

APLICAÇÃO DA DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE
EM ESTUDOS DE CAMPOS DE RADIAÇÃO

WILSON CARRON

ORIENTADOR: THOMAZ GHILARDI NETTO LFM

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

Piracicaba
Estado de São Paulo - Brasil
fevereiro - 1987

*Aos meus pais,
À Ivete, Marcelo e Luciana,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Thomaz Ghilardi Netto, pela amizade, orientação e estímulo no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade de aperfeiçoamento.
- Ao Setor de Física do Departamento de Geologia, Física e Matemática da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo e ao Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto, pela utilização do Laboratório de Dosimetria e da Fonte de Cobalto.
- A CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear, pela concessão de bolsa de estudos.
- Ao Prof. José Carlos Barbosa, da UNESP - Jaboticabal, pela colaboração nas análises estatísticas.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. TEORIA	11
3.1 TERMOLUMINESCÊNCIA	11
3.1.1 Aspectos Teóricos	11
3.1.2 Modelo Geral	14
3.1.3 Curva de Emissão Termoluminescente	15
3.2 TERMOLUMINESCÊNCIA NO FLUORETO DE LÍTIO	18
3.2.1 Introdução	18
3.2.2 Características Termoluminescentes	19
3.2.3 Curva de Emissão Termoluminescente	20
3.2.4 Curva de Resposta à Exposição	21
3.2.5 Resposta Relativa à Energia dos Fótons. 22	
3.2.6 Desvanecimento da Resposta Termoluminescente	23
3.2.7 Tratamento Térmico	23
3.3 CONVERSÃO DE DOSES ABSORVIDAS	24
3.3.1 Introdução	24
3.3.2 Teoria de Cavidades	25
3.3.3 Alcance dos Elétrons	27
3.3.4 Poder de Frenagem de Massa para Elétrons. 27	
3.3.5 Coeficiente de Absorção de Energia de Massa	28

	Página
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 FONTE RADIOATIVA	29
4.2 MATERIAIS IRRADIADOS	31
4.3 DOSÍMETROS	32
4.4 SISTEMA LEITOR	33
4.5 CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS	38
4.6 DETERMINAÇÃO DO FATOR f	43
4.7 ANÁLISE DE REGRESSÃO	49
5. RESULTADOS	50
6. DISCUSSÃO	75
7. CONCLUSÕES	80
8. LITERATURA CITADA	82

LISTA DE FIGURAS

Figura

		Página
1	Estrutura iônica bidimensional de um cristal ideal e de um cristal real contendo defeitos de várias espécies.....	12
2	Diagramas de bandas de energia em um cristal isolante ideal e em um cristal isolante real contendo defeitos, originando vários centros, com energias na banda proibida (E, B, L).....	13
3	Um modelo simples de bandas de energia para a termoluminescência.....	15
4	Curva teórica de emissão termoluminescente para um modelo de armadilha e para duas taxas de aquecimento: 2,5K por segundo e 0,5K por segundo.	17
5	Curvas de emissão termoluminescente para o LiF: Mg:Ti (TLD 100) com tratamento térmico de 1 hora a 400°C, seguido de: A, resfriamento (10 ³ °C/min) à temperatura ambiente; B, aquecimento a 80°C durante 16 horas; antes da irradiação. Os valores aproximados da meia vida de cada pico são mostrados ao lado (McKINLAY, 1981).....	21
6	Termoluminescência como uma função da exposição para o LiF (TLD 100), conforme CAMERON <i>et alii</i> . (1968).....	22
7	Resposta teórica por roentgen como uma função da energia do fóton para o LiF (CAMERON <i>et alii</i> , 1968).....	23

Figura		Página
8	Esquema da fonte de cobalto do Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto	30
9	Esquema de desintegração do ^{60}Co (DILLMAN, 1969)	31
10	Disposição dos dosímetros para a irradiação da água ou solo	32
11	Disposição dos dosímetros para a irradiação da madeira	33
12	Diagrama esquemático do sistema leitor de termoluminescência	34
13	Intervalo de integração do sinal termoluminescente	37
14	Seção de choque diferencial por elétron e por MeV, para o Efeito Compton, em função da energia entre 0,2 e 1,2 MeV. São indicadas também as energias máximas dos elétrons Compton (JOHNS e LAUGHLIN, 1956)	46
15	Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade); dosímetros instalados na água	53
16	Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade); dosímetros instalados na madeira	54
17	Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade); dosímetros instalados no solo	55

Figura		página
18	Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação da água	57
19	Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação da madeira	58
20	Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação do solo	59
21	Curva da dose de radiação absorvida pelo água em função da profundidade	72
22	Curva da dose de radiação absorvida pela madeira em função da profundidade	73
23	Curva da dose de radiação absorvida pelo solo em função da profundidade	74

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Constituição isotópica dos dosímetros TLD 100, 600 e 700 da Harshaw Chemical Company.....	20
2	Fração da energia primária remanescente e fração da energia degradada em função da profundidade, para um material equivalente à água.....	47
3	Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade) em cada material irradiado com ^{60}Co	52
4	Calibração dos dosímetros. Termoluminescência em função da dose para os dosímetros utilizados na irradiação da água, madeira e solo.....	56
5	Poder de frenagem de massa para elétrons em função da energia, para o fluoreto de lítio, água, madeira e solo em $\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$ (SELTZER e BERGER, 1982).....	60
6	Coefficiente de absorção de energia de massa em função da energia, para o fluoreto de lítio, água, madeira e solo, em m^2/kg (HUBBELL, 1982).	61
7	Coefficiente efetivo de atenuação de massa para elétrons e fator de peso em função da energia.	62

		Página
8	Razão dos poderes de frenagem de massa; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa; fator f e fator de conversão de dose ($1/f$) do fluoreto de lítio para a água, em função da energia, em MeV.....	63
9	Razão dos poderes de frenagem de massa; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa; fator f e fator de conversão de dose ($1/f$) do fluoreto de lítio para a madeira, em função da energia, em MeV.....	64
10	Razão dos poderes de frenagem de massa; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa; fator f e fator de conversão de dose ($1/f$) do fluoreto de lítio para o solo, em função da energia, em MeV.....	65
11	Razão dos poderes de frenagem média; razão dos coeficientes de energia de massa médio e fator de conversão da dose, entre o fluoreto de lítio e cada material, em função da profundidade.	66
12	Doses no dosímetro (LiF) e na água em função da profundidade. Fator de conversão: $1/f = 1,20$.	67
13	Doses no dosímetro (LiF) e na madeira em função da profundidade. Fator de conversão: $1/f = 1,15$.	68
14	Doses no dosímetro (LiF) e no solo em função da profundidade. Fator de conversão: $1/f = 1,06$.	69

"APLICAÇÃO DA DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE
EM ESTUDOS DE CAMPOS DE RADIAÇÃO"

Wilson Carron

Thomaz Ghilardi Netto

- Orientador -

RESUMO

Com o intuito de se difundir a técnica da dosimetria termoluminescente, foi desenvolvido um estudo para se obter as curvas de dose profunda em diferentes materiais, quando expostos a um campo de radiação gama, utilizando-se para isso dosímetros termoluminescentes de fluoreto de lítio, LiF.

Fez-se um estudo do fator de conversão de dose do fluoreto de lítio para os materiais estudados de interesse agrônômico: água, madeira e solo. Foram levantadas as curvas de dose absorvida em função da profundidade, para cada material e determinadas as equações de regressão que melhor se ajustam às curvas.

Concluiu-se que, nos três materiais estudados, a dose de radiação absorvida apresenta uma variação acentuada com a profundidade e que podem ser correlacionadas através de uma regressão exponencial.

"USE OF THERMOLUMINESCENT DOSIMETRY IN
GAMMA RADIATION FIELDS STUDIES"

Wilson Carron

Thomaz Ghilardi Netto

- Adviser -

ABSTRACT

The depth-dose curves for gamma rays in material of interest to agronomy were obtained using lithium fluoride thermoluminescent dosimeters.

The dose conversion factors for LiF were determined from curves of the absorbed dose versus depth in water, wood and soil. Mathematical equations were chosen to best fit these curves.

In the view of the results we came to the conclusion that in the studied materials the absorbed radiation dose presents a great variation to the depth and could be correlated through of the exponential regression.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da uniformidade de campos de radiação e a determinação correta de doses absorvidas em diferentes pontos de um material irradiado têm sido objetos de pesquisas desde a descoberta dos raios X no início do século.

Os calorímetros, instrumentos usados em medidas de fluência de energia e doses produzidas pela absorção de radiação ionizante, apresentam, como principal vantagem, a medida direta do depósito de energia, não utilizando métodos que requeiram conversão de fatores baseados em interpretações físicas de processos de absorção, envolvendo considerações, tais como: geometria, taxa de dose, poder de frenagem relativo, espectro da radiação incidente, espectro local das radiações secundárias, número atômico e densidade.

A ciência e a tecnologia das medições calorimétricas de doses absorvidas, para elétrons de alta energia e para fótons, estão bem estabelecidas, mas devido às pequenas variações da temperatura o seu uso é mais indicado para altas doses de radiação.

Um importante instrumento físico em medidas de radiação é a ionização produzida no ar pelos raios X e gama. Esta ionização é relativamente fácil de se determinar e vários tipos de equipamento têm sido desenvolvidos para medi-la: as câmaras de ionização.

Uma câmara de ionização, para ser usada na determinação, ponto a ponto, de doses absorvidas em um meio, deve satisfazer às exigências básicas da teoria de cavidade e de equilíbrio eletrônico. Estas condições impõem restrições quanto às dimensões da câmara, o que limita o seu uso.

Desta forma, houve necessidade do desenvolvimento de uma técnica para obtenção de doses nas mais variadas condições. Para isto são desejáveis dosímetros de pequenas dimensões, para serem utilizados em cavidades de difícil acesso e que apresentem condições satisfatórias para avaliações ambientais, portanto sensíveis a baixas doses de radiação.

A partir de 1960 o uso da dosimetria termoluminescente cresceu rapidamente devido às vantagens

da técnica e a disponibilidade, em escala comercial, de de-
tadores em vários formatos e de tamanho reduzido, bem como
sistemas leitores práticos para a avaliação da resposta des-
tes dosímetros.

Os raios gama do ^{60}Co são amplamente
utilizados nas irradiações de produtos agrícolas e aplica-
ções médicas. Nestas, o dosímetro termoluminescente de
fluoreto de lítio, LiF, tem preferência sobre os demais ,
devido à sua equivalência ao tecido humano, em termos de
radiação, pois apresentam números atômicos efetivos da mes-
ma ordem.

O presente trabalho tem como finali-
dade utilizar a técnica da dosimetria termoluminescente no
levantamento das curvas de doses absorvidas em função da
profundidade nos seguintes materiais, de interesse agronômico:
água, madeira e solo, quando expostos à radiação gama
do ^{60}Co .

2. REVISÃO DA LITERATURA

RANDALL e WILKINS (1945) estabeleceram as similaridades fundamentais entre fosforescência e termoluminescência e explicaram ambas usando um modelo de elétrons armadilhados na rede cristalina. Eles formularam as bases teóricas da curva de emissão termoluminescente para as substâncias fosforescentes.

DANIELS *et alii* (1953) foram os primeiros a usar a termoluminescência para efetuar medidas de exposição à radiação. Suas pesquisas estavam voltadas principalmente para os cristais inorgânicos e para o estudo das propriedades termoluminescentes dos halogenetos. Eles concluíram que, entre outros materiais, o fluoreto de lítio, LiF , apresentava condições satisfatórias para medidas de exposição à radiação gama.

CAMERON *et alii* (1961) foram os primeiros a utilizar cristais de LiF em medidas de doses, em tratamento com radiação. Pastilhas de LiF foram colocadas em tubos plásticos e estes introduzidos no reto de pacientes em tratamento, visando à determinação de doses absorvidas em diferentes pontos, com o intuito de se prevenirem doses excessivas de radiação e de se determinar a duração do tratamento.

SVARCER *et alii* (1965), utilizando-se de LiF em pó, tipo TLD 100, colocado em cápsulas gelatinosas, obtiveram medidas de raios X em pacientes durante tratamento de câncer no esôfago, com um acelerador linear de 8 MeV. As doses absorvidas locais, medidas pelas cápsulas de LiF foram comparadas com as curvas de isodose para a água, conforme NEWBERY e BEWLEY (1955), apresentando resultados plenamente satisfatórios.

CHADWICK (1966) determinou, através de um método simples, a distribuição de energia em frutas, quando irradiadas em movimento rotacional dentro do campo de radiação. Para isto ele utilizou cristais de fluoreto de lítio, que foram colocados dentro da fruta e ao longo do raio. Com este método, levantou as curvas de dose - profunda em laranjas, utilizando-se de feixes de elétrons de 1,5 MV a 1 m de distância. As curvas foram levantadas considerando as laranjas estacionárias e em movimento rotacional. Os re-

sultados obtidos mostraram grandes variações para as doses em função da profundidade.

NAYLOR (1967), realizando aplicações práticas com o fluoreto de lítio, em humanos e em animais, durante dois anos, estabeleceu as seguintes vantagens para o seu uso: tamanho reduzido, a dose pode ser armazenada por um longo período de tempo, sua resposta é independente da taxa de dose. Como desvantagens salientou a não linearidade de resposta para altas doses, a variação de resposta com a energia da radiação e a necessidade de recalibração após algumas aplicações.

PINKERTON (1969) comparou os dosímetros LIF, tipo 700 e Teflón, com o calorímetro, para raios gama do cobalto e para elétrons de 6 a 20 MeV. Os resultados mostraram concordância de resposta entre o LIF Teflón e o calorímetro e um pequeno aumento na resposta relativa com o aumento de energia, para o LIF 700 em relação ao calorímetro.

TILTON *et alii* (1971) discutiram as vantagens do fluoreto de lítio na determinação de doses em um irradiador de grãos de trigo. Os testes realizados ressaltaram a performance deste dosímetro na determinação de doses absorvida pelos grãos de trigo.

ROSENSTEIN *et alii* (1972) determina -

ram experimentalmente as curvas de dose profunda em placas de polietileno, utilizando-se de feixes de elétrons de 2 MeV, em função da espessura das placas e do ângulo de incidência do feixe. Os dosímetros de filme, usados neste experimento, apresentaram resultados que, quando comparados com os calculados pelo método Monte Carlo, divergiram de 5 a 15%.

VACIRCA *et alii* (1972) desenvolveram uma técnica para se obter distribuições de doses em pessoas expostas a raios X quando em exames radiográficos. Para isto utilizaram um simulador de material equivalente ao tecido, esqueleto e cavidades de ar. Nas medidas de doses utilizaram filmes e microdosímetros de LiF, colocados juntos entre as secções transversais do simulador. Os resultados, quando comparados com os obtidos com câmara de ionização, mostraram-se equivalentes. A vantagem deste método resume-se em uma técnica relativamente simples e muito conveniente.

HUMPHREYS *et alii* (1977) utilizaram filmes calibrados para medir perfis de dose profunda e a distribuição lateral de doses absorvidas em diversos materiais (alumínio, carbono, músculo bovino, polistireno) irradiados com feixes de elétrons de 10 MeV. Os dosímetros foram colocados dentro do material, em diversas configurações geométricas. Os dados obtidos mostraram-se de acordo com os calculados pelo método Monte Carlo.

WINTLE e AITKEN (1977) obtiveram a curva de dose profunda, para uma fonte beta de ^{90}Sr - ^{90}Y , usando grãos (2 a 8 μm de diâmetro) de $\text{CaF}_2:\text{Dy}$, modelo TLD 200, como dosímetro, interpondo absorvedores de alumínio entre a fonte e o detetor. A curva apresenta um máximo quando a espessura do absorvedor é cerca de 40 mg/cm^2 . Os resultados foram usados na previsão das taxas de dose média para várias espessuras de materiais, com uma absorção beta semelhante a do alumínio, como por exemplo, o fluoreto de cálcio e a calcita.

DHAWAN e CHAWLA (1979) efetuaram medidas de taxa de depósito de energia em vários materiais (alumínio, aço, chumbo, madeira) irradiados com raios gama do ^{60}Co , utilizando para isso TLD de fluoreto de lítio e fluoreto de cálcio. O experimento serviu como comprovação da teoria geral de ionizações em cavidades, através do uso paralelo de dois dosímetros termoluminescentes.

DHAWAN e CHAWLA (1980) usaram TLD na determinação do efeito gama-calor em vários materiais, com números atômicos entre 4 e 82. As medidas de taxa de depósito de energia efetuadas pelo TLD foram comparadas com as efetuadas por um termopar, apresentando variações de cerca de 6%.

KVASNICKA (1981), usando LiF em pó, estimou a dose de raios beta de fontes homogêneas com con -

centrações conhecidas de urânio, tório e potássio. O trabalho ressalta a sensibilidade do dosímetro para a monitoração de doses de raios beta.

PRADHAN *et alii* (1982) efetuaram comparações entre medidas e cálculos de doses para simuladores equivalentes ao tecido e para o ar, irradiados com ^{60}Co , utilizando-se de dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e LiF . Os resultados ressaltam as vantagens do sulfato de cálcio como dosímetro, um material com uma alta sensibilidade termoluminescente e com uma extensa linearidade, para medidas de doses em vários órgãos, durante uma radioterapia.

DURAN e NETTO (1983) estudaram as propriedades termoluminescentes de amostras de dente (porção esmaltada) e de osso (fêmur). As amostras foram irradiadas com raios X (energia efetiva de 35 a 80 keV) e com raios γ do ^{60}Co (energia efetiva de 1,25 MeV) e as exposições variaram entre 5 e 50 R. Os resultados obtidos mostraram que a resposta termoluminescente é linear com a dose absorvida nas amostras; que, embora o sinal termoluminescente emitido pela amostra de dente apresente uma intensidade menor que o emitido pela amostra de osso, para uma mesma exposição, o sinal ainda apresenta intensidade suficiente para que a amostra possa ser usada como dosímetro. Comparações entre as respostas termoluminescentes das amostras com as do fluoreto de lítio, um dosímetro comercial, permitiram a

conclusão de que elas apresentam uma sensibilidade razoável para o intervalo de exposições utilizado.

SILVA (1985) estudou as características termoluminescentes de cristais naturais, entre outros, ametista, feldspato e turmalina, expostos à radiação gama, na faixa de 10^{-3} C/kg a 1 C/kg. Ela concluiu que os cristais de feldspato branco e róseo e turmalinas rosa e verde mostraram-se mais adequados como detetores de radiação, apresentando uma boa sensibilidade, baixo decaimento da intensidade termoluminescente, linearidade na faixa de exposição utilizada e curvas de emissão termoluminescentes com picos na faixa de temperatura de 180°C a 230°C.

3. TEORIA

3.1 TERMOLUMINESCÊNCIA

3.1.1 Aspectos Teóricos

De acordo com MCKINLAY (1981), as bases teóricas da termoluminescência podem ser desenvolvidas através da análise de uma estrutura cristalina típica: os halogenetos. Ela é constituída de duas redes interpenetráveis de íons alcalinos e íons halogenos, conforme a figura 1.

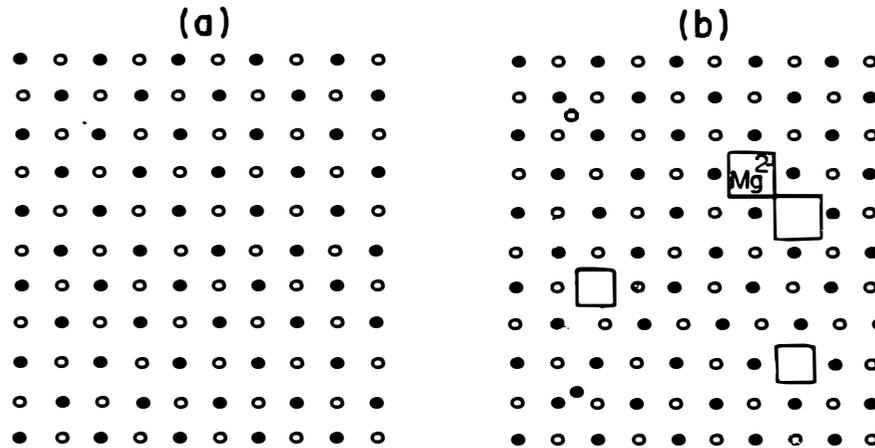


FIGURA 1 - Estrutura iônica bidimensional de (a) um cristal ideal, e (b) um cristal real, contendo defeitos de várias espécies. Convenção:

- = íon halogeno
- = íon alcalino
- Mg²⁺ = íon magnésio bivalente
- = vacância

A figura 1-a representa a rede cristalina de um cristal ideal. A figura 1-b representa a rede cristalina de um cristal real. Todos os cristais reais contêm defeitos na rede, de várias espécies, e estes desempe -
nham um papel fundamental no processo da termoluminescência. Os defeitos na rede podem ser intrínsecos ou térmicos; ex -
trínsecos ou dopagem com íons de impurezas ou induzidos por radiação.

A figura 2-a representa o esquema de bandas de energia para um cristal isolante ideal. A banda de valência é representativa de todos os elétrons ligados e a de condução é representativa de todos os elétrons desliga

dos, os quais são livres para migrar através da rede cristalina. No caso de um cristal isolante, a banda de condução é vazia e todos os elétrons residem na banda de valência. As bandas de valência e condução são separadas, em energia, pela chamada "banda proibida".

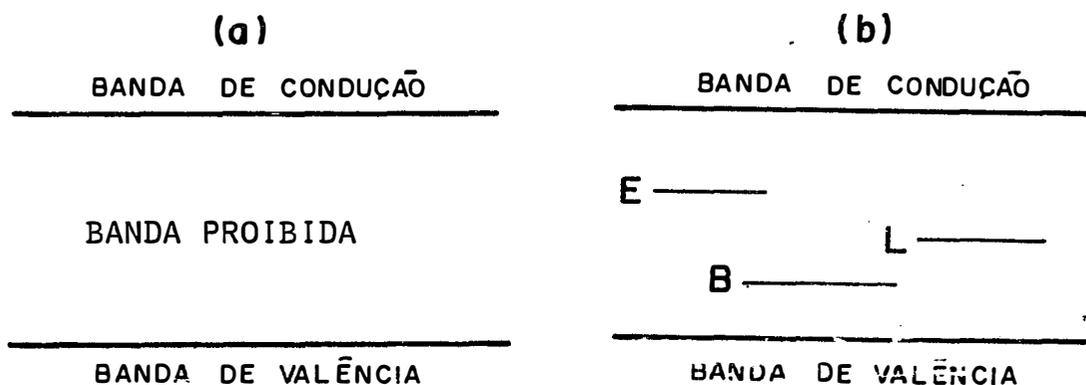


FIGURA 2 - Diagramas de bandas de energia em (a) de um cristal isolante ideal, e em (b) de um cristal isolante real contendo defeitos, originando vários centros com energias na banda proibida (E,B,L).

A figura 2-b representa um cristal real, contendo defeitos de natureza simples ou complexa, criando níveis de energia na zona proibida. O nível de energia E representa uma região com um excesso de carga positiva e, portanto, funciona como uma armadilha para elétrons livres; B representa uma região com um excesso de carga negativa e, portanto, uma armadilha para cargas positivas livres (buracos) e L representa um centro luminescente, onde elétrons e buracos podem se recombinar com emissão de luz.

3.1.2 Modelo Geral

A produção de termoluminescência em um material pela exposição à radiação ionizante, pode ser dividida em dois estágios: 1) ionização e armadilhamento de elétrons e 2) elétrons e buracos se recombinando com emissão de fótons.

A figura 3 apresenta a configuração energética para cada estágio. Radiação ionizante é absorvida pelo material e elétrons livres são produzidos. Isto é equivalente a transferir elétrons da banda de valência para a de condução (etapa 1). Estes elétrons são livres para se mover através do material (etapa 2), mas podem ser aprisionados se o cristal apresentar defeitos (armadilhas) do tipo E (etapa 3). A produção de elétrons livres é associada com a produção de buracos, os quais podem migrar, em termos de energia (etapa 2'). Os buracos podem ser armadilhados (etapa 3'). Os elétrons e buracos aprisionados permanecem em suas armadilhas até que adquiram energia suficiente para escapar. Se aumentarmos a temperatura do material, os elétrons e buracos podem adquirir suficiente energia térmica e escapar das armadilhas (etapas 4 e 4'). Elétrons e buracos podem se recombinar em centros do tipo L e o excesso de energia é irradiado como fótons na região do visível ou do ultravioleta (etapa 5).

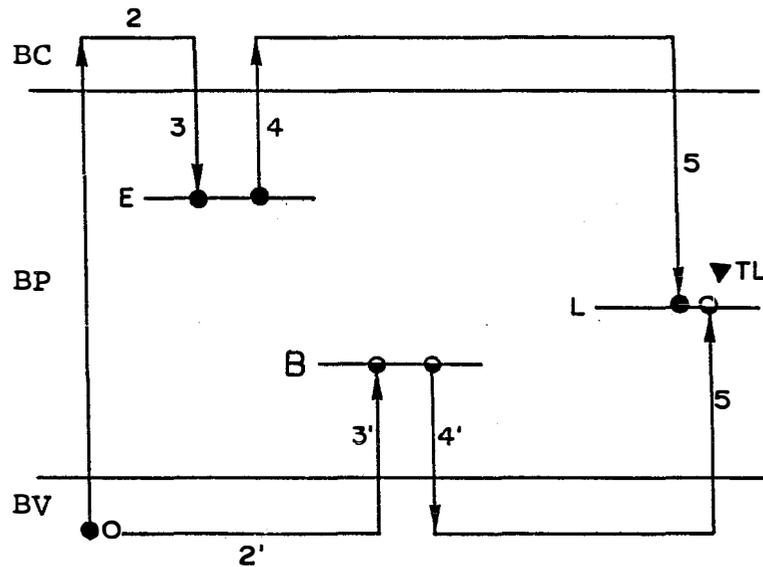


FIGURA 3 - Um modelo simples de bandas de energia para a termoluminescência. Convenção:
 ● = elétron, o = buraco, BC = banda de condução, BP = banda proibida, BV = banda de valência

3.1.3 Curva de Emissão Termoluminescente

Um material termoluminescente exposto à radiação ionizante e, em seguida, sendo aquecido, emitirá luz proporcional à quantidade de radiação recebida.

A curva obtida, da intensidade da luz em função da temperatura ou do tempo, durante o aquecimento do material, recebe o nome de curva de emissão termoluminescente. O formato da curva de emissão varia conforme o material termoluminescente e depende de vários fatores, tais como: a taxa de aquecimento, o nível de energia das armadilhas (conforme mostrado na figura 4), o tipo e a quantidade de radiação utilizada na exposição do material e os tratamentos térmicos sofridos pelo material, antes e após a irradiação.

ção.

De acordo com RANDALL e WILKINS (1945), os elétrons e buracos nas armadilhas apresentam energias térmicas obedecendo a uma distribuição estatística de Maxwell. Assim, se o nível de energia de um elétron armadilhado é E , abaixo da banda de condução, então esse elétron, absorvendo, pelo menos, uma energia E , a temperatura T , apresentará uma probabilidade p de escapar da armadilha, dada por:

$$p = s e^{-E/KT} \dots\dots\dots (1)$$

onde K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura em Kelvin e s é o fator de frequência, uma constante, mas que pode apresentar pequenas variações com a temperatura.

O modelo desenvolvido pelos autores acima, para a curva de emissão termoluminescente em função da temperatura, baseia-se nos seguintes pontos: 1) não existe re-armadilhamento, isto é, um elétron liberado não é capturado, mas dirige-se para um centro luminescente; 2) os elétrons são liberados de uma única armadilha de energia E e, portanto, a curva de emissão apresenta um único pico; 3) a intensidade de emissão de luz é proporcional à taxa de liberação de elétrons da armadilha.

De acordo com a equação 1 e com base na figura 4, observa-se que, assumindo valores constantes pa

ra K , E e s , a medida que a temperatura aumenta, a probabilidade p de liberação de elétrons também aumenta, provocando uma intensidade de luz, emitida pelo material, cada vez maior, atingindo um valor máximo e em seguida decaindo devido à redução no número de elétrons armadilhados.

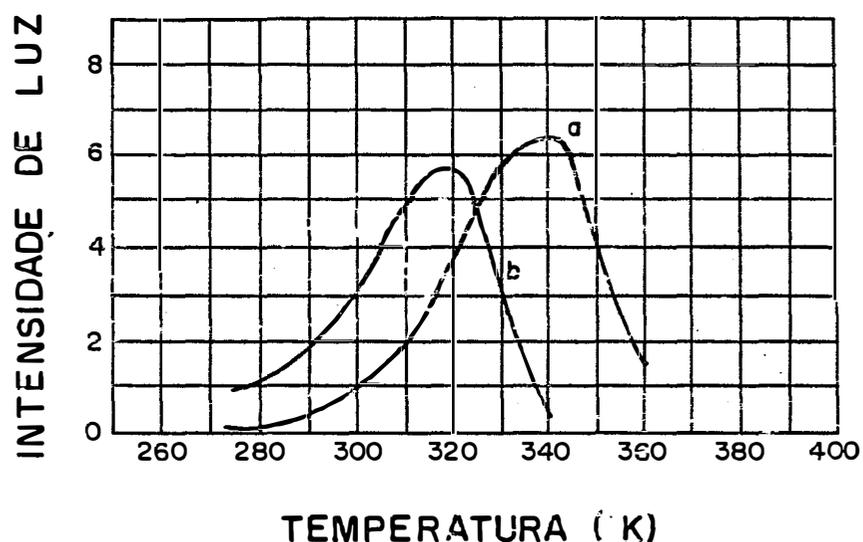


FIGURA 4 - Curva teórica da emissão termoluminescente para um modelo de armadilha e para duas taxas de aquecimento, (a) 2,5K por segundo, (b) 0,5K por segundo. $E = 0,67 \text{ eV}$; $s = 2,9 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$

3.2 A TERMOLUMINESCÊNCIA NO FLUORETO DE LÍCIO

3.2.1 Introdução

A substância termoluminescente mais intensamente estudada é o fluoreto de lítio dopado com magnésio e titânio, LiF: Mg:Ti. O processo termoluminescente no fluoreto de lítio é complexo, dependendo de vários fatores, tais como: a quantidade e tipo de impureza presente, sua forma química e método de introdução na rede cristalina, o tratamento térmico e mecânico da substância durante sua confecção e uso.

A substituição de um íon Li^+ por um íon Mg^{++} na rede cristalina do fluoreto de lítio resulta

em um excesso positivo de carga e isto implica na formação de novas armadilhas para elétrons. A influência do titânio no processo termoluminescente está relacionada com a formação de centros de recombinação termoluminescentes.

3.2.2 Características Termoluminescentes

O fluoreto de lítio, LiF, é um halogênio de densidade $2,64 \text{ g/cm}^3$ e número atômico efetivo de 8,2 (ATTIX, 1986). Apresenta boa resistência a ataques químicos e é solúvel na água.

De todas as substâncias termoluminescentes, o fluoreto de lítio é a mais comumente usada e foi primeiro investigada por DANIELS *et alii* (1953).

CAMERON *et alii* (1961) demonstraram interesse por essa substância e a Harshaw Chemical Co produziu um dosímetro comercial, conhecido como TLD 100 e suas variações isotópicas TLD 600 e TLD 700. As relativas proporções de ^6Li e ^7Li contidas nessas substâncias estão apresentadas na tabela 1.

TABELA 1 - Constituição isotópica dos dosímetros TLD 100, 600 e 700, fabricados pela Harshaw C.C.

Subst.Termol.	^6Li (%)	^7Li (%)
TLD 100	7,5	92,5
TLD 600	95,6	4,4
TLD 700	0,01	99,99

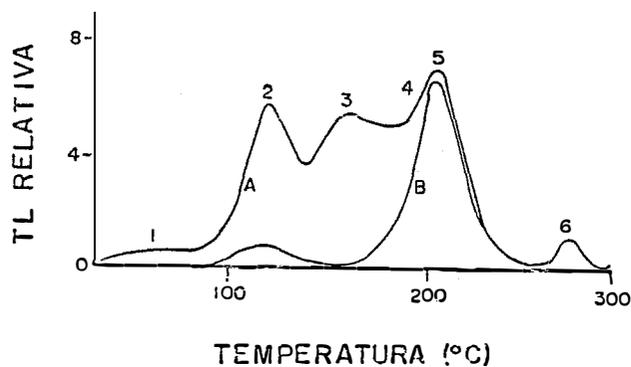
O TLD 100 (600, 700) é produzido pela fusão homogênea do fluoreto de lítio, fluoreto de magnésio, fluoreto de lítio e fluoreto de lítio titânio, resultando numa substância contendo 300 ppm de magnésio e 10 a 20 ppm de titânio. O cristal é solidificado, pulverizado e os grãos peneirados e separados (McKINLAY, 1981).

Segundo COX (1968), os dosímetros de LiF, em forma de pastilhas, são formados por compressão da mistura original a uma temperatura elevada.

3.2.3 Curva de Emissão Termoluminescente

A curva termoluminescente para o LiF:Mg:Ti apresenta seis picos entre a temperatura ambiente e 300°C, conforme a figura 5. Os picos de baixa temperatura

(1, 2 e 3) apresentam à temperatura ambiente um alto desvanecimento do sinal armazenado. Através de tratamentos térmicos adequados é possível reduzir o número de armadilhas associadas a esses picos. O pico 5 é o normalmente usado em dosimetria.



Pico	1/2 Vida
1	10 min.
2	01 dia
3	03 meses
4	8,5 anos
5	80 anos
6	milhares de anos

FIGURA 5 - Curvas de emissão termoluminescentes para LiF:Mg:Ti (TLD 100) com o tratamento térmico de 1 hora a 400°C, seguido de: A, resfriamento (10^3 °C/min) à temperatura ambiente; B, aquecimento a 80°C durante 16 h antes da irradiação. Os valores da meia vida de cada pico são mostrados ao lado, conforme MCKINLAY (1981).

3.2.4 Curva de Resposta à Exposição

A curva de resposta à exposição para o LiF:Mg:Ti, TLD 100, é mostrada na figura 6 (CAMERON *et alii*, 1968), correspondente ao pico dosimétrico nº 5, da figura 5.

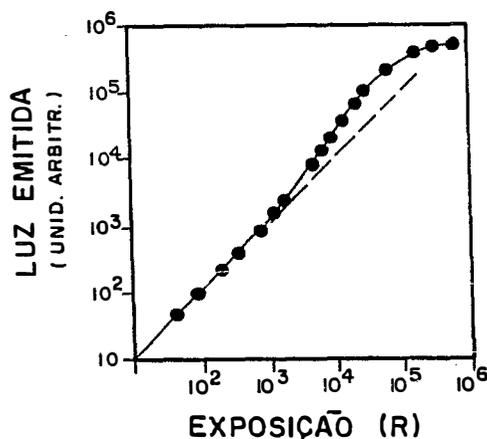


FIGURA 6 - TL como uma função da exposição para o LiF (TLD 100), conforme CAMERON *et alii* (1968).

Geralmente a resposta é linear até, a proximadamente, 10^3 R, ($2,58 \times 10^{-1}$ C/kg), tornando-se, em seguida, supralinear com um platô a, aproximadamente, $5 \cdot 10^5$ R ($1,29 \times 10^2$ C/kg) e decrescendo, finalmente, com o aumento da exposição.

3.2.5 Resposta Relativa à Energia dos Fótons

A resposta do fluoreto de lítio à energia dos fótons, dada na figura 7, é uma das principais vantagens para o seu uso em dosimetria de radiações.

A partir de 100 keV, a resposta é praticamente independente da energia dos fótons. O aumento da resposta para baixas energias, menores que 100 keV, é devido principalmente ao aumento na seção de choque relativa ao efeito fotoelétrico.

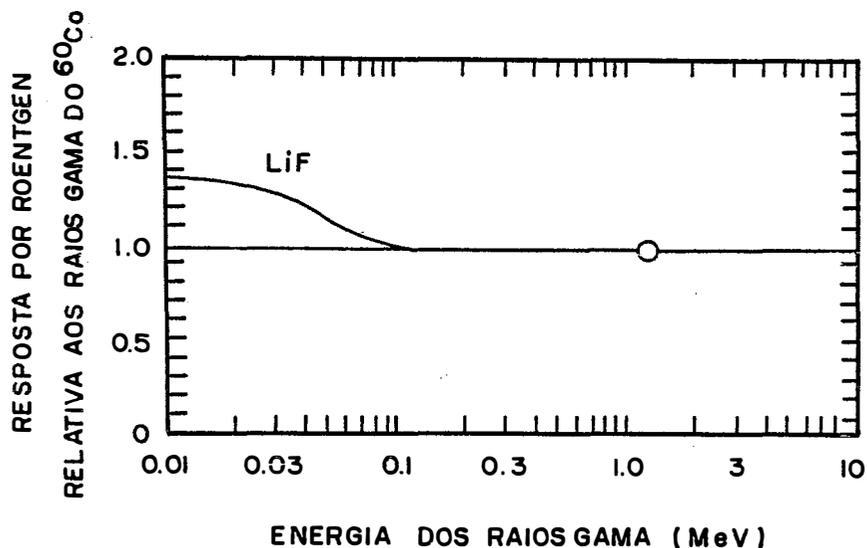


FIGURA 7 - Resposta teórica por roentgen para o LiF, como uma função da energia dos raios gama (CAMERON *et alii*, 1968).

3.2.6 Desvanecimento da Resposta Termoluminescente

O desvanecimento da resposta termoluminescente de um dosímetro corresponde à emissão espontânea de luz pelo material à temperatura ambiente. Além da temperatura, outros fatores influem, tais como a luz e a umidade. Segundo MCKINLAY (1981), o desvanecimento do pico dosimétrico nº 5, figura 5, do LiF é de 5% em um período de 3 a 12 meses, dependendo do tratamento térmico antes e após a irradiação.

3.2.7 Tratamento Térmico

Para que um dosímetro de fluoreto de

lítio, TLD 100, possa ser usado repetidas vezes, é importante aplicar-lhe um tratamento térmico correto, para devolver-lhe suas propriedades inerentes à sua primeira exposição à radiação ionizante.

ZIMMERMAN *et alii* (1965) sugerem um tratamento térmico de 400°C durante uma hora; em seguida, de 16 a 24 horas a 80°C, antes da irradiação.

A Harshaw Chemical Co sugere, para os mesmos dosímetros, um tratamento térmico de 400°C durante uma hora, seguido de 2 horas a 100°C, antes da irradiação.

3.3 CONVERSÃO DE DOSES ABSORVIDAS

3.3.1 Introdução

A dose absorvida, D_m , em um meio irradiado por fótons energéticos, devido a uma fonte de raios X ou gama, pode ser determinada pela análise de um dosímetro colocado no meio em questão. A relação entre as duas doses pode ser expressa pela relação:

$$D_m = (1/f) D_c \quad \dots\dots\dots(2)$$

onde D_m é a dose no meio e D_c é a dose no dosímetro (cavidade) e f é o fator de conversão de doses, determinado a

través da teoria de cavidade.

3.3.2 Teoria de Cavidade

De acordo com MILLER e McLAUGHLIN(1982) a teoria geral de ionizações em cavidade, desenvolvida por BURLIN (1966) pode ser resumida em três situações distintas:

a) se o tamanho da cavidade é grande quando comparado com o alcance dos elétrons secundários mais energéticos, o fator f é dado por:

$$f = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_c}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m} = \mu_m^c \dots\dots\dots(3)$$

f é a razão entre os coeficientes de absorção de energia de massa para fótons, da cavidade e do meio;

b) se o tamanho da cavidade é pequeno quando comparado com o alcance dos elétrons secundários mais energéticos, o fator f é dado por

$$f = \frac{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)_c}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)_m} = S_m^c \dots\dots\dots(4)$$

f é a razão entre os poderes de frenagem de massa para elétrons, da cavidade e do meio;

c) se o tamanho da cavidade é da ordem do alcance dos elétrons secundários mais energéticos , isto é, a dose absorvida no dosímetro é produzida pelos elétrons tanto gerados fora do dosímetro como dentro, o fator f é dado por:

$$f = d.S_m^C + (1-d) \mu_m^C \dots\dots\dots (5)$$

onde d é um fator de peso, dado por:

$$d = \frac{1 - e^{-\beta g}}{\beta g} \dots\dots\dots (6)$$

onde β é o coeficiente efetivo de atenuação de massa para elétrons e g é o caminho médio percorrido pelos elétrons através do dosímetro, sendo

$$\beta = \frac{1,6}{(T_\gamma - 0,036)^{1,4}} \text{ m}^2/\text{kg} \dots\dots\dots (7)$$

onde T_γ é a energia dos raios gama, em MeV, e

$$g = \frac{4V}{S} \rho \text{ kg/m}^2 \dots\dots\dots (8)$$

com V sendo o volume do dosímetro, em m^3 ;
 S a área total do dosímetro, em m^2 e
 ρ a massa específica do material do dosímetro, em kg/m^3

Em cada situação os coeficientes de absorção de energia de massa e os poderes de frenagem de mas-

sa para elétrons, devem ser avaliados sobre o espectro de energia dos fótons ou dos elétrons secundários, na posição do dosímetro.

3.3.3 Alcance dos Elétrons

De acordo com ATTIX (1986), o alcance, R, de uma partícula carregada, em termos de poder de frenagem da massa, é definido como:

$$R = \int_0^{T_0} \left(\frac{dt}{\rho \cdot dx} \right)^{-1} \cdot dt \dots\dots\dots (9)$$

onde T₀ é a energia inicial da partícula e $\frac{dt}{\rho \cdot dx}$ é o poder de frenagem de massa.

3.3.4 Poder de Frenagem de Massa para Elétrons

De acordo com SELTZER e BERGER(1982), o poder de frenagem de massa para elétrons para um meio qualquer, em unidades de MeV/(g.cm⁻²) é dado por:

$$S = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{col} = \frac{0,153536 \cdot Z/A}{\beta^2} B(T) \dots\dots (10)$$

- onde: B (T) é o número de frenagem
- T é a energia cinética do elétron
- β é a sua velocidade em unidade de velocidade da luz
- Z/A é a razão entre o número atômico e o peso atômico do meio freador
- ρ é a massa específica do meio

O número de frenagem $B(T)$ é dado por

$$B(T) \begin{cases} B_0(T) + b_0 & \text{para } T \leq T_0 & \dots\dots(11) \\ B_1(T) + b_1 - b_2 \{1 - [2 \ln(p/mc)]/b_3\}^k & \text{para } T_0 < T < T_1 & \dots(12) \\ B_1(T) + b_1 & \text{para } T \geq T_1 & \dots\dots(13) \end{cases}$$

onde:

$k = 3$, exceto para os gases H_2 e He e para o H_2 líquido;

$B_0(T)$ e $B_1(T)$ são funções somente da energia cinética T dos elétrons;

Z/A ; b_0 ; b_1 ; b_2 ; b_3 ; T_0 e T_1 são constantes para cada material, conforme tabelas, dadas por SELTZER e BERGER (1982);

p é o momento linear do elétron;

m é a massa do elétron e

c é a velocidade da luz.

3.3.5 Coeficiente de Absorção de Energia de Massa

De acordo com HUBBELL (1982), o coeficiente de absorção de energia de massa para uma dada substância é dado por:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{N_A}{A} (\sigma f_\sigma + \tau f_\tau + k f_k) \dots\dots(14)$$

onde

N_A é o número de Avogadro = $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

A é o peso atômico do elemento

σ é a seção de choque para o efeito Compton

τ é a seção de choque para o efeito fotoelétrico

k é a seção de choque para o efeito produção de par

f é a fração de energia da partícula carregada em relação à energia do fóton incidente, para cada tipo de interação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 FONTE RADIOATIVA

Foi utilizada uma fonte radioativa de ^{60}Co , monodirecional, com as seguintes características:

Modelo : Teletherapy Source S 2598

Fabricante : Atomic Energy of Canada Limited, Ottawa, Canada

Atividade Nominal : 2622 Curies de ^{60}Co em 23/10/86

Localização: Hospital das Clínicas - Ribeirão Preto

A fonte é constituída de um cilindro de aço inoxidável, com 1,75 cm de diâmetro, tipo C-146, contendo cobalto -60.

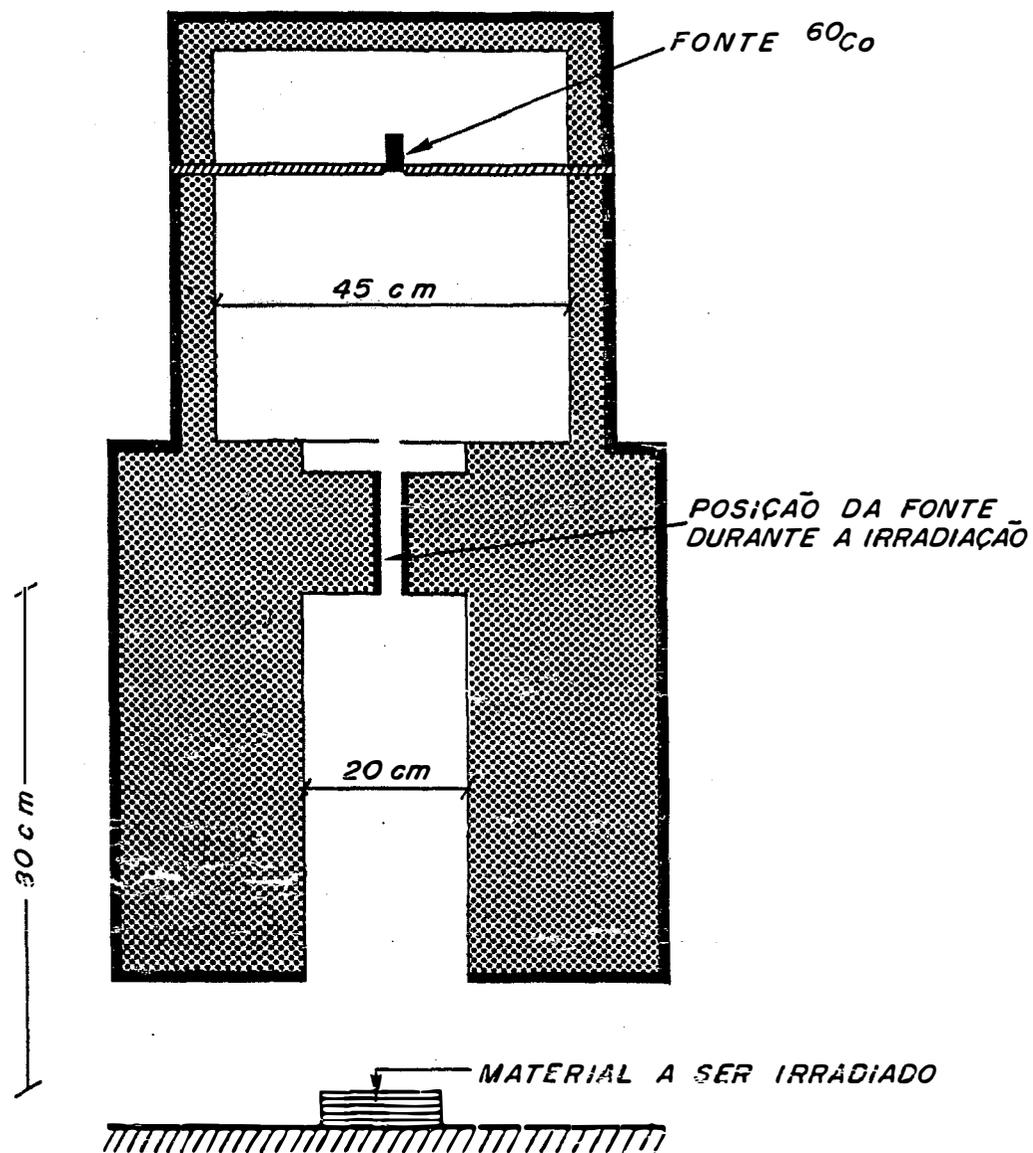


FIGURA 8 - Esquema da fonte de cobalto do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto

O ^{60}Co apresenta um esquema de desintegração conforme a figura 9.

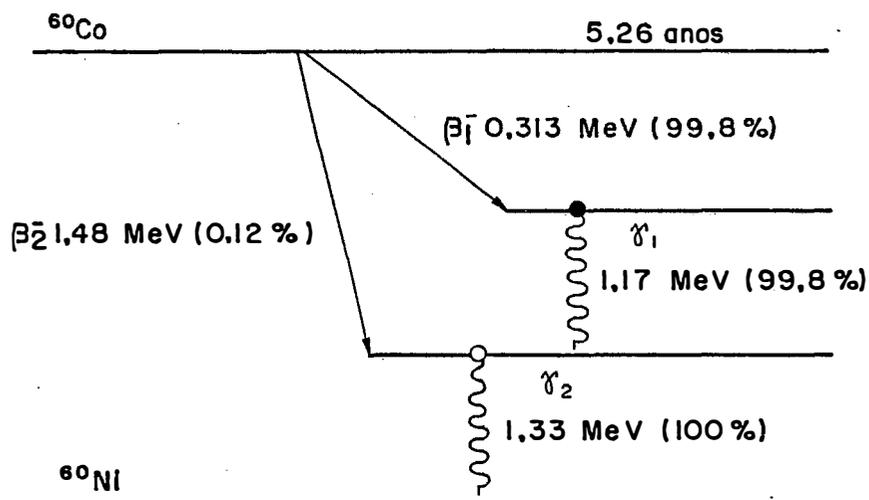


FIGURA 9 - Esquema de desintegração do ^{60}Co (DILLMAN, 1969)

Duas radiações gama são emitidas: γ_1 com energia de 1,17 MeV e abundância de 99,8% e γ_2 com energia de 1,33 MeV e abundância de 100%. Por simplicidade, podemos nos referir a emissão de dois raios gama com energia de 1,25 MeV (média aritmética dos valores emitidos).

4.2 MATERIAIS IRRADIADOS

Os seguintes materiais foram irradiados com a fonte: água, madeira e solo (TRE).

Para as irradiações da água e do solo utilizamos um recipiente plástico com 16 cm de diâmetro e 20 cm de altura, totalmente cheio com o material em questão.

Na irradiação da madeira foram utilizadas placas quadradas com 10 cm de lado e espessuras variãveis entre 0,5 e 1,5 cm .

4.3 DOSÍMETROS

Pastilhas de fluoreto de lítio, TLD-100, com as seguintes dimensões: 3,175mm x 3,175mm x 0,889mm, previamente selecionadas, foram inicialmente tratadas termicamente durante uma hora a 400°C e em seguida durante duas horas a 100°C, conforme sugestão da Harshaw Chemical C^o.

Estas pastilhas foram colocadas em suportes de acrílico e instaladas no recipiente utilizado para a irradiação de água e solo. No caso da madeira, os dosímetros foram colocados diretamente em cavidades abertas nas próprias placas.

As figuras 10 e 11 apresentam as disposições dos dosímetros dentro dos materiais irradiados.

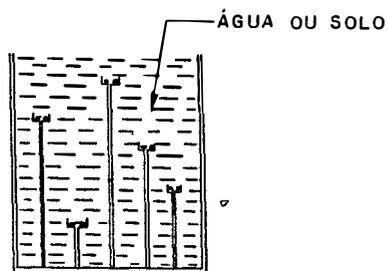


FIGURA 10 - Disposição dos dosímetros para a irradiação de água ou solo

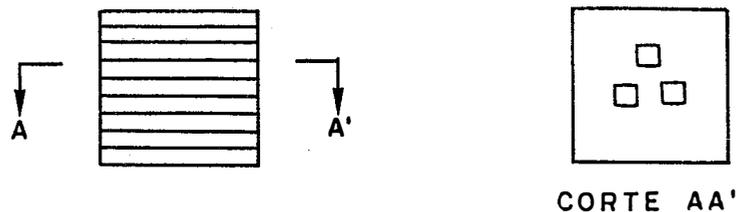


FIGURA 11 - Disposição dos dosímetros para a irradiação da madeira.

4.4 SISTEMA LEITOR

Após a irradiação e antes da leitura, os dosímetros sofreram, durante 15 minutos, um tratamento térmico a 100°C, com a finalidade de se eliminarem os picos termoluminescentes de baixas temperaturas (figura 5), que não apresentam interesse para a dosimetria.

A leitura da termoluminescência emitida pelos dosímetros, que é usada como medida da dose absorvida, foi obtida utilizando-se um sistema leitor composto de um detector de termoluminescência, modelo 2000-C, acoplado a um picoamperímetro integrador automático, modelo 2000-B, ambos fabricados pela Harshaw Chemical Company, Solon, Ohio, USA. A figura 12 mostra o diagrama esquemático do sistema leitor de termoluminescência.

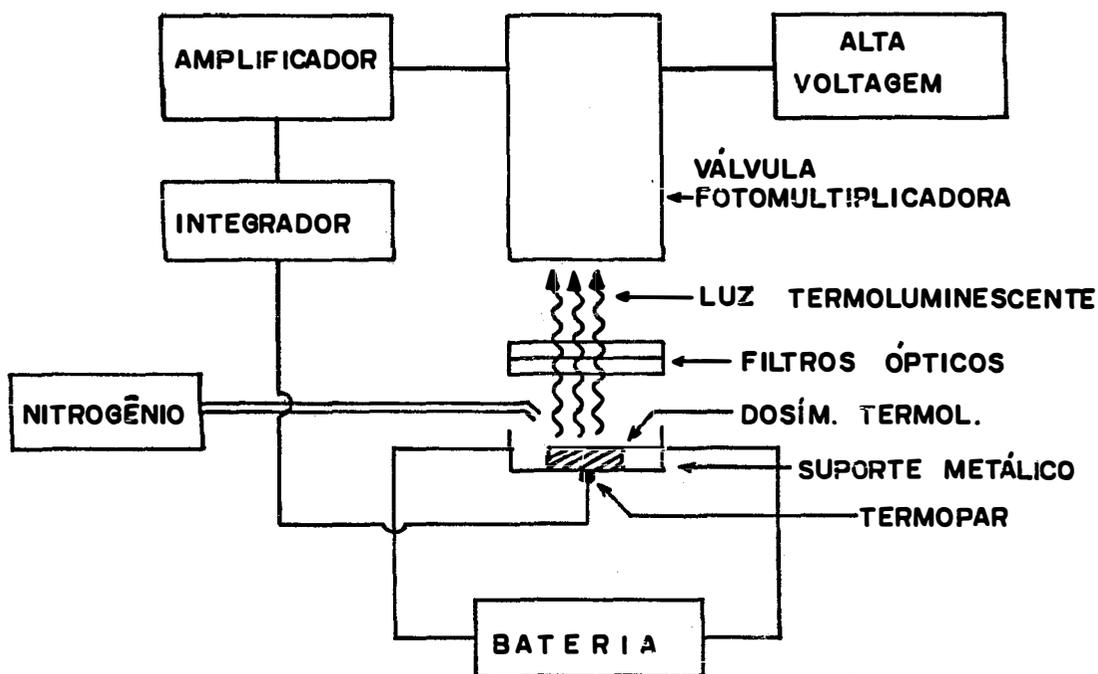


FIGURA 12 - Diagrama esquemático do sistema leitor de termo luminescência

O detector de termoluminescência consiste essencialmente de um suporte metálico, instalado dentro de uma gaveta localizada no painel frontal do detector, onde são colocadas as pastilhas de LiF, à temperatura ambiente. O aquecimento do suporte é feito através de corrente elétrica e a luz emitida pelas pastilhas atravessam os filtros ópticos, cuja finalidade é eliminar as radiações infra-vermelho, atingindo a válvula fotomultiplicadora. Esta válvula, alimentada por uma fonte de alta tensão, apresenta como principais características, um alto ganho e um baixo sinal de ruído. A luz recebida por ela é convertida em

um sinal de corrente elétrica, a qual é enviada para o picoamperímetro integrador automático. A função do integrador é amplificar o sinal de corrente recebido do detector, integrar esse sinal no intervalo de temperatura escolhido, e produzir um sinal digital de carga que é apresentado em um visor no painel do aparelho, nas unidades microcoulomb (μC) e nanocoulomb (nC).

Devido aos efeitos combinados de gases adsorvidos, humidade, sujeiras e desgastes mecânicos da superfície do material termoluminescente, existe a possibilidade de produção de um sinal termoluminescente espúrio, isto é, um sinal não proveniente da dose de radiação recebida pelo material. Este sinal afeta os resultados normalmente quando são medidas pequenas doses de radiação (abaixo de 1 mGy), mas pode ser reduzido sensivelmente, efetuando-se as medidas com as pastilhas de LiF envoltas num ambiente de um gás, por exemplo, nitrogênio. Para altas doses, este procedimento não é necessário, pois o sinal espúrio torna-se desprezível quando comparado com o emitido pelo material termoluminescente.

As instruções para a utilização do sistema leitor são descritas em seguida.

1) Teste dos controles: para o teste dos controles é necessário que o aparelho seja colocado em funcionamento com algumas horas de antecedência, para que a válvula fotomultiplicadora atinja a temperatura ideal para

o seu funcionamento. Ao ligar o aparelho, o potenciômetro de alta tensão deve ser ajustado em 724 volts.

2) Calibração do aparelho: uma fonte estável de luz, consistindo de um cristal cintilador de NaI (Tl), excitado pelo radioisótopo ^{14}C , localizada na parte posterior da gaveta do detector, serve como referência para a calibração do aparelho. Quando a gaveta está totalmente aberta, a fonte de luz posiciona-se defronte à fotomultiplicadora. Acionando-se o aparelho, para um intervalo de tempo de 10 segundos, o integrador apresenta o sinal de carga correspondente à emissão de luz da fonte de referência. Este sinal é comparado com o valor de 13,7 nC, conforme o manual de calibração do aparelho e serve para testar a sensibilidade e a estabilidade da válvula fotomultiplicadora.

3) Intervalo de integração do sinal : o sinal termoluminescente emitido pelo dosímetro de LiF, pode ser integrado no todo ou dentro de um intervalo de temperatura escolhido. Normalmente, a integração do sinal é feita dentro do intervalo mostrado na figura 13.

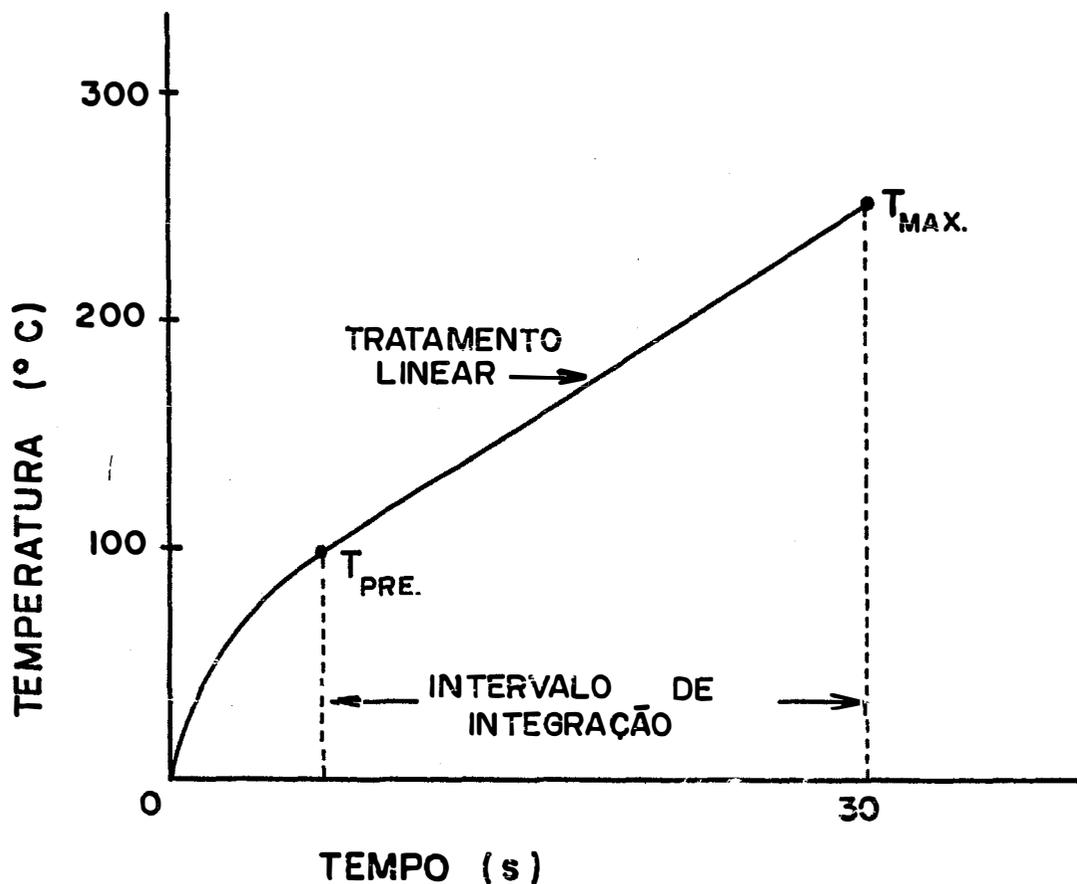


FIGURA 13 - Intervalo de integração do sinal termoluminescente.

O detector apresenta a possibilidade de escolha das temperaturas para a integração do sinal. A temperatura de pré-aquecimento pode ser obtida rapidamente e, durante o tratamento térmico, dentro do intervalo de integração do sinal, a taxa de aquecimento é da ordem de 8°C/s .

4) Leitura da termoluminescência dos dosímetros de LiF: após a calibração do aparelho e fixação do intervalo de temperatura para a integração do sinal, re-

gula-se a chave do período para um intervalo de 30 segundos e liga-se o fluxo de nitrogênio, mantendo-o a uma razão de aproximadamente 4 litros/minuto (para doses acima de 1 Gy dispensa-se o uso do nitrogênio). Com a pastilha de LiF colocada no suporte e a gaveta fechada, aciona-se o botão de leitura. Após decorrido o tempo selecionado, o aparelho desliga-se automaticamente e o visor apresenta o sinal integrado, na unidade nC ou μC .

4.5 CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS

Para se obter a curva de calibração dos dosímetros, isto é, a relação entre a resposta termoluminescente e a dose absorvida, foi utilizada a mesma fonte de cobalto usada nas irradiações dos materiais.

Esta fonte, devido à sua constante utilização em radioterapia, é calibrada periodicamente, utilizando-se para isso uma câmara de ionização, modelo M-23332/PTW-Freiburg, com volume de $0,3 \text{ cm}^3$ e um eletrômetro, modelo 6169/Keithley.

Na época de calibração dos dosímetros, a taxa de dose obtida foi de $0,519 \text{ Gy/min.}$, com a câmara de ionização colocada dentro de um simulador de acrílico, sendo de $80,6 \text{ cm}$ a distância da fonte à superfície do simulador; de $4,4 \text{ cm}$ a profundidade de medida e com um campo de

10 x 10 cm² no colimador.

A dose no material do simulador (acrílico) por unidade do monitor, foi obtida através da expressão:

$$D_{\text{meio}}/U = (\overline{M}/\overline{U}) \cdot N_{\text{gás}} \cdot (\overline{L}/\rho)_{\text{ar}}^{\text{meio}} \cdot P_{\text{parede}} \cdot P_{\text{ion}} \cdot P_{\text{subst.}} \dots (15)$$

onde,

$\overline{M}/\overline{U}$ é o sinal médio da câmara por unidade do monitor, normalizado a 20°C e a 760 mmHg: 57,04 div/min.

$N_{\text{gás}}$ é o fator de calibração da cavidade de gás: 8,26 mGy/div.

$(\overline{L}/\rho)_{\text{ar}}^{\text{meio}}$ é a razão dos poderes de frenagem, entre o acrílico e o ar: 1,103 (SCHULZ *et alii*, 1983).

P_{parede} é o fator de correção da parede: 1 (a parede da câmara e o simulador são de mesmo material - acrílico).

P_{ion} é o fator de recombinação de ionização: 1,005 (fornecido pelo fabricante).

$P_{\text{subst.}}$ é o fator de correção da substituição (gradiente): 0,993 (SCHULZ *et alii*, 1983).

O fator de calibração da cavidade de gás, $N_{\text{gás}}$, foi obtido através da expressão:

$$N_{\text{gás}} = N_x \frac{K \cdot (\overline{W}/e) \cdot A_{\text{ion}} \cdot A_{\text{parede}} \cdot \beta_{\text{parede}}}{(\overline{L}/\rho)_{\text{ar}}^{\text{parede}} \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{ar}}^{\text{parede}} + (1-\alpha)_{\text{capa}} \cdot (\mu_{\text{ar}}/\rho)_{\text{capa}}^{\text{ar}} \dots (16)$$

onde,

N_x é o fator de calibração da exposição para os raios gama do ⁶⁰Co, a 20°C e a 760 mmHg: 0,975 R/div.

K	é a carga por unidade de massa de ar por unidade de exposição: $2,58 \times 10^{-4} \text{ C.Kg}^{-1}.\text{R}^{-1}$.
\bar{W}/e	é a energia média por unidade de carga: 33,7 J/C
A_{ion}	é a eficiência de coleção de íons: 0,995 (SCHULZ <i>et alii</i> , 1983).
A_{parede}	é o fator de correção da parede: 0,994 (SCHULZ <i>et alii</i> , 1983).
β_{parede}	é a dose absorvida por fração de colisão de kerma : 1,005
α	é a fração de ionização devido aos elétrons provenientes da parede: 1 (a parede da câmara e a capa de reforço são de mesmo material)
$(\bar{L}/\rho)_{\text{ar}}^{\text{parede}}$	é a razão dos poderes de frenagem, parede/ar : 1,103 (SCHULZ <i>et alii</i> , 1983).
$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{parede}}^{\text{ar}}$	é a razão entre os coeficientes de absorção de energia de massa, ar/parede: 0,925 (SCHULZ <i>et alii</i> , 1983).
$(1 - \alpha)$	é a fração de ionização devido aos elétrons provenientes da capa de reforço : zero.
$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{capa}}^{\text{ar}}$	é a razão entre os coeficientes de absorção de energia de massa, ar/capa : 0,925 (SCHULZ <i>et alii</i> , 1983).

Essa taxa de dose, obtida no acrílico, foi convertida para a água, a uma profundidade de 0,5 cm (dose máxima), através da expressão:

$$D_{\text{água}}^{\text{(max)}/U} = \frac{D_m/U \cdot \text{ESC} \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{meio}}^{\text{água}}}{p/100} \dots\dots\dots (17)$$

onde,

D_m/U é a taxa de dose no simulador (acrílico): 0,519 Gy/min.

ESC é o fator de correção para o excesso de espalhamento dos simuladores de acrílico: 0,987 (SCHULZ *et alii*, 1983).

$(\mu_{en}/\rho)_{\text{meio}}^{\text{água}}$ é a razão entre os coeficientes de absorção de energia de massa, água/acrílico: 1,031 (SCHULZ *et alii*, 1983).

P é a porcentagem de dose profunda, na profundidade de medida ao simulador de acrílico: 77,7%.

Assim, foi obtida uma taxa de dose na água, a 0,5 cm de profundidade, de 0,679 Gy/min., para um campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ no colimador e a 80 cm de distância entre fonte e amostra.

Para as irradiações dos dosímetros de LiF, estes foram separados em três lotes:

lote 1 : dosímetros utilizados na irradiação da água
lote 2 : " " " " " madeira
lote 3 : " " " " " solo

Em cada lote, os dosímetros foram separados em dez grupos de três dosímetros cada e cada grupo irradiado com uma dose específica, dentro do intervalo de 0,5 a 5,0 Gy.

Em cada irradiação, a dose recebida pelo dosímetro foi determinada fazendo-se a conversão da taxa de dose obtida para a água, através da razão entre os coeficientes de absorção de energia de massa do fluoreto de lítio e da água (0,834).

Quando um material termoluminescente é exposto à radiação ionizante, há a necessidade de se estabelecer o equilíbrio eletrônico, para que o mesmo receba a dose correta.

De acordo com ATTIX (1968), a radia -

ção ionizante interage com a matéria através de duas etapas: Na 1^a etapa, os raios gama transferem energia para elétrons atômicos e na 2^a etapa, os elétrons dissipam suas energias cinéticas em múltiplas interações com outros elétrons. Esta 2^a etapa é descrita pela quantidade denominada Dose Absorvida. Assim "dose absorvida de qualquer radiação ionizante, é a quantidade de energia transferida à matéria por unidade de massa contida em um pequeno volume de interesse".

Para que a matéria contida no volume de interesse (volume sensitivo) receba a dose correta, é necessário que a energia recebida por ela, seja transferida somente pelos elétrons originados em ionizações primárias dentro do volume sensitivo, isto é, elétrons originados fora do volume mas que conseguem atingi-lo e aí produzir ionizações, devem ser compensados pelos elétrons originados dentro e que conseguem escapar do volume sensitivo. Isto caracteriza o equilíbrio eletrônico e somente será obtido se o volume sensitivo estiver localizado a uma profundidade tal que o volume do material, em torno do volume sensitivo, tenha uma espessura maior que o alcance máximo dos elétrons originados em ionizações primárias.

Esta espessura, também chamada de profundidade de equilíbrio eletrônico, varia com a energia de radiação. De acordo com SCAFF (1979), a profundidade de equilíbrio eletrônico no tecido humano é de 0,5 cm para a radiação gama do ^{60}Co .

No caso dos dosímetros de LiF irradiados com cobalto, foi usada uma placa de lucite (material equivalente ao tecido humano) de 0,5 cm de espessura, colocada sobre os dosímetros, que serviu como profundidade de equilíbrio eletrônico.

4.6 DETERMINAÇÃO DO FATOR f

O fator f , fator de conversão de dose entre o dosímetro e o material irradiado, foi obtido utilizando-se o seguinte procedimento:

1) através da equação 10 determinou-se os poderes de frenagem de massa para elétrons em função da energia, para os diversos elementos que participam da composição dos materiais irradiados: água, fluoreto de lítio, madeira e solo. Para isto, foram utilizadas as tabelas fornecidas por SELTZER e BERGER (1982).

Para cada material, determinou-se seus poderes de frenagem, em função da energia, no intervalo de 0,02 a 10 MeV, a partir das frações ponderais p_i e dos poderes de frenagem S_i dos elementos que os constituem, de acordo com a expressão:

$$S_{\text{mat}} = \sum (p_i \cdot S_i) \dots\dots\dots (18)$$

As composições percentuais usadas para cada material, foram as seguintes:

- água H (11,2%) e O (88,8%)....(19)
fluoreto de lítio Li(26,8%) e F⁻ (73,2%)....(20)
madeira ($\rho = 0,95 \text{ g/cm}^3$)... H (6,2%); C (44,5%) e O (49,3%)
SELTZER e BERGER (1982)(21)
- solo O (46,4%); Si (27,7%); Al (8,1%)
(Terra Roxa Estruturada) Fe (5,0%) ; Ca (3,6%); Na (2,8%)
K (2,6%) ; Mg (2,1%)(22)
ABRAHÃO *et alii* (1975).

De acordo com a literatura, a radiação gama interage com a matéria através de três processos: efeito fotoelétrico, predominante para baixas energias (na água, até 50 keV); efeito Compton, predominante para energias médias (na água, entre 50 keV e 10 MeV) e efeito produção de par, predominante para altas energias (na água, acima de 10 MeV), conforme BITELLI (1982).

Para a radiação gama do ^{60}Co (energia de 1,25 MeV), o efeito predominante é o Compton. No efeito Compton, a radiação gama interage diretamente com um elétron que está essencialmente livre, ou seja, a energia da radiação gama é muito maior que a energia de ligação do elétron no átomo.

O elétron, considerado inicialmente em repouso, é espalhado com energia T_C , fazendo um ângulo θ com a direção do raio γ incidente. As energias dos elétrons espalhados na colisão Compton, variam desde zero até um valor máximo, de aproximadamente 1 MeV, obtido por:

$$T_{C,max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2 E_\gamma}} \dots\dots\dots (23)$$

onde E_γ é a Energia da radiação gama = 1,25 MeV e $m_0 c^2$ é a energia de repouso do elétron = 0,511 MeV (MONTANHEIRO *et alii*, 1977).

A probabilidade relativa de ocorrer espalhamento de elétrons Compton com uma dada energia, está representada na figura a seguir, pela altura da curva correspondente a cada energia.

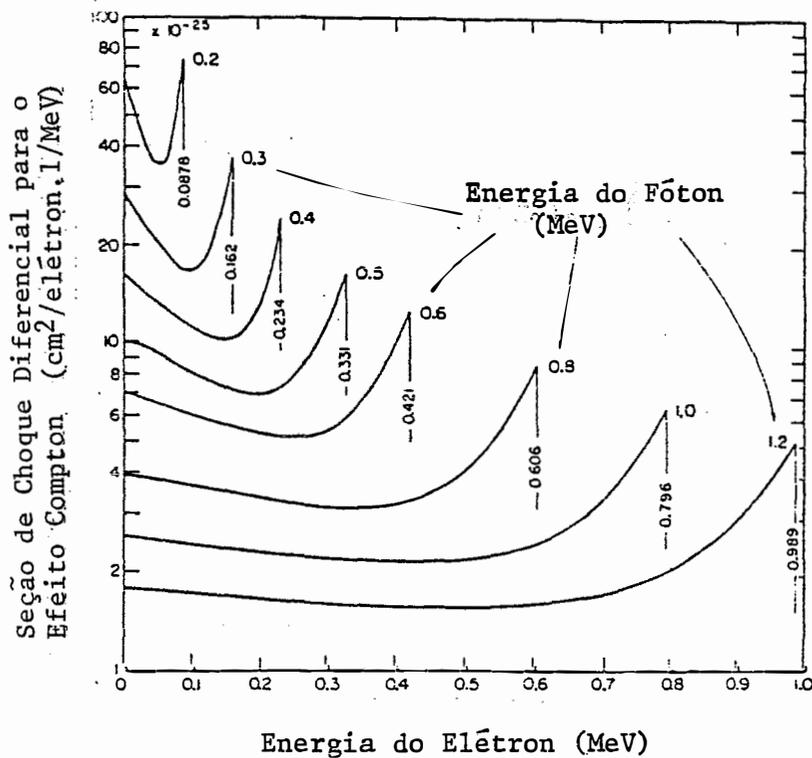


FIGURA 14 - Seção de choque diferencial por elétron e por MeV, para o Efeito Compton, em função da energia entre 0,2 e 1,2 MeV. São indicadas também as energias máximas dos elétrons Compton. (JOHNS e LAUGHLIN, 1956).

De acordo com BRUCE e JOHNS (1960) , a fração média de energia remanescente dos fótons primários do ^{60}Co com energia de 1,25 MeV e a fração média de energia degradada, entre 0,05 e 1,25 MeV, em diferentes profundidades, para um material de número atômico efetivo equivalente à água, são dadas na tabela 2.

TABELA 2 - Fração da energia primária remanescente e fração da energia degradada em função da profundidade , para um material equivalente à água.

Profundidade (cm)	Fração da En.Primária Rem. (1,25 MeV)	Fração da En.Degradada (0,05 a 1,25 MeV)
0	0,93	0,07
2	0,88	0,12
5	0,73	0,27
10	0,53	0,47
20	0,28	0,72
30	0,15	0,85

Considerando que, todas as energias compreendidas no intervalo de 0,05 a 1,25 MeV contribuem igualmente para a formação do espectro da radiação gama, conforme MILLER e McLAUGHLIN (1982), a razão do poder de frenagem médio \bar{S} , entre o LiF e cada material, foi avaliado sobre o espectro dos elétrons secundários, nas posições dos dosímetros, entre 0,05 e 1,25 MeV. Para isto, foi feita a média ponderada da razão dos poderes de frenagem para cada energia, com a sua respectiva probabilidade de ocorrência.

2) Para o cálculo dos coeficientes de absorção de energia de massa, em função da energia, para cada material, foi aplicado o mesmo processo usado para os poderes da frenagem, utilizando-se as tabelas de HUBBELL(1982)

para os diversos elementos.

A razão dos coeficientes de absorção de energia de massa $\bar{\mu}$ entre o LiF e cada material foi avaliado sobre o espectro da radiação gama do ^{60}Co , nas posições dos dosímetros, através da média ponderada dos coeficientes de absorção de energia de massa de cada energia, entre 0,05 e 1,25 MeV, com as respectivas porcentagens dadas na tabela 2.

3) Para a determinação da situação criada pelo dosímetro dentro do material irradiado, conforme descrito no item 3.3.2, foi feita a comparação entre o caminho médio percorrido pelos elétrons através do dosímetro, $g = 3,00 \text{ kg/m}^2$, calculado pela equação 15, considerando as dimensões e densidades dos dosímetros de LiF especificadas respectivamente nos itens 4.3 e 3.2.2 e o alcance R dos elétrons secundários mais energéticos. De acordo com as tabelas de ATTIX (1986) temos:

$R = 7,07 \text{ kg/m}^2$ para o fluoreto de lítio, na energia de 1,25 MeV e

$R = 5,72 \text{ kg/m}^2$ para a água, na mesma energia.

Os dados acima caracterizam a situação na qual a cavidade criada pelo dosímetro dentro do material irradiado é da ordem do alcance dos elétrons secundários mais energéticos. Assim, o fator f foi determinado pela equação 5:

$$f = d \cdot \bar{S}_m^C + (1-d) \bar{U}_m^C$$

4) Os cálculos do parâmetro d , fator de peso, em função da energia, foram obtidos através da equação 13. Para os cálculos do coeficiente efetivo de atenuação de massa para elétrons, em função da energia, foi utilizada a equação 7.

4.7 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Os resultados obtidos das doses em função da profundidade para os diversos materiais, foram submetidos a análises de regressão polinomial e exponencial, no sentido de se verificar qual a equação matemática que melhor se adapta aos resultados. Para isto foi utilizado um micro computador Edisa - Modelo 301.

5. RESULTADOS

A tabela 3 e as figuras 15, 16 e 17 apresentam a resposta termoluminescente dos dosímetros de fluoreto de lítio em função de sua localização (profundidade) em cada material: água, madeira e solo, irradiado com ^{60}Co .

A tabela 4 e as figuras 18, 19 e 20 apresentam a calibração dos dosímetros, mostrando a resposta termoluminescente em função da dose para os dosímetros utilizados na irradiação dos materiais.

Nas tabelas 5, 6 e 7 encontram-se os resultados para o poder da frenagem de massa para elétrons dos diversos materiais; coeficiente de absorção de energia de massa para os diversos materiais; coeficiente efetivo de atenuação de massa para elétrons e fator de peso, em função da energia.

Nas tabelas 8, 9 e 10 encontram-se os resultados obtidos para a razão dos poderes de frenagem de massa; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa; fator f e do fator de conversão ($1/f$) do fluoreto de lítio para a água, madeira e solo.

A tabela 11 apresenta a razão dos poderes de frenagem médio; razão dos coeficientes de absorção de energia médio e fator de conversão de dose, entre o fluoreto de lítio e cada material, em função da profundidade.

As tabelas 12, 13 e 14 apresentam as conversões da dose no dosímetro para a água, madeira e solo, respectivamente, para cada profundidade.

As curvas de dose em função da profundidade para a água, madeira e solo encontram-se nas figuras 21, 22 e 23, respectivamente.

Os resultados obtidos com as análises de regressão polinomial e exponencial para as doses em função da profundidade, nos diferentes materiais, encontram-se na página 70.

TABELA 3 - Resposta termoluminescente dos dosímetros de fluoreto de lítio em função de sua localização (profundidade) em cada material irradiado com ^{60}Co .
(cada ponto: média de três valores)

ÁGUA		MADEIRA		SOLO	
Prof. (cm)	TL (μC)	Prof. (cm)	TL (μC)	Prof. (cm)	TL (μC)
1,0	2,77	1,0	1,84	1,0	2,38
1,3	2,60	2,0	1,73	1,5	2,33
1,8	2,48	3,0	1,64	2,0	2,23
2,3	2,40	4,0	1,55	2,3	2,17
2,7	2,32	5,0	1,40	3,2	2,00
3,3	2,16	6,0	1,32	4,3	1,78
4,0	2,10	7,0	1,26	5,1	1,70
5,0	2,00	8,0	1,17	5,3	1,66
5,9	1,86	10,4	0,94	6,0	1,63
6,7	1,72			6,8	1,49

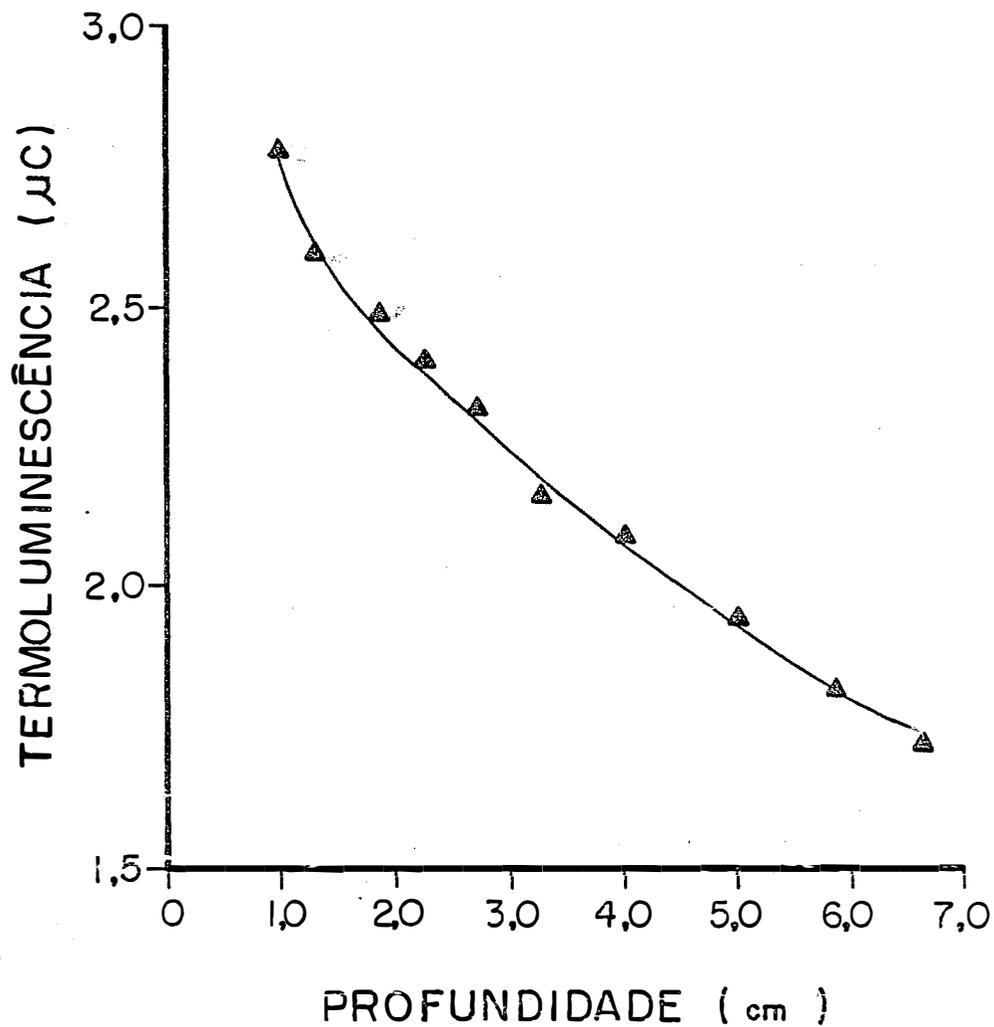


FIGURA 15 - Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade)- dosímetros instalados na água.

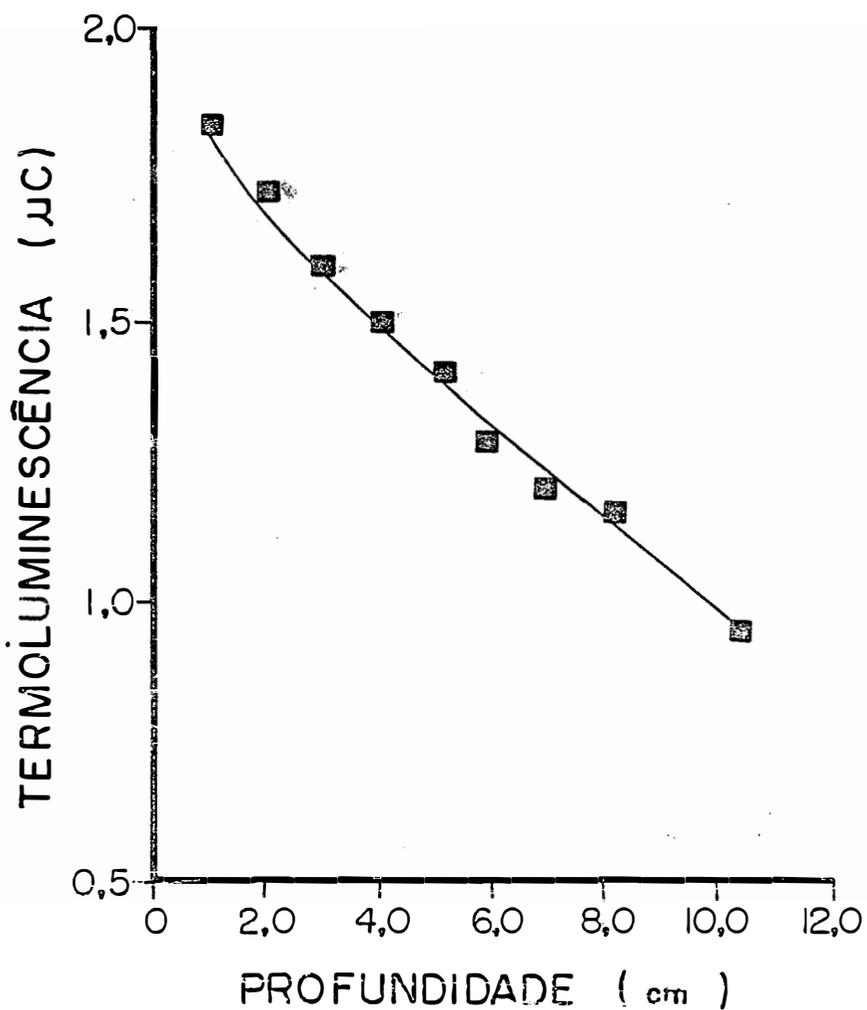


FIGURA 16 - Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade) - dosímetros instalados na madeira.

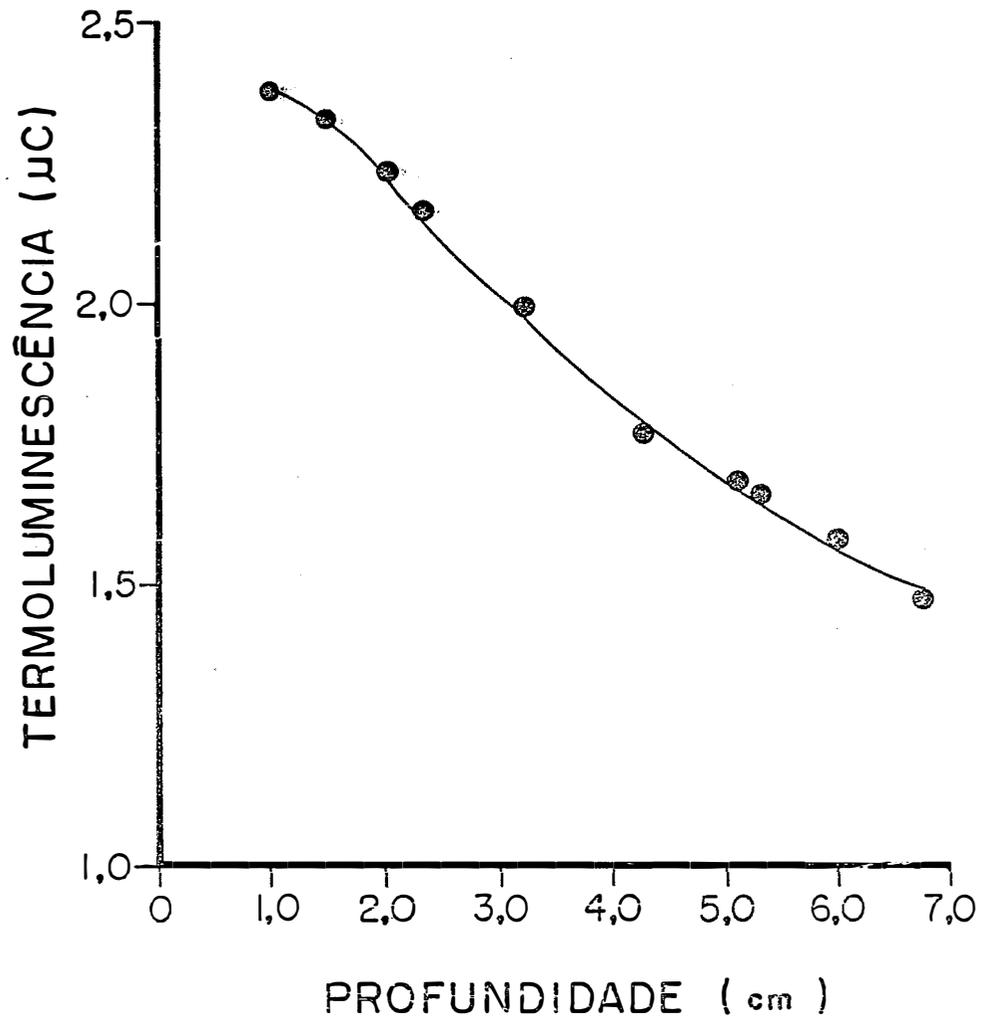


FIGURA 17 - Resposta termoluminescente dos dosímetros de LiF em função de sua localização (profundidade) - dosímetros instalados no solo.

TABELA 4 - Calibração dos dosímetros.

Termoluminescência em função da dose.

A - dosímetros utilizados na irradiação da água
 M - " " " " da madeira
 S - " " " " do solo

Dose (Gy)	A TL (μC)	M TL (μC)	S TL (μC)
0,0	0,0009	0,0002	0,0004
0,5	0,4960	0,5030	0,5390
1,0	1,1100	1,0500	1,1200
1,5	1,7800	1,5700	1,6000
2,0	2,3300	2,1800	2,2500
2,5	2,7700	2,6300	2,9700
3,0	3,3300	3,2400	3,6800
3,5	3,9700	4,0400	3,9200
4,0	4,6900	4,2500	4,5600
4,5	5,3100	5,0800	5,2000
5,0	5,8800	5,7200	5,9000

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR:

$$A : TL (\mu C) = -0,0642 + 1,17 \cdot D (Gy) \dots\dots\dots(24)$$

$$M : TL (\mu C) = -0,0880 + 1,13 \cdot D (Gy) \dots\dots\dots(25)$$

$$S : TL (\mu C) = -0,049 + 1,17 \cdot D (Gy) \dots\dots\dots(26)$$

Significativas ao nível de 1% de probabilidade.

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

$$\text{EQUAÇÃO A : } R = 0,9984$$

$$\text{" M : } R = 0,9863$$

$$\text{" S : } R = 0,9973$$

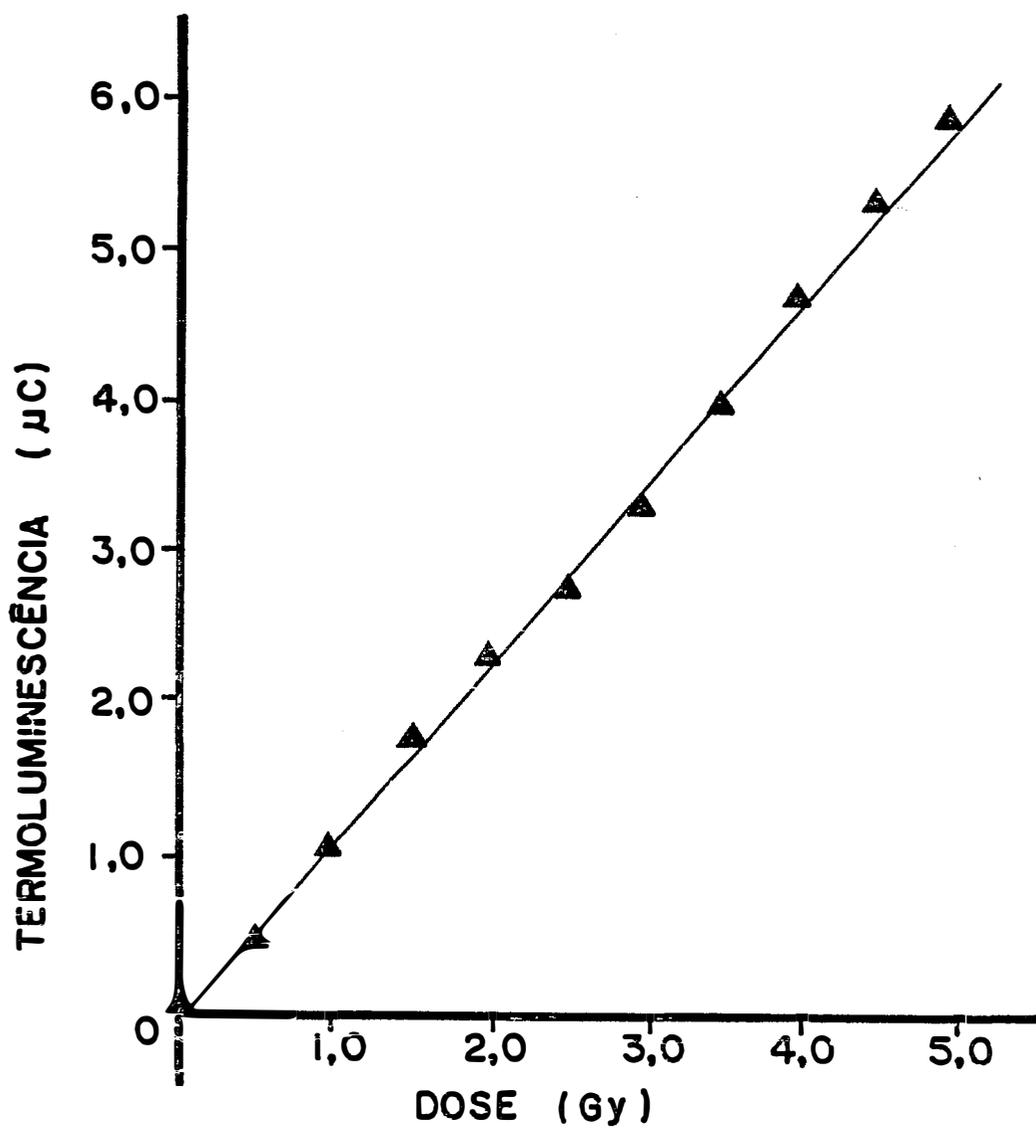


FIGURA 18 - Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação da água.

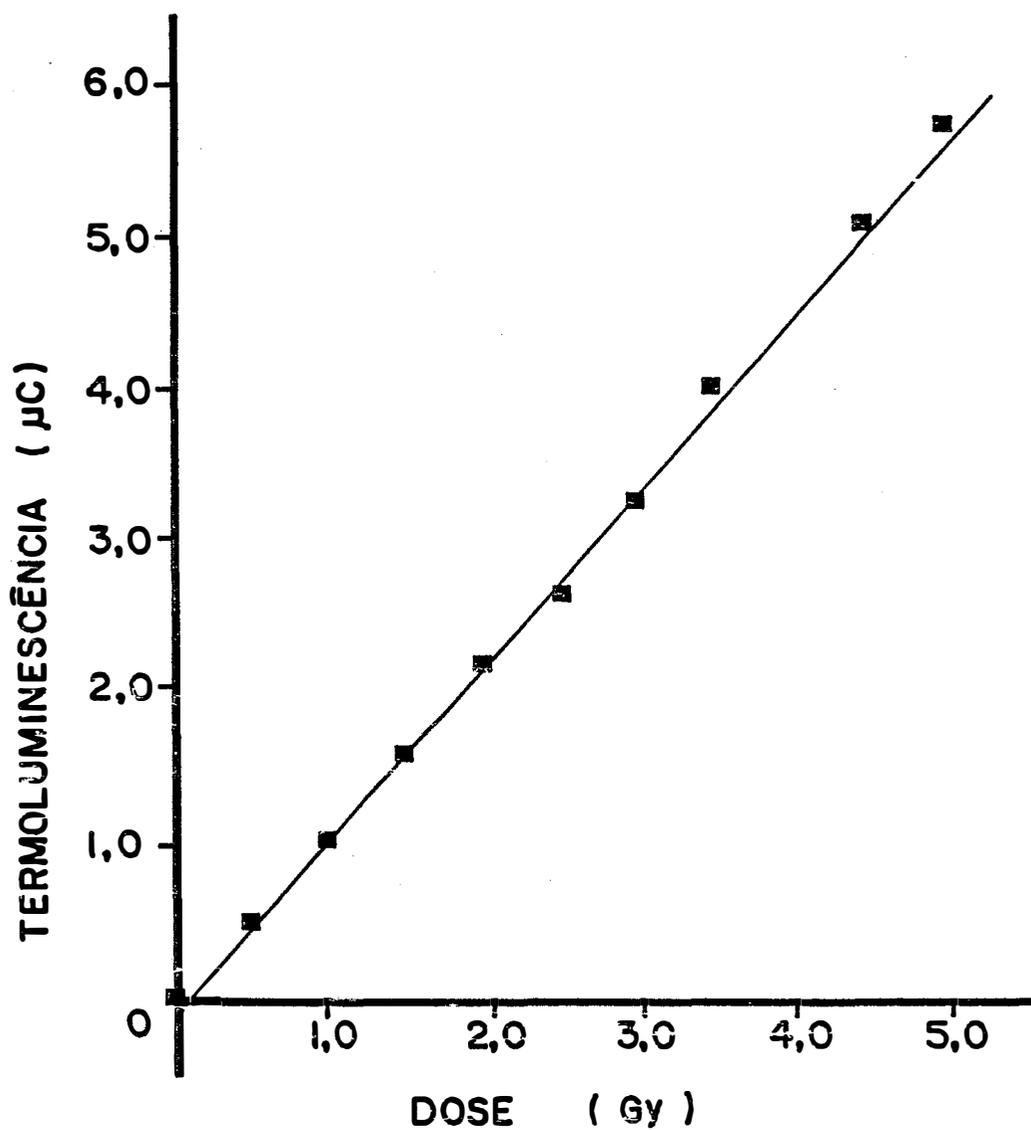


FIGURA 19 - Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação da madeira.

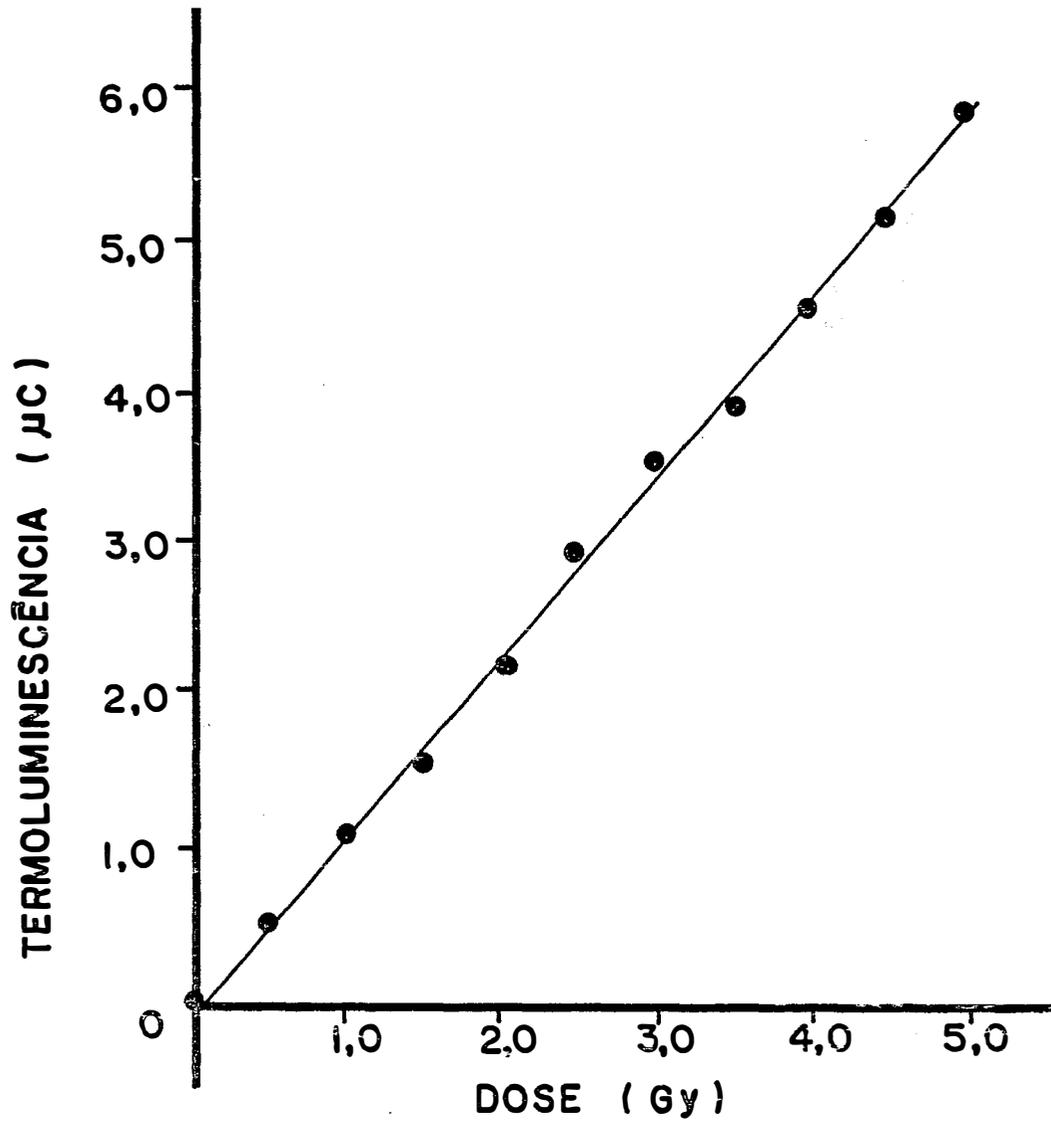


FIGURA 20 - Termoluminescência em função da dose - curva de calibração dos dosímetros de LiF usados na irradiação do solo.

TABELA 5. - Poder de frenagem de massa para elétrons em função da energia para o fluoreto de lítio, água, madeira e solo, em MeV/(g.cm⁻²), SELTZER e BERGER (1982).

ENERGIA (MeV)	LiF	ÁGUA	MADEIRA	SOLO
0,02	10,55	13,17	12,51	10,58
0,05	5,31	6,60	6,28	5,38
0,10	3,32	4,12	3,91	3,38
0,15	2,62	3,24	3,08	2,67
0,20	2,26	2,79	2,66	2,31
0,25	2,05	2,53	2,41	2,10
0,30	1,91	2,35	2,24	1,96
0,35	1,81	2,23	2,13	1,86
0,40	1,74	2,15	2,04	1,79
0,50	1,65	2,03	1,93	1,69
0,60	1,59	1,96	1,86	1,64
0,70	1,55	1,92	1,82	1,60
0,80	1,53	1,85	1,79	1,58
1,00	1,50	1,85	1,76	1,56
1,25	1,48	1,84	1,74	1,55
1,50	1,48	1,83	1,73	1,56
2,00	1,48	1,84	1,74	1,57
3,00	1,51	1,87	1,76	1,62
6,00	1,56	1,94	1,83	1,72
10,00	1,61	1,99	1,88	1,81

TABELA 6 - Coeficiente de absorção de energia de massa em função da energia para o fluoreto de lítio, água, madeira e solo, em m^2/kg , MUBBELL (1982).

ENERGIA (MeV)	LiF	ÁGUA	MADEIRA	SOLO
0,02	0,0635	0,0537	0,0394	0,358
0,03	0,0179	0,0152	0,0113	0,1077
0,04	0,00774	0,00680	0,00523	0,0452
0,05	0,00447	0,00416	0,00336	0,0234
0,10	0,00222	0,00254	0,00236	0,00426
0,20	0,00248	0,00297	0,00283	0,00289
0,30	0,00266	0,00319	0,00305	0,00290
0,40	0,00273	0,00328	0,00313	0,00293
0,50	0,00275	0,00330	0,00315	0,00293
0,60	0,00274	0,00328	0,00314	0,00291
0,80	0,00267	0,00320	0,00306	0,00284
1,00	0,00258	0,00310	0,00296	0,00274
1,25	0,00247	0,00296	0,00283	0,00262
1,50	0,00236	0,00283	0,00270	0,00250
2,00	0,00217	0,00260	0,00249	0,00231
3,00	0,00190	0,00228	0,00217	0,00205
6,00	0,00153	0,00180	0,00172	0,00174
10,00	0,00135	0,00157	0,00148	0,00152

TABELA 7 - Coeficiente efetivo de atenuação de massa para e-
lêtrons e fator de peso em função da energia.

ENERGIA (MeV)	β (m ² /kg)	d
0,05	630	0
0,10	75,1	0,004
0,15	33,5	0,010
0,20	20,1	0,017
0,25	13,9	0,024
0,30	10,3	0,032
0,35	8,10	0,041
0,40	6,59	0,051
0,50	4,69	0,071
0,60	3,57	0,093
0,70	2,84	0,117
0,80	2,33	0,143
1,00	1,68	0,196
1,25	1,22	0,266
1,50	0,938	0,334
2,00	0,622	0,453
3,00	0,350	0,619
6,00	0,131	0,827
10,00	0,064	0,910

TABELA 8 - Razão dos poderes de frenagem de massa (S_m^C); razão dos coeficientes de absorção de energia de massa (μ_m^C); fator f (f) e do fator de conversão de dose (1/f) do fluoreto de lítio, LiF, para a água, em função da energia em MeV.

ENERGIA (MeV)	S_m^C	μ_m^C	f	1/f
0,05	0,805	1,075	1,075	0,93
0,10	0,806	0,874	0,874	1,14
0,20	0,810	0,835	0,835	1,20
0,30	0,813	0,834	0,833	1,20
0,40	0,809	0,832	0,830	1,20
0,50	0,813	0,833	0,832	1,20
0,60	0,811	0,835	0,832	1,20
0,80	0,827	0,834	0,833	1,20
1,00	0,811	0,832	0,829	1,20
1,25	0,804	0,834	0,826	1,20
1,50	0,809	0,834	0,826	1,21
2,00	0,804	0,835	0,821	1,22
3,00	0,807	0,833	0,817	1,22
6,00	0,804	0,850	0,812	1,23
10,00	0,809	0,860	0,814	1,23

TABELA 9 - Razão dos poderes de frenagem de massa (S_m^C) ; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa (μ_m^C) ; fator f (f) e do fator de conversão de dose (1/f) do fluoreto de lítio, LiF para a madeira, em função da energia em MeV.

ENERGIA (MeV)	S_m^C	μ_m^C	f	1/f
0,05	0,846	1,330	1,330	0,75
0,10	0,849	0,945	0,945	1,06
0,20	0,850	0,876	0,876	1,14
0,30	0,853	0,875	0,874	1,14
0,40	0,853	0,875	0,874	1,14
0,50	0,855	0,873	0,872	1,15
0,60	0,836	0,873	0,870	1,15
0,80	0,844	0,873	0,869	1,15
1,00	0,852	0,872	0,868	1,15
1,25	0,851	0,873	0,867	1,15
1,50	0,855	0,874	0,868	1,15
2,00	0,851	0,875	0,864	1,16
3,00	0,858	0,876	0,855	1,15
6,00	0,852	0,890	0,858	1,16
10,00	0,856	0,912	0,861	1,16

TABELA 10 - Razão dos poderes de frenagem de massa (S_m^C) ; razão dos coeficientes de absorção de energia de massa (μ_m^C); fator f (f); e do fator de conversão de dose (1/f) do fluoreto de lítio, LiF para o solo, em função da energia em MeV.

ENERGIA (MeV)	S_m^C	μ_m^C	f	1/f
0,05	0,987	0,191	0,191	5,24
0,10	0,982	0,521	0,523	1,91
0,20	0,978	0,858	0,861	1,16
0,30	0,944	0,917	0,918	1,09
0,40	0,939	0,932	0,932	1,07
0,50	0,971	0,939	0,941	1,06
0,60	0,963	0,942	0,944	1,06
0,80	0,962	0,940	0,943	1,06
1,00	0,962	0,942	0,946	1,06
1,25	0,955	0,943	0,946	1,06
1,50	0,949	0,944	0,946	1,06
2,00	0,943	0,939	0,941	1,06
3,00	0,932	0,927	0,930	1,08
6,00	0,907	0,879	0,902	1,11
10,00	0,890	0,888	0,890	1,12

TABELA 11 - Razão dos poderes de frenagem médio (\bar{S}_m^C); razão dos coeficientes de energia de massa médio ($\bar{\mu}_m^C$) e fator de conversão de dose (1/f), entre o fluoreto de lítio e cada material, em função da profundidade.

Material	Profundidade (cm)	\bar{S}_m^C	$\bar{\mu}_m^C$	1/f
Água	0	0,811	0,836	1,20
	2	0,812	0,837	1,20
	5	0,812	0,842	1,20
	10	0,813	0,848	1,19
Madeira	0	0,852	0,877	1,15
	2	0,852	0,880	1,15
	5	0,852	0,889	1,14
	10	0,851	0,900	1,13
Solo	0	0,962	0,933	1,06
	2	0,962	0,926	1,06
	5	0,962	0,904	1,07
	10	0,962	0,875	1,10

TABELA 12 - Doses no dosímetro (LiF) e na água em função da profundidade.

Fator de conversão : $\frac{1}{f} = 1,20$

PROFUNDIDADE (cm)	DOSE (GY) : LiF	DOSE (GY) : ÁGUA
1,0	2,42	2,90
1,3	2,27	2,72
1,8	2,17	2,60
2,3	2,10	2,52
2,7	2,04	2,45
3,3	1,90	2,28
4,0	1,85	2,22
5,0	1,77	2,12
5,9	1,65	1,98
6,7	1,53	1,84

TABELA 13 - Doses no dosímetro (LiF) e na madeira em função da profundidade.

Fator de conversão: $1/f = 1,15$

PROFUNDIDADE (cm)	DOSE (Gy): LiF	DOSE (Gy): MADEIRA
1,0	1,71	1,97
2,0	1,61	1,85
3,0	1,53	1,76
4,0	1,45	1,67
5,0	1,32	1,52
6,0	1,25	1,44
7,0	1,21	1,39
8,0	1,11	1,28
10,4	0,91	1,05

TABELA 14 - Doses no dosímetro (LiF) e no solo, em função da profundidade.

Fator de conversão: $\frac{1}{f} = 1,06$

PROFUNDIDADE (cm)	DOSE (GY) : LiF	DOSE (GY) : SOLO
1,0	2,08	2,20
1,5	2,04	2,16
2,0	1,95	2,07
2,3	1,90	2,02
3,2	1,76	1,86
4,3	1,57	1,67
5,1	1,50	1,59
5,3	1,47	1,56
6,0	1,44	1,53
6,8	1,33	1,41

ANÁLISE DE REGRESSÃO

I. A análise de regressão polinomial aplicada aos dados das tabelas 12, 13 e 14 forneceu os seguintes resultados:

Água D = 3,3226 - 0,5409 x + 0,09436 x² - 0,006953 x³(27) significativo ao nível de 1% de probabilidade

Madeira D = 2,1064 - 0,1160 x + 0,001782 x²(28) significativo ao nível de 5% de probabilidade

Solo D = 2,3505 - 0,1160 x - 0,01829 x² + 0,002277 x³(29) significativo ao nível de 1% de probabilidade

onde D é a dose em Gy e x é a profundidade em cm

II. A análise de regressão exponencial aplicada às mesmas tabelas, forneceu os seguintes resultados, todos ao nível de 1% de probabilidade.

Água D = 2,9949 e^{-0,0724 x}(30)

Madeira D = 2,1325 e^{-0,0628 x}(31)

Solo D = 2,4061 e^{-0,0795 x}(32)

onde D é dose em Gy e x é a profundidade em cm

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO:

ÁGUA : R = -0,9831

MADEIRA : R = -0,9919

SÓLO : R = -0,9946

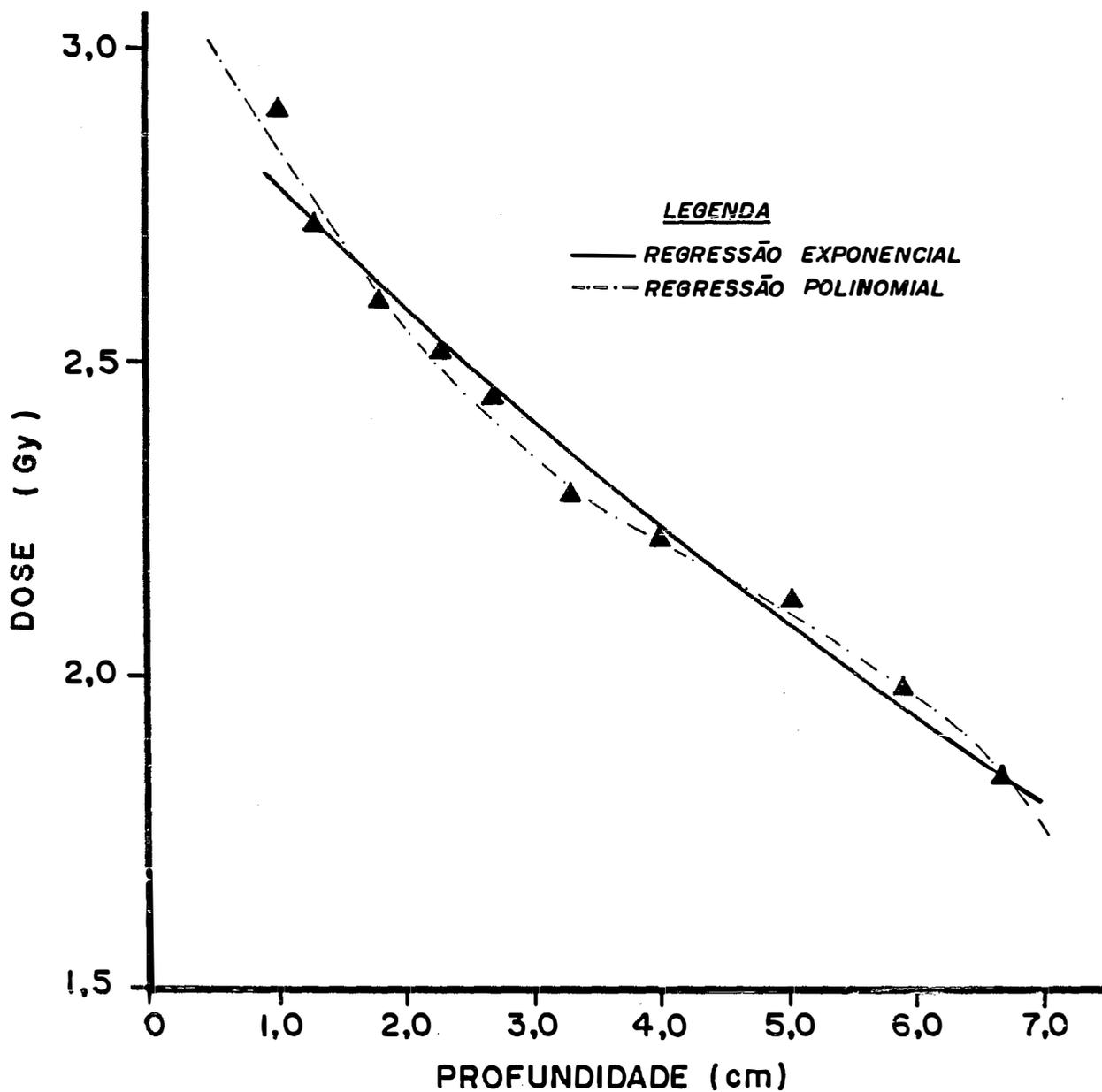


FIGURA 21 - Curva da dose de radiação absorvida pela água em função da profundidade.

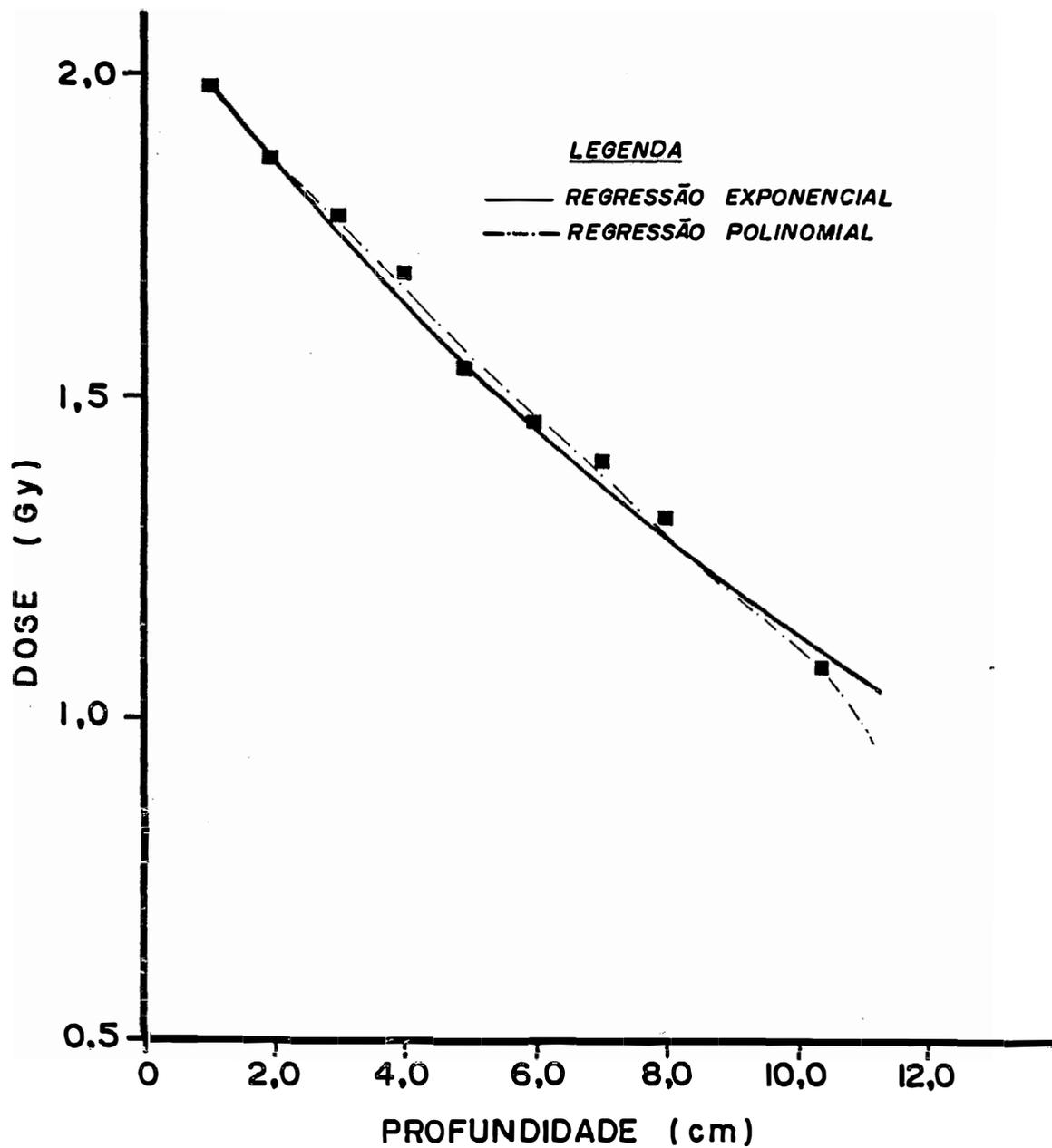


FIGURA 22 - Curva da dose de radiação absorvida pela madeira em função da profundidade.

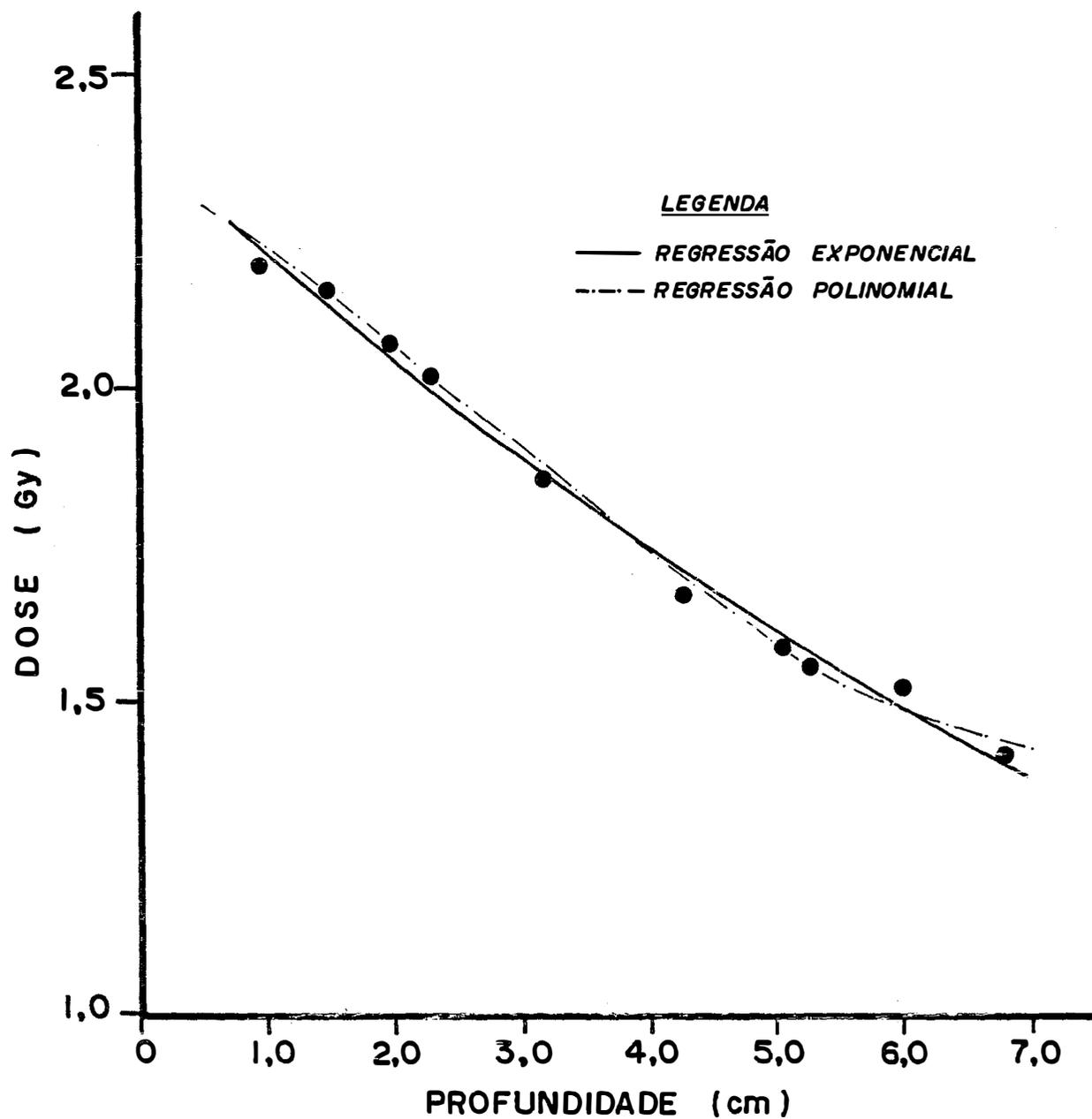


FIGURA 23 - Curva da dose de radiação absorvida pelo solo em função da profundidade.

6. DISCUSSÃO

Conforme a teoria geral de ionizações em cavidades, existem três situações distintas ao irradiarmos um material que contenha um dosímetro no seu interior. A aplicação de uma situação em particular depende da comparação entre o tamanho da cavidade, representada pelo caminho médio percorrido pelos elétrons através do dosímetro, g , e o alcance dos elétrons secundários mais energéticos, R .

No presente trabalho, os valores g e R , conforme especificados na página 48, foram considerados de mesma ordem de grandeza, caracterizando a situação na qual o tamanho da cavidade é da ordem do alcance dos elétrons secundários mais energéticos.

Na determinação de g , observa-se que seu valor não depende da energia da radiação incidente, mas somente das dimensões geométricas do dosímetro e da densida

de do material de que ele é feito. Por outro lado, o valor de R varia diretamente com a energia da radiação gama.

Na determinação do fator f , fator de conversão de dose entre a cavidade e o meio na qual ela é criada, observa-se que o parâmetro d , chamado de fator de peso, desempenha um papel fundamental.

Assim, através da análise da tabela 7, nota-se que para baixas energias, entre 0,05 e 0,7 MeV, d varia entre os valores 0 e 0,117. Portanto, o fator f é determinado praticamente pela razão dos coeficientes de absorção de energia de massa médios, entre o dosímetro e o material irradiado. Assim, essa razão contribui com uma porcentagem que varia de 88,3 a 100%, enquanto que a contribuição da razão dos poderes de frenagem de massa para elétrons atinge, no máximo, valores de 11,7%. Nesta faixa de energia, a cavidade criada pelo dosímetro dentro do material irradiado pode ser considerada grande em relação ao alcance dos elétrons secundários mais energéticos.

Para uma faixa de energia de 0,8 a 10 MeV, o fator de conversão de dose, f , sofre contribuições significativas tanto da razão dos poderes de frenagem quanto da razão dos coeficientes de absorção de energia. O fator de peso, d , varia de 0,143 a 0,910 e para esta faixa de energia a cavidade criada pelo dosímetro dentro do material irradiado é da ordem do alcance dos elétrons mais energéticos.

No caso específico da radiação γ do ^{60}Co e do dosímetro utilizado no experimento, o fator de peso vale 0,266 e, portanto, temos 26,6% de contribuição relativa à razão dos poderes de frenagem e 73,4% de contribuição relativa à razão dos coeficientes de absorção de energia de massa.

Para altas energias, acima de 10 MeV, o fator de peso, d , tende para 1, fazendo com que a contribuição da razão do poder de frenagem, na obtenção do fator f , seja alta, atingindo valores acima de 90%, enquanto que a contribuição da razão dos coeficientes de absorção de energia de massa cai para valores abaixo de 10%. Para esta situação, a cavidade criada pelo dosímetro, dentro do material irradiado, pode ser considerada pequena em relação ao alcance dos elétrons secundários mais energéticos.

Em relação à profundidade de cada material (localização dos dosímetros), observa-se que, através da tabela 11, para todos os materiais irradiados: água, madeira e solo, a razão dos poderes de frenagem médios, entre o dosímetro e cada material, avaliado sobre o espectro dos elétrons secundários, praticamente mantém-se constante com a profundidade, para todos os materiais, enquanto que, a razão dos coeficientes de absorção de energia médios apresenta pequenas variações com a profundidade. Este fato está relacionado com a mudança no espectro da radiação gama do ^{60}Co em relação à profundidade, conforme a tabela 2.

No experimento, para todos os materiais irradiados, para as profundidades analisadas, observa-se que o fator de conversão de dose não apresenta variações acima de 1%, em relação à profundidade, o que justifica a utilização de um fator único para cada material em todas as profundidades.

Com relação à calibração dos dosímetros, tabela 4 e figuras 18, 19 e 20, verificamos que, através das equações de regressão linear, os três lotes de dosímetros usados na irradiação dos materiais apresentam respostas termoluminescentes, as quais diferem entre si, no máximo, de 7% para uma mesma dose de radiação.

As curvas de dose em função da profundidade, para a água, madeira e solo, obtidas neste trabalho, podem ser representadas, tanto por uma equação de regressão polinomial quanto por uma regressão exponencial, conforme verifica-se através das figuras 21, 22 e 23. Na literatura, encontra-se referência somente às equações de regressão exponencial, porque normalmente estas equações se ajustam melhor aos efeitos de atenuação ou absorção de radiação gama.

É importante observar que essas equações de regressão correspondem à região dosimétrica, isto é, são válidas para profundidades maiores que a profundidade de equilíbrio eletrônico, em cada material.

De acordo com CHADWICK *et alii* (1977), a dose absorvida por um material, em função da profundidade no mesmo, é dada por:

$$D_x \cong D_0 \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{\bar{\mu}}{\rho} \right)_i x \right\} \dots\dots\dots 33$$

onde D_0 é a dose na profundidade de equilíbrio eletrônico; $\left(\frac{\bar{\mu}}{\rho} \right)_i$ é o coeficiente total de atenuação de massa, avaliado sobre todo o espectro da radiação na profundidade considerada e x é a profundidade medida a partir da espessura de equilíbrio eletrônico, em unidades de cm^2/g ou m^2/kg , dependendo do sistema de unidades utilizadas para o coeficiente de atenuação de massa.

A equação acima não indica uma relação de igualdade, mas sim de aproximação e não existe referências sobre o grau de aproximação desta equação. Isto não nos permite estabelecer comparações precisas entre os valores, obtidos neste trabalho, para os coeficientes de atenuação de massa (dados nas equações de regressão exponencial), com os valores indicados na literatura.

7. CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

1. pode-se usar um fator único de conversão de dose do fluoreto de lítio para cada material irradiado, para todas as profundidades analisadas;

2. devido ao tamanho da cavidade criada pelo dosímetro dentro de cada material irradiado com ^{60}Co , o fator de conversão de dose sofre contribuições significativas tanto da razão dos coeficientes de absorção de energia de massa (73,4%) quanto da razão dos poderes de frenagem de massa para elétrons (26,6%).

3. a dose de radiação absorvida pelos dosímetros pode ser correlacionada com a termolumines -

cência emitida pelos mesmos, através de uma regressão linear ao nível de 1% de significância.

4. em todos os materiais estudados :
água, madeira e solo, a absorção de dose pode ser correlacionada com a profundidade no material através de uma regressão exponencial ao nível de 1% de significância, ou através de uma regressão polinomial ao nível de 1% de significância para a água e solo e ao nível de 5% de significância para a madeira.

5. das duas regressões analisadas :
polinomial e exponencial, a preferência é para a exponencial, por ser mais usual na literatura.

6. nos materiais irradiados com ^{60}Co :
água, madeira e solo, a dose de radiação absorvida apresenta uma variação acentuada com a profundidade.

8. LITERATURA CITADA

ABRAHÃO, I.O.; D.A.F. CAMPOS e A. MARCONI, 1975. *Mineralogia e Petrologia*. Piracicaba, ESALQ/USP., p.8.

ATTIX, F.H., 1968. *Basic γ -Ray Dosimetry*. *Health Physics*. Washington, USA., 15: 49-56.

ATTIX, F.H., 1986. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. New York, USA. Ed. John Wiley & Sons. 607 p.

BITELLI, T., 1982. *Dosimetria e Higiene das Radiações*. São Paulo. Ed.Grêmio Politécnico. p. 116.

BURLIN, T.E., 1966. *A General Theory of Cavity Ionisation*. *Brit.J.Rad.*, London, 39: 727-734.

BRUCE, W.R. e H.E. JOHNS, 1960. The Spectra of X-Rays Scattered in Low Atomic Number Materials. *Brit.J.Radiol.* , London, England, Suppl. nº 9.

CAMERON, J.R.; F. DANIELS, N. JOHNSON e G. KENNEY, 1961. Radiation Dosimeter Utilizing the Thermoluminescence of Lithium Fluoride. *Science* ,New York, USA. 134: 333-334.

CAMERON, J.R.; N. SUNTHARALIGAM e G.N. DENNY, 1968. *Thermoluminescent Dosimetry*. Madison, University of Wisconsin Press. 182 p.

CHADWICK, K.H., 1966. Energy Distribution in Rotating Fruit under Unidirectional Electron Irradiation. *Food Irradiation*. Wagening, Netherland. 127: 91-97.

CHADWICK, K.A.; D.A. EHLERMANN, W.L. McLAUGHLIN, F.X. RIZZO e Y. TAKASHIMA, 1977. *Manual of Food Irradiation Dosimetry*. Washington, USA. IAEA, Technical Reports Série nº 178. p. 17.

COX, F.M., 1968. *Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry* . Tennessee, USA. IAEA. p.61.

DANIELS, F.; C.A. BOYD e D.F. SAUNDERS, 1953. Thermoluminescence as a Research Tool. *Science*. New York, USA. 117: 343-349.

- DHAWAN, M.L. e R. CHAWLA, 1979. Comparison of CaF_2 and LiF Measurements of Energy Deposition Rates in Materials Irradiated in a Large ^{60}Co Facility. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA, 30: 677-688.
- DHAWAN, M.L. e R. CHAWLA, 1980. Calorimetric Validation of TLD-Measured Gamma-irradiation Effects. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA, 31: 73-78.
- DILLMAN, L.T., 1969. Radionuclide Decay Schemes and Nuclear Parameters. *Journal of Nuclear Medicine.* New York, USA, 10: 7-32.
- DURAN, J.E.R. e T.G. NETTO, 1983. Thermoluminescence of Teeth and Bones. *Meeting on Radiological Protection and Dosimetry.* Rio de Janeiro, Brasil. March: 21-26.
- HUBBELL, J.H. 1982. Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficients from 1 KeV to 20 MeV. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA: 33: 1269-1290
- HUMPHREYS, J.C.; S.E.; CHAPPELL e W.L. McLAUGHLIN, 1977. Measurements of Dose Distributions in Various Materials Irradiated by 10 MeV Electrons. *Radiat.Phys.Chem.* Washington, USA. 9:749-761.
- JOHNS, H.E. e J.S. LAUGHLIN, 1956. Interaction of Radiation with Matter. In: HINE, G.J. e G.L. BROWNELL, Edit. *Radiation Dosimetry.* New York, Academic Press, p. 67.
- KAPLAN, I. 1962. *Nuclear Physics.* Massachusetts, USA. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 633 p.

KVASNICKA, J. 1981. β -Ray Dosimetry of Natural Samples by the TLD Method. *Int.J.App.Rad.Isot.* New York, USA, . 32: 201-204.

LANZL, L.H., 1970. *Manual on Radiation Dosimetry*. New York, USA. Edit.Marcel Dekker Inc. p. 215.

McKINLAY, A.F., 1981. *Thermoluminescence Dosimetry*. Bristol, Adam Hilger Ltd, 167 p.

MILLER, A. e W.L. McLAUGHLIN, 1982. Calculation of the Energy Dependence of Dosimeter Response to Ionizing Photons. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA , 33: 1299 - 1310.

MONTANHEIRO, M.N.S.; V.F. NASCIMENTO Fº e F.A. PINTO, 1977. Introdução à Espectrometria Gama. *Boletim Didático*. nº 21 Piracicaba, ESALQ/USP, 37 p.

NAYLOR, G.P.; 1967. The Application of TL Phosphors in Dosimetry Problems in Radiotherapy and Radiobiology. *Brit.J. Radiol.* London , England, 40: 170-176.

NEWBERY, G.R. e D.K. BEWLEY, 1955. The Performance of the Medical Research Council 8 MeV Linear Accelerator. *Brit. J. Radiol.* London, England, 28: 241-245.

- PINKERTON, A.P., 1969. Comparison of Calorimetric and Other Methods for the Determination of Absorbed Dose. *Annals of the N.Y. Academy of Science*. New York, USA. 161:63-76.
- PRADHAN, A.S.; S. BALACHANDRAN e R.C. BHATT, 1982. Sensitized CaSO₄: Dy Teflon Tl Dosimeters for In-phantoms Dosimetry of ⁶⁰Co Irradiations. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA, 33: 771-772
- RANDALL, J.T. e M.H.F. WILKINS, 1945. Phosphorence and Electron Traps: The Study of Traps Distributions and the Interpretation of Long Period Phosphorescence. *Proc.Royal. Soc.London*. London, England. *Série A*, 184:366-407.
- ROSENSTEIN, M.; H. EISEN e J. SILVERMAN, 1972. Electron Depth-Dose Distribution Measurements in Finite Polystyrene Slabs. *J.Appl.Phys.*, 43: 3191-3202.
- SCAFF, L.A.M., 1979. *Bases Físicas da Radiologia: Diagnóstico e Terapia*. São Paulo. Ed.Sarvier. p.100.
- SCHULZ, R.J.; P.R. ALMOND, J.R. CUNNINGHAM; J.G. HOLT; R. LOEVINGER; N. SUNTHARALINGAM, K.A., WRIGHT; R. NATH e G.D. LEMPert, 1983. A Protocol for the Determination of Absorbed Dose from High-Energy Photon and Electron Beams. *Medical Physics* . New York, USA. 10; 6: 741-771.

- SELTZER, S.M. e M.J. BERGER, 1982. Evaluation of the Collision Stopping Power of Elements and Compounds for Electrons and Positrons. *Int.J.App.Rad.Isot.* New York , USA. 33: 1189-1218.
- SILVA, M.C.P., 1985. Estudos de Termoluminescência em Alguns Cristais Naturais. São Carlos, IFQSC/USP, 73 p. (Dissertação de Mestrado).
- SVARGER, V.; J.F. FOWLER e T.J. DEELEY, 1965. Exit Doses for Lung Fields Measured by Lithium Fluoride Thermol. *Brit.J.Radiol.* London, England. 38:785-790.
- TILTON, E.W.; J.H. BROWER e R.R. COGBURN, 1971. A Method of Dosimetry for a Bulk-Grain Irradiator. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA. 22:577-580.
- VACIRCA, S.J.; D.L. THOMPSON, B.S.; PASTERNAK e H. BLATZ , 1972. A Film Thermoluminescent Dosimetry Method for Predicting Body Doses Due to Diagnostic Radiography. *Phys.Med.Biol.* London , 17:71-80.
- WEIZZ, J. e F.X. RIZZO, 1970. *Manual on Radiation Dosimetry.* New York, USA. Edit.Marcel Dekker Inc. p.235.
- WINTLE, A.G. e M.J. AITKEN, 1977. Absorbed Dose from a Beta Source as Shown by Thermoluminescence Dosimetry. *Int.J.Appl.Rad.Isot.* New York, USA. 28: 625-627.

ZIMMERMAN, D.W.; C.R. RHYNER e J.R. CAMERON, 1965. *Proc.Int. Conf. on Luminescence Dosimetry*. Stanford, USA. USAEC. p. 86.