UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Física e Química de São Carlos
Departamento de Física e Ciência dos Materiais

ESTUDOS DE TERMOLUMINESCÊNCIA
EM
ALGUNS CRISTAIS NATURAIS

Maria Concenta Pereira da
Silva

Dissertação apresentada ao Instituto de Física e Química de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Thomaz Ghilardi Neto

São Carlos - 1985

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE _____

Maria Concepta Pereira da Silva

APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 20 DE dezembro DE 1985.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Thomaz Chilardi Neto

- Orientador

Dr. Gian Maria A. Sordi

Dr. Guilherme Fontes Leal Ferreira

À

meus pais

minhas irmãs e irmãos

meu noivo e seus pais

A G R A D E C I M E N T O

Ao Prof. Dr. Thomaz Ghilardi Netto, que me orientou neste trabalho.

Aos Professores do Setor de Física da FFCLRP - USP pela colaboração.

Aos Profs. Adonis de Souza e Osmar Sinelli pelo fornecimento dos minerais e colaboração.

Aos funcionários do Departamento de Geologia, Física e Matemática da FFCLRP - USP que trabalharam comigo, pela dedicação e amizade.

A todo o Departamento de Física do IFQSC, pela atenção.

À CAPES, CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro.

T Í T U L O :

E S T U D O S D E T E R M O L U M I N E S C Ê N C I A

E M A L G U N S C R I S T A I S N A T U R A I S

ÍNDICE

Lista de ilustrações	i
Lista de tabelas	ii
Resumo	j
Abstract	jj

Capítulo I - INTRODUÇÃO: DEFINIÇÃO E HISTÓRIA DA TERMOLUMINESCÊNCIA (TL) E DA DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE (TLD) 1

1.1 Dosímetro termoluminescente.....	3
1.2 Modelo simples de termoluminescência	4
1.3 Principais características da termoluminescência	8
1.4 Grandezas e unidades relativas à radiação	16
1.5 Objetivo.....	18

Capítulo II - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS 19

2.a Características dos minerais estudados.....	19
2.b Preparação das amostras	19
2.c Tratamento térmico	21
2.d Métodos de irradiação	21
2.e Cuidados especiais durante a exposição à radiação	23
2.f Aparelho leitor	25

Capítulo III - CARACTERÍSTICAS GERAIS 29

3.1 Linearidade, supralinearidade e saturação	29
3.2 Sensibilidade e estabilidade	30
3.3 Estrutura dos cristais	30
3.4 Fatores ambientais	31

Capítulo IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO 32

4.1 Ametista	32
4.2 Berilo	35
4.3 Calcita	35

4.4 Calamina	41
4.5 Espodumênio	44
4.6 Feldspatos	48
4.7 Rutilo	54
4.8 Turmalinas	56
 Capítulo V - CONCLUSÕES	 68
 Sugestões para futuros trabalhos	 70
 Referências Bibliográficas	 71

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.a	- Representação da estrutura de um cristal real...	05
Figura 1.b	- Representação da estrutura de um cristal ideal.	05
Figura 2.a	- Diagrama hipotético de energia; (1) de um cristal ideal; (2) de um cristal real	07
Figura 2.b	- Diagrama hipotético de energia para cada estágio envolvido no processo de emissão termoluminescente	07
Figura 3	- Efeitos da razão de aquecimento sobre a curva de emissão.....	09
Figura 4	- Curva da intensidade natural da TL em função da granulação, para calamina	20
Figura 5.1	- Diagrama hipotético relacionado a espessura de	26
Figura 5.2	- Esquemas do sistema de aquecimento e do tubo da fotomultiplicadora em um aparelho leitor	26
Figura 6	- Diagrama de bloco do sistema leitor de TL	28
Figura 7	- Esquema da localização das regiões linear e supralinear e de saturação.....	30
Figura 8	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição para amostras de TLD-100 (LiF) e de ametista	33
Figura 9	- Curva de emissão da ametista	34
Figura 10	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, para amostras de TLD-100 (LiF) e de berilo	36
Figura 11	- Curva de emissão do berilo.....	37
Figura 12.a	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, para amostras de TLD-100 (LiF), curva (A) e de calcita curvas (B) e (C) obtidas com aparelho da Sapro e da Harshaw, respectivamente	38
Figura 12.b	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, para amostras de TLD-100 (LiF) ; curva (A) obtida com o aparelho da Sapro e curva (B) com o da Harshaw.....	39
Figura 13	- Curvas de emissão da calcita, obtidas para exposições realizadas com amostras a luz ambiente (curva A) e no escuro (curva B).....	40
Figura 14	- Curvas de emissão da calamina, obtidas para uma exposição de 0,181C/Kg com amostras de granulação 0,149mm (a); 0,177mm (b); 0,250mm (c) e 0,500mm (d)	42

Figura 15	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, para amostras de TLD-100 (LiF), curva (A) e da calamina, curvas (B) e (C) obtidas com o aparelho da Sapra e da Harshaw, respectivamente.....	43
Figura 16	- Curvas de emissão da calamina, obtidas para exposições realizadas com amostras a luz ambiente (curva 1) e no escuro (curva 2)	44
Figura 17	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição para amostras de TLD-100 (LiF), curva (A) e do espodumênio, curva (B)	46
Figura 18	- Curva de emissão do espodumênio	47
Figura 19	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do feldspato branco, curvas (B) e (C) obtidas com o aparelho da Sapra e da Harshaw, respectivamente.....	50
Figura 20	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF) e do feldspato róseo.....	51
Figura 21	- Curva de emissão termoluminescente do feldspato branco.....	52
Figura 22	- Curva de emissão termoluminescente (A) para o feldspato róseo, acompanhado da curva de aquecimento da prancheta (B).....	53
Figura 23	- Curvas de emissão do feldspato róseo, obtidas para uma exposição realizada com amostras a luz ambiente (A) e no escuro (B).....	54
Figura 24	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do rutilo, curva (B).....	55
Figura 25	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, do TLD-100 (LiF); curva (A) e da turmalina azul curva (B)	58
Figura 26	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina preta curva (B).....	59
Figura 27	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina verde, curva (B).....	60
Figura 28	- Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina rosa, curva (B)	61
Figura 29.a	- Curvas de emissão da turmalina rosa, obtidas para uma exposição realizada com amostras a luz ambiente (1) e no escuro (2).....	62
Figura 29.b	- Curva de emissão da turmalina verde	63

Figura 29.c - Curva de emissão da turmalina preta 64

LISTAS DE TABELAS

Tabela I - Tratamento térmico a que foram submetidos os materiais estudados	22
Tabela IIa - Características gerais dos minerais utilizados ..	65
Tabela IIb - Características gerais dos minerais utilizados..	66
Tabela III - Principais características dos materiais para fins dosimétricos.....	67

RESUMO

A termoluminescência tornou-se um fenômeno muito difundido, principalmente em pesquisas com cristais e, o fato de no Brasil existir inúmeros cristais naturais com possibilidades de serem aproveitados como um dosímetro termoluminescente, caso específico da fluorita ⁽⁸⁾ verde, é que motivou a realização de um estudo comparativo de minerais, tais como: ametista; calcita; calamina; espodumênio; feldspato; rutilo e diferentes tipos de turmalina.

Para que um material termoluminescente (TL) seja utilizado como dosímetro termoluminescente (TLD) de alta precisão, com o objetivo de permitir uma maior segurança na detecção da radiação, deve apresentar alguns parâmetros mensuráveis que variem com a energia absorvida. Após o estudo comparativo e a consequente avaliação das características termoluminescentes dos minerais estudados, foi possível concluir, de um modo geral, que todos os minerais se mostraram sensíveis às exposições com radiação gama, na faixa de 10^{-3} C/Kg a 1C/KG (3,88 R a $3,88 \times 10^3$ R). Deve-se porém, salientar que os cristais de feldspato branco e róseo, turmalinas rosa e verde mostraram-se mais adequados como detetores de radiação, pois, além de boa sensibilidade apresentaram baixo decaimento da intensidade TL após as exposições, linearidade na faixa de exposição utilizada, baixa sensibilidade a luz ambiente e curvas de emissão TL com picos na faixa de temperatura de 180°C a 230°C.

Assim sendo, evidenciou-se os quatro melhores minerais entre os doze estudados e, não exclui-se os oito minerais restantes de pesquisas futuras.

ABSTRACT

Thermoluminescence has become a commonly employed technique principally in the research of crystals, and the fact that there exists in Brazil an abundance of natural crystals , such as green Fluorite ⁽⁸⁾ , that may be used as thermoluminescent dosimeters has motivated the present comparative study of the following minerals: Amethyst, Calcite, Calamine, Spodumene, Feldspar, Rutile, and various types of Tourmaline.

For a thermoluminescent material to be useful as a thermoluminescent dosimeter (TLD) of adequate precision and sensitivity, it must possess some measureable parameter which varies linearly with the absorbed radiation energy. After a comparative study and analysis of the thermoluminescent characteristics of these minerals, it was possible to conclude that in a general way all were sensitive to gamma ray expositions in the range of 10^{-3} to 1 coulomb/Kg (3,9 to 3900 Roentgen). However, it should be pointed out that the white and pink Feldspars and the pink and green Tourmalines were demonstrably superior as detectors of radiation. Besides displaying a high sensitivity, there is little decay of the thermoluminescent intensity, low sensitivity to ambient light, good linearity within the range studied, and easily accessible thermoluminescent emission curves with peaks between 180°C and 230°C. In addition to these four favorable cases, another eight minerals deserve more detailed future studies.

CAPÍTULO I

I- Introdução:

A absorção de radiação por certos tipos de minerais , quando expostos a radiação X, gama ou ultra-violeta, produz ionização. A maior parte desta energia absorvida, transforma-se em calor, enquanto que, uma pequena fração, provoca quebra de ligações químicas ⁽¹⁾. Uma percentagem variável de elétrons, liberada no processo, pode ser capturada por imperfeições existentes na rede, denominadas armadilhas de elétrons (ou buracos). Para baixas temperaturas ou para armadilhas mais profundas, os elétrons podem permanecer capturados por milhares de anos se não forem estimulados à liberação, que usualmente consiste na transferência de energia térmica ou luminosa para o material. O retorno dos elétrons ou buracos armadilhados ao seu estado fundamental, está associado à uma liberação de energia. Esta liberação normalmente ocorre com maior percentagem, na forma de energia térmica e, numa percentagem bem menor, em forma de energia luminosa. Assim, pode-se afirmar que certos materiais, quando excitados termicamente, emitem fótons na região do espectro visível. Este fenômeno é denominado de termoluminescência (1 a 6 e de 8 a 12). A termoluminescência foi observada há muitos anos, provavelmente, quando, pedras lima e certas fluoritas, foram aquecidas por fogo na idade da pedra ^(1, 4). Os materiais que apresentam TL, são conhecidos como fosforos ⁽⁹⁾. A luminescência pode ser produzida por diferentes efeitos, além da termoluminescência. Se a luminescência ocorre durante a irradiação excitante, isto é, dentro de 10^{-8} segundos do estímulo, o processo é conhecido como fluorescência. Por outro lado, se existe um intervalo de tempo, maior que 10^{-8} segundos, entre a excitação e a luminescência, este efeito é conhecido como fosforescência ⁽⁴⁾. A luminescência induzida pela luz (ultra-violeta, visível ou infra vermelho) é chamada de termoluminescência fotoestimulada (TLFE) ou foto

luminescência⁽⁹⁾. No presente trabalho, estudaremos somente o efeito termoluminescente.

As primeiras publicações sobre termoluminescência datam da época dos alquimistas medievais. Em 1663, Robert Boyle escreveu para o Royal Society em Londres sobre a "estranha luz" que tinha observado ao aquecer diamantes e fluoritas, em um quarto escuro. O conhecimento dos processos físicos de liberação térmica de radiação induzida, luminescência (termoluminescência), foi usado por Wiedemann e Schmidt para determinação de radiação desde 1895. Nesta mesma época Roentgen usava chapas fotograficas para medir radiação quantitativamente.

O desenvolvimento de técnicas para detecção e medidas de radiação, passou a ter interesse científico, com a descoberta do raio x por Roentgen, ou mais precisamente desde o início deste século. As primeiras medidas quantitativas de dose de radiação, foram feitas com câmaras de ionização e com os filmes dosimétricos, que vem sendo usados há muitos anos. O desenvolvimento e uso de técnicas mais recentes, tais como, dosimetria com radiofotoluminescência (RPL) e principalmente os dosímetros termoluminescentes (TLD), está aos poucos substituindo o filme dosimétrico (1, 2, 3 e 9).

A aplicação da TL à dosimetria da radiação só foi sugerida no início da década de cinquenta, apesar do fenômeno da termoluminescência, devido radiação X ou gama, ter sido observado por vários pesquisadores, tais como: Curie (1904), Wick (1927) e Luman (1935). A evolução da eletrônica e o consequente desenvolvimento das células foto multiplicadoras, possibilitou a retomada do estudo da TL em cristais orgânicos ou inorgânicos, visando a sua utilização como detetores de radiação. Logo após os testes com bombas atômicas (1, 3), estes estudos foram iniciados em cristais de fluoreto de Lítio (LiF), por Daniels e seus colaboradores. Seus trabalhos foram interrompidos, mas algum tempo depois, tiveram continuidade através de trabalhos desenvolvidos por Cameron (1), que com suas

pesquisas proporcionou uma rápida evolução para que fosse possível utilizar o LiF: Mg em aplicações dosimétricas.

Nesta época outros grupos trabalharam em TLD. Em 1956, Schulmann e seu grupo ⁽⁵⁾ investigando as propriedades de sulfato de cálcio ativado com manganês, chegaram à conclusão que este fósforo possuía alta sensibilidade termoluminescente. Em 1959 Schulmann ⁽⁵⁾, descreveu os princípios dos sistemas sólidos em dosimetria. Nesta época, alguns pesquisadores da União Soviética e da Alemanha, também realizaram pesquisas com materiais termoluminescentes ^(1, 3).

Com a evolução, os desenvolvimentos das pesquisas demonstraram que de 3000 minerais naturais, cerca de três quartos destes minerais apresentam o efeito da termoluminescência. Este efeito não é restrito apenas à cristais inorgânicos, pois o fenômeno já foi observado em alguns compostos orgânicos tais como dente ⁽¹³⁾, osso ^(13, 17), e sementes de tomate ⁽¹²⁾. O último caracteriza-se por apresentar TL a temperatura abaixo da ambiental e com isto sua aplicação torna-se difícil em dosimetria das radiações.

Nas últimas duas décadas, a evolução do estudo da termoluminescência, possibilitou a avaliação de diferentes composições fosfóricas, para serem utilizadas no crescimento de alguns cristais. Isto, somando ao avanço tecnológico, proporcionou uma maior viabilidade comercial para obtenção de dosimétros termoluminecentes de alta precisão, possibilitando com isto uma maior segurança na detecção da radiação.

1.1 - Dosímetro Termoluminescente

Existem muitos materiais que exibem termoluminescência. Em geral, qualquer material sólido que apresente pelo menos um parâmetro mensurável e que varie com a dose absorvida, pode ser vir como base para um sistema de dosimetria do estado sólido. Em dosimetria, o problema não está somente em encontrar um material

que apresente TL, mas sim em selecionar o fósforo TL, mais apropriado dentre os avaliados. Entre os parâmetros mensuráveis podem ser citados os seguintes:

- a) mudança na cor do material
- b) termoluminescência
- c) decaimento da luminescência

d) ressonância de spin do elétron, isto é, a presença de elétrons não emparelhados em uma substância, pode ser detectada pela medida da ressonância de spin do elétron, de modo que este método pode em princípio ser usado para estimar o número de elétrons desemparelhados após o material ter sido irradiado (17, 18).

e) outras mudanças induzidas pela radiação seriam ; variação da condutividade elétrica, radiofotoluminescência (3, 8) etc.

1.2 - Modelo Simples de Termoluminescência

A teoria da termoluminescência não é conhecida completamente, devido à sua complexidade, mas este fenômeno é entendido qualitativamente a partir de diversos modelos teóricos (6 a 12, 15, 16). O modelo da figura 1a baseia-se em uma estrutura simples de um cristal real. Esta estrutura é formada por ions alcalinos, ions halógenos e por imperfeições ou defeitos de várias espécies. O defeito é qualquer entidade, que modifica a estrutura do cristal ideal, apresentada na figura 1b, ou por mudança na regularidade do cristal (6, 10). O defeito mais comum é a falta de um ion na estrutura cristalina denominada de vacância (10, 14). Em uma rede ou estrutura iônica, a produção de vacâncias deve satisfazer o requisito de equilíbrio eletrônico; deve existir sempre um número igual de cargas positivas e negativas, de modo que o cristal seja eletricamente neutro. Quando uma vacância positiva (uma vacância cation) é formada no lugar de um ion halógeno ou de um ion alcalino, a rede do cristal necessita de uma carga positiva. Esta é uma cir

Figura 1a: Estrutura de um cristal real.

- ion alcalino
- ion halógeno
- vacância cation
- vacância anion

Figura 1b: Estrutura de um cristal ideal.

cunstância não muito favorável, pois aumenta a instabilidade. Portanto a formação de uma vacância cation é acompanhada pela formação de uma vacância de ion negativo (uma vacância anion), que restabelece o equilíbrio de carga, conforme figura 1a, onde os quadros escuros representam as vacâncias de cation e os brancos vacâncias anions. Este tipo de imperfeição é chamada defeito Schottky (em homenagem a W. Schottky que idealizou este raciocínio). Essas vagas são formadas em pares, mas não necessitam estar obrigatoriamente, a temperatura ambiente uma perto da outra; ou seja existem em números iguais dispersos através do cristal, para manter a neutralidade total de carga elétrica. Porém, aumentando-se a temperatura do cristal, aumenta-se o número de vacâncias e, consequen

temente, a desordem no cristal. A criação de um defeito Schottky num cristal perfeito, é caracterizado pela transferência de um átomo do interior da rede, até um local da rede na superfície do cristal. Outro defeito de vacância, é o defeito Frenkel, no qual um átomo se transfere de um local da rede até uma posição intersticial, uma posição que não é normalmente ocupada por um átomo. Em halogenetos alcalinos puros, as vacâncias da rede mais comuns, constituem defeitos do tipo Schottky; em halogenetos de prata puros, as vacâncias mais comuns constituem defeitos Frenkel (14).

As figuras 2.a₁ e 2.a₂ representam respectivamente, um diagrama hipotético de energia de um cristal ideal e de um cristal real. Este modelo é conhecido como diagrama de bandas. A banda de valência representa a faixa de energia de todos os elétrons que se encontram no estado fundamental e a banda de condução representa a faixa de energia de todos os elétrons livres, que podem migrar através do cristal. A banda de valência é separada da banda de condução por uma faixa ou intervalo de energia, também chamada de "zona proibida" ou "banda proibida". No caso de um cristal isolante ideal, a banda de condução é vazia e todos os elétrons estão na banda de valência. Para que, um elétron da banda de valência, consiga atravessar a banda proibida e alcançar a banda de condução, é necessário o fornecimento de energia externa ao material.

Em um cristal real, temos a presença de níveis de energia, na zona proibida e, presume-se, que estejam associados com as impurezas ou defeitos no cristal (1). No diagrama 2.a₂, "E", representa um nível de energia associado à uma armadilha de elétrons, "B" um nível de energia associado à uma armadilha de buracos e "L"; como veremos a seguir, representa um centro luminescente, onde elétrons e buracos podem se recombinar, com emissão de luz.

As figuras 2.b₁ a 2.b₄ representam os diagramas de energia para cada estágio, no processo de emissão TL, produzido pe

Figura 2.a: Diagrama hipotético de energia; (1) de um cristal ideal; (2) de um cristal real.

- E: nível de energia associado a uma armadilha de elétrons.
- B: nível de energia associado a uma armadilha de buracos.
- L: nível de energia associado a um centro luminescente.

Figura 2.b: Diagrama hipotético de energia para cada estágio no processo de emissão TL.

- E: armadilha de elétron
- B: armadilha de buraco
- : fóton TL.

la exposição de um material à radiação ionizante. Em 2.b₁, está representado um cristal durante a exposição. A radiação ionizante absorvida pelo material, libera um elétron da banda de valência para a banda de condução, deixando um buraco na banda de valência. O elétron e o buraco são livres para se moverem através do cristal, até se recombinarem ou serem capturados pelas armadilhas existentes na zona proibida, como as do tipo "E" e "B". Após esta fase, nada ocorrerá com o fósforo, a menos que sofra um aquecimento até um ponto em que os elétrons e buracos armadilhados recebam suficiente energia térmica para escapar das armadilhas e viajar livremente, até, finalmente, retornar a condição original de não ionizados. Parte da energia aplicada sobre o cristal durante a irradiação e aquecimento térmico, é emitida, após o aquecimento, em forma de luz. A emissão de luz característica proveniente deste, é chamada de termoluminescência (TL). Assim, um fóton TL pode ser emitido das seguintes formas: (1) o elétron, após deixar a armadilha de elétron, se recombina com o buraco armadilhado, conforme a figura 2.b₂; (2) a recombinação elétron-buraco, ocorre na armadilha de elétron figura 2.b₃; (3) elétron e buraco, são liberados, mais ou menos simultaneamente, e se recombina num local chamado centro de recombinação ou centro luminescente figura 2.b₄.

1.3 - Principais Características da Termoluminescência para fins Dosimétricos

a) Curva de emissão

O experimento de emissão TL consiste em medir a emissão de luz quando um sólido termoluminescente é aquecido a uma razão uniforme. A curva obtida da intensidade de luz emitida em função da temperatura ou do tempo, durante o qual o fósforo é aquecido, é conhecida como curva de emissão TL.

A curva de emissão é a melhor característica de um fósforo, e sua forma varia de cristal para cristal. Os seguintes

fatores podem afetar a forma de uma curva de emissão: a razão de aquecimento (ou aquecimento por unidade de tempo) e sua uniformidade; o tamanho, a forma e a condutividade térmica da amostra; o tipo de aparelho leitor usado; a quantidade de radiação; o tipo de radiação; a história dos tratamentos térmicos e da radiação recebida pela amostra; a história do decaimento da amostra; e efeitos espúrios (ou não genuínos). Assim, por exemplo, uma duplicação da razão de aquecimento duplica a altura do pico da curva de emissão e sua largura é diminuída, porém um aquecimento vagaroso reduz a altura e alarga o pico da curva de emissão, conforme a figura 3.

Figura 3: Efeitos da razão de aquecimento sobre a curva de emissão. Razões de aquecimento rápido dão picos estreitos com picos de emissão maiores.

A uniformidade e lentidão da razão de aquecimento são desejadas quando se quer fazer uma intercomparação de curvas de emissão, embora uma razão de aquecimento aproximadamente uniforme, geralmente satisfaça. Para medidas de TLD, a razão de aquecimento necessita apenas ser reprodutível, não sendo necessariamente uniforme. Uma curva de emissão TL, geralmente apresenta mais de um pico, devido ao esvaziamento de armadilhas de diferentes níveis de energia. A altura dos picos é proporcional à quantidade de elétrons capturados nas diversas armadilhas. A área sob a curva é proporcional à luz emitida pelo fósforo, que por sua vez está relacionada com a dose de radiação absorvida. Portanto, tanto a área integrada sob a curva como a altura dos picos podem ser utilizados para determinar a intensidade de termoluminescência. Porém quando a curva de emissão apresenta picos de temperatura relativamente baixa, bem como picos de temperatura suficientemente alta, é mais vantajoso usar as alturas dos picos de temperatura alta como medida da dose absorvida, uma vez que a área estaria afetada pelos picos de temperatura baixa que decaem à temperatura ambiente.

A interpretação dos picos da curva de emissão TL, que está ligada a eventos como: interação da radiação com a matéria e emissão de fótons de luz, segue uma distribuição estatística de energias térmicas para os elétrons ou buracos nas armadilhas. Se o nível de energia de um elétron armadilhado está E eV abaixo da banda de condução, o elétron deve absorver, pelo menos, uma energia E , antes de escapar da armadilha. Devido a analogia com o caso do campo gravitacional, atuando sobre uma bola num buraco, E é chamado de profundidade da armadilha. Assim sendo, a probabilidade (p) de um portador de carga (elétron ou buraco) escapar de uma armadilha de profundidade E , à uma temperatura T é:

$$p = \exp(-E/KT) \quad (1)$$

onde K é constante de Boltzmann, e S é o chamado fator pré-exponencial ou fator de frequência.

Se a armadilha é vista como um potencial em forma de uma caixa, s expressará o produto de frequência com que o elétron se choca com os lados da caixa e do coeficiente de reflexão. Estudos realizados com fósforos ⁽⁶⁾, demonstraram que existe uma razão para supor s de uma ordem de grandeza menor do que a frequência de vibração de um cristal, aproximadamente 10^{12} seg^{-1} . De fato, s é encontrado como sendo $\approx 10^8 \text{ seg}^{-1}$ nos fósforos estudados.

A título de ilustração vejamos como Randall e Wilkins ⁽⁶⁾, fizeram o primeiro tratamento matemático para a representação dos picos de emissão TL. O modelo basea-se nas seguintes hipóteses: (a) não há superposição dos picos de emissão, ou seja, esta interpretação só seria aplicada a curvas de emissão com um único pico; (b) a probabilidade de um portador de carga ser rearmadilhado é desprezível, isto é, um elétron liberado de uma armadilha, irá diretamente para o centro luminescente, sem cair em outra armadilha; (c) a intensidade termoluminescente, é diretamente proporcional à velocidade de desarmadilhamento.

Portanto, se em um instante T qualquer, n representa o número de elétrons ou buracos armadilhados, a intensidade TL é:

$$I = -C \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

onde C é uma constante de proporcionalidade ⁽⁶⁾, $\frac{dn}{dt}$ é a velocidade de desarmadilhamento. De (1), tem-se que $\frac{dn}{dt} = -nse^{-E/KT}$ (3)

o sinal menos está diretamente relacionado com o decaimento, ou seja n diminui com o tempo. Então $\frac{dn}{n} = -se^{-E/KT} dt$ (4)

Por outro lado, a curva de emissão pode ser obtida quando a temperatura (T) aumenta a uma razão (ou velocidade constante durante o tempo de aquecimento (t); ou seja:

$$\frac{dT}{dt} = \beta(t) \quad (5)$$

onde β é a razão (ou velocidade) de aquecimento, estando relacionada com a temperatura inicial T_0 da amostra pela expressão:

$$T = T_0 + \beta t$$

De (4) e (5), implica:

$$\frac{dn}{n} = \frac{-S}{\beta} \cdot e^{-E/KT} dT$$

integrando, temos:

$$\int \frac{dn}{n} = - \int \frac{S}{\beta} e^{-E/KT} dT$$

ou seja,

$$\begin{aligned} \ln \frac{n}{n_0} &= - \int \frac{1}{\beta} S e^{-E/KT} dT \\ &= n_0 e^{- \int \frac{1}{\beta} S e^{-E/KT} dT} \end{aligned}$$

$$n = n_0 \exp \left\{ \frac{-S}{\beta} \int e^{-E/KT} dT \right\} \quad (6)$$

Substituindo (6) em (3), resulta:

$$\frac{dn}{dt} = -nse^{-E/KT} = -n_0 se^{-E/KT} \exp \left\{ \frac{-S}{\beta} \int e^{-E/KT'} dT' \right\}$$

Portanto de (2):

$$I = -C \frac{dn}{dt} = n_0 C se^{-E/KT} \cdot \exp \left\{ \frac{-S}{\beta} \int e^{-E/KT'} dT' \right\} \quad (7)$$

onde esta expressão representa a curva de emissão para um fósforo contendo armadilhas de uma dada profundidade. A curva de emissão termoluminescente, começando a temperatura baixas, aumenta exponencialmente, até atingir um valor máximo, e diminui gradualmente, devido à redução no número de elétrons ou buracos armadilhados.

b) Sensibilidade termoluminescente

A sensibilidade termoluminescente é, por definição, a quantidade de luz emitida pelo fósforo, por unidade de exposição à radiação.

O limite mais baixo de sensibilidade a ser utilizado depende das características do fósforo e do aparelho de leitura dos TLD. Em geral, os aparelhos utilizados podem medir exposições menores que 100mR. Quanto ao limite superior, este é limitado apenas pelas características dos fósforos.

c) Estabilidade

Ao expor um cristal à radiação ionizante, parte da energia é retida no cristal. Quando o mesmo é aquecido desde a temperatura da irradiação, ou seja ambiental, a energia armazenada é liberada na forma de luz visível (TL). A razão, na qual esta ener

gia é liberada, cresce rapidamente com o crescimento da temperatura. Se o fósforo apresenta uma perda relativamente baixa de TL à temperatura ambiente (aproximadamente, menor ou igual a 5%/trimestre) , pode-se considerar um fósforo de boa estabilidade. Geralmente, os fósforos contêm picos instáveis a temperaturas mais próximas da ambiente. Entretanto, após o decaimento destes picos no tempo, ou pela sua remoção através de tratamento podem apresentar TL suficientemente estável para serem aproveitados, pois este é um dos pontos fundamentais para sua utilização em aplicações dosimétricas.

d) Curva da resposta termoluminescente à exposição

Materiais de interesse à dosimetria termoluminescente devem apresentar, além das características citadas acima, uma relação linear entre a resposta termoluminescente do fósforo e a exposição a que é submetido, dentro de uma determinada faixa de interesse. Quando isto não ocorrer, os cuidados de calibração devem ser redobrados.

e) Dependência com a energia da radiação

Um fóton de raio x ou gama, pode basicamente interagir com a matéria de cinco formas diferentes: (1) espalhamento coerente; (2) efeito fotoelétrico; (3) espalhamento Compton; (4) produção de pares e (5) fotodesintegração nuclear. O processo de interação pode ser por absorção ou espalhamento de fótons. Durante a interação fotoelétrica, a energia total de um fóton de raio x ou gama, é transferida a um elétron da camada interna do átomo. O elétron é ejetado do átomo com energia cinética E_K igual à energia do fóton incidente menos a energia de ligação (E_K) requerida para remover o elétron do átomo ($E_K = h\nu - E_K$). Absorção fotoelétrica é, normalmente, o processo predominante para energias de fótons inferiores a 100KeV. Como esta interação envolve os elétrons, isto implica na dependência desta interação com a carga do núcleo atômico, isto é, com o número Z. Consequentemente, materiais TL com Z elevado apresentam um aumento no número de elétrons, liberados por efeito

fotoelétrico para fótons de baixa energia.

No efeito Compton, um fóton incidente, com energia alta, colide com um elétron livre da camada externa do átomo, expulsando o elétron de sua orbita. O fóton é defletido pelo elétron e viaja em uma nova direção, como radiação espalhada. A energia do fóton incidente é distribuída em duas partes; como energia cinética para o elétron expulso e o restante é retido no fóton defletido. Para energias altas, devemos considerar o efeito Compton que é predominante quando as energias do fóton estão entre 0,8 e 4,0MeV, para materiais com qualquer Z. Em materiais com Z baixo, o efeito Compton predomina numa faixa, de energia muito maior.

Quando um fóton atravessa a matéria e é desviado de sua trajetória inicial sem uma mudança no comprimento de onda, ocorre o chamado espalhamento coerente. Neste processo, um fóton de comprimento de onda λ , encontra um elétron de um átomo e estabelece nele, uma vibração na frequência da radiação. Com o retorno do átomo ao estado de não excitado, é emitido uma radiação de comprimento de onda $\lambda' = \lambda$. A percentagem de radiação que sofre espalhamento coerente, é pequena quando comparada com as outras interações básicas; em geral, é menor que 5%.

A produção de pares e a fotodesintegração predomina para energias muito altas. Na produção de pares um fóton de alta energia, interage com o núcleo de um átomo, o fóton se transforma em matéria na forma de duas partículas. Uma das partículas é um elétron e a outra é um positron, que é uma partícula com a mesma massa do elétron, mas com carga positiva. A energia equivalente à massa de um elétron em repouso é igual a 0,511MeV, e a produção de pares produz dois elétrons, portanto, a interação não pode ocorrer com energias de fótons menores que 1.022MeV.

Em fotodesintegração, uma parte do núcleo do átomo é ejetado por um fóton de alta energia. A porção ejetada pode ser um neutron, próton, partícula alfa ou um feixe de partículas. O fó

ton deve ter energia suficiente para superar a energia de ligação nuclear da ordem de 7 a 15MeV. Portanto, não ocorre produção de pares e fotodesintegração com energias de fóton menores que 1.02MeV e 7MeV, respectivamente.

Um dosímetro é considerado independente da energia da radiação, se sua sensibilidade termoluminescente não sofrer variação sensível com a energia do fóton; ou seja, se sua dependência energética for pequena haverá pequenas flutuações na resposta termoluminescente. Detetores com um Z efetivo, aproximadamente igual ao do ar ($Z = 7,64$), mostram uma boa resposta à energia; enquanto aqueles com um Z efetivo maior ou menor que 7,64, apresentam uma pequena resposta à energia da radiação.

1.4 - Grandezas e unidades relativos à radiação ionizante (19)

Radiação ionizante, consiste de partícula carregada (por exemplo), elétrons positivos ou negativos, prótons ou outros ions pesados e (ou) partículas não carregadas (fótons ou neutrons) capazes de causar ionização (processo no qual um ou mais elétrons são liberados de um átomo ou molécula) por processos primários ou secundários. Contudo, o processo de ionização não é o único processo pelo qual a energia da radiação pode ser transferida ao material. Um segundo fenômeno importante é excitação: este processo também tem consequências físicas, químicas ou biológicas.

Exposição

Exposição, X, é o quociente de dQ por dm onde o valor de dQ é o valor absoluto da carga total de ions de um mesmo sinal produzido no ar quando todos os elétrons (negatrons e positrons) liberado pelos átomos no ar de massa dm , são completamente termalizados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm}, \text{ e tem por unidade o C/Kg.}$$

A unidade C/Kg está relacionada à unidade especial da exposição, roentgen (R), pela seguinte relação:

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}.$$

Dose absorvida

Dose absorvida, D, é o quociente de $d\bar{E}$ por dm , onde $d\bar{E}$ é a energia média cedida pela radiação ionizante à matéria de massa dm .

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}, \text{ e tem por unidade o J/Kg.}$$

O nome especial para unidade de dose absorvida é o gray (Gy)

1Gy = 1 J/Kg, e está relacionada à unidade especial de dose absorvida, rad, pela seguinte relação

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/Kg}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg} = 100 \text{ rad}.$$

Atividade

A atividade, A, é definida como o número de átomos que se desintegram por unidade de tempo. O processo de desintegração só pode ser discutido no campo probabilístico. Então vamos supor que um instante qualquer $t = 0$, tenhamos N_0 átomos radioativos. Chamaremos de λ a probabilidade para que um deles se desintegre na unidade de tempo.

Em um instante $t > 0$, teremos N átomos radioativos. Portanto, o número provável que se desintegrará na unidade de tempo será:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \text{ o sinal negativo significa que N decresce}$$

com o tempo. Como, $\frac{-dN}{dt} = \lambda N$, integrando temos que $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

Então para um tempo t_0 , $A_0 = \lambda N_0$, e para um certo tempo

$$t \Rightarrow A = \lambda N \Rightarrow \frac{A}{A_0} = \frac{N}{N_0} \therefore A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ onde:}$$

A_0 = atividade num instante inicial

A = atividade após decorrido um tempo

λ = constante de desintegração radioativa, característica de cada elemento = $\frac{0,693}{T_{1/2}}$ (meia vida-física)

e = base neperiana.

Atividade, A , tem por unidade S^{-1} (segundo a menos um).

Um nome especial para unidade de atividade é o Becquerel (Bq).

$1Bq = 1S^{-1}$ e está relacionado à unidade especial de atividade, Curie (Ci), do seguinte modo:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ seg}^{-1}$$

$$1 \text{ S}^{-1} = \frac{1}{3.7 \times 10^{10}} \text{ Ci}$$

$$1Bq = 1S^{-1} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

1.5 - Objetivo

A termoluminescência mostrou-se um fenômeno muito estudado, principalmente em pesquisas com cristais (3, 4). Assim sendo, o principal objetivo deste trabalho é de realizar um estudo comparativo de alguns minerais existentes no Brasil. Após o estudo comparativo e a consequente avaliação das características termoluminescentes, foi possível concluir do material responder adequadamente ou não, como um detetor de radiação.

CAPÍTULO II

II - Materiais e Métodos

a) Características dos minerais estudados

Os minerais estudados foram os seguintes:

01 - Ametista	07 - Feldspato rosa
02 - Berilo	08 - Rutilo
03 - Calcita	09 - Turmalina azul
04 - Calamina	10 - Turmalina rosa
05 - Espodumênio	11 - Turmalina verde
06 - Feldspato branco	12 - Turmalina preta

Algumas características desses minerais, classe e subclasse, composição química, sistema, densidade, massa, forma física, procedência, cor e dureza, estão relacionadas na tabela II. Dureza é a resistência do material ao risco. Assim, por exemplo, calcita, que tem dureza 3, pode ser facilmente riscada por um vidro ou canivete, o mesmo não ocorrendo para o berilo de dureza de 7,5 a 8. Os minerais de um mesmo grupo, de cores diferentes, recebem nomes especiais, ver por exemplo o grupo da turmalina que na cor azul é chamada indicolita, na preta, afrisita e assim por diante.

b) Preparação das amostras

Com base em pesquisas anteriores, pode-se dizer, que cristais naturais não têm uma distribuição uniforme de impurezas (1, 10) e que a intensidade termoluminescente (TL) depende da granulação da amostra. Assim, houve necessidade de se encontrar, para cada amostra, a granulação que propiciasse uma melhor resposta de TL. Com este objetivo, as amostras de mineral bruto após serem triturados, foram peneirados em telas com malhas de 0,50 ; 0,250 ; 0,177; 0,149; 0,125; 0,088 e 0,074mm. Uma das curvas típicas da intensidade natural da TL em função da granulação para calamina é apresentada na figura 4. Os outros minerais apresentaram comportamento semelhante ao da calamina, e por este motivo cristais obti

Figura 4: Curva da intensidade natural da TL em função da abertura da malha, para calamina.

dos com malhas de abertura 0,177mm, que apresentaram um sinal TL maior após a irradiação, foram os escolhidos para este trabalho. Assim sendo, pode-se obter amostras de pó de granulação mais homogêneas que possibilitaram uma maior uniformidade no sinal termoluminescente.

c) Tratamento térmico

Os tratamentos utilizados para colocarem o material estudado em condições de uso, são apresentados na tabela I. Tendo em vista que, os minerais normalmente apresentam termoluminescência natural, as amostras devem ser submetidas a um tratamento térmico, com a finalidade de eliminar esta TL e, conseqüentemente, colocar os diferentes minerais em condições de estudo. Este tratamento térmico depende da característica de cada material, como pode ser visto na tabela I.

Após este tratamento térmico inicial, o material era exposto à radiação; em seguida, era realizada a leitura, e, posteriormente, o material era submetido a um tratamento térmico de 400°C/1 hora, para eliminar qualquer vestígio de radiação e colocá-lo em condições de reutilização.

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno Bravac da analítica e em uma estufa Olidef-CZ.

d) Métodos de irradiação

Para avaliar o comportamento dos materiais em função das doses, foram utilizadas fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs .

1 - Irradiações com a fonte de ^{60}Co

A fonte de ^{60}Co é uma fonte de radiação gama com meia vida 5,27 anos e emissão gama com energia média de 1,25MeV. Para este trabalho, foi utilizada uma fonte de ^{60}Co do Departamento de Genética da FMRP-USP, cuja atividade em fevereiro de 1966 era de 1394Ci ou $5,158 \times 10^{13} \text{ seg}^{-1}$. Antes da realização das exposições, foram realizadas calibrações e comparadas com

TABELA I: Tratamento térmico a que foram submetidos os materiais estudados.

Material	Tratamento térmico inicial	Tratamento térmico para reutilização
Ametista	400°C/2 horas	400°C/1 hora
Berilo	400°C/1 hora	400°C/1 hora
Calcita	580°C/15min mais 400°C/2 horas	400°C/1 hora
Calamina	580°C/15min mais 400°C/2 horas	400°C/1 hora
Espodumênio	400°C/1 hora	400°C/1 hora
Feldspato branco e rôseo	580°C/15min mais 400°C/2 horas	400°C/1 hora
Turmalina azul, verde e rosa	580°C/15min mais 400°C/2 horas	400°C/1 hora
Turmalina preta	400°C/2 horas	400°C/1 hora
Rutilo	400°C/1 hora	400°C/1 hora

os valores teóricos, de atividade e taxa de exposição, encontrados. Esta calibração foi efetuada, utilizando uma câmara de ionização, tipo Farmer da PTW e um eletrometro da Keithley modelo 6169. Para uma melhor precisão, foram levados em conta nos cálculos de calibração, os fatores de correção, para temperatura e pressão bem como, o de calibração da câmara. Assim sendo, foi possível determinar experimentalmente o valor da taxa de exposição, $\frac{X}{t} = \bar{L} \times \phi_{p,t} \times f_c$, onde $\bar{L}$ é o valor médio da exposição com a câmara a 1m da fonte, $\phi_{p,t}$ é o fator de correção para temperatura e pressão,

$$\phi_{p,t} = \frac{273,15 + T}{293,15} \times \frac{760}{P}$$

e $f_c = 5.917 \times 10^9$ R/C é o fator de calibração da câmara. Nestas condições a taxa de exposição em março de 1985, $\frac{X}{t} = 3.14$ R/min.

2 - Irradiações com a fonte de ^{137}Cs .

A fonte de ^{137}Cs , é uma fonte de radiação gama, com meia vida de 30 anos, e emissão gama de energia 0,662MeV.

Foi utilizada a fonte de ^{137}CS do tipo X.8, duplamente encapsulada, do Laboratório de Dosimetria e Proteção Radiológica da FFCLRP-USP, fornecida pela Amersham International Limited (Inglaterra), com uma atividade em março de 1985 de 0,097 Ci ou $3,59 \times 10^{11} \text{ seg}^{-1}$, e uma taxa de exposição de 12,57mR/min a 1 metro da fonte.

e) Cuidados especiais durante a exposição à radiação

1 - Equilíbrio eletrônico

Sempre que um fósforo TL é irradiado por um feixe de fótons, deve-se dar atenção a necessidade do equilíbrio, cujo conceito está ilustrado na figura 5.1. Em cada bloco do mate

rial (A, B, ..., G,) os elétrons são colocados em movimento pelas interações dos fótons. O alcance deste movimento, R, é uma função direta da energia do fóton. No meio do bloco D, a profundidade é igual a este intervalo: quando uns elétrons chegam ao repouso, outros são colocados em movimento. Este equilíbrio eletrônico, é essencialmente mantido, e se mantém contínuo, se o material for suficientemente espesso. A região entre a superfície irradiada e a profundidade onde se dá o máximo de ionização (do bloco A até a metade de D) é a espessura de equilíbrio eletrônico. Este equilíbrio existe, dentro de um meio sob irradiação, quando, em média, para toda partícula carregada secundária que deixar qualquer localização, uma outra partícula carregada secundária da mesma energia, a substitue no mesmo ponto. Esta condição é prontamente encontrada, usando a quantidade apropriada de material como espessura de equilíbrio eletrônico sobre a amostra que está sendo irradiada. Um grande aumento na dose absorvida ocorre na região da espessura de equilíbrio eletrônico, ou seja, nos primeiros milímetros da amostra. Consequentemente, se uma amostra TL sem a quantidade necessária de material de espessura de equilíbrio eletrônico, for irradiada por um feixe de fótons, a dose média recebida é menor do que aquela, que seria sob condições de equilíbrio.

A quantidade de material de espessura de equilíbrio eletrônico, necessária, depende diretamente da energia do fóton. É usualmente expressa, em termos de massa/área (mg/cm^2). Alguns valores de espessura de equilíbrio eletrônico, para as fontes utilizadas neste trabalho, são 250 e 450 mg/cm^2 .

Plásticos tais como Lucite, Teflon e Nylon são usados como material de espessura de equilíbrio eletrônico. É aconselhável fornecer, pelo menos, mais material de espessura de equilíbrio eletrônico que o indicado. Se o material é mais espesso que o necessário, o erro produzido, é simplesmente igual a quantidade de fótons absorvidos, dentro do excesso de espessura. Contudo, se o material de espessura de equilíbrio eletrônico é muito fino, en

tão, o fósforo pode receber uma dose menor de radiação, pois, o equilíbrio eletrônico será atingido, dentro do material que está sendo exposto.

2 - Sensibilidade dos materiais à luz ambiente

Visando estudar a sensibilidade dos minerais a luz ambiente, foram realizados exposições de amostras deste minerais, em envelopes de cartolina preta.

3 - Controle de exposição utilizando dosímetros de LiF

Pastilhas de LiF (TLD-100 da Harshaw), foram utilizadas, para avaliar as exposições das amostras dos minerais estudados, durante as irradiações, por se tratar de um dosímetro de características bem conhecidas e boa sensibilidade. Os tratamentos térmicos utilizados para o LiF, para reutilização, foi de 400°C/1 hora, no forno, mais 100°C/2 horas na estufa.

f) Aparelho leitor (20)

O equipamento usado para aquecer o material exposto e medir a luz emitida, é chamado leitor de TLD. A leitura dada pelo equipamento, é usada como medida da dose absorvida pelo material exposto a radiação. O leitor, compõe-se de três partes principais.

1 - Sistema de aquecimento

Para se fazer uma leitura de um material TL, coloca-se o pó ou pastilha sobre uma prancheta de platina, a qual é conectada a um sistema de aquecimento conforme a figura 5.2. A temperatura da amostra é aumentada, de uma maneira reprodutível a uma razão de aquecimento de 10°C/seg, em aproximadamente até 300°C, pela passagem de uma corrente elétrica através do sistema de aquecimento.

2 - Tubo da fotomultiplicadora

A quantidade de luz emitida da amostra aquecida, é amplificada pelo tubo da fotomultiplicadora. Na figura 5.2,

Figura 5.1 - Diagrama hipotético relacionado a espessura de equilíbrio eletrônico.

Figura 5.2 - Esquemas do sistema de aquecimento e do tubo da fotomultiplicadora em um aparelho leitor. (a) visão mais detalhada do tubo da fotomultiplicadora e do sistema de aquecimento)b) e (c) ilustram o procedimento para aquecimento da amostra.

evidenciam-se alguns aspectos importantes dessa parte do aparelho leitor. Para evitar os efeitos das correntes espúrias, é importante manter o tubo da fotomultiplicadora refrigerado e, por este motivo, é usual encaixar um filtro entre o tubo da fotomultiplicadora e a amostra aquecida (ver figura 5.2a). Estes filtros permitem a transmissão de luz visível; mas, impedem a radiação infra-vermelha proveniente da prancheta aquecida.

Quando usamos amostras submetidas a baixas exposições, é necessário refrigerar o tubo da fotomultiplicadora, usando nitrogênio líquido.

Durante o aquecimento da amostra e a leitura da luz emitida, o tubo da fotomultiplicadora, prancheta, amostra e o sistema de aquecimento, devem ser protegidos da luz ambiente, para que esta não influencie ou contribua na leitura fornecida pelo instrumento. As figuras 5.2b e 5.2c, ilustram o procedimento para o aquecimento da amostra.

3 - Sistema eletrônico

A amplificação efetuada pelo tubo da fotomultiplicadora, depende muito do valor da alta voltagem aplicada a seus eletrodos. Portanto, esta fonte de alta voltagem, deve ser muito estável.

A carga total produzida na saída do tubo da fotomultiplicadora, é proporcional à quantidade de luz incidente sobre sua superfície. Portanto, deve ser utilizado um circuito integrador de corrente, durante o período de aquecimento que será exposto como resposta no eletrômetro. Um diagrama de bloco do sistema leitor da TL, é mostrado na figura 6.

Figura 6 - Diagrama de bloco do sistema leitor da TL.

CAPÍTULO III

III - Características gerais

3.1 - Linearidade, supralinearidade e saturação.

Um dos aspectos importantes em dosimetria termo luminescente, é a resposta do sistema à exposição à radiação. Para que um material possa ser útil como TLD, é desejável que a resposta à exposição seja linear.

Mesmo que, a quantidade total de ionização produzida no material, seja diretamente proporcional à exposição, as maneiras pelas quais os elétrons ou buracos capturados nas armadilhas se libertam térmicamente, os processos pelos quais eles produzem luz e a natureza das armadilhas envolvidas, podem influenciar, na forma final da curva da resposta à exposição.

Quando a resposta termoluminescente não é linear, a curva de intensidade TL em função da exposição, em um gráfico feito em papel bi-logarítmico forma um ângulo diferente de 45° com a horizontal; isto é, aumenta de uma forma mais rápida que a linear. Desta forma, diz-se que a curva é supralinear, e a propriedade do material que apresenta esse aspecto, é dado o nome de supralinearidade.

Os fósforos termoluminescentes estudados respondem linearmente para baixas exposições. Provavelmente, nestes a supralinearidade esteja também presente em exposições muito baixas, embora isto não seja detectado devido as limitações da sensibilidade experimental (1). No outro extremo da curva de resposta TL, apresentam-se os efeitos de saturação, ou seja, todas as armadilhas ficam preenchidas e, com isto, não há aumento da resposta com o aumento da exposição. Na figura 7, está esquematizada a localização dessas três regiões, em uma curva de resposta termoluminescente do TLD-100 (LiF).

Figura 7 - Esquema da localização das regiões linear, supralinear e de saturação.

linear
supralinear
saturação

3.2 - Sensibilidade e estabilidade

Os tratamentos térmicos adequados para reutilização de um dosímetro termoluminescente, removem a TL de uma exposição anterior e mantem a sua sensibilidade estável. Porém, para uma exposição muito grande pode-se produzir um dano permanente no cristal e assim, dessensibilizá-lo, ou seja, torna-se impossível um tratamento térmico para sua reutilização. Portanto, a sensibilidade de um dosímetro depende, muito de sua história; isto é, da quantidade de tratamento térmico e exposição por ele recebidas.

3.3 - Estrutura dos cristais

Alguns dos diversos modelos teóricos, que fornecem um entendimento qualitativo da teoria da termoluminescência,

baseiam-se na estrutura do cristal, como já mencionado no parágrafo 1.2. As estruturas dos minerais estudados no presente trabalho, estão relacionados na tabela III, com seus respectivos sistemas. Conhecendo-se o formato das estruturas dos cristais, pode-se fazer observações, a respeito das impurezas ou defeitos das várias espécies presentes na rede do cristal, os quais, presume-se que estejam associados com os níveis de energia da zona proibida, em um diagrama de bandas de energia. Então, o comportamento, ou seja, a sensibilidade dos cristais em relação à exposição à radiação, vai depender de sua estrutura.

3.4 - Fatores ambientais

A resistência a diversos fatores ambientais, que podem influenciar a sensibilidade do cristal, tais como luz, umidade, etc., é uma outra característica, para que um material possa ser útil como TLD. Na tabela II é apresentado em termos percentuais a influência da luz ambiente, na sensibilidade dos minerais estudados.

CAPÍTULO IV

IV- Resultados e Discussão

Entre as amostras escolhidas, para serem estudadas neste trabalho, todas apresentaram sinais de termoluminescência natural, cujas características serão discutidas a seguir.

1 - Ametista:

As amostras de ametista foram cortadas, por uma serra apropriada, em forma de pastilhas com áreas de 3,5 x 3,5mm, 1mm de espessura e peso igual a 0,036g. O tratamento térmico de 400°C, durante 2 horas, foi suficiente para eliminar qualquer sinal de TL natural das amostras e fez com que, a coloração natural das amostras, passassem de violeta para incolor. Após o tratamento térmico, foram feitas exposições na faixa de 10^{-3} a 1C/Kg = $1/2,58 \times 10^{-4}R = 3,88 \times 10^3R$, com radiação gama. Para essa faixa de exposição, as amostras apresentaram boa sensibilidade TL, porém, o comportamento da curva de resposta termoluminescente à exposição, não é linear. Figura 8, as curvas (A) e (B) representam a resposta termoluminescente do TLD-100 (LiF) e da ametista, respectivamente. Percebe-se, então comparando estas duas curvas, que o LiF responde linearmente às exposições e que o mesmo não acontece para a ametista. O decaimento da intensidade de TL deste mineral, é de 64,2% na primeira semana após a exposição, e sua sensibilidade à luz ambiente é 16%, conforme apresentado na tabela III.

Na curva de emissão, apresentada pela ametista, figura 9, notamos a presença de um único pico, a uma temperatura de 210°C.

Para reutilização das amostras de ametista, após as exposições, foi feito um tratamento térmico de 400°C/1h e que foi suficiente para eliminar os sinais TL das exposições anteriores, conforme apresentado na tabela I.

Figura 8 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF) e da ametista; curvas (A) e (B) respectivamente.

Figura 9 - Curva de emissão da ametista.

2 - Berilo

As amostras de berilo, após trituras, foram peneiradas e foi utilizado o material de granulação de 0,177mm, pelos motivos já discutidos no capítulo II. O tratamento térmico de 400°C durante 1 hora, foi suficiente para eliminar qualquer sinal de TL natural das amostras e fez com que, a coloração natural das amostras, passassem de amarelo para branco, assim permanecendo , mesmo depois de irradiadas. Após o tratamento térmico, foram realizadas exposições na faixa de 10^{-4} a 1C/Kg, com radiação gama. O comportamento das amostras de berilo, foi semelhante ao da ametista, em relação a linearidade, porém, apresentou uma sensibilidade inferior a da ametista, conforme a figura 10. O decaimento da intensidade de TL deste mineral, é de 14% nas primeiras 24 horas e 27,5% em 9 dias e sua sensibilidade à luz ambiente, é 33,4% . Na curva de emissão, apresentada pelas amostras de berilo, figura 11, notou-se a presença de quatro picos, em temperaturas de 100°C, 200°C, 240°C.

O tratamento térmico para reutilização do berilo, foi identico ao da ametista, 400°C/1 hora.

3 - Calcita

Para as amostras de calcita, foi também utilizada a granulação de 0,177mm. Com o tratamento térmico de 580°C/1 hora mais 400°C/2 horas, conseguiu-se eliminar qualquer sinal de TL natural. A coloração da calcita, permaneceu inalterada, foi semelhante ao da ametista, tanto em relação à sensibilidade, bem como em relação à linearidade. Porém, nos primeiros estudos realizados com o aparelho de construção própria, em colaboração com a Sapra (a), as amostras apresentaram uma linearidade inferior, em relação à obtida com o aparelho da Harshaw.

(a) Sapra (Serviço de Assessoria e Proteção Radiológica S/C LTDA).

Figura 10 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, com radiação gama, do TLD-100 (LiF) e do berilo; curvas (A) e (B), respectivamente.

Figura 11 - Curva de emissão do Berilo.

Figura 12.a - Curva da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da calcita; curva (B) obtida com o aparelho da Sagra e curva (C) com o da Harshaw.

Figura 12.b - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, TLD-100 (LiF), curva (A) obtida com aparelho da Sapro e curva (B) com o da Harshaw.

Para uma comparação e comprovação dos resultados da calcita e dos outros minerais estudados foram realizadas uma intercomparação dos aparelhos utilizando LiL, conforme figura 12.b.

Desta intercomparação, resultou uma diferença quanto a linearidade, ou seja, em um gráfico da intensidade TL em função exposição, em um papel di-logaritmico, a curva obtida com o aparelho da Harshaw apresentou-se linear, o mesmo não ocorrendo com o da Sagra.

A intensidade de TL das amostras, decaem 3,5%, após uma semana e 16% após 4 meses. Para uma exposição de 0,181C/Kg (700R) realizada com amostras expostas a luz ambiente e no escuro, obteve-se curvas de emissão, com diferenças na altura relativa à intensidade TL e na posição, no eixo horizontal, da temperatura do pico principal, conforme figura 13.

Figura 13 - Curvas de emissão da calcita, obtidas para uma exposição de 0,181C/Kg = 700R realizada com amostras a luz ambiente (curva A) no escuro (curva B).

A sensibilidade da calcita à luz ambiente é de 12,3% e, sua curva de emissão, apresenta picos em temperaturas de 145°C e 200°C, enquanto que, para amostras no escuro, as temperaturas foram de 145°C e 196°C.

O tratamento térmico para reutilização das amostras, foi idêntico ao dos outros minerais.

4 - Calamina

A granulação utilizada para os cristais de calamina, foi a mesma dos outros minerais; pois, como discutido anteriormente, figura 4, a intensidade TL, depende da granulação das amostras, conforme mostra a figura 14. Assim, nas curvas de emissão 14.a, b, c e d, que foram obtidas para uma exposição de 0,181C/Kg (700R) com amostras de granulação 0,149; 0,177; 0,250 e 0,500mm, notou-se a presença de dois picos, em temperaturas de 210°C e 235°C; porém, este segundo pico (o de 235°C), não está evidente na curva (a).

As amostras de calamina, também foram submetidas ao mesmo tratamento térmico da calcita, ou seja: 580°C durante 15 minutos, mais 400°C durante 2 horas, para eliminar qualquer sinal de TL natural. A coloração da calamina, permaneceu inalterada após esse tratamento. Na faixa de exposição de 10^{-3} a 10^{-1} C/Kg, o comportamento da calamina foi semelhante ao da calcita. Com o aparelho Harshaw obteve-se, uma curva de resposta TL, em função da exposição (com radição gama) mais próxima da linearidade, do que com a obtida pelo aparelho da Sagra. As curvas de resposta TL, em função das exposições, do TLD-100 (LiF) e da calamina, estão apresentadas na figura 15. O decaimento da intensidade TL deste mineral é de 3,8% na primeira semana e 20% após 4 meses. A sensibilidade da calamina à luz ambiente é de 30%. Na figura 16, as curvas (1) e (2), representam as curvas de emissão, obtidas de amostras expostas à luz ambiente e no escuro, respectivamente.

Para reutilização das amostras de calamina, após as expo

sições, utilizou-se um tratamento de 400°C, durante 1 hora.

Figura 14 - Curvas de emissão da calamina, obtidas para uma exposição de 0,181C/Kg com amostras de granulação 0,149 mm (a); 0,177mm (b); 0,250mm (c) e 0,500mm (d).

Figura 15 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TL-100 (LiF), curva (A) e da calamina; curva (B) obtida com o aparelho da Sapra e curva (C) com o da Harshaw.

Figura 16 - Curvas de emissão da calamina, obtidas de amostras expostas à luz ambiente (curva 1) e no escuro (curva 2).

5 - Espodumênio

Para as amostras de espodumênio, utilizou-se a mesma granulação dos outros minerais estudados, 0,177mm. O tratamento térmico de 400°C durante 1 hora, foi suficiente para eliminar qualuquer sinal de TL natural das amostras, e, isto provocou uma variação na coloração natural das amostras, passando de amarelo para branco e permanecendo assim mesmo após as exposições à radiação. Na faixa de exposição de 10^{-3} C/Kg a 1C/Kg, o comportamento das amostras de espodumênio, foi semelhante ao do berilo, tanto em relação à linearidade bem como em relação à sensibilidade, ver figura 17.

O decaimento da intensidade de TL deste mineral, é de 11,5%, nas primeiras 24 horas e 69,6%, após 9 dias, e, sua sensibi

lidade à luz ambiente é 14,9%. Em sua curva de emissão, o espodumênio apresentou vários picos de maior intensidade TL, às temperaturas de 160°C, 180°C e 220°C, conforme figura 18.

O tratamento térmico para reutilização do espodumênio , foi o mesmo dos outros minerais (400°C durante 1 hora).

Figura 17 - Curvas de resposta termoluminescente, em função das exposições com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do espodumênio curva (B).

Figura 18 - Curva de emissão do espodumênio.

6 - Feldspato

As amostras de feldspato utilizadas, foram de cor branca e de cor rósea. A granulação dessas amostras, foi a mesma utilizada para os outros minerais estudados 0,177mm. Assim como a calcita e a calamina, o feldspato precisa de um tratamento térmico de 580°C, durante 15 minutos, mais 400°C durante 2 horas, para eliminar qualquer sinal de TL natural. Após esse tratamento, as amostras de coloração rósea passaram para uma tonalidade mais clara, conservando esta cor mesmo depois de irradiadas e, as de cor branca permaneceram inalteradas. As curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição, com radiação gama, na faixa de 10^{-3} a 1C/kg, figura 19 e 20, apresentaram uma boa sensibilidade e linearidade obtidas com as amostras de feldspato branco e róseo, respectivamente. Na figura 19, as curvas (B) e (C), evidenciam novamente, a diferença nas respostas obtidas com aparelhos leitores utilizados. As amostras de feldspato branco, apresentaram um decaimento da intensidade TL de 30%, nas primeiras 24 horas e 35% em 9 dias.

No entanto, o feldspato róseo, decai 9,8% nas primeiras 24 horas e 20% em 9 dias.

A sensibilidade do feldspato branco à luz ambiente é de 55%, e o do róseo, é de 4,7%. A curva de emissão do feldspato branco, apresenta três picos bem nítidos, em temperaturas de 185°C, 195°C e 230°C, conforme figura 21.

O feldspato róseo, para uma exposição de 0,181C/Kg (700R), apresenta uma curva de emissão, onde se percebe quase que um único pico, (figura 22), na temperatura de 200°C, e, os outros dois, em 205°C e 240°C, passam quase que despercebidos. Na figura 23, obtida para uma exposição de 0,077C/Kg (300R) com amostras expostas à luz ambiente e no escuro, a curva de emissão do feldspato róseo, apresenta um único pico de temperatura de 200°C, e, percebe-se também, ausência dos picos de 205°C e 240°C.

O tratamento térmico para reutilização desses minerais ,
foi o mesmo dos outros minerais já discutidos, (400°C) durante 1
hora.

Figura 19 - Curvas da resposta termoluminescente, em função das exposições com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do feldspato branco; curva (B) obtida com o aparelho da Sagra e curva (C) com o da Harshaw.

Figura 20 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do feldspato róseo curva (B).

Figura 21 - Curva de emissão termoluminescente do feldspato branco, onde percebe-se a presença de três picos.

Figura 22 - Curva de emissão termoluminescente (A) para o feldspato róseo, onde está evidente um pico a temperatura de 200°C acompanhado da curva de aquecimento da prancheta onde coloca-se a amostra curva (B).

Figura 23 - Curvas de emissão do feldspato róseo, obtidas para uma exposição de 0,077C/Kg (300R) realizada com amostras a luz ambiente curva A, no escuro curva B.

7 - Rutilo

O rutilo é um óxido de titânio (TiO_2), e, apresenta-se na cor vermelho pardo. Após o tratamento térmico de 400°C, durante 1 hora, para eliminar a TL natural, as amostras apresentaram uma variação na tonalidade, tornando-se mais escuras e conservando a mesma cor, após irradiadas. Na curva de resposta TL às exposições (figura 24), para uma faixa de exposição de 10^{-3}C/KG a 10^{-1}Kg , as amostras apresentaram uma boa resposta TL, em relação à sensibilidade, porém, inferior quanto à linearidade. O decaimento da intensidade TL do rutilo, é de 12% nas primeiras 24 horas e 43,7% em 9 dias. A sua sensibilidade à luz ambiente é de 25,5% e o tratamento térmico para reutilização das amostras, também é de 400°C, durante 1 hora.

Figura 24 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e do rutilo curva (B).

8 - Turmalina

A turmalina é um silicato de composição química, constituida de um complexo de boro e alumínio.

As amostras de turmalina estudadas, foram de coloração azul, verde, rosa e preta, e de granulação 0,177mm. O tratamento térmico, para eliminar qualquer sinal de TL natural, nas amostras de coloração azul, verde e rosa, foi de 580°C, durante 15 minutos, mais 400°C durante 2 horas e, para as amostras pretas, 400°C durante 2 horas. Após esse tratamento, as amostras de coloração rosa, passaram para uma tonalidade de rosa mais claro, assim permanecendo, mesmo depois de irradiadas, e as de coloração azul, verde e preta permaneceram inalteradas. Na faixa de exposição de 10^{-3} C/Kg a 1C/Kg, as curvas de resposta TL às exposições com radiação gama, mostram que os quatro tipos de turmalinas, apresentam boa sensibilidade; mais divergem em relação à linearidade nas figuras 25, 26, 27 e 28 (percebe-se que a turmalina rosa apresenta uma boa linearidade). Quanto as turmalinas verde, azul e preta, pode-se dizer que não possuem boa linearidade; porém, a de coloração verde, é quase linear. As amostras de turmalina azul, apresentaram decaimento da intensidade TL, 12% na primeira semana e 16% após 1 mês; a de cor verde, na primeira semana, não sofreu decaimento e 27,7% após 1 mês; a de cor rosa 3% nas primeiras 24 horas e 7% em 9 dias e; a de cor preta 12% nas primeiras 24 horas e 17% em 9 dias, respectivamente. A sensibilidade à luz ambiente da turmalina azul é 7,5%, da verde 12,7% da rosa 13% e da preta 52%. Na figura 29.a, são mostradas as curvas de emissão da turmalina rosa, obtidas para uma exposição de 0,181C/Kg (700R), realizada com amostras à luz ambiente (curva 1) e no escuro (curva 2), onde pode-se perceber a presença de um pico à temperatura de 80°C e outro a 180°C. A curva de emissão da turmalina verde, figura 29.b, mostra a presença de um pico em 120°C e outro em 180°C e, da turmalina preta, observa-se vários picos, conforme figura 29.c.

Como mencionado anteriormente, todo material reutilizado neste experimento, foi submetido ao tratamento de 400°C durante 1 hora, o necessário para devolver à amostra as condições existentes antes de sua primeira exposição à radiação.

Figura 25 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, TLD-100(LiF), curva (A) e da turmalina azul, curva (B).

Figura 26 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina preta, curva (B).

Figura 27 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina verde, curva (B).

Figura 28 - Curvas da resposta termoluminescente, em função da exposição com radiação gama, do TLD-100 (LiF), curva (A) e da turmalina rosa, curva (B).

Figura 29.a - Curvas de emissão da turnalina rosa, obtidas para uma exposição de $0,181\text{C/Kg} = 700\text{R}$, realizada com amostras na luz ambiente (curva 1) e no escuro (curva 2).

Figura 29.b - Curva de emissão da turnalina verde, apresentando um pico na temperatura de 120°C e outro em 180°C.

Figura 29.c - Curva de emissão da turmalina preta, onde observa-se vários picos.

TABELA II a - Características gerais dos minerais utilizados

Nome do material Característica	AMETISTA	BERILO	CALCITA	CALAMINA	ESPODUMÊNIO	RUTILO
CLASSE	SILICATO	SILICATO	OXISSAIS	SILICATO	PIROQUISENEOS	ÓXIDOS
SUB-CLASSE	Tectossilicato G. quartzo	Sorossilicato G. Turmal.	Carbonato de calcio	Silicato de zinco		Óxido de Titânio
Composição química	SiO_2	$3\text{BeOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$	CaCO_3	$\text{H}_2\text{O} \cdot 0,2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	TiO_2
Sistema	Triagonal ou Romboedrico	Hexagonal	Trigonal ou Romboedrico	Diagonal ou Rômico	Monoclinico	Tetragonal
Cor	Violeta	Amarelo	Incolor	Branco	Amarelo	Vermelho Pardo
Dureza	7	7,5 a 8	3	4,5 a 5,0	6,5 a 7	6,0 a 6,5
Massa Especifica	2,6	2,6 a 2,8	2,7	3,4 a 3,5	3,1 a 3,2	4,2 a 4,3
Massa utilizada para leitura	0,036	0,014	0,017	0,021	0,014	0,023
Procedência	Goiás	Minas Gerais	Governador Valadares	Governador Valadares	Governador Valadares	Minas Gerais

TABELA II b - Características gerais dos minerais utilizados

Nome do material Característica	FELDSPATO (1)	FELDSPATO (2)	TURMALINA (INDICOLITA)	TURMALINA	TURMALINA (RUBELITA)	TURMALINA (AFRISITA)
CLASSE	SILICATO	SILICATO	SILICATO	SILICATO	SILICATO	SILICATO
Sub-classe	Tectossilicato	Tectossilicato	Sorossilicato	Sorossilicato	Sorossilicato	Sorossilicato
Composição química	$KAlSi_3O_8$ ou $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	$KAlSi_3O_8$ ou $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	É um complexo de boro e alumínio	É um complexo de boro e alumínio	É um complexo de boro e alumínio	É um complexo de boro e alumínio
Sistema	Monoclinico e Triclinico	Monoclinico e Triclinico	Trigonal ou Romboédico	Trigonal ou Romboédico	Trigonal ou Romboédico	Trigonal ou Romboédico
Cor	Branco	Róseo	Azul	Verde	Rosa	Preta
Dureza	6	6	7,0 a 7,5	7,0 a 7,5	7,0 a 7,5	7,0 a 7,5
Massa específica	2,5 a 2,6	2,5 a 2,6	2,9 a 3,2	2,9 a 3,2	2,9 a 3,2	2,9 a 3,2
Massa utilizada para leitura	0,014	0,014	0,016	0,017	0,020	0,017
Procedência	Goiás	Goiás	Goiás	Goiás	Goiás	Goiás

TABELA III - Principais características dos materiais para fins dosimétricos

Característica Nome do material	FORMA FÍSICA	TEMP. DO PICO PRINCIPAL °C	INTERVALO SUGERIDO P/ USO EM DOSIMETRIA	DECAIMENTO	SENSIBILIDADE E LUZ AMBIENTE
AMETISTA	Pastilha	210°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	64% na primeira semana	16%
BERILO	Pó	240°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	14% nas primeiras 24 h e 27,5% em 9 dias	33,4%
CALCITA	Pó	200°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	3,5 na primeira semana e 16% após 4 meses	12,3%
CALAMINA	Pó	210°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	3,8% na primeira semana e 20% após 4 meses	30%
ESPODUMÊNIO	Pó	180°C	10^{-3} C/Kg a 1/Ckg	11,5% nas primeiras 24 h e 69,6% em 9 dias	14,8%
FELDSPATO (1)	Pó	230°C	10^{-3} C/Kg a 1C/Kg	30% nas primeiras 24 h e 35,6% em 9 dias	5,5%
FELDSPATO (2)	Pó	200°C	10^{-3} C/KG a 1C/Kg	9,8 nas primeiras 24 h e 20% em 9 dias	4,7%
RUTILO	Pó	210°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	12% nas primeiras 24 h e 43,7 em 9 dias	25,5%
TURMALINA (INDICOLITA)	Pó	180°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	12% na primeira semana e 16% após 1 mês	7,5%
TURMALINA	Pó	180°C	10^{-3} C/Kg a 1C/Kg	0% na primeira semana e 27,7 após 1 mês	12,7%
TURMALINA (RUBELITA)	Pó	180°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	3% nas primeiras 24 h e 7% em 9 dias	13%
TURMALINA (AFRISITA)	Pó	180°C	10^{-3} C/Kg a 10^{-1} C/Kg	12% nas primeiras 24 h e 17% em 9 dias	52%

CAPÍTULO V

V - Conclusões:

Em relação aos efeitos provocados nas amostras pelo aquecimento (como por exemplo, mudança na altura dos picos na curva de emissão, etc.) podem ser interpretados como consequência de uma mudança no número de armadilhas, relacionadas a um determinado pico, como também a eficiência de captura do elétron pela armadilha, ou na recombinação de elétron com um buraco.

Dos resultados obtidos para os minerais estudados, po-de-se concluir o seguinte:

1 - De um modo geral, todos os minerais se mostraram sensíveis às exposições com radiação gama, conforme apresentado nas curvas de resposta TL em função da exposição na faixa de 10^{-3} C/Kg a 1C/Kg (3,88R a $3,88 \times 10^3$ R).

2 - Em relação à linearidade, pode-se dizer que os únicos minerais que apresentaram comportamento linear foram: os feldspato branco e róseo e aturmalina rosa. Deve-se, porém salientar que, os cristais de ametista, calcita e turmalina verde, apresentaram curvas de respota TL, próximas da linearidade, ou seja, próximas dos 45°.

3 - As curvas de resposta TL, em função da exposição para as amostras de ametista, berilo, calcita, calamina, turmalina azul e verde, apresentaram supralinearidade, a partir de 10^{-1} C/Kg (388R). Rutilo e turmalina preta, apresentaram supralinearidade a partir de 0,052C/Kg (200R), e, os feldspato branco e róseo, apresentaram linearidade para toda faixa de exposição utilizada, 10^{-3} a 1C/Kg (3,88R a $3,88 \times 10^3$ R).

4 - Entre os minerais estudados, os que apresentaram baixo decaimento em 24 horas após a exposição foram: calcita, calamina, feldspato róseo, turmalina verde e turmalina rosa. Salientado que, a turmalina verde, não apresentou decaimento na primeira semana

na. Ametista e feldspato branco, decaem mais rápido (em 24 horas), porém, apresentam uma estabilidade, após esse primeiro decaimento. Rutilo, espodumênio, berilo, turmalina azul e turmalina preta, apresentaram um decaimento regular.

5 - Quanto a sensibilidade à luz ambiente, as amostras mais sensíveis são as de berilo, calamina, rutilo e turmalina preta. As amostras de feldspato, foram as que apresentaram menor sensibilidade, aproximadamente da ordem de 5%.

Assim sendo, entre os minerais estudados, os que mostraram maior viabilidade de ser aproveitados como TLD são: feldspato branco, róseo e turmalina rosa. Porém, deve-se salientar que, a turmalina verde, mesmo apresentando curvas de resposta TL em função da exposição próximas da linearidade, pode ser aproveitada como TLD, pois, não apresenta decaimento na primeira semana após a exposição, como já mencionado anteriormente, e responde a uma boa faixa de exposição. Finalmente, a utilização destes minerais como dosímetro termoluminescente vai depender de sua resposta nas várias faixas energéticas.

O pó desses minerais para ser utilizado como dosímetro, deverá ser acondicionados em cápsulas de plástico, ou compactados para obtenção de pastilhas.

Sugestões para futuros trabalhos

Pode se fazer as seguintes sugestões:

1 - Fazer levantamento da dependência energética do feldspato branco e do róseo e das turmalinas verde e rosa, tendo-se em vista que esses minerais apresentaram as características necessárias para responder adequadamente como detector de radiação.

2 - Examinar os efeitos de tempo e de temperatura de recozimento, que sensibilizem os picos nas curvas de emissão, com o objetivo de preservar somente os picos de mais alta temperatura.

3 - Analisar a composição química das amostras dos minerais para se obter a percentagem e tipo de impurezas existentes nos mesmos e, assim avaliar melhor a influência da radiação sobre esse minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - CAMERON, J.R., Suntharalingan, N. and Kenney, G.N. - Termo
luminescent dosimetry. The University of Wisconsin Press,
1968.
- 02 - BECKER, K. - Solid state dosimetry. Cleveland, Ohio, C.R.C.,
1973.
- 03 - FOWLER, J.F. and ATTIX, F.H. - "Solid state integrating do
simeters". In: Radiation dosimetry. Academic Press, 1966.
V. 1, cap. 13, p. 241-289.
- 04 - De WERD, L.A. and STOEBE, T.G. - Termoluminescent properties
of solids and their applications. In American Scientist, V.
60, Nº 3, May-June 1972, p. 303-310.
- 05 - SCHULMAN, J.H.; ATTIX, F.H.; WEST, E.J. and GINTHER, R.J. -
New thermoluminescent dosimeter. In: The review of Scientific
Instruments, 1968, V. 31. p. 1262-1269.
- 06 - RANDALL, J.T. and WILKINS, M.H.F. - Phosphorescence and
electron traps - I. The study of trap distributions Proceeding
of the Royal Society, London, 1945, A 184, p. 366-389.
- 07 - RANDALL, J.T. and WILKINS, M.H.F. - Phosphorescence and
electron traps - II. The interpretation of long period
phosphorescence. In: Proceeding of the Royal Society, London,
1945, A 184, p. 390- 407.
- 08 - OKUNO, E. - Propriedades termoluminescentes do fluoreto de
cálcio natural. Tese de doutoramento apresentada ao Instii

tuto de Física da Universidade de São Paulo (1971).

- 09 - CALDAS, L.V.E. - Termoluminescência radio e fotoestimulada do LiF: Mg. Tese de mestrado apresentada ao Instituto de Energia Atomica de São Paulo (1978).
- 10 - STOBE, T.G. - Radiation Dosimetry In: Tenth Anniversary Conference of Association of Physicists in Medicine, São Paulo, Jul. 1979, p. 93.
- 11 - FERREIRA, M.M. - CaSO_4 : Dy e/ou Tm: Estudo de suas propriedades para aplicação em dosimetria. Tese de mestrado apresentada ao Instituto de Energia Atomica de São Paulo (1979).
- 12 - SANTOS, E.N. - Estudo de emissões termoluminescentes de fósforos dosimetricos; detecção de neutrons intermediários. Tese de mestrado apresentada ao Instituto de Energia Atomica de São Paulo (1979).
- 13 - DURAN, J.E.R. and GHILARDI NETTO, T. - Termoluminescence of Teeth and Bones. In: Meeting on Radiological Protection and Dosimetry, Itaipava, Rio de Janeiro (1983).
- 14 - KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido. Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro (1978).
- 15 - Mc. DOUGALL, D.J. - Thermoluminescence of geological Materials. New York and London: Academic Press (1968).
- 16 - KELLY, P. and BRAUNLICH, P. - Phenomenological Theory of Thermoluminescence. In: Physical Review B, V. 1, Nº 4, 15 february 1970, p. 1587-1595.

- 17 - MASCARENHAS, S.; BAFFA FILHO, O. and IKEYA, M. - Electron Spin Resonance Dating of Human Bones from Brazilian Shell-Mounds (Sambaquís). In: American Journal of Physical Anthropology, 1982, V. 59, p. 413-417.
- 18 - BAFFA FILHO, O. and MASCARENHAS, S. - ESR Dating of Cave Deposits from Akioyoshi-dô Cave in Japan and Diabo Cavern in Brasil. In: J. Speleol. Soc. Japan, V.9, 29, December 1984, p. 58-67.
- 19 - ICRU REPORT 33 - RADIATION QUANTITIES AND UNITS ISSUED 15 April 1980 - International Commission on Radiation.
- 20 - MEREDITH, W.J. and MASSEY, J. R. - Experimental Physics of