que se ajustem adequadamente no disco⁶ do leitor termoluminescente Harshaw modelo 5500. Este disco é inserido numa gaveta que é então recolhida pelo instrumento o qual, após procedimentos pré-operacionais, inicia a leitura dos detectores um a um, completando cinquenta leituras em aproximadamente uma hora. E, cerca de 30% dos detectores foram devolvidos ao produtor, por não se ajustarem ao disco.

Em seguida, foi realizada uma seleção dos detectores quanto à sua *sensibilidade* à radiação. Isto é necessário para que se possa rotular cada detector como pertencente a um lote ou a outro. Um número reduzido de lotes torna mais prático o trabalho de rotina, pois todos os lotes necessitam serem caracterizados e seus fatores de calibração devem ser corrigidos periodicamente. Dependendo das condições técnicas de um laboratório, acima de um determinado número de lotes o SMIE torna-se impossível de ser executado.

Esta seleção por sensibilidade foi realizada iniciando-se com pré-irradiações: irradiam-se todos os detectores novos com uma dose de 2 mGy. Em seguida os detectores recebem tratamento térmico conforme item 4.2.5. e voltam a ser irradiados. Este ciclo foi repetido por cinco vezes, para se estabilizar os detectores, melhorando sua reprodutibilidade.

⁶ Disco é uma parte do leitor onde são colocados os detectores para que sejam lidos.

Completados os ciclos de pré-irradiações, os detectores receberam novamente tratamento térmico, foram irradiados com uma dose de 2 mGy e, após vinte e quatro horas de sua irradiação, foram lidos. As 24 h de espera são necessárias para que picos de baixas temperaturas da curva de emissão sejam eliminados. Estes são indesejáveis para a dosimetria porque desvanecem no período necessário a uma MIE. As respostas TL são organizadas na forma de uma distribuição matemática. Uma *distribuição das respostas TL* típica é apresentada na FIG.9.

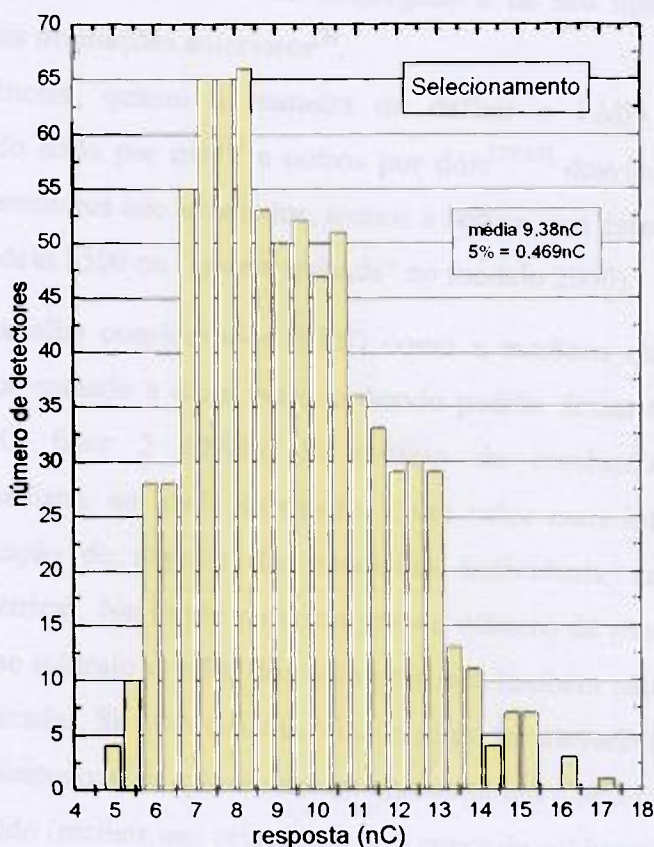


FIGURA 9: Distribuição da respostas TL de amostra contendo 777 detectores da rotina irradiados com 2,0 mGy com ^{60}Co .

Com a distribuição de respostas TL determinam-se os lotes escolhendo as larguras das "caixas" do histograma de forma a otimizar a quantidade de detectores com um mínimo de lotes. Cada caixa não pode apresentar uma largura inferior à reprodutibilidade do detector e esta última não pode ter uma largura superior aos limites normativos^[4]. No exemplo da FIG.8 as caixas foram propostas com uma largura de 10% do valor médio da distribuição. Posteriormente esta largura mostrou-se insuficiente, pois a reprodutibilidade destes detectores era maior.

4.1.2. Limite Mínimo de Detecção (LMD)

O limite mínimo de detecção, LMD, é importante para se conhecer até que dose se pode utilizar o TLD. Esta determinação torna-se imprescindível em aplicações de baixa dose, como em dosimetria ambiental, e deve demonstrar que o TLD é aplicável ao SMIE.

Na determinação do LMD de um detector TL influem características do Leitor TL, inclusive a forma de integração do sinal, do tubo fotomultiplicador, das propriedades do material TL, do tratamento térmico nele empregado e de seu histórico quanto aos tratamentos térmicos e às irradiações anteriores^[8].

Há divergências, quanto à maneira de definir o LMD. Alguns autores estabelecem como sendo dado por três^[8] e outros por dois^[17,27] desvios padrão além da média das leituras de detectores não irradiados, menos a leitura sem detector (chamada de "ruído" no Harshaw modelo 5500 ou "gaveta fechada" no modelo 2000).

Para este trabalho considerou-se LMD como a *mediana* da resposta TL de detectores não irradiados somado a duas vezes o desvio padrão destas respostas^[28], sem subtração do ruído. O fator 2 advém do critério de resolução de picos em Espectroscopia^[29]. A mediana, ao invés da média, é um valor *mais interessante* pois é menos sensível à variação de alguma das medições individuais, sendo ideal para distribuições pouco simétricas. No limite para um grande número de pastilhas a mediana iguala-se à média. Não se subtraiu o valor do ruído pois este também não é subtraído nas curvas de calibração utilizadas. Se num sistema leitor o ruído for elevado (pior qualidade), a subtração dará a falsa impressão de que o sistema apresenta um LMD inferior ao de um instrumento de menor ruído (melhor, em princípio), se a curva de calibração também não o subtrair. Esta subtração é importante se o ruído não for constante com a dose, o que não foi verificado nos sistemas do LDT, ou se a curva de calibração for determinada com esta subtração.

De acordo com este procedimento a dose mínima detectável por dosímetros TL é dada pela equação (2):

$$LMD = (\text{mediana} + 2\sigma) \cdot fc \quad (\text{Eq. 02})$$

onde: σ é o desvio padrão das resposta TL de detectores não irradiados

fc é o fator de calibração do lote de detectores.

Na FIG.10 é mostrado um exemplo de avaliação do LMD de um lote de detectores de $\text{CaSO}_4/\text{PTFE}$. Foram utilizados 90 detectores. Os detectores se submeteram ao tratamento térmico descrito no item 4.2.5. Em seguida ao tratamento térmico (sem irradiação) foram realizadas as leituras no leitor Harshaw modelo 2000, com taxa de aquecimento linear de $10^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ e sob um fluxo constante de N_2 gasoso a 2 L/min, high voltagem/alta tensão 600 V. A leitura TL foi realizado durante 26 s no intervalo de temperatura de integração de 120 a 240°C . Uma das 90 medições foi excluída pelo critério de Chauvenet^[25].

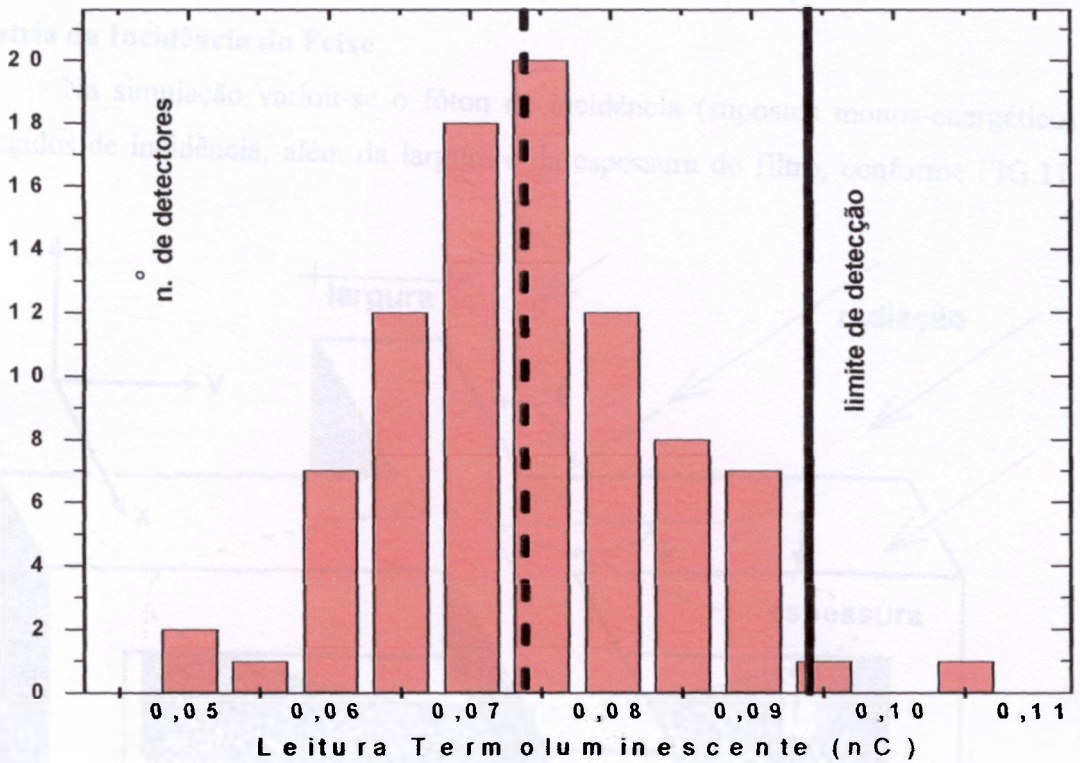


FIGURA 10: Distribuição de resposta termoluminescente dos 90 detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ não irradiados após tratamento térmico. A mediana está representada pela linha pontilhada e o limite de detecção pela linha cheia.

4.1.3. Simulação Numérica Semi-empírica

Utilizou-se o cálculo numérico realizado através de simulação computacional para calcular as dimensões do filtro de chumbo proposto, ou seja, sua largura e sua espessura ideais para minimizar a dependência energética e angular da resposta TL.

Esta simulação, compilada em FORTRAN (compilador livre Force versão 2.0.7 desenvolvido por Guilherme Luiz Lepsch Guedes: www.projetoforce.hpg.com.br), é semi-empírica pois os vetores/funções valores de entrada são ajustes das medições experimentais da dependência energética dos detectores do IPEN. Além disso, valores dos coeficientes de atenuação são também parâmetros de entrada. O programa fonte consta no Anexo.

Geometria da Incidência do Feixe

Na simulação variou-se o fóton de incidência (supostos monos-energéticos), seus ângulos de incidência, além da largura e da espessura do filtro, conforme FIG.11 e TAB.2.

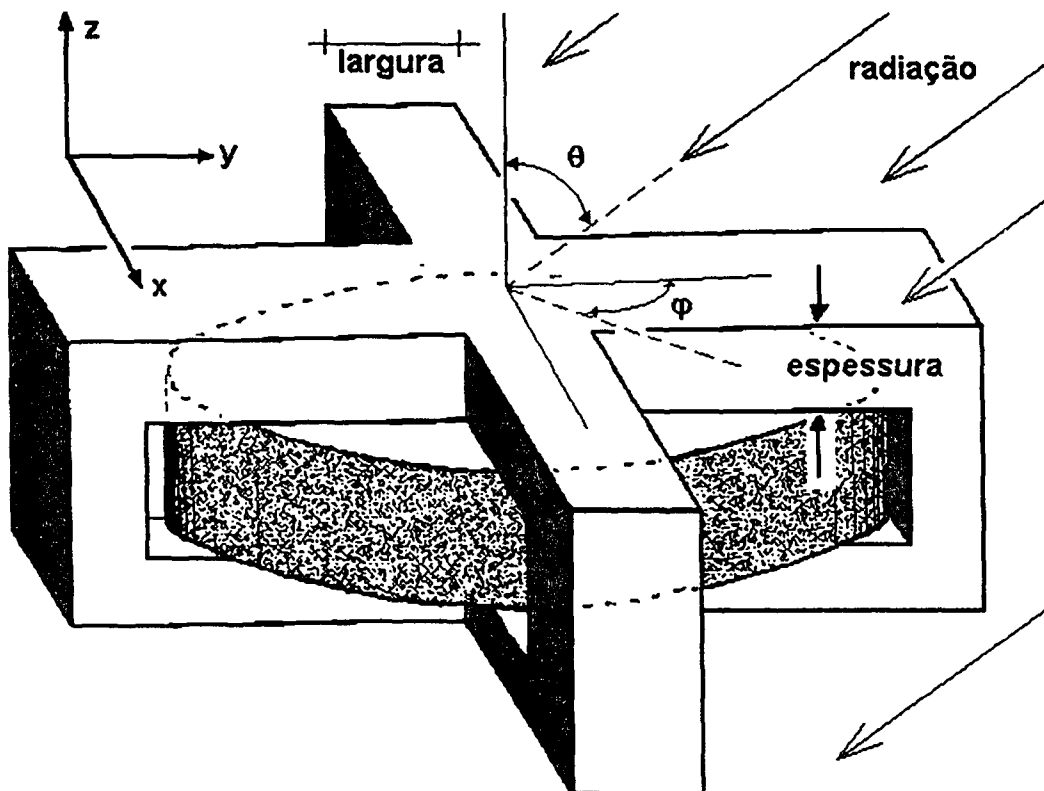


FIGURA 11: Desenho esquemático do filtro de chumbo que envolve o disco detector de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$, numa configuração a ser chamada TLDC. Os ângulos de incidência do feixe no detector e as dimensões indicadas foram simulados com os valores indicados na TAB. 2.

TABELA 2. Valores de energias dos fótons, dos ângulos θ e ϕ , da largura e da espessura do filtro utilizados na simulação.

Fóton (keV)	ângulo teta (θ)	ângulo fi (ϕ)	largura (mm)	espessura (mm)
33	0°	0°	4,09	1,36
48	15°	45°	3,54	1,09
118	30°	22,5°	3,00	0,818
1250	45°		2,45	0,545
	60°		1,91	0,273
	90°		1,36	
			0,818	
		0,273		

Na FIG.12, temos a malha de pontos utilizada na simulação do sistema detector/filtro.

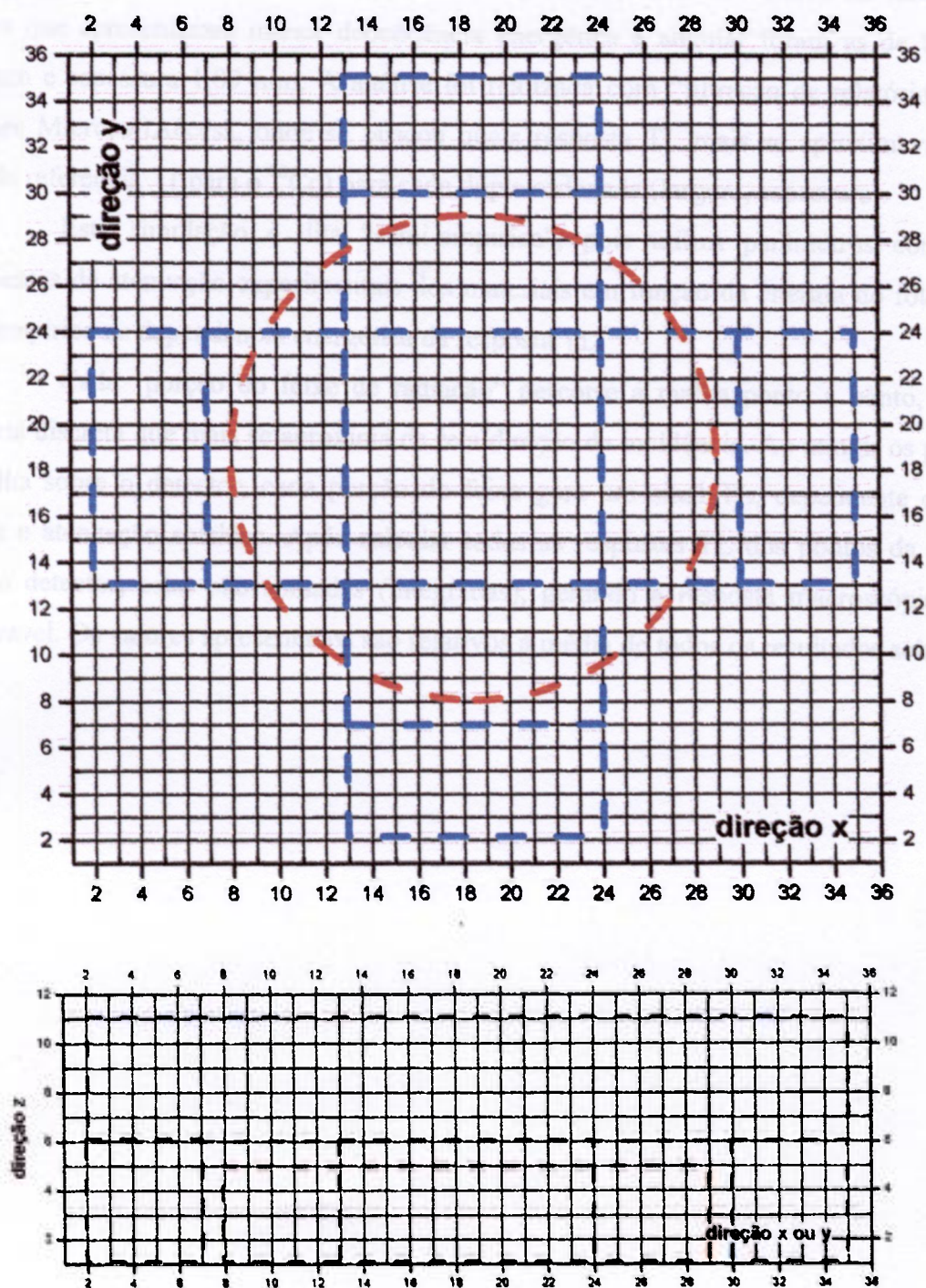


FIGURA 12: Malha de pontos utilizada na simulação do sistema detector/filtro. A discretização é não uniforme. O círculo vermelho (tracejado) indica a posição do detector e em azul (tracejado) o filtro.

Dentre os 2880 resultados (combinações de todos os valores da tabela 2), aqueles que apresentaram menor dependência energética e angular foram as de largura 3,00 mm e espessura 1,09 mm. A análise foi realizada com “filtração de relatórios”, no software MicrosoftAccess, onde se buscou quais resposta TL mais se aproximavam do valor de referência (1 para o ^{60}Co) para cada dupla ordenada (largura, espessura).

Esta simulação é dita “semi-empírica”, pois utiliza parâmetros como os coeficientes de atenuação experimentais dos materiais em função da energia do fóton e a curva empírica de dependência energética da resposta TL.

Cada “porção do feixe de radiação” percorre a malha ponto a ponto, numa trajetória discreta que mais se aproxima da reta/direção de incidência. Ao atingir os pontos da malha sobre o detector, cada porção do feixe gera um sinal TL, dependente de sua energia e atenuação sofridas. Após calcular todas as respostas TL dos pontos da malha sobre o detector, estas são somadas (integradas), gerando a resposta macroscópica TL mensurável. Os valores apresentados são relativos à média de todos os resultados sob ^{60}Co .

4.2. Materiais e métodos utilizados neste Trabalho

4.2.1. Leitura TL

A principal instrumentação necessária para se quantificar a luz emitida por um material termoluminescente é o leitor termoluminescente que é basicamente constituído de um dispositivo para aquecer o detector e uma válvula fotomultiplicadora ou um fotodiodo para captar a luz por ele emitida, como mostrada na FIG.13. A adoção de filtros ópticos entre o fósforo e o sistema óptico permite a discriminação da influência de sinais espúrios e da emissão infravermelha por parte dos elementos submetidos a temperaturas elevadas.

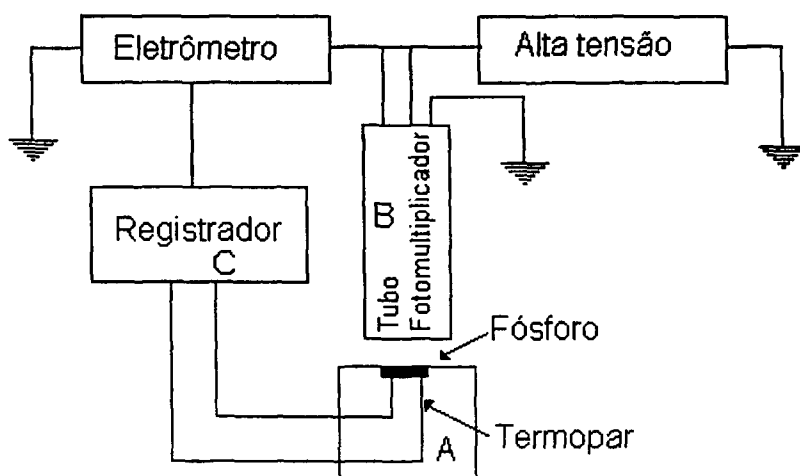


FIGURA 13: Esquema do sistema de leitura termoluminescente. O fósforo (detector) é aquecido por um sistema aquecedor em (A) onde um termopar em contato direto com a prancheta mede sua temperatura durante o processo e então a luz é emitida pelo processo TL é captada pelo tubo fotomultiplicador (há modelos com fotodiodo) em (B), onde os fótons são convertidos em corrente elétrica que são registradas por (C). Esta corrente é integrada no tempo e gera a resposta final em unidades de carga elétrica.

Dois métodos são, normalmente, utilizados no aquecimento. O primeiro consiste em colocar o material sobre uma prancheta metálica que é ou está sobre uma resistência elétrica. É o sistema utilizado pelo Harshaw modelo 2000, mostrado na FIG.14. No segundo método, a temperatura do detector é aumentada submetendo a câmara onde este localiza-se a um fluxo de gás inerte aquecido. É o caso do leitor Harshaw modelo 5500, mostrado na FIG.15, onde o gás é o nitrogênio. Este método tem a vantagem de ser mais precisamente controlado, além de prevenir a quimioluminescência^[7], pela diminuição da presença de oxigênio atmosférico.



FIGURA 13: Leitor Harshaw modelo 2000 utilizado pelo LDT. Neste equipamento, o aquecimento da prancheta metálica, onde são colocados os detectores, ocorre pelo efeito Joule, da corrente passando pela resistência da prancheta.



FIGURA 15: Leitor Harshaw modelo 5500 utilizado no LDT. Neste equipamento o aquecimento é realizado por um fluxo de gás inerte (N_2) aquecido. Os detectores são colocados em um disco onde são posicionados 50 detectores para serem lidos automaticamente, com suas avaliações TL registradas por um computador.

A taxa de aquecimento (ou rampa) deve ser precisamente controlada. No modelo 2000 ela foi de $10^{\circ}C.s^{-1}$ e no modelo 5500 foi de $12^{\circ}C.s^{-1}$. Taxas muito elevadas podem causar um deslocamento na curva de emissão devido ao “retardo” da transmissão do calor até o detector, ou seja, não houve tempo hábil para ocorrer o equilíbrio térmico.

4.2.2. Detectores TL de CaSO₄:Dy / PTFE

É desejável uma forma física robusta do fósforo para o S.M.I.E. Para o CaSO₄:Dy existe uma dificuldade porque estes são obtidos em forma de pó e devem ser misturados a outros materiais, sem que suas propriedades dosimétricas sejam prejudicadas. Um dos métodos muito utilizado é a combinação de CaSO₄:Dy com politetrafluoretileno (PTFE)^[19], pois não há mudança das características TL do CaSO₄:Dy e esta matriz suporta as temperaturas típicas dos tratamentos térmicos.

Os detectores se apresentam em forma de pequenos discos de 1 mm de espessura por 6 mm de diâmetro, produzidos por prensagem do composto pó de CaSO₄:Dy com PTFE.

O *desvanecimento térmico* da resposta do CaSO₄:Dy/PTFE (da ordem de 8% em 6 meses-informação do fornecedor) é pequeno, se comparado com outros materiais termoluminescentes. Outra característica deste detector é que sua resposta TL não é afetada de modo significativo pela umidade relativa da atmosfera. Entretanto, o material é sensível à luz ultravioleta^[30], sendo necessário protegê-lo convenientemente. Para isto, o SMIE-IPEN é feita uma selagem com plástico opaco.

A relação entre a termoluminescência do CaSO₄:Dy e a quantidade da radiação à qual o material foi exposto é linear até 8,7 Gy de dose absorvida e supralinear acima deste valor^[6,7]. A saturação ocorre por volta de 100 Gy.

A reprodutibilidade da resposta TL não é melhor devido à pouca homogeneidade dos cristais, quanto ao tamanho e distribuição, na matriz de PTFE, como ilustra a micrografia SEM da FIG.16.

A luz TL emitida de comprimento de onda, por volta de 478 e 571 nm^[8], provém principalmente da superfície do detector, pois o PTFE é opaco.

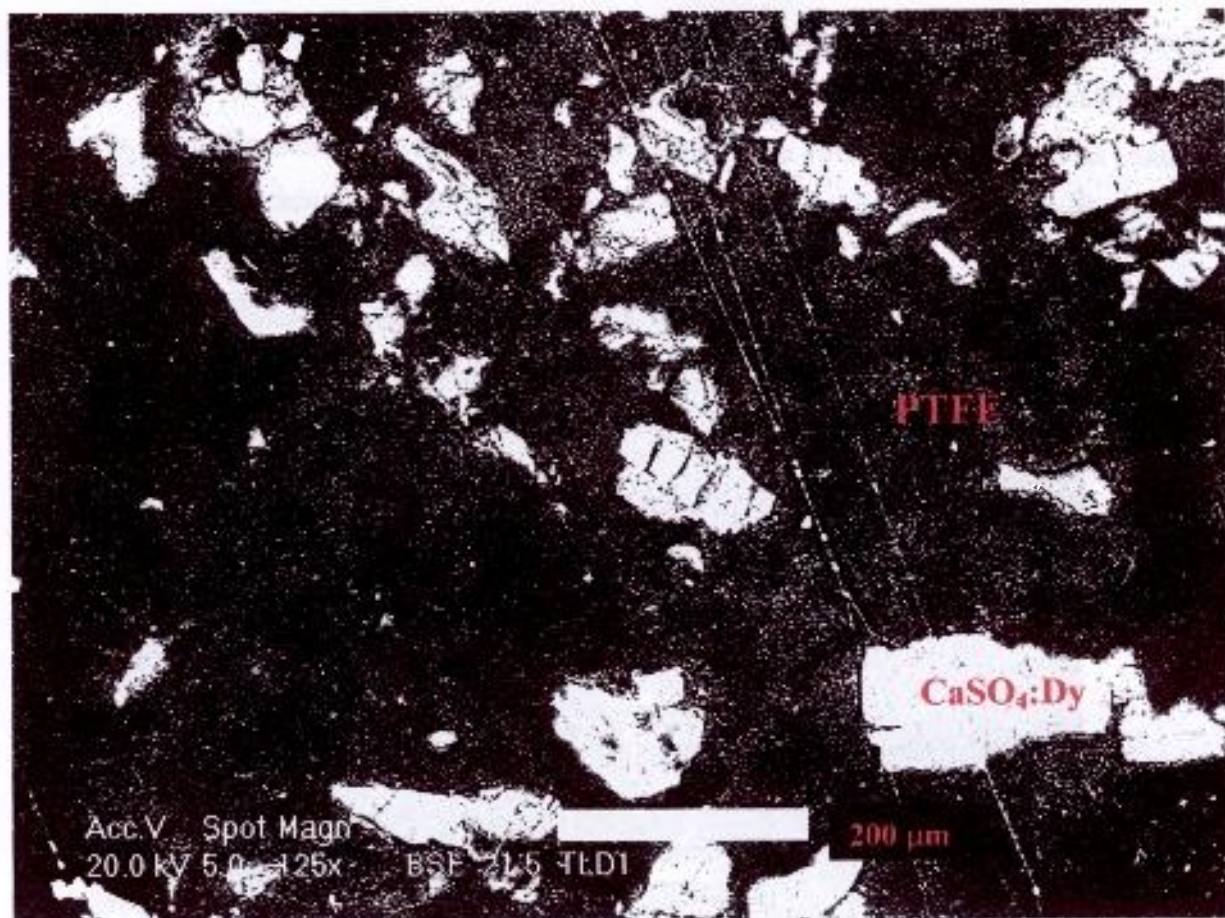


FIGURA 16: Micrografia SEM de corte transversal do detector utilizado no LDT. As regiões mais claras são os cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e as mais escuras são o PTFE. Note a não homogeneidade dos grãos (tamanho e disposições).

4.2.3. Irradiações X e Gama

As irradiações gama foram realizados utilizando-se uma fonte de ^{60}Co com exposição 4π sr de aproximadamente 6 mCi de atividade, pertencente ao Laboratório de Materiais Termoluminescente (LMT) conforme mostrada na FIG.17. A distância da fonte até o dosímetro utilizada para as irradiações foi de 15 cm. A dose individual aplicada foi de 3,42 mSv (3 mGy de kerma no ar).

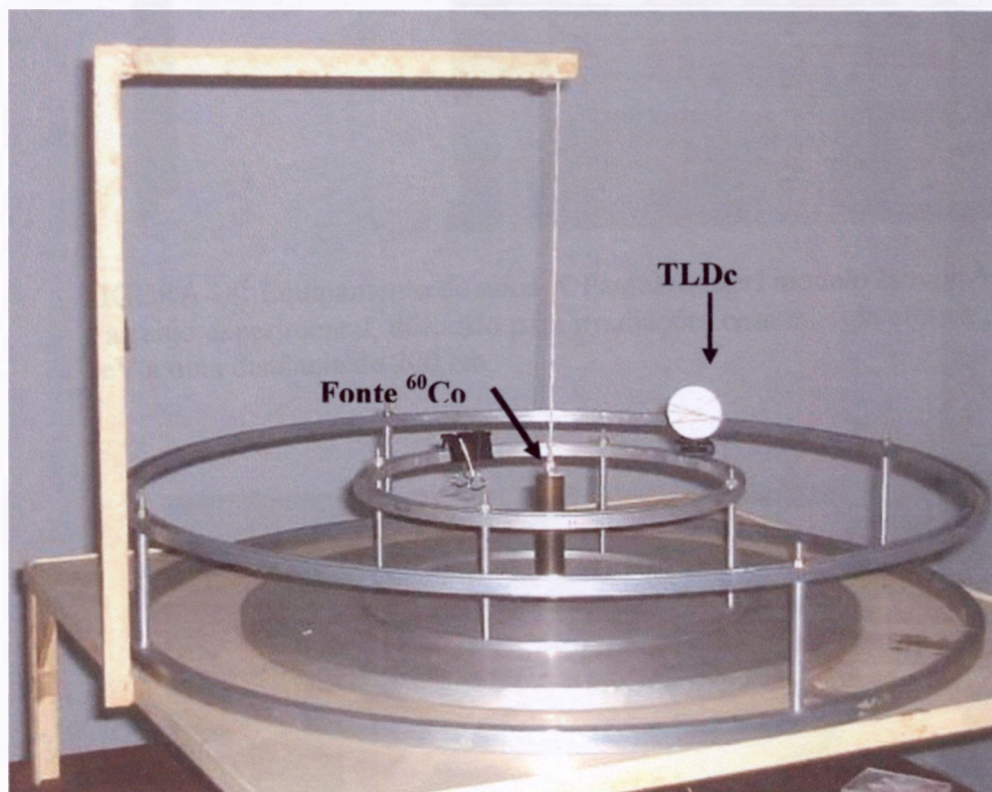


FIGURA 17: Arranjo da fonte de ^{60}Co , utilizada para as irradiações. Ao centro temos a fonte em forma de lápis, com atividade de 6 mCi, os detectores são colocados a uma distância de 15 cm da fonte.

As irradiações com feixes de raios-X disponíveis foram realizadas no Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI). As irradiações, com energias de 33 keV, foram realizadas em um equipamento Pantak/Seifert modelo Isovolt 160HS, mostrado na FIG.18. As irradiações com feixes de raios-X de energias de 25,1; 33; 37,3 e 82,1 keV foram realizadas em um equipamento de Raios-X, gerador Rigaku Denki Co, tipo Geigerflex (potencial constante), acoplado a um tubo Philips, modelo PW2184/00, mostrado na FIG.19, nas condições mostradas na TAB. 3.

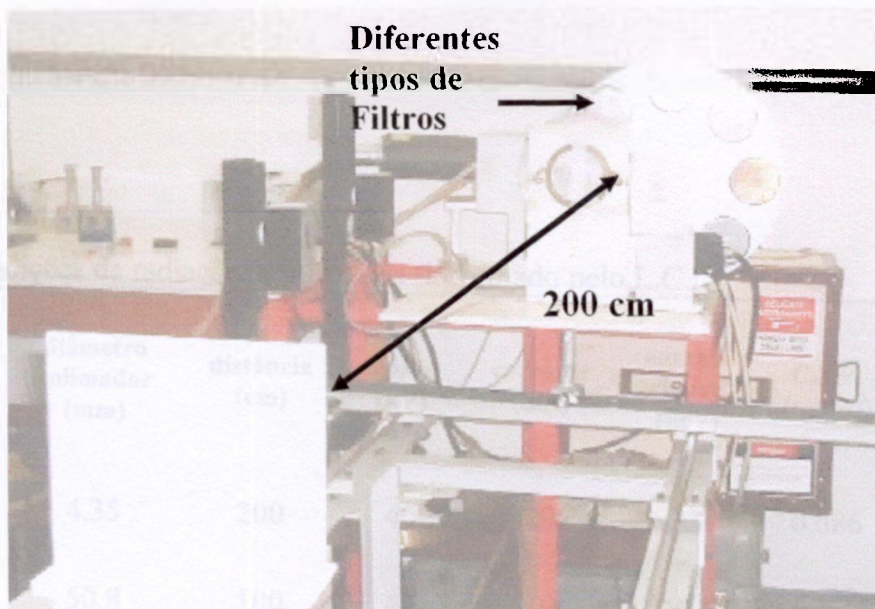


FIGURA 18: Equipamento de raios-X Pantak/Seifert modelo Isovolt 160HS e arranjo experimental, utilizado para irradiações com energia efetiva de 33 keV a uma distância de 200 cm.

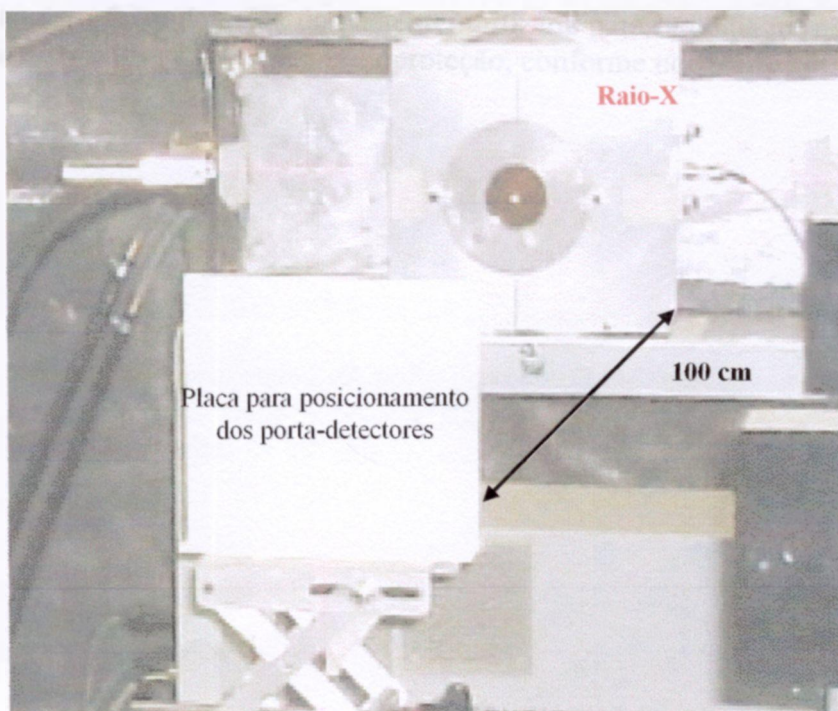


FIGURA 19: Equipamento de Raios-X, gerador Rigaku Denki Co e arranjo experimental do LCI utilizado para irradiações com energia efetiva de 25,1; 37,3 e 82,1 keV, a uma distância de 100 cm.

TABELA 3: Condições de radiação X utilizadas (informado pelo L.C.I.)

qualidade	filtração total (mmAl)	diâmetro colimador (mm)	distância (cm)	tensão (kV)	corrente (mA)	energia efetiva (keV)	C.S.R. (mmAl)	taxa de kerma no ar (mGy/min) - 20 mA
O-N40	4,21	4,35	200	40	20	33	0,086	2,0942
RQR	2,5	50,8	100	40	10	25,1	1,44	13,79
RQA 3	2,5 +10	50,8	100	50	20	37,3	1,79	3.39
RQA 10	2,5+10	50	100	150	20	82,1	4,73	13,2

Obs: RQA, série simula o feixe de saída do paciente, utilizada para radiodiagnóstico, IEC 1267. ISO-N40, feixe estreito, série N, para radioproteção, conforme norma ISO 4037.

Os porta-detectores foram posicionados nos equipamentos de raios-X utilizando-se uma placa de lucite especialmente confeccionado pelo autor para este trabalho e um feixe de luz tipo laser, como mostrado na FIG.20.

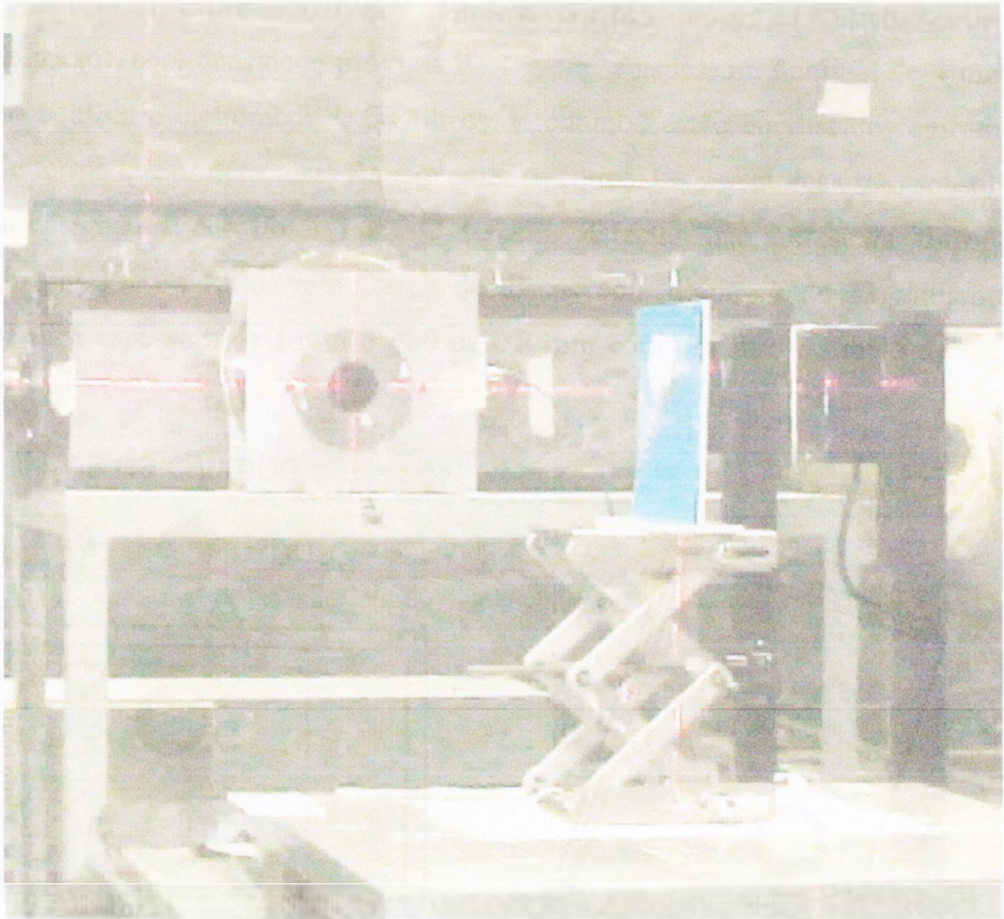


FIGURA 20: Posicionamento do porta-detector TLDC para irradiação no equipamento de raios-X. Nesta figura o detector TLDC está posicionado sob ângulo de 90° graus.

4.2.4. - TLDi, Dosímetros Pessoais do LDT/IPEN

Os TLDs em uso pelo LDT, chamados de TLDi neste trabalho, constituem-se de 3 detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ que alojam-se dentro do porta-detector, como mostrado na FIG.21. O porta-detector é composto por duas placas de plástico (poliestireno de alto impacto), com densidade próxima de 1 g/cm^3 e espessura nominal de 4 mm, para garantir o equilíbrio eletrônico^[31]. Os filtros de chumbo estão encrustados em ambas as placas, de forma que os detectores fiquem entre os filtros. Os detectores estão sob filtros de chumbo, designados por Pb e Pb0. O terceiro detector não apresenta filtro, sendo designado por Pl. Os filtros têm forma de discos com diâmetro de 13 mm, onde Pb apresenta uma espessura de 1 mm e Pb0 de 0,8 mm com um furo no meio de 2 mm de diâmetro.

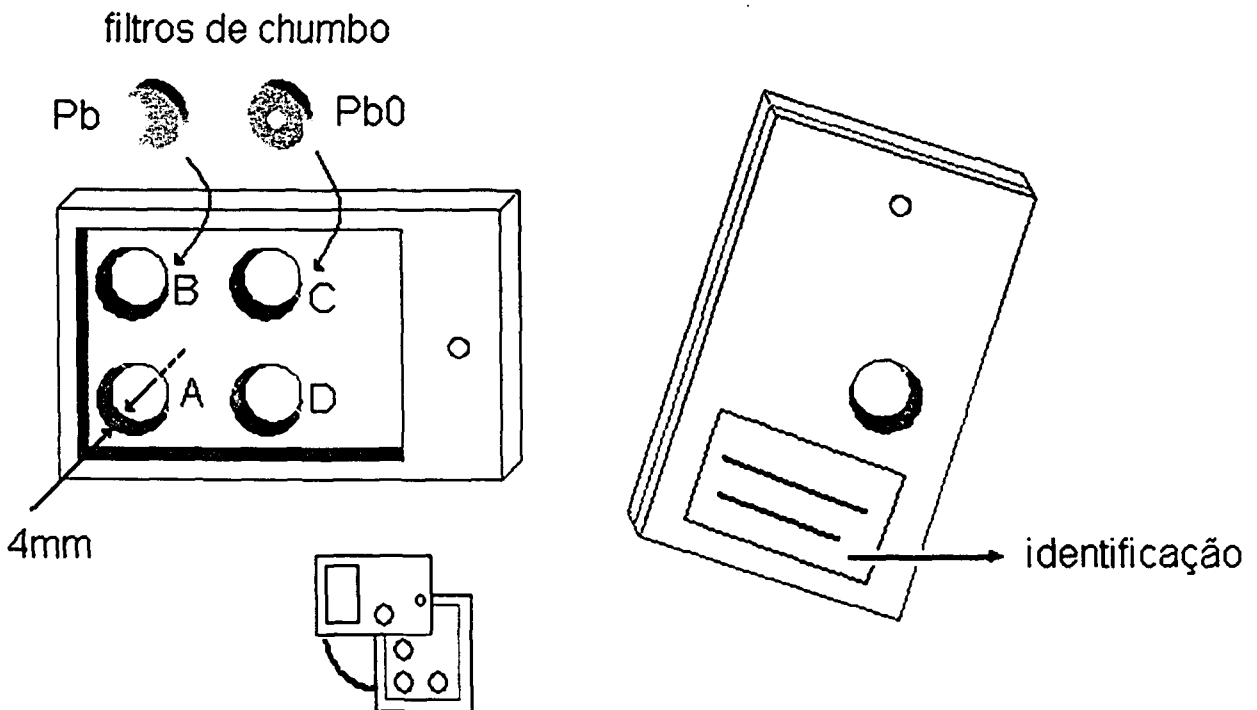


FIGURA 21: Porta-detector atualmente em uso no SMIE-IPEN. No desenho da esquerda, uma visão da parte interna, onde são colocados os detectores sob os filtros indicados; em A: sem filtração, em B: filtro de chumbo (Pb) e em C: filtro de chumbo furado (Pb0) (vide geometria da FIG.3). Na figura da direita a visão externa do porta-detector onde é colocadas a identificação do usuário.

O detector sob Pb0 é utilizado para fornecer uma resposta TL supostamente independente da energia do fóton de irradiação. Esta independência só é efetiva para uma incidência normal sobre o TLD, como exemplificado nos resultados da FIG.22.

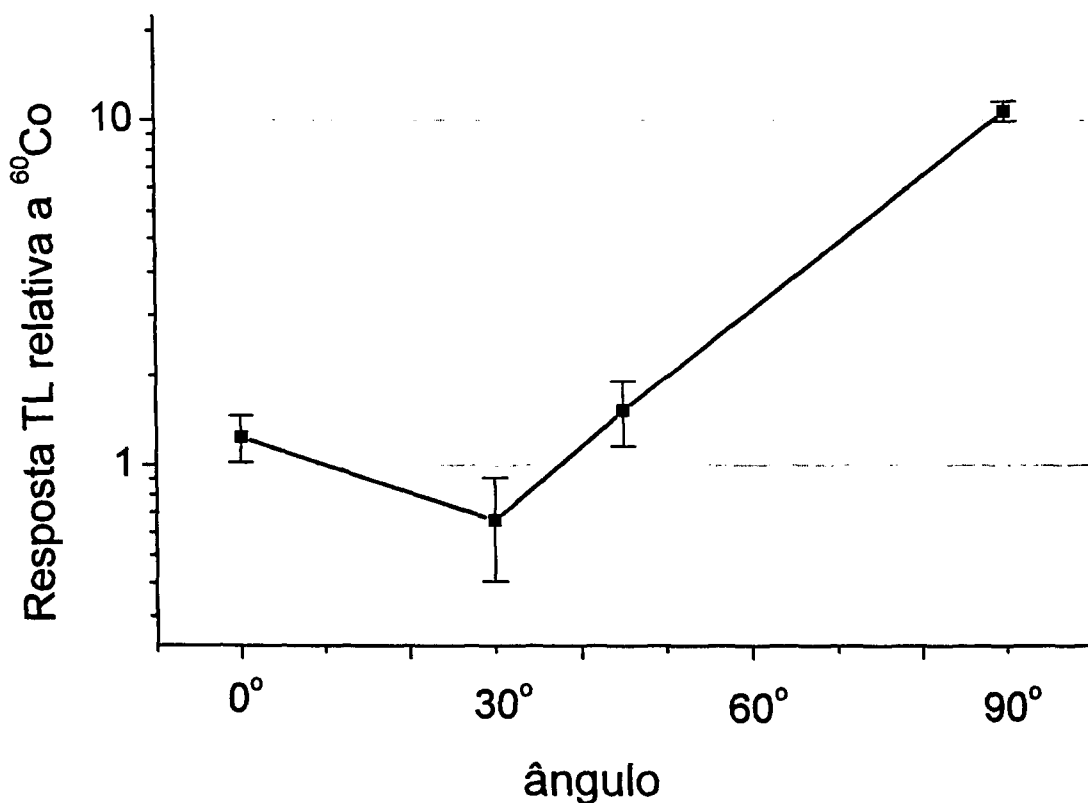


FIGURA 22: Respostas TL de detectores sob filtro de chumbo (Pb0) irradiados com 3 mGy de raios-X de energia de 33 keV, relativo a resposta sob incidência ortogonal de radiação gama de ^{60}Co .

Além da avaliação da dose individual, as diferenças de respostas TL entre os três detectores permitem a estimativa do valor do fóton da radiação incidente, se este foi monocromático ou estreito. Esta estimativa e o cálculo de dose são realizados através do algoritmo utilizado no LDT/IPEN^[26], através das razões entre as respostas TL de cada detector.

4.2.5. Tratamento Térmico

Para a re-utilização de qualquer dosímetro termoluminescente é necessário estabelecer um tratamento térmico reprodutivo com a finalidade de devolver as condições existentes antes da sua exposição à radiação ionizante^[7,32] a ser quantificada. O objetivo deste tratamento é como que de "esvaziar" completamente e estabilizar as armadilhas da estrutura eletrônica do material TL, após a sua avaliação. Avaliações foram realizadas para se estabelecer parâmetros de temperatura e de tempo de aquecimento para se obter uma dose residual aceitável mínima. Nos testes realizados pelo LDT um tratamento térmico a 300°C por uma hora é suficiente para esvaziar e estabilizar as armadilhas da estrutura do CaSO₄:Dy/PTFE^[26].

Para o tratamento térmico dos detectores utilizados neste trabalho utilizou-se um mufla modelo Heatech-Furnace, mostrada na FIG.23, com temperatura de 300°C . Os detectores são colocados em uma fôrma de alumínio e são aquecidos por um período de uma hora. Em seguida são retirados e resfriados à temperatura de 5°C, utilizando para isto outra placa espessa de alumínio previamente resfriada sobre a qual são colocadas as formas contendo os detectores. Este tratamento térmico é sempre realizado antes da utilização dos detectores.

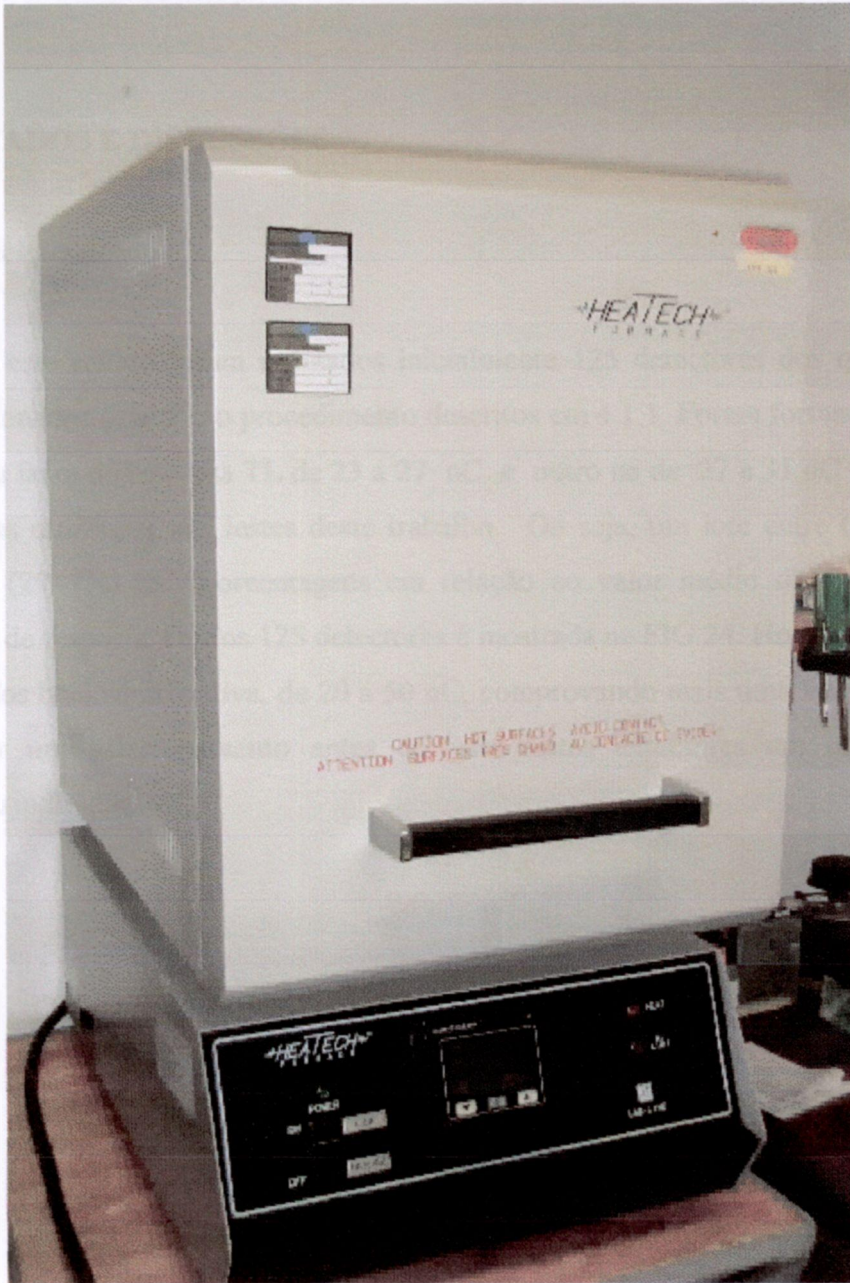


FIGURA 23: Mufla modelo Heatech-Furnace, utilizada para o tratamento térmico dos detectores de $\text{CaSO}_4\text{:Dy/Teflon}$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Do Selecionamento

Para este estudo foram utilizados inicialmente 125 detectores dos quais 50 deles foram selecionados segundo o procedimento descritos em 4.1.1. Foram formados dois lotes, sendo um na faixa de resposta TL de 23 a 27 nC e outro na de 27 a 31 nC totalizando os 50 detectores utilizados nos testes deste trabalho. Ou seja, um lote entre $(25 \pm 8\%)$ nC e outro entre $(29 \pm 7\%)$ nC (porcentagens em relação ao valor médio da distribuição). A distribuição de resposta TL dos 125 detectores é mostrada na FIG.24. Houve uma dispersão dos resultados bem significativa, de 20 a 50 nC, comprovando mais uma vez a necessidade de se fazer um selecionamento antes do uso destes detectores em um serviço de monitoração individual.

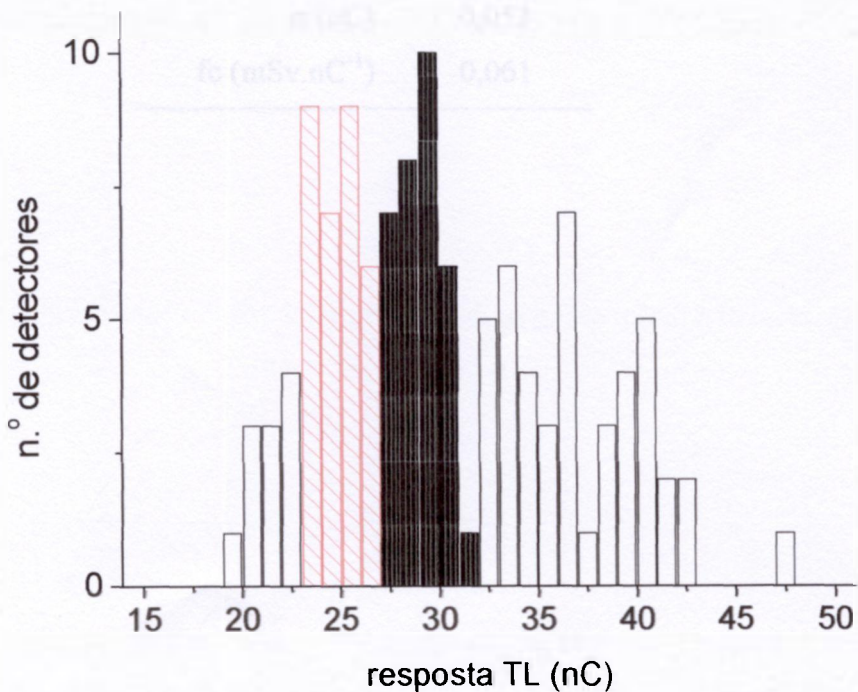


FIGURA 24: Distribuição de resposta TL dos 125 detectores selecionados para os ensaios deste trabalho segundo 4.1.1. As caixas indicadas no histograma são dos lotes de $(25 \pm 8\%)$ nC e $(29 \pm 7\%)$ nC utilizados.

5.2. Do Limite Mínimo de Detecção

Utilizando o procedimento descrito em 4.1.2. foi determinado o LMD em um dos lotes utilizados neste trabalho.

Os resultados constam na TAB. 4. e FIG. 25.

TABELA 4: Leitura TL dos 25 detectores não irradiados, em nC.

0,157	0,159	0,165	0,124	0,174
0,122	0,143	0,121	0,163	0,132
0,129	0,112	0,152	0,149	0,197
0,130	0,137	0,120	0,163	0,195
0,110	0,211	0,155	0,141	0,144

Mediana (nC)	:	0,144
σ (nC)	:	0,053
fc (mSv.nC ⁻¹)	:	0,061

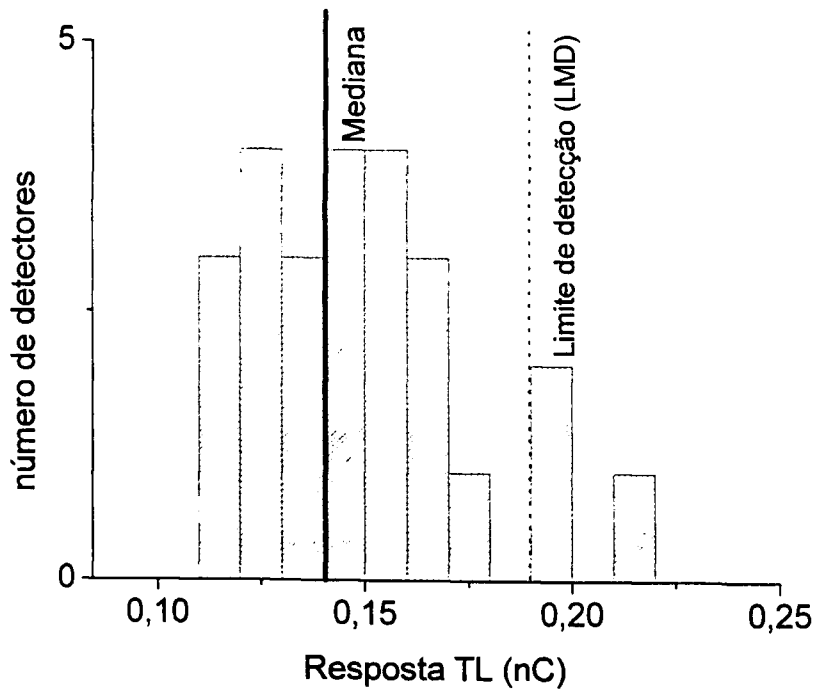


FIGURA 25: Distribuição das respostas TL dos detectores não irradiados. O limite mínimo de detecção é indicado pela linha pontilhada, onde temos duas vezes o desvio padrão das leituras dos detectores não irradiados somados à mediana das leituras (linha cheia).

Por meio da equação (2) foi determinada a dose gama mínima detectável.

$$\begin{aligned}
 &= (0,144 + 2 \cdot 0,053) \cdot 0,061 \\
 &= 0,012 \text{ mSv}
 \end{aligned}$$

5.3. Dependência energética do porta-dosímetro TLDC

Na FIG.26, é apresentado o gráfico da resposta TL dos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ sob o filtro TLDC e sem filtração.

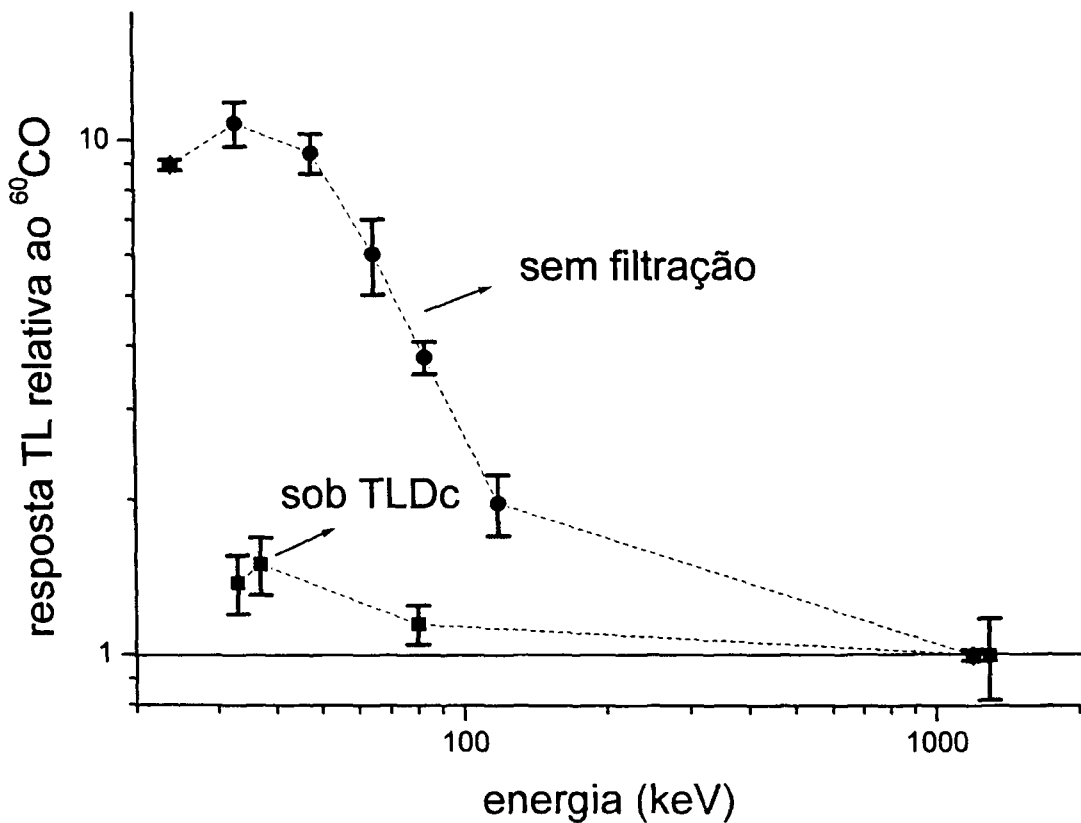


Figura 26: Resposta TL dos detectores sob filtro TLDC e sem filtração em função da energia do fóton incidente.

A resposta TL dos detectores sob os novos filtros mostrou-se eficiente na diminuição da dependência energética do fósforo de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ em incidência normal (vide FIG.11, pág. 25, $\Theta=0^\circ$).

5.4. Produção do Porta-detector e do Filtro

Para assegurar o *equilíbrio eletrônico*^[8] na interação da radiação com o detector, o fóton deve passar antes por uma camada de material com densidade próxima de um, até atingir o detector. Esta camada deve ser superior a 3 mm. Assim, o porta-detector tem uma função dosimétrica importante. Neste trabalho utilizou-se dois materiais para a confecção do porta-detector: politetrafluoretileno (PTFE) e poliestireno. O PTFE foi escolhido por ser o mesmo material utilizado na matriz do composto detector. É um material inerte e durável, embora apresente um custo alto. O poliestireno é o mesmo material utilizado na confecção dos porta-detectores já utilizados nos TLDi. Não foi verificada diferença nas respostas TL quando se utilizou um material ou outro. O PTFE encontrava-se na forma de tarugos cilíndricos de diâmetro 4,5 cm e foram cortados em espessuras de 4 mm, como ilustrado na FIG. 27. O poliestireno constitui os porta-detectores ilustrados na FIG.28.

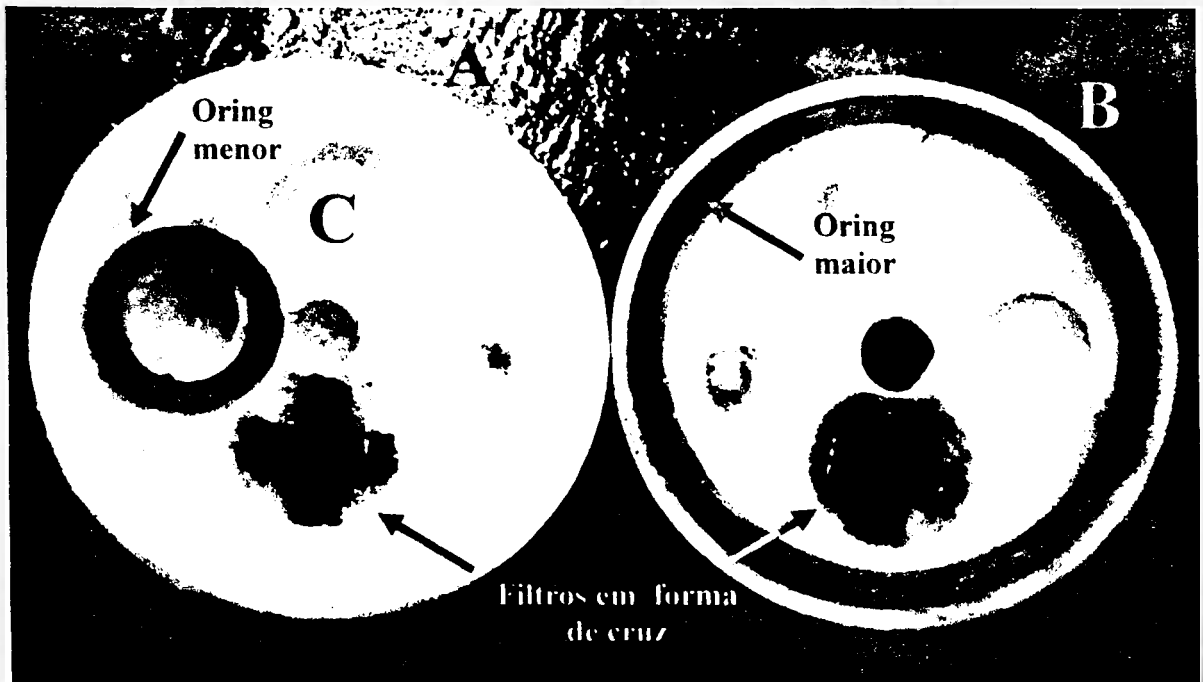


FIGURA 27: Porta-detector com geometria de filtro TLDc. Em A tem-se o oring menor vedando um orifício deixado para futuramente se medir radiação beta. Abaixo tem-se os filtros de chumbo com a geometria da FIG.10, Em B vê-se o oring maior usado para isolar os detectores de possíveis influências externas. Em C, posição de detectores sem filtração.

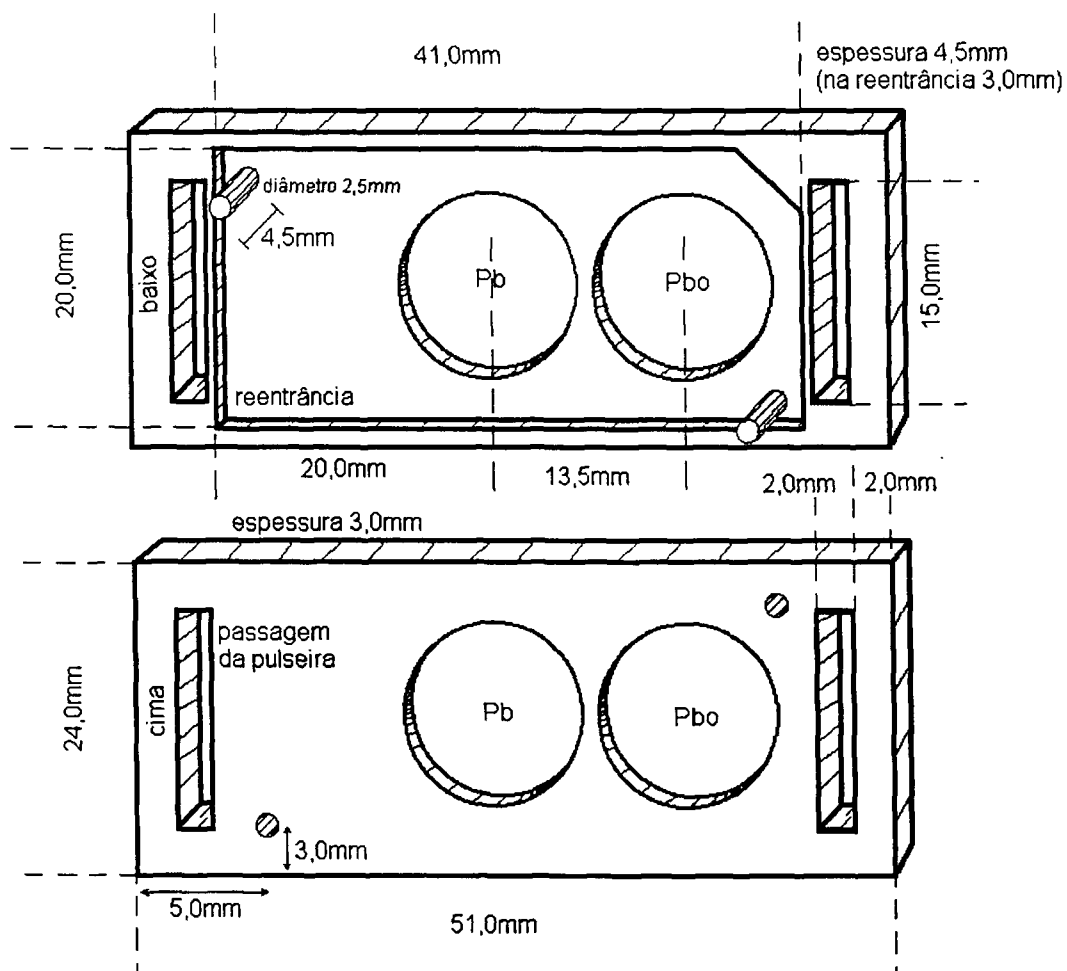


FIGURA 28: Porta-detector de pulso posteriormente adaptado para utilização dos novos filtros TLDC, que foram colocados na posição chumbo furado Pb0.

A produção dos porta-detectors e dos filtros do dosímetro TLDC foi realizada pelo próprio pesquisador no LDT. O porta-detector de pulso, já adaptado, é apresentado na FIG.29.



3 FIGURA 29: Porta-detector de pulso adaptado com o filtro TLDC.

4.7	1.82	1.12		
5.0			4.54	3.32

5.5. Da Simulação Numérica Semi-empírica

Dos 2880 resultados simulados, para as combinações dos parâmetros da TAB.2. da pag. 26, alguns destes são apresentados na TAB.5. seguir, obtidos pelo programa fonte constante no anexo. Como os resultados da simulação indicam nesta tabela e mesmo para os demais resultados não mostrados, a largura de 3,00 mm e as espessuras de 0,82, 1,09 e 1,36 mm apresentaram o maior número de resultados próximos de 1. Como a diferença entre os resultados para as 3 espessuras simuladas não é significativa, adotou-se o valor 1,09 mm como apropriado devido a uma facilidade técnica na sua aquisição.

ENTÃO O 1.0

TABELA 5.: Respostas TL relativas às do ^{60}Co (1250 keV) obtidas pela simulação computacional com ângulos $\phi=0^\circ$. A coluna (em negrito) apresenta as dimensões do filtro (TLDc).

	largura 3,00 mm			largura 2,45mm			largura 3,54mm		
	Espessura (mm)			Espessura mm			Espessura mm		
	1,09	1,36	0,82	1,09	1,36	0,82	1,09	1,36	0,82
33 keV									
$\theta=0^\circ$	1,05	1,05	1,05	2,51	2,51	2,51	0,28	0,28	0,28
15°	1,11	0,96	1,13	2,30	2,12	2,32	0,32	0,24	0,38
30°	1,04	0,97	1,25	1,87	1,80	2,11	0,60	0,49	0,76
45°	1,68	1,32	1,93	2,43	1,98	2,71	1,15	0,84	1,34
60°	2,10	1,66	2,82	2,90	2,35	3,62	1,51	1,15	2,20
90°	4,37	4,37	4,37	5,06	5,06	5,06	3,82	3,82	3,82
48 keV									
$\theta=0^\circ$	0,88	0,88	0,88	2,10	2,1	2,10	0,24	0,24	0,24
15°	0,94	0,82	0,96	1,94	1,80	1,96	0,29	0,21	0,34
30°	0,90	0,83	1,06	1,58	1,51	1,76	0,53	0,44	0,66
45°	1,39	1,10	1,61	2,02	1,65	2,26	0,96	0,71	1,13
60°	1,77	1,39	2,37	2,43	1,96	3,05	1,28	0,87	1,87
90°	3,85	3,85	3,85	4,54	4,54	4,54	3,32	3,32	3,32
118 keV									
$\theta=0^\circ$	0,22	0,21	0,24	0,23	0,21	0,25	0,07	0,06	0,10
15°	0,23	0,21	0,24	0,22	0,19	0,25	0,08	0,06	0,10
30°	0,23	0,20	0,26	0,21	0,19	0,24	0,15	0,12	0,17
45°	0,33	0,27	0,39	0,21	0,15	0,26	0,24	0,18	0,29
60°	0,53	0,34	0,58	0,26	0,20	0,35	0,33	0,25	0,48
90°	0,94	0,93	0,95	1,05	0,95	1,15	0,83	0,82	0,84
1250 keV									
$\theta=0^\circ$	1	0,98	1,01	1,01	0,99	1,02	0,99	0,97	1,01
15°	0,95	0,93	0,98	0,97	0,95	0,99	0,94	0,92	0,97
30°	0,94	0,91	0,96	0,95	0,93	0,97	0,93	0,90	0,95
45°	0,94	0,90	0,97	0,95	0,92	0,98	0,93	0,89	0,96
60°	0,92	0,88	0,97	0,94	0,90	0,98	0,91	0,86	0,96
90°	1,02	1,01	1,03	1,03	1,02	1,04	1,02	1,01	1,03
n.º de valores entre 0,5 e 1,5	15	16	14	7	7	7	12	11	11

5.6. Respostas TL Sob Ângulos Diferentes

Os resultados mensurados com o porta-detector, TLDc, são apresentados juntamente com os do TLDi e com os valores da simulação (simul.). TLDi é avaliado paralelamente por ser um dosímetro de uso já consagrado servindo, portanto, como uma boa referência comparativa. Todos foram expostos a 3 mGy de kerma no ar com radiação de Cobalto 60 e a feixes de raios-X com energias de 25; 33; 37,3 e 82,1 keV descritos em 4.2.3. A rastreabilidade dos campos é garantida pelo LCI-IPEN.

Os TLDs foram irradiados, vide FIG.10 da pagina 24, sob ângulos Θ de 0° (irradiação normal), 30° , 45° e 90° . A simulação também analisou sob 60° . Não se observou o ângulo ϕ pois sua variação não afeta os resultados significativamente (diferença menor do que 5%).

Para cada irradiação foram enviados conjuntos de 6 TLDs de cada tipo. Cada solicitação de irradiação ocorria para uma energia e para um ângulo de incidência da radiação. A média aritmética de cada uma das 6 avaliações foi assumida como o valor representativo para o respectivo ângulo e energia do fóton da radiação incidente. O desvio padrão experimental das 6 medições compõe as barras de erro apresentadas nos gráficos. Cada irradiação com raios-X levou, em média, duas semanas para ser completada, dependendo da agenda do LCI. As irradiações com ^{60}Co eram realizadas prontamente pelo próprio pesquisador pela disponibilização da sala de irradiações.

Na TAB. 6, é apresentado um resumo das irradiações realizadas neste trabalho, com as resposta do TLDc e as do TLDi, onde se tem uma idéia geral do desempenho do TLDc com a nova geometria de filtro idealizada senão para corrigir, pelo menos para diminuir a dependência energética do fósforo $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$. As incertezas das medições apresentadas podem ser diminuídas pela confecção dos filtros com cortes mais precisos das arestas, uma vez que para este trabalho os filtros e porta-detectores TLDc foram produzidos ou confeccionado pelo próprio pesquisador, com ferramentas manuais próprias.

Nas seções 5.6.1 à 5.6.5 os resultados são apresentados na forma gráfica, onde são discutidos.

TABELA 6: Resumo geral das respostas TL mensurados após as irradiações indicadas, com 6 dosímetros TLDC e TLDi. Respostas relativas às da média das respostas sob radiação de ^{60}Co .

Ângulo Teta(Θ)	Fóton (keV)	TLDc		TLDi	
		Resp. (nC)	s^*	Resp. (nC)	s^*
		1	0,18	1	0,04
0°	25	0,73	0,14	1,03	0,1
0°	33	1,38	0,18	1,19	0,04
0°	37,3	1,5	0,19	0,99	0,15
0°	82,1	1,15	0,10	0,93	0,1
30°	Co	0,97	0,07	0,98	0,05
30°	25	0,85	0,10	0,87	0,08
30°	33	1,91	0,20	0,68	0,06
30°	37,3	1,86	0,28	1,35	0,35
30°	82,1	0,90	0,2	0,77	0,10
45°	Co	1,07	0,05	1	0,22
45°	25	1,15	0,39	0,52	0,14
45°	33	1,07	1,08	1,43	0,08
45°	37,3	1,98	0,12	1,05	0,18
45°	82,1	0,74	0,1	0,45	0,10
90°	Co	1,23	0,17	1,26	0,02
90°	25	0,84	0,12	4,49	0,93
90°	33	1,32	0,24	10,5	0,18
90°	37,3	1,67	0,23	5,2	0,4
90°	82,1	1,42	0,1	3,1	0,3
	Média	1,24		1,94	
	s^{**}	0,39		2,38	

s^* é o desvio padrão relativo do valor médio das irradiações de ^{60}Co com incidência normal.

s^{**} é o desvio padrão representando a dispersão dos valores da respectiva coluna.

5.6.1. Irradiação com Radiação Gama de ^{60}Co

O gráfico da FIG.30 apresenta a resposta dos dosímetros após irradiação num campo de radiação gama de ^{60}Co , sob vários ângulos Θ de incidência..

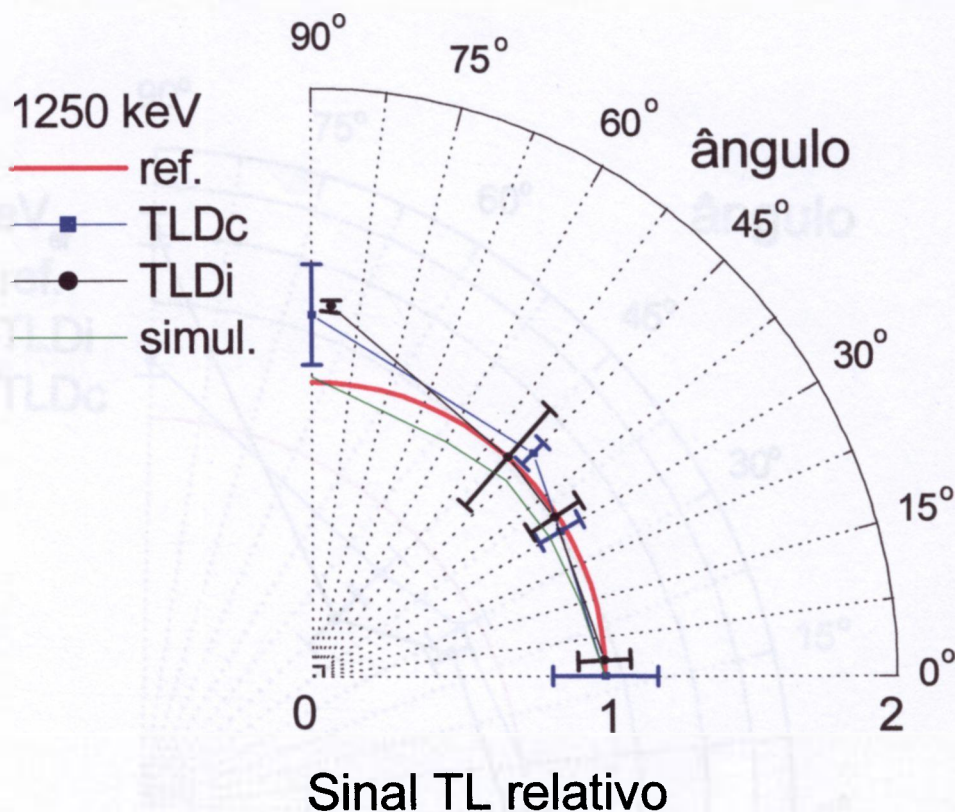


FIGURA 30: Gráfico contendo resposta TL relativa à média das irradiações com incidência normal de ^{60}Co do TLDC, do TLDi, e da simulação, irradiados com ^{60}Co (1250 keV) em função do ângulo Θ de incidência.

Estes resultados mostram que todas as respostas TL são próximas ao valor ideal, ref., igual a 1. Isto porque sob fótons de alta energia (1250keV) qualquer filtro, TLDC ou TLDi, não oferece blindagem e todos os TLDs foram calibrados nesta energia. As barras de erro indicam uma dispersão considerável das respostas, consequência da deficiência na reprodutibilidade dos detectores, principalmente. Espalhamentos, não incluídos na simulação, também contribuem para esta dispersão e para o fato dos valores mensurados serem superior aos simulados.

5.6.2. Irradiação com Raios-X de 82,1 keV

O gráfico da FIG.31 apresenta a resposta TL após irradiação num campo de raios-X de 82,1 keV_{ef}, sob vários ângulos de incidência. Não houve simulação para esta energia.

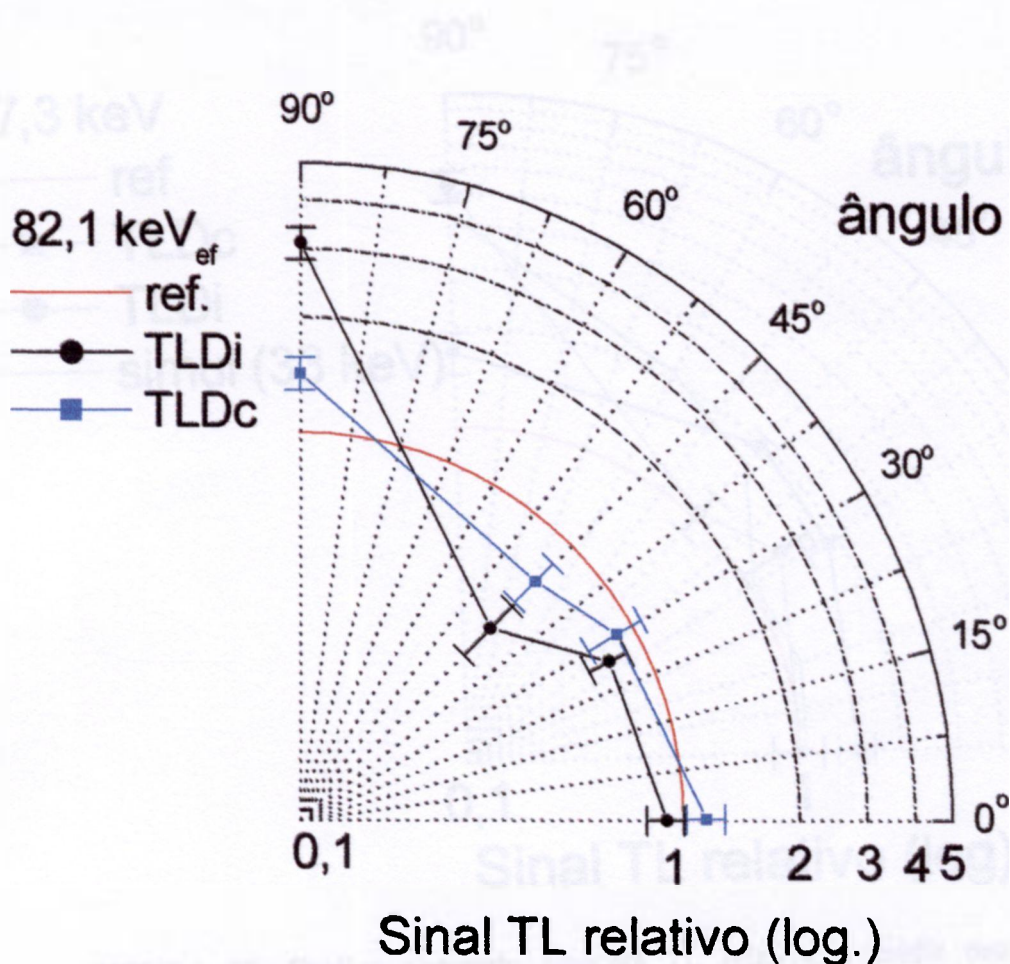


FIGURA 31: Gráfico contendo resposta TL relativa à média das irradiações com incidência normal de ao ^{60}Co do TLDc, do TLDi, e da simulação, irradiados com feixes de raios-X de 82,1 keV em função do ângulo θ de incidência.

Estes resultados mostram que as respostas TL do dosímetro TLDc estão bem mais próximas da valor ideal, ref., do que as do TLDi. Em particular, nota-se o valor superior a 3 vezes o de resposta ideal sob 90° para TLDi.

5.6.3. Irradiação com Raios-X de 37,3 keV

Os dosímetros foram expostos a um feixe de raios-X de 37,3 keV e sua resposta TL relativa à média das irradiações com incidência normal é mostrado na FIG.32.

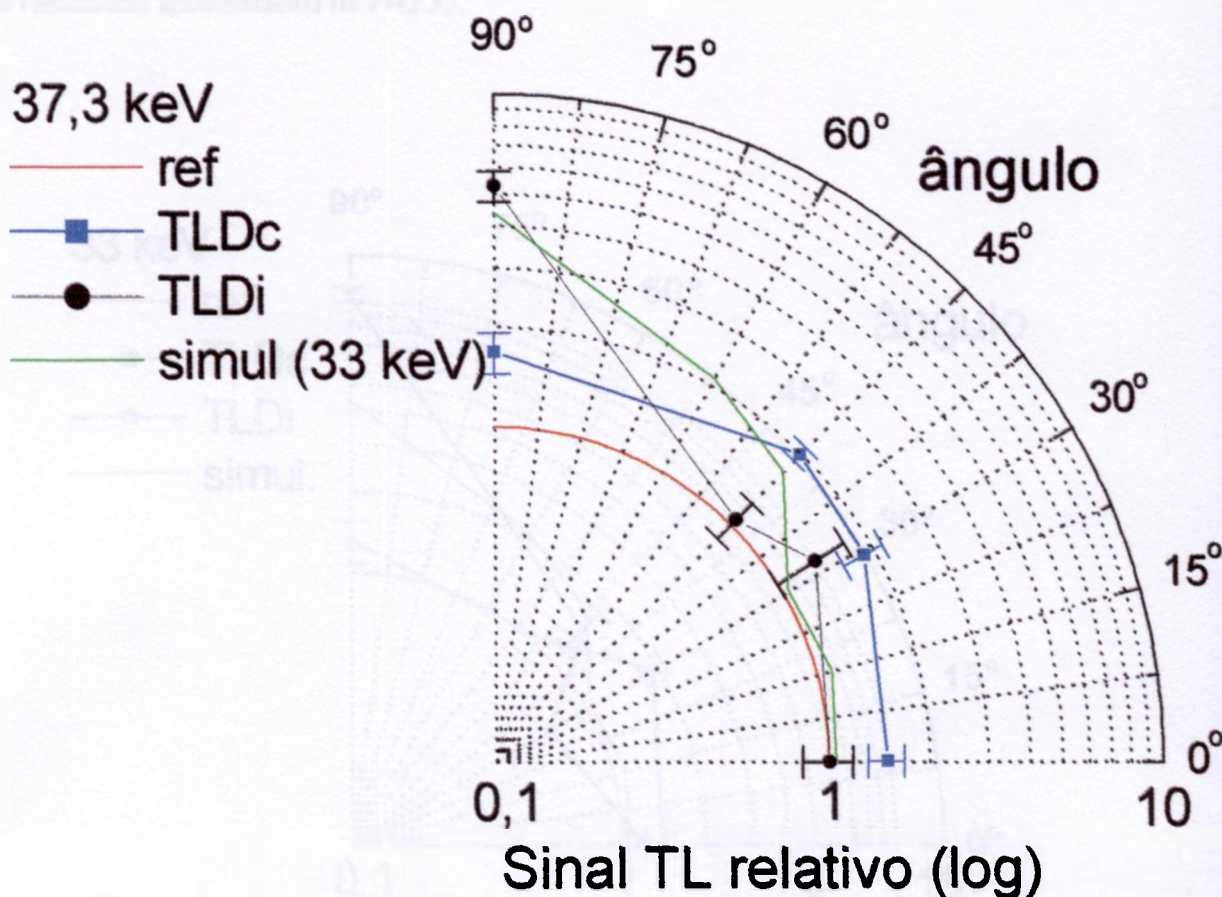


FIGURA 32: Gráfico contendo resposta TL relativa à média das irradiações com incidência normal de ao ^{60}Co do TLDc, do TLDi, e da simulação, irradiados com feixes de raios-X de 37,3 keV em função do ângulo θ de incidência. A simulação foi realizada com 33 keV.

Nesta energia, TLDi teve um desempenho melhor que o TLDc até 45°. Porém, acima deste ângulo, TLDc manteve sem desempenho enquanto TLDi teve uma superestimação da resposta em relação ao valor ideal (4 vezes).

Para baixos ângulos, as medições tiveram valores superiores à simulação pois esta última não incluiu efeitos de espalhamento (build up). Para ângulos maiores a situação foi inversa, pois a simulação não considerou toda a atenuação do feixe no plástico do porta-detector.

5.6.4. Irradiação com Raios-X de 33 keV

Os dosímetros TLDc e TLDi foram irradiados com feixes de raios-X de 33 keV com resultados apresentados na FIG.33.

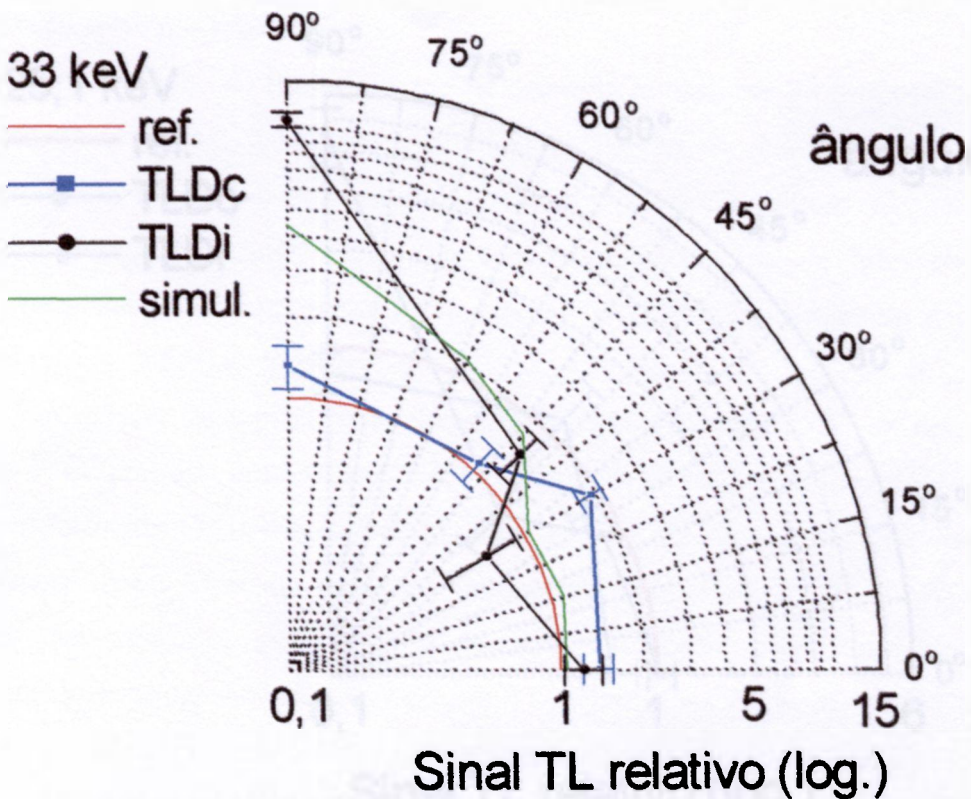


FIGURA 33: Gráfico contendo resposta TL relativa à média das irradiações com incidência normal de ao ^{60}Co do TLDc, do TLDi, e da simulação, irradiados com feixes de raios-X de 33 keV em função do ângulo θ de incidência.

TLDc apresenta um comportamento muito mais próximo de “ref” do que TLDi particularmente sob 90°, onde TLDi chega a quase 10 vezes o valor ideal, e sob 30°, onde TLDi subestima o valor da dose aplicada.

As observações quanto à simulação são as mesmas de 5.6.3

5.6.5. Irradiação com Raios-X de 25 keV

Na FIG.34, é apresentada a resposta TL relativa dos TLDs, quando submetidos a um feixe de 25,1 keV.

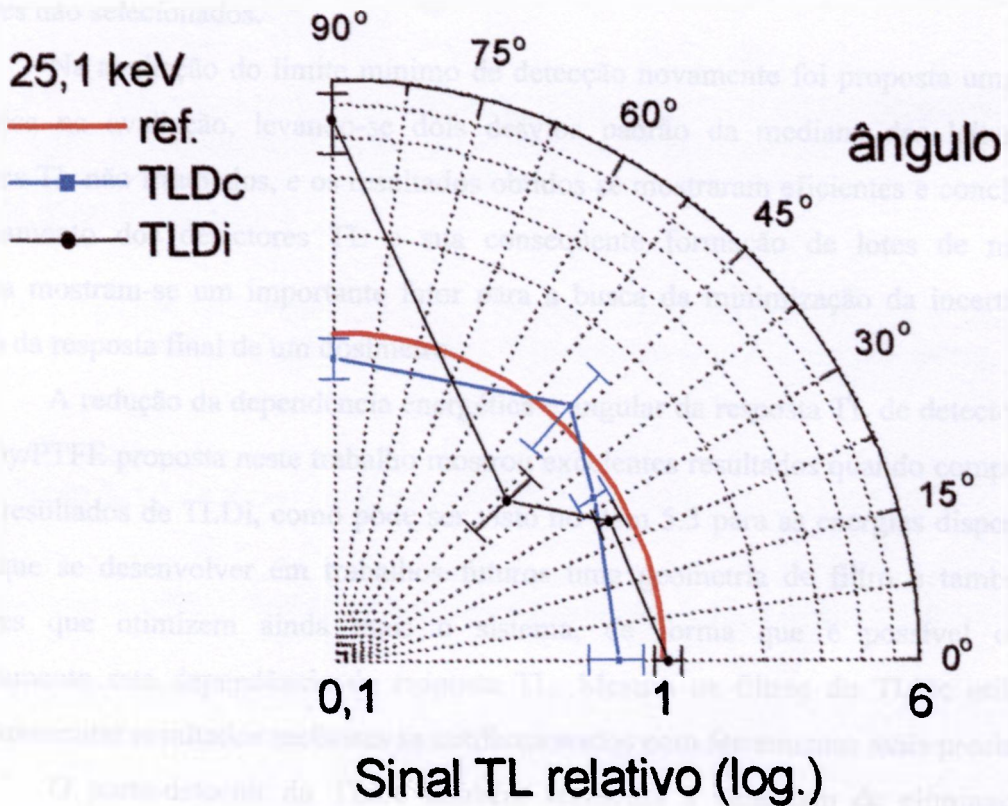


Figura 34: Gráfico contendo resposta TL relativa do TLDc e do TLDi, irradiados com feixes de raios-X de 25,1 keV em função do ângulo θ de incidência.

A resposta dos TLDc mantém-se muito mais próxima à curva de referência ideal, quando comparada com a resposta dos TLDi. Há uma subestimativa da dose de apenas 10% sob 0° e 90°. Já para o TLDi há uma subestimativa de 40% sob 45° e uma superestimativa de 400%, sob 90°.

6. Conclusões

O selecionamento de detectores termoluminescentes de $\text{CaSO}_4\text{:Dy/PTFE}$, realizado neste trabalho, vem propor uma metodologia mais adequada para a utilização destes detectores numa rotina de monitoramento pessoal, tendo em vista uma adequada caracterização dos lotes, uma vez que há uma dispersão muito grande na resposta TL de detectores não selecionados.

Na avaliação do limite mínimo de detecção novamente foi proposta uma nova sistemática na avaliação, levando-se dois desvios padrão da mediana das leituras de detectores TL não irradiados, e os resultados obtidos se mostraram eficientes e concisos. O selecionamento dos detectores TL e sua conseqüente formação de lotes de maneira criteriosa mostram-se um importante fator para a busca da minimização da incerteza de medição da resposta final de um dosímetro.

A redução da dependência energética e angular da resposta TL de detectores de $\text{CaSO}_4\text{:Dy/PTFE}$ proposta neste trabalho mostrou excelentes resultados quando comparados com os resultados de TLDi, como pôde ser visto no item 5.3 para as energias disponíveis. Mas a que se desenvolver em trabalhos futuros uma geometria de filtro e também de detectores que otimizem ainda mais o sistema, de forma que é possível corrigir completamente esta dependência de resposta TL. Mesmo os filtros do TLDc utilizadas podem apresentar resultados melhores se confeccionados com ferramentas mais precisas.

O porta-detector do TLDc também apresenta a vantagem de eliminação do processo de selagem no qual o detector passa por novo aquecimento e stress, o que colabora para a diminuição da vida útil dos detectores. A utilização de apenas dois detectores, um com o filtro e outro sem, com utilização de um algoritmo permite estimativa da energia e também a diminuição do número de detectores, uma vez que no TLDi utilizam-se três detectores. Outra vantagem é a sua possibilidade de utilização tanto como dosímetro de *corpo inteiro* como de *extremidade*, ainda mais que nesta última aplicação a possibilidade de feixes de radiação atuarem sob diversos ângulos é maior.

A simulação proposta apresentou-se como uma ferramenta útil para a posterior confecção desta geometria de filtros, podendo ainda serem propostos novas geometrias. Outros efeitos envolvidos, como "build up", e atenuação do plástico do porta-detector tornarão a simulação mais próxima ainda dos valores experimentais mensurados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers*, 1982, ICRP publications 35. Pergamon Press, Oxford.
2. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *General Principles for the Radiation Protection of workers*. 1997. ICRP publications 75. Pergamon Press, Oxford.
3. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes básicas de radioproteção*. jan. 2005. (CNEN 3.01).
4. COMITÊ DE AVALIAÇÃO DO SERVIÇO DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA. *Regulamento técnico referentes ao processo de certificação de sistemas de monitoração individual externa*. Out. 4, 1995. IRD-RT nº001 ao 005.01/95.(CASMIÉ).
5. Wolfgang G. A.; Ambrosi P.; Bohm J.; Dietze G.; Hohfeld K.; Wolfram W. *New dose quantities in radiation protection*. PTB-Bericht-Dos-23e. Braunschweig, 1995.
6. CAMPOS, L.L. Pastilhas dosimétricas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon para detecção da radiação X, beta e gama. *Publicação IPEN-120*, v.120, p. 1-10, 1987.
7. CAMPOS, L.L.; Lima, M. F. Dosimetric properties of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ teflon pellets produced at IPEN. . *Radiation Protection Dosimetry*, v.14, n.4, p.333-335, 1996.
8. OBERHOFER M.;SCHARMANN. A. *Applied Thermoluminescence Dosimetry*. Published for the Commission of the European Communities. Adam Hilger, Italy. 1979.
9. BAKSHIT A. K; PRADAN A. S. Batch to batch variation in the TL glow peaks and sensitivity in the production of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TLD phosphor. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 107, 4, pp 208-285, 2003.
10. MANZOLI J.E.; CAMPOS V. P. Selecionamento de detectores de radiação de segundo sua sensibilidade e viabilidade para dosimetria termoluminescente. *Sociedade Brasileira de Metrologia*. Set. 1-5, 2003. Metrologia -2003, Recife, Pernambuco-Brasil.
11. Bapat, V. N. *Filter Studies for thermoluminescent Phosphors*. Relatório interno IPEN. 1978.
12. Pradhan, A. S.; Gambhir, S. P.; Patel, P. H.; Bhatt, R. C. e Supe, S. J. Dose equivalent response of a TLD badge influence of body backscatter. *Health Physics*, v.59, n. 3,p. 299-304, 1990.

13. CAMPOS, L. L. Development of CaSO₄:Dy dosimeter. In: *Meeting on Radiation Protection Dosimetry*. Itaipava. Proceeding of meeting on Radiation Protection Dosimetry. Rio de Janeiro, 1983.v. 1.p.2-4.
14. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.
Thermoluminescence Dosimetry for personal and enviromental monitoring. Fontenay-aux-Roses, France: Institut de Protection et de Surete Nucleare; 12-1991.
15. CAMERON, J. R. SUNTHARALINGAM, N.; KENNEY, G. N.
Thermoluminescent Dosimetry Madison, Univ. Wisconsin Press,.1968.
16. Rosa L. A. R. *Dosimetria Termoluminescente Aplicada à Física Médica.:* Departamento de Física Médica. 2000.IRD.
17. MCKEEVER, S. W. S; MOSCOVITCH, M; TOWNSEND, P. D.
Thermoluminescence Dosimetry: Properties and Uses. London, Nuclear Technology Publishing, 1995.
18. Nambi, K. S. V.; Thermoluminescence: Its understanding and applications. São Paulo.maio de 1977, (IEA-Pub.-54).
19. J. S. YANG, D. Y. KIM; J. L. CHANG; Y. M. NAM AND J. W. PARK.
Thermoluminescence Characteristics of Teflon Embedded CaSO₄:Dy TLD.
Radiation Protection Dosimetry, v. 100. n° 1-4, p. 337-400, 2002
20. Knoll, G. F. *Radiation Detection and Measurement*.2 ed. Michigan. John Wiley&Sons.1989.
21. Evans, R. D. *The Atomic Nucleus*. Tata McGraw Hill Publishing Company Ltd. - New Delhi. 1955.
22. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION.
Recomendations of Internacional Commission on Radiological Protection, ICRP,1991.(Publicação 60). Pergamon Press., Oxfort, UK
23. Guia para expressão da incerteza. 3ª. Ed. Brasileira do "Guide to the expression of uncertainty in measurement".ed. rev. Inmetro (2003).
24. Centro de referência em tecnologia inovadoras. "Curso: Garantia da Qualidade de Resultados e Incerteza de Medição", CERTI. ago-2004.
25. Vuolo, J. H. *Fundamentos da teoria de erros*. Brasil, Ed. Edgard Blucher Ltda. 2 ed. 1996
26. Manzoli, J. E. Procedimento Interno – LDT/IPEN.
27. Roberson, P. L.; Carlson R. D.Determining the lower limit of detection for personnel dosimetry systems.*Health Physics*, v.62, n. 1,p. 2-9, 1992.

28. Campos, V. P., Saori, M., Manzoli, J. E.- Avaliação do limite de repetitividade e de detecção de dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. In: **CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA**. Nov. 09-12, 2004. Paraná: Rede Paranaense de Metrologia e Ensaios. Metrosul IV.1 CD-ROM
29. Brian M. Tissue. Chromatographic Resolution. **Copyright © 1997 by Science Hypermedia, Inc.** Disponível em <<http://elchem.kaist.ac.kr/vt/chem-ed/sep/theory/resolut1.htm>. acesso em 30 set. 2005.
30. POTIENS, Jr. A. J.; CAMPOS L.L. Ultraviolet and laser radiation dosimetry using phototransferred thermoluminescence in $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. *Radiation Protection Dosimetry*, v.66, n.1-4, p.95-96, 1996
31. Johns, H.N.; Cunnighan, J.R. **The physics of radiology**. Charles C. Thomaz Publisher, Illinois, USA, 1983.
32. Lakshmanan, A. R.; Pobli, K, L; Bhatt, R. C. Termal history and reusability of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ Teflon TLD discs. *Physics in Medicine and Biology*, v. 24, n. 5, p. 999-1008, 1979

Anexo - Programa Fonte da Simulação

```

program jemtl2
c
c avalia a resposta TL de pastilha sob filtracao tipo cruzeta
c de chumbo, variando largura, espessura e angulo de incidencia
c da radiacao
c-----
  real dx(36,36,12),dy(36,36,12),dz(36,36,12),
  .   domx(36,36,12),domy(36,36,12),domz(36,36,12),
  .   angtet(6),angfi(3),foton(4),aten(4),coefot,
  .   espess,largur,d(8),coef,sinal,tetag,fig,
  .   dmin,a,b,c,de,dis,x,y,z,pi,spast(36,36,12)
cp   ,atenp(4)
  integer tet,fi,fot,trajx(500),trajy(500),trajz(500),larg,espe,
  .   i,j,k,l,m,past(36,36,12),cruz(36,36,12),
  .   ix,iy,iz,ixa,iya,iza
c
c teta de 1 a 6, fi de 1 a 3 e fot de 1 a 4
c angulo em graus e energia em keV
c-----
  12 format(6(G15.7,1x))
  OPEN(UNIT=11,FILE='resTL.dat',STATUS='OLD')
c
c----- definicoes de todos os vetores e variaveis -----
  pi=3.141593
  angtet(1)=0. *pi/180.
  angtet(2)=15. *pi/180.
  angtet(3)=30. *pi/180.
  angtet(4)=45. *pi/180.
  angtet(5)=60. *pi/180.
  angtet(6)=90. *pi/180.
  angfi(1)=0. *pi/180.
  angfi(2)=45. *pi/180.
  angfi(3)=22.5 *pi/180.
  foton(1)=33.
  foton(2)=48.
  foton(3)=118.
  foton(4)=1250.
c
c atenuacao para milímetros
c
  aten(1)=30.
  aten(2)=11.36
  aten(3)=4.786

```

aten(4)=0.066

cp aten(1)=0.2085
 cp aten(2)=0.09242
 cp aten(3)=0.03838
 cp aten(4)=0.01354

do 10 k=1,12
 do 10 i=1,36
 do 10 j=1,36

c
 c 6 mm / 22 pontos no diametro

dx(i,j,k)=0.27272
 dy(i,j,k)=0.27272
 dz(i,j,k)=0.27272
 past(i,j,k)=0
 spast(i,j,k)=0

10 continue
 do 20 k=1,5
 do 20 i=1,36
 do 20 j=1,36
 dz(i,j,k)=0.2

c
 c 1 mm / 5 pontos de altura da pastilha

20 continue

c
 c dominio

domx(1,1,1)=0.0
 domy(1,1,1)=0.0
 domz(1,1,1)=0.0
 domx(2,1,1)=dx(1,1,1)
 domy(2,1,1)=0.0
 domz(2,1,1)=0.0
~~domx~~ domx(1,2,1)=0.0
~~domy~~ domy(1,2,1)=dy(1,1,1)
 domz(1,2,1)=0.0
 domx(1,1,2)=0.0
 domy(1,1,2)=0.0
 domz(1,1,2)=dz(1,1,1)
 domx(2,2,1)=dx(1,1,1)
 domy(2,2,1)=dy(1,1,1)
 domz(2,2,1)=0.0
 domx(1,2,2)=0.0
 domy(1,2,2)=dy(1,1,1)
 domz(1,2,2)=dz(1,1,1)
 domx(2,1,2)=dx(1,1,1)

```

domy(2,1,2)=0.0
domz(2,1,2)=dz(1,1,1)
do 30 k=2,12
  do 30 i=2,36
    do 30 j=2,36
      domx(i,j,k)=domx(i-1,j,k)+dx(i,j,k)
      domy(i,j,k)=domy(i,j-1,k)+dy(i,j,k)
      domz(i,j,k)=domz(i,j,k-1)+dz(i,j,k)
    30 continue
  30 continue
c
c pastilha:
c
  do 50 i=8,29
    do 50 j=8,29
      a=(i-18.5)**2
      b=(j-18.5)**2
      a=a+b
      if(a.le.121)then
        past(i,j,5)=1
        do 40 k=1,4
          past(i,j,k)=1
        40 continue
      else
        endif
    50 continue
  50 continue
c
c loopings da espessuras e das larguras:
c -----
  do 101 espe=1,5
    do 101 larg=1,8
  c
c cruzeta:
c
  do 60 k=1,12
    do 60 i=1,36
      do 60 j=1,36
        cruz(i,j,k)=0
        if((i.ge.(10+larg)).and.(i.le.(27-larg)).and.
          (j.ge.2).and.(j.le.35).and.
          (k.ge.(5+espe)).and.(k.le.11))then
          cruz(i,j,k)=1
        else
          if((i.ge.2).and.(i.le.35).and.
            (j.ge.(10+larg)).and.(j.le.(27-larg)).and.
            (k.ge.(5+espe)).and.(k.le.11))then
            cruz(i,j,k)=1
          else

```

```

if((i.ge.2). and.(i.le.(8-espe)). and.
(j.ge.(10+larg)).and.(j.le.(27-larg)).and.
(k.ge.1). and.(k.le.5)) then
  cruz(i,j,k)=1
else
if((i.ge.(29+espe)).and.(i.le.35). and.
(j.ge.(10+larg)).and.(j.le.(27-larg)).and.
(k.ge.1). and.(k.le.5)) then
  cruz(i,j,k)=1
else
if((i.ge.(10+larg)).and.(i.le.(27-larg)). and.
(j.ge.2). and.(j.le.(8-espe)). and.
(k.ge.1). and.(k.le.5)) then
  cruz(i,j,k)=1
else
if((i.ge.(10+larg)).and.(i.le.(27-larg)).and.
(j.ge.(29+espe)).and.(j.le.35).and.
(k.ge.1). and.(k.le.5)) then
  cruz(i,j,k)=1
else
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
60 continue
c
c propagacao do feixe:
c -----
do 100 fot=1,4
c
c "fitting" da resp.TL da pastilha (coef.foton):
c
c =-(log(foton(fot))-3.5)**2/1.21057
c =2.365*exp(c)
c coefot=exp(c)
c -----
do 100 fi=1,3
do 100 tet=1,6
c
c sinal=0.0
do 90 k=1,12
do 90 i=1,36
do 90 j=1,36
trajx(1)=i
trajy(1)=j

```

```

trajz(1)=k
if(past(i,j,k).eq.1)then
  l=2
  do 70 m=1,200

```

c
c avaliacao da menor distancia ao feixe no paralelepipedo da malha

c

```

  x=i+m*0.3*sin(angtet(tet))*cos(angfi(fi))
  y=j+m*0.3*sin(angtet(tet))*sin(angfi(fi))
  z=k+m*0.3*cos(angtet(tet))
  ix=int(x)
  iy=int(y)
  iz=int(z)
  ix=min0(ix,36)
  iy=min0(iy,36)
  iz=min0(iz,12)
  d(1)=(x-ix)**2 +(y-iy)**2 +(z-iz)**2
  d(2)=(x-ix-1)**2+(y-iy)**2 +(z-iz)**2
  d(3)=(x-ix)**2 +(y-iy-1)**2+(z-iz)**2
  d(4)=(x-ix)**2 +(y-iy)**2 +(z-iz-1)**2
  d(5)=(x-ix-1)**2+(y-iy-1)**2+(z-iz)**2
  d(6)=(x-ix)**2 +(y-iy-1)**2+(z-iz-1)**2
  d(7)=(x-ix-1)**2+(y-iy)**2 +(z-iz-1)**2
  d(8)=(x-ix-1)**2+(y-iy-1)**2+(z-iz-1)**2
  dmin=amin1(d(1),d(2),d(3),d(4),d(5),d(6))
  if(dmin.eq.d(1))then
    trajx(1)=ix
    trajy(1)=iy
    trajz(1)=iz
  else
    if(dmin.eq.d(2))then
      trajx(1)=ix+1
      trajy(1)=iy
      trajz(1)=iz
    else
      if(dmin.eq.d(3))then
        trajx(1)=ix
        trajy(1)=iy+1
        trajz(1)=iz
      else
        if(dmin.eq.d(4))then
          trajx(1)=ix
          trajy(1)=iy
          trajz(1)=iz+1
        else
          if(dmin.eq.d(5))then
            trajx(1)=ix+1

```

```

    trajy(l)=iy+1
    trajz(l)=iz
else
if(dmin.eq.d(6))then
    trajx(l)=ix
    trajy(l)=iy+1
    trajz(l)=iz+1
else
if(dmin.eq.d(7))then
    trajx(l)=ix+1
    trajy(l)=iy
    trajz(l)=iz+1
else
if(dmin.eq.d(8))then
    trajx(l)=ix+1
    trajy(l)=iy+1
    trajz(l)=iz+1
else
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
if((trajx(l).eq.trajx(l-1)).and.
    (trajy(l).eq.trajy(l-1)).and.
    (trajz(l).eq.trajz(l-1)))then
else
    l=l+1
endif
70 continue
coef=1.0
do 80 m=2,l
    ix=min0(trajx(m),36)
    iy=min0(trajy(m),36)
    iz=min0(trajz(m),12)
    ixa=min0(trajx(m-1),36)
    iya=min0(trajy(m-1),36)
    iza=min0(trajz(m-1),12)
    a=cruz(ix,iy,iz)
    b=cruz(ixa,iya,iza)
c    ap=past(ix,iy,iz)
c    bp=past(ixa,iya,iza)
if((a.eq.1).and.(b.eq.1))then
    c=(domx(ix,iy,iz)-domx(ixa,iya,iza))**2+

```

```

      (domy(ix,iy,iz)-domy(ixa,iya,iza))**2+
      (domz(ix,iy,iz)-domz(ixa,iya,iza))**2
      dis=sqrt(c)
      coef=exp(-aten(fot)*dis)*coef
    else
cp      if((ap.eq.1).and.(bp.eq.1))then
cp      c=(domx(ix,iy,iz)-domx(ixa,iya,iza))**2+
cp      (domy(ix,iy,iz)-domy(ixa,iya,iza))**2+
cp      (domz(ix,iy,iz)-domz(ixa,iya,iza))**2
cp      dis=sqrt(c)
cp      coef=exp(-atenp(fot)*dis)*coef
cp      endif
    endif
80    continue
      spast(i,j,k)=coef*coefot
    else
    endif
90 continue
c
c integral do sinal apenas na superficie da pastilha:
c
  do 92 i=8,29
    do 92 j=8,29
      a=(i-18.5)**2
      b=(j-18.5)**2
      a=a+b
      if(a.le.121)then
        sinal=sinal+spast(i,j,5)
        do 91 k=1,4
          if(a.ge.100)then
            sinal=sinal+spast(i,j,k)
          else
            endif
91      continue
        else
        endif
92 continue
      if(sinal.ne.0)then
        largur=(17-2*larg)*0.27272
        espess=(6-espe)*0.27272
        tetag=angtet(tet)*180./pi
        fig=angfi(fi)*180./pi
        write(11,12) foton(fot),tetag,fig,sinal,
          largur,espess
      else
      endif
100 continue

```

```
    write(*,*)"executado p/ largura ",largur," e espessura ",espess  
c -----  
101 continue  
c -----  
    write(*,*)"finalizado"  
    stop  
    end
```

Apêndice - Trabalhos Gerados durante o (e por causa do) Projeto.

São apresentados a seguir os trabalhos produzidos durante projeto:

- Trabalho apresentado em METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM). Setembro 01–05, 2003, Recife, Pernambuco – BRASIL *“SELECIONAMENTO DE DETECTORES DE RADIAÇÃO SEGUNDO SUA SENSIBILIDADE E VIABILIDADE PARA DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE”*.
- Trabalho apresentado em METROSUL IV – IV Congresso Latino-Americano de Metrologia *“A METROLOGIA E A COMPETITIVIDADE NO MERCADO GLOBALIZADO”* 09 a 12 de Novembro, 2004, Foz do Iguaçu, Paraná – BRASIL Rede Paranaense de Metrologia e Ensaios. Este artigo traduzido para o inglês foi convidado para publicação em edição especial da Revista Brazilian Archives of Biology and Technology (indexada internacionalmente) e está sendo julgado. *“AVALIAÇÃO DO LIMITE DE REPETITIVIDADE E DE DETECÇÃO DE DOSÍMETROS DE $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ”*
- Trabalho aceto para apresentação na Primeiras Jornadas Luso Brasileiras de Protecção contra Radiações e Décimas Primeiras Jornadas Portuguesas de Protecção contra Radiações. (Sociedade Portuguesa de Física, S.P.F.) *“ESTUDOS DA CORREÇÃO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA E ANGULAR DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE EM DOSÍMETROS PESSOAIS DE $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ - MEDIÇÕES E SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA”*

SELECIONAMENTO DE DETECTORES DE RADIAÇÃO SEGUNDO SUA SENSIBILIDADE E VIABILIDADE PARA DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE

José Eduardo Manzoli¹ e Vicente de Paulo de Campos²

^{1,2} Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, Brasil

¹ Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, Brasil

Resumo: O dispositivo principal para a medição da radiação nos dosímetros termoluminescentes do Laboratório de Dosimetria Termoluminescente, LDT-IPEN/CNEN, é um detector composto por cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ na forma de pó prensados em uma matriz de politetrafluoretileno (PTFE). Neste trabalho apresenta-se o processo de *selecionamento* destes detectores, com a determinação de sua distribuição de resposta termoluminescente e divisão em lotes de resposta semelhante, exemplificando também sua curva de calibração.

Palavras chave: selecionamento, monitoração individual externa, dosimetria.

1. INTRODUÇÃO

O Serviço de Monitoração Individual Externa do IPEN/CNEN, no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente, LDT, utiliza a técnica da Termoluminescência^{1,2} e realiza mensalmente milhares de avaliações da grandeza física *Dose Individual, H_e*, para fótons de radiação X ou gama, mensurada na unidade sievert, Sv (ou submúltiplos). O dispositivo principal para tais medições é o dosímetro de radiação, vide figura 1, composto por detectores de cristais termoluminescentes³.

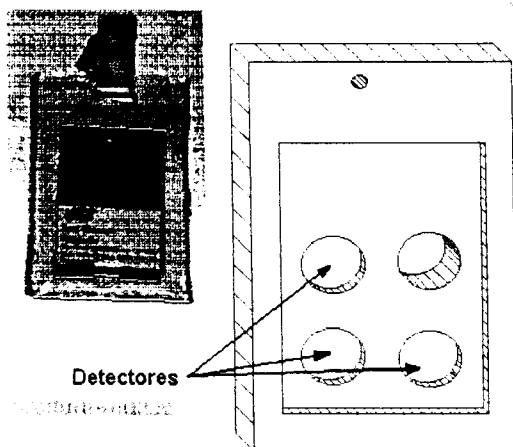


Fig. 1. Dosímetro de tórax (6x4cm) do LDT-IPEN/CNEN. Nas posições indicadas do esquema interno ilustrado inserem-se 3 detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$, discos de 6.0mm de diâmetro por 1.0mm de espessura.

Os três detectores de um mesmo dosímetro alojam-se dentro do porta-detector sob diferentes tipos de filtração da radiação, chamadas de *chumbo*, *chumbo furado* e *plástico*. A diferença de resposta destes três detectores permite também a estimativa do valor do fóton da radiação incidente¹, além da *dose individual* de radiação que um trabalhador tenha tomado.

Estes dosímetros também são utilizados para ensaios de Dosimetria Ambiental e de Área, porém, avaliando a *grandeza Exposição*.

Para se realizar as medições com precisão, exatidão e confiabilidade dentro das normas⁵, é indispensável que se realize o selecionamento dos milhares de detectores necessários, dentre os que são adquiridos do fornecedor. Neste trabalho apresenta-se este processo de selecionamento.

2. PROCEDIMENTO

O selecionamento inicia-se com uma seleção mecânica, ou seja, uma inspeção das dimensões dos detectores, que devem se ajustar perfeitamente no disco da máquina leitora termoluminescente do LDT, vide figura 2.



Fig. 2. Leitor TL Harshaw modelo 5500 do LDT. No detalhe, o disco onde devem se encaixar os detectores ou pastilhas (pequenos "pontos brancos") para serem avaliados.

Em geral, 25% dos detectores recebidos são devolvidos e trocados, por não se ajustarem perfeitamente ao disco.

O LDT apresenta por volta de 1500 usuários/dosímetros mensais, sendo necessário, então, o selecionamento de 9000 detectores, no mínimo, pois cada dosímetro individual utiliza 3 detectores e um mesmo usuário necessita de 2 dosímetros, para não ficar sem o mesmo durante a troca/avaliação.

Uma vez realizada a seleção mecânica e completado o número de detectores necessários, foi separada uma amostra contendo 777 detectores para se estabelecer os critérios de formação dos lotes. Estes detectores foram então irradiados com uma pré-dose, tratados termicamente e então irradiados com 2,0mGy de *kerma no ar*, grandeza física para radiações ionizantes diretamente relacionada a H_x , na qual o Laboratório de Calibração de Instrumentos, LCI-IPEN, possui rastreabilidade internacional. A pré-dose garante um mesmo histórico de irradiação a todos os detectores. As irradiações ocorrem em campos padrão terciário de radiação.

A distribuição de resposta termoluminescente dos detectores é mostrada na figura 3.

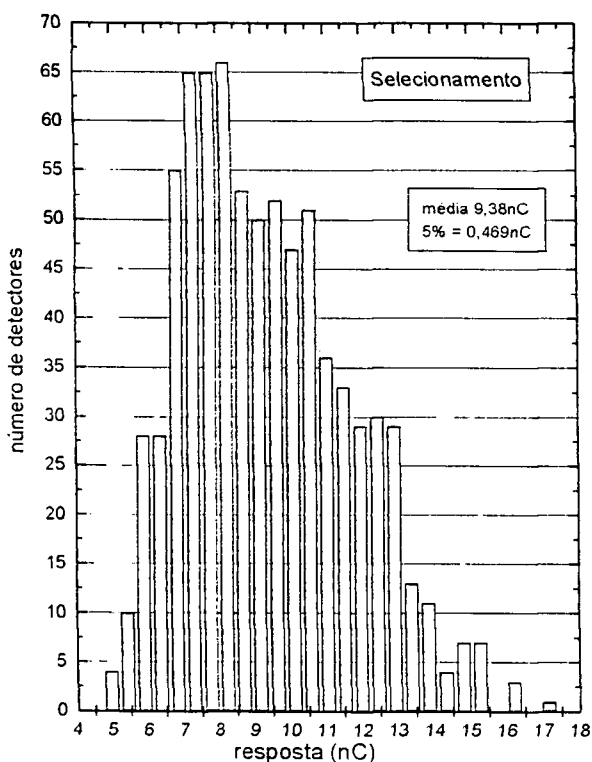


Fig. 3. Distribuição da resposta TL da amostra contendo 777 detectores irradiados com 2,0mGy com ^{60}Co .

O Laboratório de Materiais Termoluminescente, LMT-IPEN, fornecedor dos detectores, informa uma reprodutibilidade de resposta dos detectores com variação inferior a 5%. Dividiu-se, então, a região da distribuição onde há o maior número de detectores, para o seu melhor aproveitamento, em dez conjuntos ou lotes, com largura igual a 10% do valor médio da distribuição. Os resultados estão na tabela 1.

Com o critério de separação dos lotes estabelecido, procede-se ao selecionamento para aquisição dos 9000 detectores. Como não é possível realizá-lo de uma só vez, há uma média de seleção de 400 detectores por semana, sem onerar a rotina de serviços do LDT.

Tabela 1. Lotes escolhidos. Sua largura é 10% do valor da média da distribuição, o lote *esp* é utilizado para avaliações diárias do sistema todo. O lote +, após um selecionamento mais refinado, será utilizado para pesquisas, devido à sua elevada sensibilidade.

Lote	Intervalo de Sensibilidade (nC)	Porcentagem esperada (%)
1	(5,657; 6,595)	4,7
2	(6,596; 7,533)	11
3	(7,534; 8,471)	17
4	(8,472; 9,409)	15
5	(9,410; 10,347)	13
6	(10,348; 11,285)	13
7	(11,286; 12,223)	8,8
8	(12,224; 13,161)	7,5
9	(13,162; 14,099)	5,3
0	(14,100; 15,037)	1,8
+	> 15,037	2,2
esp	(7,063; 8,472)	160 detectores

Com os lotes selecionados, procede-se ao estabelecimento da curva de calibração de cada lote. Na figura 4 é apresentada uma curva de calibração de um lote irradiado com ^{60}Co .

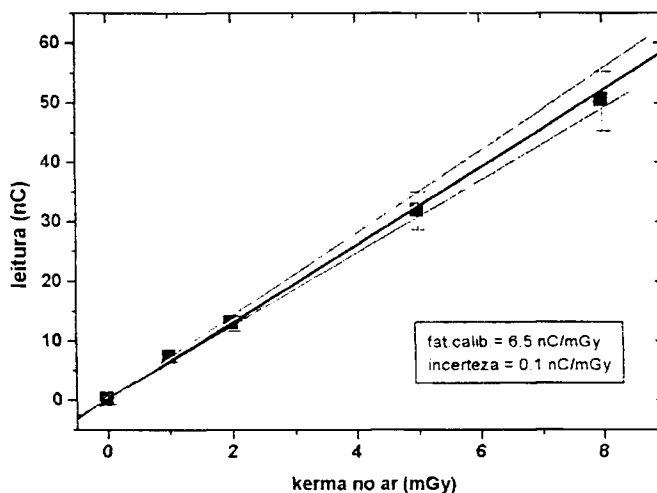


Fig. 4. Curva de calibração de um lote com 4 anos de utilização, com seu intervalo fiducial (95%). Para sua utilização, é estabelecida a relação da grandeza *kerma no ar* com H_x . A incerteza de medição de cada ponto é estabelecida com 5 dosímetros, para a incerteza tipo A, e chega a superar 10% neste lote já muito utilizado.

Também são estabelecidas as curvas de calibração com irradiações de fótons de baixa energia, com um fator de calibração sensivelmente diferente do obtido com ^{60}Co .

Para o seccionamento deste ano, o número de detectores necessários, bem como suas caracterizações quanto à curva de calibração e de dependência energética se completarão até novembro de 2003. Os resultados destas caracterizações são analisados, juntamente com sua aplicação no algoritmo de cálculo de dose¹, para a correta determinação da radiação ocupacional.

3. CONCLUSÃO

O procedimento apresentado permite um seccionamento criterioso e prático dos novos lotes de detectores TL do LDT. Este procedimento será aplicado em novos seccionamentos a cada três anos.

Os novos lotes têm uma diminuição sensível na variação da reprodutibilidade em relação aos atuais, não superando os 10% limítrofes dos lotes.

Os demais procedimentos para a colocação em uso dos dosímetros com os novos detectores dependem deste seccionamento.

REFERÊNCIAS

- [1] S.W.S. McKeever, M. Moscovitch, P.D. Townsend, "Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses", Nuclear Technology Publishing (1995).
- [2] M. Oberhofer, A. Scharmann, "Applied Thermoluminescence Dosimetry", Adam Hilger (1981).
- [3] L.L. Campos, M.F. Lima, " Dosimetric Properties of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ Teflon Pellets Produced at IPEN". Rad. Prot. Dosimetry, 14(4): 333-335: 1986.
- [4] J.E.Manzoli, "Individual Dose and Photon Energy Valuation Algorithm", to be published.
- [5] CASMIE - Regulamentos Técnicos Referentes ao Processo de Certificação de Sistemas de Monitoração Individual Externa - IRD-RT N°001 ao 004.01/95 (1995).

Autores: Dr. José Eduardo Manzoli e Bel. Vicente de Paulo de Campos, Centro de Metrologia das Radiações Dosimetria - CMRD/IPEN/CNEN, av. prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, CEP 05508-000, São Paulo - SP, Brasil, telefone (11) 3816 - 9212, fax 3816 - 9209, jmanzoli@net.ipen.br.

AVALIAÇÃO DO LIMITE DE REPETITIVIDADE E DE DETECÇÃO DE DOSÍMETROS DE $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Vicente de Paulo de Campos¹, Mirian Saori Doi¹, José Eduardo Manzoli^{1,2}

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Paulo, Brasil

²Universidade São Judas Tadeu

Resumo: A resposta de um dosímetro termoluminescente, TLD, utilizado por um trabalhador ou colocado em um local que possa estar sujeito a um campo de radiação gama, deve ser muito bem caracterizada afim de se obter a *Dose Individual para Fótons*, H_x , ou a *Exposição*, X , a ele atribuída com precisão e confiança. Entre as avaliações envolvidas nesta caracterização encontra-se a seleção dos dosímetros segundo a sua sensibilidade, a sua repetitividade quando usado várias vezes num mesmo campo de radiação e o seu limite de detecção, avaliações estas que são apresentadas neste trabalho para os detectores produzidos no IPEN.

Palavras chave: selecionamento, monitoração individual, dosimetria

1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Dosimetria Termoluminescente, LDT-IPEN, utiliza, para monitoramento individual externo de seus trabalhadores [1] e monitoração ambiental, TLDs compostos de três detectores ou pastilhas termoluminescentes, vide figura 1.

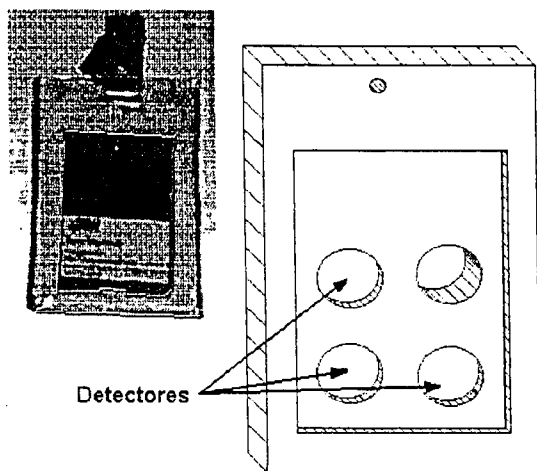


Fig. 1. Dosímetro (6x4cm) do LDT-IPEN/CNEN. Nas posições indicadas no esquema interno inserem-se três detectores ou pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$.

As pastilhas estão na forma de pequenos discos com diâmetro de 6,0 mm e espessura de 1,0 mm de Sulfato de Cálcio dopado com Disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) prensado com politetrafluoretileno (PTFE)¹.

Como não são selecionados pelo fornecedor, as pastilhas devem ser caracterizadas antes de sua utilização. A avaliação termoluminescente das pastilhas é realizada em leitores como o Modelo 5500 da Harshaw.

O método de medição utilizado tem diversas fontes de incerteza, que são descritas pelo diagramas de causa-efeito (Ishikawa) esquematizado na figura 2.

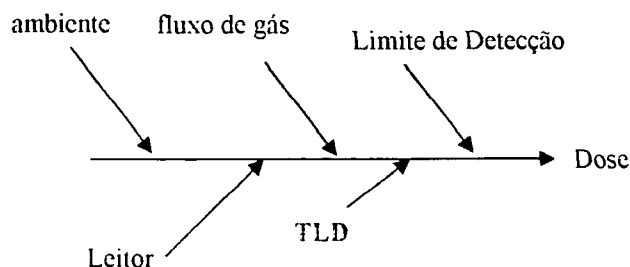


Fig. 2. Diagrama de causa-efeito (Ishikawa) para avaliação das incertezas na obtenção da resposta de um TLD.

Neste diagrama as fontes de incerteza provenientes do ramo TLD (detector ou pastilha em si) apresentam os fatores de incerteza repetitividade, reprodutividade, tratamento térmico, homogeneidade, limite de detecção e característica do material dosimétrico, vide figura 3.

O "peso" dos vários fatores que compõe a incerteza "TLD" deve ser metodicamente avaliado, variando-se cada fator e mantendo-se constantes os demais. É a chamada análise de robustez, em ensaios analíticos.

Neste trabalho avaliou-se apenas os ramos "repetitividade" e "limite de detecção". A repetitividade avalia o quão bom um detector consegue repetir uma medição, mantendo-se todos as outras condições do ensaio.

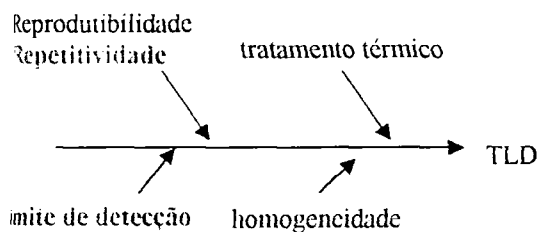


Fig 3. Diagrama de causa-efeitos (Ishikawa) para o detector.

Procedimento Experimental

Nas medições termoluminescentes, extremamente diretas e destrutivas (pois não se pode recuperar o valor mensurado, realizando a medição novamente), as várias condições do ensaio, tais como todos os detalhes da irradiação, do tratamento térmico, os parâmetros do equipamento leitor, as condições ambientais etc., são difíceis de se manterem em intervalos pequenos, por este motivo apresenta-se aqui o procedimento para avaliar a repetitividade dos detectores. Assim, não se pode afirmar que um mesmo detector tenha uma repetitividade inferior a esse limite, nas condições técnicas disponíveis. O limite de detecção é avaliado, pois é o valor abaixo do qual não se pode realizar medições TL com este detector.

4.1 Repetitividade

Ao se receber as pastilhas, procede-se ao selecionamento dos lotes por sensibilidade [2], baseando-se na distribuição de resposta TL a um mesmo campo de radiação gama, vide figura 4.

Nota-se que há variações de mais de 100% nas respostas, atestando uma grande inhomogeneidade das pastilhas recebidas. A repetitividade avalia a capacidade de uma pastilha permanecer dentro de cada lote de sensibilidade.

Uma amostra contendo 189 detectores, pertencentes a um dos lotes, foi preparada tratando-se termicamente, irradiando-se com 5,0 mGy de kerma no ar e avaliando-se no leitor TL por três vezes e aquelas com desvio percentual da média acima de 10% foram excluídas para caracterizar o lote que já havia sido selecionado.

Procedeu-se, então, ao tratamento térmico, à irradiação com 5,0 mGy de kerma no ar e à avaliação no leitor TL numa série de 4 repetições das pastilhas restantes.

Calculou-se o desvio máximo relativo percentual, $D_{\%}$, de cada pastilha a cada duas repetições, que ocorrem em intervalos de 52 horas.

O desvio máximo relativo percentual, é dado por:

$$D_{\%} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\min}} \cdot 100 \quad (1)$$

onde A é o resultado da avaliação termoluminescente.

Avaliou-se o número de detectores que apresentam desvio máximo relativo percentual, $D_{\%}$, acima de certos valores. Os resultados da evolução de $D_{\%}$ com as repetições são apresentados na figura 5.

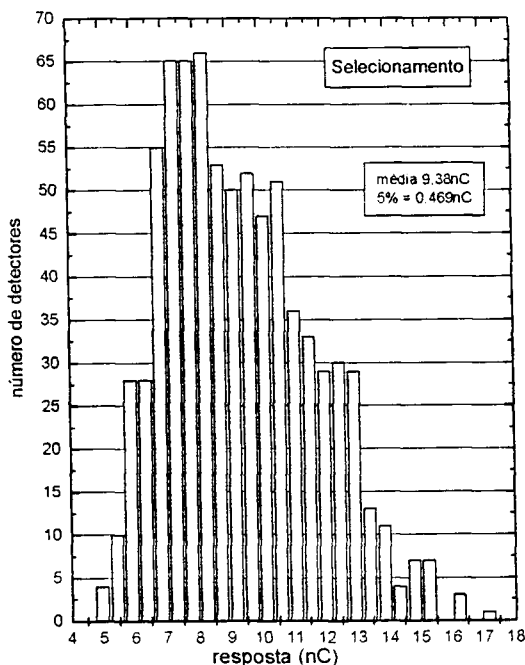


Fig. 4. Distribuição da resposta TL da amostra contendo 777 detectores irradiados com 2.0mGy com ^{60}Co .

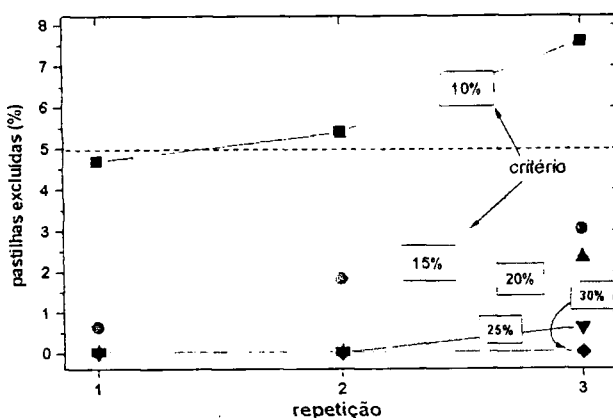


Fig. 5. Percentual de pastilhas excluídas entre cada repetição dos ensaios termoluminescente, segundo o critério indicado. Uma mesma pastilha que possua $D_{\%}$ acima deste critério não é contabilizada para o próximo ensaio/repetição. Pontilhado está o limite de 5%.

Com este procedimento, pôde-se estabelecer o nível limite de repetitividade abaixo do qual não se deve ter um número aceitável de pastilhas.

Este critério é o que chamamos de limite de repetitividade e, pela figura 5, o estabelecemos em 15%, para um nível de confiança de 95% (abaixo da curva de 5% na figura 5).

2 Limite de Detecção

Para o cálculo do Limite de Detecção de um lote de detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$, foram utilizados 90 detectores de um lote pré-selecionado.

Os detectores foram tratados termicamente pelo procedimento usual de 300 °C por 1 hora. Logo em seguida ao tratamento foram realizadas as leituras em um leitor Harshaw modelo 2000. A distribuição de resposta destas medições estão na figura 6. Uma das 90 medições foi excluída pelo critério de Chauvenet.

O Limite de Detecção, LD, é:

$$LD = \text{mediana das medições} + 2 \times (\text{desvio padrão do valor médio}) \quad (2)$$

O fator 2 advém do critério de resolução de picos (espectroscopia). A mediana, ao invés da média, é um valor mais interessante pois é menos sensível à variação de alguma das medições individuais, sendo ideal para distribuições pouco simétricas. No limite para um grande número de pastilhas a mediana iguala-se à média pois a distribuição torna-se gaussiana (normal).

O valor obtido foi $LD = 0,094 \text{ nC}$. Para obtenção deste limite de detecção na grandeza desejada, multiplica-se o valor de LD pelo fator de calibração apropriado. Assim, $LD = 4,5 \mu\text{Sv}$ (Dose Individual para fótons) ou $0,12 \mu\text{C}/\text{kg}$ (Exposição), para o lote e na época da medição.

3. CONCLUSÃO

A repetitividade como componente percentual de incerteza de medição termoluminescente com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ foi avaliada em 15%.

O limite de detecção para um dos lotes mais sensíveis foi de $4,5 \mu\text{Sv}$ (Dose Individual para fótons) ou $0,12 \mu\text{C}/\text{kg}$ (Exposição) no Harshaw modelo 2000 do LDT.

Estes valores admitem a utilização destes detectores para fins de Monitoração Individual Externa [3] e em Dosimetria Ambiental [4].

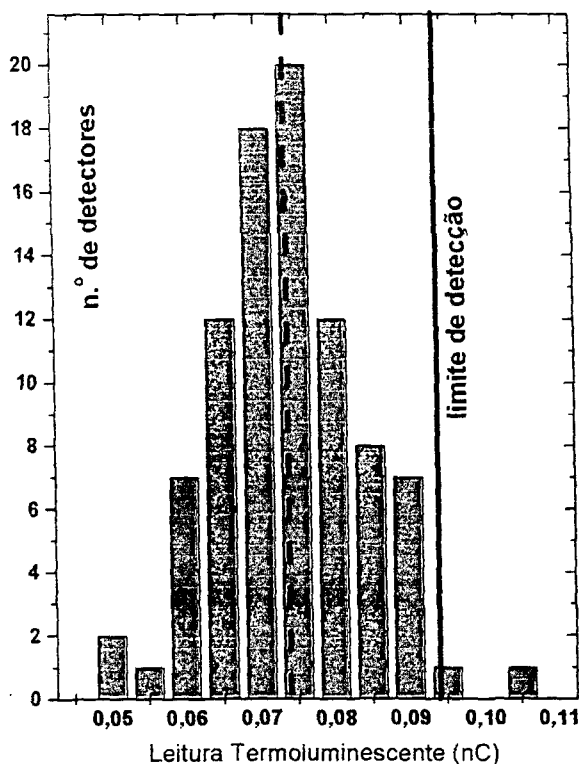


Fig.6. Distribuição de resposta termoluminescente sem irradiação. Pontilhado está a mediana.

A repetitividade apenas já condena estas pastilhas para fins de Radioterapia ou Radiodiagnóstico, que necessitam de incertezas combinadas inferiores a 5%, a menos que alterações e controles muito mais rigorosos do que os que atualmente são praticados no LDT sejam aplicados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com a colaboração do pessoal do Laboratório de Dosimetria Termoluminescente -IPEN/SP(Fátima, Osvaldo, Salomão e Eliomar).

REFERÊNCIAS

- [1] J.E. Manzoli, R.N. de Carvalho, "The Thermoluminescent Dosimeter of IPEN - a Descriptive Work of Basic Operation and Production", *International Conference on Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation*, Genebra, Suíça, de 26 à 30 de agosto de 2002, CD-ROM.
- [2] J.E. Manzoli, V.P. Campos, "Selecionamento de Detectores de Radiação Segundo sua Sensibilidade e Viabilidade para Dosimetria Termoluminescente", *Metrologia-2003*, CD-ROM.

- 3] CASMIE - Regulamentos Técnicos Referentes ao Processo de Certificação de Sistemas de Monitoração Individual Externa - IRD-RT N°001 ao 004.01/95 (1995).
- 4] P.D. Townsend, M. Moscovitch, S.W. McKeever, "Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses", *Nuclear Technology Publishing*, 1995.

Autores: Bel. Vicente de Paulo de Campos, Bel. Mirian Saori Dói, Dr. José Eduardo Manzoli, IPEN/SP- (Centro de Metrologia das Radiações; IPEN), av. Lineu Prestes, 2242, CEP 005508-000, São Paulo, BR), Fone: (0xx11) 3816-9212 Fax: 3816-9209.

ESTUDOS DA CORREÇÃO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA E ANGULAR DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE EM DOSÍMETROS PESSOAIS DE $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ - MEDIÇÕES E SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA

José Eduardo Manzoli^{1,2}
Vicente de Paulo de Campos¹
Gabriel Issa Jabra Shammam^{1,2}

¹IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária,
CEP 05508-000, São Paulo - Brasil

²Universidade São Judas Tadeu, USJT
R. Taquari, 546, Mooca, São Paulo - Brasil
jmanzoli@ipen.br

Palavras-chave: dosimetria pessoal, monitoração individual externa, termoluminescência, TLD

Abstract: Thermoluminescent phosphors have, upon heating, a light emission which depends on the radiation kind they are submitted to. This energy dependency of the thermoluminescent response becomes a problem of these materials for dosimetry purposes, because usually it is not known in advance the radiation kind the beam are composed by, and the dosemeter étalonnage is made by only one kind of radiation, normally ^{60}Co . This energy dependency is more intense in materials where effective atomic numbers are high (above 10 units of atomic mass - u.m.a.). Calcium sulphate doped with dysprosium, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($Z_{\text{eff}} \approx 15$ u.m.a.), has a marked energy dependency, overestimating the photon TL response for energies below 100 keV. This work presents results of empirical and simulated studies for the correction of this energy dependency using peculiar plumb filter geometries, which cover the TLD.

Resumo: Os materiais termoluminescentes apresentam, quando aquecidos, uma intensidade de emissão luminosa que depende do tipo de radiação de fótons a que foram submetidos. Esta dependência energética da resposta termoluminescente torna-se um problema para a utilização deste material em dosimetria, pois normalmente não se conhece previamente de quais radiações o feixe é composto, e a calibração do dosímetro é realizada com uma única radiação, normalmente de ^{60}Co . Esta dependência energética é mais acentuada em materiais com números atômicos efetivos elevados (acima de 10 unidades de massa atômica - u.m.a.). O sulfato de cálcio dopado com disprósio, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($Z_{\text{efetivo}} \approx 15$ u.m.a.), apresenta uma dependência energética acentuada, superestimando a resposta TL para fótons de energia abaixo de 100 keV. Este trabalho apresenta resultados de estudos experimentais e por simulação computacional para a correção desta dependência energética utilizando geometrias de filtros de chumbo peculiares, envolvendo o detector TL.

Introdução

Os materiais termoluminescentes apresentam, quando aquecidos, uma emissão luminosa que depende do tipo de radiação de fótons a que foram submetidos [1,2]. Esta dependência energética da resposta termoluminescente torna-se um problema para a utilização destes materiais em dosimetria, pois normalmente não se conhece previamente de quais tipos de radiações o feixe é composto, e a calibração do dosímetro é realizada com uma única radiação, normalmente de ^{60}Co .

Esta dependência energética é mais acentuada em intervalos de energia de fótons abaixo de 100 keV e em materiais com números atômicos efetivos elevados (acima de 10 unidades de massa atômica - u.m.a.), pois o efeito fotoelétrico apresenta forte dependência como o número atômico e é o principal efeito nas interações da matéria com fótons de energias abaixo de 100 keV [3,4]. O fato de possuir um número atômico efetivo baixo é uma das causas do sucesso de materiais como o fluoreto de lítio, LiF ($Z_{\text{efetivo}} \approx 7$ u.m.a.), como dosímetro termoluminescente mais utilizado mundialmente.

O sulfato de cálcio dopado com disprósio, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($Z_{\text{efetivo}} \approx 15$ u.m.a.), apresenta uma dependência energética acentuada, vide Figura 1.

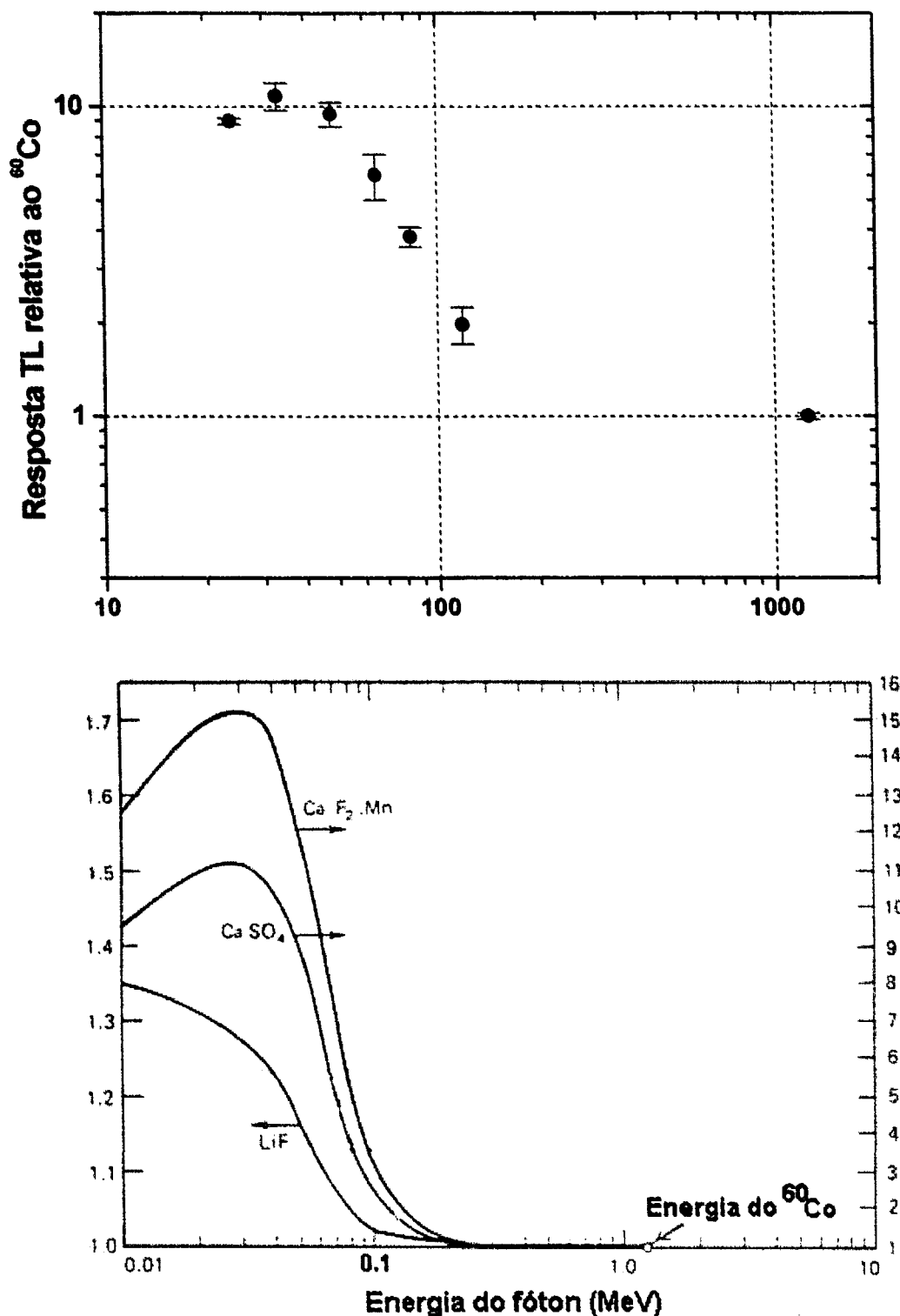


Figura 1: Dependência energética da resposta TL. Acima, resultados TL de pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}/\text{PTFE}$ produzidas pelo Laboratório de Materiais Termoluminescentes, LMT-CMR/IPEN, mensuradas no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente, LDT-CMR/IPEN, e irradiados no Centro Regional de Ciências Nucleares, CRCN/CNEN - Pernambuco. Abaixo, gráfico escaneado da ref.[1] mostrando respostas comparativas TL, relativas ao ^{60}Co , sem filtros, de vários fósforos.

Para aplicações dosimétricas, a dependência energética pode ser corrigida com a interposição de filtros. Observando-se curvas de dependência energética genéricas, como as da Figura 1, nota-se que ocorre um aumento do sinal TL se a energia da radiação for menor. É notório, também, que radiações de energias mais baixas apresentam uma atenuação maior pelos filtros. Assim, embora a radiação com energias mais baixas gere um sinal TL maior, ao incidir sobre o filtro ela é atenuada de forma mais efetiva e a quantidade de fótons que atingirá o fósforo será menor. A *geometria* do filtro permite que esta atenuação compense ou corrija a dependência energética.

Neste trabalho os autores avaliaram a geometria de filtro de chumbo chamada "TLDi", atualmente em uso pelo LDT. Também simularam numericamente as respostas TL de uma geometria de filtro de chumbo com diversas espessuras e larguras, doravante referenciado como "TLDe". O filtro TLDe com dimensões otimizadas pela simulação foi, então, produzido e a sua resposta TL foi mensurada, a qual demonstrou uma diminuição na dependência energética do sulfato de cálcio, mesmo para ângulos de incidência da radiação próximos a 90°.

Materiais e Métodos

Os detectores termoluminescentes utilizados possuem a forma de discos de 6 mm de diâmetro por 1 mm de espessura e são compostos que contêm cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ [5] numa matriz de PTFE, sendo produzidos no próprio IPEN. Um corte transversal destes discos, também chamados pastilhas ou detectores, é mostrado na micrografia de varredura da Figura 2.

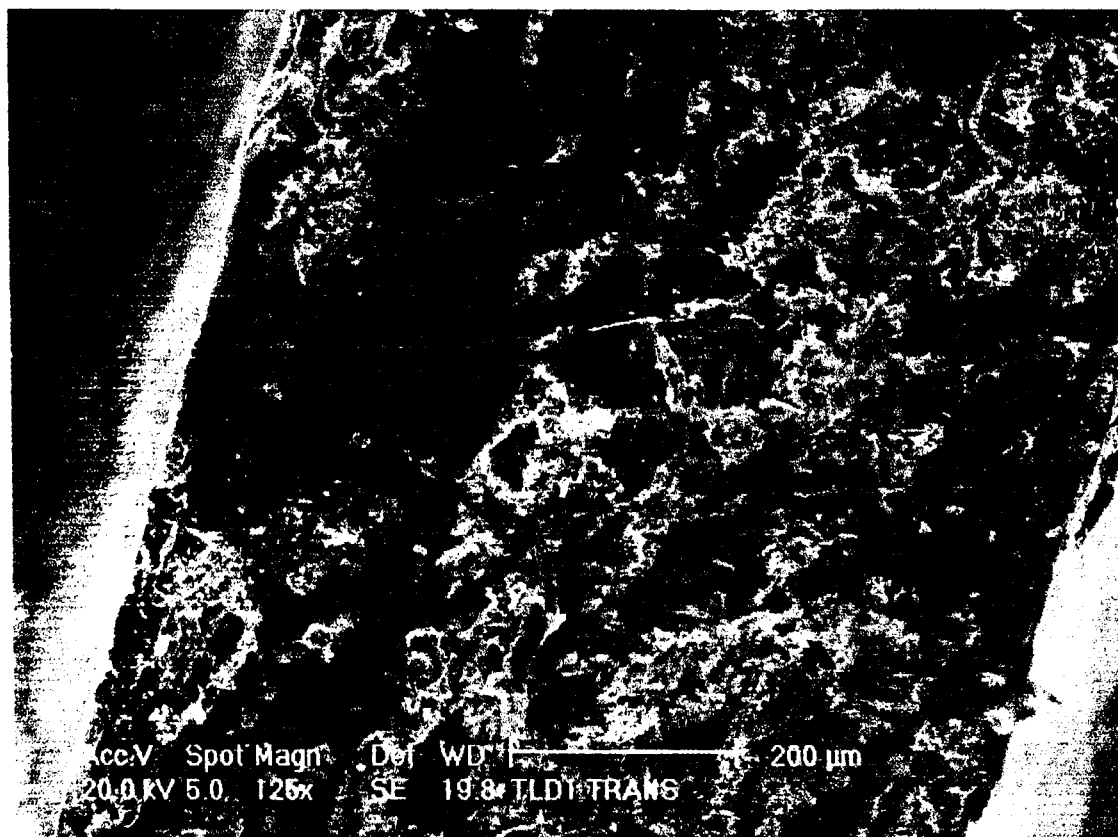


Figura 2: Micrografia SEM de um corte transversal da pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ -PTFE. O polímero PTFE apresenta-se escuro e as regiões claras são cristais de sulfato de cálcio.

As leituras termoluminescentes foram realizadas em leitores TL Harshaw, modelos 5500 e 2000, do LDT-IPEN. No modelo 5500, a taxa de aquecimento foi de 12°C/s com *pre-heat* de 150°C por 10 s e tempo total

de aquisição de 23 s. No modelo 2000, a taxa de aquecimento é $9,5^{\circ}\text{C/s}$. com integração da curva de emissão de 120°C a 230°C .

A geometria de filtro para compensação da dependência energética dos dosímetros TLDi apresenta o filtro de chumbo ilustrado na Figura 3 [5,6].

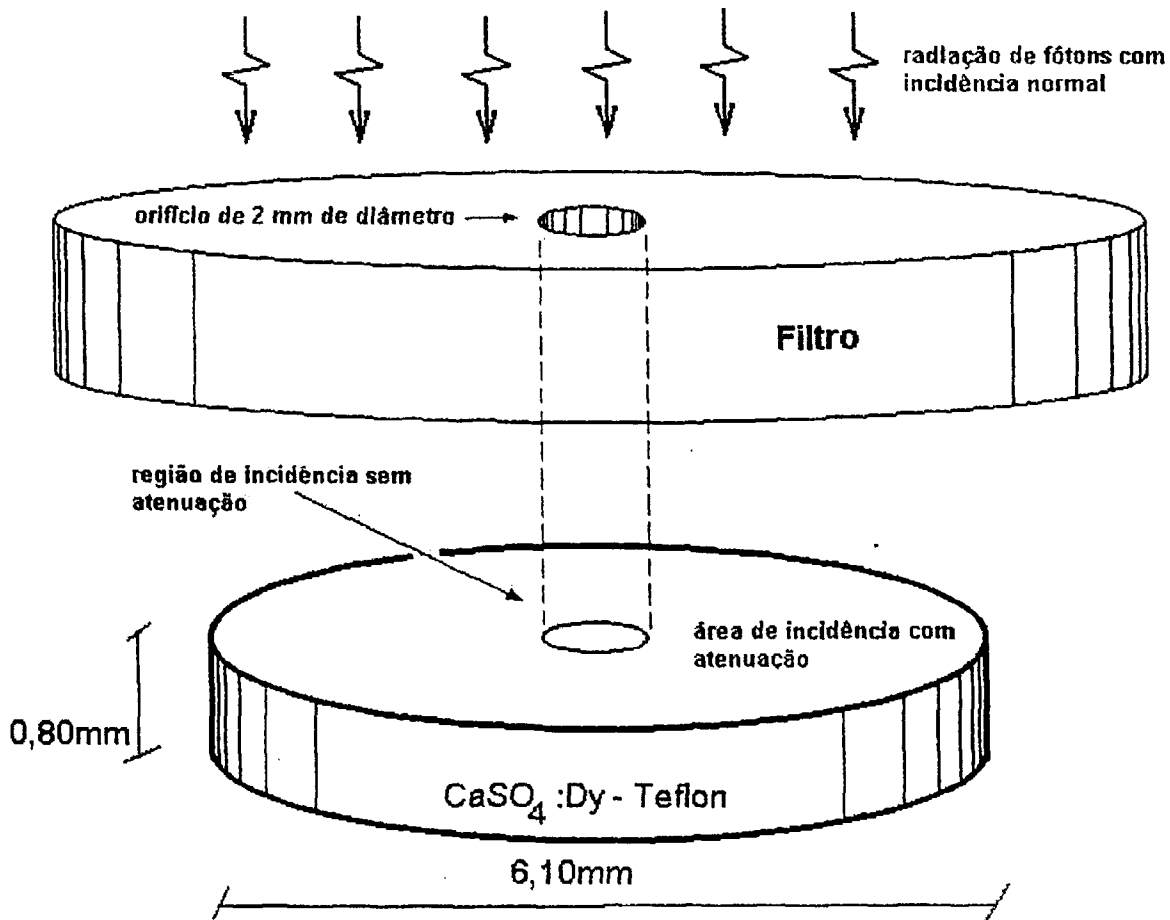


Figura 3: Filtro de chumbo TLDi e pastilha termoluminescente utilizados no IPEN. A área de incidência com atenuação emite luz, no processo termoluminescente, menos intensa que a região de incidência sem atenuação.

A compensação ocorre para irradiações ortogonais ao filtro (normais). Após a irradiação, durante o processo de avaliação termoluminescente, a razão entre as intensidades luminosas emitidas pela região de incidência *sem atenuação* e a área de incidência *com atenuação* aproxima-se de 1 quando a energia da radiação aumenta. Quando a energia diminui, esta razão aumenta bastante, de forma que para qualquer energia, o total de luminosidade, emitida pela área "com" mais a emitida pela área "sem" atenuação, permanece quase constante.

Na Figura 4 é apresentada uma representação esquemática do filtro de chumbo TLDc [7] envolvendo a pastilha de CaSO₄:Dy-PTFE.

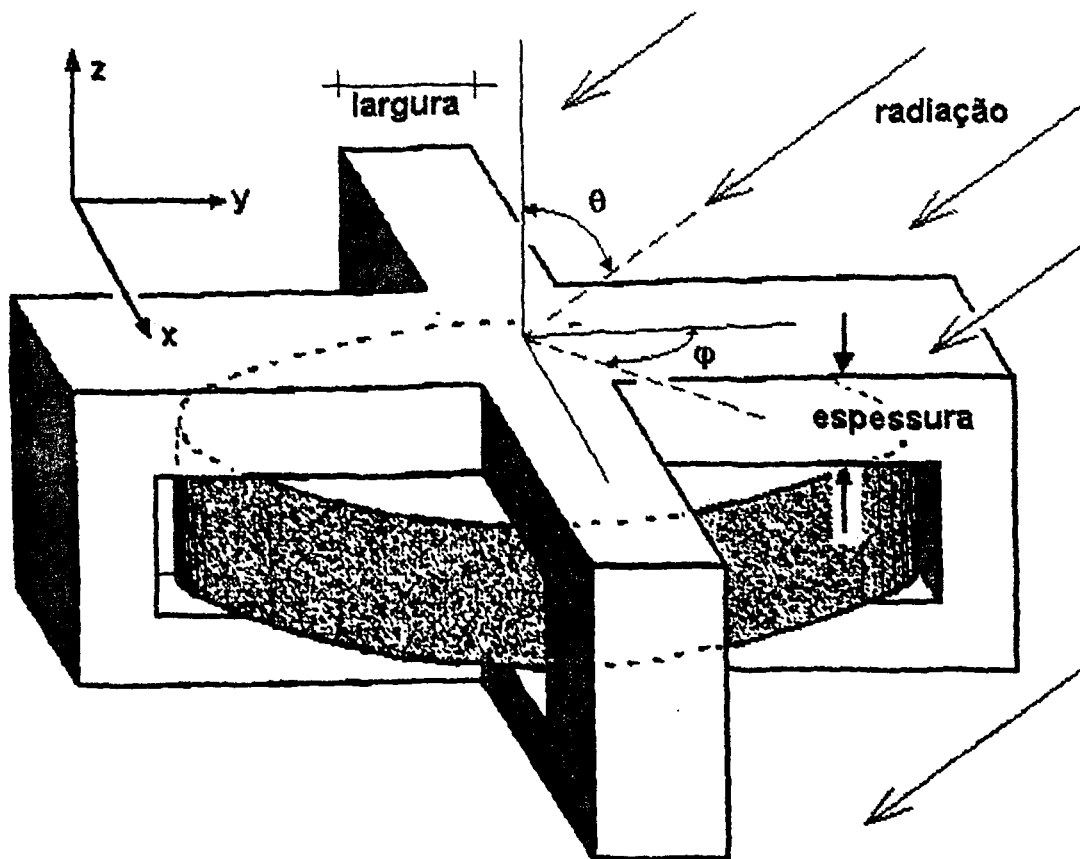


Figura 4: Filtro TLDc envolvendo a pastilha termoluminescente de $\text{CaSO}_4:\text{Dy-PTFE}$. A espessura e a largura, bem como o ângulo θ e o ângulo ϕ , foram variados na simulação numérica computacional.

Utilizou-se o cálculo numérico realizado através de simulação computacional para calcular as dimensões do filtro de chumbo proposto, ou seja, sua largura e sua espessura ideais para minimizar a dependência energética e angular da resposta TL. O filtro e a pastilha ocupam um espaço que foi discretizado numa malha de $36 \times 36 \times 12$ pontos, com a propagação da radiação através de diferenças finitas nesta malha.

Esta simulação, compilada em FORTRAN (compilador livre Force versão 2.0.7 desenvolvido por Guilherme Luiz Lepsch Guedes: www.projetoforce.hpg.com.br), é semi-empírica pois os vetores/funções de entrada são ajustes das medições experimentais da dependência energética dos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ sem filtros. Além disso, valores dos coeficientes de atenuação do chumbo para os diferentes fótons de incidência são também parâmetros de entrada. Não foram incluídos efeitos de "build up" [4].

Na simulação variou-se a energia do fóton de incidência (suposto mono-energético), seus ângulos de incidência, além da largura e da espessura do filtro.

Resultados e Discussões

Resposta TL do filtro TLDi

A curva de dependência energética com e sem o filtro TLDi é apresentada na Figura 5.

Observa-se que, mesmo sob esta irradiação normal, a correção devida ao TLDi não é muito eficaz. A correção é nula sob ângulo de 90° , pois a radiação não passa pelo filtro.

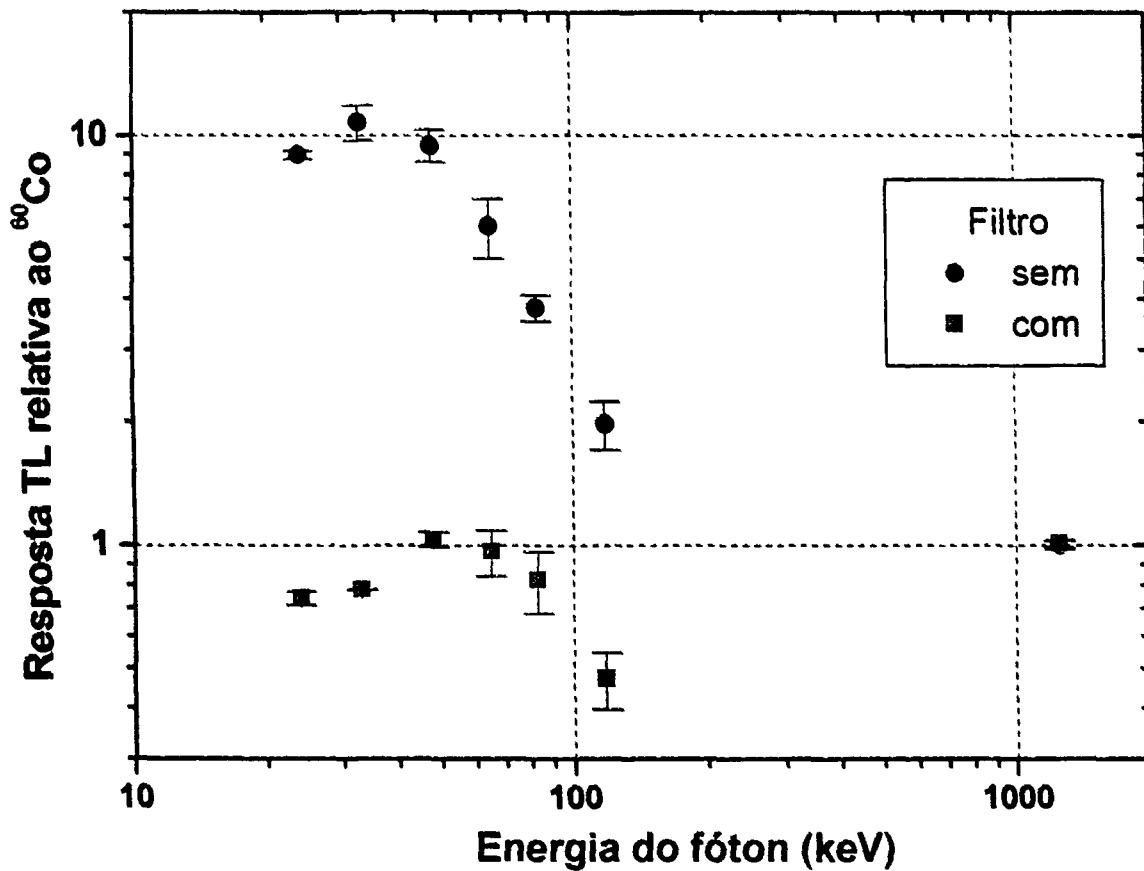


Figura 5: Dependência energética da resposta TL das pastilhas de CaSO₄:Dy/PTFE produzidas pelo LMT-CMR/IPEN com (círculo) e sem (quadrado) a filtração TLDi apresentada na Figura 3. São irradiações sob ângulo normal. As barras representam a incerteza de medição padrão combinada.

Resultados das Simulações

Para os cálculos computacionais, os parâmetros de entrada foram: energia do fóton, ângulo θ e ângulo ϕ , largura e espessura dos braços do filtro de geometria TLDc, como indicados na Figura 4. Os valores utilizados constam na Tabela 1.

Tabela 1. Valores do fóton, dos ângulos θ e ϕ , da largura e da espessura do filtro utilizados na simulação.

fóton (keV)	ângulo teta (θ)	ângulo fi (ϕ)	largura (mm)	espessura (mm)
33	0°	0°	4,09	1,36
48	15°	45°	3,5	1,09
118	30°	22,5°	3,0	0,82
1250	45°		2,45	0,54
	60°		1,9	0,27
	90°		1,36	
			0,82	
			0,27	

Assim, há 2880 respostas TL simuladas, combinação dos vários valores da Tabela 1. Estes valores foram analisados colocando-os num banco de dados Access e selecionando-se as respostas TL desejadas. Para correção da dependência energética sob quaisquer ângulos, a resposta relativa àquela da pastilha sem filtro irradiada com feixes de fótons do ^{60}Co deve estar entre 0,5 e 1,5; intervalo aceitável para a "curva trombeta" [8,9].

A espessura e a largura que obtiveram maior número de resultados TL calculados dentro deste intervalo são: largura de 3 mm e espessura de 1,1 mm. Para estas dimensões e para os valores extremos (maiores e menores) de espessura e largura da Tabela 1, os gráficos da Figura 6 apresentam resultados simulados sob as várias energias e ângulos θ de incidência dos fótons.

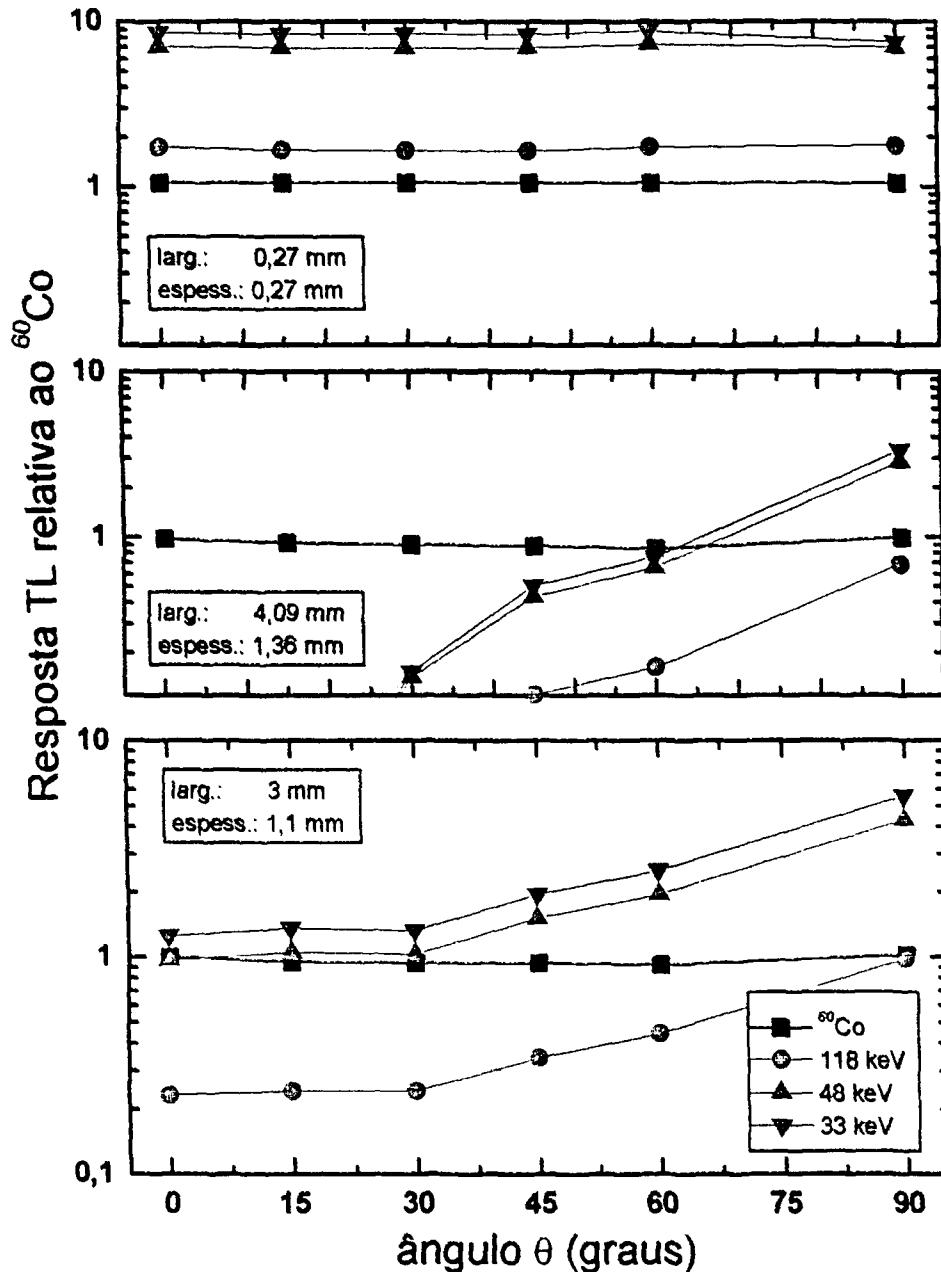


Figura 6: Resultados simulados da resposta TL relativas à do ^{60}Co sem filtração para três geometrias distintas do filtro TLDC, sob ângulo $\varphi = 0^\circ$. Acima: menores espessuras e larguras simuladas. No meio: maiores larguras e espessuras simuladas. Abaixo: largura e espessura que mais obtiveram respostas TL entre 0,5 e 1,5.

Para filtros muito finos e pouco espessos (Figura 6, largura e espessura iguais a 0,27 mm) não há praticamente filtração ou atenuação, o que faz com que a simulação acuse os resultados muito próximos daqueles sem filtro, como os da Figura 1.

Para filtros espessos e grossos (4,09x1,36 mm de largura e espessura, respectivamente), ocorre uma blindagem da pastilha para fótons de baixa energia, exceto para incidências mais inclinadas ($\theta > 45^\circ$). O fóton de energia 118 keV, embora maior que o de 33 keV e o de 48 keV, produz um sinal TL mais fraco e apresenta um coeficiente de atenuação não tão inferior.

A largura de 3 mm junto com a espessura de 1,1 mm, no TLDC, apresentou-se como a combinação para a qual maior número de valores de resposta simulada estão mais próximos daquelas respostas do ^{60}Co sem filtração (com o qual é realizada a calibração dos dosímetros). Mesmo simulando para os demais ângulos φ , este comportamento continuou sendo observado.

Resposta TL do filtro TLDC (comparação com dosímetros utilizando TLDi e com a Simulação)

Como a simulação apontou a largura de 3 mm e a espessura de 1,1 mm como as mais indicadas dentre as estudadas para a correção da dependência energética sob quaisquer ângulos, para o filtro de geometria TLDC, seus protótipos foram assim produzidos. Detectores previamente selecionados [10, 11] foram irradiados dentro dos filtros TLDC e conjuntamente foram irradiados detectores dentro de dosímetros pessoais baseados na geometria TLDi. Os dosímetros pessoais utilizam três detectores, um deles com a geometria TLDi, e um algoritmo para correção da dependência energética baseado nas três respostas TL [12].

As irradiações com ^{60}Co apresentaram os resultados da Figura 7.

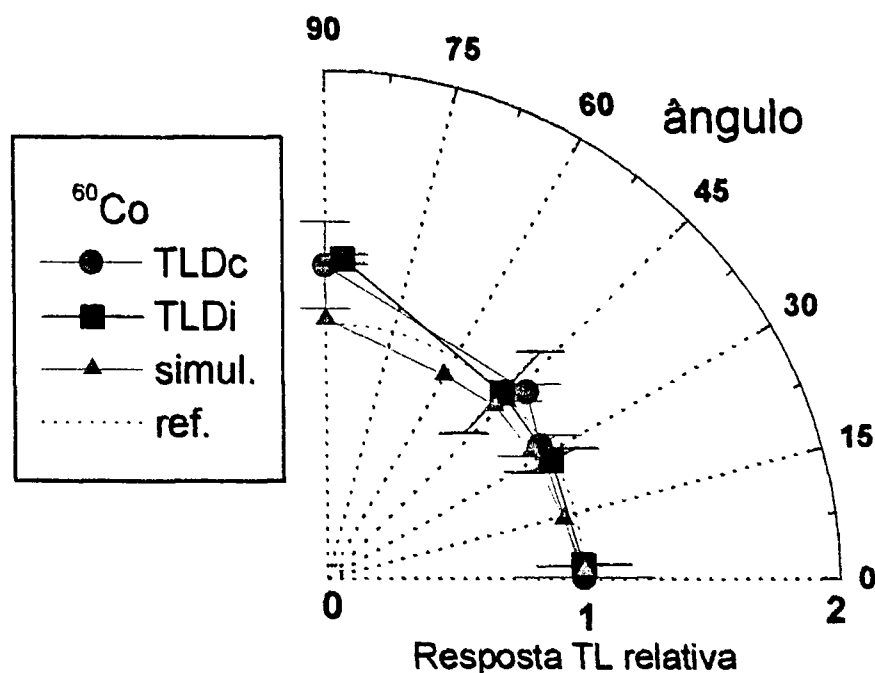


Figura 7: Respostas TL relativas à do ^{60}Co sem filtração para vários ângulos de incidência, após irradiação com o próprio ^{60}Co . As geometrias TLDC e TLDi, bem como a simulação do TLDC, apresentaram resultados equivalentes. A referência, ref., de resposta relativa igual a 1, representa o valor idealizado, de perfeita correção da dependência angular.

Os fótons de energia 1250 keV, nas irradiações com ^{60}Co , não apresentam atenuação considerável nas geometrias TLDc ou TLDi. Assim, tais geometrias apresentam-se praticamente transparentes a estes fótons, e as respostas TL dos detectores sob estas filtrações apresentam-se equivalentes sob qualquer ângulo de incidência. Estes resultados são muito satisfatórios, quanto à dependência energética e angular, pois estão próximos da linha ref. (resposta relativa igual a 1).

Os resultados das avaliações TL após irradiações com feixes de raios-X de espectro largo (qualidade RQA10) de energias próximas à 80 keV são apresentados na Figura 8.

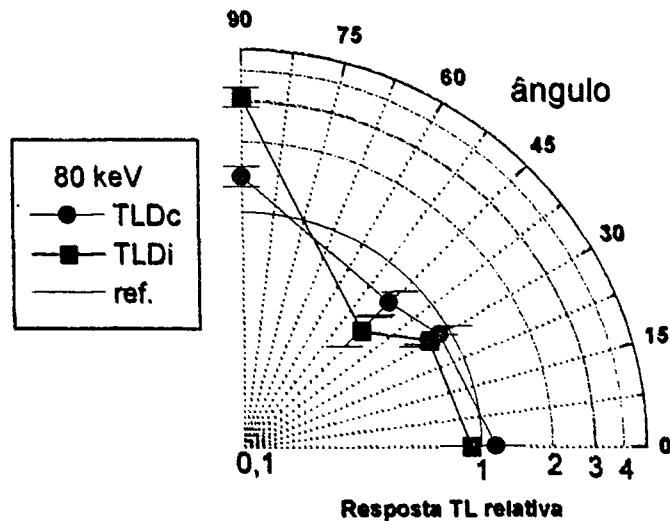


Figura 8: Respostas TL relativas à do ^{60}Co sem filtração, após irradiação com feixes de raios-X de 80 keV (espectro largo) para vários ângulos de incidência. Não foram simuladas respostas para esta energia de fóton.

Sob 80 keV, a geometria TLDc mostrou-se capaz de produzir resposta TL mais próxima do valor desejado (ref. ou valor relativo igual a 1) do que TLDi. Os valores de TLDc sob 30° e 45° não foram tão subestimados quanto para TLDi. Os resultados para irradiações com feixes de raios-X de qualidade ISO-N40 (estreito), próximas à 33 keV, são apresentados na Figura 9.

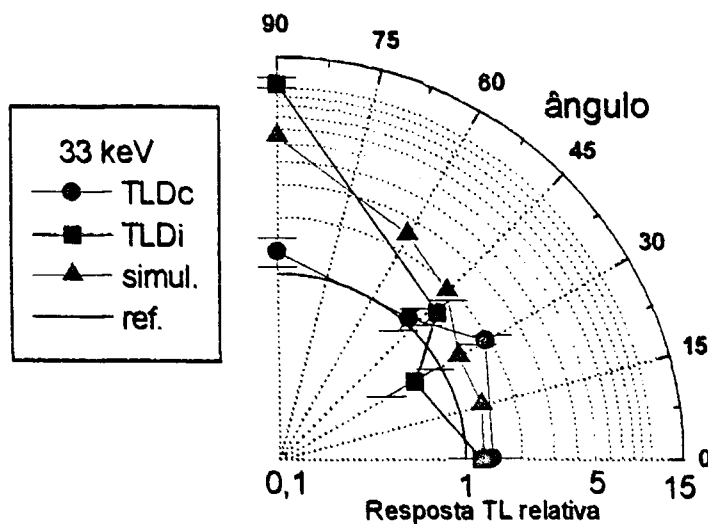


Figura 9: Respostas TL relativas à do ^{60}Co sem filtração, após irradiação com feixes de raios-X de 33 keV (espectro estreito) para vários ângulos de incidência. A simulação para a geometria TLDc apresentou resultados menos desejáveis do que o comportamento empírico.

Nesta energia de 33 keV, o resultado melhor nas medições com TLDC do que com a própria simulação demonstram a presença de efeitos que deverão ser inseridos no algoritmo de simulação, como espalhamento e build-up, para que a simulação possa ser validada nestas energias menores. TLDC apresenta resultados com menor dependência angular do que TLDi.

Conclusões e Perspectivas

A geometria de filtro TLDC permite uma correção razoável da dependência energética para irradiações sob qualquer ângulo de incidência. Estes estudos mostraram que o filtro TLDC apresenta resultados mais satisfatórios, se comparados com os do dosímetro com geometria TLDi. Para aproximar as respostas TL ainda mais do valor ideal (resposta relativa igual a 1), há necessidade de busca por outras geometrias, pesquisa que já está em curso [14].

O procedimento de cálculo, baseado em simulação computacional por diferenças finitas e parametrização semi-empírica, mostrou-se uma ferramenta simples e muito útil na busca da conformação topológica do filtro. Próximos passos na sua implementação serão a inclusão dos efeitos de espalhamento e build-up [14].

O procedimento utilizado neste estudo, buscando a correção da dependência energética e angular da resposta TL, pode ser estendido para outros materiais termoluminescentes.

Referências Bibliográficas

- [1] "Applied Thermoluminescence Dosimetry" - Oberhofer, M. and Scharmann, A. - Adam Hilger Ltd, Bristol, 1981.
- [2] "Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses" - McKeever, S.W.S.; Moscovitch, M.; Townsend, P.D. - Nuclear Technology Publishing, Ashton, Kent, 1995.
- [3] "The Physics of Radiology" - Johns, H.E. e Cunningham, J.R. - Charles C Thomas, 4.^a edição, Springfield, Illinois, 1983.
- [4] "Radiation Detection and Measurements" - Knoll, G.F. - John Wiley & Sons, 2.^a edição, New York, 1989.
- [5] "Development of a CaSO₄:Dy Dosimeter". Campos, L.L. - Meeting on Radiation Protection Dosimetry, Proceedings: vol.1, pgs. 2-4, Itaipava, RJ, Brasil.
- [6] "The Thermoluminescent Dosimeter of IPEN - a Descriptive Work of Basic Operation and Production". José Eduardo Manzoli and Ricardo Nunes de Carvalho. International Conference on Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation, Geneva, Switzerland, August 26-30, 2002. (CD-ROM).
- [7] "Desenvolvimento e Avaliação de um Novo Porta Detector / Filtro para Monitoramento Termoluminescente". Dissertação de Mestrado em Técnicas Nucleares e Aplicações (TNA-IPEN), aluno: Campos, V.P., orientador J. E. Manzoli, a ser defendida em setembro de 2005.
- [8] International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1-3) (1991).
- [9] International Commission on Radiological Protection. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75. Ann. ICRP 27(1) (1997).
- [10] "Selecionamento de Detectores de Radiação Segundo sua Sensibilidade e Viabilidade para Dosimetria Termoluminescente", Manzoli, J.E.; Campos, V.P.. In: METROLOGIA-2003 – METROLOGIA PARA A VIDA, SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA (SBM), Setembro 05–09, 2003, Recife, Pernambuco - BRASIL. CD-ROM.
- [11] "Avaliação do Limite de Repetitividade e de Detecção de Dosímetros de CaSO₄:Dy", Manzoli, J.E.; Campos, V.P.; Doi, M.S.. In: METROSUL IV – IV Congresso Latino-Americano de Metrologia "A METROLOGIA E A COMPETITIVIDADE NO MERCADO GLOBALIZADO", November 09-12, 2004. Foz do Iguaçu, Paraná – BRASIL. CD-ROM.

- [12] "Air Kerma and Photon Energy Calculation Algorithm Using Only Lead Filters for CaSO₄:Dy Phosphor", José Eduardo Manzoli. A ser submetido para publicação.
- [13] "Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual - Critérios e Condições", IRD RT N.o 002.01/95, item 4.5.10.
- [14] "Simulação Semi-empírica da Resposta Termoluminescente sob Diferentes Geometrias de Filtro" - Plano de Trabalho para projeto de mestrado em Técnicas Nucleares e Aplicações (TNA-IPEN), aluno: Gabriel Issa Shammam, orientador: José Eduardo Manzoli, início em maio de 2005.