

S 61

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

539.12.08
M247c

CARACTERIZAÇÃO DE UM DOSÍMETRO EM TERMOS DO
“EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE, $H^*(10)$ ”,
PARA MONITORAÇÃO DE CAMPOS DE RADIAÇÃO X E GAMA

Autor: Paulo Guilherme Mudado Maletta
Orientador: Prof. Teógenes Augusto da Silva

Belo Horizonte – julho - 2003
Escola de Engenharia da UFMG

539.12.08
M247

Paulo Guilherme Mudado Maletta

**CARACTERIZAÇÃO DE UM DOSÍMETRO EM TERMOS DO
“EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE, $H^*(10)$ ”,
PARA MONITORAÇÃO DE CAMPOS DE RADIAÇÃO X E GAMA**

Dissertação apresentada ao Curso de Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Técnicas de Radioproteção -
Aplicação de Radioisótopos

Orientador: Prof. Teógenes Augusto da Silva, D.Sc.
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN)
Professor convidado da UFMG

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2003



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“CARACTERIZAÇÃO DE UM DOSÍMETRO EM TERMOS DO “EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE, $H^*(10)$ ”, PARA MONITORAÇÃO DE CAMPOS DE RADIAÇÃO X E GAMA”.

ALUNO: PAULO GUILHERME MUDADO MALETTA

Dissertação defendida e aprovada pela Comissão Examinadora constituída por:

Maria do Socorro Nogueira, Dr^a.

Tarcísio Passos Ribeiro de Campos, Dr.

Valbert Nascimento Cardoso, Dr.

ORIENTADOR:

Teógenes Augusto da Silva, Dr.

Belo Horizonte, 24 de setembro de 2003

Área de Concentração: Aplicação das Radiações, Radioproteção e Instrumentação Nuclear

À
minha mãe (in memoriam),
meus irmãos,
Márcia, Gui e Rafa.

AGRADECIMENTOS

- ❖ Ao amigo Dr. Teógenes Augusto da Silva, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, a quem fui privilegiado de ter como orientador, pela competência, profissionalismo e pela sua generosidade;
- ❖ Ao Carlos Manoel de Assis Soares pelo conhecimento, amizade e interesse em ajudar em qualquer momento;
- ❖ À Dr^a Maria do Socorro Nogueira por todo apoio dispensado;
- ❖ Ao Dr. Valbert Nascimento Cardoso, professor da Faculdade de Farmácia da UFMG, pelo apoio e incentivo à realização do curso de mestrado de Ciências e Técnicas Nucleares – CCTN do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG;
- ❖ Ao professores do Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG: Dr. Tarcísio Passos Ribeiro de Campos, Dr. Arno Heeren de Oliveira; Dr^a Cláudia Pereira Bezerra Lima por todo o apoio;
- ❖ Às funcionárias da secretaria do CCTN: Márcia B. S. Rosa e Nanci Afonso;
- ❖ Ao CDTN, pela oportunidade de realizar este trabalho;
- ❖ Ao meu amigo Leonardo Sudário pela colaboração nos desenhos do LIG utilizados na dissertação;
- ❖ Ao Laboratório de Metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN/CNEN, pela irradiação dos dosímetros nas energias de raios X;
- ❖ Aos amigos do Laboratório de Calibração de Dosímetros do CDTN que muito contribuíram para a realização das irradiações em feixes de radiação gama e X: Carlos Manoel de Assis Soares, Annibal Theotônio Baptista Neto, Flávio Ribeiro Alves, Ronaldo Bittar e Paulo Rogério Gerken;
- ❖ Ao pessoal do Laboratório de Irradiação Gama do CDTN, pelo apoio na irradiação dos dosímetros termoluminescentes no LIG: Ricardo Ferracini Corrêa, Pablo Andrade Grossi e Maria Aparecida da Silva Vieira;
- ❖ Ao Márcio Tadeu Pereira do CDTN, supervisor de radioproteção do LIG, pela permissão da realização das irradiações nas instalações do LIG;
- ❖ Ao Dr. Carlos Malamut e a José Rodrigues Batista do CDTN, pela disponibilidade dos valores teóricos de doses obtidos no LIG;
- ❖ Ao Dr. Luiz Oliveira de Faria por sua disponibilidade e apoio no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente;
- ❖ Às “meninas” do setor de biblioteca do CDTN, pelo ótimo atendimento;
- ❖ Ao amigo Marco Aurélio de Souza Lacerda, pela ajuda na formatação final da dissertação;
- ❖ Ao Dr. Roberto Stasiulevicius pela amizade e pelo incentivo constante.
- ❖ Ao amigo Robson Lage pela ajuda constante;
- ❖ A José Augusto Fernandes Neto, Ricardo Severino de Andrade, João Filipeto, Annibal Baptista Theotônio Neto e Marcos Antônio Leal, pela grande amizade e pelos inúmeros momentos divertidos;
- ❖ Às queridas amigas Betinha (Elizabeth Alves) e Morena (Márcia Elói), Thessa Cristina Alonso e Madelon Zenóbio, pelo apoio e incentivo;
- ❖ A todos da Divisão de Segurança Nuclear do CDTN que de uma maneira direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.	vii
LISTA DE TABELAS.	ix
LISTA DE SIGLAS.	xi
RESUMO.	xii
ABSTRACT.	xiii
1 INTRODUÇÃO.	1
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	4
2.1 Proteção Radiológica..	5
2.1.1 Aspectos gerais de monitoração em locais de trabalho..	5
2.1.2 Planejando um programa de monitoração.	7
2.1.2.1 Propostas de um programa de monitoração.	7
2.1.2.2 Tipos de monitoração.	7
2.1.2.3 Técnicas de monitoração.	8
2.2 Termoluminescência.	9
2.3 Grandezas Radiológicas.	17
2.4 Calibração.	24
2.4.1 Objetivos da calibração.	24
2.4.2 Fator de Calibração.	25
2.4.3 Radiações de referência.	26
2.5 Testes de desempenho.	26
3 OBJETIVOS.	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS.	30
4.1 Escolha do sistema termoluminescente (TL).	30
4.1.1 Porta-detectores.	30
4.1.2 Detectores termoluminescentes.	31
4.1.2.1 LiF:Mg,Ti.	31
4.1.2.2 CaSO ₄ :Dy.	31
4.1.3 Tratamento térmico..	33
4.1.4 Leitura dos detectores termoluminescentes	35
4.1.4.1 Controle de qualidade do sistema de leitura.	37
4.1.4.1.1 Ruído.	37
4.1.4.1.2 Intensidade da luz de referência.	38
4.1.4.1.3 Leitura dos dosímetros de controle..	38
4.1.4.1.4 Leitura dos dosímetros brancos.	38

4.2	Levantamento das características dos detectores TL.	39
4.2.1	Irradiação em feixes de radiação gama e X.	39
4.2.1.1	Irradiação dos detectores e dos dosímetros TL em feixes de radiação gama.	39
4.2.1.2	Irradiação dos dosímetros TL em feixes de raios X.	41
4.2.2	Integridade física dos detectores TL(seleção visual)..	45
4.2.3	Homogeneidade do lote dos detectores TL.	46
4.2.4	Reprodutibilidade dos detectores TL.	46
4.3	Calibração dos dosímetros TL.	47
4.3.1	Calibração em fonte de ^{60}Co	47
4.3.2	Calibração em fonte de ^{137}Cs	49
4.4	Caracterização dos dosímetros TL.. . . .	49
4.4.1	Reprodutibilidade dos dosímetros TL.	49
4.4.2	Limite inferior de detecção.	49
4.4.3	Dependência energética.	50
4.4.4	Dependência angular.	50
4.5	Monitoração ambiental do irradiador gama panorâmico, com câmaras de ionização.. . . .	51
4.5.1	Monitoração em três pontos do labirinto.	57
4.6	Monitoração ambiental do irradiador gama com dosímetros TL.	58
4.7	Obtenção de doses calculadas pelo método de Monte Carlo.	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.	62
5.1	Resultados das características dos detectores TL.	62
5.1.1	Fator de Homogeneidade.	62
5.1.2	Fator de reprodutibilidade.	63
5.1.3	Seleção final do lote de detectores TL de LiF:Mg,Ti	64
5.1.4	Seleção final do lote de detectores TL de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$	71
5.2	Resultados da Calibração dos dosímetros TL.. . . .	76
5.2.1	Resultados da Calibração em fonte de ^{60}Co	76
5.2.2	Resultados da Calibração em fonte de ^{137}Cs	78
5.3	Resultados das características dos dosímetros TL.	80
5.3.1	Reprodutibilidade.	80
5.3.2	Limite inferior de detecção.	80
5.3.3	Dependência energética.	83
5.3.4	Dependência angular.	86
5.4	Resultados da monitoração ambiental do irradiador gama panorâmico, com câmaras de ionização.. . . .	88
5.5	Resultados da monitoração ambiental do irradiador gama com os dosímetros TL.	92
5.5.1	Monitoração no labirinto do LIG.	93
5.5.2	Monitoração na sala de controle do LIG.	97
5.6	Valores Teóricos.	99
5.7	Comparação do desempenho dos diferentes sistemas de medidas.	99
6	CONCLUSÃO.	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	105

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 - Modelo simplificado da termoluminescência.	12
2 - Esquema simplificado mostrando a leitora de TLD.	13
3 - Ciclo de aquecimento em uma leitora de TLD, que consiste em um pré-aquecimento (Pre-heat), a leitura (Read) e o tratamento térmico (Anneal).	14
4 - Esquema das grandezas de proteção e operacional. Onde w_R e w_T são os fatores de peso da radiação e do tecido, respectivamente.	19
5 - Esquema representativo de um (a) campo de radiação real com a fluência em um ponto P, (b) campo de radiação expandido no ponto P, com a esfera da ICRU centrada para ilustrar o tamanho do campo, (c) campo de radiação alinhado e expandido no ponto P.	23
6 - Porta-detectores (a) fechado e (b) aberto.	30
7 - Detectores TL (a) de LiF:Mg,Ti e (b) de CaSO ₄ :Dy.	32
8 - Forno utilizado para tratamento térmico dos detectores de LiF:Mg,Ti.	33
9 - Estufa utilizada para tratamento térmico dos detectores de LiF:Mg,Ti.	34
10 - Forno utilizado para tratamento térmico dos detectores de CaSO ₄ :Dy.	34
11 - Sistema de leitura termoluminescente (a) e leitora termoluminescente Harshaw, modelo 4500 com a gaveta aberta (b).	35
12 - Curva de emissão de um material termoluminescente	37
13 - Irradiador gama STS OB85/3 (a) e unidade de controle do irradiador (timer) (b).	39
14 - Suporte de PVC para irradiação dos detectores de LiF:Mg,Ti durante a fase de seleção do lote.	40
15 - Suporte de PVC para irradiação dos detectores de CaSO ₄ :Dy durante a fase de seleção do lote.	40
16 - Aparelho de raios X , modelo VMI Pulsar 800 Plus.	43
17 - Irradiação em raios X para teste de dependência angular.	44
18 - Irradiador gama com destaque para a blindagem da sala da fonte de ⁶⁰ Co.	52

	Página
19 - Pontos 1, 7 e 13 no labirinto do LIG monitorados pelas câmaras de ionização.	53
20 - Equipamento completo de monitoração composto pela câmara de ionização, eletrômetro, cabo e unidade de controle.	54
21 - Câmara de ionização de 6 cm ³	55
22 - Câmara de ionização de 180 cm ³ .	55
23 - Câmara de ionização de ionização de 1800 cm ³ .	55
24 - Câmara de ionização padrão, de 1 litro, modelo PTW – LS1.	56
25 - Localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG.	59
26 - Corte esquemático da localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG	60
27 - Localização dos pontos dos dosímetros TL na sala de controle do LIG.	61
28 - Homogeneidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.	70
29 - Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.	70
30 - Homogeneidade do lote de detectores TL de CaSO ₄ :Dy.	75
31 - Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de CaSO ₄ :Dy.	75
32 - Dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti.	84
33 - Dependência energética do dosímetro de CaSO ₄ :Dy.	85
34 - Dependência angular dos dosímetros de LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	88
35 - Monitoração do labirinto do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	95
36 - Razão entre H*(10) medidas com CaSO ₄ :Dy e medidas com LiF:Mg,Ti.	97
37 - Razão entre os valores de H*(10) a 1,40 m e 2,10 m, para cada dosímetro.	97
38 - Monitoração da sala de controle do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	98

	Página
19 - Pontos 1, 7 e 13 no labirinto do LIG monitorados pelas câmaras de ionização.	53
20 - Equipamento completo de monitoração composto pela câmara de ionização, eletrômetro, cabo e unidade de controle.	54
21 - Câmara de ionização de 6 cm ³	55
22 - Câmara de ionização de 180 cm ³ .	55
23 - Câmara de ionização de ionização de 1800 cm ³ .	55
24 - Câmara de ionização padrão, de 1 litro, modelo PTW – LS1.	56
25 - Localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG.	59
26 - Corte esquemático da localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG	60
27 - Localização dos pontos dos dosímetros TL na sala de controle do LIG.	61
28 - Homogeneidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.	70
29 - Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.	70
30 - Homogeneidade do lote de detectores TL de CaSO ₄ :Dy.	75
31 - Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de CaSO ₄ :Dy.	75
32 - Dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti.	84
33 - Dependência energética do dosímetro de CaSO ₄ :Dy.	85
34 - Dependência angular dos dosímetros de LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	88
35 - Monitoração do labirinto do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	95
36 - Razão entre H*(10) medidas com CaSO ₄ :Dy e medidas com LiF:Mg,Ti.	97
37 - Razão entre os valores de H*(10) a 1,40 m e 2,10 m, para cada dosímetro.	97
38 - Monitoração da sala de controle do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.	98

LISTA DE TABELAS

	Página
1 - Características de alguns TLDs comerciais.....	17
2 - Radiações de referência da ISO 4037-1.....	27
3 - Testes de desempenho de dosímetros termoluminescentes.....	28
4 - Características do LiF:Mg,Ti.....	31
5 - Características do CaSO ₄ :Dy.....	32
6 - Parâmetros para conversão de kerma no ar, K _a , para H*(10), para radiações de referência de radionuclídeos (S).....	41
7 - Características dos campos de raios X, da série ISO de espectro estreito (N) utilizados para verificar a dependência dos detectores TL com a energia da radiação.....	42
8 - Condições de irradiação dos dosímetros TL, para teste de dependência energética.....	42
9 - Características do campo de raios X, da série ISO de espectro largo (W) utilizados para verificar a dependência dos detectores TL com o ângulo da radiação	44
10 - Condições de irradiação dos dosímetros TL para teste de dependência angular.....	44
11 - Parâmetros para conversão de kerma no ar, K _a , para H*(10), para radiações de referência da série estreita (N).....	45
12 - Características do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.....	65
13 - Características do lote selecionado de detectores TL de CaSO ₄ :Dy.....	72
14 - Calibração do dosímetro TL de LiF:Mg,Ti em ⁶⁰ Co	77
15 - Calibração do dosímetro de CaSO ₄ :Dy em ⁶⁰ Co.....	78
16 - Calibração do dosímetro TL de LiF:Mg,Ti em ¹³⁷ Cs.....	79
17 - Calibração do dosímetro de CaSO ₄ :Dy em ¹³⁷ Cs.....	80
18 - Limite inferior de detecção dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti	81
19 - Limite inferior de detecção dos dosímetros TL de CaSO ₄ :Dy.....	82

	Página
20 - Dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti.....	83
21 - Dependência energética do dosímetro de CaSO ₄ :Dy	85
22 - Dependência angular dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.....	87
23 - Monitoração no ponto 1 do labirinto do LIG, com a câmara de ionização de 1800 cm ³	89
24 - Monitoração no ponto 7 do labirinto do LIG com as câmaras de ionização de 6, 180 e 1800 cm ³	91
25 - Monitoração no ponto 13 do labirinto do LIG, com as câmaras de ionização de 6 e 180 cm ³	92
26 - Monitoração do labirinto do LIG com os dosímetros TL.....	94
27 - Razão entre os valores de H*(10) a 1,40 m e 2,10 m, para cada dosímetro TL	96
28 - Monitoração da sala de controle do LIG com os dosímetros TL.....	98
29 - Resumo dos resultados dos testes realizados com os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO ₄ :Dy.....	100
30 - Valores de $\dot{H}^*(10)$ nos pontos 1, 7 e 13 para os diferentes sistemas de medidas.....	101
31 - Razão entre sistemas de medidas e o dosímetro de LiF:Mg,Ti	102

LISTA DE SIGLAS

- CASMIE - Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa
- CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- CRCN - Centro Regional de Ciências Nucleares
- ICRP - International Commission on Radiological Protection
- ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements
- INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
- ISO - International Organisation for Standardization
- LNMRI - Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

RESUMO

A monitoração ambiental e individual das radiações desempenha um papel importante na manutenção e controle das condições de segurança radiológica em instalações radiativas. A monitoração visa também verificar a conformidade com os limites anuais de dose efetiva e dose equivalente estabelecidos em normas nacionais. O uso de dosímetros metrologicamente caracterizados é indispensável para uma maior confiança nas medidas a serem realizadas.

Dois tipos de dosímetros ambientais, compostos por detectores termoluminescentes LiF:Mg,Ti (fluoreto de lítio ativado com magnésio e titânio) e de CaSO₄:Dy (sulfato de cálcio ativado com disprósio), calibrados em termos do equivalente de dose ambiente, H*(10), foram submetidos aos testes de reprodutibilidade, limite de detecção, dependência energética e dependência angular para fins de caracterização.

Os desempenhos dos dosímetros ambientais foram comparados na monitoração de área do Laboratório de Irradiação Gama (⁶⁰Co) do CDTN. A investigação dos resultados foi realizada comparando as medidas obtidas com os dosímetros termoluminescentes com as obtidas com câmaras de ionização e com cálculos teóricos disponíveis. Os resultados mostraram que, por causa da presença considerável da radiação espalhada, o dosímetro de LiF:Mg,Ti, subestimou os valores de H*(10) em cerca de 20% em relação às câmaras de ionização. Neste caso, o uso do dosímetro de CaSO₄:Dy foi considerado impróprio devido ao desconhecimento do espectro de energia da radiação.

ABSTRACT

The environmental and individual monitoring of ionizing radiation plays an important role for the safety of radiological facilities. The main aim of a monitoring program is to verify the compliance with national personal limits established for the effective dose and the equivalent dose.

In order to obtain reliable measurements, dosimeters must be type tested and calibrated accordingly; then two types of environmental dosimeters with LiF:Mg,Ti and CaSO₄:Dy thermoluminescent (TL) detectors were calibrated in terms of ambient dose equivalent, H*(10); both dosimeters were also studied as far as reproducibility, lower detection limit, energy dependence and angular response.

The performance of the two types of TL dosimeters was compared against measurements carried out with ionization chambers and available calculated values during the monitoring of a ⁶⁰Co Irradiation Laboratory.

Results showed that, due to the scattered radiation, the LiF:Mg,Ti dosimeter underestimated the H*(10) values to about 20% compared to ionization chamber measurements. The use of the CaSO₄:Dy dosimeters was considered inadequate for this monitoring case, since the energy radiation spectrum is unknown.

1 - INTRODUÇÃO

Devido ao extenso campo de aplicação, a utilização das radiações ionizantes está cada vez mais freqüente em diversas áreas como medicina, engenharia, agricultura e outras. Este fato exige que seja feita uma monitoração eficaz e adequada das situações de exposição às radiações, pois elas podem produzir efeitos biológicos adversos à saúde do indivíduo exposto; tais efeitos são chamados efeitos determinísticos e efeitos estocásticos.

Os efeitos biológicos denominados determinísticos são causados por irradiação total ou localizada de um tecido, causando um grau de morte celular não compensado pela reposição ou reparo, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. Existe um limiar de dose, abaixo do qual a perda de células é insuficiente para prejudicar o tecido ou órgão de um modo detectável. Isto significa que, os efeitos determinísticos são produzidos por doses acima de um limiar, onde a severidade ou gravidade do dano aumenta com a dose aplicada. A probabilidade de efeitos determinísticos para valores de dose acima do limiar é de 100%. São exemplos de efeitos determinísticos: catarata, esterilidade no homem e na mulher e depleção da hematopoiese na medula óssea (Tauhata et al., 1999).

Os efeitos biológicos denominados estocásticos são aqueles em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose de radiação, sem a existência de um limiar. Isto significa que doses abaixo de limites estabelecidos por normas e recomendações de radioproteção podem induzir tais efeitos. São exemplos de efeitos estocásticos: o câncer e os tumores benignos.

Para que as atividades com radiações ionizantes sejam realizadas com segurança, há necessidade de assegurar que, primeiramente, outra atividade seja planejada e executada com total eficácia: a proteção radiológica. O objetivo da proteção radiológica é fornecer um padrão de proteção apropriado ao homem, contra as radiações, sem inibir atividades benéficas que aumentam a exposição à radiação (ICRP, 1991).

Uma das ferramentas básicas da proteção radiológica é a adoção de programas de monitoração, que têm como objetivo geral avaliar as condições radiológicas do local de trabalho e assegurar que estas condições sejam aceitavelmente seguras e satisfatórias aos indivíduos expostos.

A monitoração individual e ambiental das radiações ionizantes desempenha um papel importante na manutenção das condições de segurança radiológica em instalações radiativas, assegurando que os limites anuais de dose estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, tanto para o público quanto para os trabalhadores, não sejam ultrapassados.

Para que a monitoração individual e ambiental pudesse ser realizada com maior eficácia, órgãos internacionais como a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (International Commission on Radiation Units and Measurements) (ICRU) e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection) (ICRP) introduziram e recomendaram grandezas operacionais que são mensuráveis na prática e que fornecem uma estimativa a mais próxima possível, da dose efetiva, E .

Para a monitoração individual foram introduzidas duas grandezas operacionais: o *equivalente de dose individual penetrante*, $H_p(d)$, e o *equivalente de dose individual superficial*, $H_s(d)$, (ICRU, 1985) que, posteriormente, foram fundidas em uma só: o *equivalente de dose pessoal*, na profundidade “d” do corpo humano, $H_p(d)$, (ICRU 1993). Por considerar que o $H_p(d)$ estimaria a dose efetiva satisfatoriamente na maioria dos campos de radiação encontrados na prática, esta grandeza foi adotada pela ICRP (ICRP 1996).

Para a monitoração ambiental, a ICRU introduziu duas grandezas operacionais: o *equivalente de dose ambiente*, $H^*(10)$ e o *equivalente de dose direcional* $H'(d,\Omega)$ (ICRU, 1985) e que foram também recomendadas pela ICRP (ICRP, 1991).

A utilização do $H^*(10)$ se justifica através de estudos realizados por órgãos internacionais, que demonstram que os valores obtidos com o uso desta grandeza são os que mais se aproximam das doses de interesse ou valores de dose efetiva (Dietze e Menzel, 1994).

Apesar da ICRP recomendar a utilização do $H^*(10)$, no Brasil a grandeza utilizada para a monitoração ambiental é o *equivalente de dose para fótons*, H_x , que foi introduzida na Alemanha em 1981 (Reich et al., 1981) e adotada por alguns países como uma grandeza interina para dosimetria de fótons.

A introdução das novas grandezas operacionais da ICRU, para uso oficial no país, já foi proposta por grupos de trabalho e também já foram apresentadas propostas de programas de trabalho para diversos temas de radioproteção e metrologia. Porém, a maioria das propostas não foi implementada devido às dificuldades operacionais (LNMRI, 2002).

Objetivando contribuir para a superação das dificuldades, inclusive conceituais, neste trabalho tratou-se de estudar e comparar o desempenho de sistemas de medida, calibrados em termos de $H^*(10)$, aplicando-os na monitoração de uma instalação radiativa.

Foram caracterizados dois tipos de dosímetros ambientais compostos por detectores termoluminescentes e porta-detectores de PVC, projetados no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN, especificamente para monitoração ambiental. Os detectores TL utilizados para um dos dosímetros é o TLD-100, (LiF:Mg,Ti – fluoreto de lítio ativado com magnésio e titânio), e $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ (sulfato de cálcio ativado com disprósio) para o outro.

Os dosímetros foram usados para monitorar as instalações do Laboratório de Irradiação Gama, LIG, localizado no CDTN, que abriga uma fonte de ^{60}Co com atividade máxima de 2,22 PBq (60.000 Ci) e é utilizado para trabalhos de pesquisa e prestação de serviços que requerem altas doses de radiação.

Os resultados obtidos através da monitoração com os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, foram comparados aos resultados obtidos através das monitorações realizadas com câmaras de ionização e, também, aos resultados obtidos através de cálculos teóricos disponíveis.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Desde a descoberta da radiação, o homem percebeu a necessidade de quantificar a radiação que interagia com um determinado meio (Soares, 2001), mas somente muito tempo depois da descoberta da radiação X, em 1895, por Wilhelm Conrad Röntgen e do fenômeno da radioatividade, em 1896, por Antoine Henri Becquerel é que foi reconhecido que a radiação ionizante e os materiais radioativos apresentavam grande risco à saúde humana (Nogueira, 1997).

A exposição ocupacional à radiação pode ocorrer como resultado de várias atividades humanas, isto inclui o trabalho associado com diferentes estágios do ciclo combustível nuclear, o uso de fontes radioativas e máquinas de raios X em medicina, pesquisa científica, educação, agricultura e indústria, e ocupações que envolvem o manuseio de materiais radioativos. De modo a controlar esta exposição, é necessário ser capaz de avaliar a magnitude das doses envolvidas (IAEA (a), 1999).

A quantificação da radiação recebida pelo homem cumpre um importante papel para os propósitos de planejamento e atuação da proteção radiológica e cumprimento de normas reguladoras introduzidas em função dos conhecimentos adquiridos nesta área (Soares, 2001).

A proteção radiológica adequada dos trabalhadores é essencial para a segurança e aceitação do uso da radiação, materiais radioativos e energia nuclear (IAEA (b), 1999).

O aumento dos conhecimentos sobre as interações da radiação com a matéria e sobre os efeitos biológicos causados por elas, associados aos recursos computacionais, permitiu introduzir novos conceitos sobre as grandezas mais apropriadas a serem utilizadas nas medidas da radiação (Soares, 2001).

2.1 – Proteção Radiológica

O objetivo da proteção radiológica é “fornecer um padrão de proteção apropriado ao homem, contra as radiações, sem inibir atividades benéficas que aumentam a exposição à radiação” (ICRP, 1991) e tem como base os três princípios (IAEA (b), 1999) descritos abaixo:

- Justificação: qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição só deve ser autorizada se produzir um benefício líquido positivo para o indivíduo ou para a sociedade, para compensar o detrimento que ela possa causar, sendo, portanto, justificada em relação a outras alternativas, levando-se em conta, também, fatores sociais, econômicos e outros fatores relevantes;
- Otimização: em relação à exposição à radiação em uma atividade, exceto exposições médicas terapêuticas, proteção e segurança devem ser otimizadas de modo que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrerem exposições devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis.
- Limitação da dose individual: a exposição normal dos indivíduos deve ser restrita tal que, a dose efetiva e a dose equivalente para órgãos e tecidos relevantes não devem exceder os limites anuais estabelecidos pelo organismo regulador e que, também, estas doses sejam tão baixas quanto possível para diminuir a probabilidade da ocorrência de efeitos estocásticos.

2.1.1 – Aspectos gerais de monitoração em locais de trabalho

A proteção radiológica tem como uma de suas ferramentas básicas, a adoção de programas de monitoração.

O termo geral “monitoração” descreve medidas relativas à avaliação ou ao controle da exposição à radiação e materiais radioativos. Monitorar é mais que simplesmente medir; requer interpretação e avaliação. O principal objetivo da monitoração é manter o controle sobre os procedimentos e instalações

associados a uma prática, incluindo a otimização da proteção, para demonstrar a concordância com os limites de dose e detectar ocorrências inesperadas. Incluído dentro deste objetivo, está a demonstração da concordância com as exigências dos organismos reguladores (IAEA, 2003).

Monitoração de um local de trabalho, que compreende medidas realizadas no ambiente ocupacional, pode ser usada para um número de propostas específicas, nas quais pode-se incluir:

- a) Facilitar o controle de exposição externa dos trabalhadores através da confirmação de campos de radiação esperados e aceitáveis, junto com a detecção precoce de condições deterioradas ou anormais, permitindo, assim, ações corretivas apropriadas;
- b) Demonstrar boas práticas de trabalho (adequação de supervisão e treinamento) e padrões de engenharia;
- c) Fornecer informações que contribuem para minimizar exposições externas ou internas de fontes em locais de trabalho;
- d) Fornecer informações que possam ser usadas para permitir aos trabalhadores como, quando e onde eles estão expostos e motivá-los a reduzir suas exposições;
- e) Em circunstâncias apropriadas, contribuir para avaliação ou estimativa da exposição externa ou interna para o indivíduo ou grupo de trabalhadores;
- f) Demonstrar concordância com os padrões de gerenciamento que são considerados apropriados para as circunstâncias;
- g) Classificar áreas controladas e supervisionadas;
- h) Ajudar na prevenção de expansão da contaminação;
- i) Fornecer informações para o planejamento de programas de monitoração individual de exposição externa e interna e para definir procedimentos operacionais;
- j) Fornecer informação para avaliação de doses em eventos de exposição acidental e;

- k) Ajudar no controle de exposição interna de trabalhadores resultante de inalação de materiais radioativos, através da confirmação de aceitáveis níveis de contaminação atmosférica, junto com a detecção precoce de condições anormais ou deterioradas, permitindo, assim, ações corretivas apropriadas.

2.1.2– Planejando um programa de monitoração

2.1.2.1 –Propostas de um programa de monitoração

Um programa de monitoração deve ser projetado para assegurar que as exigências das normas de Proteção Radiológica sejam cumpridas, de que as condições de operação da instalação sejam entendidas e de que as doses para a força de trabalho sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis. Isto pode ser útil, também, na confirmação da classificação dos locais de trabalho e detectar flutuações nas condições ocupacionais. Um programa de monitoração deve ser planejado baseado em um pré-levantamento radiológico, considerando todas as exigências das normas de Proteção Radiológica.

De acordo com os padrões de segurança básica, um programa de monitoração deve especificar:

- As grandezas a serem medidas;
- Onde e quando as medidas têm que ser feitas e qual a sua freqüência;
- Os métodos de medidas e procedimentos mais apropriados;
- Níveis de referência e ações a serem tomadas se eles se excederem.

2.1.2.2 – Tipos de monitoração

Baseada na proposta, a monitoração pode ser dividida em rotineira, específica de uma tarefa e especial.

A monitoração rotineira é associada com operações contínuas e é pretendido demonstrar que as condições de trabalho permanecem satisfatórias e que atendem as exigências das normas de Proteção Radiológica.

A monitoração específica de uma tarefa, a qual se aplica em uma operação estabelecida, fornece dados para sustentar decisões imediatas no gerenciamento da operação.

A monitoração especial é investigativa por natureza e tipicamente envolve uma situação no local de trabalho onde não existe informação suficiente para demonstrar controle adequado.

A monitoração no local de trabalho deve ser feita:

- Antes do início do uso da instalação radiativa, ou tão breve quanto possível após as fontes radioativas serem levadas para a área;
- Sempre quando houver mudanças em procedimentos, equipamentos, blindagens;
- Periodicamente, para detectar o efeito de mudanças a longo prazo em equipamentos, ambiente e hábitos de trabalho;
- Quando há suspeita de um acidente ou depois que ele ocorreu.

2.1.2.3 – Técnicas de monitoração

Como a confiabilidade das medidas em uma monitoração é muito influenciada pela técnica de detecção aplicada, é de grande importância a escolha da técnica correta de acordo com as propriedades específicas do tipo de radiação ou contaminação.

Os Instrumentos de detecção de radiação comercialmente disponíveis são freqüentemente descritos e procurados através de seus componentes básicos essenciais. Os principais componentes são: o detector, o amplificador, o processador e o mostrador.

O “detector” contém um meio o qual absorve a energia de radiação, convertendo-a em um sinal formado usualmente por cargas elétricas. Os tipos de detectores são:

- Sólidos;
- Líquidos;
- Gasosos.

Entre os detectores de estado sólido, pode-se destacar os que utilizam a técnica da termoluminescência, chamados dosímetros termoluminescentes ou simplesmente TLD.

2.2 – Termoluminescência

Falando diante da Sociedade Real Britânica em 28 de outubro de 1663, o químico inglês Robert Boyle descreveu o fenômeno da termoluminescência pela primeira vez. Boyle estudou um diamante extraordinário que apresentou uma tênue luminescência quando colocado em uma parte aquecida de seu corpo. Sabe-se agora que, o fato que Boyle observou foi o resultado de milhões de anos de exposição à radiação de pequenas quantidades de urânio e tório e presença de potássio radioativo no diamante e na sua matriz geológica. Muitos minerais são termoluminescentes em algum grau, mas a maioria requer instrumentos sensíveis para detectar e medir a luminescência (Bortolot).

Termoluminescência é um fenômeno no qual o material irradiado emite luz quando termicamente estimulado (Shani, 1991).

A técnica utilizada para determinar a dose de irradiação através da intensidade de luz emitida por um material, quando aquecido e previamente irradiado, é denominada dosimetria termoluminescente (TL) e ao material é dado o nome de dosímetro termoluminescente (TL) ou TLD. Um TLD consiste de uma pequena massa de material dielétrico cristalino, contendo impurezas ou ativadores adequados, que fazem com que o material atue como um fósforo termoluminescente. Os ativadores, os quais podem estar presentes em pequenas quantidades, produzem dois tipos de centros ou redes de imperfeições no cristal: as armadilhas e os centros luminescentes (Attix, 1986).

A dosimetria TL tem como objetivo principal, determinar a dose (quantidade de energia por unidade de massa) que foi absorvida pelo material durante o processo. A luz emitida após a liberação termoestimulada da energia é detectada por um tubo fotomultiplicador, onde os fótons são convertidos em corrente elétrica que é integrada no tempo como carga elétrica, que por sua vez é correlacionada à dose após um processo de calibração (Maurício, 1998).

São vários os modelos elaborados, a partir de evidências experimentais, que descrevem o processo da termoluminescência e, em geral, estes modelos são baseados na teoria de bandas dos cristais. Apesar destes modelos não conseguirem explicar vários aspetos do fenómeno, uma vez estabelecidos os procedimentos de utilização de um material termoluminescente, seu comportamento é bastante estável para os requisitos da dosimetria. (Ferreira, 1995). Um modelo simplificado da termoluminescência é descrito a seguir.

Antes da irradiação, o material termoluminescente se encontra em equilíbrio termodinâmico, com os elétrons no estado fundamental ou estáveis, na banda de valência, conforme a primeira parte da figura 1. Durante a irradiação, a energia absorvida pelo material arranca os elétrons da banda de valência que atingem a banda de condução, tornando-se livres (ionização) e deixando buracos positivos também livres para se deslocarem pela banda de valência. Logo em seguida, ocorre a recombinação da maioria (99%) dos elétrons e buracos com a emissão de radiação denominada radioluminescência. Os elétrons restantes (1%) são capturados e presos em armadilhas, criadas por impurezas ou ativadores, nos níveis intermediários de energia denominados metaestáveis, como mostra a segunda parte da figura 1. A maneira mais simples de realizar a liberação desta energia retida no cristal é através da recombinação elétron-buraco, em centros luminescentes, que é conseguida pelo aquecimento do material e essa energia é liberada em forma de luz visível, conforme ilustrado na terceira parte da figura 1, cuja intensidade é medida através de uma fotomultiplicadora em uma leitora de detectores termoluminescentes (um esquema simplificado de uma leitora de TLD é mostrado na figura 2), retornando o material ao seu estado de equilíbrio. Neste processo, a energia é transferida para outro elétron ou para a rede, através de fônons. A curva de emissão TL de um material representa a luz emitida pelo cristal como função da temperatura ou do tempo de aquecimento e consiste, em geral, de vários picos. Cada pico está associado a um tipo de armadilha e recombinação. A figura 3 (parte superior) ilustra um exemplo de curva de emissão.

O processo de aquecimento pode ser dividido em três regiões como mostrado na figura 3 (parte inferior). O objetivo do pré-aquecimento ("Pre-heat") é

remover os picos de baixa temperatura criados após a irradiação. A região de leitura ('Read') é onde a emissão do TLD representa a dose absorvida e a região de tratamento térmico ('anneal') tem como objetivo a remoção completa dos resíduos de elétrons aprisionados, os quais poderão conduzir a um erro no futuro uso do dosímetro (Shani, 1991).

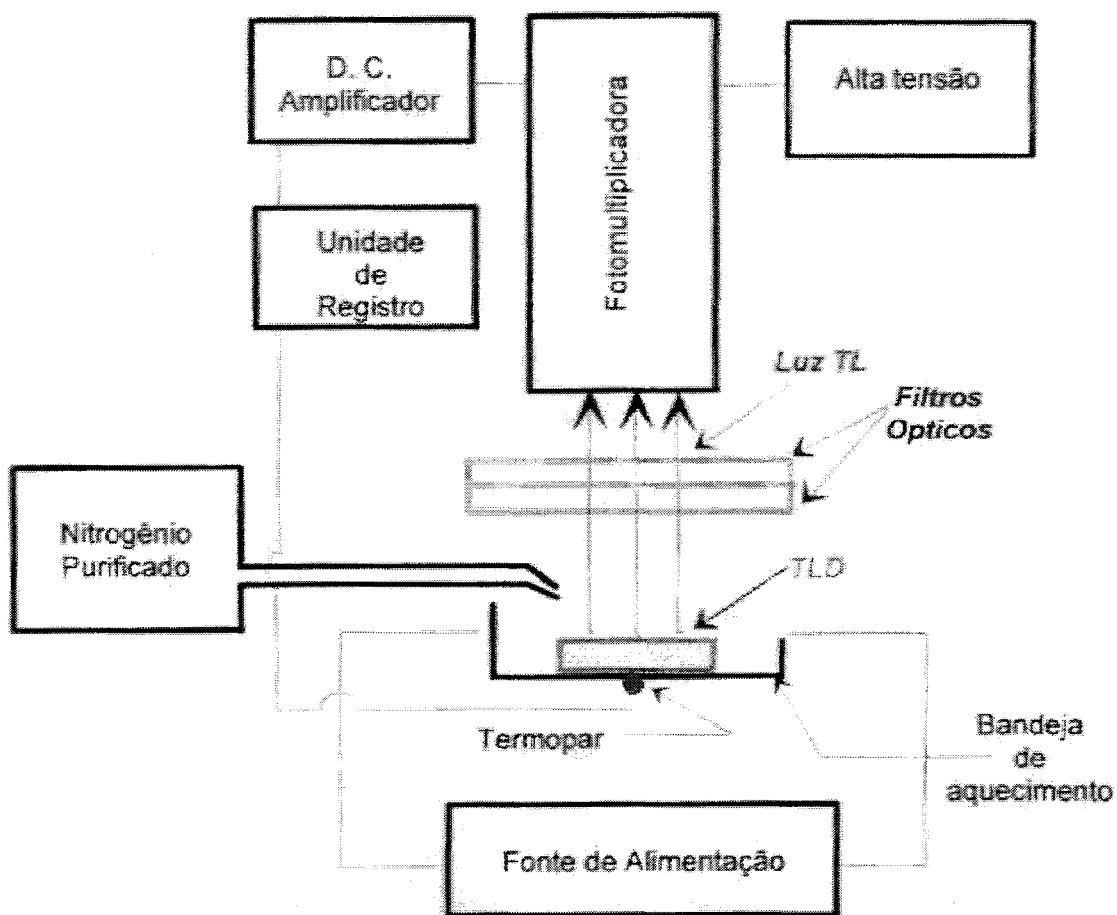


FIGURA 2 – Esquema simplificado mostrando a leitora de TLD.

Fonte: Nogueira, 1997.

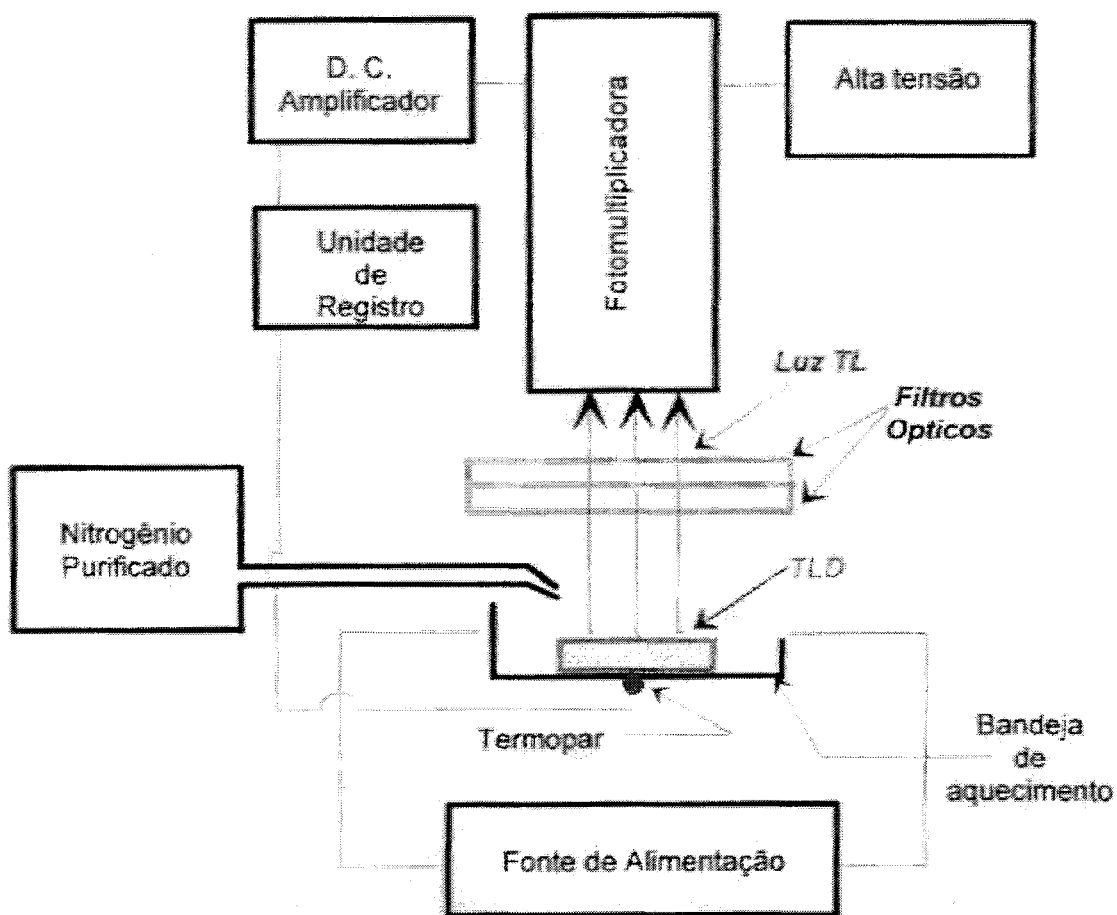


FIGURA 2 – Esquema simplificado mostrando a leitora de TLD.

Fonte: Nogueira, 1997.

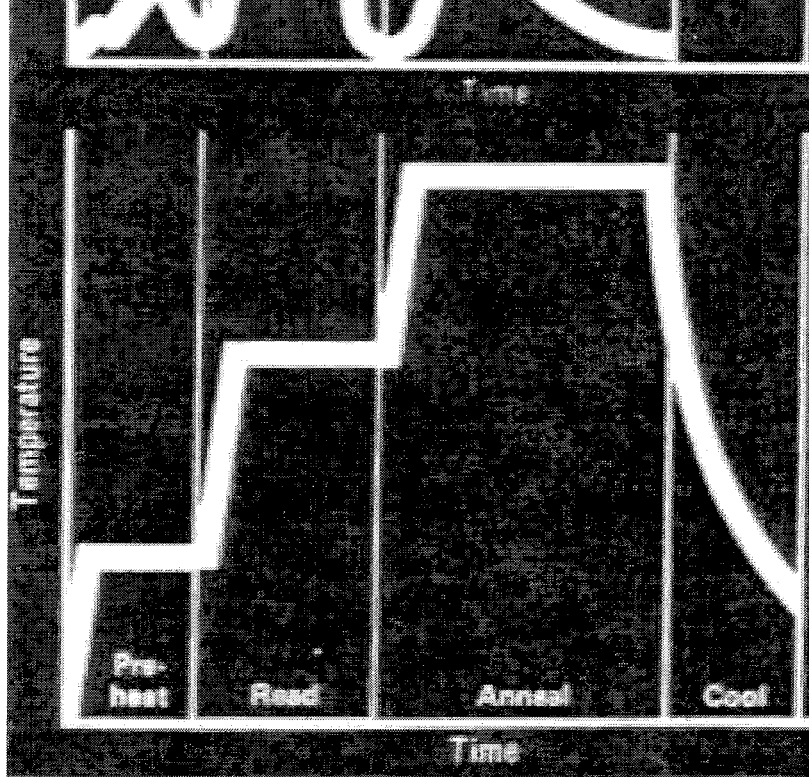


FIGURA 3 – Ciclo de aquecimento em uma leitora de TLD, que consiste em um pré-aquecimento (“Pre-heat”), a leitura (“Read”) e o tratamento térmico (“Anneal”).
Fonte: Attix, 1986.

A eficiência de emissão de luz pode diminuir com o acréscimo da temperatura por um processo chamado “termal quenching”. Assim, em taxas de aquecimento muito altas, pode ser observada alguma perda de luz. A área sob a curva da intensidade da luz em função do tempo de aquecimento será constante se a taxa de aquecimento não for muito alta (Attix, 1986). Após o aquecimento e o esvaziamento das armadilhas, o fósforo retornará ao normal após o resfriamento.

Para ser útil na aplicação da dosimetria, o fósforo termoluminescente (TLD) necessita ter uma intensa emissão de luz e ser capaz de reter elétrons aprisionados por razoáveis períodos de tempo e temperatura. A temperatura de 80°C pode ser considerado o limite mínimo para liberação térmica dos elétrons aprisionados em baixas taxas tal que medidas corretivas não sejam grandes (Shani, 1991).

Vários tipos de materiais termoluminescentes estão disponíveis para todos os tipos de aplicação como: dosimetria pessoal de corpo inteiro, dosimetria pessoal de extremidade, monitoração ambiental, dosimetria de altas doses e outros. Pode-se citar: fluoreto de lítio (LiF), borato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), fluoreto de cálcio (CaF_2), óxido de berílio (BeO) e óxido de alumínio (Al_2O). O LiF é o mais comumente usado devido ao seu número atômico efetivo baixo (8,2), ligeiramente maior que o do tecido humano (7,4). Aos materiais termoluminescentes são adicionados ativadores ou dopantes que aumentam a sensibilidade e a capacidade do cristal em criar níveis intermediários de energia, responsáveis pela retenção de parte da energia absorvida pela irradiação. Como exemplos têm-se o magnésio e titânio como ativadores do fluoreto de lítio (LiF:Mg,Ti) e o disprósio para o sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$).

Para que um material TL seja utilizado como dosímetro TL, é desejável que ele apresente algumas propriedades adicionais, que podem variar conforme sua área de aplicação. Entretanto, de modo geral, um TLD deve possuir as seguintes características:

- Elevada eficiência na emissão de luz;
- Estabilidade na temperatura e condições de utilização;
- Espectros de emissão TL na faixa de sensibilidade do instrumento de leitura;

- Boa reprodutibilidade;
- Não toxidez;
- Baixo custo;
- Resposta linear no intervalo de interesse.

A tabela 1 apresenta as características de alguns dosímetros TL disponíveis comercialmente.

TABELA 1 – Características de alguns TLDs comerciais

Características	LiF:Mg,Ti	Li ₂ B ₄ O ₇ :Mn	CaF ₂ :Mn	CaF ₂ :Dy	CaSO ₄ :Dy	BeO
densidade (g/cm ³)	2,64	2,3	3,18	3,18	2,61	3,01
Número atômico efetivo	8,2	7,4	16,6	16,6	15,6	7,1
Dependência -energética entre 30 keV a - ⁶⁰ Co	1,3	0,9	16	16	11	1
Temperatura do pico principal (°C)	195	200	260	200	220	180-220
Comprimento de onda do pico de emissão (nm)	400	500	500	460-483-576	478-571	330
Faixa de dose linear para ⁶⁰ Co (Gy)	10 ⁻⁴ - 10 ⁰	10 ⁻⁴ - 10 ⁰	10 ⁻⁵ - 10 ³	10 ⁻⁷ - 10 ³	10 ⁻⁸ - 10 ¹	10 ⁻⁴ - 10 ⁰
Dose limite de utilização (Gy)	10 ³	10 ⁴	8x10 ³	8x10 ³	10 ³	10 ³
Dose de saturação (Gy)	5x10 ³	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁴	3x10 ³	3x10 ³
Eficiência para ⁶⁰ Co relativa ao LiF	1	3	3	15	28	0,6
Desvanecimento térmico a 25°C	5% em 1 ano	10% em 2 meses	1% em 1 dia	13% em 1 mês	6% em 6 meses	8% em 3 meses
Sensibilidade à luz	fraca	média	forte	forte	média	forte
Estabilidade química	boa	higroscópico	boa	boa	boa	boa
Toxidez	alta (se ingerido)	alta (se ingerido)	baixa	baixa	baixa	alta (se inalado)

Fonte: Maurício, 1993.

2.3 – Grandezas Radiológicas

As grandezas operacionais, internacionalmente aceitas e usadas para medidas de radiação e proteção radiológica, foram definidas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological

Protection) – ICRP (ICRP, 1991) e pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (International Commission on Radiation Units and Measurements) – ICRU (ICRU, 1993).

Em 1991, a ICRP (ICRP, 1991) recomendou a revisão do sistema de limitação de dose, inclusive as especificações das grandezas limitantes básicas propostas para proteção radiológica. O sistema de limitação de dose é baseado na dose equivalente em vários órgãos ou tecidos, H_T , e na soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos e órgãos, a dose efetiva, E . Estas grandezas de proteção são essencialmente não mensuráveis; as doses devem ser estimadas através do uso de grandezas que podem ser medidas sob condições operacionais: as grandezas operacionais.

As grandezas para medida de radiação e proteção radiológica podem ser agrupadas em três tipos: as grandezas físicas ou primárias, grandezas de proteção ou limitantes e grandezas operacionais, cuja correlação é encontrada na figura 4.

As grandezas físicas ou primárias são grandezas diretamente mensuráveis definidas pela ICRU (ICRU, 1993), e universalmente aceitas para caracterização de campos de radiação. Na área de radioproteção, a grandeza física fundamental na qual padrões nacionais de radiação de fótons são calibrados é o kerma no ar, K_a (LNMRI, 2002).

Tipos de Grandeza

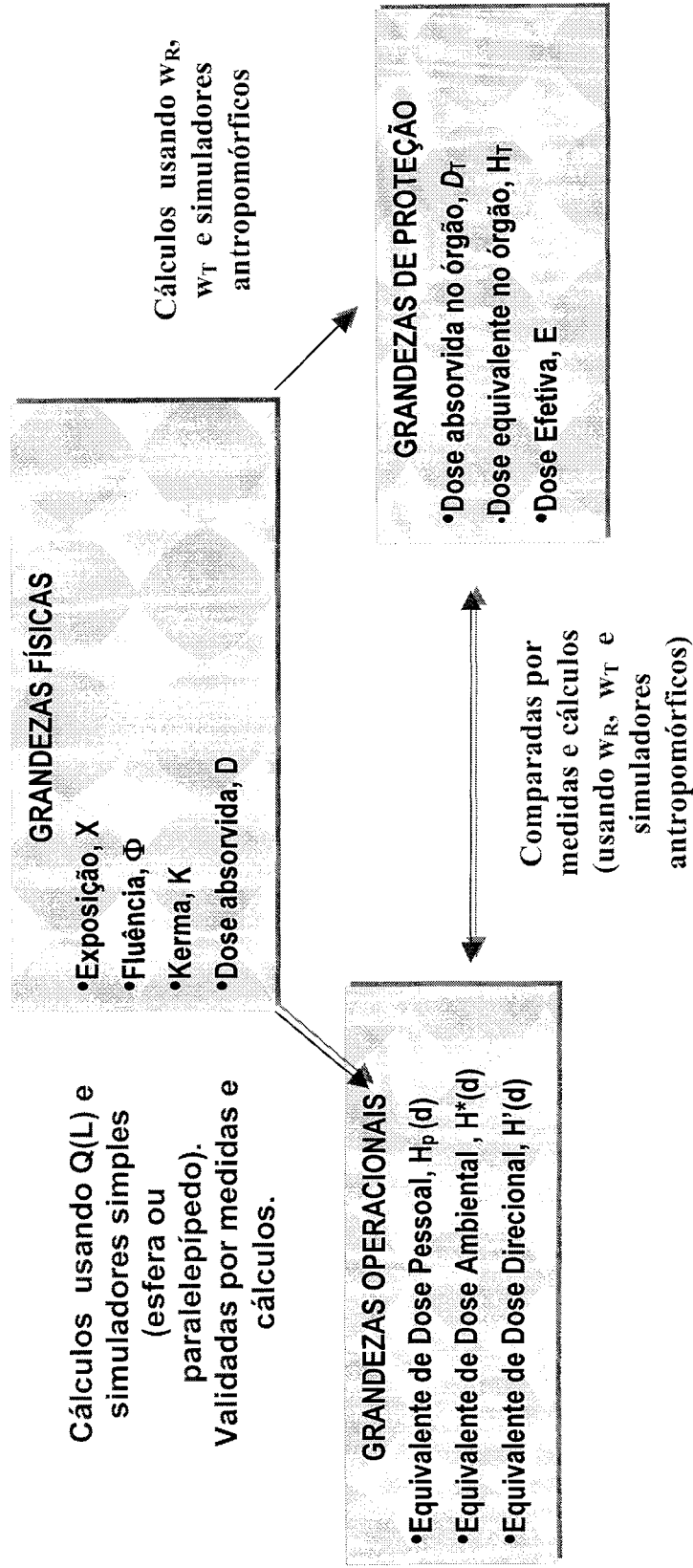


FIGURA 4 – Esquema das grandezas de proteção e operacional. Onde w_R e w_T são os fatores de peso da radiação e do tecido, respectivamente.
Fonte: Nogueira, 1997.

O kerma, K , é definido como sendo “a razão entre dE_{tr} e dm , onde dE_{tr} é a soma da energia cinética inicial de todas as partículas carregadas liberadas por interações de partículas não carregadas em um volume de massa dm ” (ICRU, 1980, 1998) ou seja:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

A unidade de kerma no SI é $J.kg^{-1}$ com o nome especial de gray (Gy).

As grandezas de proteção ou limitantes são grandezas definidas pela ICRP (ICRP, 1991) com a função de indicar o risco para o homem da exposição à radiação ionizante. As grandezas de proteção não são diretamente mensuráveis, mas podem, por meio de cálculos, ser relacionadas com o campo de radiação no qual ocorre a exposição. As duas grandezas dosimétricas recomendadas para propostas de proteção radiológica são a dose efetiva, E , e a dose equivalente H_T , no tecido ou órgão, T (IAEA (a), 1999).

“A dose efetiva é a soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos e órgãos do corpo” (ICRP, 1991), ou seja:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão T e w_T é o fator de ponderação para o tecido T .

Desde que w_T é adimensional, a unidade de dose efetiva é a mesma de dose equivalente, $J.kg^{-1}$, e recebe o nome especial de sievert (Sv).

As grandezas operacionais são grandezas definidas pela ICRU (ICRU, 1993), e podem ser diretamente mensuráveis. Estas grandezas são usadas para

demonstração de concordância com os limites de dose recomendados pela ICRP e a IAEA.

Novas grandezas operacionais para uso prático em proteção radiológica, onde há exposição a fontes externas, foram primeiramente introduzidas pela ICRU em 1985 (ICRU, 1985) e redefinidas mais tarde, (ICRU, 1993). As grandezas operacionais para monitoração de área são o equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$ e o equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$. Para a monitoração individual, a grandeza utilizada é o equivalente de dose pessoal, $H_p(d)$. Neste trabalho serão abordadas somente as grandezas operacionais para monitoração de área.

As grandezas operacionais recomendadas para a monitoração de locais de trabalho, $H^*(d)$ e $H'(d, \Omega)$, são definidas em um simulador de corpo humano conhecido como esfera ICRU (ICRU, 1993). Esta esfera é feita de material de tecido-equivalente, com diâmetro de 30 cm, densidade de 1 g/cm^3 e composição de elementos, por massa, de 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6% de nitrogênio. (IAEA (a), 1999)

Para a monitoração de área, é útil estipular certos campos de radiação que são derivados do campo de radiação real e os termos 'expandido' e 'alinhado' são usados para caracterizar estes campos de radiação derivados. No campo 'expandido', a fluência e sua distribuição de energia têm o mesmo valor em todo o volume de interesse como no ponto real de referência. A expansão do campo assegura que toda a esfera ICRU seja irradiada homogeneamente. No campo de radiação expandido e alinhado, a fluência e sua distribuição de energia são as mesmas que no campo expandido, mas a fluência é unidirecional (ICRU, 1993). Uma apresentação esquemática de um campo expandido e alinhado é mostrada na figura 5.

"O equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$, em um ponto de um campo de radiação, é o equivalente de dose que seria produzido pelo campo expandido e alinhado correspondente na esfera ICRU, na profundidade, d , no raio oposto à direção do campo alinhado" (ICRU, 1985)

O equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$ é expresso em sievert (Sv) e é definido de tal forma que os instrumentos de medida devem ter uma resposta isotrópica, isto é, a resposta independente da direção da radiação incidente.

O equivalente de dose na profundidade de 10 mm, $H^*(10)$, é a grandeza usada para estimar a grandeza de proteção radiológica “dose efetiva”, em termos da qual os limites legais são estabelecidos e é também útil em estimar o valor máximo do “equivalente de dose pessoal”, o qual poderia ser registrado pelo dosímetro do trabalhador. $H^*(10)$ é usado para radiação fortemente penetrante, geralmente radiações X e gama de energias maiores que 15 keV e nêutrons.

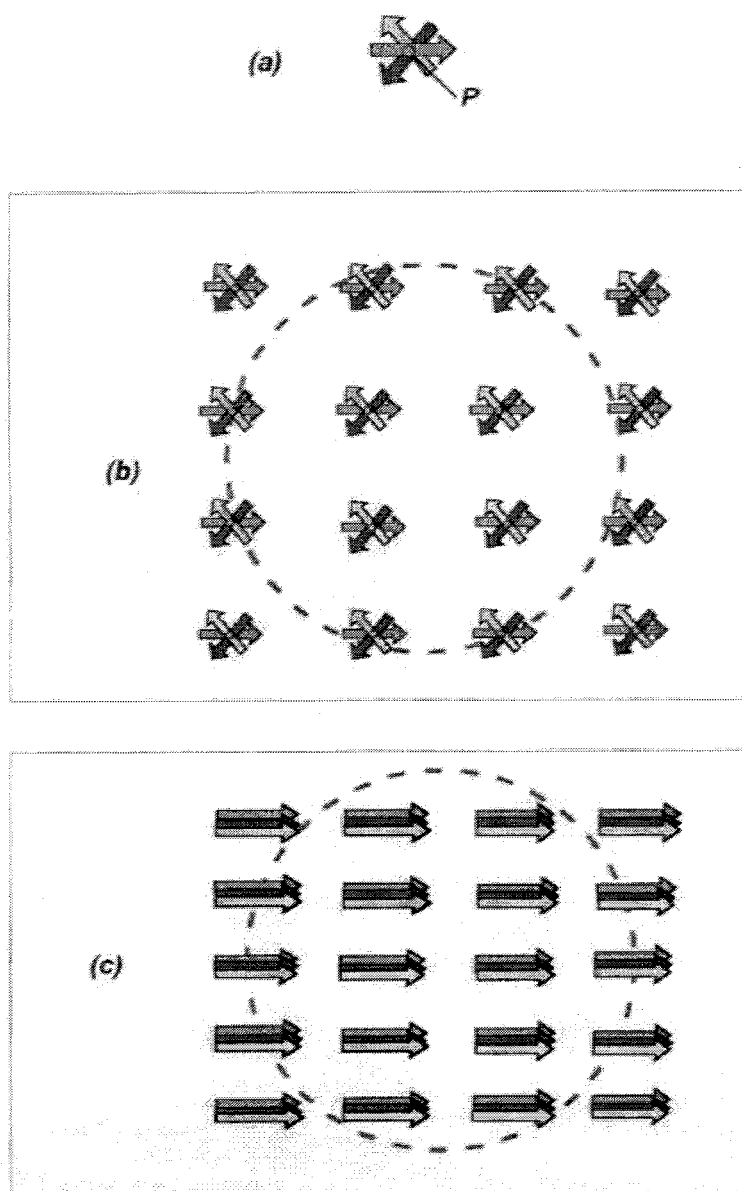


FIGURA 5 – Esquema representativo de um (a) campo de radiação real com a fluência em um ponto P, (b) campo de radiação expandido no ponto P, com a esfera da ICRU centrada para ilustrar o tamanho do campo, (c) campo de radiação alinhado e expandido no ponto P.

Fonte: Nogueira, 1997.

“O equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$, em um ponto de um campo de radiação, é o equivalente de dose que seria produzido pelo campo expandido

correspondente na esfera ICRU, na profundidade, d , no raio em uma direção específica Ω " (ICRU, 1993)

O equivalente de dose direcional na profundidade 0,07 mm, $H'(0,07, \Omega)$, é expresso em Sv e é usado para controlar o equivalente de dose para a pele. O $H'(0,07)$ é usado para radiação fracamente penetrante, geralmente radiação beta e radiações X e gama de baixa energia.

Os conceitos de radiação fortemente penetrante e fracamente penetrante foram definidos pela ICRU (ICRU, 1985). A radiação é dita fracamente penetrante quando a dose equivalente recebida por uma pequena área qualquer da pele for maior do que 10 vezes a dose efetiva. Caso contrário a radiação é dita fortemente penetrante.

2.4 – Calibração

Calibração é definida como a "determinação quantitativa, sob um conjunto controlado de condições padrões, da indicação dada pelo instrumento de medida da radiação em função do valor da grandeza que se pretende medir com um instrumento" (IAEA, 2000).

É requisito de todo instrumento de monitoração de área, que seja calibrado antes de ser usado para medir a grandeza em um campo de radiação. Calibração e testes devem ser realizados em concordância com os regulamentos nacionais.

2.4.1 – Objetivos da calibração

Os principais objetivos da calibração são:

- Assegurar que o instrumento de medida está funcionando corretamente e então verificar se ele é adequado para a proposta de monitoração pretendida;
- Determinar, sob um conjunto de condições padrões, a indicação de um instrumento em função do valor do mensurando (a grandeza que se pretende medir).

2.4.2 – Fator de Calibração

O fator de calibração, N , é definido como a razão entre o valor verdadeiro convencional da grandeza que se pretende medir, H , e a leitura, M , obtida com o instrumento, ou seja:

$$N = \frac{H}{M}$$

onde o valor verdadeiro convencional, H , da grandeza é a melhor estimativa do valor, determinado pelo padrão primário ou secundário ou por um instrumento de referência que tenha sido calibrado através de um padrão primário ou secundário.

O fator de calibração N é adimensional quando o instrumento informa a grandeza a ser medida. Um dosímetro que informa o valor verdadeiro convencional corretamente tem o fator de calibração igual a 1.

Em geral, os instrumentos de referência não indicam diretamente as grandezas de interesse, ao contrário, a maioria dos instrumentos de referência é usada para caracterizar os campos de radiação de referência através de outras grandezas como, por exemplo, fluência para radiação de nêutrons e kerma no ar para os fótons. As grandezas operacionais são derivadas destas grandezas básicas através de coeficientes de conversão apropriados, h . (IAEA, 2000)

O coeficiente de conversão, h_k , de kerma para equivalente de dose, é a razão entre o equivalente de dose na esfera, H , e o kerma no ar, K_a , do ponto no campo de radiação (ISO, 1997).

$$h_k = \frac{H}{K_a}$$

Os coeficientes de conversão foram calculados teoricamente e são adotados internacionalmente para todas as radiações de referência produzidas e descritas pela Organização Internacional de Padronização, ISO, (ISO, 1996).

A grandeza operacional, $H^*(d)$, é definida em um simulador de corpo humano conhecido como esfera ICRU (ICRU, 1993), mas os dosímetros utilizados para calibração são normalmente irradiados livres no ar, isto significa que o

projeto do dosímetro deve incorporar as características da presença da esfera ICRU.

2.4.3 – Radiações de referência

A ISO (ISO, 1996) especifica as radiações de referência X e gama, para calibração dos dosímetros, a nível de proteção, em taxas de kerma no ar entre $10\mu\text{Gy h}^{-1}$ e 10 Gy h^{-1} e para determinação de suas respostas em função da energia do fóton.

Por razões de simplificação, letras foram introduzidas para representar as qualidades de radiação da ISO (ISO, 1996). Para radiação X, as letras F, L, N, W, e H denotam: F - qualidades de radiação de fluorescência (fluorescence), L - de baixa taxa de kerma no ar (low air kerma rate), N - de espectro estreito (narrow spectrum), W - espectro largo (wide spectrum), H - de alta taxa de kerma no ar (high air kerma rate), seguidas do símbolo químico do material emissor para radiação de fluorescência e o potencial de geração para radiações X filtradas. As radiações de referência produzidas por fontes radioativas são denotadas pela letra S, combinando com o símbolo químico do radionuclídeo; as radiações de referência produzidas pelas reações nucleares são denotadas pela letra R, seguida pelo símbolo químico do elemento de alvo responsável pela radiação. A tabela 2 contém todas as qualidades de radiação junto com suas energias médias do espectro de fluência.

2.5 – Testes de desempenho

Somente a calibração (item 2.4) não é capaz de assegurar a confiabilidade de um instrumento, o que exige um conjunto de testes de desempenho, conhecido como “type test”, que deve ser realizado no dosímetro com a finalidade de se determinar as suas características. O conhecimento destas características é a base da escolha de um dosímetro apropriado para ser usado em uma condição radiológica específica. A tabela 3 apresenta alguns testes de desempenho para sistemas de dosimetria termoluminescentes.

TABELA 2 – Radiações de referência da ISO 4037-1

Qualidade da radiação	Energia keV	Qualidade da radiação	\bar{E} keV	Qualidade da radiação	\bar{E} keV	Qualidade da radiação	\bar{E} keV	Qualidade da radiação	\bar{E} keV
F-Zn	8,6	L-10	8,5	N-10	8	W-60	45	H-10	7,5
F-Ge	9,9	L-20	17	N-15	12	W-80	57	H-20	12,9
F-Zr	15,8	L-30	26	N-20	16	W-110	79	H-30	19,7
F-Mo	17,5	L-35	30	N-25	20	W-150	104	H-60	37,3
F-Cd	23,2	L-55	48	N-30	24	W-200	137	H-100	57,4
F-Sn	25,3	L-70	60	N-40	33	W-250	173	H-200	102
F-Cs	31,0	L-100	87	N-60	48	W-300	208	H-250	122
F-Nd	37,4	L-125	109	N-80	65			H-280	146
F-Sm	40,1	L-170	149	N-100	83			H-300	147
F-Er	49,1	L-210	185	N-120	100				
F-W	59,3	L-240	211	N-150	118				
F-Au	68,8			N-200	164				
F-Pb	75,0			N-250	208				
F-U	98,4			N-300	250				

Radionuclídeos

Qualidade da radiação	Reação	\bar{E} Mev
S-Am	^{241}Am	59,5
S-Cs	^{137}Cs	662
S-Co	^{60}Co	1250

Radiações para fótons de alta energia

Qualidade da radiação	Reação	\bar{E} Mev
R-C	$^{12}\text{C} (p,p'\gamma) ^{12}\text{C}$	4,36
R-F	$^{19}\text{F} (p,\&\gamma) ^{16}\text{O}$	6,61
R-Ti	(n, γ) captura em Ti	5,14
R-Ni	(n, γ) captura em Ni	6,26
R-O	$^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$	6,61

Fonte: ISO,1997.

Onde, \bar{E} = Energia Média, F = Fluorescência, L = Baixa taxa de kerma no ar, N = Espectro estreito, W = espectro largo e H = Alta taxa de kerma no ar, S = Fontes radioativas e R = Reações nucleares.

TABELA 3 - Testes de desempenho de dosímetros termoluminescentes

<i>Características a serem testadas</i>	<i>Finalidade</i>
Homogeneidade do lote	Verificar a uniformidade de sensibilidade dos dosímetros dentro de um mesmo lote
Reprodutibilidade	Verificar se o sistema dosimétrico apresenta a mesma resposta para uma mesma dose
Linearidade	Verificar a uniformidade de resposta dos dosímetros em relação à magnitude de exposição
Limite inferior de detecção	Averiguar se os requisitos mínimos de detecção referente ao limite inferior do intervalo de medida dos dosímetros são alcançados
Auto-irradiação	Investigar se a possível existência de radionuclídeos nos materiais que compõem o detector não induzirá a erros inaceitáveis
Estabilidade dos dosímetros sob diferentes condições climáticas	Investigar o comportamento do dosímetro em relação ao desvanecimento de sua resposta, quando submetido a condições normais de teste e a condições mais severas durante um período igual ao do uso rotineiro
Sinal residual	Verificar se o detector não sofre alterações significativas em sua sensibilidade após receber doses elevadas
Efeito da luz sobre o dosímetro	Determinar a influência da luz sobre o dosímetro
Dependência energética	Determinar a resposta do dosímetro em relação a energia dos fótons incidentes
Dependência angular	Determinar a resposta do dosímetro em relação ao ângulo de incidência dos fótons incidentes
Resistência a impactos	Testar a robustez dos suportes, detectores e fixação dos filtros

Fonte: Soares, 2001.

3 - OBJETIVOS

OBJETIVO: avaliar o desempenho de diferentes sistemas de medidas na monitoração ambiental utilizando um irradiador gama panorâmico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ❖ Escolha do sistema termoluminescente (TL).
- ❖ Avaliar características dos detectores TL: tais como:
 - Integridade física (seleção visual);
 - Homogeneidade;
 - Reprodutibilidade.
- ❖ Calibrar os dosímetros TL.
- ❖ Avaliar características dos dosímetros TL tais como:
 - Reprodutibilidade;
 - Limite inferior de detecção;
 - Dependência energética;
 - Dependência angular.
- ❖ Obter pelo método de Monte Carlo os valores teóricos das doses.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Escolha do sistema termoluminescente (TL)

Os materiais e métodos utilizados são descritos neste capítulo.

4.1.1 - Porta-detectores

O porta-detectores utilizado, apresentado na figura 6, projetado especialmente para a dosimetria ambiental, com 3,5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, é composto de um suporte e uma tampa, ambos de PVC, de formato cilíndrico, um espaçador de borracha ou plástico capaz de abrigar até quatro detectores, dispostos a uma profundidade de 8 mm, e um anel de borracha para evitar a umidade.

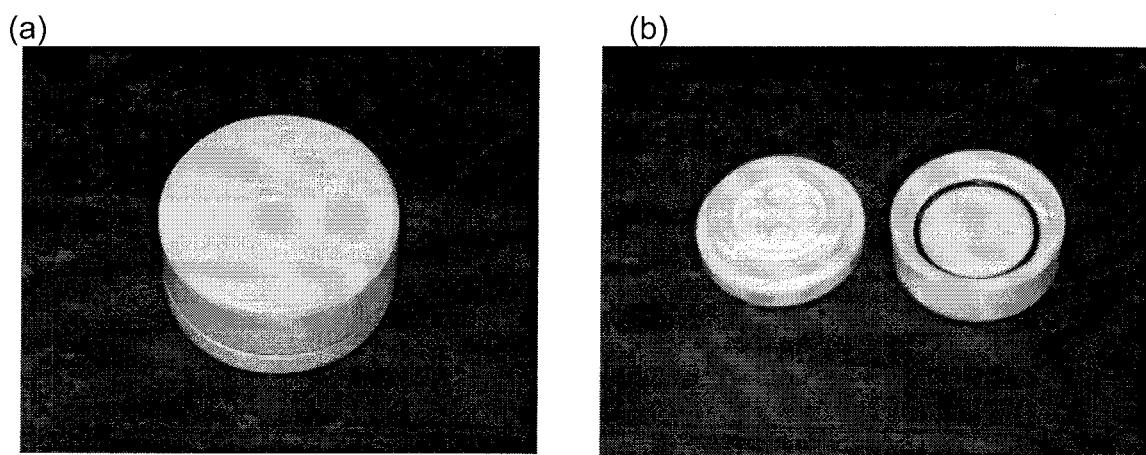


FIGURA 6 – Porta-detectores (a) fechado e (b) aberto.

4.1.2 - Detectores termoluminescentes

4.1.2.1 - LiF:Mg,Ti

Para compor um dos dosímetros ambientais, foram utilizados detectores TL de fluoreto de lítio ativado com magnésio e titânio (LiF:Mg,Ti) (figura 7a), também chamados de TLD-100, fabricados pela Harshaw Chemical Company em forma de pastilha com dimensões de 3 mm x 3 mm x 1 mm (Harshaw,1982). As principais características do TLD-100 estão na tabela 4.

TABELA 4 - Características do LiF:Mg,Ti.

Densidade (g/cm^3)	2,64
Número atômico efetivo para absorção fotoelétrica	8,2
Espectro de emissão termoluminescente	3500 a 6000 Å (emissão máxima em 4000 Å)
Temperatura em que ocorre o principal pico de emissão termoluminescente (dependente da taxa de aquecimento)	195°C
Dependência energética (30 keV/ ^{60}Co)	1,3
Faixa de dose	10^{-5} mGy até 10^3 Gy
Desvanecimento	5% ao ano

Fonte: Maurício,1993.

4.1.2.2 - CaSO₄:Dy

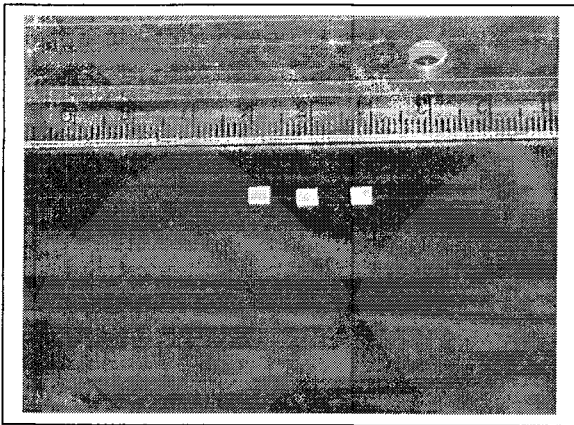
O outro tipo de dosímetro ambiental foi composto utilizando detectores TL de sulfato de cálcio ativado com disprósio (CaSO₄:Dy) (figura 7b), fabricados pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, em São Paulo em forma de pastilhas sinterizadas em teflon, com espessura de 0,80 mm e diâmetro de 6,0 mm. (CAMPOS et al., 1987). As principais características do CaSO₄:Dy são encontradas na tabela 5.

TABELA 5 - Características do CaSO₄:Dy.

Densidade (g/cm ³)	2,61
Número atômico efetivo para absorção fotoelétrica	15,6
Picos de emissão termoluminescente	4780 Å e 5710 Å
Temperatura em que ocorre o principal pico de emissão termoluminescente (dependente da taxa de aquecimento)	220 °C
Dependência energética (30 keV/ ⁶⁰ Co)	11
Faixa de Dose	10 ⁻⁵ mGy a 10 ³ Gy
Desvanecimento	6% em 6 meses

Fonte: Maurício,1993.

(a)



(b)

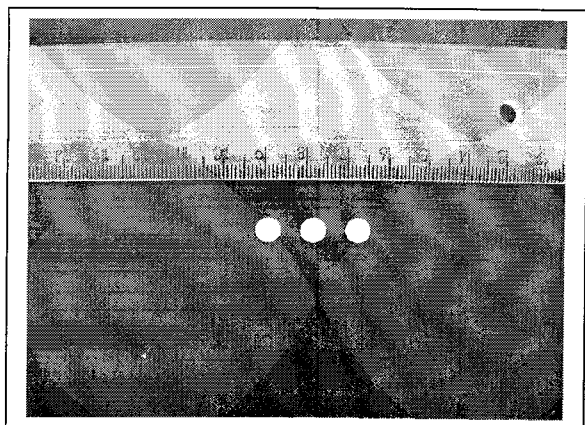


FIGURA 7 – Detectores TL (a) de LiF:Mg,Ti e (b) de CaSO₄:Dy.

4.1.3 - Tratamento térmico

Para eliminar os sinais residuais, os detectores TL de LiF:Mg,Ti e os de CaSO₄:Dy foram sempre submetidos a um tratamento térmico antes da irradiação. Os detectores foram, também, submetidos a um tratamento térmico antes da leitura para eliminar os picos de baixa temperatura criados após a irradiação.

Tanto os detectores de LiF:Mg,Ti como os de CaSO₄:Dy foram colocados em bandejas de alumínio, com aproximadamente 2 mm de espessura, que comportam até 47 detectores cada uma. O resfriamento dos detectores TL foi feito à temperatura ambiente com a bandeja mantida sobre a bancada.

Para a realização dos tratamentos térmicos dos detectores TL de LiF:Mg,Ti, foram utilizados um forno M.Blue M.Eletric Company, modelo M10A (figura 8) e uma estufa da marca FANEM LTDA (figura 9). O tratamento térmico no forno, antes da irradiação, foi de 400°C durante 1 hora, seguido de um tratamento na estufa a 100°C por 2 horas. O tratamento térmico antes da leitura foi de 100°C por 10 minutos na estufa, conforme adotado internacionalmente (SHANI, 1991).

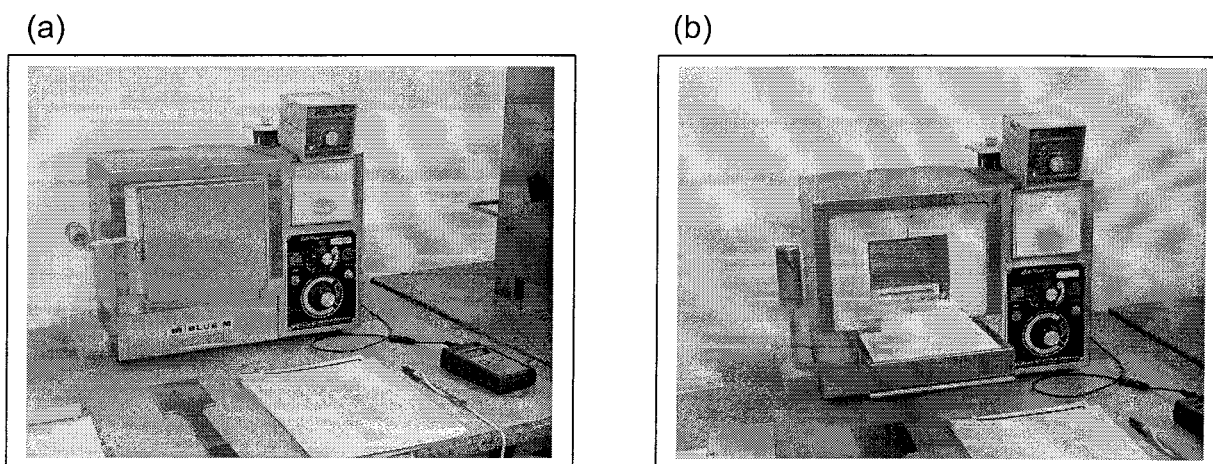


FIGURA 8 – Forno utilizado para tratamento térmico dos detectores de LiF:Mg,Ti.

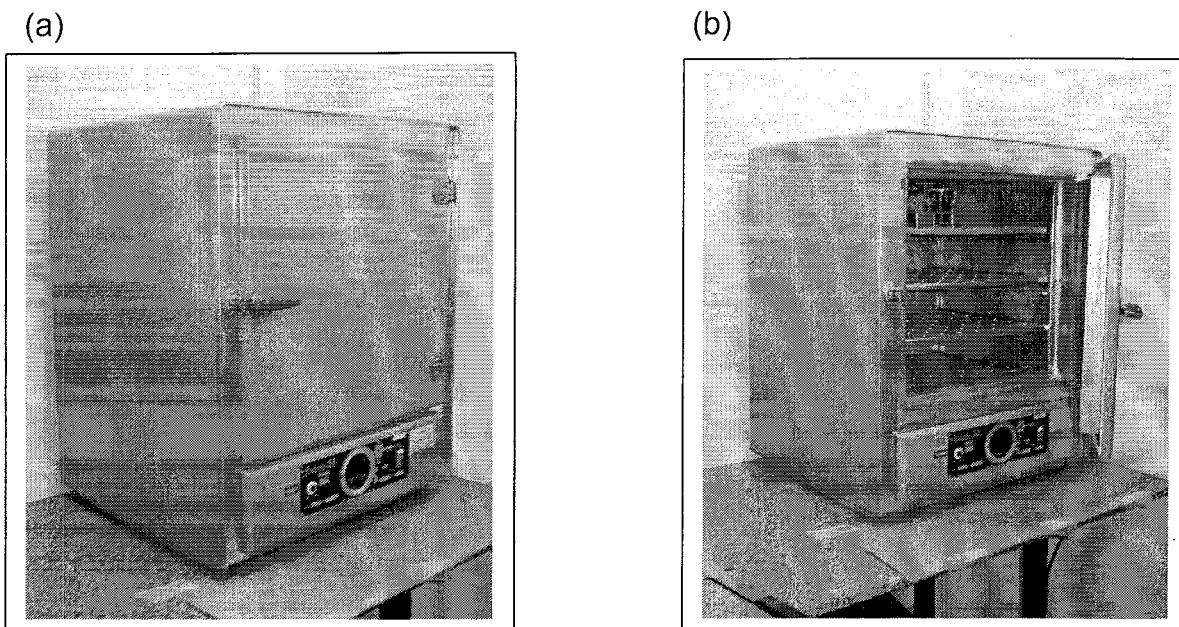


FIGURA 9 – Estufa utilizada para tratamento térmico dos detectores de LiF:Mg,Ti.

O tratamento térmico dos detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ foi realizado em um forno da marca Lavoisier, modelo 402 D (figura 10). O tratamento térmico, antes da irradiação, foi de 300°C durante 15 minutos e o tratamento térmico antes da leitura foi realizado na própria leitora TL (Campos et al., 1994).

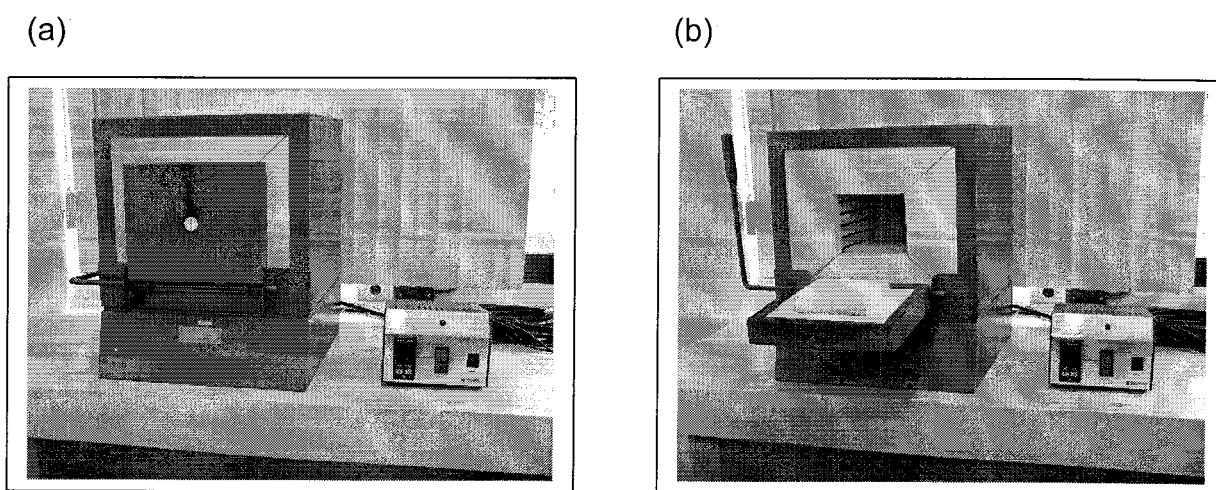


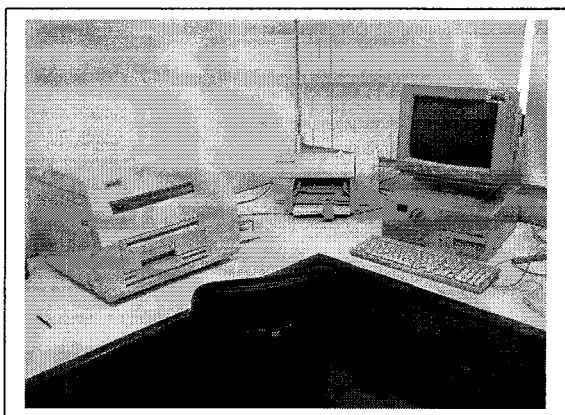
FIGURA 10 - Forno utilizado para tratamento térmico dos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

4.1.4 - Leitura dos detectores termoluminescentes

Para a realização das leituras dos detectores TL, foi utilizado um sistema de leitura termoluminescente composto por uma leitora Harshaw, modelo 4500, acoplada a um micro computador e um software denominado TLD-REMS (Radiation Evaluation and Management System) da Harshaw (figura 11). As leituras, dadas em termos de carga elétrica em coulombs (C), foram feitas no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do CDTN.

A leitora foi sempre ligada, no mínimo, vinte minutos antes que qualquer medida fosse realizada, para que houvesse a estabilização da máquina e redução do ruído de fundo (BICRON NE, 1998). Durante a leitura, um fluxo de nitrogênio foi mantido ao redor do detector TL no sentido de eliminar os sinais espúrios não provenientes dos detectores TL.

(a)



(b)

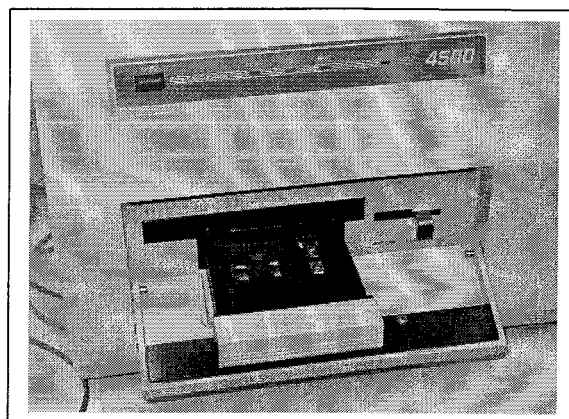


FIGURA 11 – Sistema de leitura termoluminescente (a) e detalhe da leitora de TLD Harshaw, modelo 4500, com a gaveta aberta (b).

Antes de ser iniciada a leitura, a leitora foi ajustada, através do software TLD-REMS, para produzir um ciclo de aquecimento de sua bandeja, ou seja, para que houvesse uma configuração do TTP (perfil de tempo e temperatura), para cada tipo de detector TL.

Para os detetores TL de LiF:Mg,Ti foi utilizado o seguinte TTP:

- Pré-aquecimento rápido: 50°C
- Tempo do pré-aquecimento rápido: 0 s
- Taxa de aquecimento linear: 10°C/s
- Temperatura máxima: 290°C
- Tempo de integração da leitura: 30 s
- Temperatura de recozimento: 300°C

Para os detectores TL de CaSO₄:Dy foi utilizado o TTP seguinte:

- Pré-aquecimento rápido: 150°C
- Tempo do pré-aquecimento rápido: 10 s
- Taxa de aquecimento linear: 12°C/s
- Temperatura máxima: 300°C
- Tempo de integração da leitura: 23+1/3 s
- Temperatura de recozimento: 300°C

Simultaneamente às leituras dos dosímetros TL foram obtidas as curvas de emissão, que representam o comportamento dos dosímetros de acordo com os ciclos de aquecimento da leitora (TTP) configurados para cada tipo de detector TL. Exemplo de curva de emissão é apresentado na figura 12.

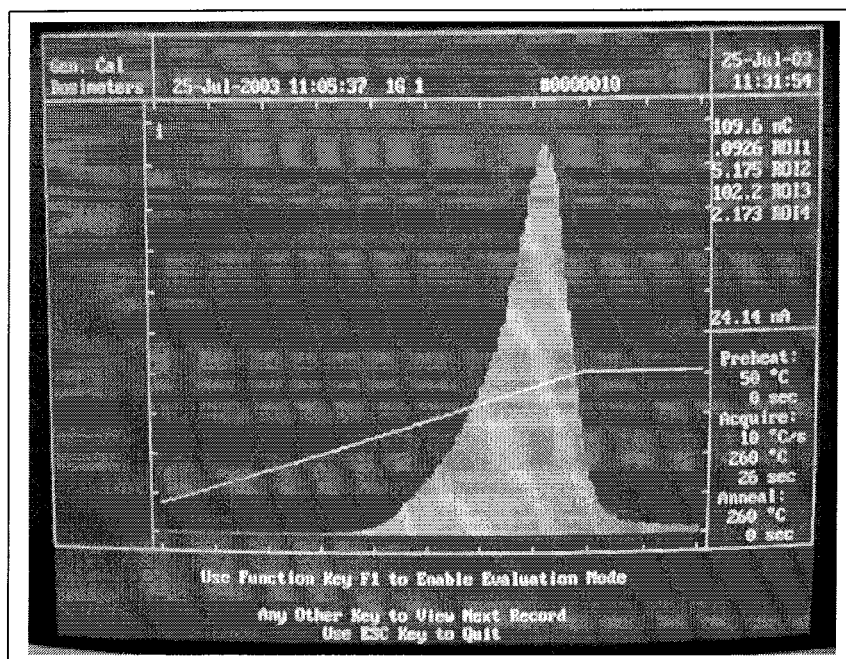


FIGURA 12 – Curva de emissão de um material termoluminescente (LiF:Mg,Ti).

4.1.4.1 – Controle de qualidade do sistema de leitura TL

Para garantir a boa qualidade das leituras, foram adotadas as seguintes medidas de controle: acompanhamento do ruído e da luz de referência da leitora através do software TLD-REMS, verificação da estabilidade do sistema de leitura através da realização de leituras dos dosímetros de controle e leitura dos dosímetros brancos para medida da radiação de fundo.

4.1.4.1.1 – Ruído

O software TLD-REMS foi configurado para que fosse possível a obtenção dos valores do ruído e da luz de referência a cada 20 leituras realizadas dos detectores TL.

A leitura do ruído foi feita seguindo o procedimento normal de leitura do detector TL, mas com a bandeja sem o detector e sem nenhuma fonte de luz sob

a fotomultiplicadora. O objetivo foi medir o ruído eletrônico (dark current) e verificar se havia alguma entrada de luz no sistema.

4.1.4.1.2. – Intensidade da luz de referência

A leitura da intensidade da luz de referência foi feita com a gaveta da leitora fechada e com a bandeja vazia e suas medidas foram obtidas através da leitura de uma fonte de luz eletrônica, representada por um LED, localizada no interior da fotomultiplicadora. Este teste serviu para verificar se o comportamento da leitora estava se mantendo constante.

4.1.4.1.3 – Leitura dos dosímetros de controle

A leitura dos dosímetros de controle consistiu em irradiar e ler um grupo de 3 dosímetros, com 3 detectores cada, irradiados sempre com 5 mGy de kerma no ar, todas as vezes antes de se iniciar a leitura de um novo grupo de dosímetros. Este teste serviu para verificar a estabilidade do sistema.

4.1.4.1.4 – Leitura dos dosímetros brancos

Para cada grupo de dosímetros TL que foi submetido à irradiação, foram preparados dosímetros TL não irradiados e armazenados em laboratório, com ausência de irradiação, para serem lidos junto aos dosímetros irradiados. A média das leituras destes dosímetros (chamados brancos) representava a radiação de fundo e foram subtraídas das médias das leituras dos dosímetros irradiados, obtendo-se, assim, os valores de leituras corrigidas.

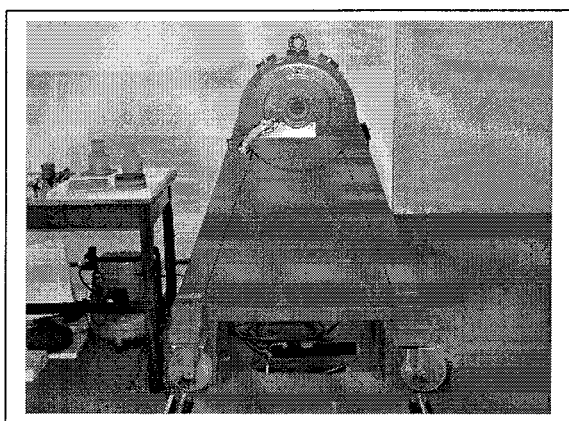
4.2 - Levantamento das características dos detectores TL

4.2.1 – Irradiação em feixes de radiação gama e X

4.2.1.1 - Irradiação dos detectores e dos dosímetros TL em feixes de radiação gama

Para a realização dos testes em feixes de radiação gama, foi utilizado o irradiador gama STS Steuerungstechnik & Strahlenschutz GmbH, modelo OB85 apresentado na figura 13a, localizado no Laboratório de Calibração de Dosímetros (LCD) do CDTN.

(a)



(b)

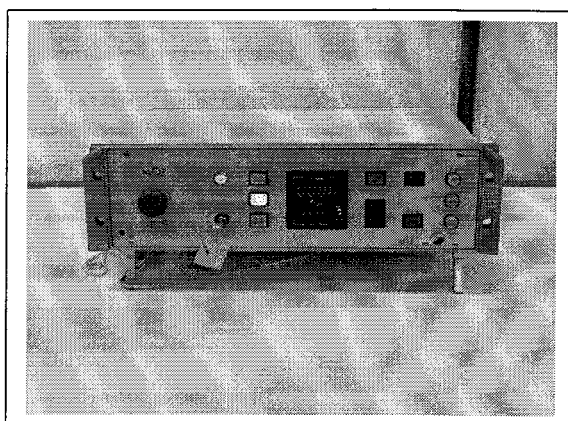


FIGURA 13 – Irradiador gama STS OB85/3 (a) e unidade de controle do irradiador (timer) (b).

O irradiador consiste basicamente, de uma blindagem cilíndrica de chumbo, contendo três fontes de radiação (^{137}Cs , ^{60}Co e ^{241}Am), com as seguintes atividades nominais:

- ^{137}Cs : 740 GBq em 29/10/1997;
- ^{60}Co : 37 GBq em 06/11/1997;
- ^{241}Am : 7,4 GBq em 21/07/1997.

O processo de irradiação é controlado por uma unidade de controle que permite estabelecer o tempo de irradiação através de um timer, conforme figura 13b.

Para os testes de homogeneidade e reprodutibilidade, os detectores TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy, após passarem pelos devidos tratamentos térmicos, foram colocados em suportes de PVC com tampas de acrílico, conforme figuras 14 e 15, e expostos no campo de radiação gama do ¹³⁷Cs com 48 cm de diâmetro, a uma distância de 1,5 m. A tampa do suporte que abrigou os detectores de CaSO₄:Dy foi pintada de preto para que fosse evitada a influência da luminosidade nos detectores.

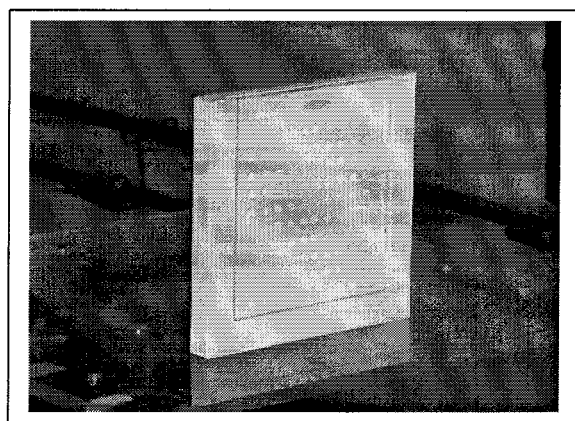


FIGURA 14 – Suporte de PVC para irradiação dos detectores de LiF:Mg,Ti durante a fase de seleção do lote.

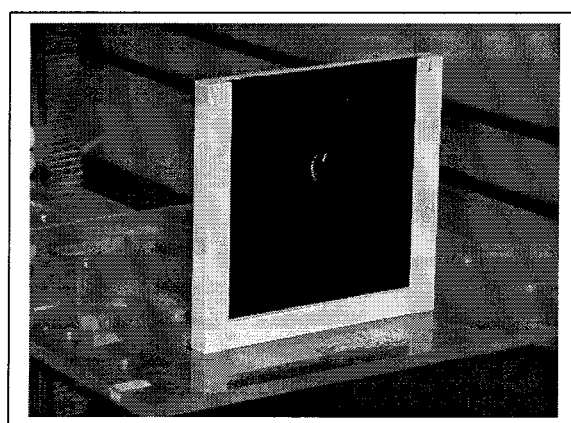


FIGURA 15 - Suporte de PVC para irradiação dos detectores de CaSO₄:Dy durante a fase de seleção do lote.

Para os testes de calibração e dependência energética, os detectores TL foram colocados no porta-detectores, descrito no item 3.1.1, e expostos nos campos de radiação do ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co a uma distância não inferior a 1,5 m, em

condições de equilíbrio eletrônico (placa de acrílico de 2 mm para ^{137}Cs e 4 mm para o ^{60}Co colocada na frente dos dosímetros durante a irradiação).

Os coeficientes de conversão [$h^*_\kappa(10,S)$], utilizados para transformar kerma no ar, K_a , em equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$, conforme descrito no item 2.4.2, para radiações de referência de radionuclídeos (S) dadas pela ISO 4037-1, são mostrados na tabela 6, que informa as radiações de referência, o intervalo das distâncias permitido, a espessura da placa utilizada para que o equilíbrio eletrônico (build-up) ocorra e os coeficientes de conversão [$h^*_\kappa(10,S)$].

TABELA 6 – Parâmetros para conversão de kerma no ar, K_a , para $H^*(10)$, para radiações de referência de radionuclídeos (S).

<i>Radiações de referência</i>	<i>Distância de irradiação</i> (m)	<i>Espessura da placa de</i> <i>equilíbrio eletrônico</i> (mm)	<i>$h^*_\kappa(10,S)$</i> (Sv/Gy)
S-Cs	1,0 – 3,0	2	1,20
S-Co	1,0 – 3,0	4	1,16

Fonte: ISO, 1997.

4.2.1.2 - Irradiação dos dosímetros TL em feixes de raios X

As irradiações em raios X convencional, para testes de dependência energética, foram realizadas nas instalações do Laboratório de Metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN/Recife utilizando-se o aparelho de raios X Pantak de 160 kV. Os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ foram irradiados em 5 qualidades de energias diferentes e para cada energia foram irradiados 10 dosímetros, 5 de cada tipo, juntos no ar, presos a um suporte semelhante a uma raquete de tênis (Soares, 2003). As características dos campos de raios X e as condições de irradiação são mostradas nas tabelas 7 e 8.

TABELA 7 - Características dos campos de raios X, da série ISO de espectro estreito (N) utilizados para verificar a dependência dos detectores TL com a energia da radiação.

Qualidade	Tensão do tubo	Energia média	Filtração adicional (mm)			
	(kV)	(keV)	Pb	Sn	Cu	Al
N-30	30	24				4,0
N-40	40	33			0,21	
N-60	60	48			0,6	
N-80	80	65			2,0	
N-100	100	83			5,0	

Fonte: ISO, 1996

OBS: A filtração total foi ajustada para 4 mm de Al (ISO 4037-1, 1993).

TABELA 8 - Condições de irradiação dos dosímetros TL, para teste de dependência energética.

Qualidade	Kerma (mGy)	Distância (m)	Tamanho do campo (diâmetro) (cm)
N-30, N-40, N-60, N-80, N100	2,0	3,4	43

Fonte: Soares, 2003

As irradiações em raios X convencional, para testes de dependência angular, foram realizadas nas instalações do LCD do CDTN, utilizando o aparelho de raios X modelo VMI Pulsar 800 Plus (figura 16).

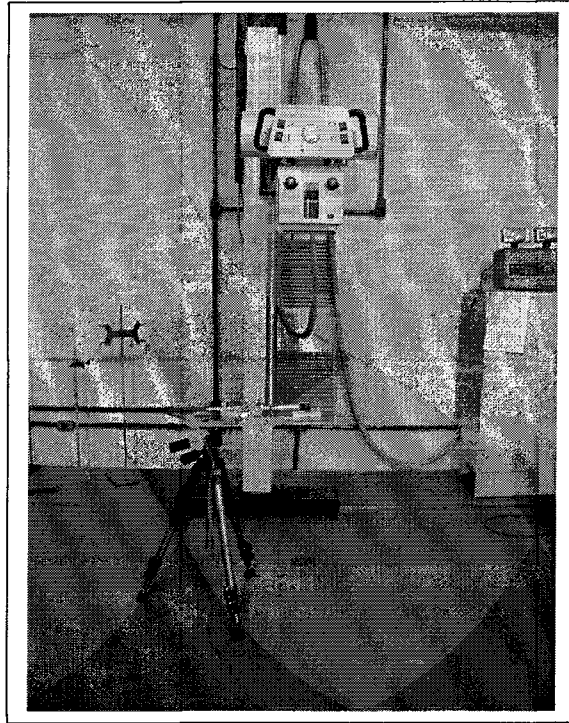


FIGURA 16 – Aparelho de raios X , modelo VMI Pulsar 800 Plus.

Os dosímetros foram testados com ângulos de incidência, em relação à normal, de 0° , 15° , 30° , 45° e 60° , em uma energia próxima de 60 keV, de acordo com o Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa, CASMIE, (CASMIE, 1995). Para cada ângulo foram irradiados quatro dosímetros, separadamente, sendo dois de LiF:Mg,Ti e dois de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, presos a um suporte de acrílico, conforme figura 17. As características do campo de raios X e as condições de irradiação são mostradas nas tabelas 9 e 10.

TABELA 9 - Características do campo de raios X, da série ISO de espectro largo (W) utilizados para verificar a dependência dos detectores TL com o ângulo da radiação.

Qualidade	Tensão	Energia	Filtração adicional (mm)	
	do tubo (kV)	média (keV)	Tin	Cu
W-80	80	57		0,5

Fonte: ISO, 1996.

OBS: A filtração total foi ajustada para 4 mm de Al (ISO 4037-1, 1996).

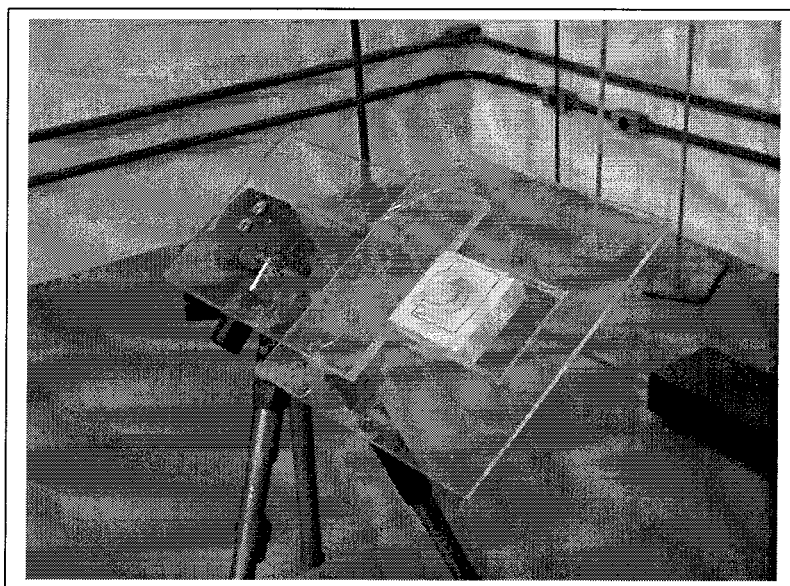


FIGURA 17 – Geometria de irradiação do dosímetro para teste de dependência angular.

TABELA 10 – Condições de irradiação dos dosímetros TL para teste de dependência angular.

Qualidade	Kerma no ar (mGy)	Distância (mm)	Tamanho do campo (mm x mm)
W-80	1,1	850	90x90

Os coeficientes de conversão [$h^*_K(10,N)$], utilizados para transformar kerma no ar, K_a , em equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$, conforme descrito no item 2.4.2, para radiações de referência da série estreita (N) produzidas pela ISO 4037-1, são mostrados na tabela 11, que informa as radiações de referência, o intervalo das distâncias permitido e os coeficientes de conversão [$h^*_K(10,N)$].

TABELA 11 - Parâmetros para conversão de kerma no ar, K_a , para $H^*(10)$, para radiações de referência da série estreita (N).

<i>Radiações de referência</i>	<i>Distância de irradiação</i> (m)	<i>$h^*_K(10,N)$</i> (Sv/Gy)
N-30	1,0 – 2,0	0,80
N-40	1,0 – 3,0	1,18
N-60	1,0 – 3,0	1,59
N-80	1,0 – 3,0	1,73
N-100	1,0 – 3,0	1,71

Fonte: ISO, 1997.

4.2.2 - Integridade física dos detectores TL (seleção visual)

Este estudo é extremamente importante pois a integridade física reflete em dois itens fundamentais: a qualidade da resposta durante a leitura após a irradiação e a duração dos detectores TL, que é importante para a preservação do lote já definido. Portanto, o manuseio dos detectores TL foi realizado com o uso de uma pinça a vácuo, evitando a utilização de pinça metálica e nunca manuseando os detectores com a mão.

Dois lotes iniciais, o primeiro de 220 de detectores TL de LiF:Mg,Ti , e o segundo de 100 detectores TL de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, passaram por uma rigorosa seleção visual tanto a olho nu como também através do uso de uma lupa eletrônica para eliminar todos os detectores que possuíam algum tipo de defeito como ranhuras, rachaduras, etc. Após o processo, foram selecionados 189 detectores TL de LiF:Mg,Ti e 94 detectores TL de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$.

4.2.3 – Homogeneidade do lote dos detectores TL

Este teste consiste em assegurar a uniformidade de sensibilidade dos detectores dentro de um mesmo lote.

O lote de 189 detectores TL de LiF:Mg,Ti e o lote de 94 detectores TL de CaSO₄:Dy foram submetidos a 5 séries de irradiação, em campo de radiação gama do ¹³⁷Cs, com 5 mGy de kerma no ar. Obtidas as medidas, foram calculados os valores médios e os respectivos desvios padrões das leituras de cada detector TL.

A homogeneidade dos lotes de detectores TL foi calculada e analisada segundo o critério do Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa, CASMIE (CASMIE, 1995):

$$F_h = \frac{\bar{M}_{j\text{máx}} - \bar{M}_{j\text{mín}}}{\bar{M}_{j\text{mín}}}$$

onde, F_h é o fator de homogeneidade $\bar{M}_{j\text{máx}}$ e $\bar{M}_{j\text{mín}}$ são respectivamente o valor médio máximo e o valor médio mínimo das leituras avaliadas.

Para o CASMIE (CASMIE, 1995) o valor de F_h máximo aceitável é de 0,30.

Após definido o lote em relação à homogeneidade, foram calculados os fatores de sensibilidade através da razão entre o valor médio das leituras de todos os detectores TL e a média das leituras de cada detector.

4.2.4 – Reprodutibilidade dos detectores TL

Este teste tem como objetivo assegurar que o detector apresente a mesma resposta para uma mesma dose, dentro de limites aceitáveis.

O procedimento adotado para homogeneidade (item 3.2.3) foi utilizado para obter os dados da reprodutibilidade dos lotes de detectores TL e segundo o

critério do CASMIE (CASMIE, 1995), a reprodutibilidade foi analisada pela equação abaixo:

$$F_r = \frac{s_j + I_j}{\bar{A}}$$

onde F_r é o fator de reprodutibilidade, s_j é o desvio padrão das medidas obtidas pelo detector TL, I_j é o intervalo de confiança e \bar{A} é o valor médio das medidas obtidas.

Onde,

$$I_j = \frac{t_{n_i} \times s_i}{\sqrt{n_i}}$$

onde n_i é o número de séries de irradiação e t_{n_i} é o t de Student para n_i medidas e um nível de confiança de 95%.

Para o CASMIE (CASMIE,1995) o valor de F_r máximo aceitável é de 7,5%.

4.3 - Calibração dos dosímetros TL

O dosímetro ambiental é um conjunto formado por um porta-detector e detectores TL dispostos dentro dele.

4.3.1 – Calibração em fonte de ^{60}Co

A calibração dos dosímetros ambientais, um contendo detectores TL de LiF:Mg,Ti e o outro de CaSO₄:Dy, em termos do equivalente de dose ambiente, H*(10), em um campo de radiação gama de ^{60}Co , seguiu os seguintes passos:

4.3.1.1 - Para a calibração do dosímetro TL de LiF:Mg,Ti, foram retirados aleatoriamente 21 detectores TL do lote selecionado e foram montados 7

dosímetros com 3 detectores TL cada. Dos 7 dosímetros, 5 foram irradiados no ar, com o valor verdadeiro convencional de 5 mGy de kerma no ar, em condições de equilíbrio eletrônico (foi colocada placa de acrílico de 4 mm de espessura na frente dos dosímetros), no campo de radiação gama de ^{60}Co , a uma distância de 2 m, enquanto que 2 dosímetros, que não foram irradiados, serviram como brancos.

4.3.1.2 - Para a calibração do dosímetro TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foram retirados aleatoriamente 21 do lote selecionado de 94 detectores e foram montados 7 dosímetros com 3 detectores TL cada, dos quais 5 foram irradiados nas mesmas condições dos dosímetros descritas no item 4.3.1.1 e dois dosímetros foram utilizados como brancos.

4.3.1.3 - Tanto para os dosímetros com $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ quanto para os com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foram feitas as leituras dos detectores TL irradiados, seguindo os procedimentos dos ciclos de tratamento térmico e leitura descritos nos item 4.1.3 e 4.1.4. Para cada dosímetro, foram obtidas as leituras de 3 detectores e sua média, para então ser calculado o valor médio entre todos os dosímetros.

4.3.1.4 - A leitura dos dosímetros denominados brancos foi obtida a partir da média de todos os detectores.

4.3.1.5 - Para obtenção dos valores médios corrigidos dos dosímetros de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, subtraiu-se o valor médio obtido com os brancos do valor médio obtido com os dosímetros irradiados

4.3.1.6 - O valor da grandeza de interesse, $H^*(10)$, foi obtido a partir do valor verdadeiro convencional de kerma no ar, multiplicado pelo coeficiente de conversão da tabela 6

4.3.1.7 - Os fatores de calibração (N_c) dos dosímetros de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ e de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, com as respectivas incertezas, foram calculados dividindo-se o valor verdadeiro convencional de $H^*(10)$ pelos valores médios corrigidos de cada tipo de dosímetro.

4.3.2 – Calibração em fonte de ^{137}Cs

A calibração dos dosímetros ambientais, um contendo detectores TL de LiF:Mg,Ti e o outro de CaSO₄:Dy, em termos do equivalente de dose ambiente, H*(10), em um campo de radiação gama de ^{137}Cs , foi semelhante à calibração para ^{60}Co , com as seguintes alterações:

- número de detectores TL de LiF:Mg,Ti utilizados: 36;
- número de dosímetros de LiF:Mg,Ti irradiados: 10;
- condição de equilíbrio eletrônico para os dois tipos de dosímetros: placa de acrílico de 2 mm de espessura;
- distância de irradiação: 1,5 m

4.4 – Caracterização dos dosímetros TL

Com o objetivo de estudar e conhecer algumas das características dos dosímetros TL com LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy, foram feitos os testes relacionados abaixo:

4.4.1 – Reprodutibilidade dos dosímetros TL

Este teste tem como objetivo assegurar que o detector apresente a mesma resposta para uma mesma dose, dentro de limites aceitáveis e o procedimento é similar ao item 4.2.4.

4.4.2 - Limite inferior de detecção

Este teste consiste em assegurar que o requisito mínimo de detecção referente ao limite inferior do intervalo de medida dos dosímetros é alcançado (CASMIE, 1995).

Para os dois tipos de dosímetros, foram retirados, aleatoriamente, 30 detectores TL, de cada tipo, dos lotes selecionados. Os detectores passaram pelos processos de tratamento térmico e leitura descritos no itens 4.1.3. e 4.1.4.

Durante as leituras dos detectores TL foram feitas 4 leituras de ruído de fundo da leitora e calculada a média destas leituras. Os valores das leituras corrigidas foram calculadas subtraindo-se a média das leituras de ruído da leitora da média das leituras dos detectores TL.

Segundo o método do CASMIE (CASMIE, 1995), o limite inferior de detecção é calculado através da fórmula:

$$L_d = t_n \cdot s_A$$

onde L_d é o limite inferior de detecção, s_A é o desvio padrão da média e t_n é o t de Student para $n-1$ graus de liberdade (n = número de dosímetros utilizados no teste) e um nível de confiança de 95%.

4.4.3 - Dependência energética

O teste de dependência energética consistiu em determinar o comportamento da resposta dos dosímetros de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy com relação à energia.

Os dosímetros foram irradiados no Laboratório de Metrologia do CRCN em campos de raios X, conforme descrito no item 4.2.1.2, da série ISO de espectro estreito N, e, também, no Laboratório de Calibração de Dosímetros – LCD/CDTN em feixes de radiação gama ¹³⁷Cs, em condições de equilíbrio eletrônico, conforme descrito no item 4.2.1.1. Em todos os casos os dosímetros foram irradiados livres no ar.

4.4.4 – Dependência angular

Este teste tem o objetivo de determinar a resposta do dosímetro TL em relação ao ângulo de incidência dos fótons incidentes (CASMIE, 1995).

As irradiações foram realizadas conforme as condições descritas no item 4.2.1.2.

4.5 – Monitoração ambiental do irradiador gama panorâmico, com câmaras de ionização

Com o intuito de comparar o desempenho dos dosímetros TL, já mencionados, com outros sistemas de medidas, foram utilizadas, também, câmaras de ionização para a realização de medidas nas instalações do Laboratório de Irradiação Gama – LIG.

Como os níveis de radiação nas áreas externas do LIG eram próximas à radiação de fundo (5,22 nSv/min), resolveu-se fazer a monitoração de três pontos ao longo do labirinto (figura 19) construído no interior da sala da fonte, além de alguns pontos na sala de controle do LIG.

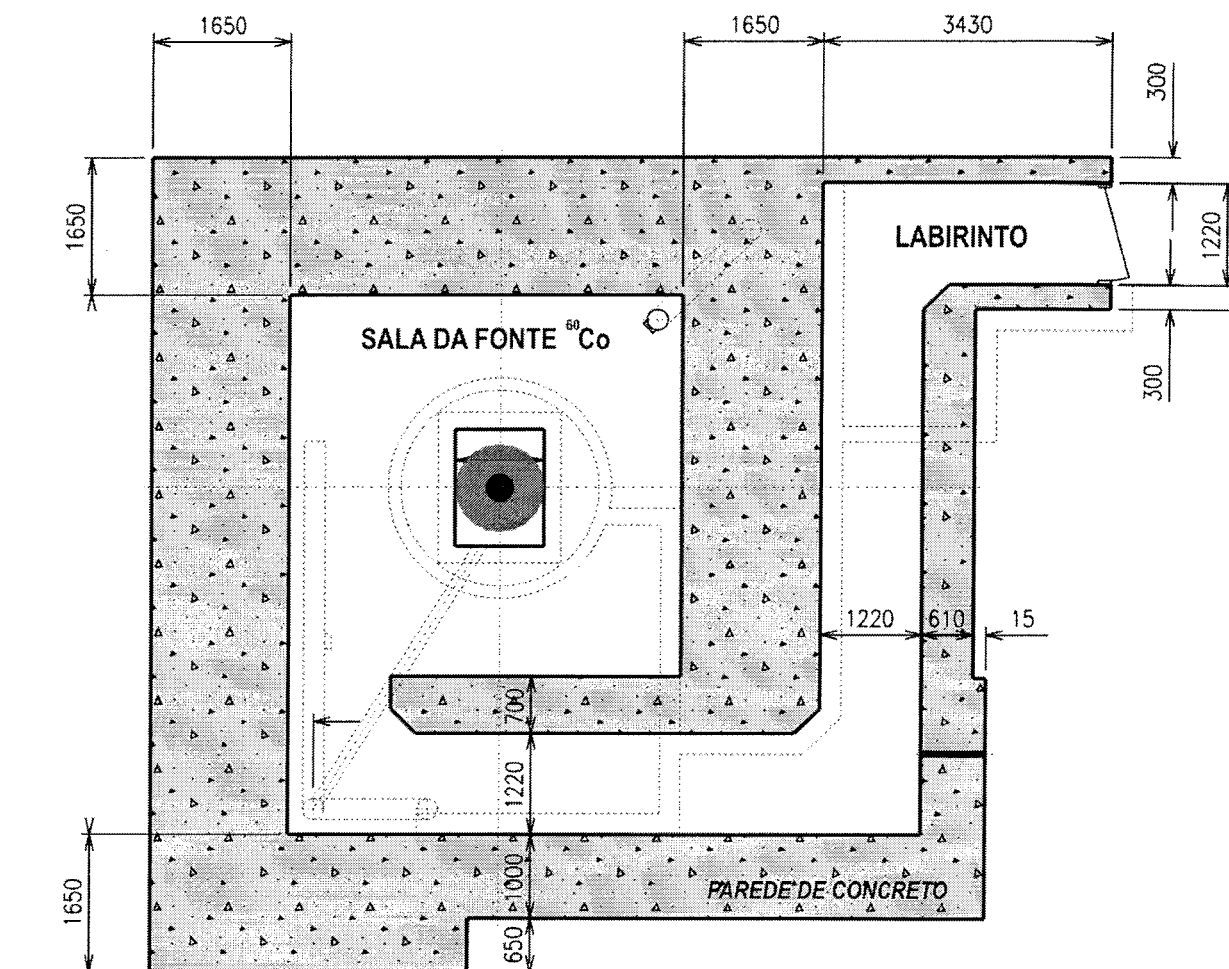
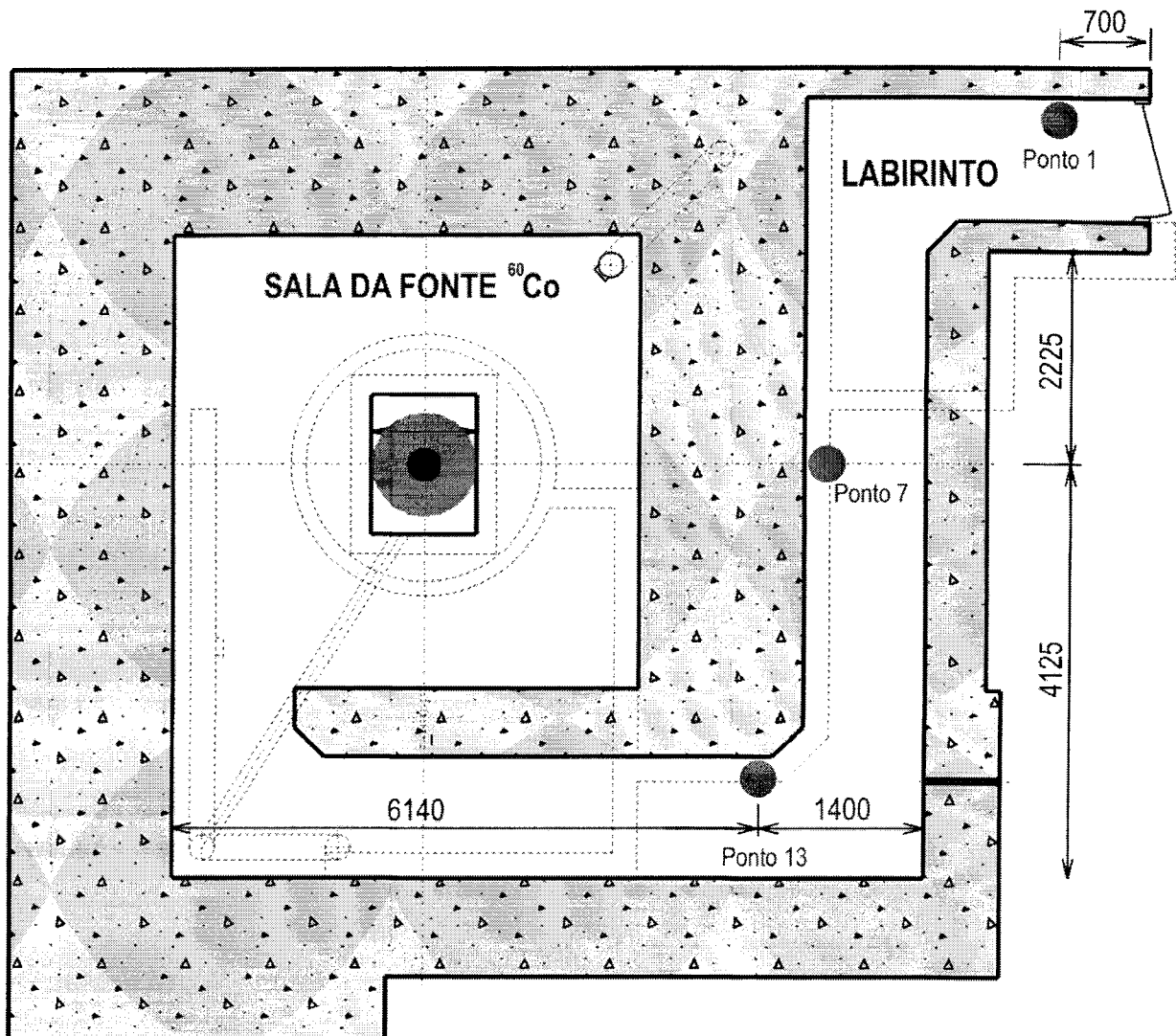


FIGURA 18 – Irradiador gama com destaque para a blindagem da sala da fonte de ^{60}Co .



LEGENDA

- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DAS CÂMARAS DE IONIZAÇÃO

NOTAS:

- 1-Pontos 1, 7 e 13 (H=1,40 m do piso);
- 2-Medidas em milímetros.

FIGURA 19 – Pontos 1, 7 e 13 no labirinto do LIG monitorados pelas câmaras de ionização.

O equipamento completo de monitoração (figura 20) é composto de uma câmara de ionização acoplada a um eletrômetro, modelo 9060, que é ligado a um cabo, modelo 90C5-6, conectado a um controlador de monitoração de radiação,

modelo 9015 e um tripé para posicionamento da câmara. Com exceção do tripé, o equipamento é de fabricação da Radcal Corporation.

Foram utilizados três modelos diferentes de câmaras de ionização:

- câmara de 6 cm³, modelo 10X5-6 e número de série (S/N)15266 (figura 21);
- câmara de 180 cm³, modelo 10X5-180 e S/N 7172 (figura 22);
- câmara de 1800 cm³, modelo 10X5-1800 e S/N 9866 (figura 23).

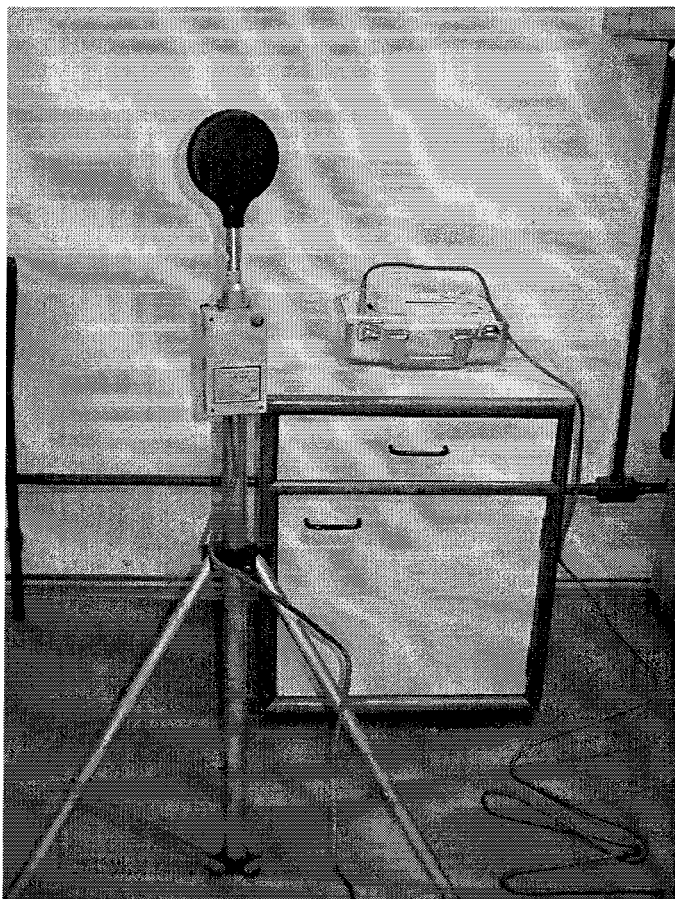


FIGURA 20 – Equipamento completo de monitoração composto pela câmara de ionização, eletrômetro, cabo e unidade de controle.

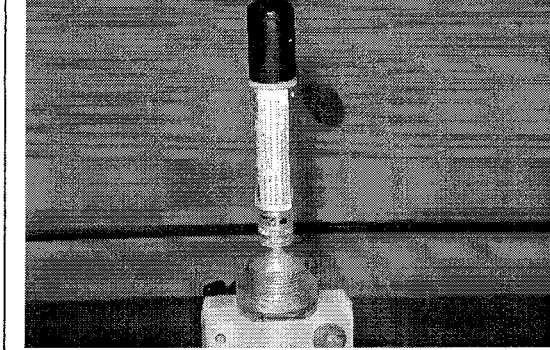


FIGURA 21 – Câmara de ionização de 6 cm^3 .

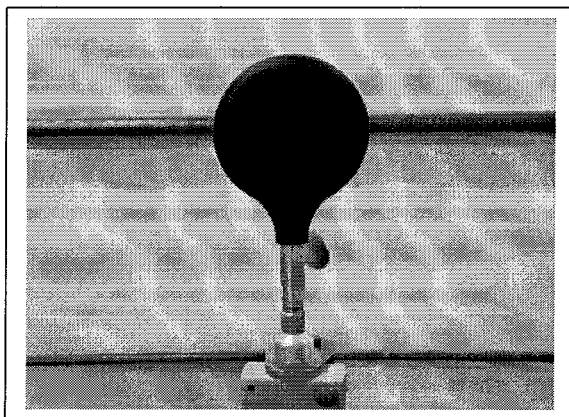


FIGURA 22 – Câmara de ionização de 180 cm^3 .

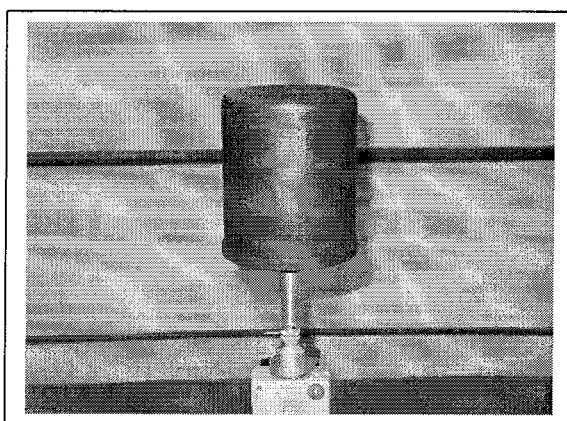


FIGURA 23 – Câmara de ionização de 1800 cm^3 .

Para a determinação dos fatores de calibração (N_c) das câmaras de ionização para transformar as leituras obtidas em mGy/h para o equivalente de dose ambiente, $H^*(10)$, foram adotados os seguintes passos:

a) primeiramente, foi realizada a verificação da dosimetria do feixe de radiação gama da fonte de ^{60}Co do irradiador STS, no Laboratório de Calibração do CDTN, utilizando-se a câmara de ionização padrão, modelo PTW – LS1, S/N M 32002-022, conforme figura 24, rastreável e devidamente certificada pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, LNMRI.

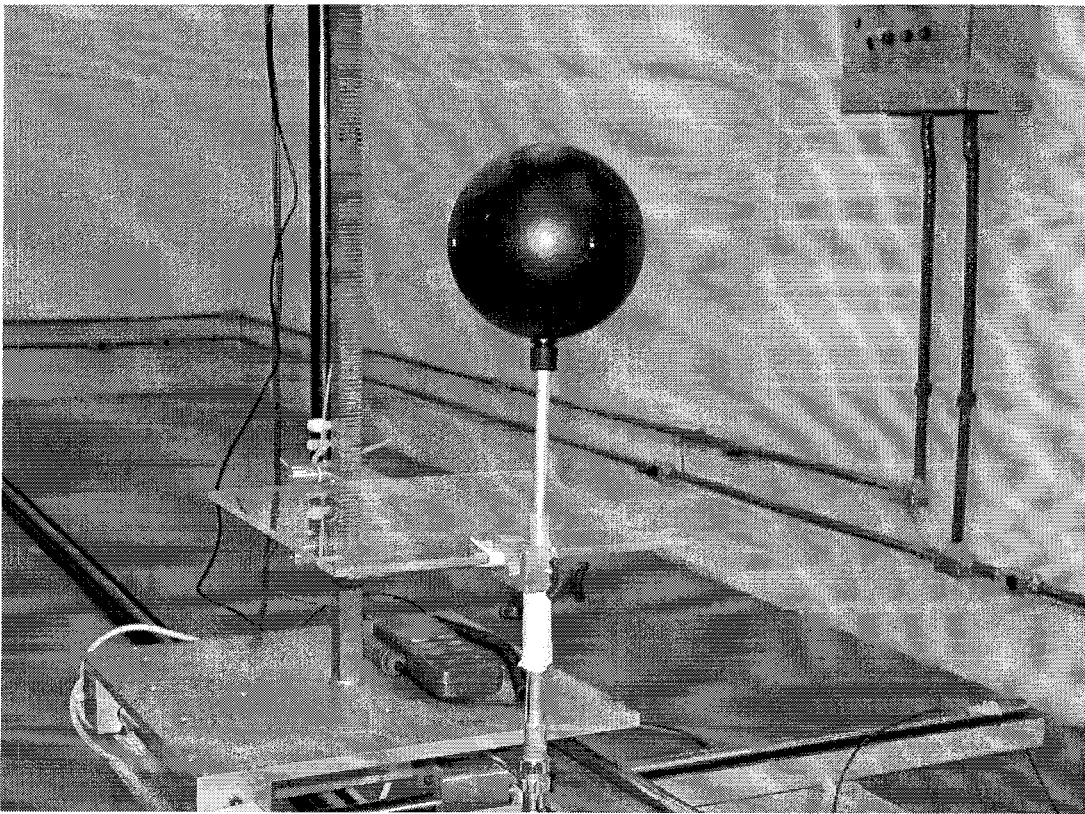


FIGURA 24 - Câmara de ionização padrão, de 1 litro, modelo PTW – LS1.

b) Para determinar o valor verdadeiro convencional, em termos de $H^*(10)$, no ponto de interesse, multiplicou-se o valor de kerma obtido naquele

ponto com a câmara pelo correspondente coeficiente de conversão, 1,16 mSv/mGy, conforme descrito no item 4.2.1.1.

c) A seguir, foram realizadas 5 séries de irradiação (na condição de equilíbrio eletrônico) em cada uma das 3 câmaras (6, 180 e 1800 cm³), no feixe de ⁶⁰Co, a uma distância de 2 m e tempo de 300 s, obtendo-se o valor de leitura média para cada câmara, em mGy/h (estas leituras já estavam corrigidas automaticamente para a temperatura de 20°C e pressão de 101.3 kPa).

d) Os fatores de calibração (N_c) das câmaras foram obtidos, dividindo-se o valor verdadeiro convencional, $H^*(10)$, pelo valor de leitura média encontrada em cada câmara.

Segundo o fabricante (Radcal Corporation, 1994) as câmaras de ionização (item 3.5) de 6, 180 e 1800 cm³, possuem uma dependência energética de $\pm 5\%$ na faixa de energia de 30 keV até 1,33 MeV.

4.5.1 – Monitoração em três pontos do labirinto

Considerando a demanda de serviços de irradiação no LIG e o tempo necessário para a realização das medidas com as câmaras de ionização, escolheu-se apenas três pontos para a dosimetria, a uma única altura de 1,4 m. O ponto 1 na proximidade do acesso ao labirinto, o ponto 7 no meio e o ponto 13 quase no final do labirinto,

Nos pontos 1 e 7 (figura 19), foram utilizadas as câmaras de ionização de 6, 180 e 1800 cm³ e realizadas 10 medidas com cada câmara.

No ponto 13 (figura 19), foram utilizadas as câmaras de 6 e 180 cm³ e também foram realizadas 10 medidas com cada câmara. Neste ponto, a câmara de 1800 cm³ não foi utilizada por problemas de saturação da câmara.

4.6 - Monitoração ambiental do irradiador gama com dosímetros TL

No labirinto do LIG, os dosímetros foram distribuídos em 20 pontos, conforme mostrado nas figuras 25 e 26, e cada ponto continha 2 dosímetros TL, um de LiF:Mg,Ti e o outro de CaSO₄:Dy, colocados um ao lado do outro.

Na sala de controle do LIG, os dosímetros foram distribuídos em 12 pontos, conforme mostrado na figura 27, e cada ponto continha 2 dosímetros TL, um de LiF:Mg,Ti e o outro de CaSO₄:Dy, colocados um ao lado do outro.

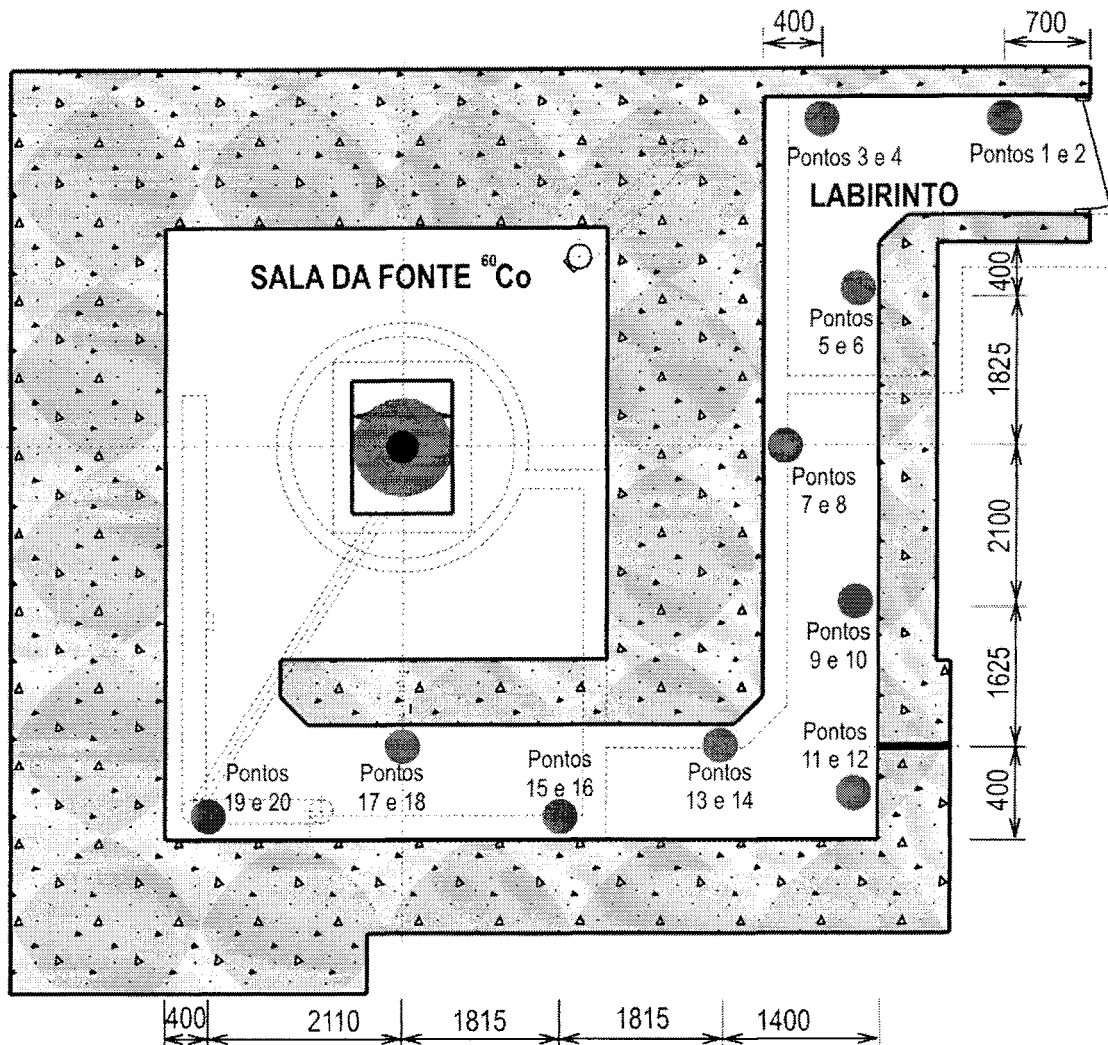
Cada valor de H*(10) é obtido multiplicando-se a leitura obtida com o dosímetro TL pelo fator de calibração do mesmo, determinado para o feixe de ⁶⁰Co.

4.7 – Obtenção de doses calculadas pelo método de Monte Carlo

Os valores teóricos de taxa de dose utilizados neste trabalho para fins de comparação foram obtidos por Batista, Malamut e Grynberg (Batista et al., 2003).

A abordagem escolhida para a realização dos cálculos teóricos no interior do irradiador gama - LIG, tanto na sua sala de irradiação quanto nos corredores que constituem o labirinto, foi a simulação numérica através da técnica de Monte Carlo, optando-se pelo Electron Gama Shower – EGS, versão 4.

Batista e outros obtiveram valores teóricos em vários pontos do labirinto do LIG, com destaque para os pontos 7 e 13, que serviram de comparação com os valores obtidos pelos demais sistemas de medida utilizados neste trabalho.



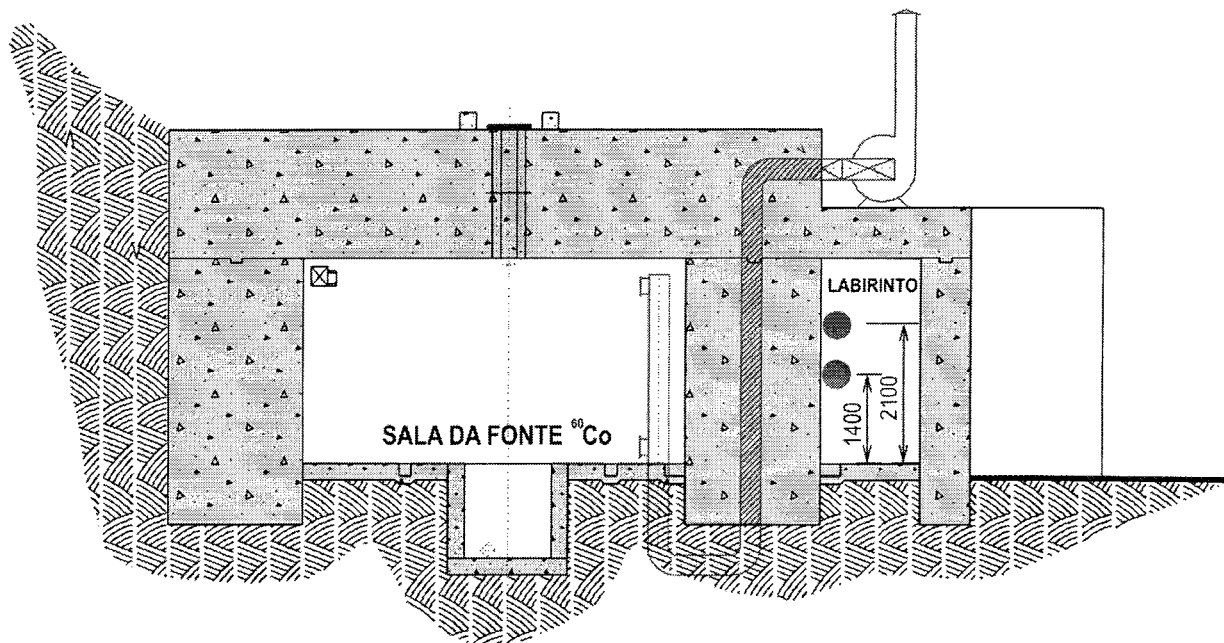
LEGENDA

- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DOS DOSÍMETROS TL

NOTAS:

- 1-Pontos 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 e 19 (H=1,40 m do piso);
- 2-Pontos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 (H=2,10 m do piso);
- 3-Medidas em milímetros.

FIGURA 25 – Localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG.



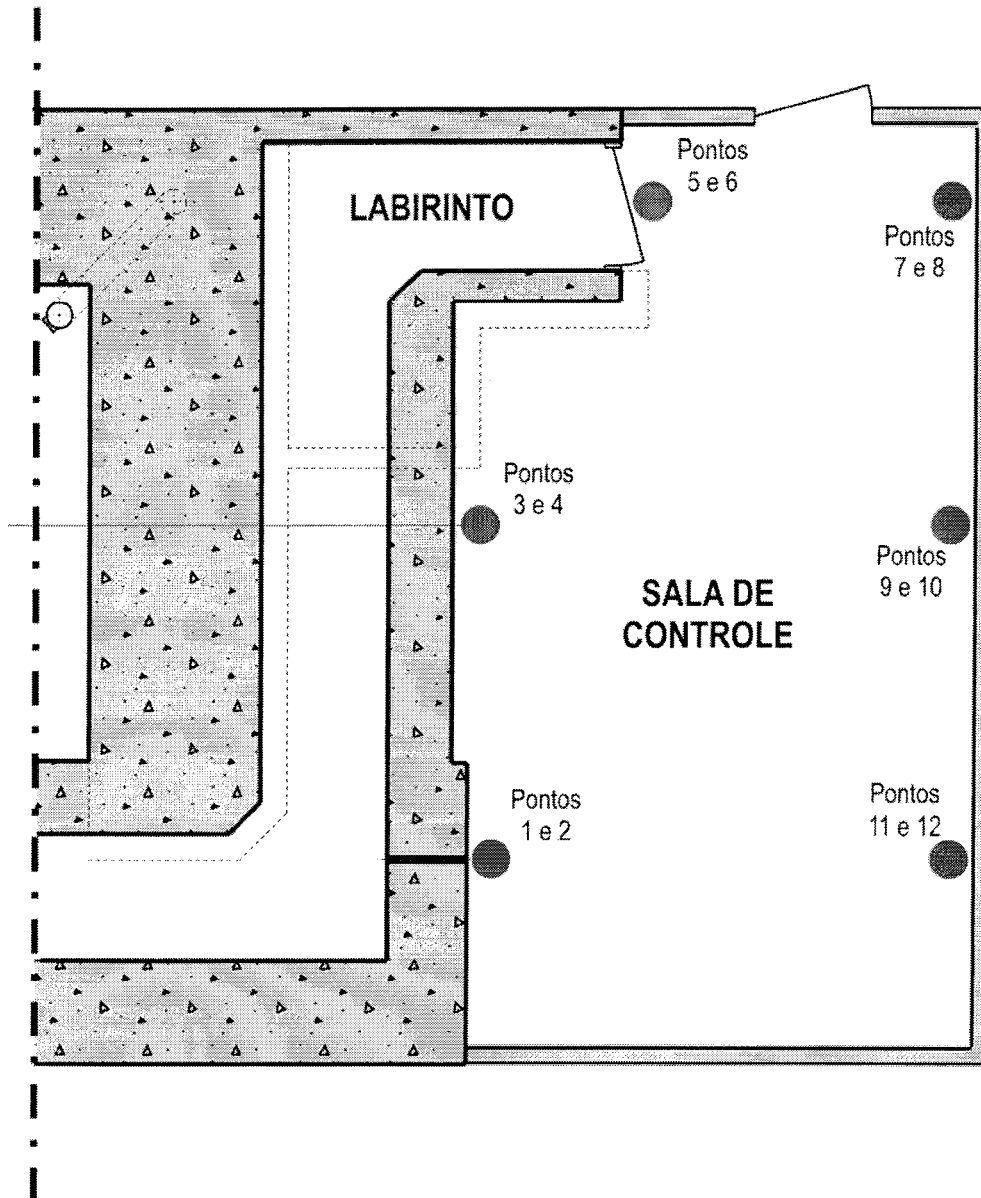
LEGENDA

- LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS
DOS DOSÍMETROS TL

NOTAS:

- 1-Pontos 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 e 19 (H=1,40 m do piso);
 2-Pontos 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 (H=2,10 m do piso);
 3-Medidas em milímetros.

FIGURA 26 – Corte esquemático da localização dos pontos dos dosímetros TL no labirinto do LIG.



LEGENDA

● LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS
DOS DOSÍMETROS TL

NOTAS:

- 1-Pontos 1, 3, 5, 7, 9 e 11 (H=1,40 m do piso);
- 2-Pontos 2, 4, 6, 8, 10 e 12 (H=2,10 m do piso);
- 3-Medidas em milímetros.

FIGURA 27 - Localização dos pontos dos dosímetros TL na sala de controle do
LIG.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais dos testes realizados com os detectores e os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e de CaSO₄:Dy são apresentados neste capítulo, juntamente com as respectivas análises e discussões.

5.1 – Resultados das características dos detectores TL

5.1.1 – Fator de Homogeneidade

De acordo com o teste descrito no item 3.2.3 foram calculados os fatores de homogeneidade (F_h), para cada tipo de detector TL.

Para atender ao limite aceitável para F_h máximo de 0,30 (CASMIE,1995), a fim de se obter a melhor seleção em relação à homogeneidade, foi feito um estudo dos detectores TL LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy, conforme descrito abaixo.

5.1.1.1 – Para o estudo do detector TL de LiF:Mg,Ti, foram adotados os seguintes passos:

- Dos 189 detectores TL selecionados visualmente, utilizou-se os valores $\bar{M}_{j\text{máx}}$ e $\bar{M}_{j\text{mín}}$ de 128,8 nC e 105,48 nC , respectivamente, obtendo-se o F_h igual a 0,22
- Mesmo sendo F_h igual a 0,22 e estando portanto, dentro do limite aceitável pelo CASMIE, foram retirados 21 detectores TL dos extremos superior e inferior dos valores médios obtidos, com o objetivo de reduzir ainda mais o valor de F_h . Os valores $\bar{M}_{j\text{máx}}$ e $\bar{M}_{j\text{mín}}$ passaram a ser de 124,94 nC e 110,22 nC, respectivamente, obtendo-se o F_h de 0,13 para os 168 detectores restantes.

5.1.1.2 - Para o estudo do detector TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foram adotados os seguintes passos:

- Dos 94 detectores TL selecionados visualmente, utilizou-se os valores $\bar{M}_{j\text{máx}}$ e $\bar{M}_{j\text{mín}}$ de 1,82 μC e 1,39 μC , respectivamente, obtendo-se o F_h igual a 0,31.
- Como F_h é maior que 0,30, foram retirados adicionalmente 3 detectores TL fazendo com que os valores de $\bar{M}_{j\text{máx}}$ e $\bar{M}_{j\text{mín}}$ passassem a ser de 1,78 e 1,43, respectivamente, obtendo-se o F_h igual a 0,24 para os 91 detectores restantes.

Após definido o lote em relação à homogeneidade para cada tipo de detector TL, foram calculados os fatores de sensibilidade através da razão entre o valor médio das leituras de todos os detectores TL e a média das leituras de cada detector, apresentados nas tabelas 12 e 13.

5.1.2 – Fator de reprodutibilidade

Após realizar a seleção dos lotes dos detectores TL em relação à homogeneidade, conforme item 5.1.1, foram calculados os fatores de reprodutibilidade (F_r), conforme descrito no item 4.2.4, para cada tipo de detector TL.

Para atender ao limite aceitável para F_r máximo de 7,5% (CASMIE,1995), a fim de se obter a melhor seleção em relação à reprodutibilidade, foi feito um estudo dos detectores TL $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, conforme descrito abaixo:

5.1.2.1 - Para o estudo do detector TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$, foram adotados os seguintes passos: dos 168 detectores TL selecionados, conforme descrito no item 5.1.1.1, dezesseis apresentavam F_r maior que 7,5% e foram retirados do lote, restando, então, 152 detectores com $F_{r\text{máx}}$ de 4,1%.

5.1.2.2 - Para o estudo do detector $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foram adotados os seguintes passos: dos 91 detectores TL selecionados, conforme descrito no item 5.1.1.2, apenas 1 apresentou F_r maior que 7,5% e foi retirado do lote, restando, então, 90 detectores com $F_{r \text{ máx}}$ de 6,1%.

5.1.3 – Seleção final do lote de detectores TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$

As características dos detectores TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ do lote selecionado são mostradas na tabela 12.

A tabela 12 mostra as leituras médias (\bar{M}), o desvio padrão (s), os fatores de sensibilidade (F_s) e os desvios padrões percentuais ($s\%$), de cada detector, relativos às leituras realizadas durante as 5 séries de irradiação conforme descrito no item 4.2.3.

O ruído (item 4.1.4.1.1) da leitora de TLD foi desprezível (menor que 0,04% em relação aos valores das leituras) e não foi considerado na determinação das leituras médias (\bar{M}) dos detectores TL.

A luz de referência (item 4.1.4.1.2) variou em torno de 4% durante a realização dos testes, demonstrando bom comportamento da leitora de TLD.

Foram selecionados 152 detectores TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ que apresentaram fator de homogeneidade F_h de 0,13 (leitura média máxima de 124,94 nC e leitura mínima de 110,22 nC) e fator de reprodutibilidade máximo ($F_{r \text{ máx}}$) de 4,1%. Para o cálculo dos fatores de sensibilidade, foi obtido o valor médio entre as leituras médias dos detectores igual a 118,07 nC. Estes resultados permitem considerar o lote selecionado como homogêneo e reprodutível, sem necessidade de calibração individual dos detectores TL.

A homogeneidade e a reprodutibilidade do lote selecionado dos detectores TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ são mostradas nas figuras 28 e 29.

TABELA 12 - Características do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.

<i>n° detector TL</i>	<i>M (nC)</i>	<i>s (nC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
1	118,90	2,12	0,99	1,78
2	124,06	1,76	0,95	1,42
3	118,26	2,55	1,00	2,16
4	121,90	1,93	0,97	1,58
5	120,22	2,48	0,98	2,06
6	120,80	4,69	0,98	3,88
7	115,18	4,58	1,03	3,98
8	121,74	4,28	0,97	3,52
9	119,12	2,60	0,99	2,18
10	117,50	2,73	1,00	2,32
11	116,58	2,13	1,01	1,83
12	123,04	2,65	0,96	2,15
13	124,04	1,86	0,95	1,50
14	118,60	2,46	1,00	2,07
15	119,36	3,04	0,99	2,55
16	115,02	1,65	1,03	1,43
17	122,24	2,57	0,97	2,10
18	121,14	1,84	0,97	1,52
19	119,78	2,72	0,99	2,27
20	118,74	3,38	0,99	2,85
21	124,36	2,67	0,95	2,15
22	115,12	1,84	1,03	1,60
23	116,58	2,34	1,01	2,01
24	121,90	2,70	0,97	2,21
25	119,82	2,26	0,99	1,89
26	121,22	4,12	0,97	3,40
27	122,76	2,83	0,96	2,31
28	124,50	2,57	0,95	2,06
29	118,24	2,21	1,00	1,87
30	121,00	2,29	0,98	1,89

<i>n° detector TL</i>	<i>M (nC)</i>	<i>s (nC)</i>	<i>F_s</i>	<i>s%</i>
31	124,38	2,66	0,95	2,14
32	121,78	2,97	0,97	2,44
33	118,86	2,52	0,99	2,12
34	122,34	2,98	0,97	2,44
35	122,96	2,35	0,96	1,91
36	117,96	2,18	1,00	1,85
37	122,50	2,38	0,96	1,94
38	123,24	2,33	0,96	1,89
39	114,76	2,29	1,03	2,00
40	118,72	4,54	0,99	3,82
41	120,12	3,19	0,98	2,66
42	119,12	4,70	0,99	3,95
43	118,74	3,44	0,99	2,90
44	122,00	2,54	0,97	2,08
45	120,34	2,09	0,98	1,74
46	119,16	2,96	0,99	2,48
47	115,44	1,86	1,02	1,61
48	119,64	2,98	0,99	2,49
49	118,68	1,71	0,99	1,44
50	116,60	2,54	1,01	2,18
51	123,22	3,67	0,96	2,98
52	118,88	3,17	0,99	2,67
53	120,02	4,49	0,98	3,74
54	120,96	3,23	0,98	2,67
55	121,26	2,04	0,97	1,68
56	117,74	2,48	1,00	2,11
57	121,12	2,12	0,97	1,75
58	115,94	2,75	1,02	2,37
59	119,78	2,60	0,99	2,17
60	117,72	2,36	1,00	2,00
61	117,13	2,86	1,01	2,44

<i>n° detector TL</i>	<i>M (nC)</i>	<i>s (nC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
62	116,64	2,38	1,01	2,04
63	120,86	1,96	0,98	1,62
64	119,32	1,32	0,99	1,11
65	123,04	2,18	0,96	1,77
66	122,90	1,91	0,96	1,55
67	122,52	1,93	0,96	1,58
68	122,08	3,26	0,97	2,67
69	123,68	3,53	0,95	2,85
70	120,18	3,24	0,98	2,70
71	119,36	2,96	0,99	2,48
72	119,88	1,72	0,98	1,43
73	120,02	2,69	0,98	2,24
74	118,10	2,16	1,00	1,83
75	124,94	3,19	0,95	2,55
76	120,40	3,04	0,98	2,52
77	116,60	4,16	1,01	3,57
78	118,78	3,71	0,99	3,12
79	115,05	3,76	1,03	3,27
80	119,48	3,89	0,99	3,26
81	121,66	3,75	0,97	3,08
82	118,26	3,76	1,00	3,18
83	118,92	3,81	0,99	3,20
84	120,16	4,57	0,98	3,80
85	120,86	3,53	0,98	2,92
86	117,68	3,58	1,00	3,04
87	114,20	3,64	1,03	3,19
88	118,34	3,50	1,00	2,96
89	117,40	2,59	1,01	2,21
90	116,48	3,63	1,01	3,12
91	117,70	3,76	1,00	3,19
92	112,78	3,37	1,05	2,99

<i>n° detector TL</i>	<i>M (nC)</i>	<i>s (nC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
93	119,32	3,40	0,99	2,85
94	115,82	3,58	1,02	3,09
95	120,52	4,47	0,98	3,71
96	118,86	3,30	0,99	2,78
97	118,48	3,60	1,00	3,04
98	120,84	3,56	0,98	2,95
99	117,46	2,47	1,01	2,10
100	117,48	4,35	1,01	3,70
101	112,50	2,61	1,05	2,32
102	119,32	3,75	0,99	3,14
103	120,64	3,09	0,98	2,56
104	119,92	3,42	0,98	2,85
105	116,16	3,58	1,02	3,08
106	118,13	3,87	1,00	3,28
107	113,86	4,31	1,04	3,79
108	116,90	3,31	1,01	2,83
109	120,14	4,32	0,98	3,60
110	114,14	2,88	1,03	2,52
111	118,22	3,11	1,00	2,63
112	112,56	3,40	1,05	3,02
113	111,34	3,92	1,06	3,52
114	114,04	4,00	1,04	3,51
115	114,02	3,94	1,04	3,46
116	115,96	3,91	1,02	3,37
117	114,58	3,98	1,03	3,47
118	116,24	4,17	1,02	3,59
119	113,98	3,54	1,04	3,11
120	113,12	3,36	1,04	2,97
121	116,06	4,70	1,02	4,05
122	113,68	2,80	1,04	2,46
123	113,82	3,43	1,04	3,01

<i>n° detector TL</i>	<i>M (nC)</i>	<i>s (nC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
124	114,74	3,76	1,03	3,28
125	114,08	3,02	1,03	2,65
126	115,76	2,35	1,02	2,03
127	115,66	3,28	1,02	2,84
128	120,42	3,85	0,98	3,20
129	115,86	3,61	1,02	3,12
130	114,62	4,32	1,03	3,77
131	114,38	3,49	1,03	3,05
132	116,92	4,39	1,01	3,75
133	112,22	3,85	1,05	3,43
134	115,62	3,10	1,02	2,68
135	117,78	3,67	1,00	3,12
136	111,54	3,80	1,06	3,41
137	115,98	3,99	1,02	3,44
138	116,46	3,31	1,01	2,84
139	114,80	3,71	1,03	3,23
140	119,44	3,52	0,99	2,95
141	117,14	4,04	1,01	3,45
142	110,22	3,51	1,07	3,18
143	110,22	3,04	1,07	2,76
144	112,42	3,28	1,05	2,92
145	112,64	4,22	1,05	3,75
146	115,32	3,54	1,02	3,07
147	113,46	4,31	1,04	3,80
148	117,34	3,74	1,01	3,19
149	110,40	3,39	1,07	3,07
150	111,18	3,30	1,06	2,97
151	117,65	4,09	1,00	3,48
152	112,67	4,24	1,05	3,76

M(nC)=leitura média em nanocoulombs coulombs, Fs=fator de sensibilidade cada detector TL.

s=desvio padrão das leituras em nano-
s%=desvio padrão percentual, de

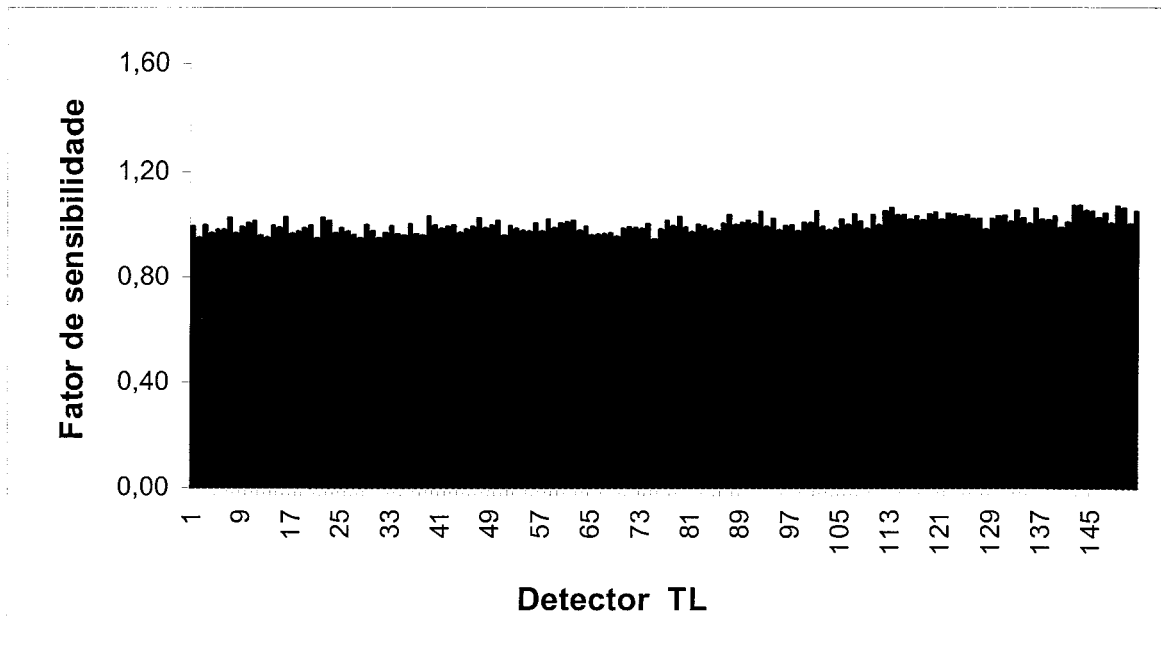


FIGURA 28 – Homogeneidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.

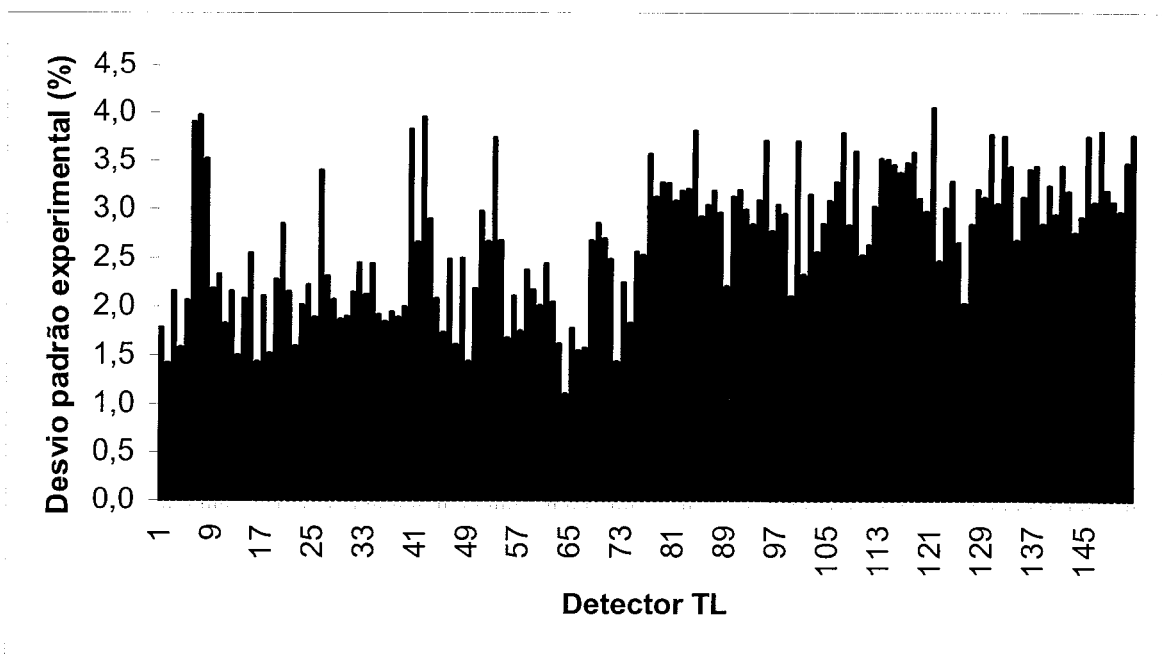


FIGURA 29 – Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de LiF:Mg,Ti.

5.1.4 – Seleção final do lote de detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

As características dos detectores TL $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ do lote selecionado são mostradas na tabela 13.

A tabela 13 informa as leituras médias (M), o desvios padrões (s), os fatores de sensibilidade (F_s) e os desvios padrões percentuais ($s\%$), de cada detector, relativos às leituras realizadas durante as 5 séries de irradiação conforme descrito no item 4.2.3.

O ruído (item 4.1.4.1.1) da leitora de TLD foi desprezível (menor que 0,01% em relação aos valores das leituras) e não foi considerado na determinação das leituras médias (M) dos detectores TL.

A luz de referência (item 4.1.4.1.2) variou em torno de 3% durante a realização dos testes, demonstrando bom comportamento da leitora de TLD.

Foram selecionados 90 detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ apresentando fator de homogeneidade F_h de 0,24 (leitura média máxima de 1,78 μC e leitura mínima de 1,44 μC) e fator de reprodutibilidade máximo ($F_{r\text{máx}}$) de 6,1%. Para o cálculo dos fatores de sensibilidade, foi obtido o valor médio entre as leituras médias dos detectores igual a 1,63 μC . Estes resultados permitem considerar o lote selecionado como homogêneo e reprodutível, sem necessidade de calibração individual dos detectores TL.

A homogeneidade e a reprodutibilidade do lote selecionado dos detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ são mostradas nas figuras 30 e 31.

TABELA 13 - Características do lote selecionado de detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

<i>n° detectores TL</i>	<i>M (μC)</i>	<i>s (μC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
1	1,64	0,08	0,99	4,73
2	1,66	0,05	0,98	2,79
3	1,59	0,06	1,02	3,52
4	1,69	0,06	0,97	3,34
5	1,73	0,10	0,94	5,55
6	1,48	0,06	1,10	4,04
7	1,62	0,05	1,01	2,86
8	1,77	0,04	0,92	2,21
9	1,68	0,09	0,97	5,30
10	1,54	0,03	1,06	1,77
11	1,69	0,08	0,96	4,62
12	1,67	0,05	0,97	2,76
13	1,57	0,06	1,04	4,12
14	1,62	0,04	1,01	2,71
15	1,58	0,03	1,03	1,95
16	1,54	0,07	1,06	4,28
17	1,73	0,05	0,94	2,64
18	1,75	0,06	0,93	3,68
19	1,60	0,08	1,02	4,84
20	1,69	0,04	0,96	2,59
21	1,63	0,03	1,00	1,98
22	1,73	0,06	0,94	3,24
23	1,67	0,05	0,98	3,01
24	1,59	0,06	1,03	4,05
25	1,73	0,04	0,94	2,27
26	1,59	0,05	1,03	3,38
27	1,66	0,04	0,98	2,58
28	1,73	0,06	0,94	3,36
29	1,63	0,04	1,00	2,19
30	1,55	0,06	1,05	4,17

<i>n° detectores TL</i>	<i>M (μC)</i>	<i>s (μC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
31	1,59	0,09	1,02	5,55
32	1,58	0,09	1,03	5,67
33	1,69	0,09	0,96	5,19
34	1,67	0,05	0,98	2,79
35	1,69	0,10	0,97	5,68
36	1,75	0,05	0,93	2,84
37	1,56	0,07	1,04	4,38
38	1,58	0,07	1,03	4,56
39	1,56	0,07	1,05	4,75
40	1,51	0,06	1,08	4,14
41	1,60	0,06	1,02	4,01
42	1,56	0,08	1,05	5,09
43	1,62	0,09	1,00	5,36
44	1,62	0,05	1,01	3,04
45	1,51	0,08	1,08	5,11
46	1,68	0,07	0,97	4,28
47	1,73	0,06	0,94	3,51
48	1,76	0,06	0,92	3,27
49	1,49	0,09	1,09	6,08
50	1,63	0,05	1,00	2,92
51	1,46	0,08	1,12	5,22
52	1,73	0,05	0,94	3,17
53	1,63	0,04	1,00	2,65
54	1,74	0,06	0,94	3,72
55	1,51	0,06	1,08	4,27
56	1,63	0,06	1,00	3,96
57	1,56	0,08	1,04	5,20
58	1,61	0,05	1,01	2,86
59	1,62	0,07	1,01	4,22
60	1,75	0,06	0,93	3,59
61	1,53	0,06	1,06	4,00

<i>n° detectores TL</i>	<i>M (μC)</i>	<i>s (μC)</i>	<i>Fs</i>	<i>s%</i>
62	1,74	0,03	0,94	1,76
63	1,64	0,08	0,99	4,65
64	1,78	0,09	0,91	4,99
65	1,49	0,05	1,10	3,40
66	1,62	0,06	1,00	3,57
67	1,71	0,04	0,95	2,50
68	1,55	0,07	1,05	4,49
69	1,60	0,03	1,02	1,83
70	1,60	0,07	1,02	4,64
71	1,65	0,08	0,99	4,81
72	1,74	0,05	0,94	2,69
73	1,44	0,06	1,13	4,12
74	1,60	0,07	1,02	4,28
75	1,63	0,05	1,00	2,99
76	1,72	0,06	0,95	3,21
77	1,55	0,06	1,05	3,59
78	1,78	0,04	0,92	2,26
79	1,66	0,04	0,98	2,43
80	1,64	0,05	1,00	2,81
81	1,63	0,05	1,00	3,05
82	1,47	0,07	1,11	4,88
83	1,58	0,07	1,03	4,17
84	1,65	0,02	0,99	1,29
85	1,51	0,03	1,08	2,10
86	1,73	0,03	0,94	1,54
87	1,75	0,03	0,93	1,88
88	1,63	0,04	1,00	2,32
89	1,68	0,07	0,97	4,06
90	1,48	0,06	1,10	4,12

M(nC)=leitura média em nanocoulombs
coulombs, Fs=fator de sensibilidade
cada detector TL.

s=desvio padrão das leituras em nano-
s%=desvio padrão percentual, de

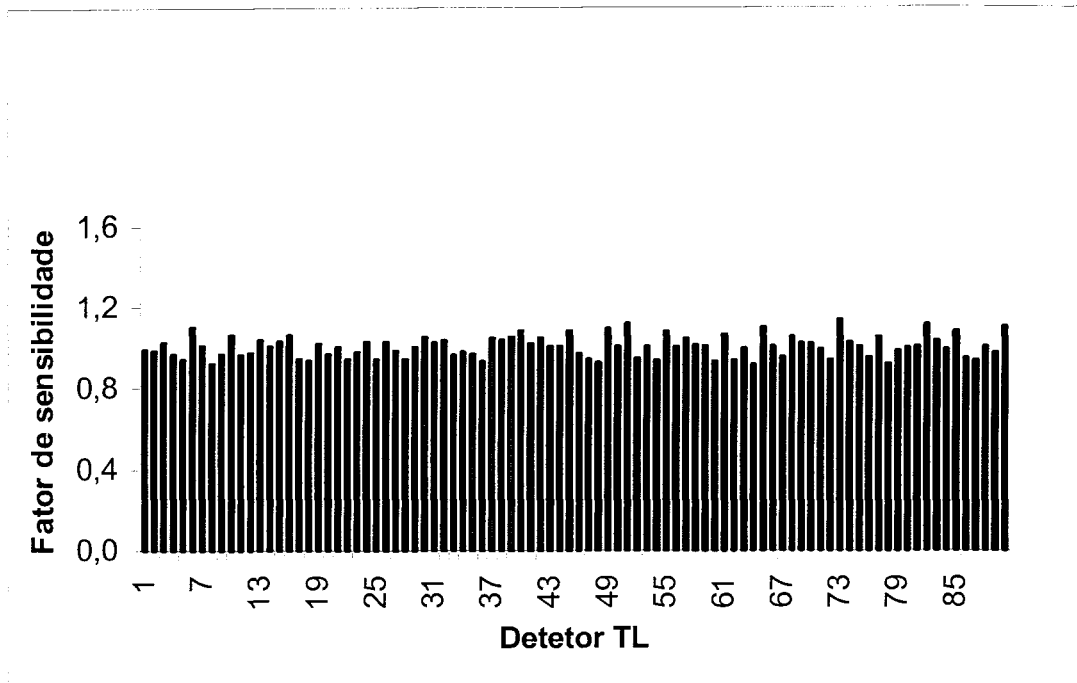


FIGURA 30 - Homogeneidade do lote selecionado de detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

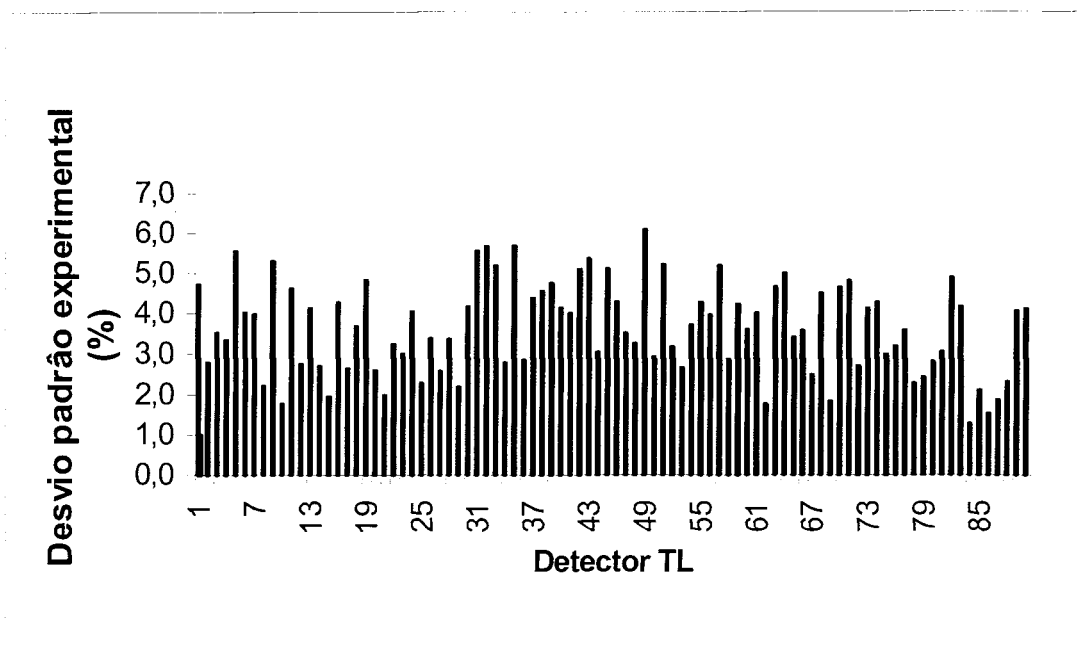


FIGURA 31 – Reprodutibilidade do lote selecionado de detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

5.2 – Resultados da Calibração dos dosímetros TL

De acordo com o teste realizado no item 4.3, foram calculados os fatores de calibração (N_c), em ^{60}Co e ^{137}Cs , para cada tipo de detector TL.

5.2.1 - Resultados da Calibração em fonte de ^{60}Co

As leituras dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti obtidas no teste de calibração, conforme item 4.3.1, são mostradas na tabela 14, que informa as leituras dos dosímetros irradiados, as leituras dos brancos, o valor médio das leituras obtidas e o valor médio corrigido, que foi calculado subtraindo-se o valor médio das leituras dos dosímetros brancos do valor médio das leituras dos dosímetros irradiados.

O valor médio corrigido foi de 99,80 ($\pm 0,65\%$) nC para o valor conhecido de $H^*(10)$ de 6000 μSv , o que acarreta um fator de calibração N_c , para a radiação do ^{60}Co , de 60,10 ($\pm 0,70\%$) $\mu\text{Sv/nC}$.

A incerteza considerada foi obtida pela combinação quadrática das componentes de incerteza do tipo A, isto é, associadas a procedimentos estatísticos; as incertezas do tipo B não foram consideradas.

TABELA 14 - Calibração do dosímetro TL de LiF:Mg,Ti em ^{60}Co .

<i>nº do dosímetro TL</i>	<i>Leitura 1 (nC)</i>	<i>Leitura 2 (nC)</i>	<i>Leitura 3 (nC)</i>	<i>Leitura Média (nC)</i>	<i>Leitura brancos (nC)</i>
1	98,1	103,5	102,5	101,4	2,137
2	104,0	97,3	102,3	101,2	2,218
3	103,0	101,5	103,3	102,6	2,323
4	102,5	103,4	101,0	102,3	2,295
5	99,1	104,6	103,3	102,3	1,957
					1,799
	Valor médio das leituras			101,9	2,122
	Desvio padrão			0,62	0,190
	Valor médio corrigido (nC)				99,8

As leituras dos dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtidas no teste de calibração, conforme item 4.3.1, são mostradas na tabela 15, que informa as leituras dos dosímetros irradiados, as leituras dos brancos, o valor médio das leituras obtidas e o valor médio corrigido, que foi calculado subtraindo-se o valor médio das leituras dos dosímetros brancos do valor médio das leituras dos dosímetros irradiados.

O valor médio corrigido foi de 1246 ($\pm 1,77\%$) nC para o valor conhecido de $H^*(10)$ de 6000 μSv , o que acarreta um fator de calibração N_c , para a radiação do ^{60}Co , de 4,81 ($\pm 1,79\%$) $\mu\text{Sv/nC}$.

A incerteza considerada foi obtida pela combinação quadrática das componentes de incerteza do tipo A, isto é, associadas a procedimentos estatísticos; as incertezas do tipo B não foram consideradas.

TABELA 15 - Calibração do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em ^{60}Co .

<i>nº do dosímetro</i>	<i>Leitura 1 (nC)</i>	<i>Leitura 2 (nC)</i>	<i>Leitura 3 (nC)</i>	<i>Leitura Média (nC)</i>	<i>Leitura brancos (nC)</i>	<i>Leitura média corrigida (nC)</i>
TL						
1	1260	1225	1250	1245	14,38	
2	1269	1230	1226	1241	13,96	
3	1286	1249	1246	1260	17,75	
4	1311	1301	1296	1302	22,70	
5	1239	1272	1277	1262	13,76	
					12,97	
	Valor médio das leituras			1262	15,92	
	Desvio padrão			21,72	3,71	
	Valor médio corrigido (nC)					1246

5.2.2 - Resultados da Calibração em fonte de ^{137}Cs

As leituras dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti obtidas no teste de calibração, conforme item 4.3.2, são mostradas na tabela 16, que informa as leituras dos dosímetros irradiados, as leituras dos brancos, o valor médio das leituras obtidas e o valor médio corrigido, que foi calculado subtraindo-se o valor médio das leituras dos dosímetros brancos do valor médio das leituras dos dosímetros irradiados.

O valor médio corrigido foi de $118,70 (\pm 3,78\%) \text{nC}$ para o valor conhecido de $H^*(10)$ de $6000 \mu\text{Sv}$, o que acarreta um fator de calibração N_c , para a radiação do ^{137}Cs , de $50,54 (\pm 3,79\%) \mu\text{Sv/nC}$.

A incerteza considerada foi obtida pela combinação quadrática das componentes de incerteza do tipo A, isto é, associadas a procedimentos estatísticos; as incertezas do tipo B não foram consideradas.

TABELA 16 -Calibração do dosímetro TL de LiF:Mg,Ti em ^{137}Cs .

<i>nº do dosímetro TL</i>	<i>Leitura 1 (nC)</i>	<i>Leitura 2 (nC)</i>	<i>Leitura 3 (nC)</i>	<i>Leitura Média (nC)</i>	<i>Leitura brancos (nC)</i>
1	116,6	116,7	113,9	115,7	0,97
2	113,5	117,8	115,2	115,5	0,87
3	114,5	121,6	114,7	116,9	1,05
4	116,5	110,8	118,1	115,1	1,35
5	114,1	115,6	117,4	115,7	0,79
6	122,4	126,8	124,2	124,5	1,02
7	126,0	120,2	122,1	122,8	–
8	120,6	124,5	125,0	123,4	–
9	123,6	125,3	128,4	125,8	–
10	124,1	124,4	117,3	121,9	–
Valor médio das leituras				119,7	1,01
Desvio padrão				4,48	0,19
Valor médio corrigido (nC)					118,7

As leituras dos dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtidas no teste de calibração, conforme item 4.3.2, são mostradas na tabela 17, que informa as leituras dos dosímetros irradiados, as leituras dos brancos, o valor médio das leituras obtidas e o valor médio corrigido, que foi calculado subtraindo-se o valor médio das leituras dos dosímetros brancos do valor médio das leituras dos dosímetros irradiados.

O valor médio corrigido foi de $1456 (\pm 2,0\%) \text{ nC}$ para o valor conhecido de $H^*(10)$ de $6000 \mu\text{Sv}$, o que acarreta um fator de calibração N_c , para a radiação do ^{137}Cs , de $4,12 (\pm 2,03\%) \mu\text{Sv/nC}$.

A incerteza considerada foi obtida pela combinação quadrática das componentes de incerteza do tipo A, isto é, associadas a procedimentos estatísticos; as incertezas do tipo B não foram consideradas.

TABELA 17 - Calibração do dosímetro de CaSO₄:Dy em ¹³⁷Cs.

<i>nº do dosímetro TL</i>	<i>Leitura 1 (nC)</i>	<i>Leitura 2 (nC)</i>	<i>Leitura 3 (nC)</i>	<i>Leitura Média (nC)</i>	<i>Leitura brancos (nC)</i>
1	1510	1471	1429	1470	9,33
2	1407	1396	1502	1435	6,06
3	1543	1407	1417	1455	8,76
4	1470	1526	1544	1513	12,18
5	1509	1487	1359	1451	9,64
					6,51
	Valor médio das leituras			1465	8,74
	Desvio padrão			29,69	2,24
	Valor médio corrigido (nC)				1456

O N_c do dosímetro TL de LiF:MgTi equivale cerca de 12 vezes o valor do N_c do dosímetro TL de CaSO₄:Dy, demonstrando que, entre os dois, o dosímetro TL de CaSO₄:Dy é bem mais sensível.

5.3 – Resultados das características dos dosímetros TL

5.3.1 – Reprodutibilidade

Conforme descrito no item 4.4.1, a reprodutibilidade dos dosímetros TL foi considerada a mesma obtida para os detectores TL, conforme item 5.1.1.

5.3.2 – Limite inferior de detecção

Conforme descrito no item 4.4.2, foram calculados os limites inferiores de detecção para os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

Para o cálculo do limite inferior de detecção (L_d) do dosímetro de LiF:Mg,Ti, foram utilizados os dados mostrados na tabela 18, que informa as leituras dos dosímetros não irradiados e suas médias, a leitura média do ruído proveniente da leitura com a bandeja vazia e as leituras corrigidas.

Para o cálculo do limite inferior de detecção utilizou-se t de Student de 2,26 (CASMIE, 1995), o desvio padrão da média das leituras ($s_{\bar{A}}$) de 0,05 nC e o fator de calibração (N_c) do LiF:Mg,Ti de 50,54 $\mu\text{Sv/nC}$.

O valor obtido do limite inferior de detecção dos dosímetros de LiF:Mg,Ti foi $L_d = 5,26 \mu\text{Sv}$.

TABELA 18 - Limite inferior de detecção dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti.

<i>nº dos dosímetros TL</i>	<i>Leitura 1 (nC)</i>	<i>Leitura 2 (nC)</i>	<i>Leitura 3 (nC)</i>	<i>média das leituras (nC)</i>	<i>Leitura média ruído (nC)</i>	<i>Leituras corrigidas (nC)</i>
1	0,7076	0,4658	0,4839	0,552	0,0502	0,501
2	0,6298	0,6168	0,6296	0,625		0,574
3	0,7616	0,7109	0,5591	0,677		0,626
4	0,5561	0,5054	0,4762	0,513		0,461
5	0,6045	0,756	0,7383	0,700		0,648
6	0,8306	1,491	0,4999	0,941		0,889
7	0,585	0,6148	0,7461	0,649		0,597
8	0,8146	1,076	0,9545	0,948		0,897
9	0,6826	0,5491	0,7628	0,665		0,613
10	0,6957	0,8115	0,7971	0,768		0,716

desvio padrão da média ($s_{\bar{A}}$) das leituras corrigidas (nC) : 0,05

Para o cálculo do limite inferior de detecção (L_d) do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foram utilizados dados obtidos na tabela 19, que informa as leituras dos

dosímetros não irradiados e suas médias, a leitura média do ruído proveniente da leitura com a bandeja vazia e as leituras corrigidas.

Para o cálculo do limite inferior de detecção utilizou-se t de Student de 2,26 (CASMIE, 1995), o desvio padrão da média das leituras ($s_{\bar{A}}$) de 0,23 (nC) e o

fator de calibração (N_c) do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ de $4,12 \mu\text{Sv/nC}$.

O valor obtido do limite inferior de detecção dos dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ foi $L_d = 2,13 \mu\text{Sv}$.

TABELA 19 - Limite inferior de detecção dos dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

<i>n</i> ^o dos dosímetros TL	Leitura 1 (nC)	Leitura 2 (nC)	Leitura 3 (nC)	média (nC)	Leitura média ruído (nC)	Leituras corrigidas (nC)
1	2,821	2,475	2,97	2,755	0,0857	2,670
2	5,24	3,559	4,314	4,371		4,285
3	1,617	2,966	2,438	2,340		2,255
4	4,202	2,466	2,565	3,078		2,992
5	3,098	4,147	1,772	3,006		2,920
6	2,517	3,07	6,744	4,110		4,025
7	4,394	2,287	2,016	2,899		2,813
8	2,036	3,186	2,213	2,478		2,393
9	3,585	2,266	5,426	3,759		3,673
10	4,728	5,106	2,186	4,007		3,921

desvio padrão da média ($s_{\bar{A}}$) das leituras corrigidas (nC): 0,23

O L_d do dosímetro TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ é 2,5 vezes o valor do L_d do dosímetro TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, demonstrando que apesar da alta sensibilidade do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em relação ao $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$, as flutuações nas leituras do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, causadas pela homogeneidade do lote, introduzem limitações no limite inferior de detecção.

5.3.3 – Dependência energética

Os resultados obtidos dos testes de dependência energética, conforme descrito no item 4.6, realizados com os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy estão descritos abaixo.

As leituras dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti obtidas no teste de dependência energética são mostradas na tabela 20, que informa a energia média dos feixes de irradiação utilizados, conforme item 4.2.1.2, as leituras médias dos detectores TL normalizadas para 1 mGy de kerma e para 1 mSv de H*(10) (conforme os coeficientes de conversão de kerma para H*(10), descritos no itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2) e os valores do kerma e H*(10) medidos com os dosímetros TL e normalizados para ¹³⁷Cs. A dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti é mostrada na figura 32.

TABELA 20 - Dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti

Energia média (keV)	Leitura média TL (nC)		Kerma e H*(10) (normalizado para ¹³⁷ Cs)	
	normalizada para 1 mGy	normalizada para 1 mSv	kerma	H*(10)
24 (raios X)	0,75	0,93	0,03	0,05
33 (raios X)	5,11	4,33	0,23	0,24
48 (raios X)	15,36	9,66	0,70	0,53
65 (raios X)	24,13	13,95	1,11	0,77
83 (raios X)	26,44	15,46	1,21	0,85
663 (¹³⁷ Cs)	21,80	18,17	1,00	1,00
1250 (⁶⁰ Co)	19,96	16,76	0,91	0,92

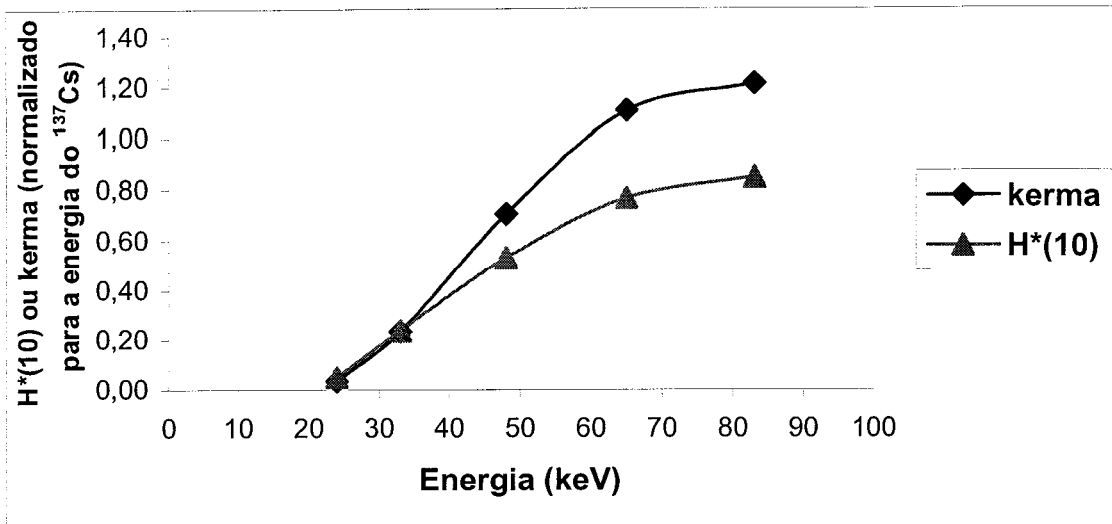
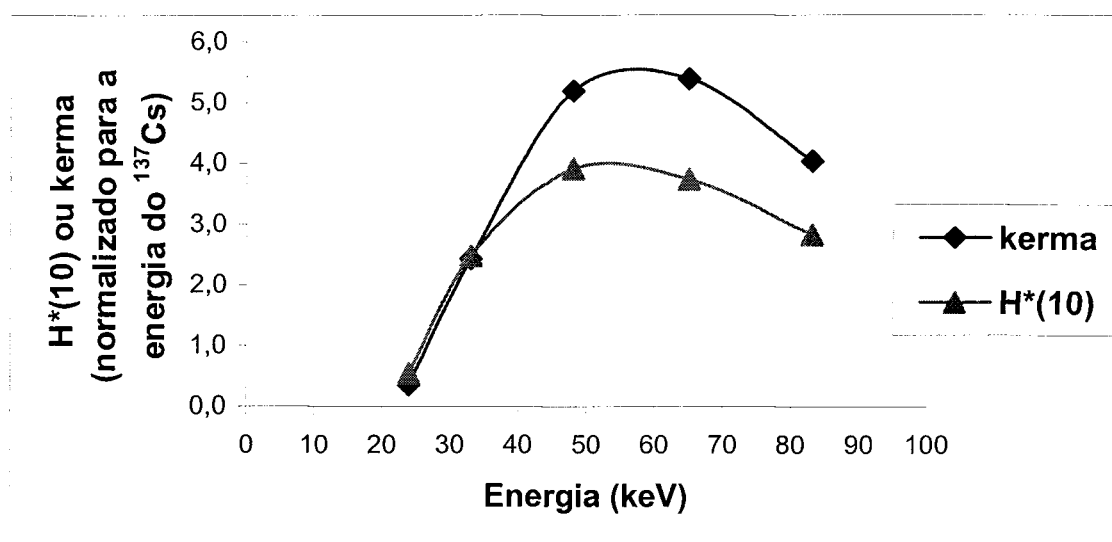


FIGURA 32- Dependência energética do dosímetro de LiF:Mg,Ti.

As leituras dos dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ obtidas no teste de dependência energética são mostradas na tabela 21, que informa a energia média para os feixes de irradiação utilizados, conforme item 4.2.1.2, as leituras médias dos detectores TL normalizadas para 1 mGy de kerma e para 1 mSv de $H^*(10)$ (conforme os coeficientes de conversão de kerma para $H^*(10)$, descritos no itens 4.2.1.1 e 4.2.1.2) e os valores do kerma e $H^*(10)$ medidos com os dosímetros TL e normalizados para ^{137}Cs . A dependência energética do dosímetro TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ é mostrada na figura 33.

TABELA 21 - Dependência energética do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

Energia média (keV)	Leitura média TL (nC)		Kerma e $H^*(10)$ (normalizado para ^{137}Cs)	
	normalizada para	normalizada para	kerma	H^*
	1 mGy	1 mSv		
24 (raios X)	99,91	124,88	0,36	0,54
33 (raios X)	677,71	574,33	2,44	2,48
48 (raios X)	1444,59	908,55	5,19	3,92
65 (raios X)	1501,26	867,78	5,40	3,74
83 (raios X)	1125,42	658,14	4,04	2,84
663 (^{137}Cs)	278,25	231,87	1,00	1,00
1250 (^{60}Co)	249,30	209,41	0,90	0,90

FIGURA 33 - Dependência energética do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

As figuras 32 e 33 mostram que:

- existe uma diferença de dependência energética entre os valores obtidos em $H^*(10)$ e kerma, e este fato é explicado pela própria definição de cada grandeza, em que o $H^*(10)$ é definido na esfera ICRU, conforme descrito no item 3.3, e o kerma é definido no ar.

- a dependência energética em relação à energia do ^{137}Cs , em termos de $H^*(10)$, do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ varia de 184% a 292% na faixa de energia 48 keV – ^{137}Cs , enquanto que o dosímetro de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ apresenta uma dependência que varia de -15% a -47% na mesma faixa de energia, demonstrando que o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ tende a superestimar a dose de maneira bastante significativa, enquanto o $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ tende a subestimar a dose de forma aceitável.
- a dependência energética em relação à energia do ^{137}Cs , em termos de kerma no ar, na faixa de energia 33 keV – ^{137}Cs obtidos experimentalmente de 0,23 a 1,21 e 2,44 a 5,40 para os dosímetros de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, respectivamente, são diferentes dos valores máximos típicos obtidos na literatura de 1,30 e 11, conforme descrito nos itens 4.1.2.1 e 4.1.2.2. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que, os valores experimentais foram obtidos com os detectores TL inseridos dentro do porta-detector, enquanto os valores típicos se referem apenas aos detectores TL.
- Os resultados sugerem que os dosímetros não são adequados para medidas em feixes de radiação de baixa energia, por causa da grande atenuação produzida pelo porta-dosímetro.

5.3.4 – Dependência angular

Os resultados obtidos nos testes de dependência angular conforme descrito no item 4.4.4, realizados com os dosímetros TL de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ e $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ são mostrados na tabela 22, que informa os ângulos de incidência (α) nos quais os dosímetros foram irradiados, as leituras obtidas para os dois tipos de dosímetros ($M_{\text{LiF}}^{(\alpha)}$ e $M_{\text{CaSO}_4}^{(\alpha)}$) e as leituras TL normalizadas para 0° , com os valores médios e os desvios padrões. A normalização para 0° das leituras TL para os dois tipos de dosímetros e a comparação entre eles é mostrada na figura 34.

A figura 34 mostra que a dependência angular é bastante parecida para os dois tipos de dosímetros, e que é crescente a medida que o ângulo de incidência aumenta, chegando a 44% para um feixe de radiação com ângulo de incidência

de 60°. Para este estudo, porém, a dependência angular considerada foi a média entre os valores obtidos para cada ângulo de incidência testado, por representar melhor a situação dos dosímetros expostos à radiação espalhada, obtendo-se uma dependência angular de 18% para o dosímetro de CaSO₄:Dy e de 16% para o LiF:Mg,Ti, constatando, assim, a baixa influência da dependência angular nos resultados obtidos.

A incerteza (s) associada aos resultados é a raiz quadrada da soma quadrática dos desvios padrões das leituras realizadas para cada ângulo testado.

TABELA 22 - Dependência angular dos dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

Ângulo de incidência	$M_{\text{LiF}(\alpha)}$ (nC)	$M_{\text{CaSO}_4(\alpha)}$ (nC)	$\frac{M_{\text{LiF}(\alpha)}}{M_{\text{LiF}(0^\circ)}}$	$\frac{M_{\text{CaSO}_4(\alpha)}}{M_{\text{CaSO}_4(0^\circ)}}$
0°	20,98	1537	1	1
15°	19,23	1455	0,917	0,947
30°	19,3	1401	0,92	0,911
45°	15,87	1034	0,756	0,673
60°	12,45	867	0,593	0,564
		Média	0,837	0,819
		Desvio padrão percentual (s%):	4,1%	4,4%

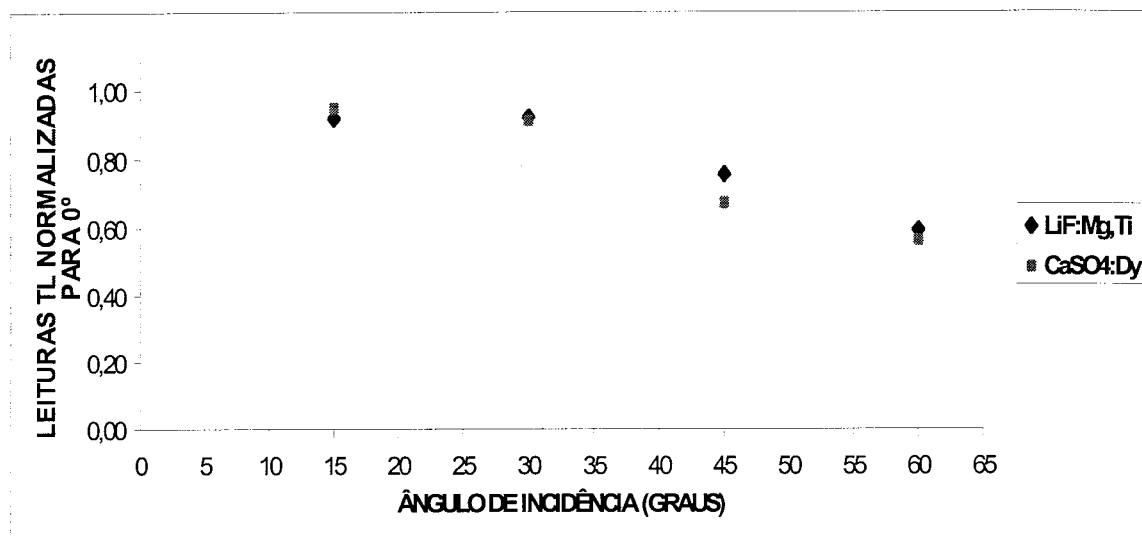


FIGURA 34 - Dependência angular dos dosímetros de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

5.4 – Resultados da monitoração ambiental do irradiador gama panorâmico, com câmaras de ionização.

Os fatores de calibração das câmaras, conforme descrito no item 4.5, foram os seguintes:

- Câmara de 6 cm³ - $F_c = 1,138 (\pm 0,50\%) \frac{\text{mSv}}{\text{mGy}}$;
- Câmara de 180 cm³ - $F_c = 1,149 (\pm 0,37\%) \frac{\text{mSv}}{\text{mGy}}$;
- câmara de 1800 cm³ - $F_c = 1,235 (\pm 0,28\%) \frac{\text{mSv}}{\text{mGy}}$.

Os resultados obtidos na monitoração ambiental do irradiador gama panorâmico, com câmaras de ionização, conforme item 4.5, estão descritos abaixo.

No ponto 1 (figura 19), os valores obtidos são mostrados na tabela 23, que informa as leituras obtidas com a câmara de ionização de 1800 cm³ e o valor da leitura média de 2,44 (± 1,56%) µGy/h.

Multiplicando-se o valor da leitura média pelo fator de calibração da câmara de 1800 cm³ (1,235 mSv/mGy), obteve-se o valor da taxa de \dot{H}^* (10) de 3,01 (\pm 1,6%) μ Sv/h

As câmaras de 6 e 180 cm³ não conseguiram indicar nenhum valor, por não terem sensibilidade suficiente para o baixo nível de radiação presente neste ponto.

TABELA 23 - Monitoração no ponto 1 do labirinto do LIG, com a câmara de ionização de 1800 cm³.

		<i>Leitura</i> (μ Gy/h)
		câmara 1800 cm ³
		2,38
		2,44
		2,47
		2,47
		2,44
		2,49
		2,37
		2,42
		2,44
		2,44
	média	2,44
	Desvio padrão (s)	0,04
	Desvio padrão percentual (s%)	1,56

No ponto 7 (figura 19), os valores obtidos são mostrados na tabela 24, que informa as leituras obtidas e os valores médios das leituras iguais a 0,266 , 0,168 e 0,213 mGy/h, obtidas com as câmaras de ionização de 6, 180 e 1800 cm³,

respectivamente, o desvio padrão (s) e o desvio padrão percentual (s%) obtidos entre as medidas.

Como as leituras obtidas com a câmara de 6 cm³ estão bem próximas do seu limite de detecção, fato comprovado pelo alto desvio padrão entre elas, não foram consideradas para fins de medida. Por isso, foram considerados, somente, os valores médios das leituras de 0,168 e 0,213 mGy/h.

Multiplicando-se os valores médios das leituras de 0,168 e 0,213 mGy/h pelos valores de calibração da câmaras de 1,149 e 1,235 mSv/mGy (câmaras de 180 e 1800 cm³), respectivamente, conforme descrito neste item, obteve-se os valores de H*(10) de 0,20 mSv/h e 0,26 mSv/h para as câmaras de 180 e 1800 cm³, respectivamente.

Calculando-se a média entre os equivalentes de dose ambiente obtidos, encontrou-se o $\dot{H}^*(10)$ de 0,23 ($\pm 4,5\%$) mSv/h.

TABELA 24 – Monitoração no ponto 7 do labirinto do LIG com as câmaras de ionização de 6, 180 e 1800 cm³.

	<i>Leitura (mGy/h)</i>		
	câmara 6cm ³	câmara 180 cm ³	câmara 1800 cm ³
	0,25	0,17	0,21
	0,25	0,17	0,21
	0,25	0,17	0,21
	0,25	0,17	0,24
	0,17	0,17	0,21
	0,33	0,16	0,21
	0,25	0,17	0,2
	0,33	0,16	0,21
	0,33	0,17	0,21
	0,25	0,17	0,22
média	0,266	0,168	0,213
Desvio padrão (s)	0,051	0,004	0,011
Desvio padrão percentual (s%)	19,02	2,51	4,97

No ponto 13 (figura 19), os valores obtidos são mostrados na tabela 25, que informa as leituras obtidas e os valores médios das leituras iguais a 41,66 e 40,84mGy/h, obtidos com as câmaras de ionização de 6, 180 cm³, respectivamente, o desvio padrão (s) e o desvio padrão percentual (s%) obtidos entre as medidas.

Por causa da alta taxa de leitura, a câmara de 1800 cm³ não foi utilizada, para evitar problemas de saturação.

Multiplicando-se os valores médios das leituras de 41,66 e 40,84 mGy/h pelos fatores de calibração da câmaras de 1,138 e 1,149 mSv/mGy (câmaras de 6 e 180 cm³), respectivamente, conforme descrito neste item, obteve-se os valores de $\dot{H}^*(10)$ de 47,40 mSv/h e 46,93 mSv/h para as câmaras de 6 e 180 cm³, respectivamente.

Calculando-se a média entre os equivalentes de dose ambiente obtidos, encontrou-se o \dot{H}^* (10) de 47,17 ($\pm 2\%$) mSv/h.

TABELA 25 - Monitoração no ponto 13 do labirinto do LIG, com as câmaras de ionização de 6 e 180 cm³.

	<i>Leitura (mSv/h)</i>	
	câmara 6cm ³	câmara 180 cm ³
	41,96	40,91
	41,96	40,82
	41,61	40,65
	41,7	40,91
	41,7	40,73
	42,05	40,82
	39,6	41
	42,05	40,73
	41,96	40,91
	41,96	40,91
Média	41,66	40,84
Desvio padrão (s)	0,74	0,11
Desvio padrão percentual (s%)	1,77	0,27

A análise das medidas é feita no item seguinte, comparativamente às medidas com dosímetros TL.

5.5 – Resultados da monitoração ambiental do irradiador gama com os dosímetros TL

Os resultados obtidos durante a monitoração ambiental do irradiador gama com os dosímetros TL, conforme item 4.6, no labirinto e na sala de controle do

LIG, estão mostrados nas tabelas 26 e 28, respectivamente, que informam os valores das taxas de $\dot{H}^*(10)$ medidas com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$) e $\text{H}^*(10)$ medidas com $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ ($\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$) e a razão entre eles para cada ponto monitorado. Os valores das incertezas associadas a $\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$ e a $\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$, são de 6,1% e 4,1%, respectivamente, que correspondem aos mesmos valores obtidos nos testes de reprodutibilidade, conforme itens 5.1.3 e 5.1.4

5.5.1 – Monitoração no labirinto do LIG

As taxas de $\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$ e $\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$, encontradas nos pontos de 1 a 20 no labirinto do LIG (figuras 25 e 26), e a razão entre elas, são mostradas na tabela 26 e representadas graficamente nas figuras 35 e 36.

TABELA 26 – Monitoração do labirinto do LIG com os dosímetros TL.

<i>Ponto</i>	$\dot{H}^*(10)_{CaSO_4}$ ($\mu Sv/min$)	$\dot{H}^*(10)_{LiF}$ ($\mu Sv/min$)	$\frac{\dot{H}^*(10)_{CaSO_4}}{\dot{H}^*(10)_{LiF}}$
1	0,060	0,024	2,50
2	0,047	0,019	2,47
3	2,08	0,848	2,45
4	2,31	0,801	2,88
5	2,11	1,066	1,98
6	2,03	1,227	1,66
7	11,33	3,07	3,69
8	11,10	2,89	3,84
9	105,17	46,53	2,26
10	87,61	43,16	2,03
11	1099	596	1,84
12	1118	588	1,90
13	829	697	1,19
14	710	586	1,21
15	5325	2450	2,17
16	4587	2271	2,02
17	9447	3815	2,47
18	5841	3637	1,61
19	115,658	72498	1,60
20	95194	69801	1,36

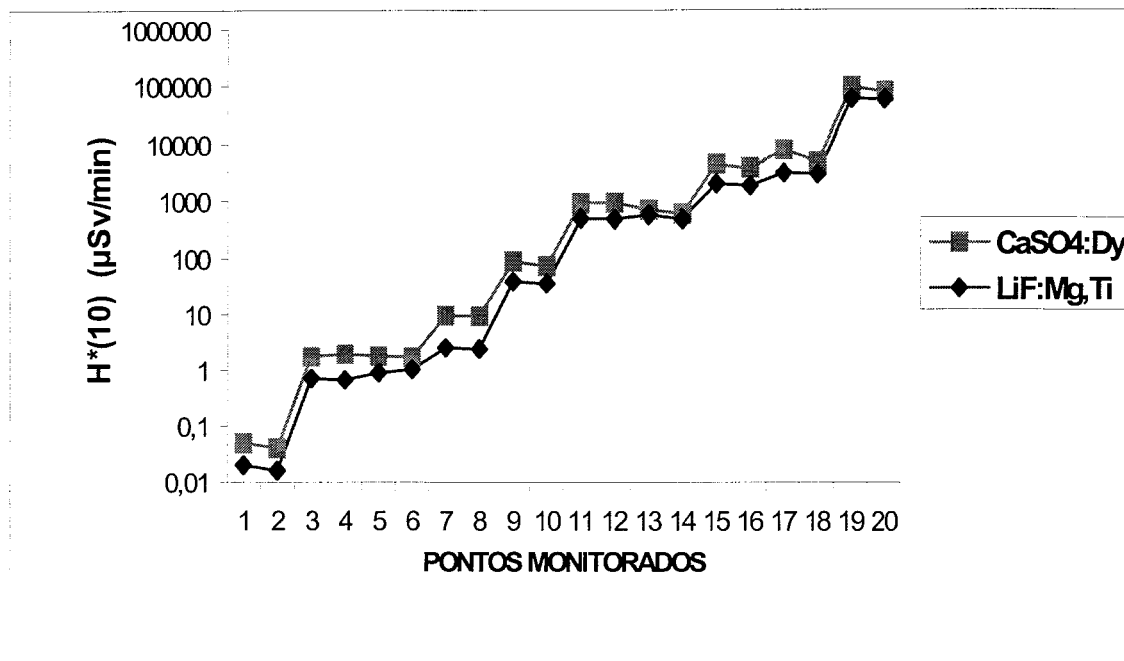


FIGURA 35 – Monitoração do labirinto do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

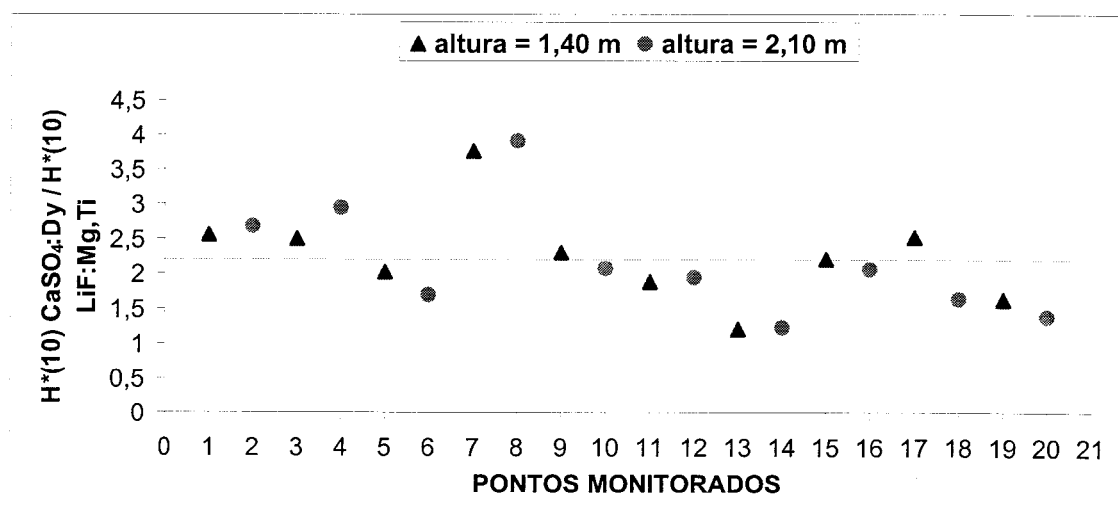


FIGURA 36 – Razão entre $H^*(10)$ medidas com CaSO₄:Dy e medidas com LiF:Mg,Ti.

Percebe-se pela figura 35, que os valores das taxas de $\dot{H}^*(10)$ aumentam no sentido do ponto 1 para o ponto 20, ou seja, no sentido da porta para o local onde está situada a fonte.

A figura 36 mostra que em todos os pontos, os valores das taxas de \dot{H}^* (10) medidas com dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ estão superestimados em relação aos valores obtidos com os dosímetros de $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$, em um fator de média 2,2, sugerindo que a existência de fatores de influência, como componentes de baixa energia causada pela radiação espalhada e luminosidade, podem estar interferindo no processo.

A razão entre os valores de \dot{H}^* (10) a 1,40m e 2,10 m, para cada dosímetro, é mostrada na tabela 27 e figura 37, que informa a posição vertical, os pontos considerados e a razão entre os pontos considerados para os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (r_{CaSO_4}) e $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ (r_{LiF}).

TABELA 27 – Razão entre os valores de $H^*(10)$ a 1,40 m e 2,10 m, para cada dosímetro TL.

<i>Posição vertical</i>	<i>pontos considerados</i>	r_{CaSO_4}	r_{LiF}
1	1 e 2	1,25	1,25
2	3 e 4	0,90	1,06
3	5 e 6	1,04	0,87
4	7 e 8	1,02	1,06
5	9 e 10	1,20	1,08
6	11 e 12	0,98	1,01
7	13 e 14	1,17	1,19
8	15 e 16	1,16	1,08
9	17 e 18	1,62	1,05
10	19 e 20	1,22	1,04

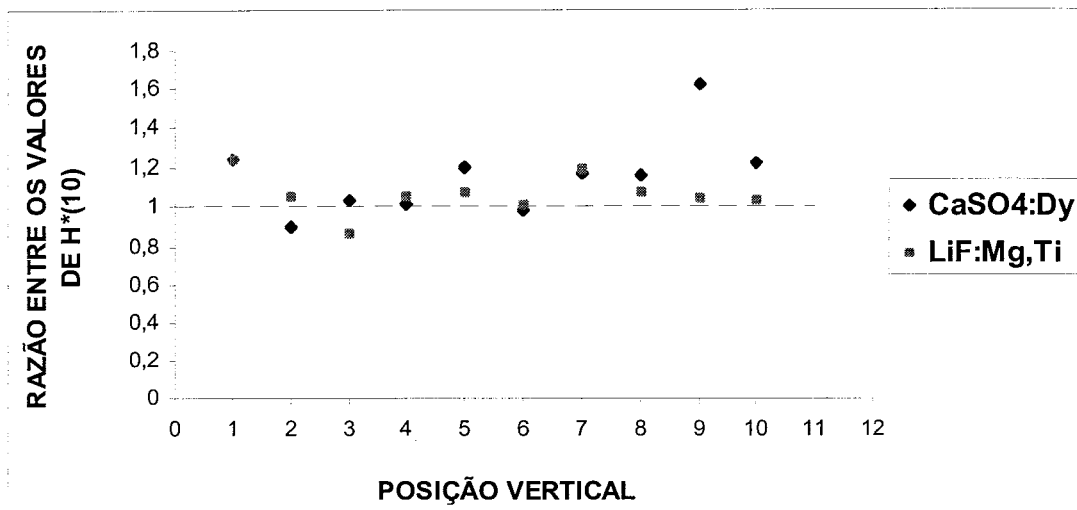


FIGURA 37 – Razão entre os valores de $H^*(10)$ a 1,40 m e 2,10 m, para cada dosímetro.

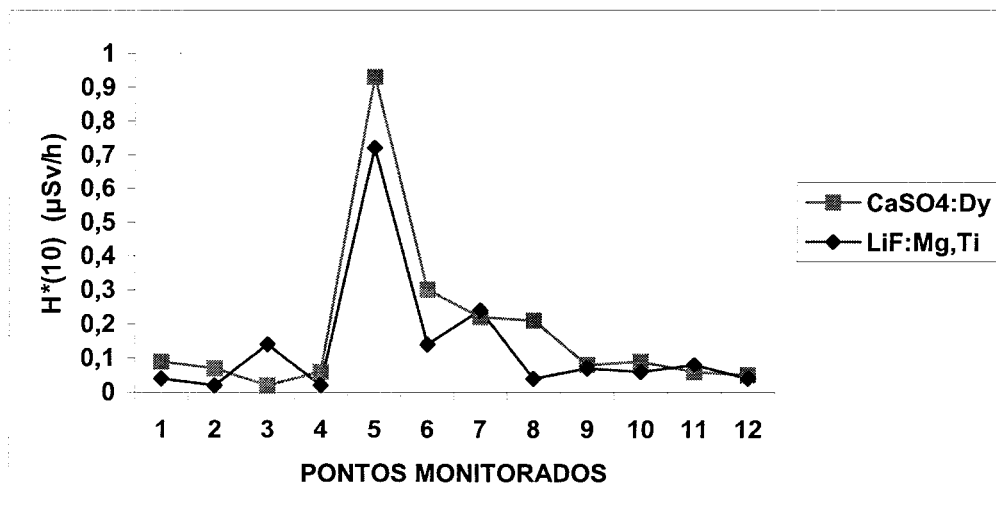
A figura 37 mostra que, com exceção dos dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ na posição 9, os valores das taxas de $\dot{H}^*(10)$ para os dosímetros TL posicionados a 1,40 m do piso estão próximas dos valores dos dosímetros posicionados a 2,10 m do piso, apresentando variação máxima de 25% entre eles, sugerindo uma coerência entre as respostas obtidas para cada tipo de dosímetro TL, e que a radiação (espalhada) se distribuiu mais ou menos uniforme ao longo da parede.

5.5.2 – Monitoração na sala de controle do LIG

As taxas de $\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$ e $\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$, encontradas nos pontos de 1 a 12 (figura 27) na sala de controle do LIG, são mostradas na tabela 28 e representadas na figura 38.

TABELA 28 – Monitoração da sala de controle do LIG com os dosímetros TL.

Ponto	$\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$	$\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$
	($\mu\text{Sv/h}$)	($\mu\text{Sv/h}$)
1	0,09	0,04
2	0,07	0,02
3	0,02	0,14
4	0,06	0,02
5	0,93	0,72
6	0,30	0,14
7	0,22	0,24
8	0,21	0,04
9	0,08	0,07
10	0,09	0,06
11	0,06	0,08
12	0,05	0,04

FIGURA 38 – Monitoração da sala de controle do LIG com dosímetros TL LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

Os resultados obtidos (tabela 28) mostram que, com exceção dos pontos 5 e 6, os valores de $\dot{H}^*(10)$ são menores que 0,24 $\mu\text{Sv/h}$ (0,48 mSv/ano) e a alta flutuação entre os resultados se deve ao fato de que os valores das leituras

medidas com os dosímetros brancos representam, em média, 90% das leituras dos valores irradiados, indicando que os níveis de radiação da sala de controle estão próximos de zero.

Os pontos 5 e 6 se destacam por estarem localizados na porta de entrada para a sala do irradiador. O resultado é devido à instalação de uma fonte de ^{137}Cs na porta para fins de dispositivo de segurança e apresenta um valor máximo de $\dot{H}^*(10)$ de $0,93 \mu\text{Sv/h}$ que equivale a $1,86 \text{ mSv/ano}$.

5.6 – Valores Teóricos

Os valores teóricos de $\dot{H}^*(10)$ obtidos, conforme descrito no item 4.7, para os pontos 7 e 13 do labirinto do LIG foram de:

- Ponto 7 = $2,45 \mu\text{Sv/min}$
- Ponto 13 = $609,8 \mu\text{Sv/min}$

5.7 - Comparação do desempenho dos diferentes sistemas de medidas

O resumo dos resultados obtidos nos testes realizados com os dosímetros de LiF:Mg,Ti e $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ é mostrado na tabela 29.

TABELA 29 - Resumo dos resultados dos testes realizados com os dosímetros TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy.

	<i>LiF:Mg,Ti</i>	<i>CaSO₄:Dy</i>
Reprodutibilidade dos detectores	4,1%	6,1%
Homogeneidade dos detectores	0,13	0,24
Fator de calibração (Fc) dos dosímetros	60,10 µSv/nC	4,81 µSv/nC
Reprodutibilidade dos dosímetros	4,1%	6,1%
Limite inferior de detecção dos dosímetros	5,26 µSv	2,13 µSv
Dependência energética dos dosímetros entre 48 keV – ¹³⁷ Cs	-47% -15%	292% 184%
Dependência angular dos dosímetros	16%	18%

A tabela 29 indica que:

- De acordo com a dependência energética na faixa de 48 keV – ¹³⁷Cs, o dosímetro de LiF:Mg,Ti tende a subestimar a dose em até 47%, enquanto que o dosímetro de CaSO₄:Dy pode superestimar a dose em até 292%. Os resultados sugerem a necessidade de conhecer o espectro de energia da radiação, para fins de correção, quando o dosímetro de CaSO₄:Dy for utilizado. No caso do dosímetro de LiF:Mg,Ti a dependência energética pode ser considerada aceitável para monitoração de área.

- A dependência angular de cerca de 20% sugere que o ângulo de incidência da radiação não é um parâmetro relevante para monitoração de área, com os dois tipos de dosímetros estudados.
- Para haver uma dosimetria confiável, existe a necessidade de se conhecer o espectro ou de usar um dosímetro o mais independente de energia possível.

Os valores de $\dot{H}^*(10)$ obtidos nos pontos 1, 7 e 13 do labirinto do LIG (figura 19), com os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$, com as câmaras de ionização e cálculos teóricos, são mostrados na tabela 30.

TABELA 30 – Valores de $\dot{H}^*(10)$ nos pontos 1, 7 e 13 para os diferentes sistemas de medidas.

	$\dot{H}^*(10)_{\text{LiF}}$ ($\mu\text{Sv}/\text{min}$)	$\dot{H}^*(10)_{\text{CaSO}_4}$ ($\mu\text{Sv}/\text{min}$)	$\dot{H}^*(10)_{\text{câmaras}}$ ($\mu\text{Sv}/\text{min}$)	$\dot{H}^*(10)_{\text{cálculo teórico}}$ ($\mu\text{Sv}/\text{min}$)
Ponto 1	$0,023 \pm 4,1\%$	$0,060 \pm 6,1\%$	$0,050 \pm 1,4\%$	—
Ponto 7	$3,07 \pm 4,1\%$	$11,33 \pm 6,1\%$	$3,83 \pm 4,5\%$	2,45
Ponto 13	$696 \pm 4,1\%$	$828 \pm 6,1\%$	$786 \pm 2\%$	609

A razões entre cada sistema de medida e o dosímetro de $\text{LiF}:\text{Mg}$ ($r_{\frac{\text{sistema de medida}}{\text{LiF}}}$) são mostradas na tabela 31, respectivamente.

TABELA 31 – Razão entre sistemas de medidas e o dosímetro de LiF:Mg,Ti.

	$\frac{r_{CaSO_4}}{LiF}$	$\frac{r_{câmaras}}{LiF}$	$\frac{r_{cálculo\ teórico}}{LiF}$
Ponto 1	2,5	2,21	–
Ponto 7	3,69	1,25	0,80
Ponto 13	1,19	1,13	0,87

Os resultados apresentados nas tabelas 30 e 31 indicam que as medidas com os dosímetros de LiF:Mg,Ti subestimam os valores de $H^*(10)$ no máximo em 20% (ponto 7) e em 11,5% (ponto13), em comparação com as medidas das câmaras de ionização; isto ocorre devido à radiação espalhada existente, cujo espectro de radiação possui certamente energias menores que a do ^{60}Co .

As medidas com os dosímetros de $CaSO_4:Dy$ superestimam os valores de $H^*(10)$ em até 270%, em comparação às medidas com o LiF:Mg,Ti; o que é também devido à radiação espalhada e à alta dependência energética do dosímetro.

Os valores teóricos calculados por Monte Carlo subestimam em cerca de 20% os valores de $H^*(10)$ obtidos com o LiF:Mg,Ti; o que equivale a cerca de 40% em relação às câmaras de ionização.

O ponto 1 apresenta um desvio das medidas com o LiF:Mg,Ti de cerca de 120% em relação às câmaras de ionização e 150% em relação ao $CaSO_4:Dy$. Isto sugere que neste ponto o valor de $H^*(10)$ obtido pelo dosímetro de LiF:Mg,Ti sofreu uma grande atenuação e que a proximidade entre valores obtidos com as câmaras de ionização e o $CaSO_4:Dy$ foi mera coincidência.

6 – CONCLUSÃO

Dois tipos de dosímetros ambientais, compostos por detectores TL de LiF:Mg,Ti e CaSO₄:Dy, foram caracterizados e calibrados para monitoração de área, em termos de H*(10).

Os resultados indicaram que, apesar do dosímetro de CaSO₄:Dy apresentar um limite inferior de detecção de aproximadamente duas vezes menor que o dosímetro de LiF:Mg,Ti, a alta dependência energética do primeiro exige, para fins de correções, o conhecimento do espectro de energia da radiação incidente.

Na faixa de energia de 50 keV a ⁶⁰Co, o dosímetro de LiF:Mg,Ti tende a subestimar os valores de H*(10) em até 50%, o que pode ser considerado aceitável para monitoração de área. Na mesma faixa, o dosímetro de CaSO₄:Dy superestima, de forma inaceitável, os mesmos valores em até 300%.

Ambos dosímetros não apresentam dependência angular superior a 20%, indicando que isto não é um fator relevante a ser considerado.

A aplicação dos dosímetros na monitoração do laboratório de irradiação gama, com fonte de ⁶⁰Co, onde há presença considerável de radiação espalhada, confirmou que, em relação às medidas com câmaras de ionização calibradas, o dosímetro de LiF:Mg,Ti subestimou os valores de H*(10) em cerca de 25%, podendo ser de até 50% se, em outros pontos do labirinto a componente de baixa energia da radiação for relevante.

O uso do dosímetro de CaSO₄:Dy na monitoração do LIG foi considerado impróprio, pelo desconhecimento do espectro de energia da radiação nos pontos de medida, o que impossibilita qualquer correção da influência da alta dependência energética do dosímetro.

A aplicação dos dosímetros, em áreas com presença de radiação de baixa energia, deve ser avaliada cuidadosamente, já que o porta-dosímetro provoca considerável atenuação do feixe de radiação. Nestes casos, o mais adequado seria utilizar os detectores TL livres no ar e devidamente calibrados e caracterizados em termos de $H^*(10)$.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATTIX, F. H. - Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1986.
- BATISTA, J. R., MALAMUT, C., GRYNBERG, S. E. - Dosimetria do Laboratório de Irradiação do CDTN, VIII Congresso Brasileiro de Física Médica, Porto Alegre, 2003.
- BICRON NE - Model 4500 TLD Workstation Operators' Manual, Publication No. 4500-0-O-0598-002, Saint-Gobain Industrial Ceramics, Inc., OHIO, USA, 1998.
- BORTOLOTT, V. J. - Thermoluminescence Dating of Art Objects, Bortolot Daybreak Corporation, Guilford, CT 06437. <http://www.daybreaknuclear.com/tlpaper.pdf>
- CAMPOS L. L., LIMA M. F. - Pastilhas Dosimétricas de CaSO₄:Dy + Teflon para Detecção da Radiação X, Beta e Gama, Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – IPEN, São Paulo, 1987.
- CAMPOS L. L., POTIENS, A. - J. Ultraviolet and Laser Radiation Dosimetry Using Photostimulated Thermoluminescence in CaSO₄:Dy, Fourth Conference on Radiation Protection and Dosimetry, Proceedings, Programs and Abstracts, Orlando, Flórida, USA, 1994.
- CASMIE - Comitê de Avaliação de Serviços de Monitoração Individual Externa, *Desempenho de Sistemas de Monitoração Individual – Critérios e Condições*. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 1995.
- DIETZE, G, MENZEL, H. G - Aspects of ICRP 60 and ICRU 47 Relevant to Individual Monitoring of External Exposure, Radiation Protection Dosimetry, v. 54, n. 3/4, p. 167-173, 1994.

FERREIRA, H. R. - Produção e Caracterização do Material Termoluminescente LiF:Mg,Cu,P para Dosimetria de Radiações Gama e X. Dissertação de mestado, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 1995.

HARSHAW CHEMICAL COMPANY - Model 3000A TLD System, Instruction Manual, 1982.

IAEA, International Atomic Energy Agency, Workplace Monitoring for Radiation and Contamination, Practical Radiation Technical Manual, Viena, 1995.

IAEA (a) - International Atomic Energy Agency, Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiarion, Safety Standards Series, Safety Guide, No. RS-G- 1.3, Viena, 1999.

IAEA (b) - International Atomic Energy Agency, Occupational Radiation Protection, Safety Standards Series, Safety Guide, No. RS-G- 1.1, Viena, 1999.

IAEA - International Atomic Energy Agency, Workplace Monitoring, Draft Safety Report (a ser publicado), Viena, 2003.

IAEA - International Atomic Energy Agency, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, Safety Reports Series nº 16, Viena, 2000.

ICRP - International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of ICRP 21, n. 1/3, *ICRP Publication 60*, Pergamon Press, Oxford, 1991.

ICRP - International Commission on Radiological Protection, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, Annals of ICRP 26, (3-4), *ICRP Publication 74*, Pergamon Press, Oxford, 1996.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Radiation quantities and units, ICRU Report 33, Bethesda, MD, 1980.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Source, ICRU Report 39, Bethesda, MD, 1985.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Source – Part 2, ICRU Report 43, Bethesda, MD, 1988.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47, Bethesda, MD, 1992.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Radiation Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, Bethesda, MD, 1993.

ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, Radiation Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, *ICRU Report 60*, Bethesda, MD, 1998.

ISO - International Organisation for Standardization. X and Gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate and for determining their response as a function of photon energy; radiation characteristics and production methods, ISO 4037 – 1, 1996.

ISO - International Organisation for Standardization. X and Gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate and for determining their response as a function of photon energy; calibration of area and personal

dosemeters of their response as a function of energy and angle of incidence, ISO 4037 – 3, 1997.

LNMRI - Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante, INMETRO, IRD/CNEN/MCT, Rio de Janeiro, dezembro de 2002.

Maurício, C. L. P. - Noções de Dosimetria Termoluminescente: Aplicação em Dosimetria Individual, apostila de curso, IRD/CNEN, 1993.

Maurício, C. L. P. - Dosimetria Termoluminescente, Noções Teóricas e Aplicação à Monitoração Individual Externa, apostila de curso, IRD/CNEN, 1998.

NOGUEIRA, M. S. - Determinação de Fatores de Conversão de kerma no Ar e de Fluência para o Equivalente de Dose Ambiental para Raios X Gerados no Intervalo de 50 kV_p a 125 kV_p, tese (doutorado), IPEN, CNEN/SP, 1997.

RADCAL CORPORATION - Instruction Manual for the Model 9015 Radiation Monitor Controller, USA, 1994.

REICH, H, BENGTSSON, G. - Proposed interim measuring quantity for radiation protection dosimeters for photons, *Health Physics*, v. 40, p 898-902, jun 1981.

SHANI, G. - Radiation Dosimetry Instrumentation and Methods, CRC Press, Inc., Flórida, USA, 1991.

SOARES, C. M. A. - Caracterização de um Dosímetro para Medida do Equivalente de Dose Pessoal. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte 2001.

SOARES, C. M. A. - Relatório de Viagem, Irradiação de Filmes Dosimétricos para Calibração da 24ª remessa, CDTN/CNEN, Belo Horizonte, 2003.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A, DI PRINZIO, R. D., DI PRINZIO, A R. – Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, 1999.