



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**CARACTERIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DE UM SISTEMA
DOSIMÉTRICO TERMOLUMINESCENTE PARA RADIAÇÕES
ULTRAVIOLETA E LASER UTILIZANDO O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

FABIO HENRIQUE GROSSI

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

**Orientadora:
Dra. Letícia L.C. Rodrigues**

**São Paulo
2002**

**CARACTERIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DE UM SISTEMA
DOSIMÉTRICO TERMOLUMINESCENTE PARA RADIAÇÕES
ULTRAVIOLETA E LASER UTILIZANDO O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

FABIO HENRIQUE GROSSI



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

**Orientadora:
Dra. Letícia L. C. Rodrigues**

**São Paulo
2002**

CARACTERIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DE UM SISTEMA DOSIMÉTRICO TERMOLUMINESCENTE PARA RADIAÇÕES ULTRAVIOLETA E LASER UTILIZANDO O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

FABIO HENRIQUE GROSSI

RESUMO

O método da termoluminescência fotoestimulada (TLFE) foi usado para a caracterizar um sistema dosimétrico para radiações ultravioleta e laser. As amostras de sulfato de cálcio ativado com disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) utilizadas são produzidas no próprio Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e tem se mostrado um excelente material dosimétrico para radiação não ionizante. Foi estudada a resposta TLFE para radiação UV no intervalo de 220 a 450nm e laser no intervalo de 193 a 1.060nm. As amostras apresentaram maior sensibilidade aos comprimentos de onda de 193, 250, 310 e 337nm da região UV e nenhuma sensibilidade à região do infravermelho. Apresentaram resposta TLFE linear em função da exposição radiante, dose gama de excitação no intervalo de 5 a 100Gy e diâmetro do feixe incidente entre 2 e 6mm. Outros parâmetros investigados foram a dependência angular, exposição UV mínima detectável e decaimento óptico do sinal TLFE. Foram ainda efetuadas análises de radiação laser espalhada no centro cirúrgico do Departamento de Oftalmologia da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), mostrando que amostras posicionadas a 4m da fonte são sensibilizadas pela radiação laser, além de estimar as exposições à radiação laser recebidas pelos trabalhadores da área médica. Um método de envio das amostras via correio foi desenvolvido para as análises realizadas na Unifesp.

CHARACTERIZATION AND STANDARDIZATION OF A THERMOLUMINESCENT DOSIMETRIC SYSTEM TO ULTRAVIOLET AND LASER RADIATION USING $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

FABIO HENRIQUE GROSSI

ABSTRACT

The phototransferred thermoluminescence (PTTL) was used to characterize a dosimetric system to the laser and ultraviolet radiation. Dysprosium activated calcium sulphate samples ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$) used are produced at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) and have proved been an excellent dosimetric material for non ionizing radiation. PTTL signal was studied for UV radiation detection in the 220 to 450nm range and for laser radiation in the 193 to 1.060nm range. The samples presented more sensibility to the 193, 250, 310 and 337nm wavelengths and no sensibility to infrared region. The samples presented linear PTTL in function of radiant exposure, excitation gamma dose in the range between 5 and 100Gy and laser beam diameter between 2 and 6mm. Another parameters studied were the angular dependence, UV lower exposure limit and PTTL signal optical fading. Spread laser radiation analysis was performed in the Ophthalmologic Department of Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) surgical center, showing that samples positioned as far as 4m from laser source are sensitized to the laser radiation, as well as evaluating the laser exposure received by workers of medical area. A method to send the samples by mail was developed to the studies performed in the Unifesp.

***Dedico este trabalho a meus avós:
José (in memoriam) e Olívia T. Carvalho (in memoriam)
José (in memoriam) e Aparecida F. Grossi***

*Vós sois o sal da terra e a luz do mundo!
Quando se acende uma lâmpada não é para
pô-la debaixo do alqueire, mas sobre a
luminária, e ela brilha para todos que estão
na casa. Assim também brilhe a vossa luz
aos olhos dos homens, a fim de que, vendo
as vossas boas obras, eles glorifiquem o
vosso Pai que está nos céus.*

A BÍBLIA

*E Deus disse: "Faça-se a luz". E a luz se fez.
E viu Deus que a luz era boa;
e Deus separou a luz da escuridão.*

A TORÁ

*Luz sobre luz!
Deus guia a esta luz quem lhe aprover:
e dá exemplo aos homens;
Ele conhece todas as coisas.*

O CORÃO

*Mas, silêncio! Que luz é aquela que está
entrando pela janela?
É a aurora; e Julieta é o sol!*

SHAKESPEARE

*A luz nos revela o mundo.
O corpo e a alma anseiam por ela.
Os seres humanos pensam sobre o
conceito de luz tanto quanto os peixes
pensam sobre a noção de água.*

JOEL ACHENBACH

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Trindade Santa pela inspiração, iluminação e proteção em todos estes anos de minha vida.

À Dra. Letícia Lucente Campos Rodrigues pela orientação, incentivo e apoio durante estes anos de trabalho.

Ao Dr. Cláudio Rodrigues, superintendente do IPEN, por receber-me nesta instituição e por permitir o uso da infraestrutura dos Departamentos adjuntos na realização deste projeto.

À FAPESP pelo incentivo financeiro e concessão da bolsa durante a execução deste trabalho.

Aos pesquisadores do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN, Dr. Laércio Gomes, Dr. Armando Mirage, Dr. Wagner de Rossi, Dra. Denise Maria Zezell e MSc. Andréa Antunes Pereira pelo apoio e espaço aberto à realização das exposições laser feitas neste Departamento.

Ao corpo clínico do Departamento de Oftalmologia da Universidade Federal de São Paulo, Dr. Paulo Schor, Dr. Luis Alberto S. de Melo Junior e Dr. Edson Shizuo Mori pelas discussões, incentivo e permissão para utilizar o centro cirúrgico na realização de exposições laser lá realizadas.

Ao Dr. Nei Fernandes de Oliveira Júnior, do Laboratório de Baixas Temperaturas do IFUSP, pela compreensão e apoio dados à conclusão deste trabalho.

Aos engenheiros do Centro Tecnológico de Radiações do IPEN, Carlos Gaia da Silveira e Elizabeth S. Ribeiro Somessari pelo carinho, atenção e rapidez na exposição das amostras.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais Dosimétricos do Departamento de Metrologia das Radiações do IPEN, MSc. Davi Tadashi Fukumori, Eng. Fávio Betti, Sr. Vanderlei I. Souto, Sr. Antônio C. de Souza e Sra. Maria de Lourdes do Nascimento pelo preparo das amostras e paciência nas vezes que tiveram de trabalhar no escuro por causa de meu projeto.

Ao pessoal do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Departamento de Metrologia das Radiações do IPEN, Dra. Maria da Penha A. Potiens, MSc. Vítor Vívoló, Sr. Eliomar J. C. de Cerqueira, Sr. Marcos Xavier e Sr. Valdir de Souza Carvalho pelo apoio técnico e discussões no decorrer do projeto.

Ao Sr. Claudinei T. Cescom e Sr. Gelson P. dos Santos, do Laboratório de Eletrônica, pela rapidez no suporte técnico e manutenção dos equipamentos usados na parte experimental.

À Sra. Filomena De Fina Beraldo pelo carinho e pronto atendimento das inúmeras solicitações feitas na secretaria.

Aos colegas Alessandro M. Costa, Alessandro Dytz, Aline B. Guerra e Lincoln S. Gomes pelas inúmeras discussões, almoços, caronas e descontração proporcionados durante todo este tempo de trabalho.

Aos meus pais, José Antônio e Conceição, pelo incentivo, força e orações confiadas durante toda minha existência. Sem vocês, Deus não teria soprado o dom da vida sobre mim.

Às minhas irmãs, Fernanda, Carla e Vanessa pelas vezes em que me tiraram do sério, tanto sorrindo ou zangando, obrigado.

Minhas desculpas aos meus priminhos, Henrique, Bruna, Milena, Bárbara, Vítor e Ana Clara, pelo destemperamento quando brincavam no quintal e eu, estando estudando... Desculpem-me.

Aos meus sobrinhos, Clarissa, Karen, Mayara e Maurício, vocês são a luz no fim do túnel quando me sinto só. Beijos!

À Delamaris, sua importância em minha vida é imensurável.

Ao Rodrigo, pelas xérox, obrigado.

À minha noiva, Ana Paula Silva, sempre carinhosa, dedicada e presente em minha vida. "Não há palavras pra comparar...!" Obrigado pelo apoio irrestrito na execução e conclusão deste trabalho. Você sempre estará em um lugar privilegiado dentro de meu coração!

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

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
Dedicatória	iii
Agradecimentos	v

Página

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	3
2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Conceitos sobre radiação não ionizante	4
2.1.1. Terminologias.....	5
2.1.2. Riscos.....	7
2.1.2.1. Radiação laser	8
2.1.2.2. Radiação ultravioleta	11
2.2. Termoluminescência.....	13
2.2.1. Entendimento do fenômeno TL	14
2.2.2. Termoluminescência fotoestimulada ou fototransferida	17
2.3. Sulfato de cálcio dopado com disprósio (CaSO ₄ :Dy)	20

3. Materiais e Métodos	22
3.1. Características das amostras	22
3.2. Tratamentos térmicos	23
3.3. Irradiação gama.....	24
3.4. Exposição UV	25
3.5. Exposição laser	26
3.5.1. Laser excímero.....	28
3.6. Leitura TL e TLFE.....	30
4. Resultados e discussões	31
4.1. Características físicas das amostras	31
4.1.1. Tratamentos térmicos.....	34
4.2. Exposição UV	36
4.2.1. Dependência com o tratamento térmico e comprimento de onda	37
4.2.2. Dependência com a iluminação ambiente.....	39
4.2.3. Decaimento óptico do sinal	40
4.2.4. Dependência com a dose gama absorvida	41
4.2.5. Dependência com o tempo de exposição.....	42
4.2.6. Dependência com o ângulo de incidência da radiação UV.....	44
4.2.7. Dependência com o fluxo energético	45
4.2.8. Dependência com a irradiância.....	46
4.2.9. Resposta TLFE à exposições UV subseqüentes	47
4.2.10. Limite mínimo de detecção UV.....	49
4.2.10.1. Dose gama mínima para detecção do sinal TLFE	49
4.2.10.2. Exposição UV mínima detectável.....	52

4.3. Exposição laser	54
4.3.1. Lasers Nd:YAG e diodo.....	54
4.3.2. Lasers de argônio e nitrogênio.....	55
4.3.2.1. Dependência com o diâmetro do feixe laser	57
4.3.2.2. Dependência com a potência laser	58
4.3.2.3. Dependência com o tempo de exposição laser.....	58
4.3.2.4. Dependência com a dose gama.....	60
4.3.2.5. Influência da radiação infravermelha	62
4.3.3. Laser excímero	63
4.3.3.1. Caracterização das amostras à radiação laser.....	63
4.3.3.2. Detecção da radiação espalhada.....	65
5. Conclusões.....	70
ANEXO	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

1. Introdução

Atualmente, as novas tecnologias surgem cada vez mais como inovadoras do modo de vida do homem moderno, seja facilitando tarefas antes complicadas ou, simplesmente, servindo como ferramenta para novos avanços.

Porém, um ponto nesta intrincada teia tecnológica chama muito a atenção. A utilização de radiação não ionizante, como ultravioleta, lasers, microondas e radio frequência, ficando em poucos exemplos, tem se tornado cada vez mais rotineiro em ambientes públicos e mesmo nos lares de todo o mundo.

Não se nega que tais avanços melhoraram muito a vida humana, porém, ainda dorme uma questão crucial a respeito da utilização deste tipo de radiação pelo público em geral: será que a exposição aos equipamentos que produzem este tipo de radiação fazem mal à saúde?

Não é de hoje que se sabe que a exposição excessiva aos raios ultravioleta emitidos pelo sol pode causar câncer de pele [1], mas e quanto às camas de bronzamento artificial que utilizam lâmpadas artificiais? E quanto aos apontadores laser vendidos sem controle nas lojas de artigos importados de qualquer grande cidade e manipulados até mesmo por crianças? E os fornos de microondas instalados na altura do útero das mulheres dentro das cozinhas de todo o mundo? E, por fim, os telefones celulares que operam com frequências elevadas em contato com o crânio do usuário, estes simples equipamentos da modernidade podem causar danos à saúde?

Centros de pesquisa e centros médicos que utilizam fontes de radiação não ionizantes também modernizaram-se e aperfeiçoaram suas técnicas para obter o máximo dos instrumentos e ferramentas, mas com o aumento da utilização destas fontes nestes locais, foi gerada uma polêmica quanto à exposição dos pesquisadores e trabalhadores à radiação espalhada dentro do ambiente.

Pesquisas que descrevem e determinam efeitos biológicos de lasers e radiação ultravioleta tem aumentado enormemente pelo mundo todo, tornando-se assunto de interesse público, pois é cada vez maior o número de pessoas que se submetem a cirurgias à laser, tratamentos odontológicos com uso de laser e

radiação UV, tratamentos estéticos com UV, além de profissionais destas áreas que manipulam as fontes de radiação não ionizante diariamente.

Uma vez determinados e quantificados os efeitos biológicos causados ao ser humano pelas radiações não ionizantes, também é preciso determinar e quantificar métodos para medir esta radiação. Muitos métodos já foram criados e estudados, porém, aquele que obteve maior sucesso devido à sua resposta automática é a medição de radiação não ionizante utilizando-se sensores semicondutores, como fotodiodos e fototransistores [2, 3, 4]. Mas estes equipamentos são muito caros para a maioria das instituições que se prestam a controlar a emissão desta radiação no ambiente.

Este fator financeiro faz com que muitos locais onde se usam lasers e fontes UV desprezem o controle de radiação espalhada no ambiente.

Foi pensando nisto que o IPEN, por meio do Departamento de Metrologia das Radiações, está propondo um novo método para monitoração de radiação não ionizante usando um cristal termoluminescente, o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Por meio da técnica de termoluminescência fotoestimulada (TLFE) aplicada à detecção do sinal TL dos dosímetros, é possível estudar diversos parâmetros como a sensibilidade de dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em função de diferentes tipos de laser e diferentes comprimentos de onda, efeito do diâmetro do feixe luminoso incidente no dosímetro, relação energética dos feixes com o sinal TL obtido, decaimento do sinal TL em função do tempo de armazenagem, efeitos da espessura do dosímetro na resposta, além da análise da reprodutibilidade do sinal após seguidos ciclos de exposição e obtenção do sinal termoluminescente. É possível também se determinar a exposição radiante a que um ambiente está submetido, de um modo mais barato e acessível a todos os centros médicos e de pesquisa que necessitem de um controle rigoroso na radiação espalhada.

A caracterização do método de TLFE para monitoração da radiação não ionizante espalhada é bastante promissora, pois, além da alta sensibilidade do material termoluminescente à radiação óptica na região UV. seu custo é baixo, o que permitirá um maior controle das radiações não ionizantes de fundo em laboratórios e centros cirúrgicos, para análise de riscos à saúde dos trabalhadores.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivos caracterizar e padronizar os detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ produzidos no Laboratório de Materiais Dosimétricos do IPEN para uso na monitoração das radiações não ionizantes, ultravioleta e laser, e efetuar os testes de desempenho que irão permitir o desenvolvimento de um sistema dosimétrico para avaliação da exposição recebida por profissionais da área de saúde, pesquisadores da área científica e do público em geral, bem como a monitoração ambiental e de área.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Conceitos sobre radiação não ionizante

Radiação não ionizante (RNI) é o termo usualmente aplicado a todas as formas de radiação eletromagnética as quais interagem com a matéria de outra forma que não seja a ionização, isto é, podem excitar a matéria eletronicamente ou deixá-la quimicamente ativa [3]. Além disso, a RNI refere-se à radiação eletromagnética com comprimentos de onda maiores que 100nm, equivalente a energias quânticas inferiores a 12eV, segundo a relação de Planck. Para o princípio de proteção à radiação, eletricidade estática, campos magnéticos, bem como o transporte de energia através da matéria na forma de vibração mecânica, como o ultra-som e o infra-som, podem ser considerados RNI [4].

O uso científico, médico, industrial e doméstico de equipamentos que produzem radiação não ionizante está expandindo-se rapidamente em tipo e número, aumentando assim sua presença no ambiente humano e causando inquietação quanto aos danos provocados à saúde pela radiação excessiva ou não controlada a trabalhadores e ao público em geral. Algumas destas fontes são radares, fornos de microondas, cabos elétricos, fontes laser e mais recentemente, telefonia móvel.

Para propósitos de proteção à saúde, a RNI eletromagnética pode ser subdividida em intervalos de comprimento de onda (λ) ou frequência (ν):

- radiação ultravioleta, $100\text{nm} \leq \lambda \leq 400\text{nm}$ (radiação óptica);
- radiação visível, $400\text{nm} \leq \lambda \leq 760\text{nm}$ (radiação óptica);
- radiação infravermelha, $760\text{nm} \leq \lambda \leq 1\text{mm}$ (radiação óptica);
- radiofrequência, incluindo microondas, $300\text{Hz} \leq \nu \leq 300\text{GHz}$, correspondente a $1000\text{km} \geq \lambda \geq 1\text{mm}$;
- campos de frequências extremamente baixas, $\nu \leq 300\text{Hz}$.

Para um ponto de vista pragmático, campos magnetostáticos e eletrostáticos também fazem parte da região de RNI.

Obviamente, esta não é a única classificação disponível, e, na prática, muitas outras classificações são usadas de acordo com necessidades particulares. Um tratado internacional, envolvendo participantes da União Internacional de Telecomunicações, dividiu o intervalo de 0 a 3THz em 12 bandas e alocou uso particular para algumas delas [5].

Proteção contra RNI é assunto crescente em estudos e publicações, porém a carência de consenso sobre terminologias e o uso de conceitos de proteção que diferem significativamente entre tipos de radiação e aplicação, torna difícil comparar vários estudos para compilar dados num caminho comum. Também, o desenvolvimento de regulamentações, padronizações e o conhecimento do público de conceitos sobre proteção à radiação são confundidos por esta vacância de uniformidade em terminologia, grandezas e unidades.

A Associação Internacional de Proteção Radiológica (AIPR) tornou-se responsável pelas atividades relacionadas à radiação não ionizante com a formação do Grupo de Trabalho sobre Radiação Não Ionizante em 1974. Este Grupo de Trabalho, mais tarde, tornou-se o Comitê Internacional sobre Radiação Não Ionizante (AIPR/CIRNI) num encontro da AIPR em Paris em 1977. E, em 1992, este comitê alcançou independência da AIPR e foi renomeado de Comissão Internacional de Proteção à Radiação Não Ionizante (CIPRNI). A AIPR/CIRNI e sua sucessora, a CIPRNI, reviram toda a literatura científica sobre RNI e fizeram estimativas de riscos à saúde humana para exposição à RNI. Em cooperação com a Divisão de Saúde Ambiental da Organização Mundial de Saúde (OMS), a CIPRNI responsabilizou-se pelo desenvolvimento de critérios e documentos sobre proteção à saúde contra RNI, os quais são publicados periodicamente e servem como guia para limites de exposição a este tipo de radiação.

2.1.1. Terminologias

Até 1930, o mundo técnico da fotometria era mais voltado à medida de grandezas luminosas que à radiações infravermelha (IV) e ultravioleta (UV). Após o desenvolvimento de fototubos e fotomultiplicadores, tornou-se possível medir e

usar a maioria dos espectros ópticos. O desenvolvimento de outros sensores, a partir da II Guerra Mundial, como os de estado sólido (fototransistores, fotodiodos, células solares semicondutoras, além de muitos outros) abriu caminho para a optoeletrônica.

Como nenhum destes detectores respondiam com a mesma sensibilidade espectral que o olho humano, a avaliação destas características tornou-se um problema radiométrico. As medidas fotométricas são, hoje, mais limitadas à indústria de iluminação e avaliação de cores, enquanto que a radiometria vem cada vez mais se desenvolvendo e tornando-se mais precisa. Hoje em dia pode-se afirmar que a fotometria tornou-se uma área específica da radiometria.

Portanto, parece existir um dualismo formal entre grandezas radiométricas e fotométricas, o que muitas vezes pode confundir indivíduos que venham querer saber mais sobre medição de radiação não ionizante. Isso pode ser sanado com a seguinte divisão [2, 4, 6]:

- *Radiometria*: trata da propagação e medida de grandezas do espectro óptico associadas ao campo de radiação eletromagnética de uma fonte (energia e potência, principalmente);
- *Fotometria*: trata da propagação e medida da radiação visível e utiliza unidades baseadas na reação do olho humano.

Sabe-se também que há uma relação algébrica entre grandezas foto e radiométricas [2, 3, 6], porém, no presente trabalho, estaremos mais voltados à energia (grandezas radiométricas) que à luminosidade.

A tabela 1, a seguir, traz as unidades usadas pelas principais grandezas foto e radiométricas.

Tabela 1: Comparação entre grandezas fotométricas e radiométricas.

Símbolo	Termo fotométrico		Termo radiométrico	
	Grandeza	Unidade	Grandeza	Unidade
Q	Energia luminosa	lm.s	Energia radiante	J
ϕ	Fluxo luminoso	lm	Fluxo radiante	W
E	Iluminância	lux (lm.m ⁻²)	Irradiância	W.m ⁻²
M	Emitância luminosa	lm.m ⁻²	Emitância radiante	W.m ⁻²
I	Intensidade luminosa	cd (lm.sr ⁻¹)	Intensidade radiante	W.sr ⁻¹
L	Luminância	cd.m ⁻²	Radiância	W.m ⁻² .sr ⁻¹

* Ver no Anexo as definições das grandezas mostradas na tabela 1.

2.1.2. Riscos

Como descrito anteriormente no item 2.1, a RNI interage com a matéria e, conseqüentemente, podem existir alguns riscos associados à exposição de partes do corpo humano à radiação. Portanto, é preciso fornecer algumas referências a respeito de exposições máximas permissíveis [3, 4, 7, 8], as quais são assunto crescente em estudos e publicações.

Para uma avaliação destes riscos ao organismo humano e possíveis meios de proteção, deve-se conhecer quantitativamente a ação da RNI em tecidos vivos. Isso depende de vários parâmetros envolvidos, como:

- fonte de radiação – comprimento de onda, distribuição da potência espectral e irradiância;
- características do detector – resposta espectral, precisão, resposta angular e região sensível de atuação;
- efeitos biológicos – ação do espectro nos tecidos expostos e limiares de irradiância.

Nos itens seguintes, será feita uma rápida explanação quanto aos riscos causados pelas fontes de RNI (laser e UV) e sua usual classificação.

2.1.2.1. Radiação laser

Com o avanço das aplicações do laser nas mais diversas áreas da tecnologia (medicina, processamento de materiais, comunicação) e também no uso doméstico (fac-símile, scanners, orientadores para deficientes visuais), tornou-se indispensável o conhecimento dos perigos que podem ser causados à saúde pela exposição aos feixes lasers.

Os órgão mais propensos a danos devido à radiação laser são os olhos e a pele. Os olhos são um sistema óptico constituído, sucintamente, por uma objetiva convergente (cristalino) que possui um diafragma de abertura (íris); as imagens dos objetos exteriores se formam na “camada sensível”, chamada retina [9]. Um desenho esquemático do olho humano é mostrado na figura 1. Um feixe de luz paralelo chegando ao cristalino será, portanto, focalizado sobre a retina o que torna a densidade energética nessa região muito maior ao valor que tinha quando o feixe foi convergido pelo cristalino.

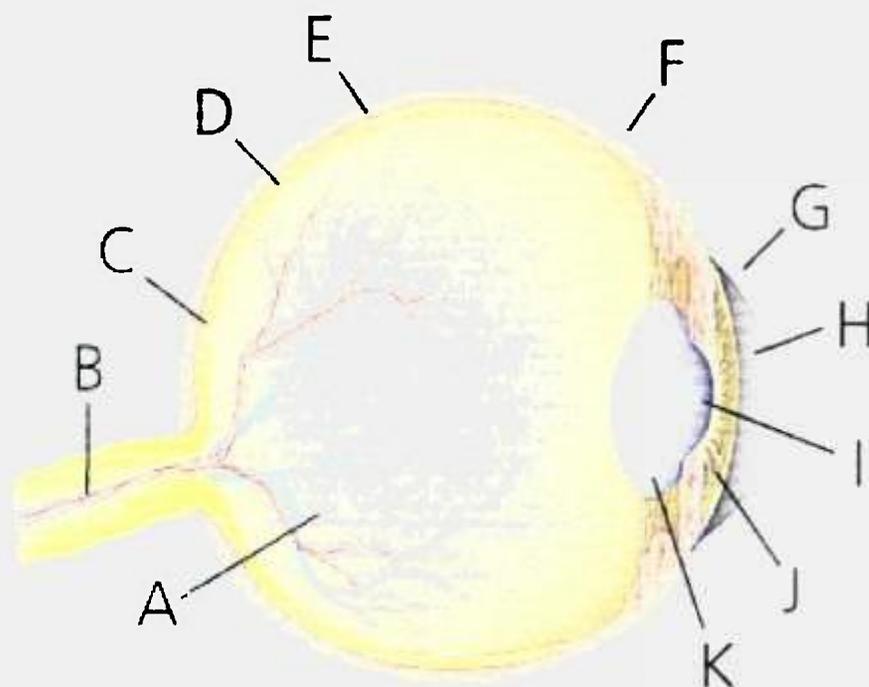


Figura 1: Esquema do olho humano.

A: humor vítreo, B: artéria central da retina, C: mácula, D: retina, E: coróide, F: esclerótica, G: córnea, H: câmara anterior, I: pupila, J: íris, K: cristalino (lente).

Os danos mais comuns aos olhos podem ser a destruição parcial da córnea e/ou da retina (comprimentos de onda num intervalo de 0,4 a 1,4 μ m) e a opacidade da córnea ou do cristalino, a última mais comumente chamada de catarata (causada pela região UV do espectro eletromagnético) [4, 10, 11].

A pele, por sua vez, é constituída de duas regiões principais, a epiderme, uma camada mais externa, e a derme, mais interna, como mostra a figura 2. A pele é mais sensível à região UV do espectro eletromagnético e os principais problemas associados a ela, devido à exposição a esta radiação, são eritema (vermelhidão da pele), envelhecimento precoce, ressecamento e até mesmo câncer causado por quebras cromossômicas principalmente na região da epiderme. Dependendo da energia radiante e do tempo de exposição, pode ocorrer carbonização do tecido [10, 11, 12].

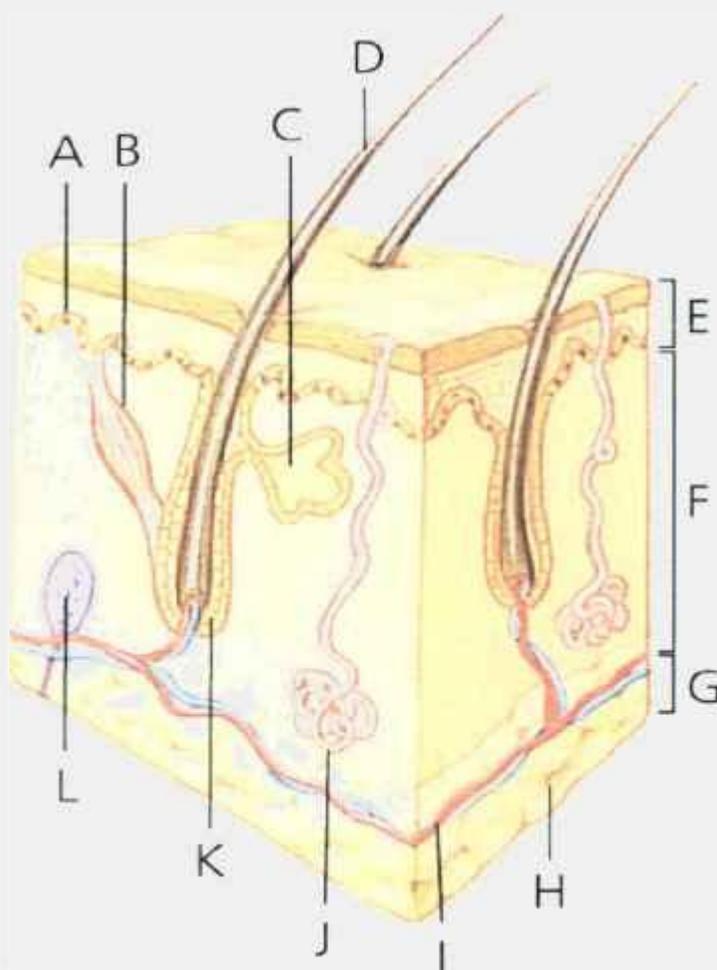


Figura 2: Esquema da pele humana.

A: melanócitos, B: músculo, C: glândula sebácea, D: pêlo, E: epiderme, F: derme, G: tecido subcutâneo, H: gordura, I: vasos do sistema circulatório, J: glândula sudorípara, K: folículo capilar, L: corpúsculo de Pacini.

Além destes riscos já citados, deve-se ter em mente que podem ocorrer acidentes elétricos, principalmente com lasers de alta potência, devido à presença de altas tensões, porém, o interesse deste trabalho é tratar dos perigos devido à radiação óptica, não levando em consideração este fator.

Para fins de classificação de periculosidade dos lasers, o Instituto Americano de Padrões Nacionais, por meio da regulamentação ANSI Z-136.1 [7], determinou a seguinte divisão entre classes de periculosidade para fontes laser:

- *classe 1* – lasers ou sistemas lasers que, sob condições de operação normais, não causam perigo devido à baixa potência ou devido à sua isolação do campo visual do trabalhador ou indivíduo do público;
- *classe 2* – lasers ou sistemas lasers que, devido à resposta de aversão do olho (piscadelas, movimento), não apresentam perigo; somente haverá algum dano se visualizado diretamente durante um longo intervalo de tempo. Lasers desse tipo emitem radiação espectral na região visível e têm limite máximo de potência em 1mW;
- *classe 3a* – lasers ou sistemas lasers que devem ser manuseados com cuidado, mas que normalmente não causam prejuízo aos olhos se vistos por apenas alguns momentos (dentro do período de resposta de aversão do olho – 0,25s) sem proteção. Porém, podem causar sérios riscos se vistos com o uso de lentes (óculos, lentes de contato). Lasers desse tipo emitem radiação espectral também na região do visível, tendo limite máximo de potência em 5mW;
- *classe 3b* – lasers ou sistemas lasers perigosos se vistos diretamente ou refletidos especularmente, porém, com o auxílio de refletores difusos torna-se passível de observação e sem riscos, com as condições de que o observador mantenha-se no mínimo a 50mm do refletor e num tempo máximo de focalização do feixe de 10s. Lasers desse tipo emitem na região visível ou invisível e não ultrapassam um limite de 0,5W para lasers de operação contínua ou 10^5J.m^{-2} para lasers pulsados;
- *classe 4* – lasers ou sistemas lasers que podem ser perigosos, não somente devido aos feixes diretos ou à reflexão especular, mas também às reflexões difusas. Estes tipos de lasers podem ser bastante prejudiciais à pele além de poder iniciar chamas.

2.1.2.2. Radiação ultravioleta

Como o laser, a radiação UV também está sendo vastamente aplicada em diversos campos hoje em dia (cura de tintas, fotolitografia industrial, fotomedicina, esterilização de instrumentos e alimentos) o que leva a questões quanto à periculosidade dessa região do espectro óptico à saúde humana.

A principal forma de interação da radiação UV com a matéria é por meio de efeitos fotoquímicos, funcionando apenas como um catalisador para determinadas reações, causando, assim, os principais danos aos olhos e à pele do ser humano.

Dentre os problemas que podem ser causados aos olhos pela radiação UV estão a cerato-conjuntivite (inflamação da córnea e da conjuntiva), com maior sensibilidade de absorção ao comprimento de onda de 270nm; lesões na retina (causadas pela exposição a fontes com alto fluxo radiante) e opacidade do cristalino (catarata), causado principalmente na região de 295 a 325nm [3, 4, 12].

Os danos causados à pele pela exposição à região UV são eritema (sensibilidade na região de 200 a 400nm), envelhecimento precoce, descamação, além de câncer (principalmente devido à exposição crônica à região entre 280 a 315nm). Também são registradas doenças causadas por substâncias chamadas fototoxinas, que permanecem na pele e ativam-se quimicamente quando expostas à radiação UV. Alguns exemplos de fototoxinas são drogas comuns (anti-sépticos, tranqüilizantes, antibióticos e agentes fungicidas) ou produtos industrializados (corantes sintéticos) [3].

Além desses danos causados aos tecidos humanos, a radiação UV pode produzir espécies tóxicas no ar (principalmente o ozônio – O₃) que são prejudiciais ao ser humano quando inaladas.

Para propósitos de padronização e contenção da irradiância abaixo de valores da exposição máxima permissível, a região UV foi dividida em três intervalos a saber:

- *UVA* – região do espectro ótico que estende seu comprimento de onda desde 315nm até 400nm;
- *UVB* – região do espectro ótico que estende seu comprimento de onda desde 280nm até 315nm;
- *UVC* – região do espectro ótico que estende seu comprimento de onda desde 100nm até 280nm.

Esta divisão é a mais comumente usada e foi proposta pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) por meio da sua regulamentação *CIE n. 17 E-1.1* [13].

2.2. Termoluminescência

Alguns materiais cristalinos, quando aquecidos, após serem expostos à radiação ionizante, apresentam a propriedade de emitir luz. Este fenômeno é conhecido como termoluminescência (TL).

TL é um nome dado incorretamente a este fenômeno; isso se deu devido ao senso comum de nomear processos luminescentes como catodoluminescência, eletroluminescência e bioluminescência; *o calor não é um agente de excitação na TL, mas somente um estimulante*. A excitação é alcançada por qualquer agente convencional como radiação ionizante, radiação UV, vibrações ou tensões mecânicas, reações químicas, etc. Portanto, termoluminescência é o fenômeno de emissão luminescente após a remoção da excitação de um material com o aumento da temperatura; daí, deve-se definir a TL como sendo uma liberação termicamente estimulada da energia armazenada em um material (na forma de radiação óptica) [14].

A primeira observação do fenômeno TL está datada em 1663, por observações realizadas por Robert Boyle, notificadas à “Royal Society” [15, 16]. Ele notou uma emissão luminosa de um diamante quando este fora aquecido em um quarto escuro. Daí em diante muitos outros cientistas estudaram esse efeito em outros materiais, porém, somente em 1904, com Marie Curie, soube-se que era possível restaurar propriedades TL de cristais expondo-os à radiação ionizante. Um modelo teórico só foi obtido com Urbach [15], na década de 30 e, posteriormente, em 1945, foram desenvolvidos modelos teóricos que permitiam cálculos quantitativos da cinética TL, com Randall e Wilkins [14, 15, 16].

2.2.1. Entendimento do fenômeno TL

O fenômeno TL é geralmente explicado com o auxílio do diagrama de bandas de energia dos sólidos. Pode-se imaginar a banda proibida contendo alguns níveis metaestáveis doadores/aceitadores de elétrons, que são basicamente responsáveis pela TL observada.

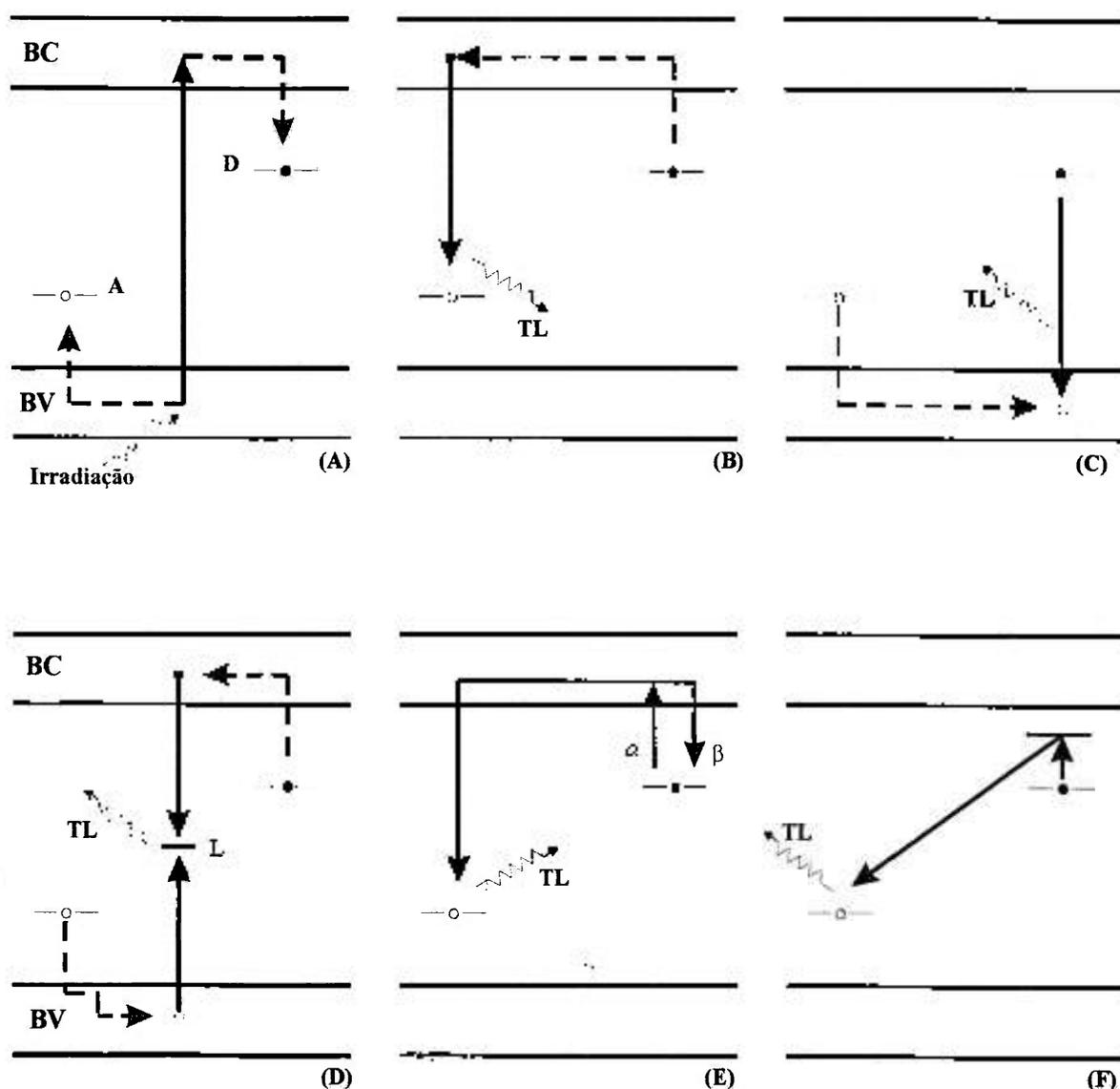


Figura 3: Modelo do diagrama de bandas para o processo TL em um cristal isolante; (A)- sob irradiação; (B)-(F) processos de recombinação sob aquecimento [15].

Como ilustra a figura 3, a interação da radiação ionizante com o sólido resulta em uma transferência de energia suficiente ao elétron (●) na banda de

valência (BV) capaz de ejetá-lo para a banda de condução (BC). Esse processo, geralmente, requer energias da ordem de 10eV (para um típico cristal iônico), e é realizado por elétrons secundários que são produzidos pelos fotoelétrons que chegam ao material. Uma grande quantidade desses elétrons “ejetados” retorna imediatamente ao estado fundamental, acompanhado ou não de emissão de luz (causando fluorescência e aquecimento interno). Entretanto, uma fração deles pode ser capturada em níveis doadores D , com as lacunas () correspondentes nos níveis aceitadores A (figura 3 – A).

De acordo com a distribuição de Maxwell-Boltzmann, a vida média de um elétron (ou lacuna) armazenado pode ser expresso por [15, 16]:

$$\frac{1}{\tau} = s \cdot e^{\left(\frac{-E}{kT}\right)} \quad (1)$$

onde: τ - vida média;

s - fator de frequência de movimento dos elétrons na armadilha;

E - energia de ativação térmica que caracteriza a profundidade da armadilha;

k - constante de Boltzmann ($= 8,617 \cdot 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$);

T - temperatura do cristal.

Se as armadilhas não forem muito profundas, o desarmadilhamento e a recombinação podem ocorrer à temperatura ambiente, resultando num curto período de meia vida da energia armazenada.

Somente se as armadilhas forem profundas o suficiente haverá uma estabilidade à temperatura ambiente (meia vida dos elétrons armadilhados durando meses) e o efeito torna-se de interesse dosimétrico.

Os níveis doador e aceitador são estados metaestáveis relacionados aos defeitos cristalinos (incluindo impurezas). Como o cristal está sendo aquecido, os elétrons e as lacunas que permanecem armadilhados vão ganhando energia até esta ser igual ou superior à energia de “liberação” de cada partícula. Assim, os portadores de carga têm energia suficiente para se mover no material (figuras 3 – B e 3 – C) e, posteriormente, recombinar-se com seu par, emitindo luz. Em muitos fósforos TL é possível que elétrons e lacunas sejam desarmadilhados quase que ao mesmo tempo e recombinem-se num local

específico chamado centro luminescente ou centro de recombinação L (figura 3 – D).

Também tem-se uma probabilidade finita de rearmadilhamento (β) do portador de carga depois de ser desarmadilhado (figura 3 – E). Segundo Nambi [15], quando esta probabilidade é significativa, a resposta TL torna-se diferente daquela encontrada com β desprezível.

Há também situações em que o portador desarmadilhado recombina-se diretamente sem ter de ser excitado. Este é um caso de TL envolvendo centros de luminescência isolados com probabilidade constante no tempo (figura 3 – F).

A quantidade de luz emitida é mensurável, aumentando sua intensidade com a população de elétrons ou buracos armadilhados, conforme o tipo de armadilha. Ela cresce com a dose absorvida pelo cristal até atingir um máximo. Desta forma, a luz medida na emissão TL depende da população de elétrons, ou buracos, que, por sua vez, depende da dose absorvida pelo cristal. Em alguns materiais TL a quantidade de luz emitida cresce, de início linearmente com a dose absorvida de radiação, observando-se posteriormente um crescimento mais rápido do que o linear. A este último comportamento dá-se o nome de supralinearidade, que está representado na figura 4.

Muitos mecanismos foram propostos para tentar explicar esse fenômeno de supralinearidade nos fósforos TL, porém, as afirmações de Zimmerman [17] são as mais usuais, pois relacionam quantitativamente os portadores de carga armadilhados a sua probabilidade de emissão de fótons.

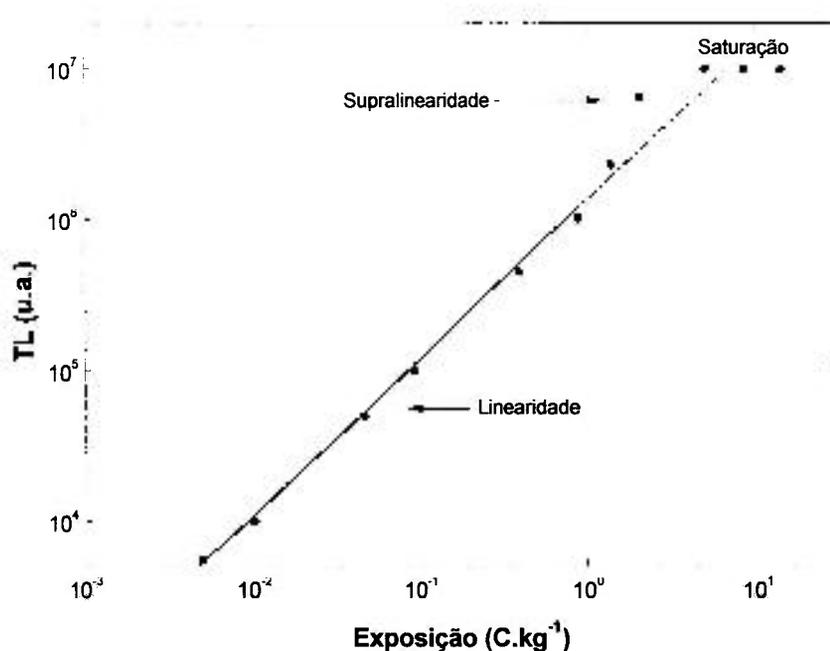


Figura 4: Curva típica de resposta TL de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em função da exposição [16].

2.2.2. Termoluminescência fotoestimulada ou fototransferida

Termoluminescência fotoestimulada (TLFE) é um processo onde os portadores de carga são transferidos das armadilhas profundas para aquelas rasas de interesse dosimétrico. Isso é alcançado expondo-se, previamente, os fósforos TL à radiação ionizante, depois tratando-os termicamente a uma dada temperatura e, por fim, expondo-os à radiação não ionizante. Outro método de dosimetria das radiações não ionizantes, através de dispositivos do estado sólido, é a termoluminescência fotoinduzida (TLFI), isto é, os dosímetros são expostos diretamente à fonte de radiação não ionizante e fornecem uma resposta TL proporcional à dose absorvida. Este último método não será abordado neste trabalho, pois as características do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ melhor se aplicam ao processo TLFE [3, 18].

A primeira tentativa de medir TLFE em fósforos TL usando radiação UV foi com Lyman, em 1935. Ele mediu a transparência do ar para comprimentos de onda de 110 – 130nm usando $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ [18].

Como já descrito anteriormente, para a energia armazenada nos fósforos ser medida é preciso ultrapassar a barreira de potencial das armadilhas por meio da estimulação térmica. Isto é uma das características da TL. Agora, o processo de estimulação dos portadores de carga se dá através da incidência luminosa, o que caracteriza a TLFE.

Como visto na figura 5, a irradiação preenche parcial ou totalmente as armadilhas rasas (S) e profundas (P) do cristal (figura 5 – A). Um tratamento térmico adequado esvazia somente as armadilhas rasas (figura 5 – B). Finalmente, a luz fornece energia suficiente para os elétrons libertarem-se das armadilhas profundas tornando-se excitados (figura 5 – C); estes podem ser recapturados nas armadilhas rasas. A leitura TL realizada posteriormente revela a TLFE dessas armadilhas repopuladas.

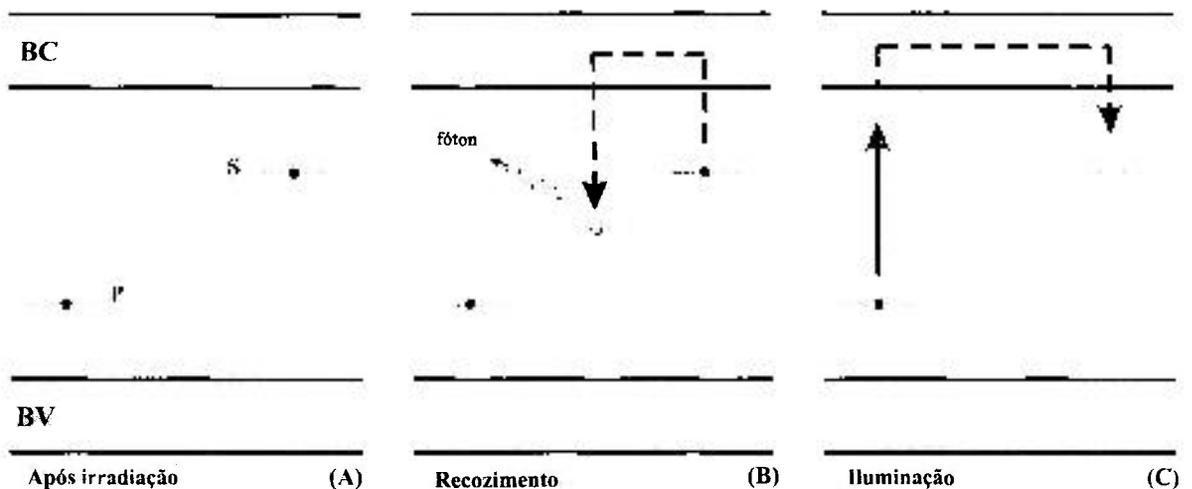


Figura 5: Modelo do diagrama de bandas para o processo TLFE.

Não é somente devido ao procedimento descrito acima que um fósforo TL, necessariamente, torna-se um fósforo TLFE, alguns requisitos são necessários, como [19]:

- alta taxa de luminescência fotoestimulada para diminuir ruídos e também melhorar a absorção de baixas doses de radiação;

- linearidade entre a intensidade TLFE e a dose da radiação recebida pelo fósforo em um grande intervalo, o que diminui problemas com o decaimento do sinal;
- baixa taxa de decaimento do sinal com o tempo de estocagem, o que indica estabilidade na leitura TL;
- alta densidade do material para aumentar a absorção de radiação;
- espectro de estimulação ótimo para um dado comprimento de onda;
- grande secção de choque;
- baixo espalhamento.

Logicamente, nem todos os fósforos utilizados em TLFE detém todas estas características, porém, pode-se encontrar um compromisso razoável entre elas.

Já foi comprovado que a TLFE é muito dependente do comprimento de onda e do tamanho do grão utilizado para confecção dos dosímetros [20, 21, 22]. As pastilhas de $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ têm sua sensibilidade à radiação não ionizante dentro da região UV e, quanto menor for o grão dos cristais, maior essa sensibilidade devido à maior penetração dos feixes luminosos na pastilha.

É importante lembrar que hoje em dia a radiação não ionizante é vastamente empregada nas mais diversas áreas como saúde, indústria, entretenimento, além de todos nós, em geral, estarmos constantemente expostos aos raios ultravioleta do sol. Portanto, a técnica de TLFE tende a ser bastante útil na determinação da “quantidade de luz”, ou mais especificamente, a irradiância que, porventura, possa ser recebida tanto por trabalhadores das áreas correlatas ou pela população, já que os equipamentos existentes para tal tarefa, fotodiodos e fototransistores, são muito caros [23, 24].

2.3. Sulfato de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$)

Os fósforos de sulfato de cálcio (CaSO_4), juntamente com o fluoreto de cálcio (CaF_2), foram um dos primeiros materiais termoluminescentes estudados para medir radiação UV [17, 20]. Com o passar dos anos, estes materiais foram sendo aperfeiçoados e, fabricados sinteticamente em laboratório em meados do século passado e começaram a ser usados para monitoração de radiação ionizante.

O sulfato de cálcio tem um número atômico efetivo alto, $Z_{ef} = 15,3$, e por isso sua dependência energética é alta na região de energia de predominância de efeito fotoelétrico. Entretanto, nas suas diversas formas de preparação e dopagem, este é um dos materiais mais sensíveis à radiação não ionizante disponível para uso.

De todas suas variações, o CaSO_4 dopado com disprósio (Dy) é o material mais popular utilizado para medição de radiação. Seu pico termoluminescente principal é observado em 220°C , com dois outros picos instáveis a baixas temperaturas, em 80 e 120°C . Um outro pico a 300°C aparece quando o material é exposto a valores de radiação acima do limite de linearidade (100Gy) [18], como mostrado na figura 6.

A emissão espectral dos picos luminescentes está em 478 e 571nm . O decaimento óptico do sinal TL é de 3% ao mês [18].

O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ($0,1\%$ mol de Dy) usado no trabalho é produzido pelo Laboratório de Materiais Dosimétricos do IPEN pelo método de evaporação em sistema selado desenvolvido no próprio IPEN [25, 26]. O cristal de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, depois de triturado, é misturado ao Teflon[®] e, as pastilhas prensadas a frio, são sinterizadas em atmosfera ambiente.

As pastilhas utilizadas no trabalho são as mesmas que o IPEN comercializa para monitoração da radiação ionizante individual, ambiental e de área.

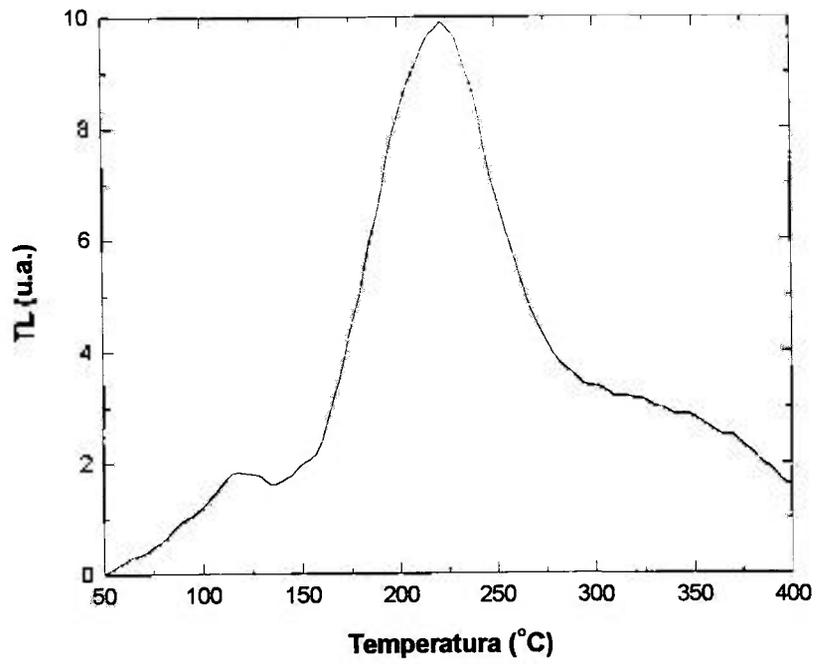


Figura 6: Curva típica de emissão termoluminescente do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ [18].

3. Materiais e métodos

3.1. Características das amostras

Os detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ caracterizados para aplicação na dosimetria das radiações laser e UV são produzidos no Laboratório de Materiais Dosimétricos do próprio IPEN [25, 27, 28].

Foram utilizados três tipos de pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (35% da massa total) com tamanho de grãos entre 85 a 185 μm , contendo Teflon[®] como agregante, cujas principais características são mostradas na tabela 2.

Tabela 2: Características físicas dos detectores TL utilizados.

Detector	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa total (mg)	Sensibilidade gama relativa	Decaimento térmico do sinal (ao mês)
CaSO ₄ :Dy + Teflon [®] (N)	0,80	6	50	1,00	3%
CaSO ₄ :Dy + Teflon [®] (F)	0,35	6	20	0,53	3%
CaSO ₄ :Dy + Teflon [®] + grafite (G)	0,35	6	20	0,01	3%

Durante o desenvolvimento deste trabalho, estes detectores foram denominados *N*, *F* e *G*, respectivamente. O detector *G* contém 10% da massa total constituída de grafite.

3.2. Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos usados são mostrados na tabela 3.

O tratamento de maior tempo foi efetuado em um forno tipo mufla da EDG. O forno varia $\pm 4^{\circ}\text{C}$, na região de 300°C , em regime de equilíbrio térmico depois de 3h em operação contínua.

Os demais tratamentos das pastilhas foram realizados em um forno de microondas MAS 7000 da CEM Co., com variação de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Após o tratamento, as amostras são resfriadas rapidamente à temperatura ambiente entre duas placas de alumínio com espessura de 1mm, que servem como suporte para as amostras durante os tratamentos térmicos realizados.

Todos os procedimentos de tratamento térmico seguem, rigorosamente, as publicações nacionais e internacionais [20, 29, 30].

Tabela 3: Tratamentos térmicos usados nos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo (h)
Pré-irradiação gama	300	15
Pré-exposição UV	300	0,5
Pré-exposição laser	300	0,25
Controle de reprodutibilidade	400	1

O procedimento de controle de reprodutibilidade das pastilhas se faz necessário após, aproximadamente, quinze ciclos de leitura TLFE das amostras, uma vez que elas começam a tornar-se opacas, impedindo a absorção da luz, o que ocorre devido a repetidos aquecimentos e também ao manuseio o que as torna um pouco amareladas. Isto faz com que ocorra uma queda no sinal TLFE obtido.

3.3. Irradiação gama

Foram utilizadas cinco fontes distintas para a irradiação dos detectores, as quais são listadas na tabela 4.

As amostras sempre permaneceram sob condições de equilíbrio eletrônico entre placas de acrílico com 3mm de espessura, sendo irradiadas sempre no ar.

Tabela 4: Fontes de radiação gama utilizadas.

Número	Radionuclídeo	Atividade* (GBq)	Distância fonte – amostras (cm)
1	^{60}Co	50.123	10
2	^{60}Co	17.929	100
3	^{60}Co	0,064	34
4	^{60}Co	69,6	166,5
5	^{137}Cs	687	81,5

* Atividades medidas no dia 01/06/2001.

Apenas a fonte número um não pertence ao Laboratório de Metrologia das Radiações, pertence ao Centro Tecnológico de Radiações (CTR) do IPEN.

A fonte de irradiação do bunker pertencente ao CTR foi utilizada para irradiar as amostras com doses superiores a 5Gy, enquanto as demais fontes radioativas serviram para irradiações com doses menores. Estas doses menores foram usadas na calibração e selecionamento TL das amostras para a posterior análise TLFE.

As distâncias fonte – amostra foram otimizadas para cada fonte para o campo de radiação cobrir uniformemente toda a área ocupada pelas amostras colocadas entre as placas de acrílico, que garantem o equilíbrio eletrônico.

3.4. Exposição UV

O sistema de irradiação UV consiste em uma lâmpada de gás de mercúrio pressurizado HBO 200W da Osram (Alemanha) acoplada a um monocromador Kratos GM 200 (EUA) com fendas variáveis, sensível à região de 200 a 700nm, além de um fotodetector modelo 580 – 25A da EG&G (EUA), sensível à região de 200 até 800nm com seu respectivo controlador, modelo 580 – 11A.

As principais linhas de emissão espectral da lâmpada de mercúrio estão concentradas nos comprimentos de onda de 185, 254, 313, 365, 405, 436 e 546nm [2, 31].

O arranjo do sistema de exposição à fonte UV é montado dentro de uma estrutura fechada para impedir a entrada de outras fontes de luz e radiação luminosa ambiente, principalmente.

O procedimento padrão adotado foi o de colocar uma amostra por vez no porta amostra, sempre num ângulo de 0° da fonte UV, isto é, a face sensível da amostra é totalmente voltada para o feixe incidente. Isto garante a melhor absorção do espectro luminoso. A distância fonte UV – amostra foi variada conforme desejava-se maior ou menor irradiância sobre a amostra. Cada ponto TLFE analisado é a média de cinco amostras expostas à radiação UV e seu erro, o desvio padrão da média (1σ) [16, 20].

O fotodetector foi posicionado exatamente no mesmo local em que a amostra foi colocada, imediatamente antes e depois da exposição UV das amostras. Também foi colocado um anteparo possuindo o mesmo diâmetro das amostras sobre a região sensível do fotodetector. Estes procedimentos foram escolhidos para diminuir possíveis acúmulos de erros na leitura da irradiância da amostra.

3.5. Exposição laser

Os lasers, seus comprimentos de onda e os respectivos fotodetectores utilizados para exposição das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ são mostrados na tabela 5.

Todos os equipamentos descritos na tabela 5 pertencem ao Centro de Lasers e Aplicações (CLA) do IPEN, exceto os lasers excímero (ArF), que pertencem ao Centro Cirúrgico Oftalmológico da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), e o diodo, que pertence ao Laboratório de Calibração do Departamento de Metrologia das Radiações do próprio IPEN.

Os lasers de Nd:YAG pertencem ao Laboratório de Protótipos Laser do CLA. Estes lasers foram desenvolvidos no próprio IPEN pelo Prof. Dr. Wagner de Rossi e são usados para pesquisa e aplicações industriais. As medidas de energia e potência foram feitas por um controlador Coherent modelo Fieldmaster digital e cabeça fotodetectora LM P10i.

O laser de argônio pertence ao Laboratório de Espectroscopia Atômica, também do CLA. Este laser é da marca Spectra Physics, modelo 171, utilizando uma fonte modelo 270. Para medir a potência deste laser utilizou-se um controlador Ophir Optronics Ltda. juntamente com uma cabeça fotodetectora PD 300SH.

Outro laser utilizado foi o de nitrogênio, que pertence ao Laboratório de Espectroscopia Óptica do CLA. O laser é da marca Photonics, modelo UV-24, com 10mJ por pulso operando em 10Hz e largura temporal de pulso de 10ns. Para que o diâmetro do feixe laser fosse o mesmo das amostras, foi utilizado um obturador com diâmetro de fenda variável, colocado a 15cm da fonte laser. A medição da energia foi feita por meio de um controlador Ophir, modelo Nova Display, juntamente com uma cabeça detectora da marca Ophir, modelo 30A-P-SH.

O laser diodo pertencente ao Laboratório de Calibração do Departamento de Metrologia das Radiações do IPEN é da marca LaserMax, modelo MDS, e possui uma potência de 0,92mW. Este laser é utilizado como localizador (*pointer*)

dos equipamentos (câmaras de ionização) nas aplicações e pesquisas realizadas com raios X dentro do laboratório.

Tabela 5: Lasers e detectores utilizados no estudo da resposta TLFE do CaSO₄:Dy.

Tipo de laser	Comp. de onda (nm)	Método de oscilação	Medidor e cabeça detectora utilizados
Nd:YAG	1.060	Pulsado (10Hz)	Controlador Coherent modelo Fieldmaster digital e cabeça fotodetectora LM P10i
Nd:YAG	1.060	Contínuo	Controlador Coherent modelo Fieldmaster digital e cabeça fotodetectora LM P10i
Diodo	670	Contínuo	Controlador Coherent modelo Fieldmaster digital e cabeça fotodetectora LM P10i
Argônio	488	Contínuo	Controlador Ophir Optronics Ltda. e cabeça fotodetectora PD 300SH
Argônio	476,5	Contínuo	Controlador Ophir Optronics Ltda. e cabeça fotodetectora PD 300SH
Nitrogênio	337	Pulsado (10Hz)	Controlador Ophir Nova Display e cabeça fotodetectora 30A-P-SH
Excímero (ArF)	193	Pulsado (200Hz)	Controles eletrônicos do próprio sistema

3.5.1. Laser excímero

Este tipo de laser é vastamente utilizado na área oftalmológica em cirurgias refrativas corneanas. Foram realizados, nas dependências do Centro Cirúrgico Oftalmológico da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), experimentos para determinação de radiação espalhada no ambiente, além de primeiros ensaios quanto à radiação laser espalhada que é absorvida pelos trabalhadores da área de saúde, além do próprio paciente submetido à cirurgia.

O laser utilizado é do tipo exímero de ArF, LadarVision Autonomous, modelo Ladar 4000, comprimento de onda de 193nm, modo de oscilação pulsado (10ns) operando em 200Hz, energia por pulso da ordem de 3mJ, diâmetro do feixe de 0,9mm e fluência na região entre 180 e 240mJ.cm⁻². Também possui um *tracker* na região de infravermelho (905nm), com frequência de 4kHz.

Este estudo foi realizado em duas partes primordiais. Num primeiro estágio do trabalho, as amostras de CaSO₄:Dy foram expostas diretamente ao feixe laser a uma distância de 20cm da fonte. Cada ponto analisado é a média de cinco detectores expostos às mesmas condições. Isto serviu para verificar o comportamento das amostras em relação ao sistema laser da Unifesp. Na segunda parte do trabalho, na cirurgia refrativa de cinco pacientes escolhidos aleatoriamente, alguns detectores foram colocados em pontos de interesse: testa do paciente (0,15m – distância fonte-amostra), testa do cirurgião (0,5m), testa do instrumentador (1m), e paredes internas da sala (1,5m e 4m), como mostra a figura 7.

Para o procedimento de análise de radiação espalhada, foi proposto um método de envio das amostras por meio de serviços de postagem pelo correio (Sedex[®]) entre IPEN e Unifesp. As amostras utilizadas na experiência foram embaladas em plástico antiestático e foram chamadas *amostras de análise*. Outras três amostras, chamadas *controle*, foram embaladas no mesmo tipo de plástico e enviadas junto com as *de análise*; estas serviriam para averiguar se, no caminho IPEN-Unifesp-IPEN, houve algum acúmulo de sinal detectável, não sendo manipuladas. Outras três amostras, chamadas *contra-prova*, foram mantidas no IPEN em blindagem de chumbo para serem comparadas com as *de*

controle para total certificação de que nenhum sinal espúrio influenciou as medidas TLFE subseqüentes à exposição laser. Todos os procedimentos de embalagem e envio seguiram recomendações internacionais [15, 33], exceto pelo envio via correio, procedimento proposto pelos pesquisadores envolvidos nesta pesquisa.

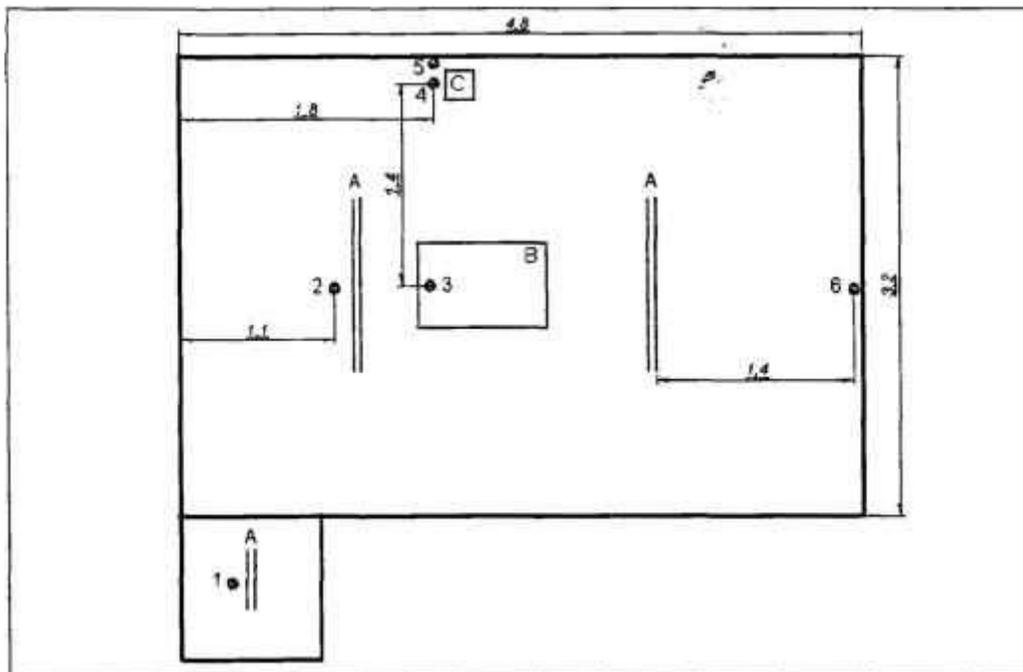


Figura 7: Lay-out da sala de cirurgias refrativas corneanas da Unifesp e posicionamento das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (dimensões em metros):
 1 – Sala de esterilização; 2 – Cirurgião; 3 – Paciente; 4 – Instrumentador; 5 – Parede lateral (computador); 6 – Parede do fundo.
 A – Lâmpadas; B – Laser; C – Computador.

Todos os procedimentos para realização das análises lasers utilizando pacientes tiveram sua aprovação pelo comitê de ética em pesquisa da Unifesp*.

Em cada cirurgia, as amostras ficaram expostas à radiação aproximadamente por 10min. A amostra que está indicada na sala de esterilização é uma amostra que se desloca com o instrumentador desta sala para a sala de cirurgia. Este procedimento, o da esterilização, serve para eliminar microorganismos do material utilizado na cirurgia por meio de aquecimento. Nem o médico nem o paciente passam por esta sala.

* <http://www.unifesp.br/admin/orgaos/comites/etica/index.htm>

3.6. Leituras TL e TLFE

Para as leituras TL e TLFE das pastilhas foi utilizado um leitor Harshaw modelo 2000 AB, com taxa de aquecimento linear de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ e sob um fluxo constante de N_2 gasoso a $1,5\text{dm}^3$.

O ciclo de leitura TL foi realizado durante 26s em intervalos de temperatura de integração que variaram de 145 a 220°C (amostras **N**), 110 a 200°C (amostras **F**) e 120 a 190°C (amostras **G**). Estas variações no intervalo de integração se fizeram necessárias devido ao fato do sinal TL ser diretamente proporcional a concentração de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ nas amostras. As amostras **N**, sendo as de maior concentração de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, têm o intervalo em temperaturas mais altas, decrescendo este intervalo para as outras amostras, **F** e **G**.

Para a leitura do sinal TLFE das amostras foi utilizado um ciclo de leitura de 32s e intervalo de integração de 170 a 270°C . Este sinal foi obtido após 24h da exposição à radiação UV ou laser. As amostras foram armazenadas, à temperatura ambiente, em blindagem de chumbo.

Cada ponto apresentado nas análises é a média extraída de cinco amostras e adotou-se como erro o desvio padrão da média (1σ).

4. Resultados e discussões

4.1. Características físicas das amostras

Inicialmente, com 100 pastilhas de cada tipo **N**, **F** e **G** depois de prensadas e sinterizadas no Laboratório de Materiais Dosimétricos do IPEN, foi analisado a variação da massa de todas elas para minimizar possíveis erros na determinação da dose absorvida pelas mesmas. Os dados obtidos são mostrados na tabela 6.

Tabela 6: Valor médio da massa dos detectores.

	N	F	G
<i>Média (mg)</i>	49,81	20,85	19,87
<i>Desvio padrão (mg)</i>	0,81	1,18	0,37
<i>Erro relativo (%)</i>	1,64	5,68	1,89

Para a realização das medidas de massa das pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, foi usada uma balança Mettler modelo H35 devidamente calibrada.

A partir desta primeira análise, todas as pastilhas foram numeradas em uma das superfícies com lápis de grafite para identificação, sendo expostas a $25,8\mu\text{C.kg}^{-1}$ de radiação gama usando a fonte número 3 da tabela 4. Após exposição à radiação gama, o sinal TL de todas as pastilhas foi obtido por meio do leitor TL. Este processo foi repetido 5 vezes e, calculada a sensibilidade média ao final, foram selecionadas apenas aquelas que permaneceram num intervalo de reprodutibilidade de $\pm 5\%$ (1σ) [20]. Conseguiu-se, nesse selecionamento, aproveitar 60% das pastilhas **N**, 75% das pastilhas **F** e 45% das pastilhas **G**. Uma explicação para o baixo rendimento das pastilhas tipo **G** é que a homogeneização dos constituintes deste tipo específico de pastilha – $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, Teflon[®] e grafite – não é satisfatória, isto é, sendo o efeito TL um efeito de superfície nesse tipo de

amostra, o grafite pode atrapalhar a absorção de radiação por parte do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, que é o material sensível.

Após o selecionamento das pastilhas, foi obtida a curva de calibração das amostras selecionadas a fim de se conhecer sua sensibilidade e também o fator de calibração dos lotes. As curvas de calibração para os três tipos de detectores, obtidas para radiação gama de ^{60}Co e ^{137}Cs , fontes 4 e 5 da tabela 4, no intervalo de doses de 1 a 20mGy, podem ser vistas na figura 8.

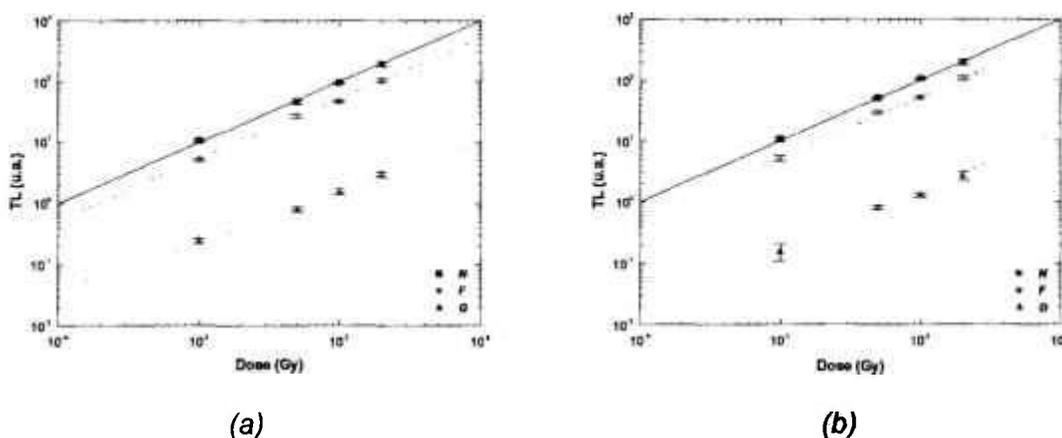


Figura 8: Curvas de calibração das pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ usando-se fontes (a) ^{60}Co e (b) ^{137}Cs .

Na tabela 7 são mostradas as principais características das amostras obtidas a partir das curvas de calibração.

A sensibilidade gama, como mostrada na tabela 2 e também agora, em unidade de leitura TL por dose absorvida, já era esperada, pois nas pastilhas **N** há uma massa maior do elemento sensível ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$), o qual diminui nas demais pastilhas, **F** e **G**. Nas amostras **G**, ainda há a agravante de sua opacidade devido à grafite.

Tabela 7: Características de calibração das pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

	N	F	G
Sensibilidade para ^{60}Co (nC.Gy $^{-1}$)	10.530 \pm 470	5.130 \pm 302	244 \pm 25
Sensibilidade para ^{137}Cs (nC.Gy $^{-1}$)	10.480 \pm 418	5.140 \pm 371	254 \pm 18
Sensibilidade relativa	1,00 \pm 0,08	0,49 \pm 0,05	0,024 \pm 0,003

O fator de dependência energética f_E das amostras foi determinado pela relação [25]:

$$f_E = \frac{TL(^{137}\text{Cs})/D_{^{137}\text{Cs}}}{TL(^{60}\text{Co})/D_{^{60}\text{Co}}} = \frac{S_{^{137}\text{Cs}}}{S_{^{60}\text{Co}}} \quad (2)$$

onde: $S_{^{137}\text{Cs}}$ é a sensibilidade dos detectores para o ^{137}Cs ;

$S_{^{60}\text{Co}}$ é a sensibilidade dos detectores para o ^{60}Co .

Os resultados para os três tipos de amostras são mostrados na tabela 8.

Tabela 8: Valores de f_E para as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

	N	F	G
f_E	0,995 \pm 0,060	1,002 \pm 0,093	1,08 \pm 0,19

Por meio dos dados das tabelas 7 e 8, observa-se, como esperado, que as amostras não apresentam dependência energética em relação ao radionuclídeo da fonte, por estar no intervalo de energia de interação da radiação com a matéria por efeito Compton, portanto, todas as demais exposições à radiação ionizante foram feitas somente com o ^{60}Co .

4.1.1. Tratamentos térmicos

Devido à precaução quanto à reprodutibilidade da leitura TL, inicialmente, alguns testes foram realizados para se determinar qual era o tratamento térmico mais adequado após exposição das amostras à radiação não ionizante, irradiadas previamente com doses gama altas, para que não danificasse a fotomultiplicadora do aparelho leitor TL, causando sua saturação, sem prejuízo da reprodutibilidade.

Foram analisadas diferentes temperaturas para o tratamento pré-exposição UV. Depois de irradiadas com dose gama de 20Gy, 50 amostras *N*, divididas em cinco lotes contendo 10 cada um, foram colocadas no forno MAS 7000 e tratadas termicamente a 300°C durante tempos que variaram de 15 a 60 minutos. Depois do tratamento térmico, as amostras foram expostas à radiação UV de 310nm durante 20 minutos, sob irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ e, quatro lotes das amostras foram armazenados por 24 horas em blindagem de chumbo antes de lidas, enquanto um dos lotes foi tratado a 100°C por 15 minutos logo após a exposição UV e imediatamente lidas as respostas TLFE das amostras. As curvas de emissão TLFE do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para estes tratamentos são vistas na figura 9.

Pode ser observado pelas curvas de emissão TLFE que o pico dosimétrico encontra-se, aproximadamente, a 210°C, como era esperado devido às características físicas do material [18, 25]. O tratamento a 300°C por 30min antes da exposição UV mostrou-se mais satisfatório que o realizado a 300°C por 15min, quando pensamos em evitar a saturação da fotomultiplicadora para doses altas, porém, em relação à sensibilidade, o último é preferível. Nos demais tratamentos, só é obtido decaimento dos portadores de carga para armadilhas de muito baixa energia, sendo bastante instáveis, não servindo para aquisição de dados.

Para a intercomparação entre as resposta TLFE de amostras tratadas termicamente durante 15min e outras tratadas por 30min, foi utilizado o fator de correção encontrado na figura 9a para as áreas das curvas $\frac{A_{15\text{ min}}}{A_{30\text{ min}}}$ que é igual a 689.

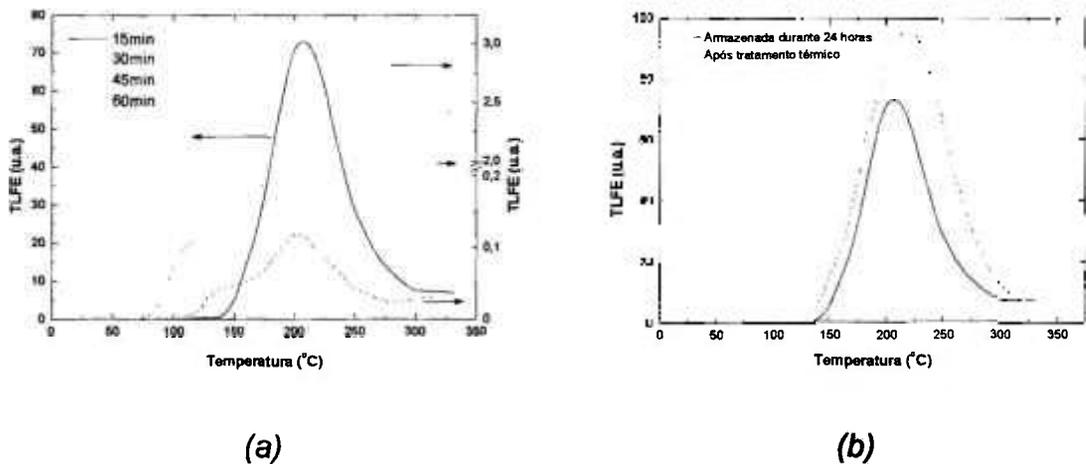


Figura 9: Curva de emissão TLFE de amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para:
 (a) *temperatura mantida em 300 °C, variando-se o tempo do tratamento pré-exposição UV e armazenadas durante 24h antes de lidas;*
 (b) *tratamento térmico pré-exposição UV a 300 °C por 15min com um lote de amostras armazenadas durante 24h e outro tratado a 100 °C por 15min após exposição UV.*

Também é observado um deslocamento do pico de 210 para, aproximadamente, 240°C quando a resposta TLFE é obtida logo após a exposição das amostras à radiação UV, como indica a figura 9b. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura [34], que defende a hipótese de que este pico é formado por portadores de carga presos em armadilhas profundas que estão ainda em processo de decaimento.

O efeito de vários ciclos térmicos também foi ponto de estudo para certificação de que a absorção de radiação óptica não seria influenciada. Um lote de 5 amostras *N* irradiadas com dose gama de 20Gy, tratadas termicamente e expostas à radiação UV de 310nm e irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ foi testado durante 30 ciclos térmicos, envolvendo tratamento pré-irradiação gama, irradiação gama, pré-exposição UV, exposição UV e leitura do sinal TLFE, conforme descrito no item 3. Este processo foi repetido até se verificar uma queda do sinal TLFE das amostras, como mostra a figura 10.

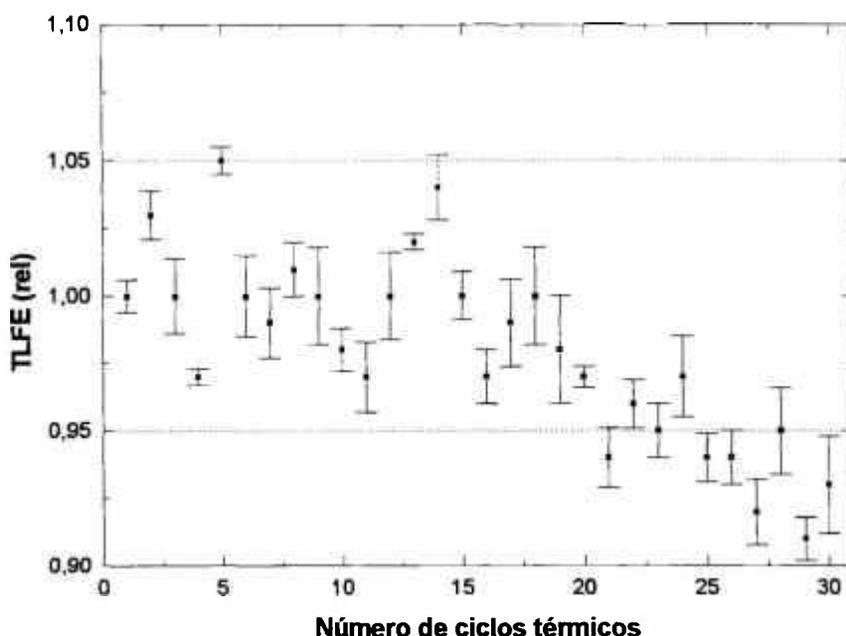


Figura 10: Sinal TLFE relativo em função do número de tratamentos térmicos pré-irradiação gama (300 °C/15h) e pré exposição UV (300 °C/30min).

Pode ser observado que o sinal TLFE das amostras permanece dentro do intervalo de $\pm 5\%$ do valor esperado de 1 unidade relativa até, aproximadamente, 20 ciclos térmicos, e que após este número, o sinal TLFE começa a cair, saindo desta região de controle da reprodutibilidade do sinal. Visualmente, as pastilhas tornam-se amareladas, isto pode ser o principal fator desta diminuição do sinal devido a conseqüente queda da absorção óptica nas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

A solução encontrada para este efeito foi tratar as amostras termicamente a 400°C durante 1 hora. Este processo foi desenvolvido e é utilizado pelos técnicos do Laboratórios de Materiais Dosimétricos e de Termoluminescência do IPEN.

A partir dos dados das figuras 9 e 10, foi estabelecido que todas as amostras expostas à radiação não ionizante deveriam permanecer durante 24h em blindagem de chumbo antes de tomada sua leitura TLFE. Também foi estabelecido que a cada 15 ciclos térmicos as amostras sofreriam um processo de controle de reprodutibilidade como indicado na tabela 3.

4.2. Exposição UV

4.2.1. Dependência com o tratamento térmico e comprimento de onda

As amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a serem expostas à radiação não ionizante precisam, primeiramente, sofrer um processo de sensibilização por meio da irradiação com dose gama alta. Isto é necessário para a criação de armadilhas profundas no material, o que melhora e sensibiliza o material dosimétrico para a absorção óptica [18, 34].

Todos os tipos de amostra **N**, **F** e **G** foram separadas em dois lotes iguais. Um dos lotes sofreu o processo de sensibilização, enquanto o outro não. Para a normalização da resposta TLFE e manutenção da reprodutibilidade, um lote foi sensibilizado com uma dose gama de 100Gy [18] e submetido a um tratamento térmico de 300°C/15h (tabela 3) antes de nova irradiação gama [35]. O outro lote, que não sofreu o processo de sensibilização, foi tratado a 300°C/3h antes de nova irradiação gama. Estes experimentos foram eficientes e possibilitaram determinar qual o melhor tratamento térmico pré-irradiação gama deveria ser utilizado.

As amostras de ambos os lotes, após o respectivo tratamento térmico, foram submetidas a uma dose gama de 20Gy e tratadas termicamente para exposição UV com diferentes comprimentos de onda. Para cada comprimento de onda, as pastilhas foram expostas durante 20 minutos a uma distância de 15cm da fonte. A figura 11 mostra os resultados obtidos deste experimento.

As amostras **G** não apresentaram qualquer resposta TLFE para nenhum dos tratamentos térmicos estudados.

O comportamento da resposta é o mesmo para os dois tipos de amostra, **N** e **F**. São verificados três máximos com comprimentos de onda de 250, 310 e 370nm. A relação de sensibilidade entre as amostras **N** e **F** é de 5,9 para o pico de 250nm, 4,9 para o de 310nm e 2,6 para o de 370nm para os lotes sensibilizados e tratados termicamente com um tempo maior.

Para o comprimento de 310nm, que apresentou um máximo em ambos lotes, a relação de sensibilidade para as amostras dos lotes *N*, bem como para as dos lotes *F*, é de aproximadamente 1,6.

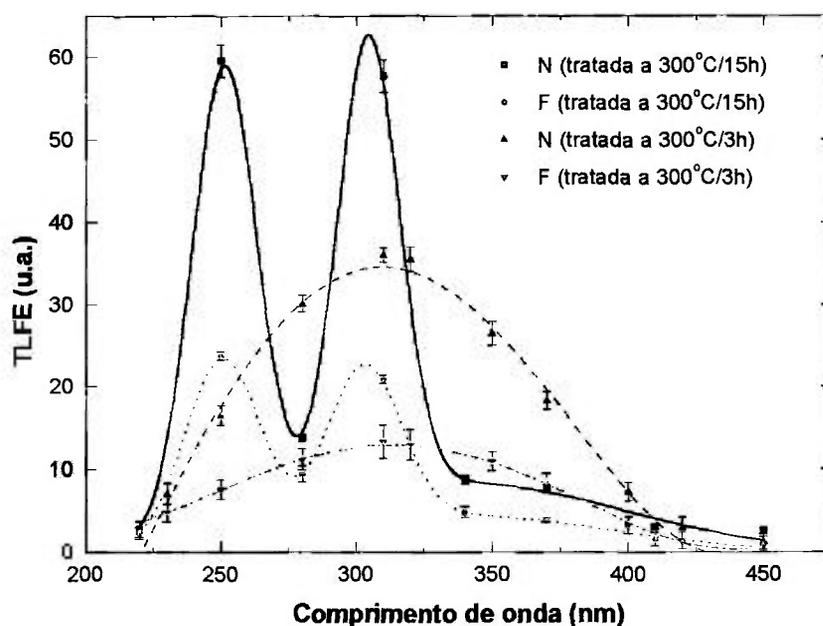


Figura 11: Resposta TLFE em função do comprimento de onda para diferentes tempos de tratamento térmico pré-irradiação gama. Amostras irradiadas com dose gama de 20Gy e expostas por 20min à radiação óptica.

A análise da figura 11 deixa claro o efeito do tempo de tratamento térmico e sensibilização nas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Tal comportamento de aumento de sensibilidade já era esperado conforme literatura [14, 30, 35], também os três máximos de absorção óptica, com comprimentos de onda de 250, 310 e 370nm, já foram observados na literatura tanto para $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, como para $\text{CaSO}_4:\text{Eu}$, $\text{CaF}_2:\text{Dy}$, $\text{LiF}:\text{Mg}$ e $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ [21, 36, 37, 38].

Certamente, o tempo de tratamento térmico é fundamental para o comportamento da resposta e também para a sensibilidade TLFE do material. Na literatura são encontrados modelos que explicam o processo de absorção óptica pelos cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ [18, 39, 40]. Alterações na concentração de defeitos pontuais produzidos pelos dopantes de terras raras nas amostras são

responsabilizadas pela diferença de sensibilidade observada entre as curvas na figura 11 [32, 41, 42].

Nas demais análises, o procedimento de tratamento térmico pré-irradiação gama usado nas amostras foi o de 300°C/15h, como mostra a tabela 3. As amostras utilizadas foram, a partir deste ponto, somente as **N**, por apresentarem maior sensibilidade devido ao seu maior volume e facilidade de manuseio.

4.2.2. Dependência com a iluminação ambiente

Uma vez determinada a sensibilidade das amostras a diferentes comprimentos de onda, tornou-se de vital interesse o comportamento destas em função da radiação óptica da sala onde as medidas foram realizadas.

As amostras **N** foram irradiadas com dose gama de 20Gy, tratadas termicamente a 300°C/15min e expostas à 20min ao comprimento de onda de 310nm sob irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Após armazenamento em blindagem de chumbo por 24h a temperatura ambiente, as amostras foram, então, colocadas sobre uma mesa dentro da sala com luzes fluorescentes acesas. Em intervalos de tempo pré-selecionados, cinco amostras foram extraídas da mesa, separadas num invólucro e guardadas em blindagem de chumbo por 24h antes de lidas. A distância mesa – luz é de aproximadamente 3m. Cinco destas amostras foram guardadas, antes do início da experiência, em blindagem de chumbo para comparação com as demais expostas à luz ambiente. A figura 12 mostra os resultados obtidos.

A figura mostra que, num intervalo de $\pm 3\%$, não há variação do sinal TLFE para um intervalo de 0 a 48 horas de exposição contínua.

Esta característica é bastante importante, pois indica que as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ não são sensíveis à luminosidade interna das salas onde as exposições à radiação não ionizante são realizadas.

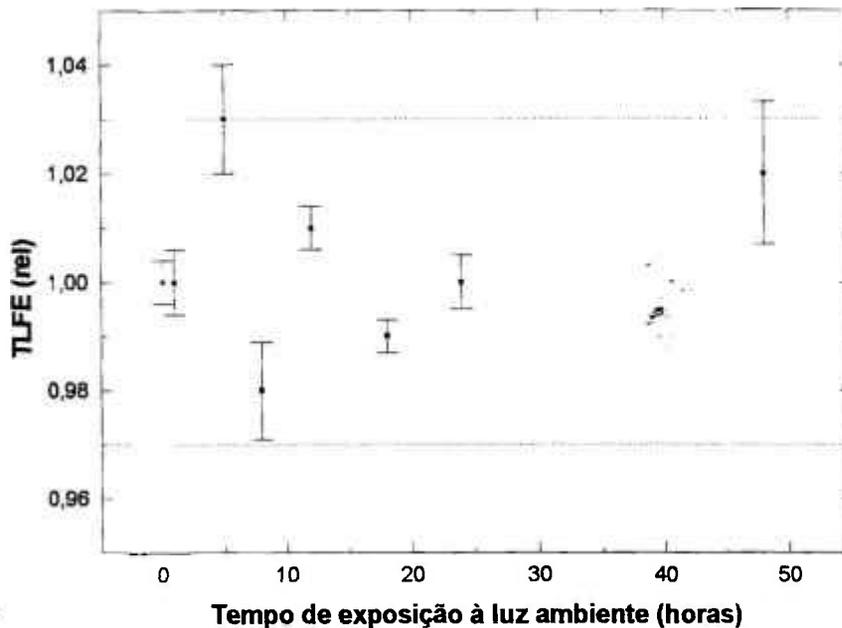


Figura 12: Influência da iluminação das luzes fluorescentes da sala ambiente às amostras expostas à radiação UV ($310\text{nm} - 15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$).

4.2.3. Decaimento óptico do sinal TLFE

A avaliação do decaimento óptico do sinal TLFE em função do tempo de armazenamento das pastilhas **N** depois de expostas à radiação UV foi estudada. As amostras receberam uma dose gama de 20Gy, tratamento térmico adequado (tabela 3), foram expostas por 20 minutos à radiação UV (310nm), sob irradiância constante de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ e armazenadas em blindagem de chumbo antes de lidas. O intervalo de tempo entre a exposição UV e a leitura do sinal TLFE foi de 1 minuto a 72 horas. Os resultados obtidos estão mostrados na figura 13.

Na figura observa-se que 24 horas após a exposição UV as pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ apresentaram decaimento do sinal TLFE de 25% em relação àquelas lidas logo após exposição, estabilizando-se neste patamar ao longo de 3 dias de armazenamento. Comportamento semelhante ao registrado na literatura [18].

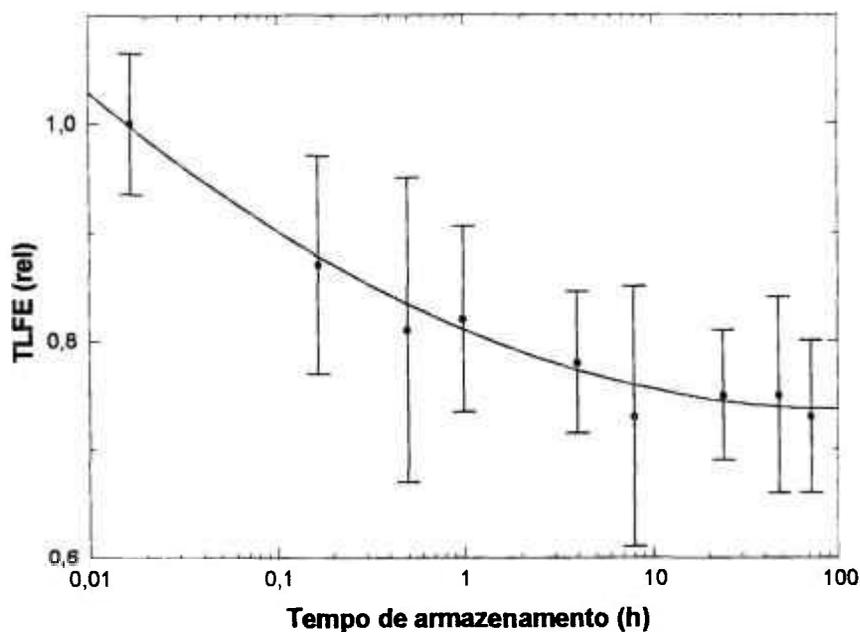


Figura 13: Decaimento óptico do sinal TLFE para pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (N).

4.2.4. Dependência com a dose gama absorvida

Para estudo da dependência da resposta TLFE em função da dose gama, as amostras **N** foram expostas à radiação gama do ^{60}Co num intervalo de dose entre 5 e 100Gy. Depois de irradiadas, dois lotes de amostras foram tratados termicamente e expostos durante 5 e 20min, respectivamente, à radiação UV, com comprimentos de onda de 310nm, mantida a irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para ambos os lotes, obtendo-se as curvas mostradas na figura 14.

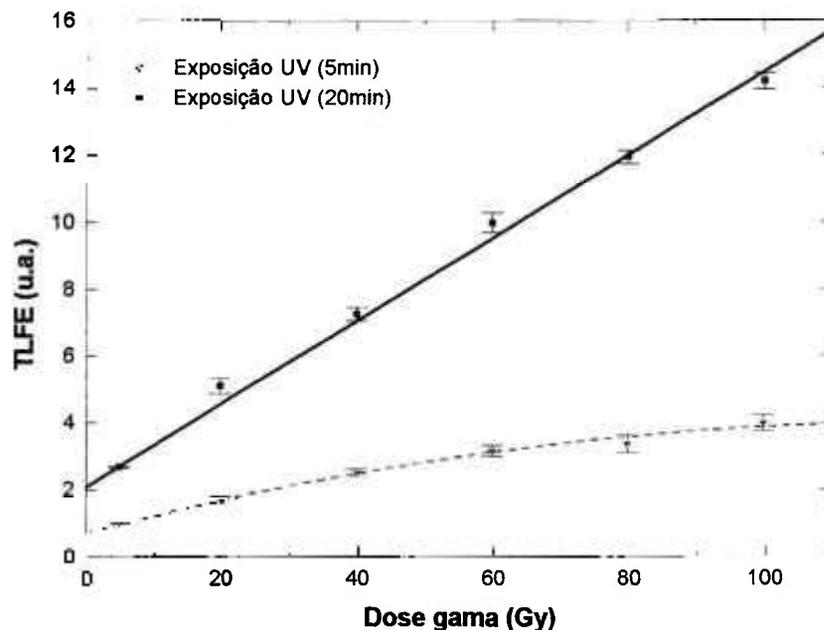


Figura 14: TLFE das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (N) em função da dose gama para diferentes tempos de exposição UV (310nm – $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$).

Quando expostas por 20 minutos à radiação UV, as amostras apresentam um comportamento linear com a dose gama, como era esperado conforme literatura [20], porém, para 5 minutos de exposição, este mesmo efeito não ocorre, indicando uma estabilização, isto é, um número muito pequeno de portadores de carga é liberado das armadilhas. Resultado de acordo com o esperado, pois um menor fluxo energético atinge o material, não fornecendo energia suficiente aos portadores de carga para estes vencerem a barreira de potencial das armadilhas profundas onde se encontram.

4.2.5. Dependência com o tempo de exposição

As amostras *N* foram irradiadas com dose gama de 20Gy, tratadas termicamente de acordo com a tabela 3 e, variando-se o tempo de exposição UV entre 5 e 80min obteve-se a resposta TLFE em função do tempo de exposição.

Foram usados os comprimentos de onda que apresentaram maior sensibilidade TLFE conforme a figura 10, isto é, 250 e 310nm, com irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para ambos comprimentos de onda. Na figura 15 são apresentados os resultados obtidos.

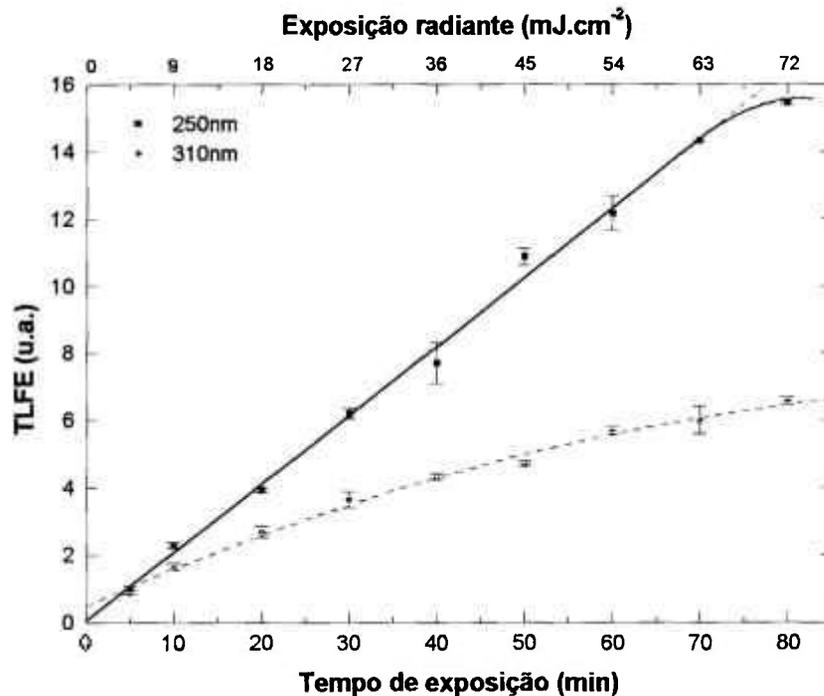


Figura 15: TLFE das amostras N em função do tempo de exposição UV. Dose gama: 20Gy.

Observa-se a maior sensibilidade da resposta TLFE para o comprimento de onda de 250nm, além de um maior intervalo de linearidade em função do tempo de exposição.

Apesar da maior sensibilidade em 250nm, nas análises que envolveram comprimentos de onda na região UV, foi utilizado o comprimento de onda de 310nm devido ao fato da maior sensibilidade do radiômetro se encontrar na região de 300 a 550nm, onde podemos alcançar valores máximos de irradiância na ordem de $150\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (para 310nm), enquanto que para valores menores que 300nm, só atingimos valores máximos de $45\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para um comprimento de onda de 270nm.

4.2.6. Dependência com o ângulo de incidência da radiação UV

Na avaliação de dependência da resposta TLFE em função do ângulo de incidência da radiação UV, as amostras **N** foram irradiadas com uma dose gama de 20Gy, tratadas termicamente e expostas à radiação UV durante 5 e 20 minutos, respectivamente, variando o passo do ângulo de 15° entre amostra e direção do feixe luminoso, num intervalo de 0 a 90°. A irradiância foi mantida em $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para incidência normal. Os resultados obtidos são vistos na figura 16.

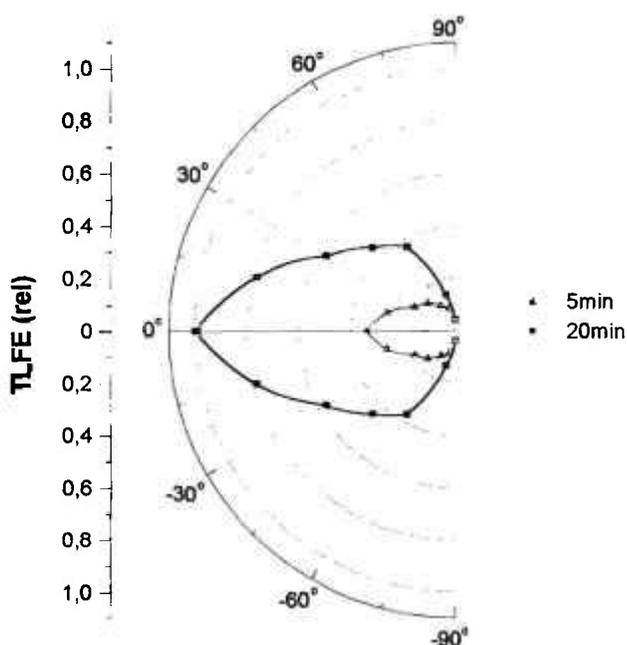


Figura 16: TLFE relativa do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (N) em função do ângulo de incidência da radiação UV para diferentes tempos de exposição.

Observa-se que somente para ângulos maiores que 30° a resposta TLFE torna-se praticamente desprezível (menor que 50% relativo ao valor máximo alcançado na exposição a zero grau). Os resultados estão de acordo com a teoria, que mostra a dependência da irradiância em função do ângulo de

incidência na amostra ($dE = \frac{dI}{r^2} \cdot \cos\theta$ - válido para fontes pontuais ou distantes do ponto de irradiação) [23, 31].

4.2.7. Dependência com o fluxo energético

As amostras *N* foram irradiadas com dose gama de 40Gy; tratadas termicamente e expostas à radiação UV com comprimento de onda de 310nm. As irradiâncias utilizadas foram de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, $80\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ e $150\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, enquanto a exposição radiante variou entre 1 e $100\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$. Os resultados obtidos são mostrados na figura 17.

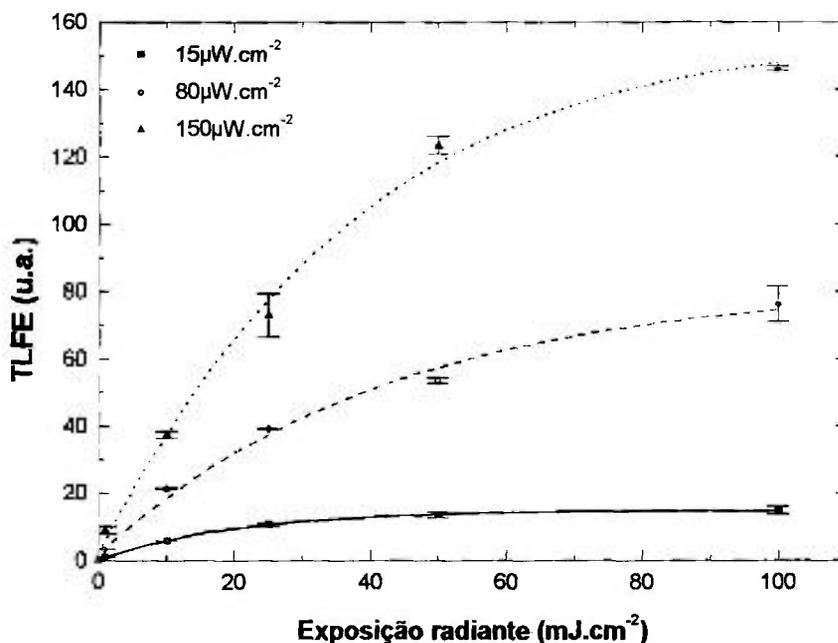


Figura 17: TLFE das amostras *N* em função da exposição radiante com irradiância fixa. Dose gama: 40Gy e comprimento de onda: 310nm.

* I – intensidade radiante ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$);

r – distância entre fonte de irradiação e superfície irradiada (cm);

θ – ângulo de inclinação da superfície irradiada em relação ao ângulo sólido do feixe luminoso.

Por meio da figura 17, verifica-se que, com a irradiância mantida constante, a resposta TLFE alcança o máximo de linearidade em 25mJ.cm^{-2} , onde começa um comportamento não linear, ou tendência a saturação, como ocorreu com as amostras expostas à irradiância de $15\mu\text{W.cm}^{-2}$. Comportamento similar ao dos dosímetros de CaF_2 encontrados na literatura [36, 43].

4.2.8 Dependência com a irradiância

Neste item, é analisado o comportamento da resposta TLFE em função da irradiância. As amostras **N** foram irradiadas com dose gama de 40Gy, tratadas termicamente e expostas à radiação UV (310nm) com diferentes valores de irradiância e mantendo-se os valores de exposição radiante constantes.

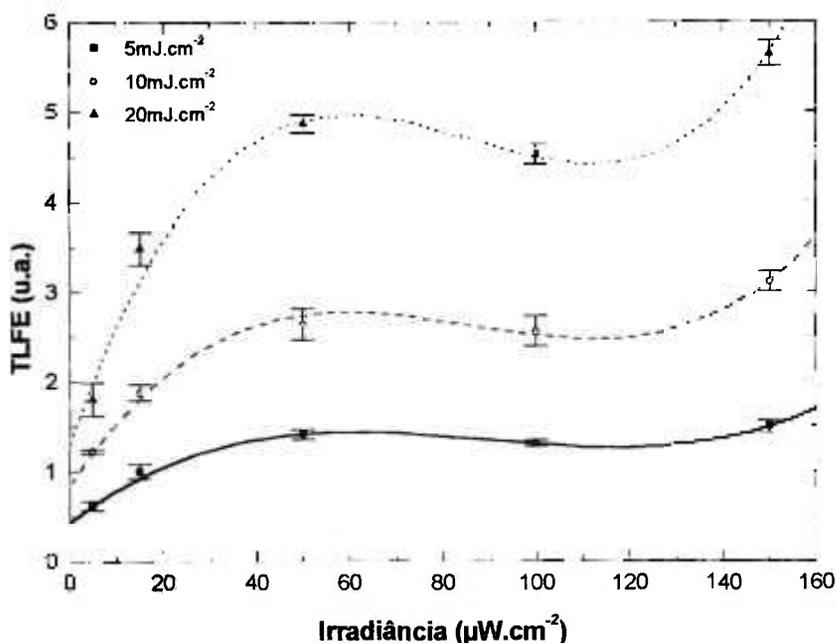


Figura 18: TLFE das amostras **N** em função da irradiância para exposições radiantes constantes. Dose gama: 40Gy e comprimento de onda: 310nm.

Como observado para o fluxo energético, na figura 18 também pode ser observado que a resposta TLFE não é linear com a irradiância, porém, a tendência de saturação não parece clara. Para valores maiores que $150\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, as amostras têm uma tendência a aumentar o sinal TLFE.

4.2.9. Resposta TLFE à exposições UV subseqüentes

Analizou-se a resposta TLFE para exposições subseqüentes com diferentes comprimentos de onda. As amostras *N*, primeiramente, foram irradiadas com dose gama de 40Gy e tratadas termicamente conforme a tabela 3. Então, foram expostas à radiação UV com comprimento de onda de 310nm, irradiância de $70\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ durante um tempo de 143s, alcançando assim, uma exposição radiante de $10\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ (chamadas *referência*). Depois de armazenadas por 24h à temperatura ambiente em blindagem de chumbo, estas mesmas amostras foram expostas a outros comprimentos de onda, sem qualquer tratamento térmico, mantendo-se a irradiância constante em $25\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ e fluxo energético em $10\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ para todos os comprimentos de onda analisados (estas, chamadas *teste*). A tabela 9 mostra a relação entre resposta TLFE obtida e esperada para as amostras *teste*.

Observa-se, na tabela 9 e também na figura 19, que, para os comprimentos de onda analisados, sempre há um crescimento, ou acúmulo, do sinal TLFE nas amostras teste, nunca ocorrendo decaimento do sinal de referência ($10\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ exposto somente a 310nm), o que também ocorre para amostras de CaF_2 encontradas em literatura [43, 44].

No intervalo de comprimentos de onda estudado, as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ mostraram-se bastante promissoras no que diz respeito a acúmulo de radiação não ionizante, UV especificamente. Porém, quando dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ usados na monitoração pessoal de dose gama são expostos à radiação UV (comprimentos de onda de 250, 300, 350 e 404nm), há uma queda na resposta TL [45]. Este fenômeno é bem explicado por McKeever [46], que

mostra a relação entre decaimento do sinal TL causado pela exposição à radiação óptica.

Tabela 9: Análise do sinal TLFE das amostras de CaSO₄:Dy expostas subseqüentemente a comprimentos de onda distintos.

Amostra	Comprimento de onda da exposição (nm)	TLFE relativa esperada *	$TLFE_{\lambda} / TLFE_{310}$	TLFE relativa obtida
Referência	310	1,00 ± 0,03	---	1,00 ± 0,03
teste 1	250	2,03 ± 0,07	1,03 ± 0,06	2,07 ± 0,01
teste 2	280	1,24 ± 0,06	0,24 ± 0,02	1,29 ± 0,04
teste 3	370	1,16 ± 0,06	0,16 ± 0,01	1,19 ± 0,02
teste 4	420	1,1 ± 0,1	0,10 ± 0,01	1,2 ± 0,02
teste 5	520	1,00 ± 0,06	---	1,10 ± 0,01

*Estes valores foram extraídos da figura 11. Somou-se ao valor referência (1,0) a relação

$$\frac{TLFE_{\lambda}}{TLFE_{310}}$$

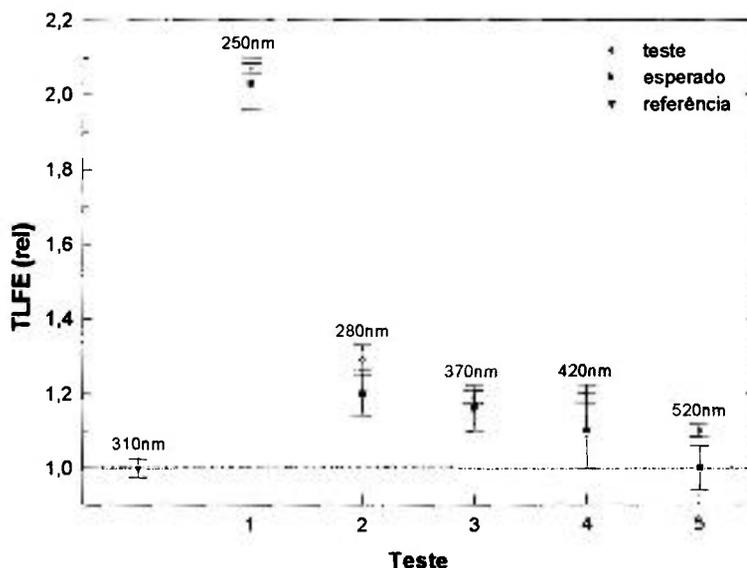


Figura 19: Análise do sinal TLFE das amostras N em função de exposições subseqüentes a diferentes comprimentos de onda.

4.2.10. Limite mínimo de detecção UV

Uma característica muito importante na dosimetria das radiações é conhecer os limites mínimo e máximo de detecção do material. Devido às propriedades do conjunto radiômetro-controlador não permitirem medidas de irradiância com precisão maiores que $160\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para o comprimento de onda de 310nm e $30\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ para 250nm (os comprimentos de onda com maior sensibilidade), a análise do limite máximo para radiação UV está impossibilitada de ser realizada.

4.2.10.1. Dose gama mínima para detecção do sinal TLFE

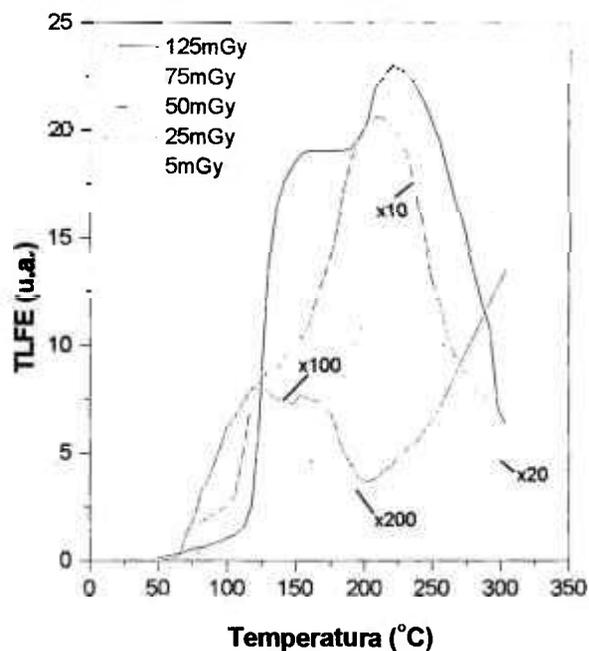
Primeiramente, foi estudada a relação entre dose gama e tempo de exposição UV para as amostras **N**. As amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ foram divididas em dois lotes distintos, ambos receberam dose gama, um 100Gy e outro 125mGy. Ambos os lotes foram tratados termicamente a $300^\circ\text{C}/30\text{min}$ antes de serem expostos à radiação UV de 310nm com irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Para o lote que recebeu dose gama alta, 100Gy, a resposta TLFE só foi observada para tempos de exposição UV maiores que 5 minutos, enquanto que para o lote irradiado com dose gama menor, 125mGy, a TLFE foi observada para tempos de exposição da ordem de 30s. Isto mostra que, quanto menor a dose gama, mais facilidade a radiação óptica terá para vencer a barreira de potencial do material onde os portadores de carga estão, ou em outras palavras, os portadores de carga não são armadilhados em poços de potencial demasiadamente profundos, possibilitando que, com menor taxa de fótons por unidade de tempo, estes portadores de carga sejam ejetados e rearmadilhados em armadilhas mais rasas e de interesse dosimétrico.

Com estes dados experimentais disponíveis, foi feita uma tentativa de quantificar a dose gama mínima com a qual observa-se a resposta TLFE. Foram

tomados 5 lotes tratados termicamente e irradiados com dose gama num intervalo de 5 até 125mGy. Estes, após novo tratamento térmico (300°C/15min para melhorar a sensibilidade das amostras), foram expostos à luz UV de 310nm com irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, durante tempos que variavam de 1s até 35min. As curvas TLFE para tempos de exposição UV de 30s destes lotes são vistas na figura 20.

Das curvas da figura 20 pode-se afirmar que, para doses gama menores que 50mGy, não se observa resposta TLFE satisfatória. Isto pode ocorrer devido ao fato da dose gama ser tão baixa que não há armadilhamento de portadores de carga em níveis de energia altos no material; daí, os portadores liberados opticamente pela radiação UV serem aqueles que ainda permanecem no pico dosimétrico principal (220°C) após tratamento térmico. Estes decaem para o pico dosimétrico de menor estabilidade ($\approx 110^\circ\text{C}$), como mostra a figura para as doses gama de 5 e 25mGy. Portanto, a dose gama mínima, determinada experimentalmente, necessária para a obtenção da resposta TLFE é de 50mGy.



*Figura 20: Curvas TLFE para diferentes doses gama
Tempo de exposição UV: 30s e comprimento de onda: 310nm.*

Para comprovar que as respostas obtidas não são leitura de radiação de fundo ou sinal espúrio, as amostras N foram submetidas a um outro teste para determinar a dose gama mínima detectável.

De acordo com a bibliografia [16, 25], a dose mínima detectável por dosímetros TL é dada pela equação (3):

$$D_{\min} = (\overline{TL}(0R) + 3\sigma) \cdot f_c \quad (3)$$

onde $\overline{TL}(0R)$ é a leitura TL média da dose zero dada em nC, σ é o desvio padrão da média da leitura TL da dose zero também dada em nC e f_c é o fator de calibração do lote, dado em $\mu\text{Gy} \cdot \text{nC}^{-1}$.

Para o cálculo da dose zero, foram tomadas 15 amostras tratadas termicamente a $300^\circ\text{C}/15\text{h}$ e, sem sofrer irradiação gama, foram lidas no equipamento Harshaw 2000AB. O fator de calibração f_c foi extraído do gráfico da figura 14, amostras expostas a 20min de radiação UV, como sendo o ângulo de inclinação da reta obtida para as amostras expostas a diferentes doses gama no intervalo entre 5 e 100Gy.

Estes valores são mostrados na tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros para determinação da dose gama mínima na qual se detecta radiação UV.

$\overline{TL}(0R)$ (nC)	0,185
σ (nC)	0,035
f_c ($\text{Gy} \cdot \text{nC}^{-1}$)	0,023 \pm 0,008

Por meio da equação (3) foi determinada a dose gama mínima na qual é possível obter sinal TLFE.

$$D_{\min} = (\overline{TL}(0R) + 3\sigma) \cdot f_c$$

$$D_{\min} = (0,185 + 3 \cdot 0,035) \cdot 0,023$$

$$D_{\min} = (6 \pm 3)\text{mGy}$$

Valor este não comprovado experimentalmente de acordo com a figura 20. Amostras irradiadas com doses gama abaixo de 50mGy não apresentam resposta TLFE satisfatória, apresentaram somente picos luminescentes de baixa temperatura ou instáveis. Portanto, confirma-se que para valores abaixo deste limiar – 50mGy – há muito acúmulo de sinal espúrio, o que impossibilita o uso das amostras irradiadas com doses mais baixas na detecção de radiação não ionizante, como demonstrado na figura 20.

4.2.10.2. Exposição UV mínima detectável

Determinada a dose gama mínima para a qual observa-se resposta TLFE, é desejável se determinar quais são a irradiância e a exposição radiante mínimas detectáveis pelas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Para isso, as amostras **N** foram irradiadas com dose gama mínima (50mGy), tratadas a 300°C por 15min e expostas a radiação UV (310nm) mantendo-se constante a irradiância em valores mínimos e variando-se a exposição radiante, como visto na figura 21.

Portanto, de acordo com os métodos seguidos, pode-se notar que diminuindo-se a irradiância, é necessário maior tempo de exposição das amostras para conseguir um sinal TLFE mínimo detectável para a exposição radiante.

Estes limiares de exposição radiante não significam que há um valor mínimo quantificado de energia incidente detectável pelo material, mas sim que, dependendo da potência incidente por unidade de área, é necessário maior exposição da amostra para sua sensibilização, quanto menor for a irradiância. Respostas abaixo destes valores mínimos de exposição radiante nas diferentes

irradiâncias foram encontradas, porém, a curva luminescente não é bem definida, sendo estes valores descartados.

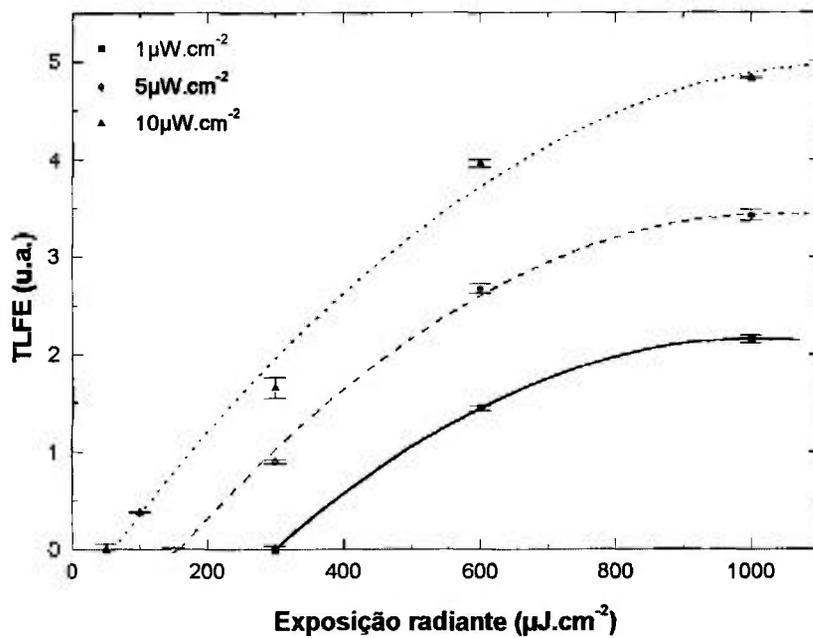


Figura 21: Limiar de exposição radiante detectável pelo $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Dose gama: 50mGy, comprimento de onda: 310nm.

4.3. Exposição laser

Como visto na tabela 5, as amostras **N** foram expostas a diversos tipos de lasers, dos quais apenas dois operam na região UV. Esta análise visa caracterizar as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para uso na detecção da radiação laser, como anteriormente feito para radiação UV.

4.3.1. Lasers Nd:YAG e diodo

Para os estudos da resposta TLFE do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para lasers de Nd:YAG, as amostras foram divididas em dois lotes, ambos irradiados com dose gama de 20Gy e, um lote tratado termicamente a 300°C por 30min e outro a 300°C por 15min, e expostos à radiação laser.

Num primeiro teste, amostras de cada lote foram expostas ao laser pulsado, recebendo 1, 3, 7, 10 e 15 pulsos com energias em um intervalo de 75 a 1.125mJ a uma distância de 35cm da fonte, com diâmetro de feixe de aproximadamente 1mm. Para as amostras tratadas a 300°C/15min, pode se observar uma pequena resposta TLFE referente aos picos de temperatura baixa, com pouca estabilidade, sendo praticamente desprezíveis. O lote tratado a 300°C/30min não apresentou qualquer sinal TLFE detectável nestas condições.

Seguiu-se a exposição das amostras ao laser Nd:YAG de modo contínuo de operação com 1W de potência. As amostras, mantidas a 35cm do laser, foram expostas a diâmetros de feixe de 2, 4 e 6mm usando-se uma lente divergente montada a 15cm da fonte laser, variando-se as energias numa região entre 1 até 600J. Novamente, nenhuma resposta TLFE satisfatória foi detectada por nenhuma amostra em estudo.

Nenhum sinal TLFE foi detectado em ambos os lotes de amostras quando expostos ao laser diodo do Laboratório de Calibração. Foram utilizados intervalos

de tempo de exposição entre 1min e 3h e distância fonte laser-amostra de 15cm. Foram mantidos os mesmos parâmetros de irradiação gama que os usados para análise do laser Nd:YAG.

Portanto, confirmou-se que o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ não é sensível a comprimentos de onda na região do infravermelho [18, 20], nem mesmo para fluxos energéticos altos.

4.3.2. Laser de argônio e nitrogênio

No estudo da resposta dos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para lasers de argônio foram mantidos os parâmetros utilizados para o estudo com o laser de Nd:YAG (dose gama e tratamentos térmicos). A resposta TLFE somente foi observada quando as amostras **N** foram expostas ao comprimento de onda de 476,5nm do laser de argônio, tratadas termicamente a 300°C/15min e para exposições mínimas de 3min com potências maiores que 100mW (18J). Quando expostas ao comprimento de onda de 488nm, nenhum sinal foi detectado. Devido a isso, todas as amostras analisadas receberam um tratamento térmico de 300°C/15min antes de expostas à radiação laser.

As amostras analisadas no Laboratório de Espectroscopia Ótica do CLA utilizando o laser de nitrogênio (N_2) também foram tratadas termicamente a 300°C/15min para efeito de comparação com os dados obtidos com a exposição ao laser de argônio.

Os resultados obtidos não estão de acordo com aqueles obtidos por Bircharall e Beckley [47], onde as pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ apresentaram sensibilidade ao comprimento de onda de 488nm e não suportaram fluxos radiantes lasers maiores que 600mW, por apresentar alta taxa de aquecimento das amostras, o que influenciou a medida TLFE.

Neste trabalho, além das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ não serem sensíveis ao comprimento de onda de 488nm, elas, mesmo sob fluxos radiantes da ordem de 750mW, não apresentaram elevação de temperatura durante as exposições.

Os lasers utilizados são mostrados nas figuras 22 e 23.



Figura 22: Arranjo do Laser de argônio do Laboratório de Espectroscopia Atômica do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN usado na pesquisa.

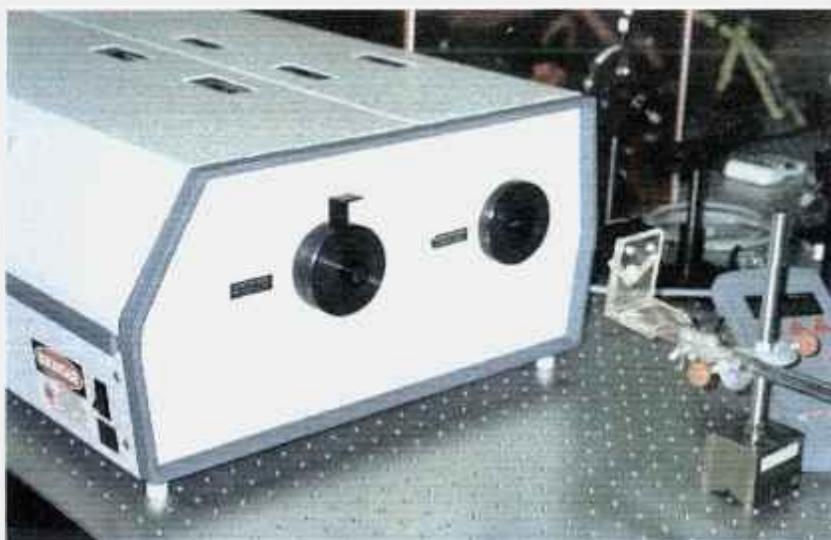


Figura 23: Laser de nitrogênio do Laboratório de Espectroscopia Óptica do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN usado na pesquisa.

4.3.2.1. Dependência com o diâmetro do feixe laser

Nos estudos realizados, foram analisados alguns fatores como o comportamento da resposta TLFE em função do diâmetro do feixe. Para isso foram empregadas lentes divergentes colocadas na saída do feixe laser.

Usando-se o laser de argônio, é observado um comportamento linear entre o diâmetro do feixe laser e o sinal TLFE. Há uma variação de aproximadamente 30% na intensidade TL quando o diâmetro do feixe varia de 6 para 2mm, como mostra a figura 24. Isso ocorre devido ao fato do maior diâmetro do feixe laser sensibilizar uma maior área do detector, conseqüentemente, há maior acúmulo de sinal pela amostra. A lente foi colocada a 30cm da fonte laser, enquanto a amostra permaneceu a 100cm da fonte.

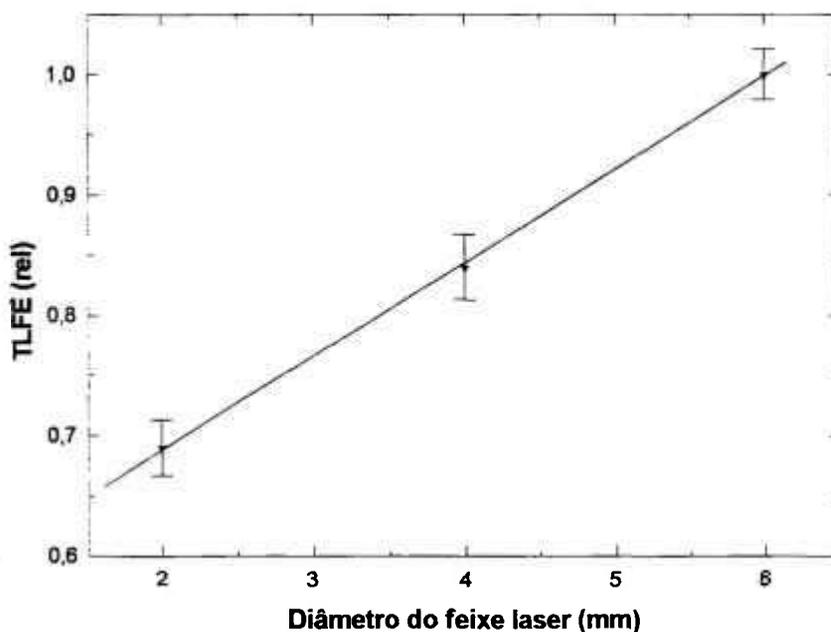


Figura 24: Relação entre resposta TLFE e diâmetro do feixe laser de argônio. Dose gama: 20Gy, potência laser: 450mW, tempo de exposição: 3min.

4.3.2.2. Dependência com a potência laser

Na figura 25, é observado um comportamento de saturação da resposta TLFE em função da potência laser de argônio. O início da saturação se dá por volta de 450mW da potência laser. As amostras foram irradiadas com 20Gy, tratadas termicamente e expostas durante 3min ao laser de argônio com 6mm de diâmetro de feixe. As potências empregadas foram entre 100 e 750mW.

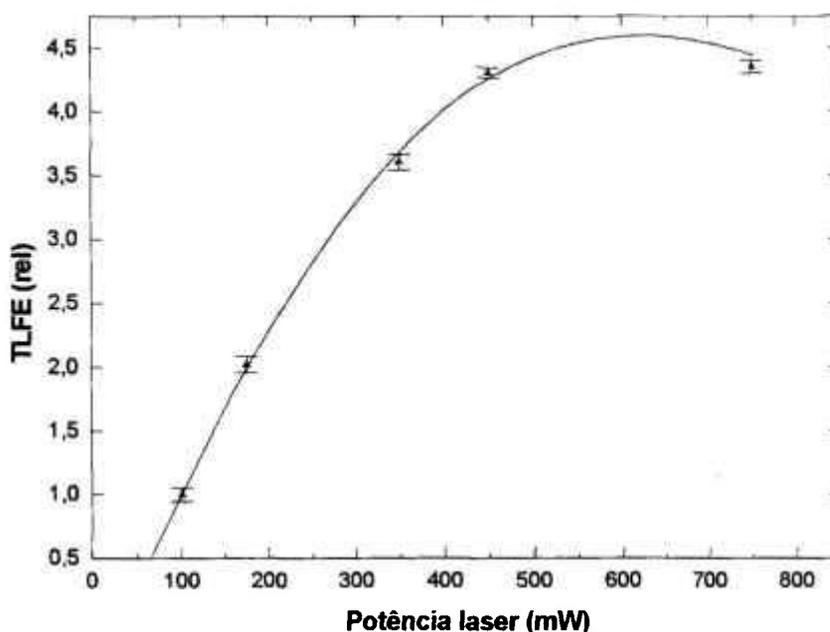


Figura 25: Relação entre resposta TLFE e fluxo radiante laser para tempo de exposição de 3min e diâmetro de feixe de 6mm.

4.3.2.3. Dependência com o tempo de exposição laser

Outro estudo efetuado foi o comportamento da TLFE em função do tempo de exposição usando-se a máxima potência alcançada pelos equipamentos laser

de argônio (comprimento de onda de 476,5nm e potência de 750mW) e nitrogênio (comprimento de onda 337nm e potência 100mW). A figura 26 mostra a saturação do sinal TLFE para a exposição ao laser de argônio, enquanto que, para o laser de nitrogênio, um comportamento linear é observado.

Por meio do gráfico da figura 26, vê-se claramente a baixa sensibilidade ao comprimento de onda de 476,5nm do laser de argônio para potência de 750mW ($2,7\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) e diâmetro de feixe de 6mm quando comparado com o laser de nitrogênio 100mW ($350\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) e à exposição UV de 310nm a $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Se comparadas as exposições radiantes das amostras para as radiações laser e UV, encontra-se, para 20min de exposição, um valor de $3,2\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ para o laser de argônio, $420\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ para o laser de nitrogênio e $18\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ para radiação UV. Observa-se que apesar da exposição radiante laser de argônio ser $1,8\cdot 10^5$ vezes maior que a exposição radiante UV, sua resposta TLFE é aproximadamente metade da resposta UV e 10 vezes menor que a resposta para o laser de nitrogênio.

A maior transferência de energia para as amostras devido à coerência laser faz com que o sinal TLFE seja amplificado, conseqüência do maior desarmadilhamento de portadores de carga das armadilhas mais profundas. Outro fator que colabora para este processo é o comprimento de onda, no caso do laser de nitrogênio, 337nm, estar dentro do intervalo de maior sensibilidade das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, como mostrado na figura 10, o que não ocorre para o comprimento de onda do laser de argônio, 476,5nm.

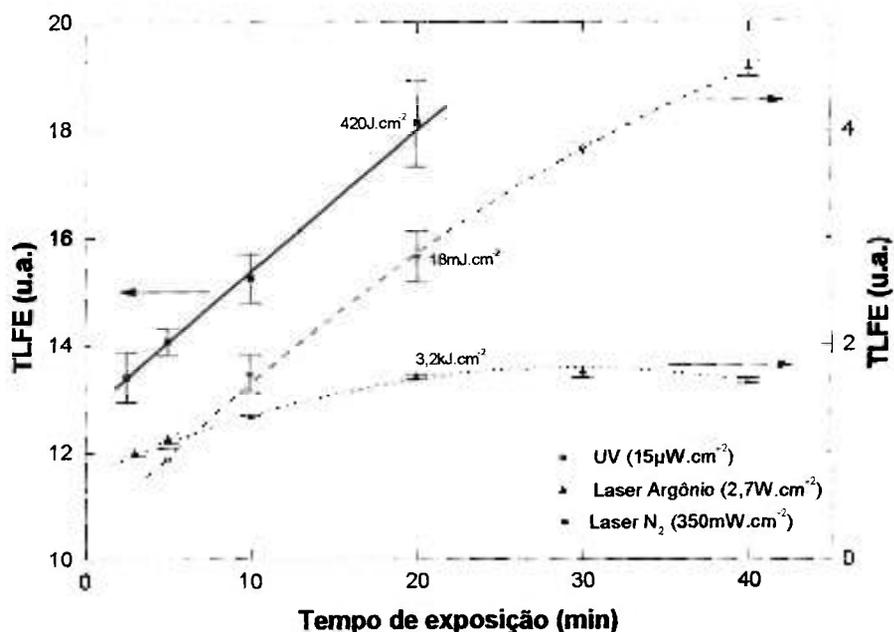


Figura 26: Comparação da resposta TLFE em função do tempo de exposição entre os lasers de Ar e N₂ e radiação UV. Dose gama: 20Gy, diâmetro dos feixes laser: 6mm, potências dos lasers de Ar e N₂: 750mW e 100mW, comprimento de onda UV: 310nm.

4.3.2.4. Dependência com a dose gama

O mesmo comportamento de baixa sensibilidade pode ser observado na figura 27, onde o sinal TLFE é apresentado em função das exposições laser de argônio (10min a 450mW – 1,6W.cm⁻²), nitrogênio (2min a 100mW – 350mW.cm⁻²) e radiação UV (20min a 310nm – 15μW.cm⁻²) para diferentes doses gama no intervalo de 5 a 100Gy. Nesta figura também é observado um comportamento de supralinearidade e saturação do sinal TLFE das amostras expostas ao laser de argônio. Este comportamento de baixa sensibilidade pode ser explicado se observada a figura 10. Vê-se que, para exposições com lâmpada UV, a partir do comprimento de onda de 400nm, a resposta TLFE das amostras de CaSO₄:Dy é bastante pequena. A saturação é o efeito causado pela população das armadilhas rasas pelos portadores de carga desarmadilhados daquelas mais profundas.

Como para doses gama altas, há a geração de maior número de armadilhas profundas sem uma correspondência para as armadilhas rasas [18, 32, 48], estas últimas são totalmente populadas antes do total esvaziamento das profundas causado pela radiação óptica. Como o comprimento de onda de 476,5nm está fora da região de sensibilidade das amostras, estes portadores de carga não recebem energia suficiente para vencer a barreira de potencial.

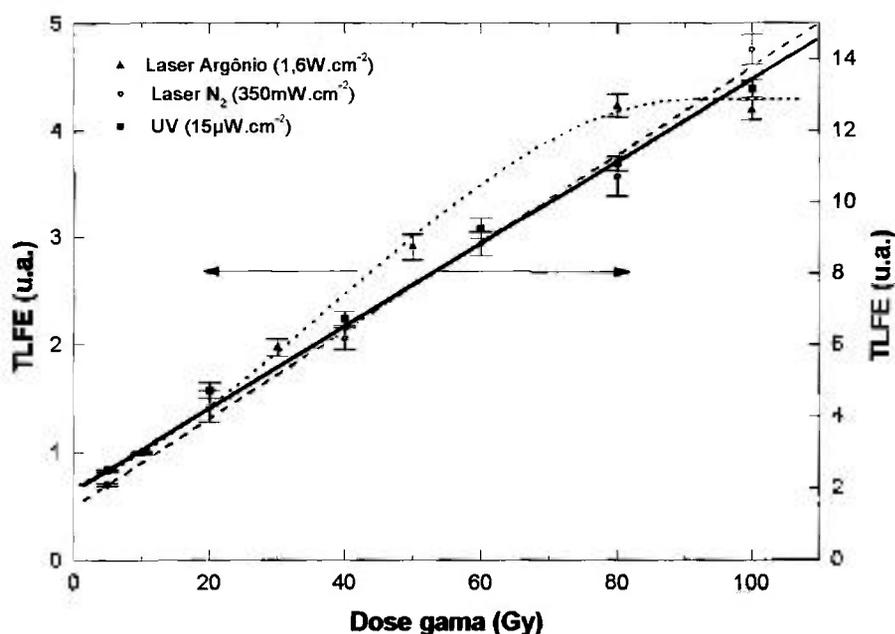


Figura 27: Resposta TLFE em função da dose gama para as amostras N quando expostas à radiação laser e UV.

Dose gama: 20Gy, potência laser de Ar e N₂: 450mW e 100mW, diâmetro dos feixes laser: 6mm; comprimento de onda UV: 310nm.

Ainda na figura 27, há uma grande correlação entre a resposta TLFE das amostras expostas ao laser de nitrogênio e à radiação UV. Somente o fato dos comprimentos de onda serem próximos não explica o por quê da semelhança, uma vez que a energia cedida às respectivas amostras é, aproximadamente, 12J e 5mJ.

4.3.2.5. Influência da radiação infravermelha

Para verificar se comprimentos de onda na região do infravermelho não influenciam os sinais de amostras expostas à radiação laser, 20 amostras teste foram irradiadas com dose gama de 20Gy, tratadas termicamente a 300°C/15min e expostas ao laser de nitrogênio por 2min. Após este processo, as amostras foram separadas em 4 lotes iguais de cinco amostras cada. O primeiro, chamado *referência*, foi blindado à temperatura ambiente e não foi exposto a qualquer outro tipo de radiação. Os outros três lotes, chamados *teste*, foram expostos, após 24h da exposição ao laser de nitrogênio, ao laser diodo, com uma irradiância de $170\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, intervalos de tempo de exposição de 10, 30 e 60min e distância de 15cm das amostras. O resultado é visto na figura 28.

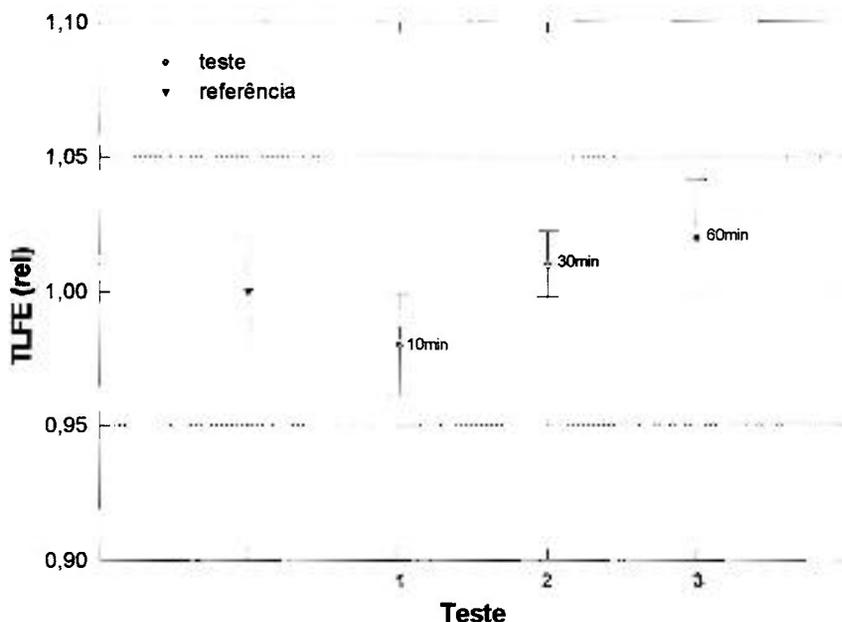


Figura 28: Dependência da resposta TLFE de amostras expostas subsequentemente a lasers de nitrogênio e diodo. Dose gama: 20Gy, tempo de exposição ao laser nitrogênio: 2min.

Observa-se que num intervalo de $\pm 5\%$, não há acúmulo, nem decaimento do sinal nas amostras, comprovando-se, novamente, que as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ não absorvem radiação óptica nas regiões do espectro infravermelho.

4.3.3. Laser excímero

4.3.3.1. Caracterização das amostras à radiação laser

A primeira parte da pesquisa visou caracterizar as amostras para o uso do laser excímero de fluoreto de argônio (ArF). Para verificação da dependência do sinal TLFE em função do número de pulsos (energia radiante acumulada), as amostras foram irradiadas com dose gama de 20Gy, tratadas termicamente a 300°C/15min e expostas ao laser a uma distância de 20cm fonte – amostra. O resultado é visto na figura 29.

Para a realização da leitura TLFE das amostras foi preciso utilizar um arranjo no aparelho leitor TL. A área sensível da fotomultiplicadora foi reduzida por um fator de 30 usando-se um anteparo negro com um orifício de 1mm de diâmetro. As amostras sob análise foram lidas com este arranjo e depois, com outras amostras irradiadas com dose gama de 500mGy, determinou-se o fator de correção da leitura, que foi calculado em 580,7. Para esse cálculo dividiu-se a leitura TL de dez pastilhas sem anteparo pela leitura de outras dez pastilhas usando-se o anteparo.

Observa-se na figura que a resposta TLFE em função da energia radiante apresenta comportamento linear. Isso indica que as amostras de CaSO₄:Dy são bastante sensíveis à radiação do laser excímero (193nm).

O comportamento da resposta TLFE em função da dose gama absorvida e da exposição ao laser excímero é comparado com a resposta à radiação UV (exposição por 20min e comprimento de onda de 310nm) sendo o resultado mostrado na figura 30. As amostras foram irradiadas com 20Gy, tratadas termicamente e expostas a 4 pulsos da radiação laser (equivalente a aproximadamente 12mJ de energia radiante acumulada).

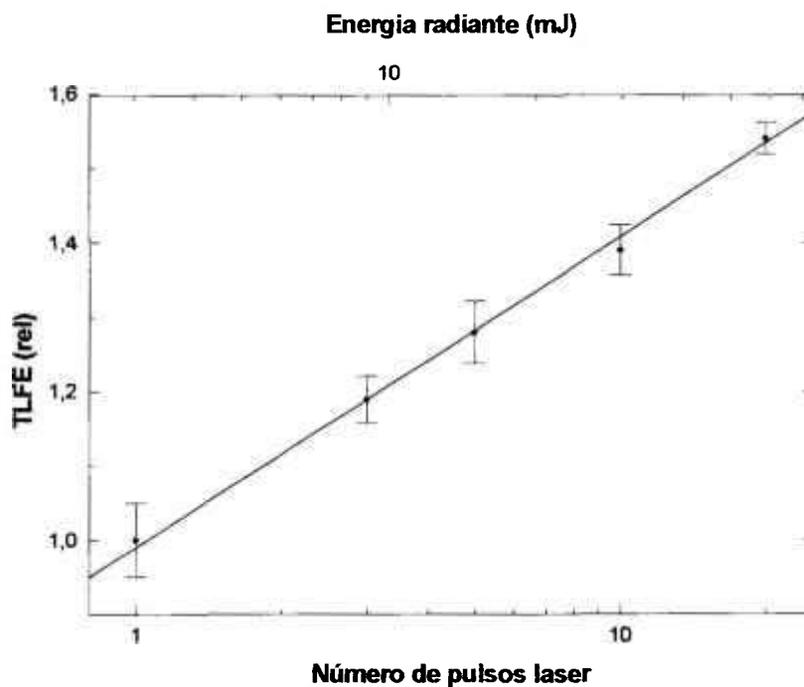


Figura 29: Dependência da resposta TLFE em função da quantidade de pulsos do laser excímero.

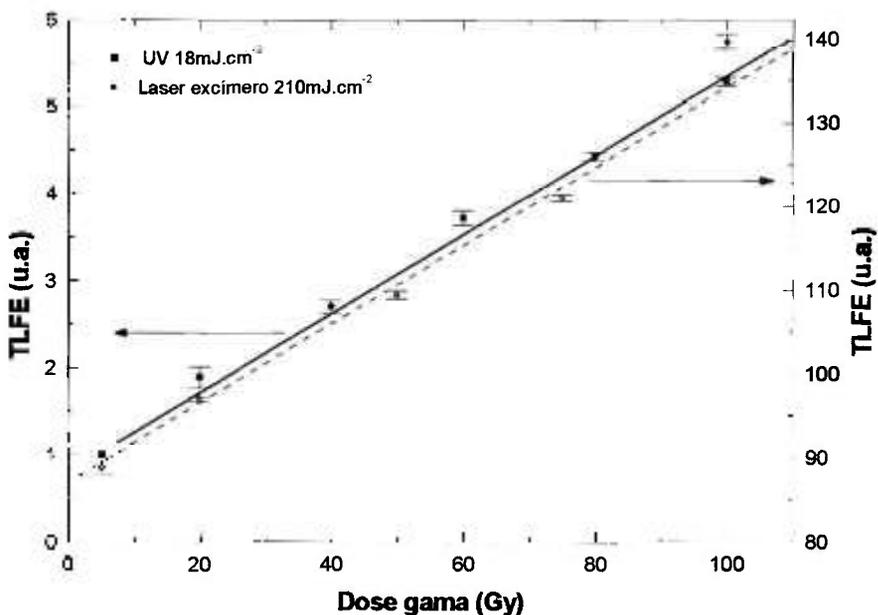


Figura 30: Resposta TLFE em função da dose gama para as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ quando expostas à radiação do laser excímero e à radiação UV.
 Dose gama: 20Gy, quantidade de pulsos: 4 (12mJ)
 diâmetro do feixe laser: 0,9mm; comprimento de onda UV: 310nm.

Por meio do gráfico da figura 30 observa-se o comportamento linear da resposta TLFE em função da dose gama, além da grande diferença de sensibilidade das amostras para as radiações laser e UV. Para uma diferença de exposição radiante de aproximadamente 10 vezes entre laser excímero e radiação UV da lâmpada HBO 200W, o sinal TLFE das amostras tem um aumento médio de 110 vezes. Chandra *et. al.* [21] encontraram um fator de aproximadamente 500 para a resposta TLFE do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ quando exposto a comprimentos de onda de 200 e 300nm usando uma lâmpada de alta pressão de xenônio de 2500W de potência.

Nosso caso é um tanto diferente do reportado na bibliografia, pois comparamos laser e lâmpada UV com exposições radiantes diferentes. Porém tal sensibilidade incentivou novos estudos dentro do Centro Oftalmológico da Unifesp.

4.3.3.2. Detecção de radiação espalhada

Com o intuito de averiguar o comportamento das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para a avaliação da radiação espalhada dentro do centro cirúrgico, foi proposto um método fácil e barato para envio das amostras via correio, como descrito no item 3.5.1 do capítulo 3, para que os cirurgiões da Unifesp se responsabilizassem pela manipulação das amostras dentro do centro cirúrgico, sempre sob orientação dos pesquisadores do IPEN de como proceder.

Os detectores enviados à Unifesp foram irradiados com dose gama de 5Gy e tratados a 300°C/15min.

Uma vez dentro do centro cirúrgico, um lote de cinco amostras de análise foi fixado nos pontos de interesse já descritos (testa do paciente, testa do cirurgião, testa do instrumentador e paredes lateral e dos fundos) com fita adesiva dupla face. Ao final da cirurgia, as amostras foram retiradas e prontamente

embaladas e acondicionadas em local seco e não iluminado e reenviadas para o IPEN, onde, após 48h à exposição ao laser excímero, foram analisadas

Os resultados obtidos são vistos na figura 31. As cirurgias não apresentam sempre os mesmos procedimentos e parâmetros, como por exemplo, o número de pulsos (ou fluxo energético) disparados nos pacientes e o tempo de cirurgia.

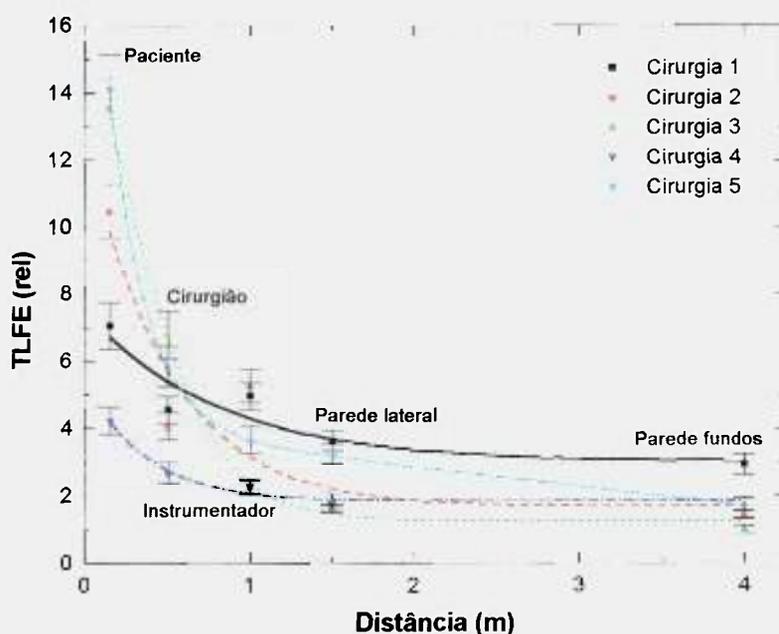


Figura 31: Resposta TLFE das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ em função da distância da fonte laser dentro do centro cirúrgico da Unifesp.

As amostras de controle não apresentaram nenhum sinal espúrio que pudesse invalidar as amostras de análise. O mesmo ocorreu com as amostras de contra-prova.

A figura 31 mostra o decaimento exponencial da resposta TLFE em função da distância da fonte laser. Esta figura mostra, ainda, que os trabalhadores da área de saúde, como cirurgiões e instrumentadores, estão expostos a doses de radiação espalhadas do laser dentro da sala cirúrgica.

Uma análise do crescimento do sinal TLFE em função do tempo de permanência na sala cirúrgica também foi realizada. A figura 32 mostra os resultados obtidos para três amostras que permaneceram nos pontos de interesse

indicados na figura 6 por 4 horas e outras que ficaram apenas o tempo de uma cirurgia, 10min.

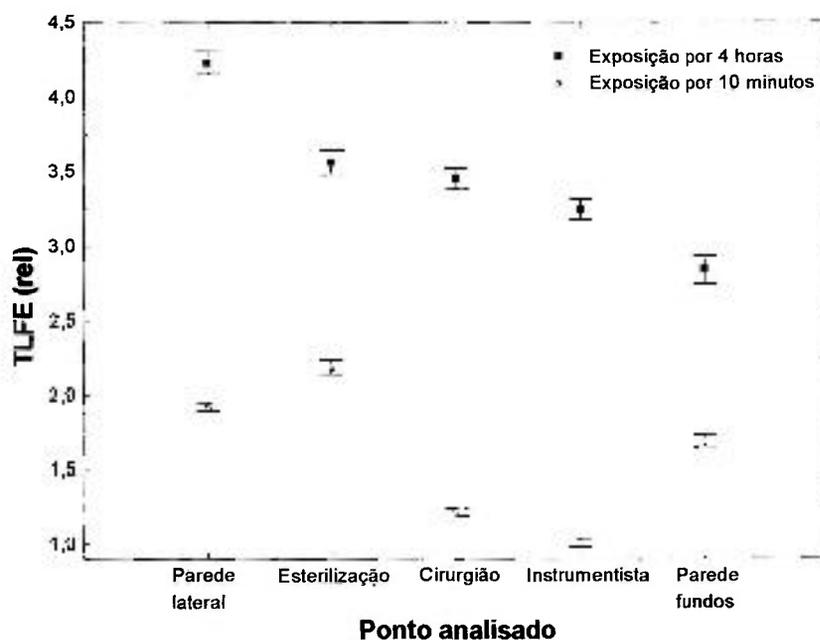


Figura 32: Resposta TLFE acumulada para exposição ao laser excímero por um intervalo de tempo de 4h.

A figura indica que os trabalhadores estão sujeitos a uma exposição bastante significativa em um intervalo de 4h.

Com estes dados de exposição à radiação laser acumulada e, sabendo que a relação entre energia radiante e resposta TLFE para o laser excímero é linear conforme mostrado na figura 29, foi possível determinar a que energia radiante as amostras sob análise foram expostas, por meio da extrapolação do gráfico. As figuras 33 e 34 mostram estes resultados.

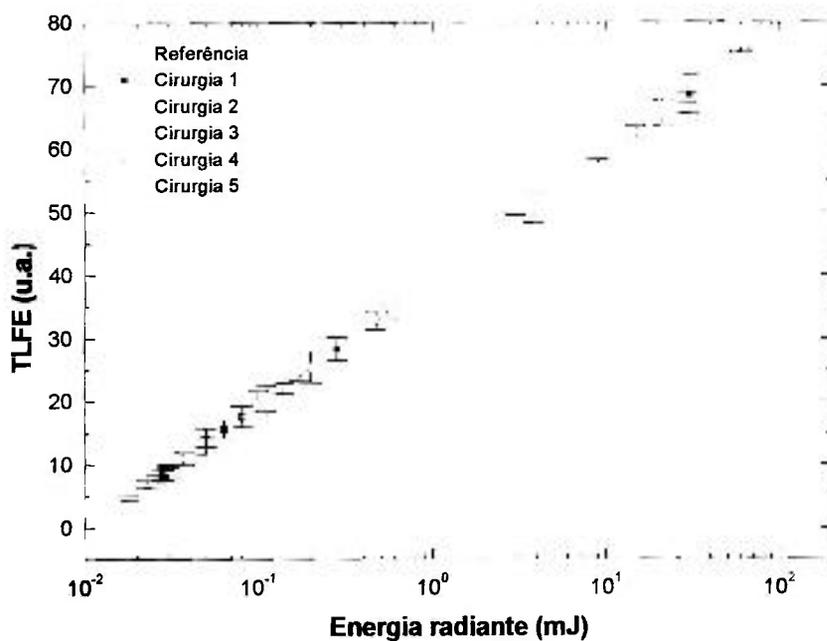


Figura 33: Energia radiante absorvida pelas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ nas cirurgias em estudo.

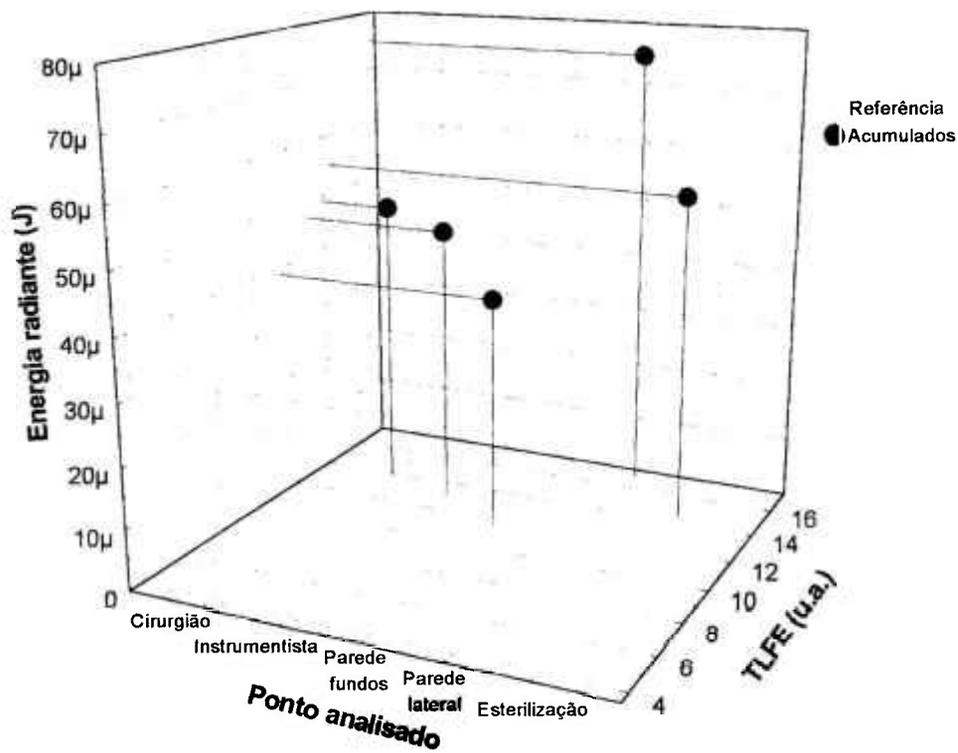


Figura 34: Energia radiante acumulada pelas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ num intervalo de tempo de 4h.

A referência da figura 32 são os dados da figura 29 normalizados e corrigidos para a extrapolação realizada nas figuras 33 e 34, uma vez que a área sensibilizada nos detectores pela radiação laser na análise da figura 32 é, aproximadamente, onze vezes maior que a da figura 29.

Pode ser observado na figura 33 que os pontos com energia radiante acima do valor de 3mJ são apenas aqueles fixados aos pacientes submetidos à cirurgia. Trabalhadores e ambiente da sala não recebem mais que 1mJ de radiação espalhada por cirurgia. A figura 34, onde estão indicados os pontos de referência, expostos somente a uma cirurgia, e os de exposição acumulada, expostos durante 4h dentro da sala cirúrgica para o cirurgião e o instrumentador, indica que há uma variação de mais de 30μJ entre a exposição em uma cirurgia (10min de exposição) e 4h (acumulados) dentro da sala.

Segundo a literatura [49] o limite de exposição (LE) à radiação laser depende do tempo de exposição, comprimento de onda e também do modo de oscilação do laser utilizado. Para intervalos de tempo de exposição entre 10^{-9} a 3.10^4 s, o LE varia de 30J.m^{-2} (3.10^5J.cm^{-2}) a 3mJ.m^{-2} (30J.cm^{-2}), respectivamente.

Como o diâmetro das amostras que receberam a radiação laser espalhada é de 6mm, vem que o limite de exposição para a energia radiante é de 85kJ a 8,5J, respectivamente.

Portanto, é observado que os trabalhadores da área médica, num intervalo de acúmulo de sinal de 4h, estão bastante abaixo do limite mínimo de exposição à radiação laser (8,5J num intervalo de tempo de 3.10^4 s = 8h20min).

Deve-se acrescentar que a literatura nada diz a respeito de acúmulo de radiação laser com o passar do tempo. Apenas recomenda limites máximos de exposição, durante determinado tempo, que não devem ser ultrapassados no caso de exposição contínua.

5. CONCLUSÕES

A caracterização das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para utilização na dosimetria de radiações UV e laser foi realizada com sucesso e a sua aplicação na monitoração de radiação laser espalhada no ambiente também mostrou-se bastante promissora.

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O tempo de tratamento térmico pré-irradiação gama influencia na sensibilidade das amostras, sendo que o tratamento a $300^\circ\text{C}/15\text{h}$ apresentou melhor resultado;
- Não há sensibilização das amostras quando expostas à radiação luminosa (lâmpadas fluorescentes) da sala onde as exposições UV ou laser são realizadas;
- As amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ apresentam um decaimento óptico do sinal de 25% em 24h, permanecendo neste patamar após este tempo de estocagem em blindagem de chumbo à temperatura ambiente;
- Os menores comprimentos de onda na região do UV são aqueles que mais sensibilizam as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, 193 e 250nm;
- Amostras expostas sucessivamente a comprimentos de onda diferentes acumulam sinal TLFE proporcional à sensibilidade relativa à cada comprimento de onda;
- Amostras irradiadas com doses gama baixas apresentaram maior sensibilidade quando expostas à tempos mínimos de radiação UV (30s de incidência com exposição radiante pequena);
- O limite mínimo de detecção de radiação não ionizante não depende da potência da fonte, mas sim do tempo de exposição das amostras;
- A dosimetria de radiação laser utilizando-se o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ mostrou ser promissora para aqueles que atuam na região de UV, como o nitrogênio e o excímero;

- As análises realizadas com lasers de comprimento de onda na região do infravermelho não sensibilizaram as amostras, nem mesmo usando-se altos valores de energia radiante;
- O laser de argônio, atuando na região do visível, sensibiliza pouco as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, sendo necessário potências altas e tempos de exposições igualmente altos para aquisição de curvas luminescentes;
- O laser de nitrogênio sensibiliza as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 10 vezes mais que o laser de argônio e 4 vezes mais que a radiação UV (310nm durante 20min sob irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- O laser excímero sensibiliza as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 110 vezes mais que a radiação UV (310nm durante 20min sob irradiância de $15\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$);
- A radiação espalhada pode ser detectada a 4m da fonte laser com boa definição de curva luminescente. O método proposto pelos pesquisadores de envio das amostras foi bem sucedido, uma vez que é rápido, barato e não houve acúmulo de sinais espúrios no trajeto de ida e volta entre IPEN e Unifesp;
- A monitoração do crescimento do sinal TLFE das amostras em função do tempo de exposição ao laser excímero dentro da sala de cirurgia da Unifesp mostrou ser de grande valia, uma vez que ele pode indicar o valor da exposição radiante que os trabalhadores da área médica estão expostos.

Todos estes resultados indicam que o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ possui características desejáveis para a aplicação na monitoração das exposições à radiação ultravioleta e laser devido, principalmente, à sua alta luminescência, linearidade com a exposição à região de UV por grandes períodos de tempo e energia além da estabilidade do sinal óptico durante o tempo de estocagem.

ANEXO

Aqui estão definidos alguns termos importantes usados em radiometria e fotometria, os quais são:

- *Energia radiante* (Q_e): refere-se à potência que alcança um ponto no espaço, acumulada num dado intervalo de tempo. Sua unidade é o **joule**.
- *Energia luminosa* (Q_v): é a quantidade de luz medida num intervalo de tempo, sendo medida em **lúmen.s**. Geralmente é aplicada à fontes luminosas pulsantes.
- *Fluxo radiante* ($\phi_e = \frac{\partial Q_e}{\partial t}$): é **uma** característica fundamental de detectores radiométricos. Define-se como a potência óptica total de uma fonte luminosa, isto é, a razão da energia radiante por um intervalo de tempo e é expresso em **watt**. Para medir o fluxo radiante, o detector deve possuir uma área ativa de medição a qual colete toda a radiação incidente, como mostra a figura 35.

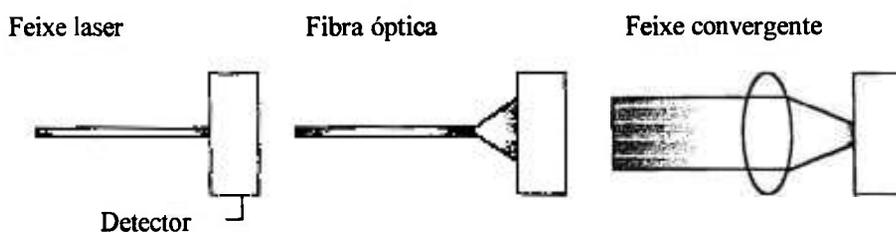


Figura 35: Medição do fluxo radiante

- *Fluxo luminoso* ($\phi_v = \frac{\partial Q_v}{\partial t}$): é a medida da energia luminosa total de uma fonte de luz visível. Pode ser medido na unidade fundamental da fotometria, o **lúmen**. Para ser medida necessita que, como o fluxo radiante, toda a potência da fonte se concentre no detector. Isto é problemático com fontes que se espalham no espaço, como LEDs e lâmpadas.

- **Irradiância** ($E_e = \partial\phi_e / \partial A$): é a quantidade de fluxo radiante incidente sobre uma secção de área conhecida. A unidade internacional da medida é o **watt.m⁻²**. Entretanto, devido a muitos detectores terem uma área efetiva de detecção de 1cm², também o **watt.cm⁻²** é bastante empregado.

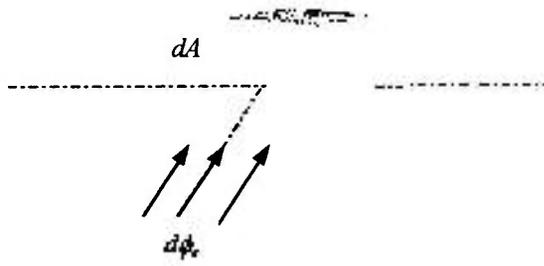


Figura 36: Irradiância de uma superfície

- **Exposição radiante** ($H = \int E_e \partial e$): é a integral da irradiância e sua unidade é o **joule.cm⁻²**. Esta grandeza é bastante usada quando necessário determinar a energia radiante incidente numa secção de área conhecida.
- **Iluminância** ($E_v = \partial\phi_v / \partial A$): é definida como a quantidade de luz visível incidente sobre uma dada superfície com área A . Sua unidade é o **lux** (1lux = 1lm.m⁻²).
- **Emitância radiante** ($M_e = \partial\phi_e / \partial A$): propriedade da fonte luminosa; é o fluxo radiante total de uma fonte dividido pela área superficial da fonte. Sua unidade é o **watt.m⁻²**, podendo ser reduzido para o **watt.cm⁻²**. Este tipo de medida somente é aplicado a fontes luminosas extensas e é usual para fazer medida da eficiência em fontes luminosas de diferentes materiais.
- **Emitância luminosa** ($M_v = \partial\phi_v / \partial A$): é uma propriedade intrínseca de fontes luminosas. É o quociente do fluxo luminoso que deixa uma fonte luminosa, dividido pela área de superfície da fonte. Pode-se medir a emitância luminosa em **lúmen.m⁻²**, porém não deve-se confundir com a medida de iluminância (lux). A área que se refere à emitância é a da fonte, não da superfície iluminada. Esta medida aplica-se a emissores de superfície plana.

- *Intensidade radiante* ($I_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial \Omega}$): é a quantidade de fluxo radiante emitido através de um ângulo sólido conhecido. É medido em **watt.sterorradiano⁻¹**. A intensidade radiante é uma propriedade da fonte luminosa e talvez não seja relevante à não uniformidade da distribuição espacial da radiação da fonte [23]. É apropriada para fontes puntiformes (ou aproximações, como a medida de intensidade de LEDs) mas não para fontes colimadas.
- *Intensidade luminosa* ($I_v = \frac{\partial \phi_v}{\partial \Omega}$): definida como a quantidade de fluxo luminoso emitido uniformemente num ângulo sólido. É medida em **candela** ($1\text{cd} = 1\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$). Esta também é uma característica de fontes luminosas, não aplicável apenas àquelas colimadas e para emissores não uniformes.
- *Radiância* ($L_e = \frac{\partial I_e}{\partial A \cdot \cos \Theta}$): é a intensidade radiante emitida de uma área definida da fonte luminosa que incide num plano de área ortogonal ao fluxo. É usada para medir fontes extensas ou painéis eletroluminescentes; não é apropriada para caracterizar fontes puntiformes [23]. Sua unidade é o **watt.cm⁻².sterorradiano⁻¹**.
- *Luminância* ($L_v = \frac{\partial I_v}{\partial A \cdot \cos \Theta}$): também chamada de claridade. Mede o fluxo refletido de, ou emitido por, uma superfície chata e uniforme. A técnica leva em conta a área da superfície, além do ângulo subtendido visto por um observador. Também pode ser pensada como intensidade luminosa por unidade de área, d'onde vem sua unidade, **candela.m⁻²**.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – LEFFEL, D. J.; BRASH, D. E. Sunlight and skin cancer. *Scientific American*, n. 7, p. 38 – 43, 1996.
- 2 – STIMSON, A. *Photometry and radiometry for engineers*. New York. John Wiley & Sons, 1974.
- 3 – PHILLIPS, R. *Sources and applications of ultraviolet radiation*. London, Academic Press, 1983.
- 4 – MOSELEY H. *Non-ionising radiation – microwaves, ultraviolet and laser radiation*. Bristol. Adam Hilger, 1988.
- 5 – INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION / INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE. Review of concepts, quantities, units and terminology for non-ionizing radiation protection. *Health Physics*, v. 49, n. 6, p. 1329 – 1362, 1985.
- 6 – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation quantities and units*. Bethesda, 1980. (ICRU Report 33).
- 7 – AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *Safe use of lasers*. New York, 1993. (ANSI Z-136.1).
- 8 – INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION / INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE. Guidelines on limits to ultraviolet radiation of wavelengths between 180nm and 400nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, v. 49, n. 2, p. 331 – 340, 1985.

- 9 – OKUNO, E; CALDAS, I. L; CHOW, C. ***Física para ciências biológicas e biomédicas***. São Paulo. Harper & Row do Brasil, 1982.
- 10 – NIEMZ, M. H. ***Laser tissue interactions – fundamentals and applications***. Berlin. Springer, 1996.
- 11 – HILLEMKAMP, F. Laser radiation tissue interaction. ***Health Physics***, v. 56, n. 5, p. 613 – 616, 1989.
- 12 – SLINEY, D. H. Ultraviolet radiation effect upon the eye: problems of dosimetry. ***Radiation Protection Dosimetry***. v. 72, n. 3 – 4, p. 197 – 206, 1997.
- 13 – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECCLAIRAGE. ***International lighting vocabulary, 4th edn***. Vienna, 1987. (Pub. CIE n. 17 E-1.1).
- 14 – NAMBI, K. S. V. ***Thermoluminescence: its understanding and applications***. São Paulo. Maio, 1977. (IEA-Pub. – 54).
- 15 – CAMERON, J. R.; SUNTHARALINGAN, N.; KENNEY, G. N. ***Thermoluminescent Dosimetry***. Madison, Univ. Wisconsin Press, 1968.
- 16 – OBERHOFER, M.; SCHARMANN A. ***Applied Thermoluminescence Dosimetry***. Published for the Commission of the European Communities. Adam Hilger, 1979.
- 17 – ZIMMERMAN, J. Radiation induced increase of thermoluminescence sensitivity of dosimetry phosphor LiF (TLD – 100). ***Journal of Physics C***. v. 18, n. 4, p. 3277 – 3280, 1971.
- 18 – HOROWITZ, Y. S. ***Thermoluminescence and Thermoluminescent dosimetry – v. II***. Boca Raton. CRC, 1984.
- 19 – NANTO, H. Photostimulated luminescence in insulators and semiconductors. ***Radiation Effects & Defects in Solids***, v. 46, p. 311 – 321, 1998.

- 20 – POTIENS, A. J.; CAMPOS, L. L. Ultraviolet and laser radiation dosimetry using phototransferred thermoluminescence in $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 66, n. 1 – 4, p. 95 – 96, 1996.
- 21 – CHANDRA, B.; AYYANGAR, K.; LAKSHMANAN, A. R. Ultraviolet response of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. ***Physics in Medicine and Biology***, v. 21, n. 1, p. 67 – 73, 1976.
- 22 – SHINDE, S. S.; LAKSHMANAN, A. R.; BHATT, B. C.; BHATT; R. C. Photo transfer thermoluminescence in $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ – grain size dependence; ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research***, v. B31, p. 592 – 596, 1988.
- 23 – GRASEBY OPTRONICS, INC. ***The guide to radiometry***. Orlando. Customer Folder, August 1992.
- 24 – DRISCOLL, C. M. H. Dosimetry methods for UV radiation. ***Radiation Protection Dosimetry***. v. 72, n. 3 – 4, p. 217 – 222, 1997.
- 25 – CAMPOS, L. L.; LIMA, M. F. Dosimetric Properties of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ Teflon pellets produced at IPEN. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 14, n. 4, p. 333 – 335, 1986.
- 26 – INTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. L. L. Campos Rodrigues. Processo de obtenção de cristais de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e sua compactação para uso em dosimetria da radiação. BR n. PI 8106943. Ago. 1981.
- 27 – CAMPOS, L. L.; LIMA, M. F. Thermoluminescent $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ teflon pellets for beta radiation detection. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 18, n. 2, p. 95 – 97, 1987.
- 28 – CAMPOS, L. L. Graphite mixed $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ TL doseimeters for beta radiation dosimetry. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 48, n. 2, p. 205 – 207, 1993.

- 29 – LAKSHMANAN, A. R.; POPLI, K. L.; BHATT, R. C. Thermal history and reusability of CaSO₄:Dy Teflon TLD discs. ***Physics in Medicine and Biology***, v. 24, n. 5, p. 999 – 1008, 1979.
- 30 – KITIS, G.; HASAN, F.; CHARALAMBOUS, S. Regenerated thermoluminescence: some new data. ***Nuclear Tracks***, v. 10, n. 4, p. 565 – 570, 1985.
- 31 – YOUNG, M. ***Óptica e lasers***. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, 1998.
- 32 – MCKEEVER, S. W. S.; MOSCOVITCH, M.; TOWNSEND, P. D. ***Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses***. London, Nuclear Technology Publishing, 1995.
- 33 – CHAKRABARTI, K.; MATHUR, V. K.; ABBUNDI, R. J.; HILL, M. D. UV induced trapping in powder and sintered CaSO₄:Tm and CaSO₄:Dy. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 33, n. 1, p. 35 – 38, 1990.
- 34 – LEWANDOWSKI, A. C.; MATHUR, V. K. High dose and phototransferred thermoluminescence in CaSO₄, CaSO₄:Dy and CaSO₄:Tm. ***Radiation Protection Dosimetry***. v. 66, n. 1 – 4, p. 213 – 216, 1996.
- 35 – GOYET, D.; LAPRAZ, D.; IACCONI, P.; BARTHE, J.; PREVOST, H.; GASLOT, J. UV emission in the TL peaks of CaSO₄:Dy: origin and application to high temperature dosimetry. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 47, n. 1 – 4, p. 147 – 150, 1993.
- 36 – GODBOLE, S. V.; NAGPAL, J. S.; PAGE, A. G. UV induced photoluminescence and thermally stimulated luminescence of CaSO₄:Eu and CaF₂:Tb⁺³ phosphors. ***Radiation Measurements***, v. 32, p. 343 – 348, 2000.
- 37 – CALDAS, L. V. E. ***Termoluminescência radio e fotoestimulada do LiF:Mg***. São Paulo: 1973. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

- 38 – COLYOTT, L. E.; AKSELROD, M. S.; MCKEEVER, S. W. S. Phototransferred thermoluminescence in α -Al₂O₃:C. ***Radiation Protection Dosimetry***, v. 65, n. 1 – 4, p. 263 – 266, 1996.
- 39 – OKUNO, E. ***Propriedades termoluminescentes do fluoreto de cálcio natural***. São Paulo: 1971. Tese (Doutoramento) – Universidade de São Paulo.
- 40 – LAS, W. C. ***Mecanismos propostos de termoluminescência induzida pela luz UV no CaF₂ natural***. São Paulo: 1975. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
- 41 – DHOPTÉ, S. M.; MUTHAL, P. L.; KONDAWAR, V. K.; MORHARIL, S. V. Mechanism of thermoluminescence in CaSO₄:Dy. ***Radiation Effects & Defects in Solids***, v. 117, p. 337 – 342, 1991.
- 42 – LAKSHMANAN, A. R. Photoluminescence and thermostimulated luminescence processes in rare-earth-doped CaSO₄ phosphors. ***Progress in Materials Science***. v. 44, p. 1 – 187, 1999.
- 43 – NAGPAL, J. S. Ultraviolet radiation dosimetry – perspectives, problems & parameters. ***10th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION***, May 14 – 19, 2000. Hiroshima.
- 44 – HSU, P.C.; WENG, P. S. Influence of radiation on CaF₂:Tm thermoluminescence dosimeters. ***Radiation Protection Dosimetry***. v. 58, n. 4, p. 297 – 300, 1995.
- 45 – CALVERT, R. L.; YOUNG, J. G.; BARTINIK, D. L. The effect of ultra-violet and visible radiation on CaSO₄:Dy in Teflon discs used for personnel γ -radiation monitoring. ***Health Physics***. v. 46, n. 2, p. 275 – 281, 1984.

- 46 – MACKEEVER, S. W. S. Models for optical bleaching of thermoluminescence in sediments. *Radiation Measurements*. v. 23, n. 2 – 3, p. 267 – 275, 1994.
- 47 – BIRCHALL, I.; BECKLEY, R. J. Use of a thermoluminescent dosimetry system to measure laser beam power density. *Health Phys*, v. 28, n. 5, p. 622 – 623, 1975.
- 48 – BULL, R. K. The creation and filling of thermoluminescence traps during irradiation. *Radiation Protection Dosimetry*. v. 17, p. 459 – 463, 1986.
- 49 - INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION / INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE. Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180nm and 1mm. *Health Physics*, v. 49, n. 2, p. 341 – 359, 1985.