



**ESTUDO COMPARATIVO DE DOSÍMETROS FOTOGRÁFICOS,  
TERMOLUMINESCENTES E RADIOFOTOLUMINESCENTES**

**Sudernaique F. Deus**

**DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 018**

**ABRIL/1976**

**ESTUDO COMPARATIVO DE DOSÍMETROS FOTOGRÁFICOS  
TERMOLUMINESCENTES E RADIOFOTOLUMINESCENTES**

Sudernique F. Deus

Dissertação para obtenção do Título de "Mestre em Ciências" - Orientador Prof. Dr. Shigeo Watanabe. Apresentada e defendida em 22 de dezembro de 1971, à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

APROVADA PARA PUBLICAÇÃO EM JANEIRO/1976

**CONSELHO DELIBERATIVO**

**MEMBROS**

Klaus Reinach - Presidente  
Roberto D'Utra Vaz  
Helcio Modesto da Costa  
Ivano Humbert Marchesi  
Admar Cervellini

**PARTICIPANTES**

Regina Elisabete Azevedo Beretta  
Flávio Gori

**SUPERINTENDENTE**

Rômulo Ribeiro Pieroni

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)  
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"  
SÃO PAULO - BRASIL

## ÍNDICE

Página

### CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO .....	1
A) – Filmes Dosimétricos .....	2
B) – Dosímetros Termoluminescentes .....	3
C) – Dosímetros Radiofotoluminescentes .....	4

### CAPÍTULO II

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS .....	5
A) – Materiais .....	5
B) – Equipamentos e Métodos .....	7
1) – Dosimetria Fotográfica .....	7
a) – Equipamentos .....	7
b) – Processamento dos Filmes e Leitura .....	7
2) – Dosimetria Termoluminescente .....	8
a) – Equipamentos .....	8
b) – Método de Leitura da TL .....	8
c) – Tratamento Térmico dos Materiais TL .....	9
3) – Dosimetria Radiofotoluminescente .....	10
a) – Equipamentos .....	10
b) – Tratamento Térmico dos Vidros RFL .....	10
c) – Método de Limpeza dos Vidros RFL .....	10
d) – Método de Leitura dos Vidros RFL .....	11

### CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS .....	13
PARTE A) – <i>Experiência em Condições Conhecidas de Irradiação e de Ambiente</i> .....	13
1) – <i>Determinação das Respostas de Diferentes Tipos de Materiais Dosimétricos em Função da Exposição à Radiação-Gama do <sup>60</sup>Co</i> .....	13
a) – <i>Irradiações</i> .....	13
b) – <i>Resultados</i> .....	13
– <i>Filmes</i> .....	13
– <i>Dosímetros Termoluminescentes</i> .....	17

TLD-100 .....	17
Dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .....	17
Dosímetros de LiF Sinterizados a Quente (Hot Press) .....	17
– Dosímetros Radiofotoluminescentes (RFL) .....	22
Vidros RFL tipo FD-P6-1 .....	22
Vidros RFL tipo FD-P8-1 .....	22
2) – Determinação das Respostas de Diferentes Materiais em Função da Energia da Radiação .....	22
a) – Irradiações com Raios-X .....	22
b) – Irradiação com $^{137}\text{Cs}$ .....	28
c) – Irradiação com $^{60}\text{Co}$ .....	28
d) – Irradiações Repetidas .....	28
e) – Resultados .....	28
– Filmes .....	28
– TLD-100 .....	28
– $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .....	29
– Hot Press .....	29
– Vidros RFL tipo FD-P6-1 .....	29
– Vidros RFL tipo FD-P8-1 Usados com o Porta-Dosímetro BD-2 da Toshiba ..	29
3) – Verificação da Linearidade das Respostas dos Dosímetros em Função da Energia da Radiação .....	29
4) – Determinação do Poder de Detetabilidade de Cada um dos Diferentes Dosímetros para a Energia dos Raios-Gama do $^{60}\text{Co}$ .....	34
5) – Flutuação na Reprodutibilidade dos Diferentes Tipos de Dosímetros, para a Energia dos Raios-Gama do $^{60}\text{Co}$ .....	41
PARTE B) – Experiência em Condições não Controladas – Monitoração Pessoal .....	45
1) – Finalidade e Procedimentos .....	45
2) – Determinação da Energia Efetiva das Radiações .....	45
a) – Pelos Filmes .....	45
b) – Pelos Materiais TL .....	48
3) – Resultados .....	51
a) – Comportamento Relativo entre os Dosímetros .....	51
b) – Comparação das Respostas dos Diferentes Dosímetros com a Resposta do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .....	52
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

# ESTUDO COMPARATIVO DE DOSÍMETROS FOTOGRÁFICOS, TERMOLUMINESCENTES E RADIOFOTOLUMINESCENTES

Sudernaique F. Deus

## RESUMO

Foram comparadas as respostas de três diferentes sistemas dosimétricos, quais sejam, fotográfico, termoluminescente (TL) e radiofotoluminescente (RFL). A comparação foi dividida em duas partes. Na primeira, as condições de irradiação eram conhecidas (exposição, incidência normal, energia da radiação), e o ambiente controlado (temperatura  $\sim 27^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa  $\sim 70\%$ ). Nessas condições estudou-se a dependência das respostas dos diferentes dosímetros em função da exposição e da energia da radiação, fez-se uma verificação da linearidade das respostas em função da energia, determinou-se o poder de detetabilidade e a reprodutibilidade dos dosímetros. Verificou-se que as respostas em função da exposição para 37 KeVef e para 1 MeV são lineares na região de interesse da dosimetria pessoal rotineira, para todos os dosímetros, exceção feita para os filmes.

Apesar dos filmes dosimétricos não reponderem linearmente à exposição, a razão entre as respostas em 37 KeVef e em 1 MeV independe da exposição, o que permite determinar um fator de correção para a energia da radiação. Tal correção é usualmente necessária uma vez que as respostas de todos os dosímetros são fortemente dependentes da energia, com exceção dos dosímetros de LiF. Os materiais TL possuem maior poder de detetabilidade que os RFL e os filmes, e a reprodutibilidade, para baixas exposições, é maior para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , vindo em seguida, o "hot press", o TLD-100, os vidros RFL e os filmes, nessa ordem.

> Na segunda parte, foi feita uma verificação das re-postas relativas dos dosímetros em condições práticas de uso, isto é, na monitoração pessoal, onde as condições de irradiação e de ambiente são as mais variadas possíveis. Como foi verificado que o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  é o mais sensível e reprodutível, fez-se uma comparação entre as leituras dos outros dosímetros tomando-se o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  como referência. Como resultado, 20 entre 29 dosímetros de TLD-100 concordam com as leituras do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  dentro de 30%, 13 dos 29 vidros RFL concordam também dentro de 30%, enquanto que somente 3 entre 29 filmes tiveram esse comportamento.

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Alguns anos após a descoberta das radiações ionizantes verificou-se que os organismos vivos em geral e em particular o organismo humano, quando expostos a essas radiações ficam sujeitos a efeitos biológicos indesejáveis, tais como, dermatites, depilação, esterilização, anemia, câncer, etc. Como o aparecimento desses efeitos depende da dose de radiação recebida pelo organismo, veio a necessidade de se controlar ou medir esse dose.

Dai surgiram os dosímetros que são dispositivos que têm uma propriedade que permite a medida da dose absorvida, a qual é definida em termos da energia absorvida pelo dosímetro, e esta, por sua vez é uma função da exposição recebida. Por energia absorvida<sup>(1)</sup>  $\Delta E_D$  entende-se como sendo a soma  $\Delta E_g$  das energias de todas as partículas ionizantes que entram, durante um certo intervalo de tempo, num pequeno volume de material de massa  $\Delta m$ , centrado no ponto onde queremos saber a dose absorvida, menos a soma  $\Delta E_g$  das energias de todas as partículas ionizantes que saem desse volume, e menos ainda a energia  $\Delta E_R$  equivalente a qualquer aumento na massa de repouso devido às interações das partículas dentro do volume considerado. Portanto:

$$\Delta E_D = \Delta E_E + \Delta E_S + \Delta E_R$$

Define-se, então, dose absorvida como sendo

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}$$

A unidade de dose absorvida é o rad. 1 rad = 100 erg/g de material.

O termo exposição<sup>(2)</sup> (X) é usado para radiação-X ou gama, e é o quociente de  $\Delta Q$  por  $\Delta m$ , onde  $\Delta Q$  é a soma das cargas elétricas de todos os íons, de um mesmo sinal, produzidos no ar quando todos os elétrons (négatron e pósitrons) liberados pelos fótons num elemento de volume de ar cuja massa é  $\Delta m$ , são completamente freiados no ar. Portanto:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

A unidade de exposição é o roentgen (R). 1 R =  $2,58 \cdot 10^{-4}$  C/kg.

O dosímetro mais usado em todo o mundo, na atualidade, para monitoração pessoal, é o filme fotográfico, seguindo-se a câmara de ionização ou dosímetro de bolso. Com o crescente avanço no campo das aplicações das radiações direta ou indiretamente ionizantes, tanto na medicina como na indústria, na agricultura, em pesquisa propriamente dita, tornou-se necessário a procura de novos métodos de detecção capazes de medir com maior precisão e facilidade, as exposições à que estão sujeitas as pessoas diretamente ligadas a trabalhos com radiação.

Nos primórdios deste século foi observado que certos materiais quando aquecidos emitiam luz fluorescente após serem irradiados com raios-X ou gama. A esse fenômeno foi dado o nome de Termoluminescência (TL). O seu uso para fins dosimétricos só foi sugerido depois da segunda guerra mundial, isto é, em 1950, quando então foram iniciadas pesquisas nesse sentido.

Em 1912 foi observado<sup>(3)</sup> também que numerosos compostos inorgânicos apresentavam alterações no seu espectro de luminescência quando excitados com luz ultravioleta após serem irradiados com raios beta ou gama. Mais tarde foi verificado que os raios-X também produzem tais efeitos. P. zibram, em 1922, introduziu o termo Radiofotoluminescência que, depois da redefinição em 1925, significa que um material que não é luminescente quando irradiado com luz visível ou ultravioleta, adquire essa propriedade após um tratamento com radiação ionizante. A partir de 1951 esse termo ficou restringido à criação de novos centros luminescentes quasi-estáveis que são muito pouco destruídos pela radiação ultravioleta que os excita.

Esse efeito de radiofotoluminescência passou então a ser usado em dosimetria, pois, foi verificado que a intensidade do mesmo é uma função da exposição recebida pelo material.

A seguir será dada a descrição e o princípio de detecção dos filmes dosimétricos, dos dosímetros termoluminescentes e radiofotoluminescentes.

#### A) - Filmes Dosimétricos<sup>(4,5)</sup>

Os filmes dosimétricos são constituídos de uma película de acetil celulose sobre a qual é depositada a emulsão fotográfica que é a parte sensível do mesmo. Essa emulsão é composta de

grãos de brometo de prata dispersos em gelatina, e de uma pequena quantidade de impurezas como ouro, enxofre e outros metais, os quais são incorporados dentro do cristal e sobre sua superfície e que exercem um papel muito importante na formação da imagem latente.

A incidência de luz ou radiação ionizante sobre a emulsão, provoca a formação da imagem latente a qual consiste de aglomerados de um ou mais átomos de prata, sobre a superfície dos grãos de AgBr e no seu interior, os quais vão catalizar, durante o processo de revelação, a redução química dos demais íons de prata no grão, produzindo, no filme, um certo enegrecimento. Esse enegrecimento é medido em termos de densidade ótica, a qual é definida como  $\log \frac{I_0}{I}$  onde  $I_0$  é a intensidade da luz incidente e  $I$  a intensidade da luz transmitida através do filme. A densidade ótica está relacionada ao número de grãos revelados, e este é, por sua vez, uma função da exposição. Portanto a densidade ótica é uma função da exposição.

#### B) – Dosímetros Termoluminescentes<sup>(6)</sup>

Os dosímetros termoluminescentes são compostos principalmente de sais halogenetos, sulfatos, boratos de metais alcalinos e alcalinos terrosos com impurezas especiais. O princípio básico de termoluminescência é o seguinte:

Quando um cristal iônico é exposto à radiação ionizante, os elétrons que são liberados da banda de valência, são promovidos para a banda de condução deixando buracos na banda de valência. Os elétrons e os buracos emigram através do cristal até se recombinarem ou serem presos em armadilhas, que são defeitos ou impurezas na rede cristalina, dando origem a níveis discretos no gap de energia entre a banda de valência e a banda de condução. Quando o material é aquecido, dois processos podem ocorrer: a) os elétrons recebem suficiente energia, escapam das armadilhas e vão para a banda de condução onde se locomovem livremente até se recombinarem com um centro de recombinação (Figura 1-1-b), emitindo luz. Os buracos recebem suficiente energia, escapam das armadilhas e vão para a banda de valência, onde se locomovem até se recombinarem com um centro de recombinação, podendo emitir um fóton (Figura 1-1-c). Esses dois processos são similares; a predominância de um depende de qual dos portadores de carga está mais fracamente ligado. Consideremos, porém, só o primeiro. A luz emitida é medida e sua intensidade é proporcional, num certo intervalo de exposição, à população de elétrons nas armadilhas, e esta é proporcional à exposição recebida. Portanto a luz emitida é proporcional à exposição recebida.

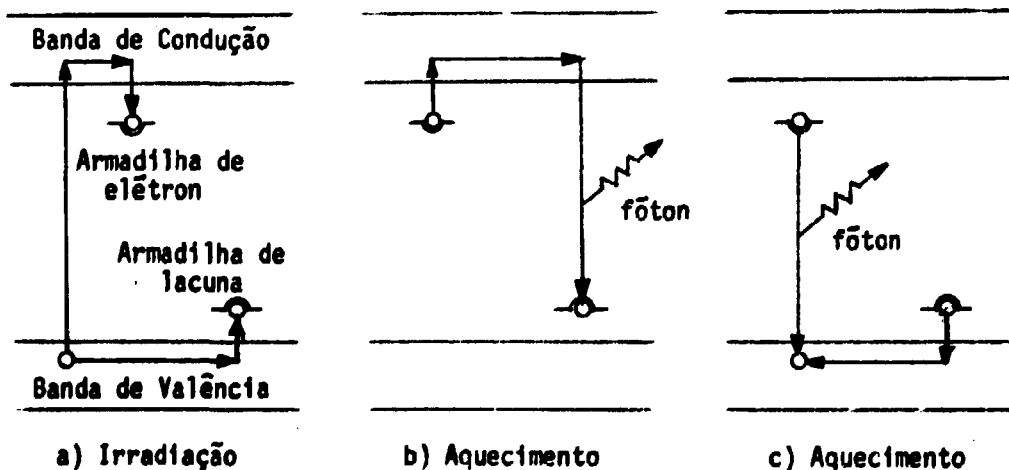


Figura 1-1



### Dosímetros Radiofotoluminescentes<sup>(3,7)</sup>

Os dosímetros radiofotoluminescentes usados neste trabalho são vidros de fosfatos ativados com prata. A radiofotoluminescência desses materiais é caracterizada pelo aumento na emissão fluorescente depois de serem tratados com raios-X ou gama. Essa fluorescência é causada pela excitação com luz ultravioleta.

De acordo com Schulman, depois da irradiação desses materiais com raios-X ou gama, aparecem bandas de absorção na região da ultravioleta, devido a diversos tipos de centros induzidos pela radiação nos cristais. A luminescência produzida pela excitação desses centros com luz ultravioleta é proporcional ao número de centros criados, e este por sua vez é proporcional à exposição recebida, dentro de um certo intervalo de exposição. Portanto a luminescência é proporcional à exposição recebida.

Atualmente, segundo a literatura existente, os autores não concordam entre si sobre as qualidades de cada um dos sistemas em estudo. Por exemplo, segundo Klaus Becker<sup>(8)</sup>, os testes de comparação entre os diferentes tipos de sistemas dosimétricos em condições controladas, isto é, usando radiação monoenergética incidindo perpendicularmente nos dosímetros em condições mínimas de espalhamento da radiação, e em condições ambientais conhecidas (umidade, temperatura, gases, etc.), não traduzem a realidade, pois, os resultados são bons demais como é de se esperar. Por exemplo, pode-se obter leitura de 10 mR com erro de  $\pm 15\%$  usando os filmes mais sensíveis do mercado e fazendo as irradiações nas condições citadas. Na prática, isto é, na monitoração pessoal, as condições são bastante diversas e portanto os resultados são menos precisos. Experiências feitas com filmes usados na monitoração pessoal levam a crer que a dosimetria fotográfica, no presente momento, está longe de ser satisfatória, pois, as leituras apresentam erros que vão de  $\pm 20\%$  a  $\pm 50\%$ , e podem apresentar erros por um fator de 5 a 50 em ambas as direções e com probabilidade imprevisível.

Acrescenta, o autor, que os dosímetros TL e RFL apresentam muitas vantagens sobre os filmes: melhor precisão ( $\pm 3\%$  entre 50 mR e 1000 R), melhor resposta com a energia, range de dose maior, mínima dependência com a direção da radiação, mínimo desvanescimento, estabilidade durante o armazenamento, possibilidade do mesmo dosímetro ser usado diversas vezes, leitura simples, reprodutibilidade. As desvantagens em relação aos filmes são poucas: triboluminescência para baixas doses, destruição do efeito da radiação com a leitura e dependência da sensibilidade com a história do material.

Com relação aos dosímetros TL e RFL, apesar do efeito de build-up e das contaminações luminescentes para leituras de baixas doses, o autor considera os dosímetros RFL superiores aos TL em casos de usos prolongados, isto é, durante um mês, três meses e um ano ou mesmo durante a vida toda onde um documento da exposição pode ser guardado. Sobre outros aspectos, o autor também considera os dosímetros RFL superiores aos TL: leitura instantânea e independente de aquecimento e portanto da taxa de aquecimento; a composição pode ser variada de acordo com a finalidade que se pretende; vidros esféricos são independentes da direção de incidência da radiação.

Num trabalho publicado no *Giornale di Fisica Sanitaria e Protezione contro le Radiazioni*, G. Busuoli e A. Cavallini<sup>(9)</sup> acham que os filmes apresentam melhor reprodutibilidade e mais vantagens que os dosímetros TL (LiF), e que apesar dos aperfeiçoamentos com a incorporação do material termoluminescente em matriz de teflon ou borracha de silicone, o método de leitura é muito cansativo. Acrescentam ainda, que no presente, os dosímetros TL e RFL não podem substituir os filmes na dosimetria pessoal. No entanto J. R. Cameron<sup>(6)</sup>, em diversos testes comparativos entre filmes e dosímetros TL, conclui que os dosímetros TL apresentam melhor precisão e reprodutibilidade que os filmes dosimétricos.

Num outro trabalho apresentado num simposium sobre medidas de radiações, E. Piesch<sup>(10)</sup> mostra que os dosímetros RFL apresentam, em relação aos filmes dosimétricos, maior precisão e maior reprodutibilidade, tanto em testes de irradiação como no uso rotineiro, isto é, na monitoração pessoal.

Como se vê, as opiniões dos autores divergem entre si e, portanto, não se pode concluir, através da literatura, qual é o melhor sistema dosimétrico e como cada um deles responde em condições conhecidas de irradiação e de ambiente e em condições não conhecidas, como na monitoração pessoal, onde as irradiações são feitas em todos os ângulos possíveis e nas mais variadas condições ambientais.

No presente trabalho será feita uma comparação entre os três sistemas dosimétricos citados, no que diz respeito à resposta com exposição, resposta com energia, limite inferior de fidelidade e reprodutibilidade. Será feito também uma verificação das respostas relativas entre os dosímetros em condições práticas de uso, isto é, na monitoração pessoal.

As conclusões que serão tiradas e a aquisição de experiência com cada um dos sistemas dosimétricos citados serão os objetivos deste trabalho.

## CAPÍTULO II

### MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

#### A) – Materiais

Os materiais usados no presente trabalho foram:

- Filmes Agfa-Gevaert modelos Structurix D10 e D2<sup>(\*)</sup>
- Fluoreto de lítio com impurezas de Mg (TLD-100 com abundância natural de Li),<sup>(\*\*)</sup>
- Fluoreto de lítio sinterizado a quente (hot press)<sup>(\*\*)</sup>
- Sulfato de cálcio com impureza de disprósio (CaSO<sub>4</sub>:Dy)<sup>(\*\*)</sup>
- Vidros radiofotoluminescentes tipo FD-P6-1 e FD-P8-1 da Toshiba<sup>(\*\*\*)</sup>
- Cápsulas de polietileno, para conter TLD-100 ou CaSO<sub>4</sub>:Dy, de fabricação local.
- Materiais de limpeza dos vidros RFL: detergente neutro líquido, mistura sulfo-crômica, água comum, água destilada, álcool metílico, Beakers, placas de Petri, pinças e dessecador.
- Materiais para revelação dos filmes: revelador rápido para raios-X da Kodak, Stopper preparado no I.E.A. com solução a 28% de ácido acético glacial e Fixador da Kodak.

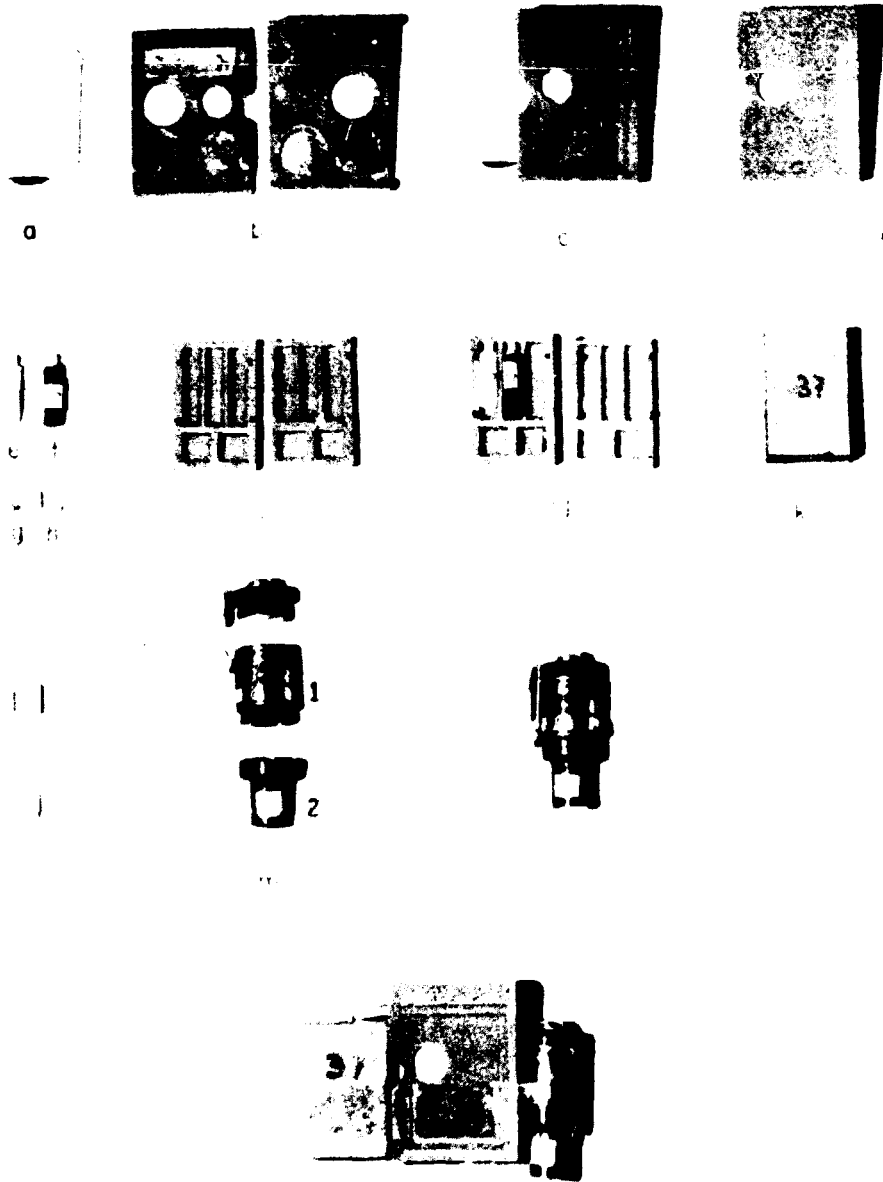
O TLD-100 e o CaSO<sub>4</sub>:Dy, que se apresentam sob a forma de pó, foram encapsulados e colocados em porta-dosímetros de plástico juntamente com o hot press e os vidros FD-P8-1. Os filmes e os vidros FD-P8-1 foram colocados respectivamente nos porta-filmes usados no I.E.A. e nos porta-dosímetros modelo BD-2 da Toshiba. Tanto o porta-filme como o porta-dosímetro da Toshiba possuem filtros que permitem determinar a energia da radiação incidente. (Vide Figura 2-1).

Os três porta-dosímetros foram agrupados formando um "badge" composto conforme Figura 2-1-o.

(\*) Os modelos D10 e D2 são respectivamente de alta e de baixa sensibilidade.

(\*\*) Harshaw Chemical Co., Ohio, U.S.A.

(\*\*\*) Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd, Tokyo, Japan  
Composição (% em massa): 80% de LiPO<sub>3</sub>; 80% de Al(PO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>; 7% de AgPO<sub>3</sub>; 3% de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Figura 2.1** – a) Filme dosimétrico da Agfa Gevaert, tipo Personnel Monitoring Film. b) Porta-filme aberto mostrando os filtros (Pb, Cd, Cu e janela aberta). c) Filme sendo introduzido no porta-filme fechado. d) Porta-filme fechado. e) Cápsula de polietileno contendo TLD-100. f) Cápsula de polietileno contendo  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . g) Fluoreto de lítio sinterizado a quente (hot press). h) Vidro RFL tipo FD-PB-1. i) Porta-dosímetro aberto. j) Porta-dosímetro contendo os dosímetros. k) Porta-dosímetro fechado. l) Vidros RFL tipo FD-PB-1. m) Porta-dosímetro BD-2 da Toshiba, aberto. Os Vidros são colocados nas partes 1 e 2 indicadas. n) Porta-dosímetro BD-2 da Toshiba fechado. o) Badge composto.

## B) – Equipamentos e Métodos

### 1) – Dosimetria Fotográfica

#### a) – Equipamentos

Os equipamentos usados no interior da câmara escura foram: três tanques contendo respectivamente o revelador, o stopper e o fixador; uma lâmpada de segurança para possibilitar a manipulação dos filmes no escuro, um suporte para revelação dos filmes, um termômetro e um medidor de pH para controlar a temperatura e o pH dos banhos.

Para a leitura dos filmes usou-se um densitômetro modelo 12 - A da Macbeth-Ansco, cujo diagrama de bloco é visto na Figura 2-2.

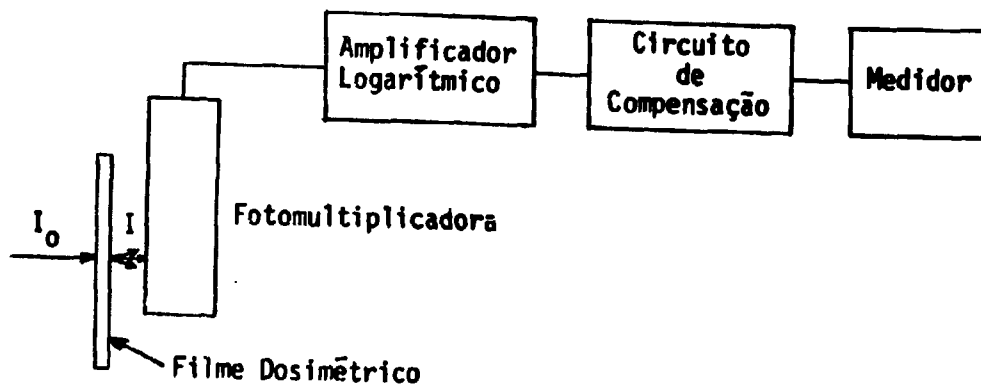


Figura 2.2 – Diagrama de bloco do sistema de leitura

#### b) – Processamento dos Filmes e Leitura

Para revelação foram fixados os seguintes valores dos parâmetros envolvidos:

- temperatura dos banhos: 19°C
- pH: revelador: 9,5 – 10,5  
stopper: 2,5 – 3,5  
fixador: 3,5 – 4,5
- tempo de revelação: 4 minutos
- tempo no stopper: 45 segundos
- tempo no fixador: 8 minutos
- tempo na água corrente: 30 minutos

Após revelados, os filmes são postos para secar e em seguida são lidos.

A leitura é feita com o densitômetro citado, o qual mede a densidade ótica do filme, no intervalo de zero a sete, pela quantidade da luz transmitida através do mesmo. Essa luz transmitida incide numa fotomultiplicadora que a transforma em corrente elétrica que por sua vez é amplificada e medida. Essa corrente elétrica é proporcional à quantidade de luz que atravessa a película fotográfica. A medida dessa densidade ótica foi feita nas posições correspondentes a cada filtro do porta-filme (Vide Figura 2-1-b).

Os filmes dosimétricos usados neste trabalho são constituídos de duas películas com sensibilidades diferentes. Essas películas são embaladas juntas e as respostas de ambas cobrem um intervalo de exposição de algumas dezenas de miliroentgens à aproximadamente  $10^3$  R, isto é, a película de maior sensibilidade mede exposições de algumas dezenas de miliroentgens até aproximadamente 10 R de raios-gama do  $^{60}\text{Co}$  e a de menor sensibilidade mede exposições de 2 R a aproximadamente  $10^3$  R de raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ .

## 2) – Dosimetria Termoluminescente

### a) – Equipamentos

Os equipamentos utilizados foram:

Um conjunto Harshaw "Model 2000 Thermoluminescent Analyser" que é constituído de um detector TL modelo 2000-A e um picoamperímetro integrador, automático, modelo 2000-B. A esse conjunto acrescentamos um registrador modelo 370 da Keithley. O diagrama de bloco do sistema acima é o seguinte:

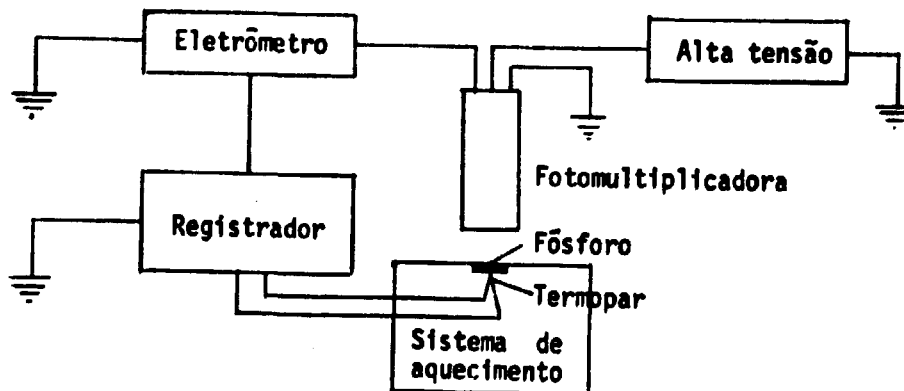


Figura 2.3 – Diagrama de bloco do sistema de leitura

### b) – Método de Leitura da TL

Para a leitura do material TL, usamos um volume constante de aproximadamente  $15 \text{ mm}^3$  de pó TL o qual é medido num dispositivo que possui uma cavidade que é preenchida com o fósforo e

sobre o qual são produzidas vibrações para melhor reprodutibilidade do volume medido. Essa alfuqueta de pr é colocada numa bandeja cujo material é uma liga de prata de alta resistência à oxidação mesmo quando aquecida à temperatura da ordem de 400°C.

Essa bandeja é inserida no aparelho de leitura e uma corrente elétrica passa através da mesma aquecendo-a. A taxa de aquecimento e a temperatura máxima podem ser reguladas para um valor desejado e mantidas constantes.

A medida que o fósforo é aquecido pela bandeja, há emissão de luz a qual é transformada em corrente elétrica por uma fotomultiplicadora. Essa corrente passa por um eletrômetro e é simultaneamente integrada. À saída do eletrômetro é ligado um conversor analógico digital que alimenta um conjunto de décadas contadoras que vão indicar a carga integrada em nanocoulomb, e um registrador pelo qual obtemos a curva de emissão do fósforo (material TL), que nos dá a intensidade da luz emitida em função do tempo de aquecimento. Essa curva é constituída de um ou mais picos de emissão cujas alturas são dependentes da taxa de aquecimento do fósforo, e é chamada de curva de emissão.

No caso do TLD-100, os picos de 1 a 5 (enumerados na ordem crescente da temperatura de emissão da TL), decaem<sup>(6)</sup>, depois da irradiação, respectivamente com as meias vidas aproximadas de 5 minutos, 10 horas, 6 meses, 7 anos e 80 anos, à temperatura ambiente.

Os picos 4 e 5 são os mais indicados para dosimetria por possuírem meias-vidas relativamente longas quando comparadas com o tempo em que os dosímetros são usados, e este, em geral varia de 1 a 3 meses.

Tanto a área sob a curva de emissão como a altura de pico são proporcionais à luz emitida que por sua vez é função da exposição. Neste trabalho foi usada a altura de pico como medida da exposição.

Para que o aparelho de leitura dê sempre a mesma resposta ao ler fósforo com mesma exposição, é necessário que as condições pré-fixadas, isto é, pré-aquecimento da bandeja, taxa de aquecimento da bandeja, resposta à fonte de luz padrão<sup>(\*)</sup> que se acha anexa ao próprio instrumento, e a supressão da corrente de fundo, sejam sempre as mesmas. As condições que foram fixadas para todas as leituras foram:

- Pré aquecimento da bandeja: ~ 72°C
- Velocidade de aquecimento: ~ 100°C/6,5 s
- Resposta à fonte de luz padrão: 9,00 nanocoulomb/10 s
- Supressão da corrente de fundo: Corrente de fundo residual ~ 20 pico A.

#### c) – Tratamento Térmico dos Materiais TL

O TLD-100 recebeu um recozimento<sup>(6)</sup> a 400°C durante 1 hora e em seguida foi resfriado à temperatura ambiente em aproximadamente dois minutos e depois aquecido a 80°C durante 24 horas. Este processo é reprodutível, e através dele, os picos 1 e 2 são quase que totalmente eliminados e a influência do pico 3 é diminuída.

O CaSO<sub>4</sub>.Dy recebeu um tratamento<sup>(14)</sup> inicial de 700°C durante 1 hora e meia sendo depois resfriado à temperatura ambiente em 5 minutos. Este tratamento tem a finalidade de estabilizar a altura de pico, isto é, o material adquire uma sensibilidade constante à radiação ionizante após os recozimentos subsequentes a 400°C. Foi feito também o recozimento a 400°C durante uma hora e resfriado rapidamente à temperatura ambiente.

(\*) A fonte de luz padrão emite uma fluorescência constante que possibilita a calibração sistemática do aparelho de leitura.

### 3) – Dosimetria Radiofotoluminescente

#### a) – Equipamentos

Instrumento de leitura: Fluoro Glass Dosimeter Reader modelo FGD-6 da Toshiba cujo diagrama de bloco está representado na Figura 2-4.

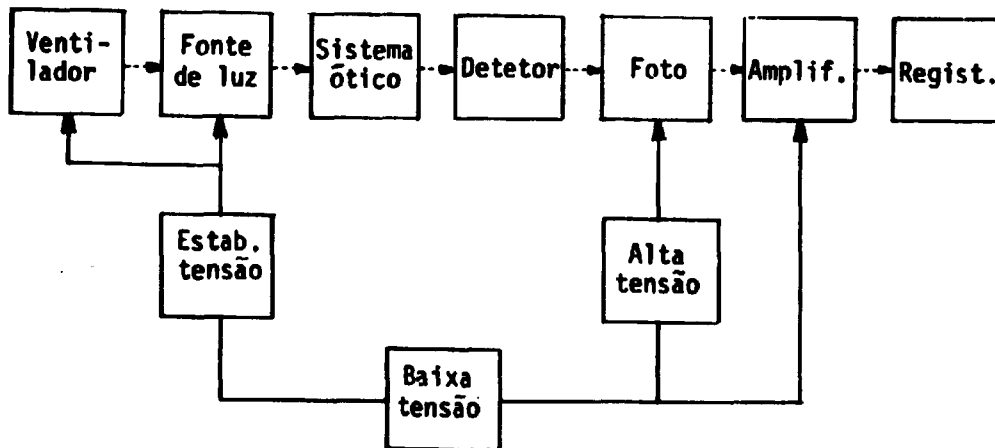


Figura 2.4 – Diagrama de bloco do sistema de leitura

Tanto a intensidade da fonte de luz (lâmpada de arco de mercúrio a alta pressão modelo SHL-100 UV-)<sup>(\*)</sup> como a sensibilidade da fotomultiplicadora variam com o tempo e essa variação pode ser compensada usando-se os vidros de referência que são semelhantes aos vidros RFL (radiofotoluminescentes). Esses vidros de referência não possuem propriedades radiofotoluminescentes, porém emitem uma fluorescência constante e equivalente a uma exposição de 36,1 R de raios-gama do <sup>60</sup>Co, o que possibilita a verificação sistemática da sensibilidade do aparelho de leitura.

#### b) – Tratamento Térmico dos Vidros RFL<sup>(11)</sup>

Os vidros receberam um tratamento de 400°C durante 20 minutos e em seguida foram resfriados rapidamente. Esse tratamento tem a finalidade de baixar a pré-dose dos dosímetros. A pré-dose é a dose correspondente à quantidade de fluorescência que os vidros RFL emitem antes de serem irradiados.

#### c) – Método de Limpeza dos Vidros RFL<sup>(12)</sup>

Para se efetuar a leitura dos dosímetros RFL há necessidade de que os mesmos passem por um processo de limpeza, pois, impressões digitais<sup>(11)</sup>, pó, óleos ou resíduos de detergentes sobre a sua superfície produzem luz fluorescente espúria através de estimulação ou reduz a intensidade da luz

(\*) De Toshiba

ultravioleta através de absorção ou de espalhamento, causando erros apreciáveis na avaliação. Para evitar isso, há necessidade de uma limpeza exaustiva, tanto dos dosímetros como dos frascos que os conterão.

Primeiramente, os beakers, as placas de Petri e as pinças devem ser lavadas cuidadosamente com detergente, e a secagem deve ser uniforme evitando-se a formação de gotas. Em seguida os dosímetros (aproximadamente vinte) são colocados num dos beakers lavados contendo 100 cm<sup>3</sup> de detergente neutro líquido, permanecendo aí de alguns minutos até mais de 10 horas dependendo do grau de sujeira existente. Depois os vidros são postos num outro beaker e lavados cuidadosamente com água comum, enchendo-se e esvaziando-se o mesmo aproximadamente 10 vezes, pois os detergentes neutros remanescentes produzem luz fluorescente. A seguir os vidros são transferidos para outro beaker, contendo 100 cm<sup>3</sup> de mistura sulfo-crômica onde permanecem de 5 a 10 minutos, sendo depois lavados com água comum da maneira como foi explicado anteriormente. Depois eles recebem uma lavagem prévia com água destilada e em seguida uma segunda lavagem, também com água destilada, para completar a limpeza. Após isso, os vidros são transferidos para outro beaker contendo álcool metílico, para acabamento final. Esses vidros são colocados numa placa de Petri e postos para secar num dessecador.

Todas essas operações devem ser necessariamente executadas com pinça, e ao colocar os vidros numa placa de Petri, para secagem, a face que é fosca, e usada para identificação, deve estar voltada para baixo, tomando-se o cuidado de evitar o contato entre dois vidros quaisquer. A Figura 2-5 mostra os materiais de limpeza usados. Depois de limpos, os dosímetros estão prontos para serem lidos.

#### d) – Método de Leitura dos Vidros RFL<sup>(12)</sup>

O processo de leitura é o seguinte: A luz ultravioleta com comprimento de onda de 365 nm, emitida pela lâmpada de mercúrio, incide sobre o dosímetro, o qual então emite uma luz fluorescente cuja intensidade é proporcional a dose recebida pelo mesmo. Essa luz fluorescente é transformada em corrente elétrica por uma fotomultiplicadora. Essa corrente é amplificada e medida num miliamperímetro, quando se usa o método de leitura por deflexão, ou então é anulada através de um circuito potenciométrico cuja indicação é feita por um tubo eletrométrico, quando se usa o método do zero.

Faz-se então a leitura da pré-dose, e após isso, os dosímetros são usados durante o tempo que for necessário, recebendo uma certa exposição a ser medida. A determinação dessa exposição é feita repetindo-se novamente todo o processo de limpeza e em seguida fazendo-se a leitura. Do resultado obtido subtrai-se a pré-dose<sup>(11)</sup> tendo-se então a exposição que foi recebida e que se quer medir. Esse método é usado quando os dosímetros já dão as respostas em roentgens, como é o caso dos vidros tipo FD-P8-1 usados com o porta-dosímetro BD-2 da Toshiba. Caso contrário, há necessidade de uma curva de calibração. Esse porta-dosímetro, como já foi dito anteriormente, tem a propriedade de tornar as respostas independentes da energia da radiação quando se calcula a exposição através da expressão:

$$R = 0,45 (L_1 + 0,3 L_2)$$

onde  $L_1$  e  $L_2$  são as leituras dos vidros (já subtraída a pré-dose) colocados respectivamente nas partes 1 e 2 do porta-dosímetro BD-2 da Toshiba (Vide Figura 2-1-m).

Para que se tenha boa precisão com os vidros, é necessário que a pré-dose corresponda a uma exposição inferior a 1 R, pois, o intervalo de exposição mais freqüente, para um tempo de 3 meses de uso na monitoração pessoal e em nossas condições ambientais, é de 100 mR a 1 R. Se a pré-dose corresponder a uma exposição acima de 1 R haverá necessidade de se fazer um recozimento a 400°C durante vinte minutos.

(11) O termo pré-dose é usado universalmente, mesmo quando se mede exposição em roentgen, pois, como estabelece<sup>(12)</sup> dose ou dose absorvida é expressa em rad e não em roentgen.





**Figura 2.5** - Materiais de limpeza dos vidros RFL. Da esquerda para a direita tem-se: mistura sulfo-crômica, água comum, detergente, água destilada 1, água destilada 2, álcool metílico 1 e álcool metílico 2.

O trabalho de limpeza dos vidros pode ser reduzido quando os dosímetros são usados rotineiramente e não haja necessidade de recozimento após a avaliação, pois, a última leitura será a pré-dose para o próximo uso.

### CAPÍTULO III

#### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

##### PARTE A

##### Experiência em Condições Conhecidas de Irradiação e de Ambiente

##### 1) – Determinação das Respostas de Diferentes Tipos de Materiais Dosimétricos em Função da Exposição à Radiação Gama do $^{60}\text{Co}$

##### a) – Irradiações

Foram irradiados simultaneamente 230 dosímetros de diferentes tipos, com exposição de 10 mR, 20 mR, 50 mR, 100 mR, 200 mR, 500 mR, 1 R, 2 R, 5 R, 10 R, 20 R, 50 R e 100 R.

As irradiações de 10 mR a 5 R foram feitas no Instituto de Energia Atômica com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  de 82,6 mCi, calibrada com 3% de erro pelo Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. De 10 R a 100 R foram feitas no Hospital do Servidor Público do Estado de São Paulo, com 5% de erro.

Todos os porta-filmes e porta-dosímetros foram irradiados a uma distância da fonte para que o fator de espalhamento fosse o mesmo para todos os dosímetros.

Essas irradiações foram feitas com incidência normal, em condições conhecidas de umidade e temperatura, e em ambiente isento de outros gases misturados com o ar (umidade: ~ 70%, temperatura ~ 27°C, ar comum).

Para cada uma das exposições acima foram irradiados 5 dosímetros de cada espécie com o intuito de se verificar a sua fidelidade e obter uma boa curva de calibração.

Os tempos de exposição foram calculados através da expressão:

$$t = \frac{Xd^2}{\Gamma A}$$

onde X é a exposição em roentgen, d é a distância em metro entre o dosímetro e a fonte, A é a atividade da fonte em curies e  $\Gamma$  é a constante da radiação gama dada em R/hCi a 1m de distância da fonte.

##### b) – Resultados

##### - Filmes

Os resultados da leitura dos filmes dosimétricos estão representados nas Figuras 3-1 e 3-2, onde cada ponto é a média aritmética de 5 leituras. Vê-se que a resposta dos filmes de alta sensibilidade não é linear com a exposição e em aproximadamente 100 R a sua densidade ótica atinge o máximo. Vê-se ainda que os desvios nas respostas crescem quando a exposição decresce. Esse fato é explicado<sup>(4)</sup> pelos diversos fatores que causam erros na leitura dos filmes, tais como: erro devido ao desvanecimento da imagem latente (fading), erro devido ao enegrecimento espontâneo da emulsão fotográfica (fogging), erro na determinação da densidade ótica, erro devido à cobertura não uniforme da emulsão fotográfica e a defeitos da mesma. Evidentemente, quanto menor a exposição que se quer determinar maior será a influência desses erros nos resultados.

Na Figura 3-1 é vista a curva de resposta para raios-X de 37 KeVef, a qual será discutida na secção 3, juntamente com as respostas dos outros dosímetros para essa energia.

A resposta dos filmes de baixa sensibilidade é vista na Figura 3-2. Vê-se que essa resposta não é linear no intervalo de exposição considerado, isto é, de 2 R a 100 R. Esses filmes começam ler exposições a partir de 2 R de radiação gama do  $^{60}\text{Co}$ .

A Figura 3-3 mostra a exposição lida pelos filmes em função da exposição recebida, onde a reta de 45° de inclinação foi traçada para se ter uma visão da relação entre a exposição lida e a exposição real. A parte quantitativa dos desvios será vista mais adiante na secção 4.

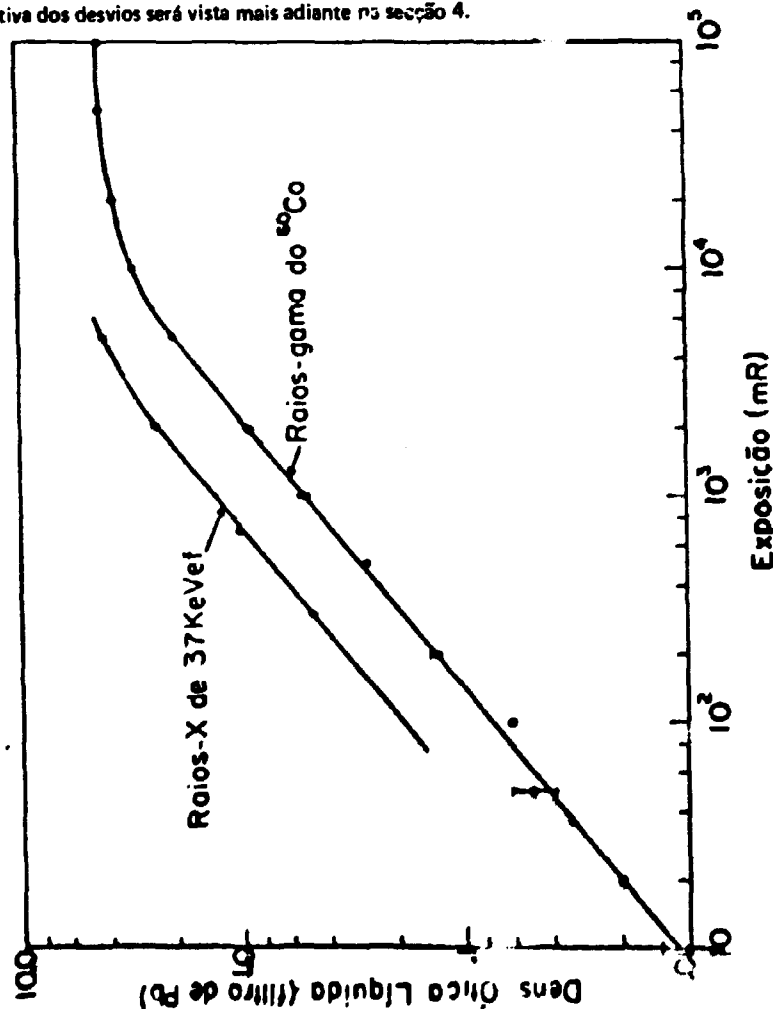


Figura 3.1 - Curva de calibração dos filmes dosimétricos de alta sensibilidade

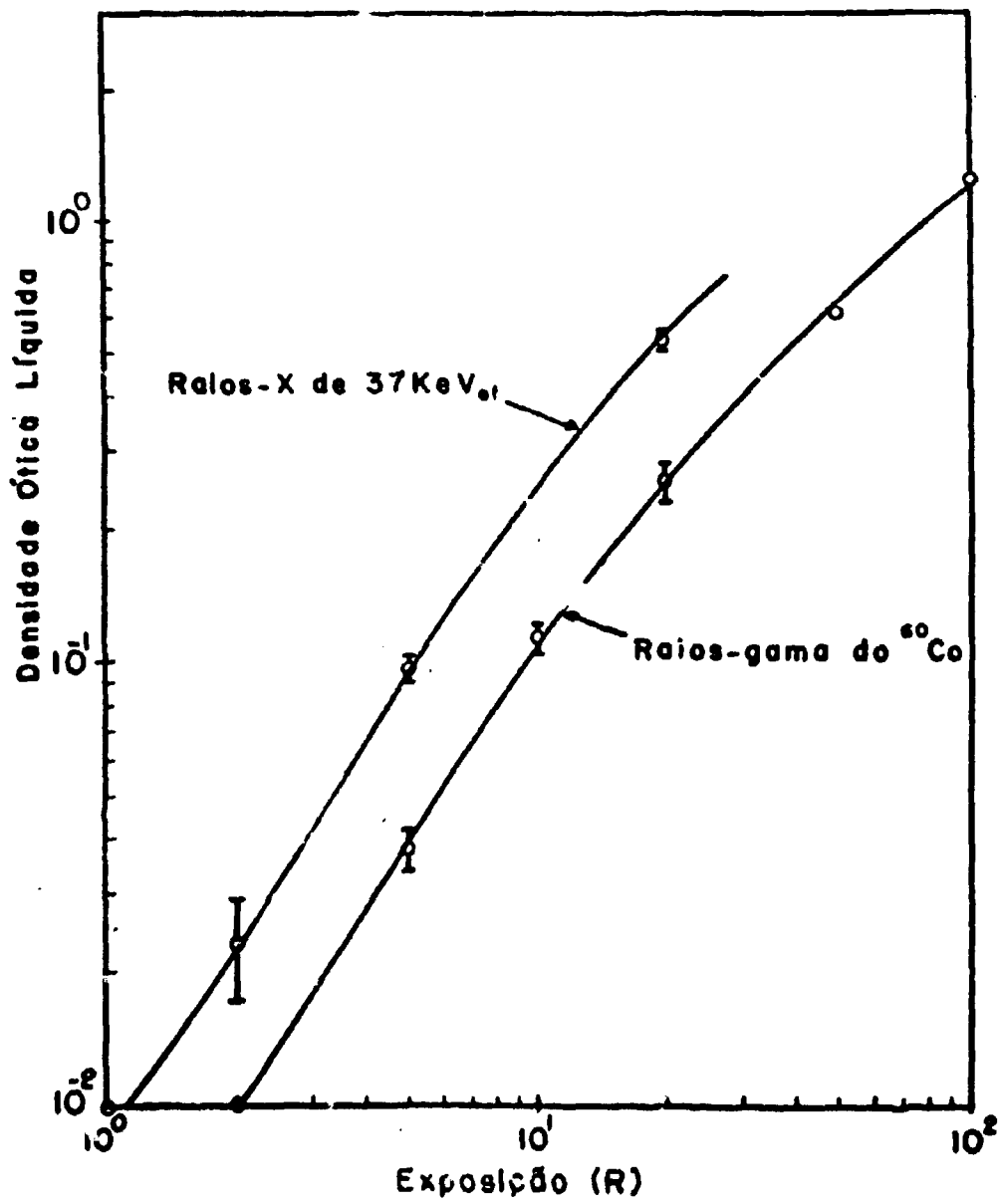


Figura 3.2 - Curva de calibração dos filmes dosimétricos de baixa sensibilidade.

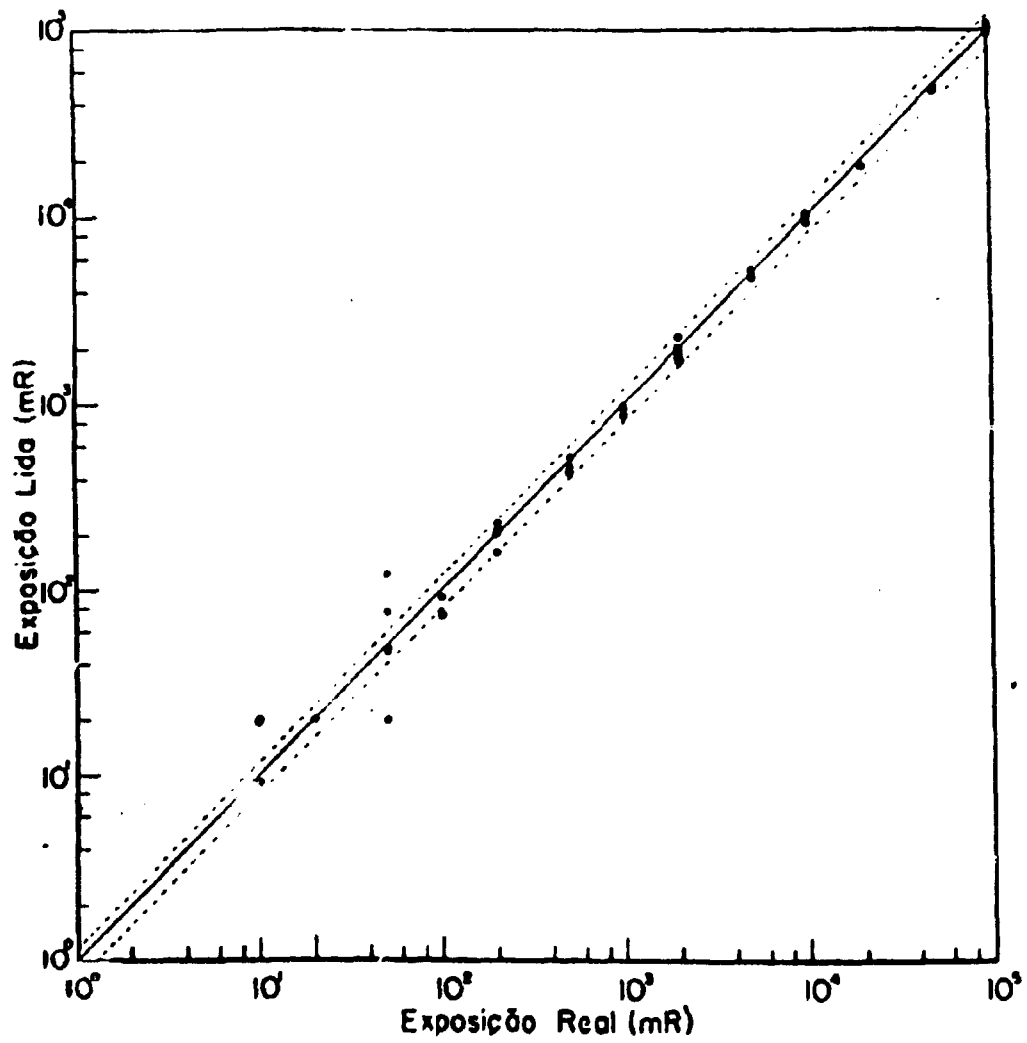


Figura 3.3 - Exposição lida versus exposição-real para os filmes dosimétricos. As linhas tracejadas representam 20% de erro.

## Dosímetros Termoluminescentes

### TLD-100

A resposta do TLD-100 em função da exposição aos raios gama do  $^{60}\text{Co}$  pode ser vista na Figura 3-4.

Esse material apresenta resposta linear no intervalo de exposição em que a experiência foi feita. De acordo com Cameron<sup>(6)</sup>, sabe-se que a resposta continua linear até aproximadamente  $10^3$  R, acima da qual inicia uma supralinearidade, isto é, há um aumento não linear na TL quando a exposição aumenta. A saturação desses dosímetros inicia-se em aproximadamente  $10^5$  R.

Nota-se também neste caso, que, a medida que a exposição decresce, o erro na determinação da mesma cresce. Isso é devido, em grande parte, à influência da triboluminescência<sup>(6)</sup> em baixas exposições. Essa triboluminescência é uma luminescência espúria não devido à radiação mas sim aos efeitos mecânicos como atrito e pressão. A Figura 3-5 mostra as exposições lidas no TLD-100 em função das exposições recebidas.

A análise quantitativa dos erros será feita com mais detalhes na seção 4.

### Dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

A resposta desses dosímetros em função da exposição aos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$  é mostrada na Figura 3-6.

Vê-se que esse material também apresenta resposta linear com a exposição, mas, levando vantagem sobre o TLD-100, de ser sua sensibilidade aproximadamente 14 vezes maior para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ . Pode-se adiantar que para a energia de raios-X de 40 KeVef, sua sensibilidade é ainda maior que a do TLD-100.

Devido a isso, os erros na determinação de baixas exposições são muito menores, o que torna possível a dosimetria de exposições inferiores comparado com o TLD-100. Isso é visto na Figura 3-7 em que a exposição lida é comparada com a exposição recebida pelos dosímetros. Nota-se que o dosímetro de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  é de fato mais sensível que os outros dosímetros apresentados, na região de baixas exposições. A discussão quantitativa dos erros será feita na seção 4.

As qualidades acima mencionadas são as razões porque o seu estudo foi incluído neste trabalho.

### Dosímetros de LiF Sinterizados a Quente (Hot Press)

Esses dosímetros apresentam as mesmas características que o TLD-100 em pó, por serem ambos fluoreto de lítio. A diferença entre um e outro é que o TLD-100 se apresenta sob a forma de pó enquanto que o "hot press" se apresenta sob a forma sinterizada. A vantagem deste último sobre o primeiro é que sendo sua massa constante, a sua leitura é mais reprodutível, e sendo sólido, mais rápida, pois, não há necessidade de medida de alíquota para a leitura.

A resposta do "hot press" em função da exposição aos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$  pode ser vista na Figura 3-8, na qual os erros não foram apresentados por falta de material na ocasião da irradiação. Mais adiante, na experiência da seção 4, foram feitas novas irradiações em que esses erros são apresentados.

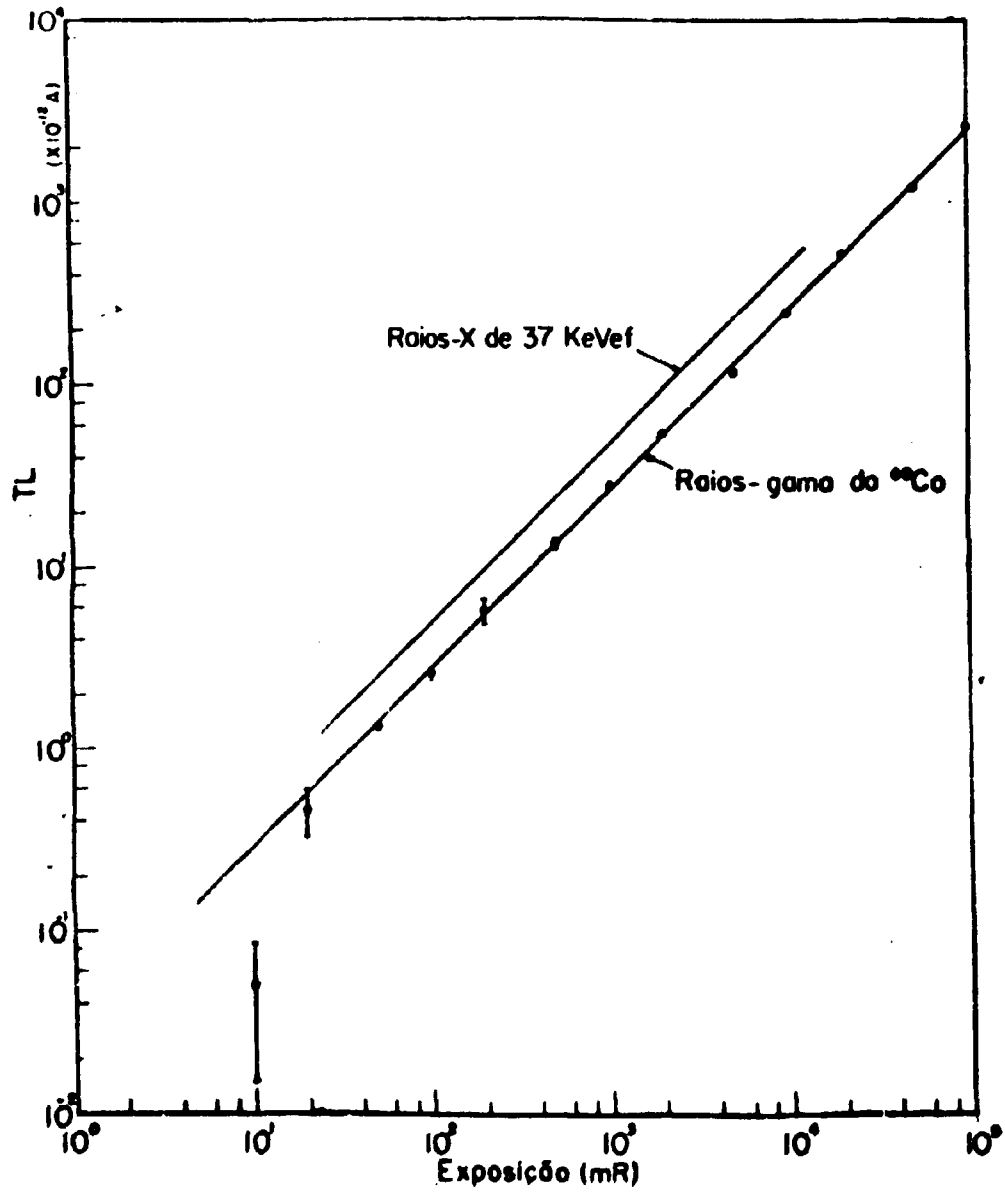


Figura 3.4 - Curva de calibração do TLD-100.

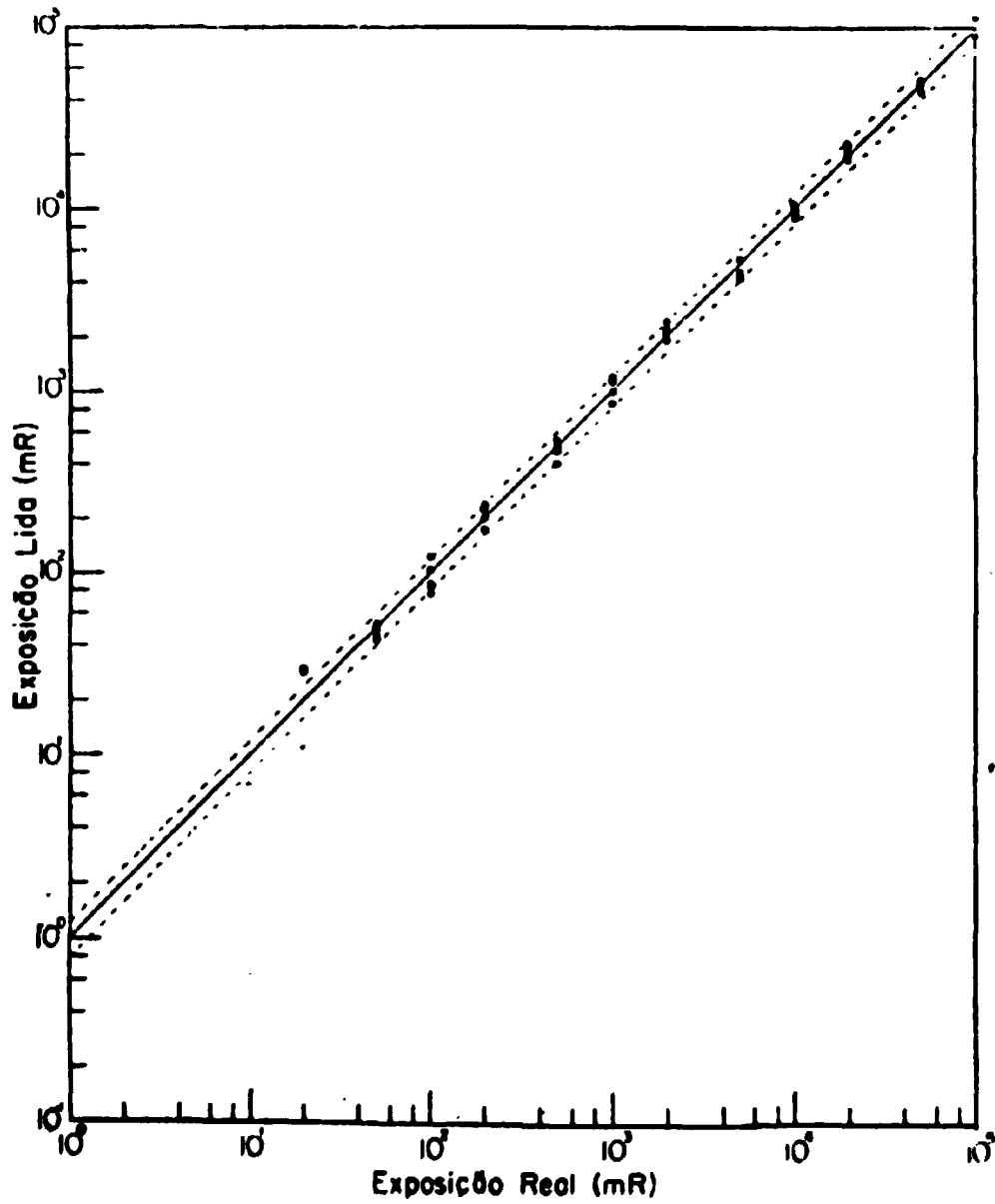


Figura 3.5 - Exposição lida versus exposição real para o TLD-100. As linhas tracejadas representam 20% de erro.



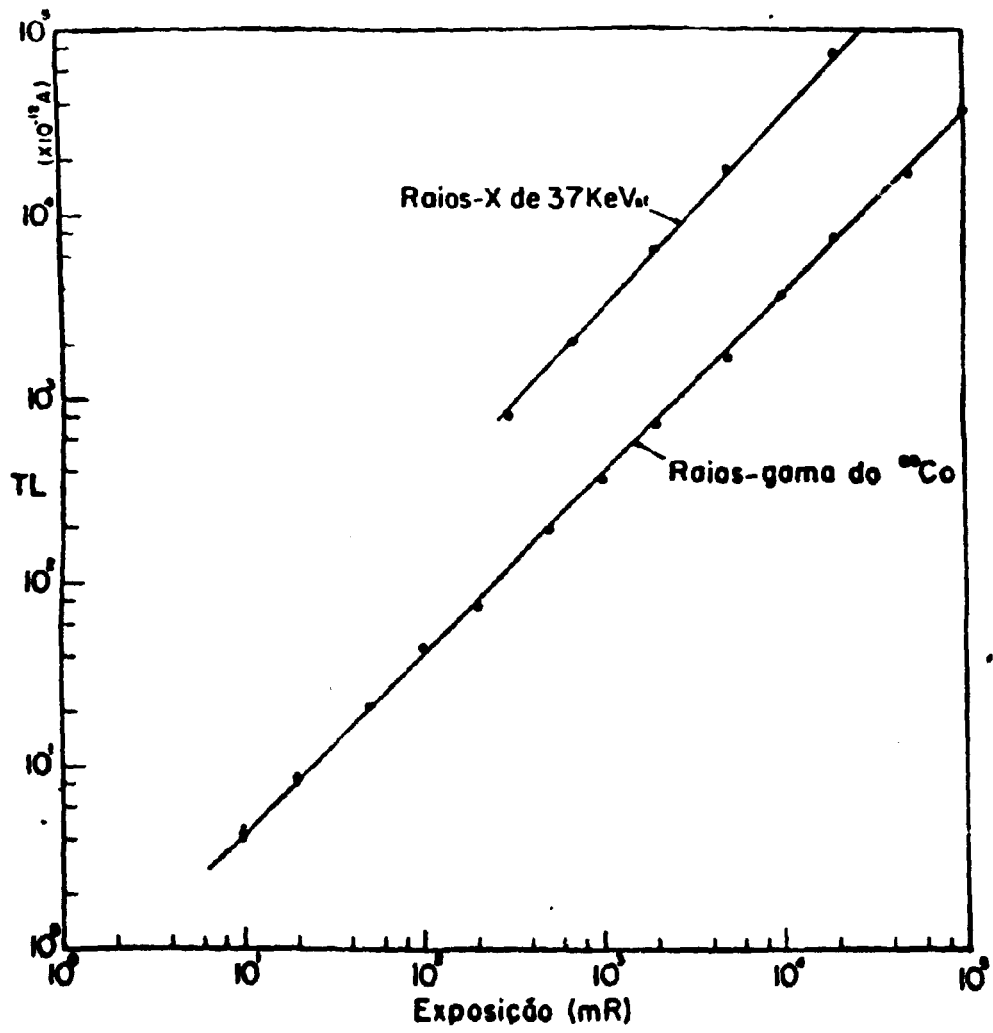


Figura 3.6 - Curva de calibração dos dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy

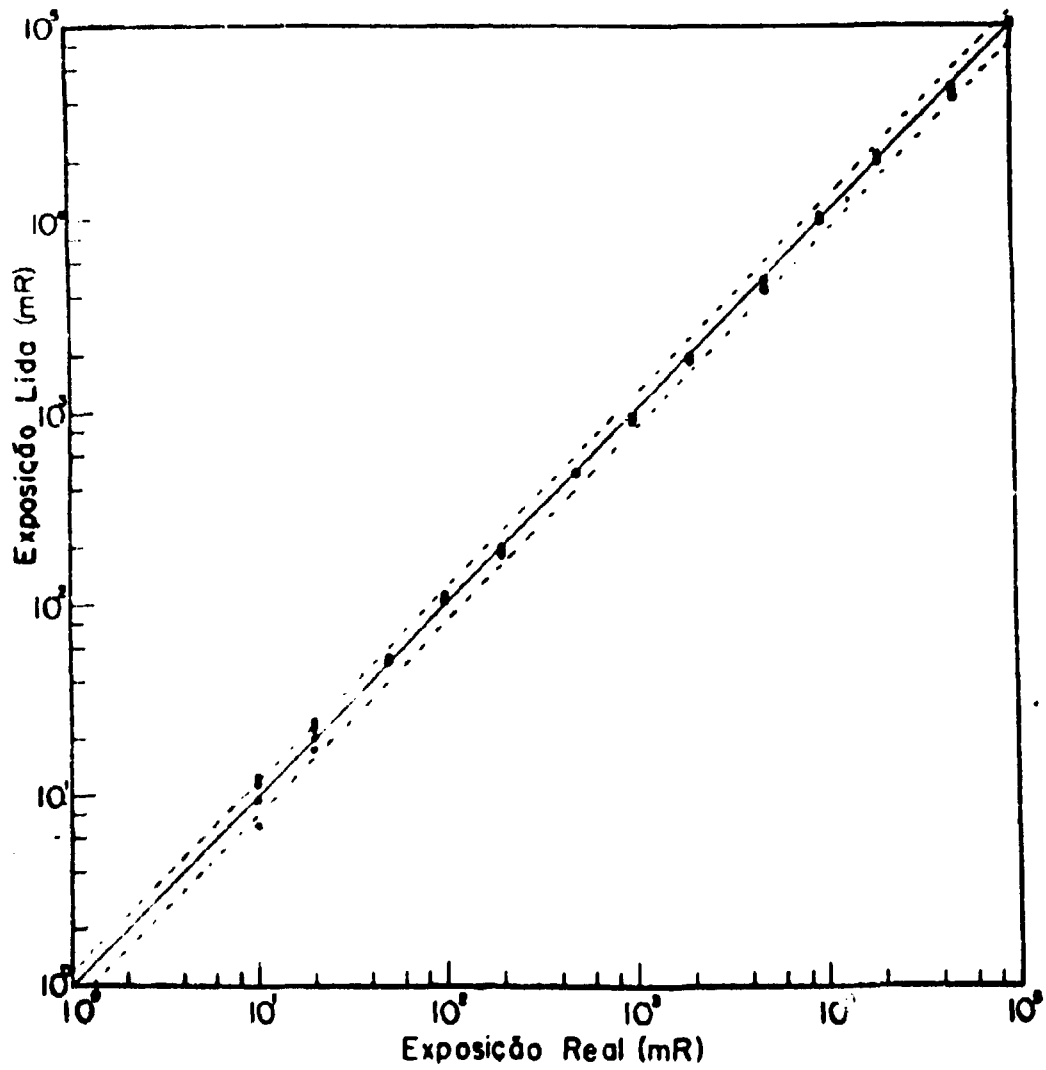


Figura 3.7 -- Exposição lida versus exposição real para os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . As linhas tracejadas representam 20% de erro.

-- Dosímetros Radiofotoluminescentes (RFL)

**Vidros RFL Tipo FD-P6-1**

Os vidros RFL tipo FD-P6-1 também apresentam resposta linear com a exposição, dentro de ~ 40 mR a 100 R, como se vê na Figura 3-9. Na realidade, acima de 3000 R deixa de ser linear.

Da mesma forma que os dosímetros anteriores, os erros para os vidros RFL aumentam a medida que a exposição diminui. Esses erros são divididos principalmente às condições de limpeza da superfície dos vidros, à influência da temperatura durante a irradiação e durante a leitura, à razão entre a leitura e a pré-dose, pois, quanto mais próximo de 1 for essa razão, maior será o erro em baixas exposições.

Na Figura 3-10 é vista a exposição lida pelos vidros tipo FD-P6-1, em função da exposição recebida; o tratamento quantitativo dos desvios será feito na seção 4.

**Vidros RFL Tipo FD-P8-1**

Esses vidros, como foi dito no capítulo anterior, foram irradiados com o porta-dosímetro BD-2 da Toshiba o qual tem a propriedade de tornar as respostas dos vidros independentes da energia da radiação acima de aproximadamente 50 KeVef<sup>(12)</sup>, e mais ainda, a sua resposta é dada diretamente em roentgen.

Os resultados da irradiação com <sup>60</sup>Co são mostrados na Figura 3-11, em que se vê exposição lida versus exposição real. Também neste caso, como é de se esperar, os erros nas leituras crescem a medida que as exposições decrescem. Isso será discutido mais detalhadamente na seção 4.

**2) – Determinação das Respostas dos Diferentes Materiais em Função da Energia da Radiação**

**a) – Irradiações com Raios-X**

com o intuito de estudar a resposta dos diferentes tipos de materiais em função da energia da radiação, 240 dosímetros foram irradiados com exposições iguais a 20 R e raios-X de energias 12.0, 28.0, 34.0, 49.0, 54.0, 67.0, 82.0, 97.0 e 147 KeVef, (e com <sup>137</sup>Cs e <sup>60</sup>Co).

Para cada uma dessas energias foram também irradiados 5 dosímetros de cada espécie para melhor precisão no traçado das curvas de resposta em função da energia.

Essas irradiações foram feitas no Hospital do Servidor Público do Estado de São Paulo e no Hospital A. C. Carmargo (Hospital do Câncer), procedendo-se a uma dosagem do aparelho de raios-X com a câmara superficial do dosímetro Universal da Siemens, para cada energia. O erro de exposição aqui apresentado é também da ordem de 5%.

As condições de irradiação são mostradas no Quadro III-1.

A determinação das energias efetivas dos raios-X foi feita através da medida das camadas semi-redutoras de Al e de Cu usando-se um dispositivo que permite a variação contínua da espessura do material absorvedor até um valor em que a exposição se reduz à metade de seu valor sem absorvedor.

As energias efetivas podem então ser determinadas através dos gráficos existentes de HVL x Energia ou através de cálculos, usando-se a expressão:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

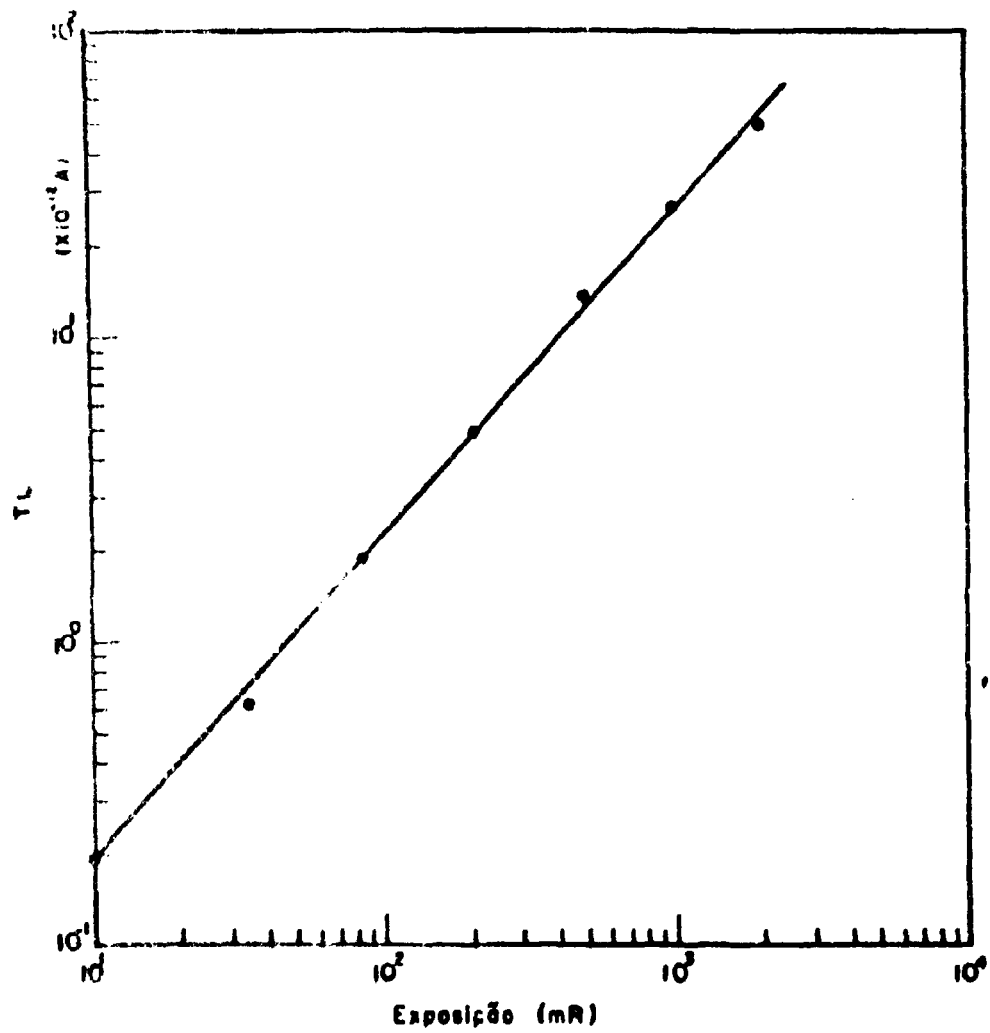


Figura 3.8 Curva de calibração dos dosímetro, de LiF sinterizado a quente (Hot Press), irradiados com raios gama do <sup>60</sup>Co.

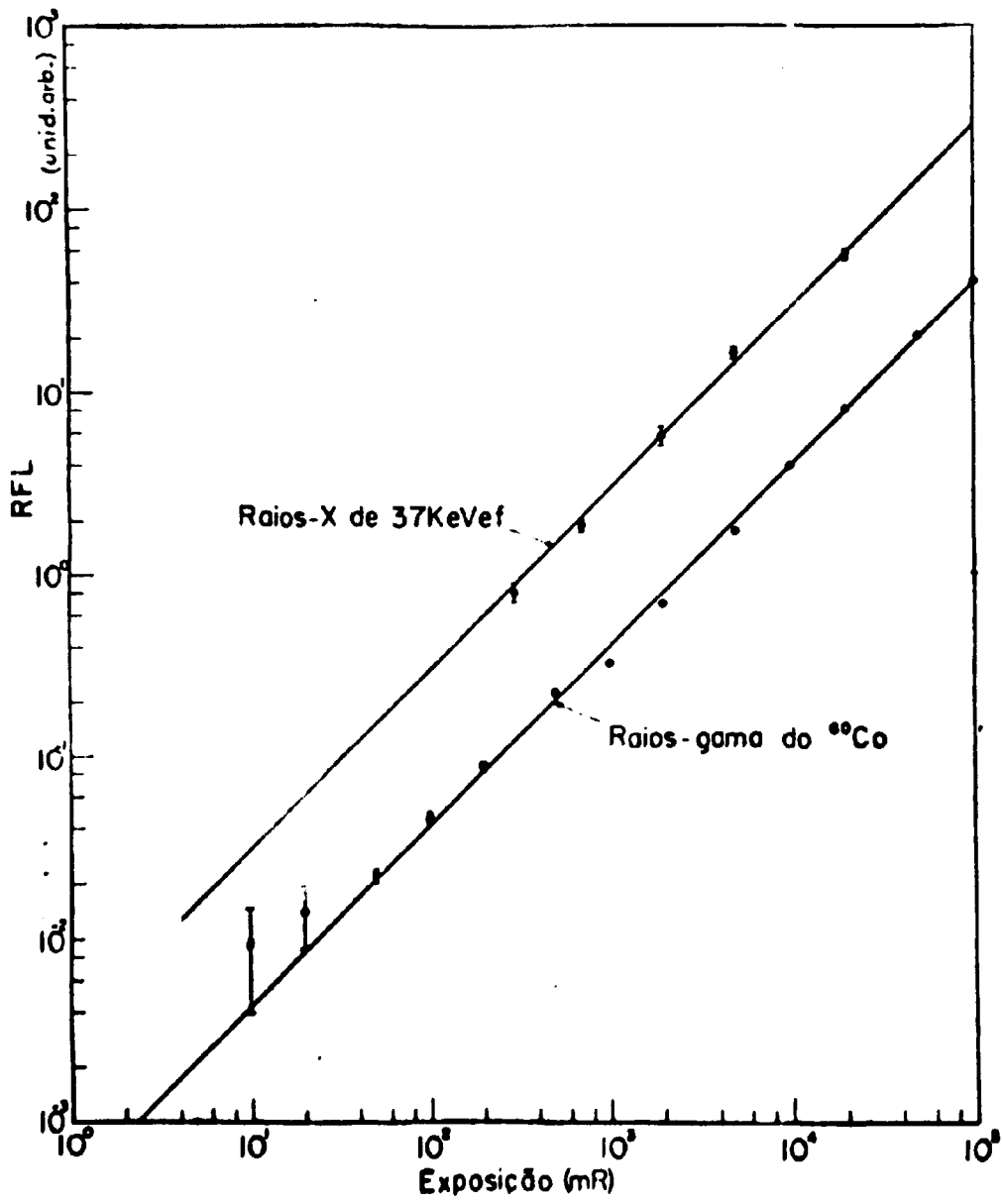


Figura 3.9 -- Curva de calibração dos vidros RFL tipo FD-P6-1 da Tortiba.

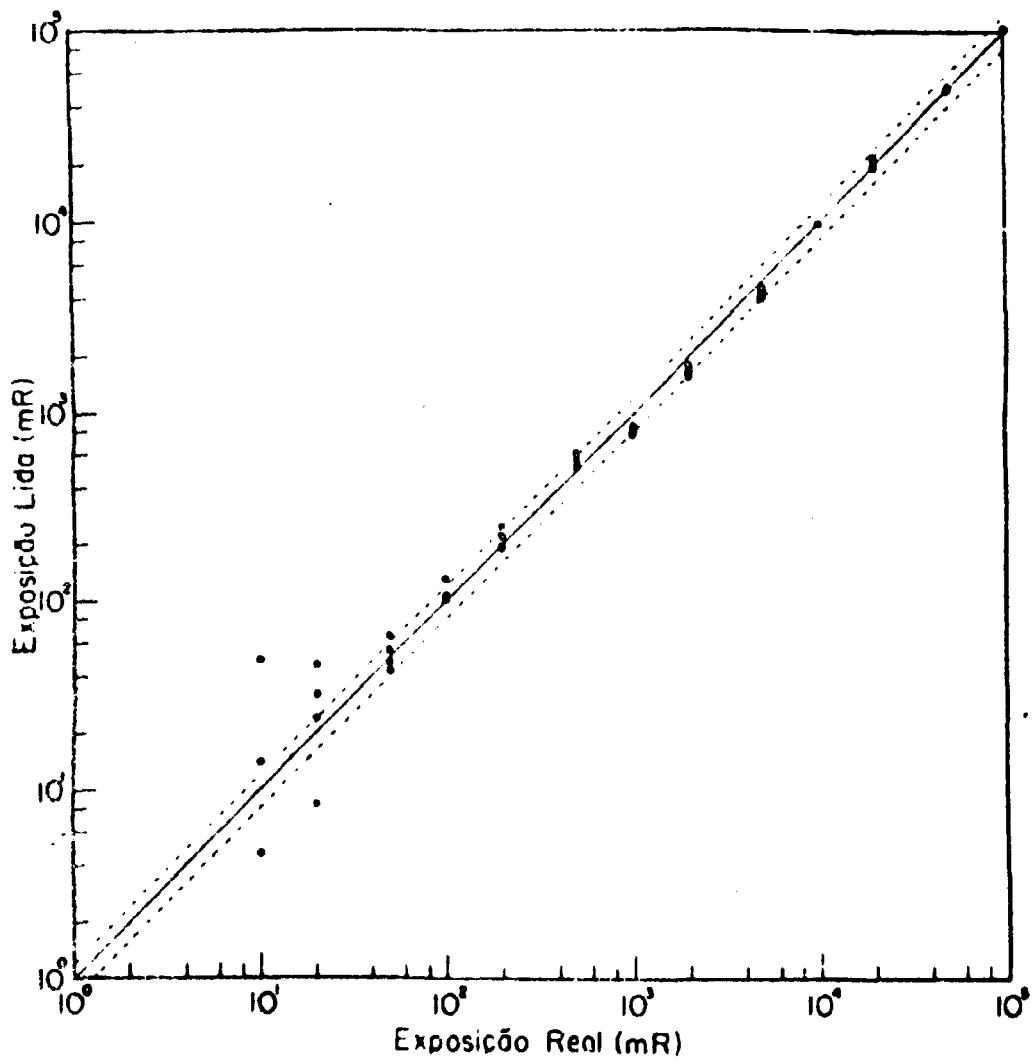


Figura 3.10 – Exposição lida versus exposição real para os vidros RFL tipo FD-P6-1. As linhas tracejadas representam 20% de erro.

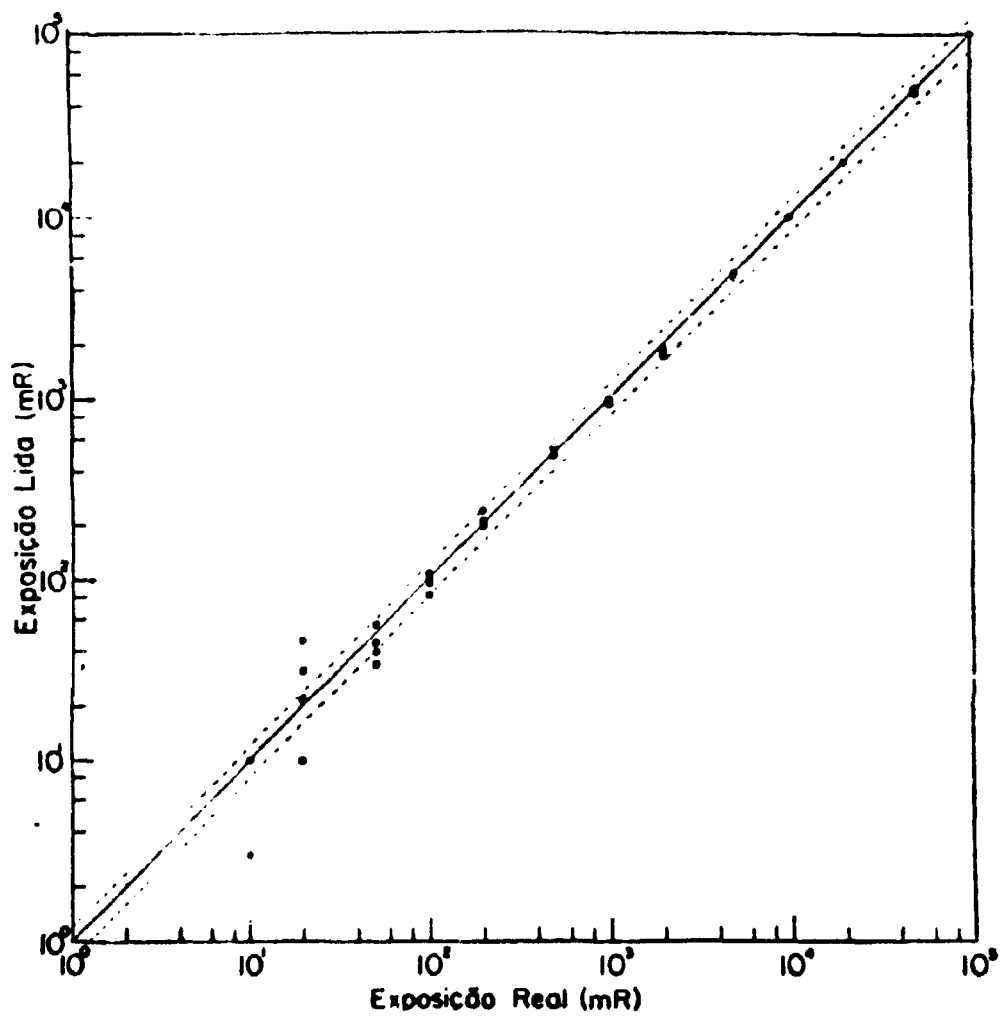


Figura 3.11 - Exposição lida versus exposição real para os vidros RFL tipo FD-P8-1. As linhas tracejadas representam 20% de erro

Quadro III-1

KV <sub>p</sub>	mA	Filtro	Distância (cm)	Rendimento (R/min)	Tempo	HVL	Energia (KeVef)	Exp. (R)	Local da irrad.
40	2	0,5 mm/Al	30	7,2	2min 47s	0,50 mm/Al	12,0	20	H.A.C.C.
60	3	1,0 mm/Al	30	12,0	1min 40s	1,05 mm/Al	20,0	20	H.A.C.C.
70	20	2,0 mm/Al	50	27,0	44s	2,00 mm/Al	28,0	20	H.S.P.E.
100	1	3,0 mm/Al	30	4,2	4min 45s	3,30 mm/Al	34,0	20	H.A.C.C.
120	20	0,2 mm/Cu	50	37,0	32s	0,3 mm/Cu	49,0	20	H.S.P.E.
140	5	0,25 mm/Cu	-	-	-	0,525 mm/Cu	53,0	20	H.A.C.C.
140	20	0,5 mm/Cu	50	29,0	41s	0,65 mm/Cu	67,0	20	H.S.P.E.
200	5	0,5 mm/Cu	-	-	-	1,1 mm/Cu	82,0	20	H.A.C.C.
220	5	1,0 mm/Cu	-	-	-	1,6 mm/Cu	97,0	20	H.A.C.C.
250	15	2,0 mm/Cu	50	46,5	26s	3,4 mm/Cu	147,0	20	H.S.P.E.

onde:

KV<sub>p</sub> = Quilovoltagem do aparelho de raios-X

mA = Corrente, em miliampere, no filamento

Tempo = Tempo de exposição do filme aos raios-X

HVL (half value layer) = Camada semi-redutora

H.S.P.E. = Hospital do Servidor Público do Estado de São Paulo

H.A.C.C. = Hospital A. C. Camargo



onde  $I_0$  é a intensidade da radiação incidente no absorvedor,  $I$  a intensidade transmitida através do absorvedor,  $\mu$  o seu coeficiente de absorção linear e  $x$  a sua espessura. Pelo método usado, temos:  $I = \frac{I_0}{2}$  quando  $x = \text{HVL}$ . Portanto um cálculo simples dá:

$$\mu = \frac{\ln 2}{\text{HVL}} = \frac{0,693}{\text{HVL}}$$

Dividindo-se  $\mu$  pela densidade do material, tem-se o coeficiente de absorção de massa  $\mu/\rho$  e usando-se o gráfico de  $\mu/\rho$  x Energia, encontrado na pág. 447 da referência<sup>(15)</sup>, determina-se a energia da radiação.

#### b) – Irradiação com $^{137}\text{Cs}$

Cinco dosímetros de cada espécie foram irradiados com  $^{137}\text{Cs}$  no Departamento de Biologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo<sup>(\*)</sup>, com exposições iguais àquelas das irradiações com raios-X, isto é, 20R.

A fonte de  $^{137}\text{Cs}$  foi calibrada com o Condenser R-Meter modelo 553 da Victoreen, cuja precisão é de 5% de acordo com a National Bureau of Standards dando  $(0,68 \pm 0,03)$  R/minuto a 50 cm de distância.

#### c) – Irradiação com $^{60}\text{Co}$

Foram usados os resultados dos dosímetros irradiados com 20 R na experiência da secção 1.

#### d) – Irradiações Repetidas

Para os filmes foi necessário repetir as irradiações com raios-X,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$  porque houve saturação da película de alta sensibilidade. A nova irradiação foi feita com exposição de 200 mR e para a qual foram obtidos bons resultados. As condições para essas irradiações são vistas no Quadro III-2.

#### e) – Resultados

##### – Filmes

A resposta dos filmes em função da energia da radiação é mostrada na Figura 3-12. Nessa figura aparecem duas curvas: uma representa as densidades óticas com o filtro de chumbo, e a outra com a janela aberta. Nota-se que a resposta com o filtro de chumbo é menos dependente da energia, pois, as radiações menos energéticas são blindadas mais facilmente que as mais energéticas e consequentemente sua sensibilidade cai com a qualidade decrescente. Na região de 40 KeVef existe forte dependência com a energia da radiação; a razão entre as respostas em 40 KeVef e 1 MeV é aproximadamente 10 com a janela aberta e 3 com o filtro de chumbo.

A explicação disso é que o número atômico efetivo do brometo de prata é maior que o do ar, e isto, conforme o gráfico de variação das respostas com o número atômico efetivo, à página 16 da referência<sup>(6)</sup>, implica numa dependência com a energia da radiação.

##### – TLD-100

O TLD-100, como é visto através da Figura 3-13, é pouco dependente da energia da radiação. Isso é devido ao fato de seu número atômico efetivo ser muito próximo do número

(\*) Esta fonte é uma doação da Fundação Rockefeller ao Departamento de Biologia.

Quadro III-2

KV <sub>p</sub>	mA	Filtro	Distância (cm)	Rendimento (R/min)	Tempo	Energia (KeVef)	Exp (mR)	Local de irrad.
70	2	2,0 mm/Al	150	0,300	40,0s	28,0	200	H.S.P.E.
100	2	4,0 mm/Al	150	0,354	33,9s	37,0	200	H.S.P.E.
120	2	0,2 mm/Cu	150	0,411	29,2s	49,0	200	H.S.P.E.
140	5	0,5 mm/Cu	150	0,322	37,2s	67,0	200	H.S.P.E.
250	2	2,0 mm/Cu	150	0,688	17,5s	147,0	200	H.S.P.E.

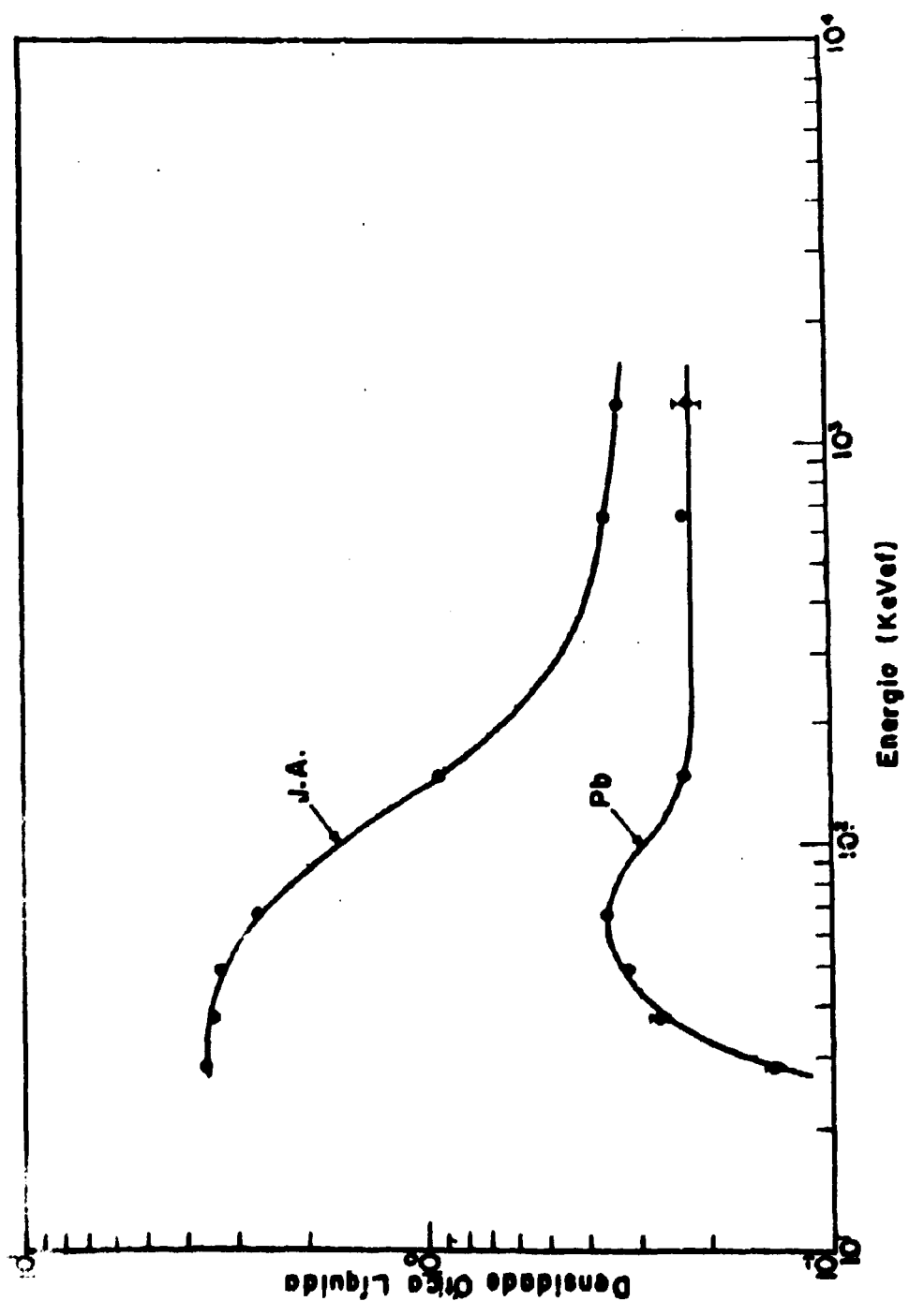


Figura 3.12 - Curva de resposta em função da energia da radiação para os filmes dosimétricos de alta sensibilidade

atômico efetivo do ar. A TL em 40 KeVef é aproximadamente 1,8 vezes maior que em 1 MeV. Deve-se observar que esse resultado foi obtido usando-se um porta-dosímetro de plástico cujas paredes têm 3 mm de espessura e no qual o equilíbrio eletrônico, para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , não é atingido; para que o fosse, seria necessário<sup>(6)</sup> uma parede de 4,5 mm de espessura. Como na região de 40 KeVef o equilíbrio eletrônico é atingido nos 3 mm de plástico, as respostas do TLD-100 são intensificadas nessa região, e não o são na região de 1 MeV. Daí obtermos o fator de 1,8 em vez de 1,3 encontrado na literatura

A pequena dependência com a energia e o fato de ser o LiF quase equivalente ao tecido vivo, faz do TLD-100 um material de ótima qualidade para a dosimetria pessoal.

#### – $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

A resposta versus energia para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  é mostrada na Figura 3-13. A resposta desse material é fortemente dependente da energia na região de 40 KeVef. Isso é devido ao fato do  $Z_{\text{ef}}$  (número atômico efetivo) do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  ser maior que o  $Z_{\text{ef}}$  do ar. A razão entre as respostas em 40 KeVef e 1 MeV é aproximadamente 11. Como já foi observado, a sua sensibilidade à radiação na região de 1 MeV é aproximadamente 14 vezes maior que a do TLD-100 e na região de 35 KeVef aproximadamente 86 vezes. Apesar de sua dependência com a energia, o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  é um excelente material para a dosimetria pessoal onde as baixas exposições são muito frequentes.

#### – Hot Press

A curva de resposta do "hot press" com a energia não foi feita por falta de material.

#### – Vidros RFL Tipo FD-P6-1

A resposta desses vidros à radiação, em função da energia pode ser vista na Figura 3-14. Como os materiais anteriores, os vidros RFL também apresentam forte dependência com a energia da radiação na região de 50 KeVef. A resposta em 50 KeVef é aproximadamente 7 vezes maior que em 1 MeV. O motivo é o mesmo explicado para os outros dosímetros.

#### – Vidros RFL Tipo FD-P8-1 Usados com o Porta-Dosímetro BD-2 da Toshiba

Esse dosímetro apresenta boa característica quanto a dependência com a energia, como se vê na Figura 3-14, pois, devido ao filtro de 0,9 mm de espessura de Sn contido no porta-dosímetro, essa dependência é pequena entre 80 KeVef e 1 MeV, porém, perde na sensibilidade e precisão para energias baixas.

Além disso, como já foi observado, a sua resposta já é dada em roentgen, não havendo necessidade de se traçar curva de calibração.

### 3) – Verificação da Linearidade das Respostas dos Dosímetros em Função da Energia da Radiação

Se as respostas dos dosímetros, em função da exposição, forem lineares para qualquer energia, poder-se-á usar um fator de correção (para a energia), e as exposições poderão ser determinadas usando-se a curva de calibração para os raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ .

Como, para o TLD-100, já foi verificado<sup>(13)</sup> que até cerca de  $10^3\text{R}$  há linearidade nas respostas para as energias entre 25 e 662 KeVef, fez-se a verificação, somente para 37 KeVef e 1,25 MeV, onde os dosímetros apresentam respectivamente a maior e a menor resposta por roentgen, admitindo que, para as energias intermediárias, o mesmo comportamento tem lugar. Para os outros tipos de dosímetros, supoz-se que os mesmos se comportam da mesma maneira que o TLD-100.

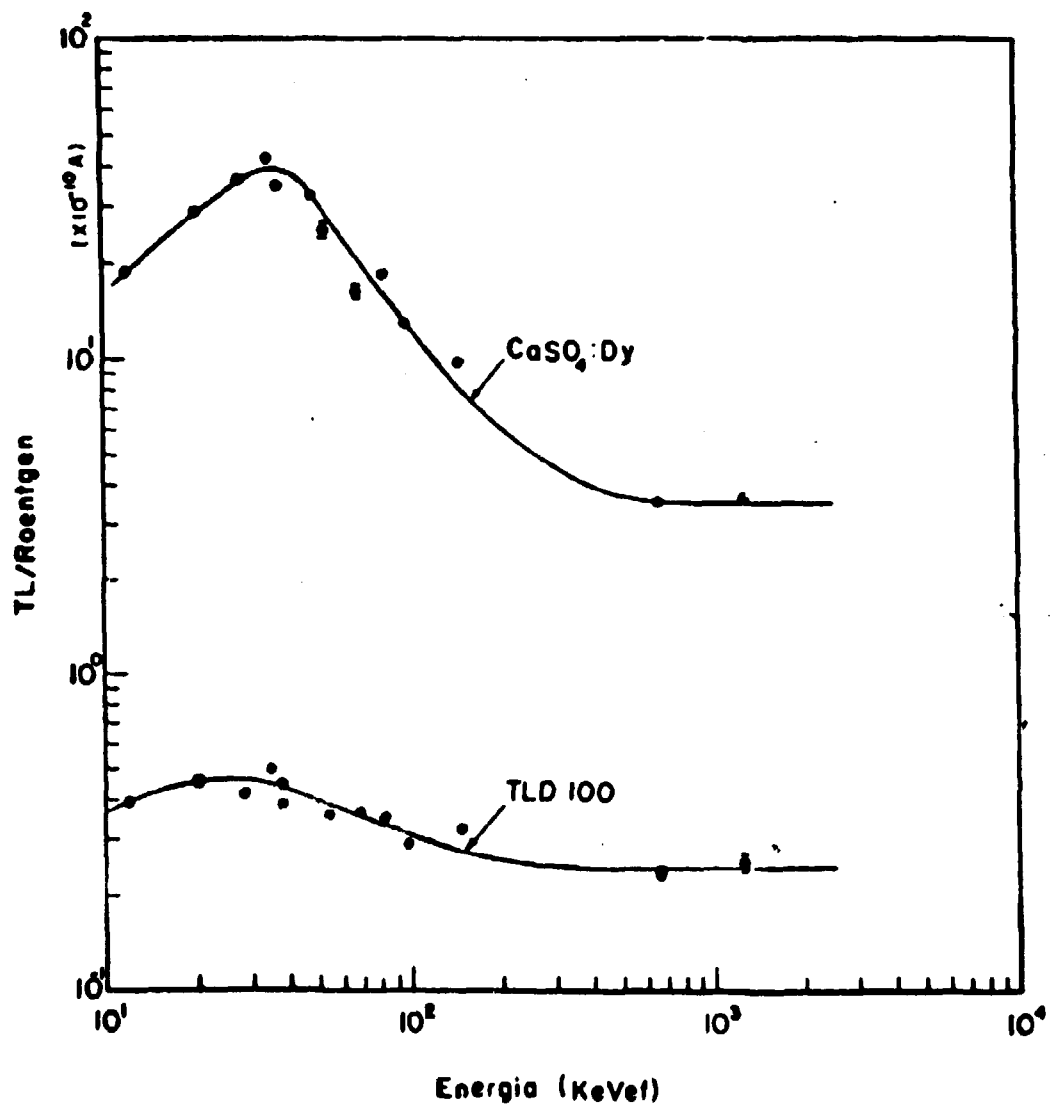


Figura 3.13 - Curva de resposta em função da energia de radiação para o TLD-100 e para os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .

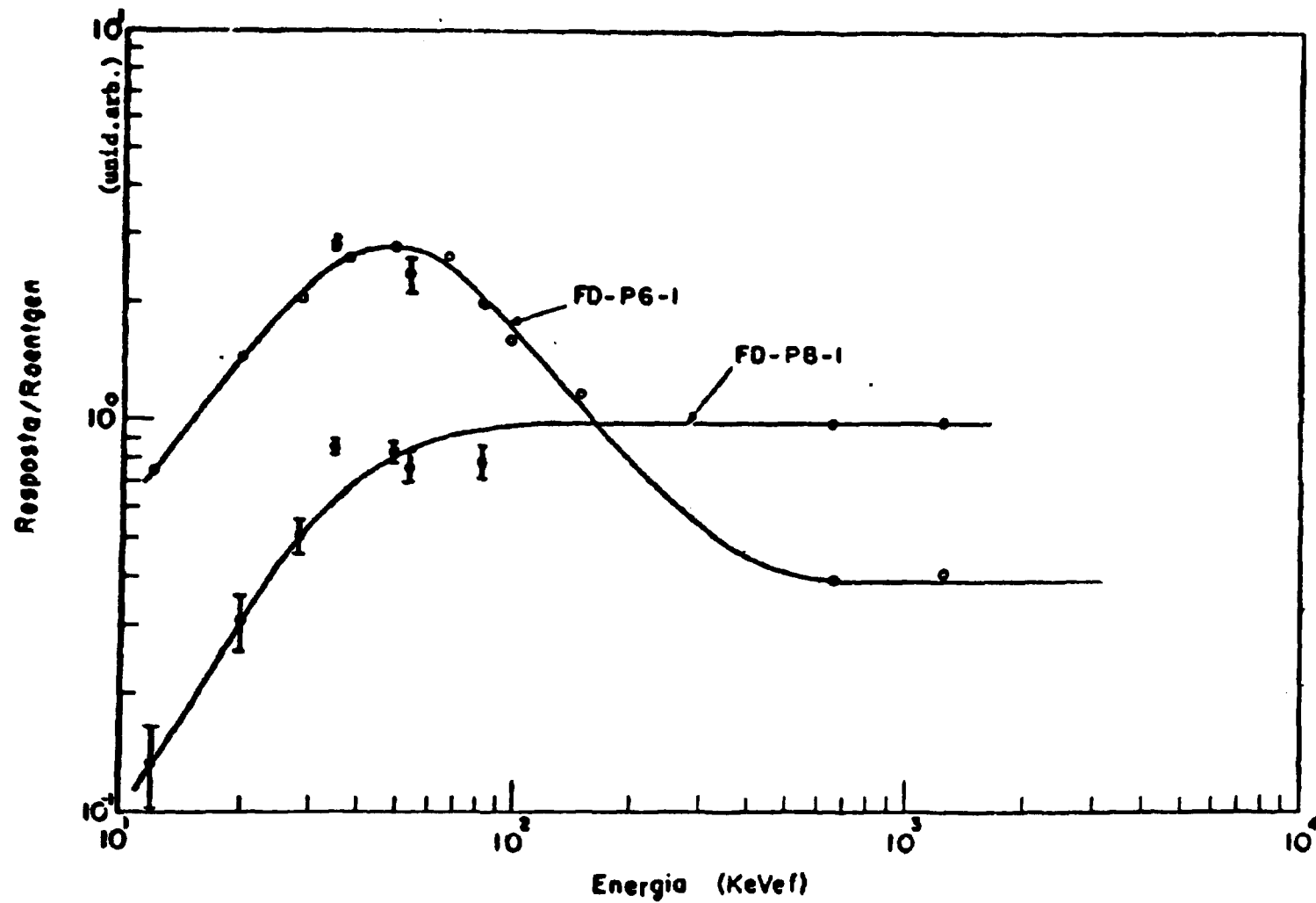


Figura 3.14 - Curva, de resposta em função da energia da radiação para os vidros RFL tipo FD-P6-1 e FD-P8-1 da Toshiba. Os vidros tipo FD-P8-1 foram irradiados com o porta-dosímetro BD-2 da Toshiba

Irradiou-se, então, 4 dosímetros de cada tipo, com exceção dos vidros RFL tipo FD-P6-1, por ter-se concluído, com os resultados já existentes, que os vidros do tipo FD-P6-1 são os mais convenientes para a dosimetria pessoal. As irradiações foram feitas com raios-X de 37 KeVef e com exposições de 300 mR, 700 mR, 1 R, 2 R, e 5 R. Essas irradiações foram feitas dentro de 5% de erro no Hospital do Servidor Público do Estado de São Paulo e nas condições indicadas no Quadro III-3.

As respostas dos diferentes dosímetros foram levadas respectivamente para as Figuras 3-1, 3-2, 3-6, e 3-9. Nessas figuras vê-se que em 37 KeVef, tem-se, para todos os tipos de dosímetros, com exceção dos filmes de baixa sensibilidade, uma reta que é paralela à reta de resposta para os raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ . A reta de calibração do TLD-100, para 37 KeVef, indicada na Figura 3-4 foi traçada com o auxílio da Figura 3-13 determinando-se a razão entre as leituras em 37 KeVef e 1 MeV; essa razão foi mantida constante na Figura 3-4, pois, segundo Cameron<sup>(13)</sup> e outros, ela é independente da exposição até cerca de  $10^3$  R.

Para os filmes (incluindo os de alta e de baixa sensibilidade), apesar dos mesmos não responderem linearmente à exposição, verificou-se, pelas Figuras 3-1 e 3-2, que no intervalo de exposição estudado, isto é, de aproximadamente 300 mR e até 20 R, a razão entre as respostas em 37 KeVef e em 1 MeV é independente da exposição.

Para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e para os vidros RFL, de acordo com as Figuras 3-6 e 3-9, respectivamente, foi verificado até a exposição de 20 R, que as respostas são lineares para a energia de 37 KeVef.

**Observação:** Como foi visto, os filmes foram irradiados para 4 finalidades diferentes: 1) verificação das respostas em função da exposição, 2) verificação da dependência da resposta com a energia, 3) verificação da linearidade das respostas dos dosímetros em função da energia da radiação, e 4) determinação do poder de detetabilidade e verificação da reprodutibilidade. Os lotes de filmes correspondente a cada uma dessas experiências foram irradiados e revelados em épocas diferentes.

#### 4) – Determinação do Poder de Detetabilidade de Cada um dos Diferentes Dosímetros para a Energia dos Raios-Gama do $^{60}\text{Co}$

Por poder de detetabilidade de um dosímetro entende-se a menor exposição que este deteta com um erro de  $\pm 20\%$ . A escolha de  $\pm 20\%$  é arbitrária.

Para essa finalidade foram irradiados 4 dosímetros de cada tipo para cada uma das seguintes exposições: 2 mR, 5 mR, 7,5 mR, 10 mR, 20 mR, 30 mR e 60 mR. Para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  foi feita também uma irradiação com 1 mR.

Essas irradiações foram feitas no Instituto de Energia Atômica com a fonte calibrada de  $^{60}\text{Co}$  e nas mesmas condições de irradiação citadas na secção 1.

Esta experiência é muito importante, pois, as exposições mais frequentes na monitoração pessoal estão próximas ao poder de detetabilidade dos dosímetros. Além disso, precisamos saber qual o grau de confiança que devemos dar às leituras dos dosímetros para exposições no intervalo de 5 mR a 100 mR.

Inicialmente, após todos os dosímetros terem sido lidos, foi feita uma extensão das curvas de calibração para exposições inferiores a 10 mR, embora, nesta segunda calibração, tenham sido incluídas exposições entre 10 e 50 mR. (Vide Figuras 3-15 e 3-16). Feito isso, a determinação das exposições foi feita usando-se essas curvas de calibração.

Em seguida foram calculados os desvios padrões de cada exposição lida, e o resultado é visto na Figura 3-17. Vê-se que, até aproximadamente 100 mR a classificação dos dosímetros na ordem decrescente de fidelidade é:

Quadro III.3

KV <sub>p</sub>	mA	Filtro	Distância (cm)	Rendimento (R/min)	Tempo	HVL	Energia (KeVef)	Exp. (mR)
100	4	4 mm/Al	150	0,708	25,5s	4,1 mm/Al	37,0	300
100	4	4 mm/Al	150	0,708	59,3s	4,1 mm/Al	37,0	700
100	10	4 mm/Al	150	1,770	34,0s	4,1 mm/Al	3,0	1000
100	10	4 mm/Al	150	1,770	1min 8s	4,1 mm/Al	37,0	2000
100	10	4 mm/Al	150	1,770	2min 50s	4,1 mm/Al	37,0	5000



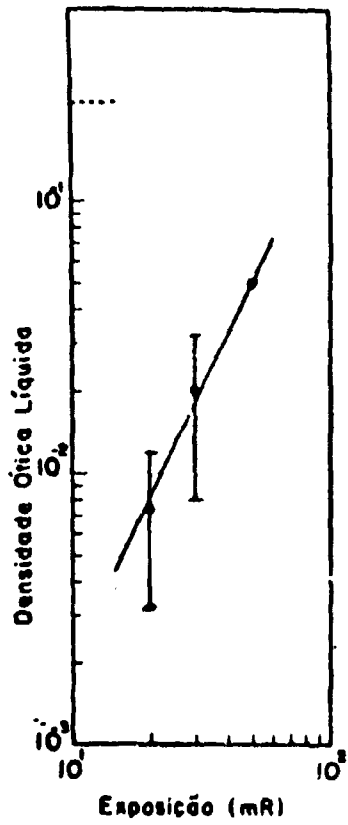


Figura 3.15 - Curva de calibração dos filmes dosimétricos de alta sensibilidade para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ .

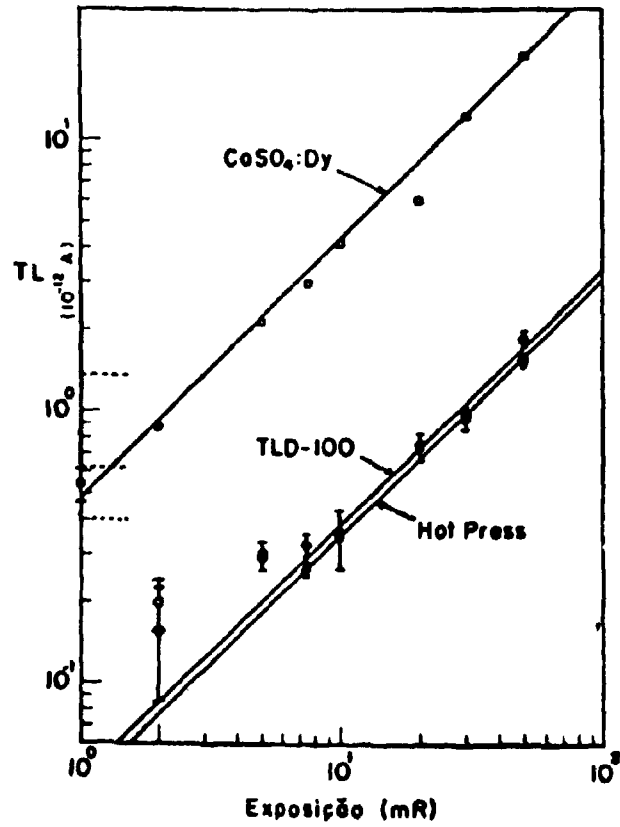


Figura 3.18 - Curvas de calibração dos dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , TLD-100 e Hot Press para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ .

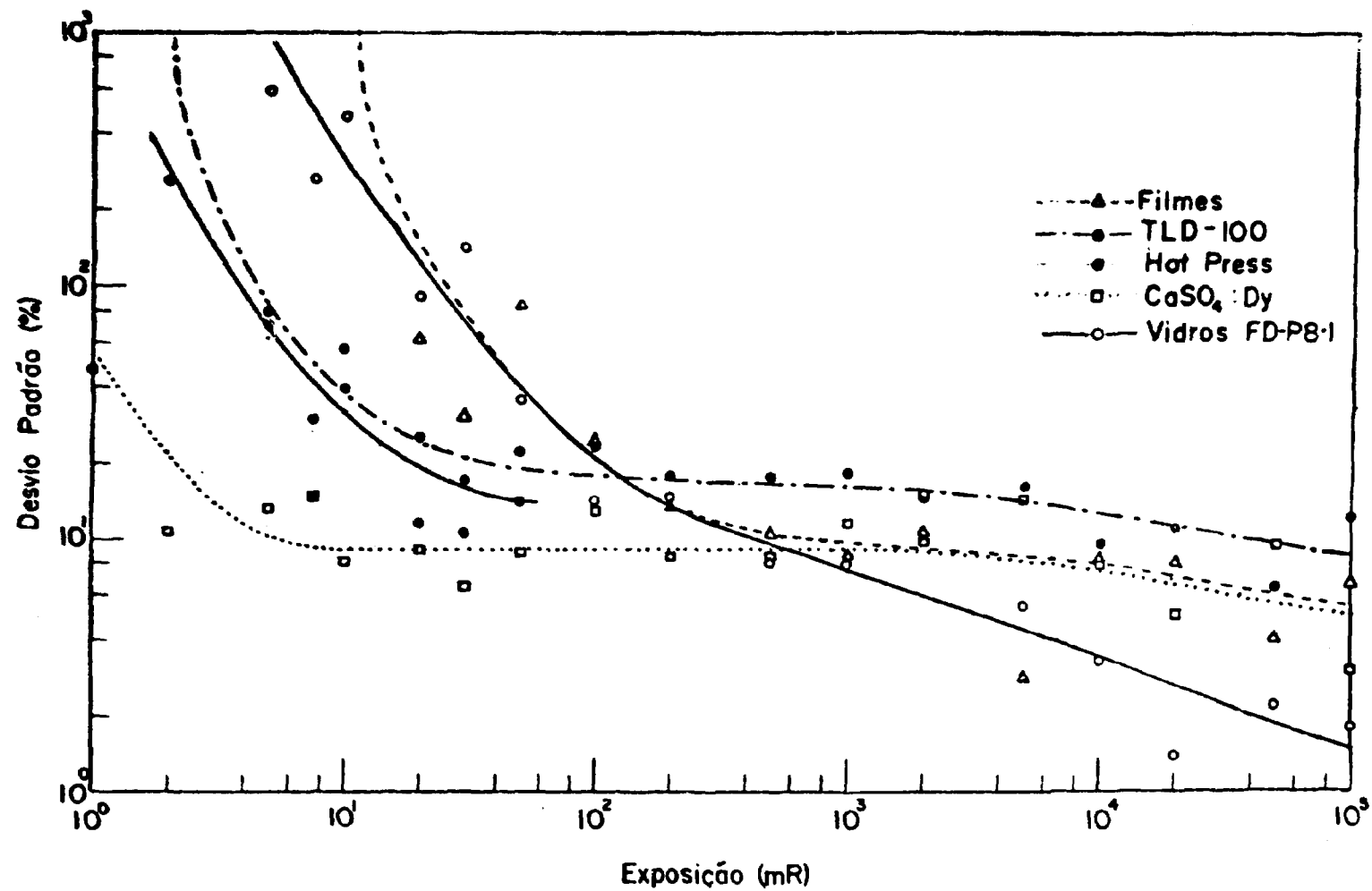


Figura 3.17 - Flutuação nas leituras dos diversos tipos de dosímetros para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , em função da exposição.

- 1 -  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
- 2 - Hot Press
- 3 - TLD-100
- 4 - Vidros RFL
- 5 - Filmes

De 100 mR a aproximadamente 500 mR

- 1 -  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
- 2 - Vidros RFL
- 3 - Filmes
- 4 - TLD-100

De 500 mR a 100 R

- 1 - Vidros RFL
- 2 -  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
- 3 - Filmes
- 4 - TLD-100

Diz-se que um dosímetro é fiel quando tendo recebido uma dada exposição em mR (ou R), a leitura é exatamente a exposição recebida, na mesma unidade.

O Quadro III-4 dá uma boa visão da fidelidade relativa dos diferentes dosímetros para diferentes exposições. Os filmes não detetam nada até 10 mR e a 20 mR apresentam erros da ordem de 160%, começando medir com erro de 20% a partir de 100 mR. Depois, os desvios vão diminuindo gradualmente até o valor de 5,5% em 100 R.

O TLD-100 não deteta nada até 2 mR sendo que em 5 mR o erro é aproximadamente 80% baixando para aproximadamente 21% em 30 mR. De 30 mR para cima o erro diminui gradativamente até 8,5% em 100 R.

O "hot press" tem o comportamento análogo ao TLD-100, porém responde com menor erro pelo motivo já explicado, isto é, devido ao fato de que o mesmo é sólido e possui uma massa fixa, não havendo portanto variação apreciável na quantidade de material TL usado na leitura e nem na maneira como o pó é distribuído na bandeja.

O  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  responde à exposição de 1 mR com 56% de erro; para 2 mR apenas 20% de erro, e de 10 mR para cima, o desvio decresce até aproximadamente 5% em 100 R. Vê-se portanto, que esse material é de fato o mais sensível dentre os três fósforos estudados.

Os vidros RFL tipo FD-P8-1 usados com o porta-dosímetro BD-2 da Toshiba, apresentam um erro de 300% em 10 mR, diminuindo para 40% em 50 mR e 20% em 100 mR. Acima de 100 mR, o desvio diminui gradativamente até 1,5% em 100 R.

O Quadro III-5 mostra as exposições que respondem com 30%, 20% e 17% de erro, para cada tipo de dosímetro. Verifica-se que, até aproximadamente 130 mR, os dosímetros TL são os mais sensíveis e dentre eles, na ordem decrescente de fidelidade estão o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , o "hot press" e o TLD-100. Os vidros RFL e os filmes apresentam praticamente as mesmas exposições mínimas para os erros acima indicados. Acima de 130 mR os desvios tornam-se maiores para os filmes que para os vidros, conforme Figura 3-17.

Quadro III.4

FIDELIDADE – DESVIOS PADRÕES (%)

Exposição	1mR	2mR	5mR	10mR	20mR	30mR	50mR	100mR	200mR	500mR	1R	2R	5R	10R	20R	50R	100R
Filmes	—	∞	∞	∞	160	80	40	20	14	10	9,5	9	8,5	8	7	6	5,5
TLD-100	—	∞	80	38	25	21	19	18	17	16,5	16	15,5	14	13	11	9,5	8,5
Hot Press	—	280	70	30	19	16	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CaSO <sub>4</sub> :Dy	56	20	10	9	9	9	9	9	9	9	9	8,8	8	7,5	6,5	6,5	5
Vidros RFL	—	—	1000	300	120	70	40	20	13	9,5	7,5	6	4,5	3,5	2,6	1,9	1,5

Quadro III-5

Exposições Mínicas Sujeitas a Erros de 17%, 20% e 30%

Desvio Padrão	30%	20%	17%
Filmes	65 mR	100 mR	130 mR
TLD-100	13 mR	35 mR	200 mR
Hot Press	10 mR	18 mR	25 mR
CaSO <sub>4</sub> :DY	1,5 mR	2 mR	2,5 mR
Vidros RFL Tipo FD-PB-1	65 mR	100 mR	130 mR

### 5) - Flutuação na Reprodutibilidade dos Diferentes Tipos de Dosímetros para a Energia do $^{60}\text{Co}$

Para esta determinação, foram usadas as mesmas respostas dos dosímetros obtidos na secção anterior. A diferença entre os cálculos da secção anterior e os cálculos desta secção é que no primeiro foram calculados os desvios das exposições lidas em relação às exposições reais dadas aos dosímetros. No caso presente, os desvios foram calculados levando-se em conta somente a variação das respostas entre os dosímetros de mesma espécie. Os resultados são mostrados na Figura 3.18. Nota-se que até aproximadamente 200 mR a classificação dos dosímetros em ordem decrescente de reprodutibilidade é a seguinte:

- 1 -  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
- 2 - Hot Press
- 3 - TLD-100
- 4 - Vidros RFL
- 5 - Filmes

De 200 mR até aproximadamente 10 R.

- 1 -  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
- 2 - Vidros RFL
- 3 - TLD-100
- 4 - Filmes

O Quadro III-6 oferece uma visão da reprodutibilidade relativa dos dosímetros para várias exposições. Observa-se que os filmes praticamente não são reprodutíveis para exposições iguais ou abaixo de 30 mR. Para 100 mR são reprodutíveis dentro de 19% de erro, para 200 mR dentro de 14%, para 500 mR dentro de aproximadamente 9%; depois esse desvio diminui gradativamente para 3% em 100 R.

O TLD-100 não é reprodutível para exposições iguais ou inferiores a 5 mR. Para 10 mR é reprodutível dentro de aproximadamente 32%, para 20 mR dentro de aproximadamente 21%, para 50 mR dentro de 14%, para 100 mR dentro de 11%; esse desvio continua decrescendo até 3% em 100 R.

O "hot press" não é reprodutível para exposições iguais ou inferiores a 2 mR. Para 5 mR é reprodutível dentro de 30%, para 10 mR dentro de 20%, para 30 mR dentro de 10% e para 100 mR dentro de 8%.

O  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  não é reprodutível em 1 mR, porém em 2 mR sua reprodutibilidade varia dentro de aproximadamente 11%; em 5 mR dentro de 3%, 10 mR dentro de 2% e de 20 mR em diante, dentro de 1,5%. Portanto, com relação a esta propriedade, não há dúvida quanto a sua superioridade em relação aos outros dosímetros.

Os vidros RFL tipo FD-PB-1 usados com o porta-dosímetro BD-2 da Toshiba não são reprodutíveis para exposições iguais ou inferiores a 30 mR. Em 50 mR são reprodutíveis dentro de 25%, em 100 mR dentro de aproximadamente 15%, em 200 mR dentro de 8,5%; esse desvio continua diminuindo até 0,9% em 100 R.

O Quadro III-7 possibilita uma avaliação mais nítida das exposições mínimas que são reprodutíveis dentro de 10, 20 e 30%. Vê-se claramente que os materiais TL são os mais reprodutíveis, vindo em seguida os vidros RFL e por último os filmes.

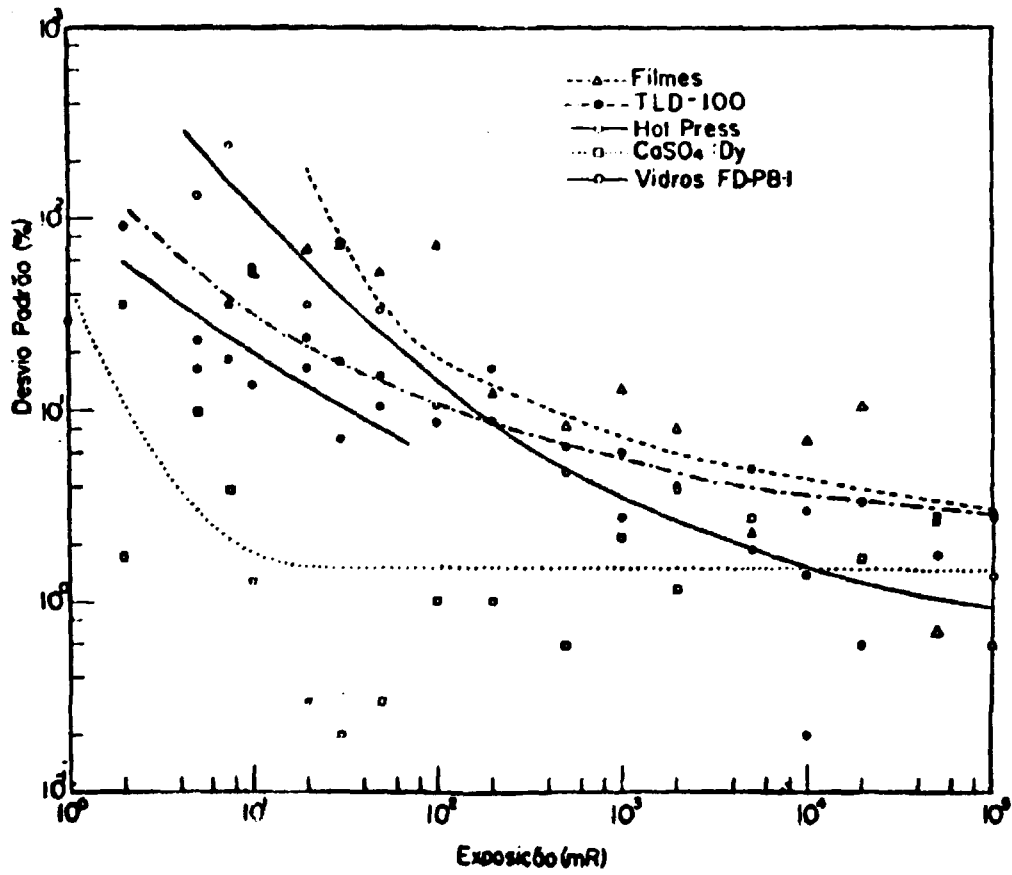


Figura 3.18 - Flutuação na reprodutibilidade dos diversos tipos de dosímetros para a energia dos raios gama do <sup>60</sup>Co, em função da exposição.

Quadro III.6

REPRODUTIBILIDADE – DESVIOS PADRÕES (%)

Exposição	1mR	2mR	5mR	10mR	20mR	30mR	50mR	100mR	200mR	500mR	1R	2R	5R	10R	20R	50R	100R
Filmes	–	∞	∞	∞	150	80	35	19	13	9,3	7,2	6	5	4,5	4	3,5	3
TLD-100	–	120	65	32	21	18	14	11	8,5	6,5	5,6	5,5	4	3,6	3,4	3,2	3
Hot Press	–	60	30	20	13	10	8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CaSO <sub>4</sub> :Dy	50	11	3	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Vidros RFL	–	–	250	110	60	40	25	14	8,5	5	3,5	2,7	1,9	1,5	1,3	1	0,9



Quadro III-7

Exposições Mínicas com Reprodutibilidade dentro de 10%, 20% e 30%

Desvio Padrão	30%	20%	10%
Filmes	60 mR	90 mR	400 mR
TLD-100	11 mR	22 mR	120 mR
Hot Press	5 mR	10 mR	30 mR
CaSO <sub>4</sub> :Dy	1,2 mR	1,5 mR	2 mR
Vidros RFL Tipo FD-P8-1	40 mR	65 mR	160 mR

## PARTE B

### Experiência em Condições não Controladas – Monitoração Pessoal

#### 1) – Finalidade e Procedimentos

Esta experiência tem a finalidade de verificar o comportamento relativo dos diferentes dosímetros em condições não controladas de uso, isto é, na monitoração pessoal onde os dosímetros são expostos à radiações de energias desconhecidas, e a incidência dessas radiações se dá em todos os ângulos possíveis e em condições ambientais de temperatura, umidade, gases, etc. muito variadas.

Para esta experiência os badges compostos, já referidos no capítulo II, foram distribuídos para 90 funcionários do Instituto de Energia Atômica, e em 10 pontos de área dentro do prédio do reator IEA-R1, segundo código de identificação marcado em cada badge. Os dosímetros foram distribuídos da seguinte maneira:

Badge composto de número 1 a 11 contendo TLD-100,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , 1 hot press, 1 vidro FD-P6-1, 2 vidros FD-P8-1 e 1 filme. De 12 a 20 com TLD-100,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , 2 vidros FD-P6-1, 2 vidros FD-P8-1 e 1 filme. De 21 a 26 com TLD-100, 2 vidros FD-P6-1, 2 vidros FD-P8-1 e 1 filme. De 27 a 51 com TLD-100, 2 vidros FD-P6-1 e 1 filme. De 52 a 60 com TLD-100, 1 vidro FD-P6-1 e 1 filme. De 61 a 85 com TLD-100 e 1 filme. De 86 a 91, usados nos pontos de área, com TLD-100,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , 2 vidros FD-P6-1, 2 vidros FD-P8-1 e 1 filme. De 92 a 96 com TLD-100 e 1 filme. De 97 a 100, também usados em pontos de área, com TLD-100,  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , 2 vidros FD-P6-1, 2 vidros FD-P8-1 e 1 filme.

Esses badges compostos foram usados durante 2 meses e 20 dias e recolhidos.

Como durante o tempo de uso dos filmes pelos funcionários existe o problema do desvanescimento da imagem latente, procurou-se diminuir o mesmo revelando os filmes de calibração, isto é, os filmes irradiados com exposições conhecidas de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e raios-X, 1 mês após a irradiação dos mesmos, a fim de permitir que esses filmes tivessem também um período de desvanescimento.

Para que o efeito de revelação fosse o mesmo tanto nos filmes de calibração como nos filmes usados pelo pessoal, a revelação de todos eles foi feita de uma só vez e num mesmo banho revelador. Com isso diminuiu-se a probabilidade de enegrecimento diferente, devido diferenças de condições dos banhos e prováveis erros nos tempos de revelação.

No caso dos vidros RFL, a leitura foi feita 24 horas após a irradiação devido ao efeito de build-up<sup>(12)</sup> que é um aumento na emissão RFL depois da irradiação.

Os outros materiais foram lidos após a irradiação.

#### 2) – Determinação da Energia Efetiva das Radiações

##### a) – Pelos Filmes

Como já foi mencionado, o porta-filme usado possui um conjunto de filtros que permite a determinação da energia efetiva da radiação incidente. Esses filtros são: 0,5 mm de Pb, 0,5 mm de Cd, 0,5 mm de Cu, plástico e janela aberta (Vide Figura 2-2-b).

A determinação das energias efetivas das radiações às quais os filmes foram expostos, foi feita através da razão entre as densidades óticas sob a janela aberta e sob o filtro de chumbo.

Essa razão é levada no gráfico III-19 onde é determinada a energia efetiva da radiação incidente. Esse gráfico foi construído a partir da Figura 3-12, calculando-se, ponto por ponto, a razão entre as densidades óticas sob a janela aberta e sob o filtro de Pb, para cada energia.

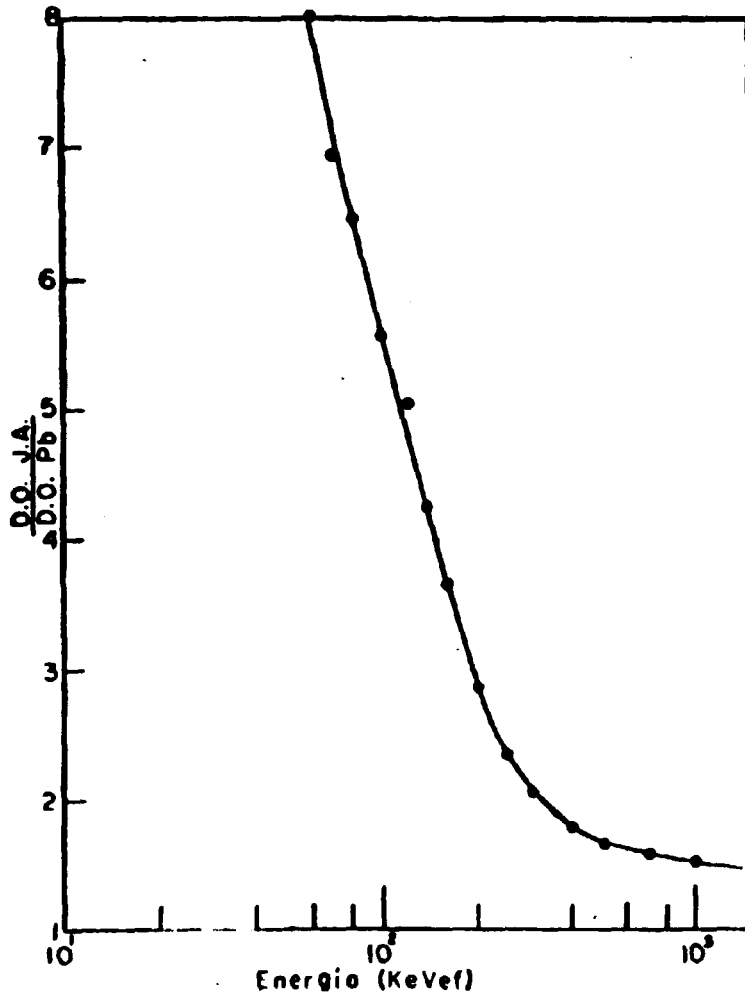


Figura 3.19 - Razão entre densidade ótica na janela aberta e densidade ótica sob o filtro de Pb versus energia da radiação para os filmes dosimétricos de alta sensibilidade.

Em seguida, conforme a rotina do processo, as respostas sob o filtro de Pb foram reduzidas para a energia do  $^{60}\text{Co}$  através do fator de correção determinado na Figura 3-20. Essa figura também foi construída a partir do gráfico III-12, calculando-se a razão entre as densidades óticas com o filtro de Pb, para a energia dos gamas do  $^{60}\text{Co}$  e a densidade ótica, também sob o filtro de Pb, para cada energia abaixo de 1 MeV.

Uma vez que as respostas foram reduzidas para a energia do  $^{60}\text{Co}$ , as exposições foram determinadas através da curva de calibração para essa energia (Figura 3-1).

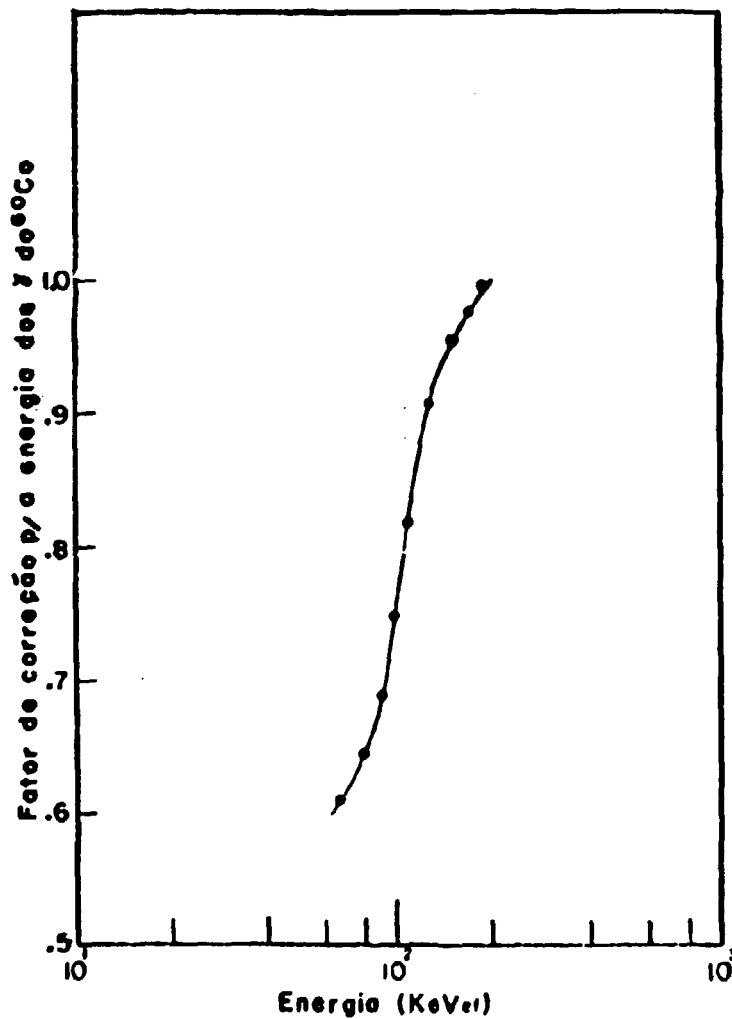


Figura 3.20 - Fator de correção das respostas dos filmes de alta sensibilidade para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , em função da energia da radiação.

Esse processo elimina a necessidade de se traçar curvas de calibração para diversas energias o que é muito trabalhoso e impraticável num serviço rotineiro de dosimetria pessoal, pois, essas calibrações devem ser refeitas cada vez que os banhos de revelação são trocados, e cada vez que se usa filmes com vencimentos diferentes.

Segundo Becker<sup>(4)</sup> mesmo após a correção para a energia, pode haver ainda um erro de um fator de 3 ou mais, devido à presença de radiação beta junto com os fótons, aos erros quando exposições de 50 a 100 mR estão envolvidas, ao ângulo de incidência da radiação, etc.

#### b) – Pelos Materiais TL

A determinação da energia efetiva da radiação através dos materiais TL foi feita calculando-se a razão entre a resposta do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e a resposta do TLD-100, para os casos em que os dois materiais foram usados pela mesma pessoa. Nos outros casos foi usada a energia determinada pelos filmes. Essa razão é levada ao gráfico III-21 onde a energia efetiva é determinada. Esse gráfico foi feito a partir da Figura 3-13, calculando-se as razões entre as leituras do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e as leituras do TLD-100 para cada energia.

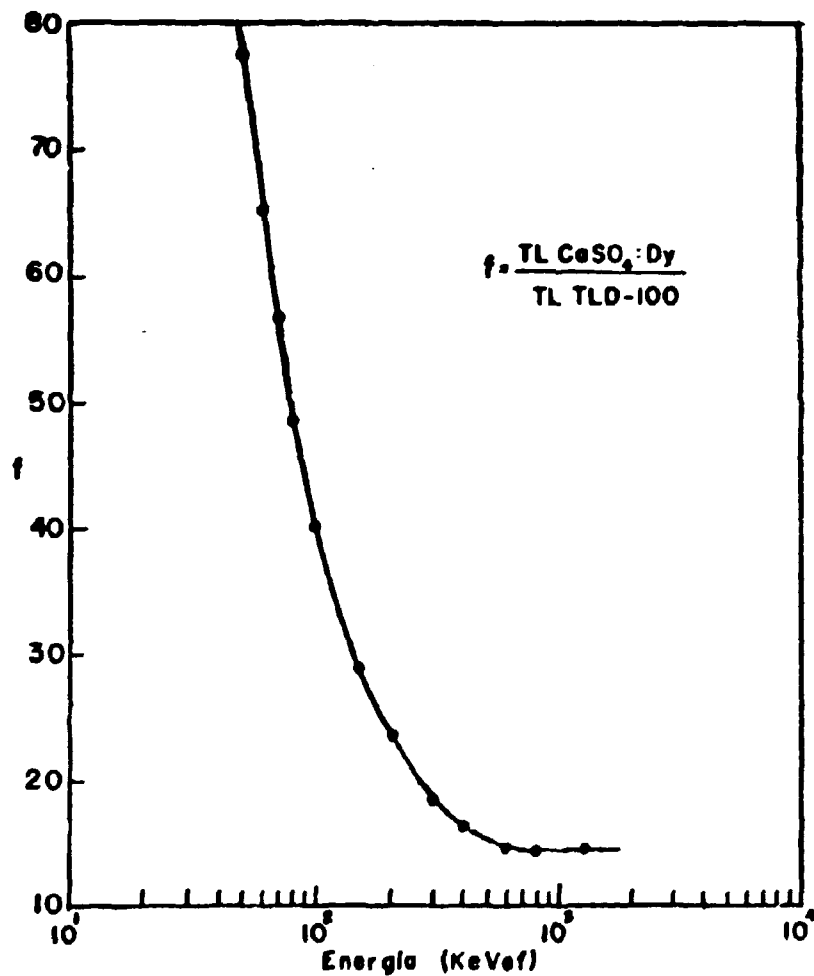


Figura 3.21 – Razão entre TL do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e TL do TLD-100 versus energia da radiação.

Depois de determinada a energia efetiva reduziu-se as respostas dos fósforos para a energia do  $^{60}\text{Co}$  usando-se a Figura 3-22 para o TLD-100 ou 3-23 para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . Essas figuras foram feitas a partir do gráfico III-13 da mesma maneira como foi feito para os filmes.

As respostas reduzidas para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$  foram levadas para os gráficos de calibração com  $^{60}\text{Co}$  (Figura 3-4 ou 3-6) por meio dos quais as exposições foram calculadas.

Mesmo após a correção para a energia da radiação, as exposições lidas estarão afetadas de um erro de  $\sim 23\%$  para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e  $\sim 6\%$  para o TLD-100, nas condições em que a experiência foi feita.

As exposições determinadas pelos vidros RFL tipo FD-P6-1 foram também corrigidas para a energia usando-se os valores determinados pelos filmes. A redução das respostas para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$  foi feita usando-se o gráfico III-24 de modo análogo ao que já foi explicado para os outros dosímetros.

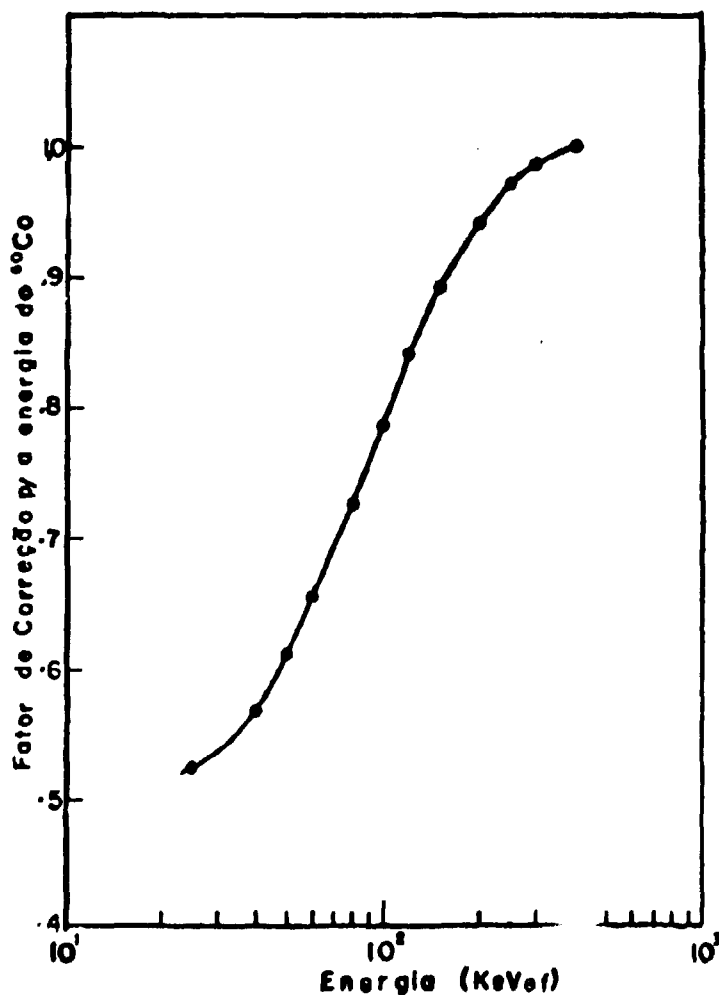


Figura 3.22 - Fator de correção das respostas do TLD-100 para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , em função da energia da radiação.

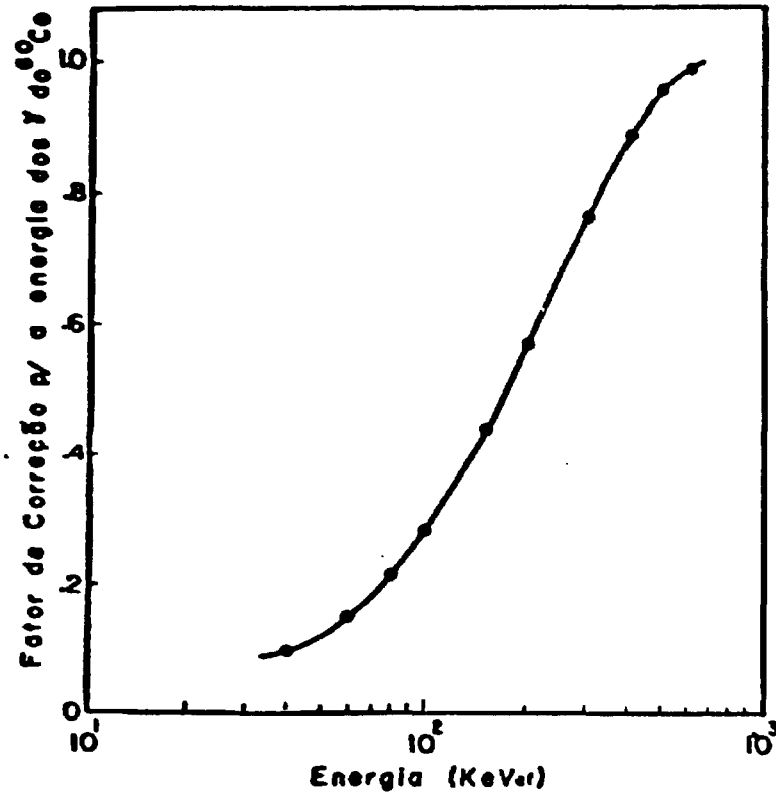


Figura 3.23 — Fator de correção das respostas do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , em função da energia da radiação.

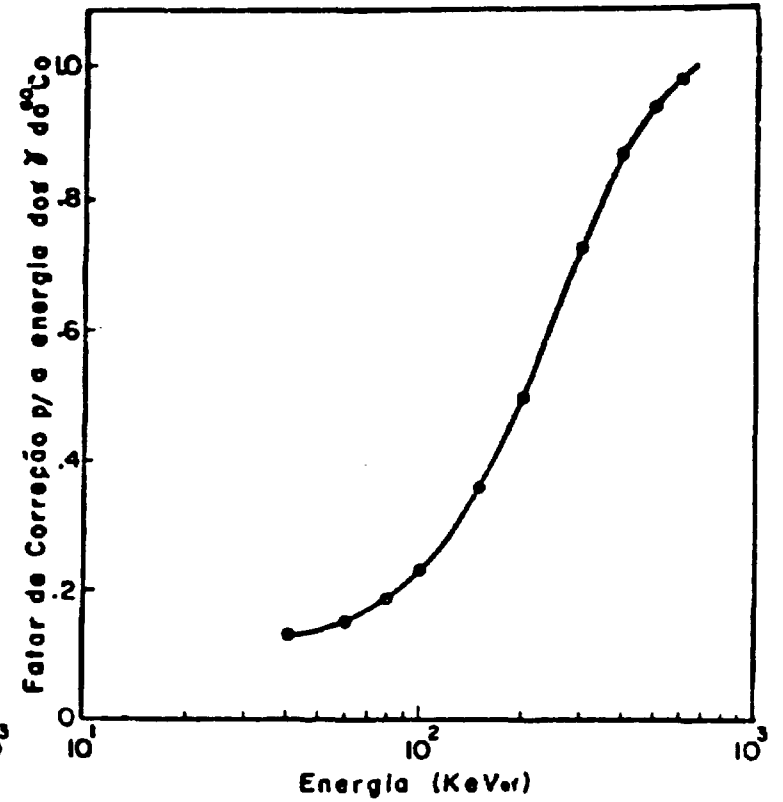


Figura 3.24 — Fator de correção das respostas dos vidros RFL tipo FD-P6-1 para a energia dos raios-gama do  $^{60}\text{Co}$ , em função da energia da radiação.

## 3) - Resultados

## a) - Comportamento Relativo entre os Dosímetros

Os resultados desta experiência são mostrados na Figura 3-25. Essa figura foi elaborada dispoendo no eixo horizontal os filmes em ordem crescente de exposição lida, e no eixo vertical essa exposição lida, na mesma unidade.

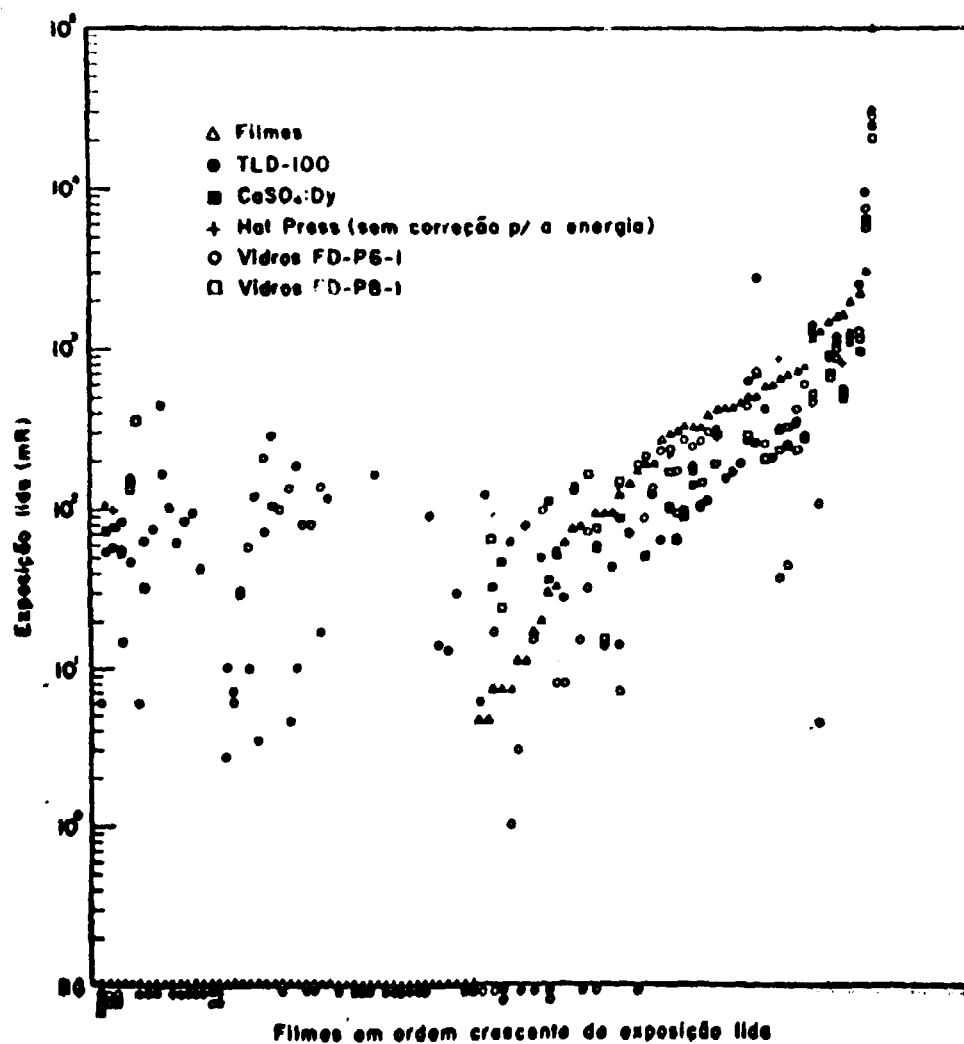


Figura 3.25 - Leitura dos dosímetros usados na monitoração pessoal.



Observa-se que na região em que os filmes não apresentam nenhuma leitura, isto é, abaixo de aproximadamente 5 mR, os dosímetros TL e RFL apresentaram leituras que vão de 0 mR até aproximadamente 300 mR. Observa-se, ainda, que o primeiro filme que não apresentou leitura, concorda com os outros três tipos de dosímetros ao passo que os dosímetros TL correspondentes ao segundo, terceiro, quarto e quinto filmes, também sem leituras, apresentaram resultados entre aproximadamente 54 e 150 mR.

Como foi visto anteriormente, o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  apresenta, para exposições acima de 5 mR, uma precisão de aproximadamente 10% e uma reprodutibilidade de aproximadamente 1,5%. Esse fato, associado às respostas apresentadas pelos dosímetros TL e RFL, mostra que os filmes podem não apresentar nenhuma leitura para exposições abaixo de aproximadamente 150 mR.

Acima de aproximadamente 100 mR lidos, a maioria dos filmes passa a apresentar leituras mais altas que os demais dosímetros.

Os resultados do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  coincidem 14 vezes em 29; isso é uma boa indicação da concordância entre as respostas dos materiais TL.

#### b) – Comparação das Respostas dos Diferentes Dosímetros com a Resposta do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , como foi verificado, são os mais sensíveis, comparado com os demais, ou, em outras palavras, são os que apresentam menor erro na região de baixas exposições ( $< 1 \text{ R}$ ). Por este motivo, fez-se uma comparação das respostas dos demais dosímetros com a resposta do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , de modo semelhante como fizemos no item anterior, tomando o filme como elemento de comparação. O resultado é visto na Figura 3-26.

Verifica-se, por essa figura, que 20 entre 29 dosímetros de TLD-100, concordam com as leituras do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  dentro de 30% de erro e apenas 2 dosímetros não apresentaram nenhum resultado quando os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  leram exposições de 36 a 46 mR. As respostas dos dosímetros sinterizados a quente, conforme foi dito anteriormente, não foram corrigidos para a energia da radiação e seus valores são superiores aos do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . Para os vidros RFL tipo FD-P8-1, 13 entre 29 vidros apresentaram resultados dentro de 30% de erro e apenas 2 leram 0 R quando os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  leram exposições de 73 e 80 mR. Dos 29 vidros RFL tipo FD-P6-1, 9 apresentaram erros dentro de 30% e 6 leram 0 R para exposições entre 32 e 80 mR, lidas pelos dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . Para os filmes, apenas 3 entre 29 leram exposições dentro de 30% em comparação com o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e 4 não apresentaram nenhum resultado quando os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  leram exposições entre 70 e 150 mR.

## CAPÍTULO IV

### DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Inicialmente será feito um sumário dos resultados obtidos.

Como se vê, através das Figuras 3-1 e 3-2 do capítulo anterior, a resposta dos filmes à radiação não é uma função linear da exposição, enquanto que para os materiais TL e RFL essa função é linear dentro de um certo intervalo de exposição, que é de interesse na monitoração do pessoal. A vantagem de ser linear está no fato de que é possível se determinar o fator de linearidade e se calcular a exposição lida sem a necessidade de usar curve de calibração.

Quanto à fidelidade, vê-se, através da Figura 3-17 e dos Quadros III-4 e III-5, que, para exposição de  $\sim 20 \text{ mR}$ , os desvios são: para os filmes  $\sim 160\%$ , para o TLD-100  $\sim 25\%$ , para o "hot press"  $\sim 19\%$ , para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$   $\sim 9\%$ , e para os vidros RFL  $\sim 120\%$ .

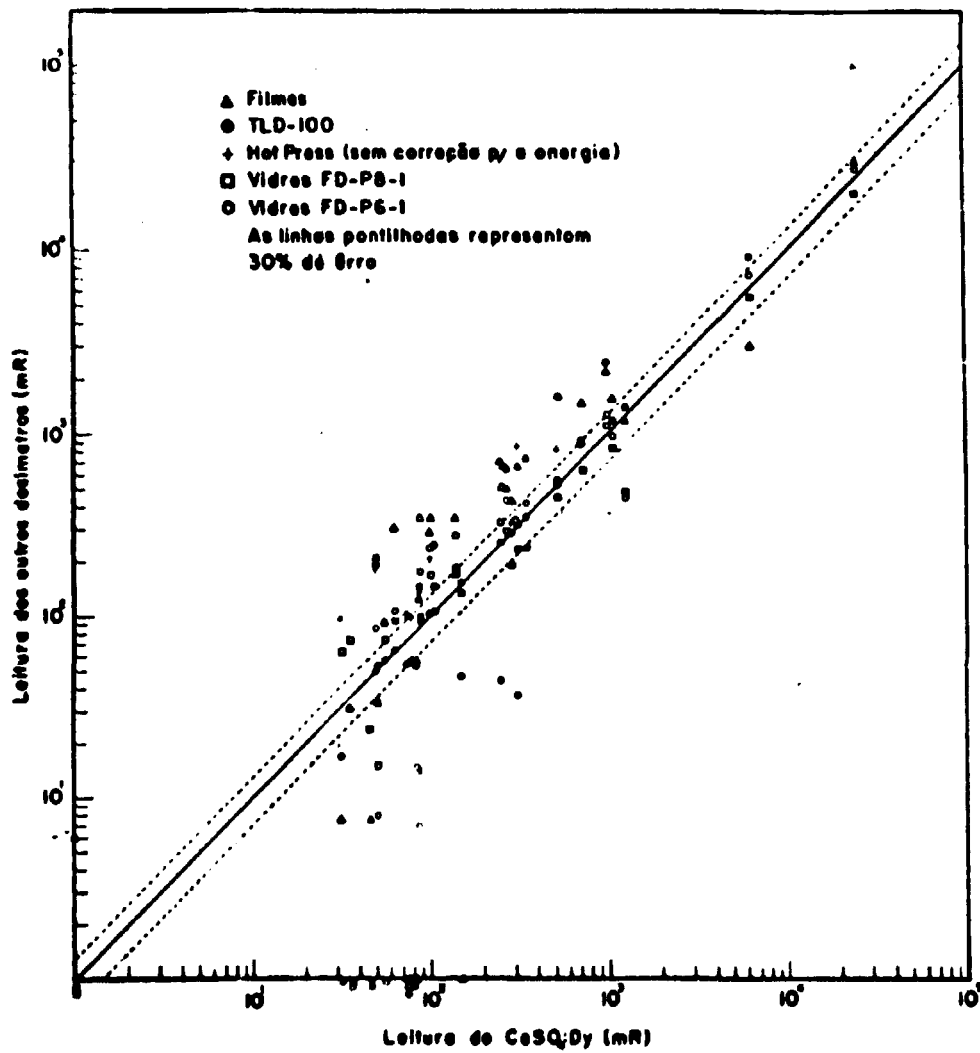


Figura 3.26 - Comparação das leituras dos diversos dosímetros usados na monitoração pessoal, com a leitura do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .

As exposições que estão sujeitas a erro de  $\sim 20\%$  são: para os filmes  $\sim 100$  mR, para o TLD-100  $\sim 35$  mR, para o "hot press"  $\sim 18$  mR, para o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$   $\sim 2$  mR e para os vidros RFL  $\sim 100$  mR. Portanto, os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  são os que possuem o maior poder de detetabilidade, seguindo-se o "hot press", o TLD-100 e finalmente os vidros RFL e os filmes.

Quanto à reprodutibilidade na região de baixas exposições, a classificação dos dosímetros em ordem crescente de erros padrões é a mesma do caso da fidelidade, isto é, primeiro os materiais TL, depois os RFL e por último os filmes. Isto pode ser verificado através da Figura 3-18 e dos Quadros III-6 e III-7. Para exposições acima de 100 mR, todos os dosímetros são confiáveis.

Quanto à dependência com a energia, os filmes, o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  e os vidros RFL são altamente dependentes para energias abaixo de aproximadamente 200 KeVef, ao passo que para o TLD-100 essa dependência é pequena.

Quanto às respostas em condições não conhecidas de irradiação e de ambiente, pode-se verificar, pela Figura 3-25, que os filmes podem não apresentar nenhum resultado significativo quando os outros dosímetros (TL e RFL) têm exposições entre aproximadamente zero e 300 mR. Verifica-se, ainda, que há concordância entre as respostas dos dosímetros TL (TLD-100 e  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ), pois, 14 entre 29 desses dosímetros apresentaram leituras iguais, dentro do erro experimental.

Comparando os resultados dos diferentes dosímetros com os resultados do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , temos que o TLD-100 é o que melhor concorda com as leituras daquele dosímetro, seguindo-se os vidros RFL tipo FD-P8-1 e finalmente os vidros RFL tipo FD-P6-1 e os filmes.

O Quadro IV-1 apresenta uma síntese do que foi dito.

Vê-se, nesse quadro, que os filmes são os dosímetros que apresentam características mais desfavoráveis, isto é, possuem para baixas exposições, o menor poder de detetabilidade, menor reprodutibilidade, grande dependência com a energia da radiação e sua resposta não é linear com a exposição. Além disso, o método de leitura é menos prático e existem<sup>(4)</sup> os problemas de desvanescimento da imagem latente, do "fogging", da dependência da sensibilidade com a direção da radiação incidente, da não equivalência ao tecido humano, do custo, que, a longo prazo, é elevado, pois, os mesmos filmes não podem ser usados novamente, e isso implica na renovação constante do estoque desse material dosimétrico. Contudo, os filmes apresentam certas vantagens como o fato de oferecer um documento da exposição lida, caso venha ser necessário a confirmação futura dessa exposição. Outra vantagem é a do seu tamanho, quando usado na monitoração pessoal, pois, pode-se fazer uma análise do filme e constatar, quando for o caso, a imagem de objetos que, por ventura, ficaram interpostos entre a fonte de radiação e o filme, provocando erro na determinação da exposição.

Vê-se, também, que os vidros RFL apresentam praticamente o mesmo poder de detetabilidade que os filmes, porém, suas leituras são mais reprodutíveis. Sua resposta é linear com a exposição até cerca de 3000 R, sendo, não obstante, fortemente dependente da energia da radiação; apresenta pequeno fading ( $\sim 1\%/3$  meses), não é equivalente ao tecido humano, o custo, a longo prazo, é pequeno devido ao fato dos vidros poderem ser usados muitas vezes; o método de leitura é simples, porém, apresenta o problema da limpeza, que, como foi descrita no capítulo II, é exaustiva e se não for bem executada causa erros consideráveis nas leituras. Existe, no entanto, outro método de limpeza, menos trabalhoso, no qual é usado o ultra-som. Os vidros, como os filmes, também oferecem um documento da exposição que foi lida.

Os materiais TL possuem maior poder de detetabilidade, maior reprodutibilidade para baixas exposições, pequena dependência com a energia da radiação (TLD-100), resposta linear com a exposição e fácil manuseio.

Esses fatos, associados à simplicidade de leitura, à possibilidade de se usar o mesmo dosímetro muitas vezes, (o que diminui o custo a longo prazo), ao intervalo útil de exposição (aproximadamente 1 mR a  $10^5$  R, quando se usa alíquota de 50 mg de pó TLD-100), ao fato de ser quase equivalente ao ar

Quadro IV-1

	Dependência da resposta com a exposição	Erro para exposição de 20 mR	Exposição mínima sujeita a 20% de erro	Exposição mínima com reprodutibilidade dentro de 20% de erro	Comparação com $\text{CaSO}_4:\text{Dy-N}^\circ$ de leituras dentro de 30% de erro (total: 29 dosim.)	Razão entre respostas em 30-50 KeVef e 1 MeV sem o uso de filtros.
Filmes	Não Linear	160%	100 mR	90 mR	3	10,5
TLD-100	Linear	25%	35 mR	22 mR	20	1,8
Hot Press	Linear	19%	18 mR	10 mR	-	-
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	Linear	9%	2 mR	1,5 mR	-	11,0
Vidros RFL Tipo FD-P8-1	Linear	120%	100 mR	65 mR	13	7,0

e ao tecido vivo (TLD-100), ao pequeno "fading" (< 5%/3 meses), ao pequeno tamanho, (o que é um fator importante quando usado na medicina, onde o dosímetro pode ser inserido no corpo humano, necessitando, para isso, uma pequena incisão), levam a crer que os dosímetros TL podem ser usados na dosimetria pessoal com melhores resultados que os vidros RFL e os filmes, apesar dos mesmos terem a desvantagem do efeito da exposição ser destruído no processo de leitura, não deixando um documento dessa exposição. Contudo, essa dificuldade pode ser superada usando-se mais de um dosímetro termoluminescente, além de um registro bem feito.

#### ABSTRACT

Comparison was made between the response of three different dosimetric systems, namely, photographic, thermoluminescent (TL) and radiophotoluminescent (RPL). The comparison was divided in two parts. The first was carried out in known radiation conditions (exposure, normal incidence, energy) and under controlled environment ( $\sim 27^{\circ}\text{C}$  temperature,  $\sim 70\%$  relative humidity). Under these conditions, the response as a function of exposure and energy, the relation of the linearity to the energy, the lowest detectable exposure, and the reproducibility, were studied. The response against exposure at 37 KeVef and at 1 MeV was found to be linear in the region of interest to routine personnel dosimetry for all dosimeters except for the films.

Although the films' responses are not linear, the ratio between the response at 37 KeVef and at 1 MeV doesn't depend on the exposure, and this allows the determination of a simple correction factor for the radiation energy. Such correction is usually necessary since all the dosimeters are strongly energy dependent, except the LiF TL dosimeters. The lowest detectable exposures was achieved with TL materials, and the reproducibility, at low exposures, is best for  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  followed by LiF (hot press), LiF (TLD-100), RPL glasses and photographic films in that order.

In the second part, the relative response of the dosimeters was verified under the uncontrolled conditions of personnel dosimetry. As the  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  is the most sensitive dosimeter, comparison was made using this dosimeter as the standard, in which case one finds that 20 of 29 TLD-100 dosimeter give the same reading within 30%, 13 of 29 RPL dosimeter agree within 30%, and only 3 of 29 films fall within 30%.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Attix, H.; Roesh, W. C. and Tochilin E. — "Radiation Dosimetry", Academic Press, 1968.
2. ICRU Report 11, September 1, 1968 — "Radiation Quantities and Units".
3. Becker, K. — "Radiophotoluminescent Dosimetry" — Atomic Energy Review, vol. 5, 1967.
4. Becker, K. — "Photographic Dosimetry" — The Focal Press, London and New York.
5. Hine, G. J.; Brownell, G. L. — "Radiation Dosimetry", Academic Press Inc., Publisher, New York.
6. Cameron, J. R.; Suntharalingam, N. and Kenney, G. N. — "Thermoluminescent Dosimetry", The University of Wisconsin Press.
7. Schulman, J. H.; Schurcliff, W.; Ginther, R. J. and Attix, F. H. — "Radiophotoluminescence Dosimetry System of the U. S. Navy" — Nucleonics, vol. 11, 1953, July — December.
8. Becker, K. — "Photographic, Glass or Thermoluminescent Dosimetry ? Health Physics, vol. 12, 1966 II.
9. Busuoli, G. e Cavallini, A. — "A comparison of lithium fluoride and film for personnel dosimetry of X and gamma-radiations", Giornale di Fisica Sanitaria e Protezione contro le Radiazioni, vol. 13, n° 4, Ottobre — Dicembre 1969.
10. Piesch, E. — "Intercomparison of Results for Films, Glass and Ionisation Chamber Dosimeter worn together in Routine Personnel Monitoring" — Trabalho apresentado num Symposium sobre

medidas de dose de radiação, suas finalidades, interpretação e precisão requeridas em proteção radiológica.

11. Technical Reports Series n<sup>o</sup> 109 – “Personnel Dosimetry Systems for External Radiation Exposures”.
12. “Instruction Manual for Model FGD-6 Fluoro Glass Dosimeter” da Toshiba – Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd, Tokyo, Japan.
13. Cameron, J. R.; DeWerd, L.; Wagner, J.; Wilson C.; Dopke, K.; e Zimmerman, D. – “Non-linearity of thermoluminescence as a function of dose for LiF (TLD-100)” – Proceedings of a symposium on Solid State and Chemical Radiation Dosimetry in Medicine and Biology.
14. Yamashita, T.; Nada, N.; Onishi, H. and Kitamura, S. – “Calcium Sulfate Phosphor Activated by Rare Earth” – Proceedings of the Second International Conference on Luminescence Dosimetry – CONF. 680920.
15. Rockwell, Theodore; Reactor Shielding Design Manual.

