UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA À MEDICINA E
BIOLOGIA - FAMB

Análise do desvanecimento do sinal termoluminescente
por meio da curva de emissão

Caio César Garcia Souza

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências, obtido no Programa de Pós-Graduação em Física Aplicado à Medicina e Biologia.

Ribeirão Preto - SP

2021

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADO À MEDICINA E
BIOLOGIA - FAMB

Análise do desvanecimento do sinal termoluminescente

por meio da curva de emissão

Caio César Garcia Souza

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto – FFCLRP – da USP, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências, obtido no Programa de Pós-Graduação em Física Aplicado à Medicina e Biologia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Martins da Costa (in memorium)

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Nicolucci

Ribeirão Preto - SP

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Souza, Caio César Garcia

Análise do desvanecimento do sinal termoluminescente
por meio da curva de emissão. Ribeirão Preto, 2021.

62 p.: il.; 30 cm

Dissertação de Mestrado, apresentada à Faculdade de
Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/USP. Área de
concentração: Física Aplicada à Medicina e Biologia.

Orientadora: Nicolucci, Patrícia.

1. Dosimetria Individual. 2. Termoluminescência. 3. Proteção
Radiológica. 4. CaSO₄.

Nome: SOUZA, Caio César Garcia

Título: Análise do desvanecimento do sinal termoluminescente
por meio da curva de emissão

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia,
Ciência e Letras de Ribeirão Preto da USP, como parte
das exigências para a obtenção do título de Mestre em
Ciências

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Ao meu eterno orientador,
Prof. Dr. Alessandro Martins da Costa
(in memorium).

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Jonas e Cleuza, por sempre me apoiarem em minhas decisões, e serem suportes nos momentos difíceis, sendo fundamentais em minha vida. Hoje eu possuo uma graduação, e estou concluindo meu mestrado, algo inimaginável sem o incentivo, amor e educação dado por vocês. Só posso ser grato por pais tão maravilhosos, e amorosos. Eu amo vocês.

Ao meu irmão, Eric, que me apoia e me faz buscar sempre uma versão melhor de mim para que eu possa ser sempre seu reflexo como irmão mais velho. Eu te amo muito,

A minha companheira, amiga e namorada Natasha, que me ama, e sempre se faz presente por mim quando eu preciso. Ribeirão Preto seria muito mais difícil sem você, obrigado por dividir sua vida comigo, eu amo essa nova fase. Eu te amo muito.

Ao meu querido Professor Alessandro que não apenas foi um professor e orientador de excelência, mas um amigo, e alguém que me acolheu na minha chegada em Ribeirão Preto. Infelizmente ele não se faz presente fisicamente, mas está presente em cada página desse trabalho. Obrigado por tudo professor, você está comigo em cada momento, e o pouco tempo de convívio foi o suficiente para contribuir imensamente em minha vida profissional e pessoal, muitas saudades.

A Professora Patrícia por aceitar dar continuidade ao trabalho, e acreditar no estudo, colocando todo empenho e dedicação a esse mestrado. Um agradecimento também à equipe do CIDRA por apoio e paciência, em especial a técnica Dra. Cassiane por toda ajuda e parceria, sendo fundamental para a execução do trabalho.

Um agradecimento a todos os meus amigos e companheiros que me ajudaram nessa jornada. Ao grupo Toco's que é formado por – Paulo, um amigo de graduação, que nesses anos serviu para fortalecer mais ainda nossa amizade, você ocupa um pedaço especial da minha vida, meu grande obrigado por tudo que você fez por mim. Ao Dadalt, meu grande companheiro, que tornou minha estadia muito mais divertida e emocionante durante esses anos, e que contribuiu imensamente com meu trabalho de maneira técnica e intelectual. Ao Kaio, meu grande amigo, xará que compartilha comigo o amor pela física e pelo Corinthians, uma pessoa de grande coração, eu nunca vou te esquecer, meu querido. A Vivian, foi lindo demais fazer parte da sua história e ver você crescer e se desenvolver, sinto sua falta, você é demais. A Karen, querida companheira de Botucatu, que eu possuo um carinho muito especial, obrigado por tudo. E ao Emanuel, um dos maiores músicos que eu já conheci, sempre foi uma honra tocar e fazer música ao seu lado, obrigado por todas as conversas e companheirismo. Todos vocês fizeram minha estadia nessa cidade mais leve e tranquila, eu amo vocês, obrigado por todo crescimento pessoal

que vocês proporcionaram, e por todo amor e carinho. E também, um agradecimento ao meu querido amigo Lucas Lima, por todas as conversas, conselhos, apoio e companheirismo, eu te amo demais meu irmão de outra mãe, sem você talvez eu não estaria aqui concluindo esse trabalho.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Física da FFCLRP, muito obrigado por me abrirem as portas e estarem sempre a postos para me ajudar. A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo apoio financeiro.

Resumo

A dosimetria termoluminescente é fundamentada no princípio de que alguns cristais podem absorver e armazenar a energia da radiação ionizante, que é reemitida na forma de radiação eletromagnética, quando estes cristais são aquecidos. A luz emitida é então detectada por uma fotomultiplicadora e correlacionada à dose absorvida recebida pelo material termoluminescente (TL). A perda do sinal termoluminescente com o tempo decorrido entre a irradiação e a leitura é uma característica bem conhecida dos dosímetros termoluminescentes e é referida como desvanecimento. Para o monitoramento de doses individuais, o efeito do desvanecimento é uma questão desafiadora, pois a medição de um sinal reduzido resulta em uma subestimação da dose de irradiação. Normalmente, o desvanecimento é contornado através de um tratamento térmico, que apaga o sinal dos picos de menor temperatura, sendo eles os maiores responsáveis pelo desvanecimento do sinal. Devido a isso, o objetivo deste trabalho foi estudar e analisar a curva de emissão TL, e entender melhor o fenômeno do desvanecimento e a metodologia de tratamento térmico, podendo propor uma metodologia alternativa para otimizar o tempo de leitura e tratamento da pastilha. Um total de 100 pastilhas foram utilizadas para seleção de um grupo de trabalho para avaliação do desvanecimento do sinal TL com o tempo entre a irradiação e a leitura. A seleção foi dada pela leitura média e reprodutibilidade das pastilhas. Após a seleção, essas pastilhas foram divididas em subgrupos, em que cada grupo foi irradiado com doses de 0,1 a 10 mGy. O sinal TL de cada subgrupo foi lido após tempos de 0 a 60 dias após a irradiação, com avaliação do desvanecimento dos picos de baixa (P1) e alta (P2) temperatura. Foram comparados resultados com e sem tratamento térmico realizado previamente às leituras. Pelos resultados foi possível observar que a partir do dia 10, o sinal do P1 desaparecia quase por completo, além de que o tratamento térmico melhora os resultados obtidos referentes ao P2, com uma redução da dispersão dos dados de até 12%. Porém, os resultados obtidos apontam para a potencialidade da utilização da razão F (razão da integral do sinal do P2 pela integral do sinal total) como parâmetro dosimétrico. Foi possível perceber que a razão F apresenta resultados comparáveis para leituras com e sem tratamento térmico. Isso mostra que a razão F é um potencial parâmetro dosimétrico que independe tanto do desvanecimento, quanto da dose. Desta forma, o uso da razão F pode representar um potencial ganho para laboratórios de dosimetria individual, no sentido de facilitar o processamento dos dosímetros individuais sem a necessidade de tratamentos térmicos pré-leitura e mantendo-se a exatidão da quantificação das grandezas operacionais.

Palavras-chave: Dosimetria Individual; Termoluminescência; Proteção Radiológica; CaSO₄.

Abstract

Thermoluminescent dosimetry is based on the principle that some crystals can absorb and store energy from ionizing radiation, which is re-emitted in the form of electromagnetic radiation when these crystals are heated. The emitted light is then detected by a photomultiplier tube and correlated to the absorbed dose received by the thermoluminescent (TL) material. The loss of the thermoluminescent signal with the time elapsed between the irradiation and the reading is a well-known characteristic of thermoluminescent dosimeters and is referred to as fading. For the monitoring of individual doses, fading is a challenging issue, as measuring a reduced signal results in an underestimation of the irradiation dose. Fading is usually bypassed through a thermal treatment, which erases the signal from the lowest temperature peaks, which are the most responsible for the signal fading. Hence, the objective of this work was to study and analyze the TL emission curve, and to better understand the fading phenomenon and the thermal treatment methodology, aiming to propose an alternative methodology to optimize the reading and treatment time. A total of 100 TL pellets were used to select a working group and assess the TL fading signal with the time between irradiation and reading. The selection was given by the average reading and reproducibility of the pellets. After selection, these pellets were divided into subgroups, in which each group was irradiated with doses from 0.1 to 10 mGy. The TL signal of each subgroup was read after times from 0 to 60 days after irradiation, with evaluation of the fading of the low (P1) and high (P2) temperature peaks. Results were compared with and without heat treatment performed prior to the readings. From the results it was possible to notice that from the tenth day onwards, the P1 signal disappeared almost completely, in addition to the heat treatment improving the results obtained for P2, with a reduction of data dispersion up to 12%. However, the obtained results point to the potential of using the F ratio (ratio of the integral of the P2 signal by the integral of the total signal) as a dosimetric parameter. It was possible to see that the F ratio showed comparable results for readings with and without thermal treatment. This shows that the F ratio is a potential dosimetric parameter that is independent of both fading and dose. Thus, the use of the F ratio can represent a potential gain for individual dosimetry laboratories, in the sense of facilitating the processing of individual dosimeters without the need for pre-reading thermal treatments and maintaining the accuracy of the quantification of the operational quantities.

Keywords: Individual Dosimetry; Thermoluminescence; Radiological Protection; CaSO₄.

Lista de figuras

Figura 1 - Fenômeno da termoluminescência. Imagem retirada do trabalho de Letícia Lucente Campos de 1998.	6
Figura 2 - Pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e suporte para irradiação em acrílico.....	11
Figura 3 - Arranjo da irradiação das pastilhas na fonte.	12
Figura 4 - Esquema exemplificando o processo de calibração das pastilhas	13
Figura 5 - Deconvolução do sinal de uma pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ do grupo experimental. É possível observar o sinal integral em vermelho, e os picos coloridos representam o sinal deconvoluído	18
Figura 6 - Curva de brilho típica de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, mostrando a intensidade T_I em função da temperatura	19
Figura 7 - Intensidade do sinal T_I em função da temperatura e do tempo, mostrando o comportamento do perfil do sinal da pastilha 10 ao longo do tempo.....	20
Figura 8 - Média da leitura individual de cada pastilha acompanhado de sua barra de erro. Em verde temos a linha representando a média das 100 pastilhas, e em azul e vermelho linhas guia, na qual representam o desvio de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ em relação à média.	21
Figura 9 - Curva de dose-resposta típica, demonstrando a linearidade dos grupos experimentais	24
Figura 10 - Sinal TL em função da temperatura: todos os sinais são referentes a mesma pastilha, porém em dias de leitura diferentes após a irradiação.....	27
Figura 11 - Integral do Pico 1 ao longo dos dias entre a irradiação e a leitura para o Grupo 1.	29
Figura 12 - Integral P1 (superior), e desvio padrão (inferior) em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura	30
Figura 13 - Integral do sinal do Pico 2 (superior) e seu desvio padrão (inferior) em função da dose e ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.	32
Figura 14 - Integral Total do sinal TL (superior) e seu desvio padrão (inferior) em função da dose e ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.	34
Figura 15 - Razão F (superior) e seu desvio relativo (inferior) em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.	36
Figura 16 - Sinal TL em função da temperatura para a mesma pastilha utilizada na Figura 1, porém com tratamento térmico realizado previamente à leitura.	37
Figura 17 - Integral P2 (parte superior do gráfico), e o desvio padrão (parte inferior do gráfico) em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.	39
Figura 18 - Integral Total (parte superior do gráfico), e desvio padrão (parte inferior do gráfico) em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.	40

Figura 19 - Razão F em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.....	42
--	----

Lista de tabela

Tabela 1- Tabela retirada das diretrizes básicas de proteção radiológica da norma da CNEM 3.01, na qual descreve os limites de dose anuais para o IOE, e também para indivíduo do público	4
Tabela 2 - Parâmetros utilizados neste trabalho, e suas características.....	16
Tabela 3 - Média de leitura, e o desvio padrão dos 5 grupos em irradiação com 2 mGy em fonte de ^{137}Cs	23
Tabela 4 - Sensibilidade dos grupos experimentais, e seu desvio padrão.	25
Tabela 5 - Divisão dos subgrupos com a dose de exposição, e o tempo de irradiação necessário para a dose estabelecida.....	25
Tabela 6 - Dose mínima detectável ($D0$), e fator de calibração (FC)	26
Tabela 7 - Integral do Pico 1 ao longo do tempo entre irradiação e leitura para os 5 grupos do estudo.....	29
Tabela 8 - Integral do Pico 2 ao longo do tempo entre irradiação e leitura para os 5 grupos do estudo.....	31
Tabela 9 - Integral total do sinal TL ao longo do tempo para os 5 grupos do estudo	33
Tabela 10 - Razão da integral do Pico 2 pela integral total ($IntP2IntT$) para os 5 grupos de estudo.....	35
Tabela 11 - Integrais do sinal TL do Pico 2 e integral total do sinal TL ao longo do tempo para os 5 grupos de estudo.	38
Tabela 12 - Razão dado pela integral do Pico 2 pela integral total do sinal TL ($IntP2IntT$) para os 5 grupo do estudo.	41
Tabela 13 - 10 leituras de luz de referência, com sua média e desvio padrão.....	47
Tabela 14 - 10 leituras do ruído da fotomultiplicadora, com sua média e desvio padrão	47
Tabela 15 - Média de cada calibração com seu desvio médio, seguido da média das quatro calibrações e seu desvio.....	47
Tabela 16- Seleção das 50 melhores pastilhas, com a leitura média das quadruplicadas, e seu desvio percentual individual, e o desvio em relação à média do grupo todo	47
Tabela 17 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.....	49
Tabela 18 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.....	49
Tabela 19 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.....	49
Tabela 20 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.....	49
Tabela 21- Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.....	49

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Fundamentos teóricos.....	3
2.1 Radiação Ionizante.....	3
2.2 Termoluminescência.....	4
2.3 Bandas Energéticas	5
2.4 Avaliação da curva de brilho	10
3. Materiais e Métodos	11
3.1. Materiais	11
3.2. Testes dosimétricos.....	12
3.2.1. Teste de desempenho da leitora.....	12
3.2.2. Avaliação geral da resposta TL do grupo de 100 pastilhas de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$	13
3.2.3. Homogeneidade do grupo.....	14
3.3. Grupo de estudo	14
3.3.1. Curva de dose-resposta.....	14
3.4. Desvanecimento.....	15
4. Resultados e Discussões.....	18
4.1. Curva de brilho	18
4.2. Testes dosimétricos.....	20
4.2.1. Teste de desempenho da leitora	20
4.2.2. Avaliação geral da resposta TL do grupo de 100 pastilhas de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$	21
4.2.3. Homogeneidade de grupo.....	22
4.3. Grupo de estudo	22
4.3.1. Curva de dose-resposta.....	23
4.4. Desvanecimento.....	26
4.4.1. Leituras sem tratamento térmico	26
4.4.2. Análise do sinal TL com tratamento térmico	36
4.5. Discussão geral	42
5. Conclusão.....	44
Referências	45
Apêndice 1	47

1. Introdução

Desde a descoberta das radiações ionizantes, juntamente com o avanço tecnológico, os raios X têm sido uma excelente ferramenta tanto para o uso terapêutico, quanto diagnóstico (Silva Lima & Ferreira Pimental, 2009). Devido a isso, atualmente a proteção radiológica e a dosimetria são indispensáveis para manter a segurança dos trabalhadores ocupacionalmente expostos (IOE) à radiação, sendo a dosimetria termoluminescente um dos principais métodos usados tanto para dosimetria individual quanto ambiental. (Rodrigues, 2012).

Os detectores termoluminescentes (*Thermoluminescent Detector* - TLD) são detectores de radiação passivos, que funcionam através de uma característica intrínseca do material sensível utilizado, que é a termoluminescência. Esse é o processo em que ocorre emissão de onda eletromagnética por um material aquecido, principalmente na faixa de luz visível, caso seja previamente irradiado (Barsanelli, 2003).

Atualmente, devido à grande variedade e das inúmeras composições possíveis, diferentes fósforos luminescentes podem ser usados para diferentes qualidades e tipos de radiação, seja ela radiação gama, nêutrons, partículas alfas e outras. Esses diferentes fósforos também permitem a detecção em um intervalo de doses de μGy a kGy , como mostrado na revisão feito por Burke (Burke, 1997).

Uma dificuldade de se trabalhar com esses TLDs é sua característica de desvanecimento do sinal termoluminescente. Esse efeito causa perda de sinal ao longo dos dias decorridos entre a irradiação e a leitura, que é causado pelo desarmadilhamento ou transferência de cargas (Sorger, Stadmann, & Sprengel, 2020). O efeito do desvanecimento normalmente é contornado através de uma metodologia bem conhecida e aplicada em laboratórios nacionais e internacionais, onde é realizado o tratamento térmico, adequado para cada tipo de dosímetro, previamente à leitura das pastilhas, como discutido na literatura (Aypar, 1978) (Konstantinidis, Tsoutsoumanos, Polymeris, & KitisGorbics, 2020).

No início do desenvolvimento da dosimetria termoluminescente, Cameron e colaboradores estudaram o efeito do desvanecimento em detectores de fluoreto de lítio (LiF) por longos períodos, mostrando desvanecimento de até 5% ao ano (Cameron, *et al*, 1964). Resultados diferentes foram encontrados através das leituras obtidas de dosímetros de LiF de dois hospitais em Londres, o *Hammersmith Hospital* e o *St. Bartholomew's Hospital*, que, em conjunto com a Universidade de Wisconsin, observaram que os dosímetros de LiF

apresentavam decaimento de 10-20% em até três semanas. (Suntharalingam, Cameron, & Fowler, 1968). A literatura mais recentes mostra um desvanecimento do sinal em torno de 7% em 2 semanas para esses detectores (Sorger, Stadmann, & Sprengel, 2020).

O aquecimento dos TLDs previamente a leitura diminui significativamente o desvanecimento devido à remoção dos picos de temperatura mais baixas (Izak-Biran, 1996), embora uma desvantagem destes métodos seja a redução da intensidade total do sinal. Além disso, a técnica de pré-aquecimento remove parte do sinal da curva de emissão e, assim, remove informações potenciais sobre a natureza da irradiação.

Detectores de fluoreto de lítio apresentam características compatíveis com as aplicações médicas, tanto em aplicações em radioterapia, e outros serviços de dosimetria em geral (Nunes & Rodrigues, 2012). Porém esse tipo de material não é produzido no Brasil, o que encarece esse tipo de equipamento, e uma alternativa é a utilização de dosímetros de sulfato de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$), ou TLD-900, que embora não seja amplamente utilizado como os dosímetros de LiF , são produzidos nacionalmente. Harvey e colaboradores reportaram que o desvanecimento do TLD-900 pode chegar até 3,7% em torno de 30 dias quando armazenados em temperatura ambiente e não exposto a luz (Harvey, Haverland, & Kearfott, 2010). Porém, quando exposto a qualquer espectro dentro da luz visível, verificou-se um desvanecimento maior que 50% do sinal termoluminescente. (Al-Ghorabie, 2005).

Dado esse contexto, esse trabalho tem como objetivo estudar e analisar a curva dosimétrica do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, quantificando o desvanecimento do sinal de pastilhas TLD de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, e avaliando a possibilidade de adoção de um procedimento de leitura sem tratamento térmico pré-leitura.

Esta dissertação foi redigida e dividida em Fundamentos Teóricos, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões, Conclusão e Referências Bibliográficas. Os Fundamentos Teóricos trazem, nos Capítulo 2, conceitos que fundamentam a base da dosimetria termoluminescente, e que são de extrema importância para a melhor compreensão e discussão a respeito da dissertação.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados em toda experimentação deste trabalho, além de descrever todas as metodologias utilizadas e aplicadas para calibração, leitura e melhoria da exatidão dos resultados.

Os resultados referentes às metodologias aplicadas no Capítulo 3 são apresentados, comparados e discutidos ao longo do Capítulo 4. E então, subsequente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais do trabalho. No Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas do trabalho.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Radiação Ionizante

A radiação é uma energia que se propaga no meio a partir de uma fonte emissora, seja ela partícula, ou como onda eletromagnética. Sua forma de interação com outros corpos depende do tipo, da energia e do meio absorvedor. A radiação ionizante é aquela capaz de depositar energia suficiente para arrancar um elétron da eletrosfera, em um processo chamado de ionização (Okuno & Yoshimura, Física das Radiações, 2010)

A radiação ionizante pode ser emitida por diferentes fontes, podendo ser através de reatores nucleares, aceleradores de partículas, tubos de raios X, fontes naturais como os radionuclídeos e radiação cósmica (Okuno & Yoshimura, Física das Radiações, 2010).

Os raios X se tornaram parte de vários processos importantes para a sociedade com sua descoberta pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895. Nessa época já era sabido que alguns materiais emitiam luz quando expostos ao tubo de raios catódicos, como o bário, por exemplo. Essa luz era capaz de atravessar objetos, e ficou conhecida como raios X (Martins, 1997).

Assim como Röntgen, outros cientistas como Antoine H. Becquerel, Maria S. Curie, Pierre Curie, Ernest Rutherford, entre outros, são reconhecidos como precursores da física médica, dadas suas descobertas e os efeitos causados.

Com a intensificação das pesquisas, o passar do tempo, e consequentemente avanço tecnológico, a radiação se tornou aliada da saúde e da indústria, permanecendo assim até os dias de hoje. Porém, quando a radiação é utilizada de forma inadequada em relação aos protocolos de segurança, pode causar risco ao indivíduo e a todo ambiente que está em sua volta. Porém, quando utilizada corretamente seguindo todos os protocolos de segurança, com a utilização de equipamentos de proteção e monitoramento das possíveis exposições, pode se tornar uma grande aliada.

Por isso, juntamente com o avanço da radiação ionizante, também ocorreu o desenvolvimento da proteção radiológica. A proteção radiológica envolve um conjunto de medidas aplicadas com o objetivo de garantir a segurança dos profissionais envolvidos no trabalho da área, sendo necessário a atualização constante dos protocolos de uso, a adoção de medidas preventivas quando necessárias e equipamentos que monitorem as doses referentes a áreas e indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE's), garantindo assim a segurança dos indivíduos e a otimização do seu uso.

Para que isso ocorra, a radiação precisa ser detectada e quantificada. Podem ser utilizados para a detecção diversos tipos de detectores; a gás, os cintiladores, contador proporcional, Geiger-Muller, e dosímetros termoluminescentes (TLD). Cada um desses detectores possui eficiência e especificidades de detecção diferentes, e nesse trabalho trataremos exclusivamente do TLD, e sua aplicação em dosimetria ocupacional.

Segundo norma CNEN, CNEN-NN-3.01 (CNEN, 2005), o limite anual de dose efetiva é dado na Tabela 1.

Tabela 1- Tabela retirada das diretrizes básicas de proteção radiológica da norma da CNEM 3.01, na qual descreve os limites de dose anuais para o IOE, e também para indivíduo do público

Limites de Dose Anuais [a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv [b]	1 mSv [c]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv [b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)	15 mSv
	Pele [d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

2.2 Termoluminescência

O fenômeno de termoluminescência foi descoberto em 1663, pelo químico Robert Boyle, quem descreveu os efeitos da termoluminescência em um diamante, que cintilava em seu laboratório, quando aquecido.

A termoluminescência ocorre quando um material que possui essa característica intrínseca é irradiado. Parte dos elétrons excitados pela radiação ficam armazenados em armadilhas (níveis eletrônicos na banda proibida), e posteriormente, através de um estímulo térmico, os elétrons aprisionados se desprendem, emitindo uma quantidade de luz ao retornar para a banda de valência. Essa característica se demonstrou muito importante para a proteção radiológica e dosimetria, pois intensidade do sinal de luz emitido está diretamente correlacionada com a dose recebida (Randall & Wilkins, 1940).

Atualmente, os dosímetros TL são utilizados em diversas áreas da dosimetria, tanto individual, quanto ambiental. Isso ocorre devido à grande variedade de materiais termoluminescentes que são utilizados, cada um com suas características próprias, possibilitando, assim, sua vasta aplicação com uma grande capacidade de detecção. Os materiais mais comumente utilizados são LiF:Mg,Ti; LiF:Mg,P,Cu; CaSO₄:Dy; CaSO₄:Mn; Li₂B₄O₇:Mn; Li₂B₄O₇:Cu; MgB₄O₇:Dy (Burke, 1997).

A grande vantagem do dosímetro TL é o fato de ser um dosímetro passivo armazenando todo o sinal no dosímetro. Os IOE's podem utilizá-lo sem causar desconforto e garantindo ergonomia em seu trabalho, podendo também ser utilizados dosímetros de extremidade (em forma de anel, ou pulseira), além do dosímetro de cristalino quando necessário.

Outra vantagem, é que os dosímetros podem ser reutilizados, ou seja, após a leitura eles são expostos a altas temperaturas para chegar a valores basais, e assim podem ser utilizados novamente para que o ciclo se repita.

2.3 Bandas Energéticas

A física do estado sólido é uma área que estuda as propriedades físicas da matéria (propriedades mecânicas, térmicas e óticas). No estado sólido, as moléculas não podem ser consideradas isoladas, e devido a isso as propriedades de uma molécula podem ser alteradas pela interação com as moléculas vizinhas, como explicado pela teoria de bandas. (Eisberg & Resnick, 1974)

Através da teoria de bandas pode-se descrever o comportamento de um sólido cristalino, e um modelo de funcionamento para semicondutores. Os cristais termoluminescentes são geralmente materiais isolantes. No modelo de bandas, as energias possíveis de um elétron estão organizadas por bandas energéticas permitidas, separadas por bandas proibidas que possuem uma distância que varia dependendo do material. A banda permitida, é a região onde existem inúmeras configurações de estados energéticos permitidos, enquanto na banda proibida idealmente não existe nenhum estado permitido.

Nesse modelo, no caso dos condutores, a banda de valência é onde os elétrons movem-se livremente, e a banda de condução pode conter elétrons temporariamente. Quando o material absorve energia, os elétrons podem transitar da banda de valência para banda de condução, através da banda proibida. Para isolantes, essa banda proibida possui um tamanho suficiente para que seja praticamente desprezível a probabilidade de movimentação de elétrons livres a temperatura ambiente (Randall & Wilkins, 1940). Porém, cristais puros que não permitem a

transição de elétrons, normalmente são dopados com pequena quantidade de outros átomos, que acabam formando posições intersticiais, como observado na figura 1.

Figura 1 - Fenômeno da termoluminescência. Imagem retirada do trabalho de Letícia Lucente Campos de 1998.

Na Figura 1 observa-se as transições que podem ocorrer durante o fenômeno de termoluminescência. Quando o material é irradiado ocorre a excitação dos elétrons que migram da banda de valência para a banda de condução, formando buracos na região da banda de valência. Tanto os elétrons quanto os buracos deslocam-se dentro dessas bandas até se recombinarem, ou serem capturadas pelas armadilhas formadas pelos dopantes na banda proibida. Quando isso ocorre é necessário um estímulo térmico para que os elétrons consigam se libertar, e, assim, ocorrer a emissão de luz, chamada de termoluminescência. Os elétrons podem permanecer armadilhados por períodos prolongados (até meses), o que confere ao detector TL a vantagem de armazenagem de informação, que pode ser coletada apenas aquecendo o cristal a uma temperatura que depende da sua natureza. Os elétrons que absorvem a energia em forma de calor são estimulados, e escapam das armadilhas, podendo retornar à banda de condução ou se recombinar com os buracos da banda de valência (Randall & Wilkins, 1940).

O aquecimento e a detecção de luz são realizados em um sistema de leitura chamado de leitora TL. A quantidade de luz emitida pelo material TL depende da temperatura e do número de elétrons armadilhados, o que é proporcional à dose absorvida no cristal. Assim, a quantidade de luz emitida também depende da dose absorvida no cristal. Na maioria dos materiais TL há mais que um tipo de armadilha, com diferentes profundidades em relação à banda de condução e que, portanto, serão desocupadas em diferentes temperaturas. O grande número de armadilhas leva a uma função complicada da intensidade da luz em função da temperatura. A chamada curva de brilho consiste de diferentes picos de emissão TL correspondentes a diferentes estados

de energia no cristal. Esses picos podem ser instáveis, decaindo mais ou menos rapidamente com o tempo, de acordo com o material TL considerado, ou estáveis, sendo os picos estáveis utilizados em dosimetria e chamados de picos dosimétricos.

Após a leitura, o material TL está, idealmente, em seu estado original e, neste caso, pronto para ser reutilizado. Na prática, um tratamento térmico que consiste em expor os cristais a temperaturas muito elevadas é utilizado para restaurar seu estado original, eliminando a probabilidade de um sinal remanescente.

A fim de descrever as curvas de emissão TL matematicamente é necessário considerar que todas as armadilhas serão preenchidas com diferentes números de elétrons. A probabilidade, p , por unidade de tempo de um elétron deixar uma armadilha, indo para a banda de condução, é dada por:

$$p = s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

em que s é o fator de frequência (s^{-1}), uma constante específica da armadilha e relacionada com as vibrações da rede cristalina, E é a profundidade da armadilha (eV), k é a constante de Boltzmann (eVK^{-1}) e T é a temperatura absoluta (K).

A suposição básica de que nenhum elétron que deixa uma armadilha é armadilhado novamente dá o conceito de cinética de primeira ordem. Se n é o número de elétrons armadilhados no material e a temperatura T é mantida constante, então n decresce com o tempo t de acordo com a expressão:

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

Usando a Equação 1 e integrando a Equação 2, tem-se que:

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = - \int_0^t s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dt \quad (3)$$

Obtém-se

$$n = n_0 \exp\left(-st \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right), \quad (4)$$

em que n_0 é o número de elétrons armadilhados no instante $t = 0$.

Em 1945, Randall e Wilkins (Randall & Wilkins, 1940) utilizaram extensivamente uma representação matemática para cada pico TL em uma curva de emissão supondo como uma primeira aproximação que o cristal é exposto a uma taxa de aquecimento $\beta = \frac{dT}{dt}$ constante e adotando uma cinética de primeira ordem. Assim, a intensidade da luz TL, I , a qualquer temperatura, é diretamente proporcional à taxa de desarmadilhamento:

$$I = -c \frac{dn}{dt} = c n \quad (5)$$

em que c é uma constante que pode ser fixada como uma unidade.

Usando a Equação 4 obtém-se:

$$I(t) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(-st \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right) \quad (6)$$

Utilizando $dt = dT/\beta$, a partir da Equação 3 tem-se

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\frac{s}{\beta} \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' \quad (7)$$

De novo:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (8)$$

Usando a Equação 5 tem-se:

$$I(t) = n_0 s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left(-\frac{s}{\beta} \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right) \quad (9)$$

A Equação 9 pode ser avaliada por integração numérica e produz uma curva em forma de sino com um máximo de intensidade a uma temperatura característica T_m . A função dada pela Equação 7 é complicada para ser utilizada diretamente para ajuste e deconvolução da curva de emissão TL; no entanto, uma expressão simplificada pode ser utilizada para descrever a intensidade da luz TL em função da temperatura (Furetta & Weng, 1998):

$$I(T) = I_m \exp \left[1 + \frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m} - \frac{T^2}{T_m^2} \exp \left(\frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m} \right) (1 - \Delta) - \Delta_m \right], \quad (10)$$

em que I_m é o máximo de intensidade da luz TL na temperatura T_m em K, E é a energia de ativação em eV, k é a constante de Boltzmann em evk^{-1} , Δ é $2kT/E$ e Δ_m é $2kT_m/E$.

Nesse caso, a informação sobre os parâmetros de armadilhamento, s e n_0 , é perdida, o que não tem qualquer importância na maior parte das aplicações dosimétricas. A Equação 10 pode ser usada para deconvolução matemática da curva de emissão.

No entanto, algumas das armadilhas podem não ser tão profundas, que são as armadilhas rasas, da qual os elétrons conseguem desvencilhar-se com maior facilidade com o tempo. Isto se torna um problema desafiador para a dosimetria individual, pois no momento da leitura a dose estimada será uma dose subdimensionada em relação à dose real, devido a essa perda de informação. Esse evento é chamado de desvanecimento do sinal termoluminescente.

Os dosímetros TL são comumente usados em diferentes campos de aplicação, como a dosimetria ambiental ou pessoal. Como já foi citado, uma estimativa da dose de radiação é a quantidade de luz TL emitida pelo dosímetro durante o aquecimento, e uma característica bem conhecida dos dosímetros TL é a perda de sinal com o tempo, ou desvanecimento.

No Brasil, existem três grandes serviços de dosimetria individual que atendem a maior parte da demanda total, que são a a Sapra Landauer, a PRO-RAD Consultores em Radioproteção e a Metrobras – Metrologia das Radiações Ionizantes Ltda. Devido à logística necessária para distribuição e retorno dos dosímetros individuais aos laboratórios credenciados, o tempo decorrido entre a última irradiação e a leitura pode ser suficiente para resultar em uma leitura com a dose subdimensionada. Quando se tem a informação do tempo decorrido entre a última irradiação e o dia de leitura, existem maneiras de se corrigir a leitura do dosímetro, porém muitas vezes essa informação não é conhecida.

O método mais simples para quantificar o sinal de TL é medir a integral da luz emitida ao longo de um intervalo de temperatura, ΔT . Em todos os outros métodos, a curva de emissão,

isto é, $I(T)$, é registrada e o sinal a ser correlacionado com a dose é baseado em alguma forma de deconvolução computadorizada da curva de emissão.

2.4 Avaliação da curva de brilho

A curva de brilho representa a intensidade de luz emitida em função da temperatura ou tempo. Uma curva de brilho possui diferentes picos de emissão, sendo um ou mais deles considerados os picos principais, que são os menos afetados pelo desvanecimento, também conhecidos como picos dosimétricos, sendo que muitas vezes um único pico é utilizado em dosimetria.

Há diversos métodos para se avaliar o sinal TL. O primeiro método é medir a altura do pico dosimétrico. Esse método tem algumas possíveis desvantagens, sendo que em doses baixas a altura do pico pode sofrer flutuações estatísticas muito maiores do que para um sinal TL integrado, e, no caso de curvas de emissão complexas, a altura de pico pode ser influenciada por picos vizinhos/sobrepostos, cujas características dosimétricas são diferentes. Um segundo método baseia-se na integração do sinal de TL entre duas temperaturas pré-determinadas, que definem a chamada “região de interesse” (ROI, do inglês *Region Of Interest*). Mais do que uma ROI pode ser aplicada simultaneamente para análise do sinal TL. Esse método atenua a flutuação estatística sofrida por métodos de altura de pico, mas ainda é baseado na sobreposição de vários picos e na escolha subjetiva do intervalo de temperaturas, que pode se deslocar por causa de flutuações instrumentais. Um terceiro método, chamado de CGCA (do inglês *Computerized Glow Curve Analysis*) simplificada, analisa a forma da curva de emissão e compara com curvas de emissão registradas anteriormente. Finalmente, o quarto método realiza a deconvolução completa da curva de emissão. Esse método tem o potencial de fornecer a maior quantidade de informação e o tempo e esforço envolvidos são justificados quando a precisão/exatidão é um requisito importante.

A maioria das abordagens para análise da curva de emissão restringe a estimativa da dose de irradiação para picos de alta temperatura, medidas com maiores meias-vidas. Uma possível realização dessa abordagem é aplicar um procedimento de pré-aquecimento antes da medição real. Durante esse procedimento, os picos de baixa temperatura, com meias-vidas mais curtas, são apagados para que o sinal restante seja independente do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura. Uma desvantagem destes métodos é a redução da intensidade total do sinal. Além disso, a técnica de pré-aquecimento apaga partes da curva de emissão e assim remove informações potenciais sobre a natureza da irradiação.

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

No trabalho foram utilizados inicialmente um conjunto novo de 100 pastilhas comerciais do tipo TLD-900, da MRA Equipamentos e Serviços Ltda, com material sensível $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e Teflon® como agregante. Antes de qualquer procedimento de calibração, as pastilhas foram enumeradas com grafite de 1 a 100 para facilitar a identificação das mesmas. Na Figura 2 é possível observar as pastilhas utilizadas durante todo o experimento, e seu tamanho comparado a uma régua.

Figura 2 - Pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e suporte para irradiação em acrílico.

O sistema irradiador utilizado foi uma fonte selada de cézio-137, da Amersham Co., modelo CDC 809. A fonte possuía atividade de 44,84 mCi, em julho de 2021, oferecendo uma taxa de dose de 0,068 mGy /min a 18 cm, conforme mostrado na Figura 3, no arranjo experimental do Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção (CIDRA) do Departamento de Física, da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, onde todas as medidas foram realizadas.

Figura 3 - Arranjo da irradiação das pastilhas na fonte.

Para a aquisição e leitura da emissão termoluminescente (TL) das pastilhas foi utilizada uma leitora Thermo Scientific modelo TLD 3500, que inclui uma gaveta para leitura de um único detector, sistema de aquecimento linear programável da prancheta de posicionamento da amostra, tubo fotomultiplicador e componentes eletrônicos associados para quantificar a emissão de luz TL. Também foi utilizado o *software* Thermo Scientific, modelo WinREMS®. O leitor TL utilizado fornece alto desempenho e alta confiabilidade e está em conformidade com os mais recentes requisitos de organizações de padrões internacionais (Thermo Electron Corporation, 2002).

Para tratamento térmico pré e pós-irradiação foi utilizado um conjunto de fornos produzidos pela BRAVAC, sendo um da linha M2, e o outro da linha M3, ambos modelos semiautomáticos, com temperatura máxima de 997°C. Também foi utilizada uma estufa microprocessada de secagem com temporizador, produzida pela QUIMIS, do modelo Q317M-32.

3.2. Testes dosimétricos

3.2.1. Teste de desempenho da leitora

Foram realizados testes iniciais para aferição de que o sistema de leitura. O primeiro teste realizado foi o de reprodutibilidade da luz de referência, em que são realizadas 10 leituras sequenciais da luz de referência, e o desvio encontrado tem que ser menor que 0,5%, assim como estabelecidos pelos padrões do fabricante (Thermo Electron Corporation, 2002).

O segundo teste foi de sinal da fotomultiplicadora (PTM, do inglês *photomultiplier tube*). O intuito é avaliar o ruído da fotomultiplicadora, sendo que esse teste consiste também na repetição de 10 leituras sequenciais do ruído da leitora. A média do ruído obtido para a PTM foi descontada dos sinais lidos durante o estudo.

3.2.2. Avaliação geral da resposta TL do grupo de 100 pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Inicialmente, todo o grupo de 100 pastilhas foi exposto a uma dose de 20 mGy, recomendada pelo fabricante como a dose de estabilização das armadilhas nas pastilhas. Após essa dose inicial, as pastilhas passaram por um tratamento térmico no forno, por 20 minutos a 300°C , para apagar qualquer resquício de sinal armazenado.

A Figura 4 mostra o esquema de processamento das pastilhas para o processo de calibração. Após o tratamento térmico pré-irradiação, as pastilhas foram irradiadas com uma dose de 2,02 mGy. Antes da leitura, as pastilhas foram tratadas termicamente em estufa por 30 minutos a uma temperatura de 100°C . Após cada leitura, as pastilhas receberam novamente o tratamento térmico em forno para eliminar qualquer resquício de sinal. Esse ciclo foi repetido por quatro vezes para que o sinal TL médio de cada pastilha fosse obtido.

Figura 4 - Esquema exemplificando o processo de calibração das pastilhas

Foi utilizada uma rampa de aquecimento de $\beta = 5^\circ\text{C/s}$, sendo esse valor uma taxa de aquecimento padrão, comumente utilizada no laboratório para esse tipo de dosímetro.

Após as leituras em quadruplicata, os dosímetros termoluminescentes do grupo de 100 pastilhas passaram por uma série de testes para que se garantisse que os mesmos eram adequados para utilização no trabalho e para separação dos *Grupos de estudo*, proporcionando, assim, maior precisão aos resultados que foram encontrados durante os experimentos. Para isso foram verificados dois fatores de grande importância, que são a reprodutibilidade e sensibilidade das pastilhas.

A reprodutibilidade consiste em quantificar a qualidade de reprodução do sinal TL da pastilha para um determinado experimento repetido em condições semelhantes. A reprodutibilidade foi calculada pelo desvio padrão obtido das 4 diferentes leituras realizadas nas pastilhas.

A sensibilidade não foi calculada individualmente, apenas para o *Grupo de estudo*. Após a divisão das pastilhas em sub-grupos, a sensibilidade do grupo é dada pela derivada da sua resposta em função da dose recebida. Assumindo-se que a curva dose-resposta do grupo de pastilhas utilizadas era linear no intervalo de doses estudadas, a sensibilidade das pastilhas, em nC/mGy, foi calculada através do sinal TL obtido para irradiações com a dose de 2,02 mGy, no processo de calibração das pastilhas. Para tanto, o sinal TL foi dado como a integral do sinal total.

3.2.3. Homogeneidade do grupo

As irradiações de calibração das pastilhas, realizadas em quadruplicata, foram utilizadas para avaliação da homogeneidade de sinal TL do grupo. O teste de homogeneidade consiste em comparar o valor de menor leitura com o de maior leitura obtido em um grupo de pastilhas. A homogeneidade do grupo é calculada segundo a equação 11:

$$CV_h = \frac{(L_{max} - L_{min})}{L_{min}} \times 100\%, \quad (11)$$

onde CV_h é o coeficiente de variação de homogeneidade; L_{max} é a leitura TL de maior valor do grupo; L_{min} é a leitura TL de menor valor do grupo

3.3. Grupo de estudo

De forma a aumentar a homogeneidade de sinal TL entre as pastilhas utilizadas, do grupo de 100 pastilhas iniciais foi selecionado em Grupo de estudo de 50 pastilhas, sendo escolhidas as que apresentaram o menor desvio padrão individual após as quatro calibrações. Posteriormente, essas 50 pastilhas foram divididas em cinco subgrupos de dez pastilhas cada um. Os subgrupos foram selecionados através do da dispersão do sinal TL médio de cada pastilha em relação ao sinal TL médio do subgrupo, obtendo-se pastilhas com sensibilidades semelhantes e subgrupos mais homogêneos.

3.3.1. Curva de dose-resposta

Após separadas em subgrupos, foram obtidas as curvas de dose-resposta de cada grupo. As doses escolhidas para tanto foram de 0,1; 0,2; 0,5; 0,8; 1 e 2 mGy. Após irradiadas, as pastilhas foram tratadas termicamente em estufa. A sensibilidade para cada grupo foi calculada através da curva de dose-resposta.

O fator de calibração (F_c), em mGy/nC, foi obtido para cada grupo como sendo o inverso do coeficiente angular dos ajustes lineares obtidos para as curvas de dose-resposta. A dose mínima detectável (D_0) foi calculada a partir da equação 12:

$$D_0 = (\bar{B} + 3\sigma_B)F_c, \quad (12)$$

onde $\overline{B}$ é a média das leituras dos dosímetros não irradiados(background); σ_B é o desvio padrão dos dosímetros não irradiados e F_c é o fator de calibração.

3.4. Desvanecimento

Para analisar como os picos termoluminescentes são afetados pelo desvanecimento, as pastilhas devem ser irradiadas e armazenadas da maneira correta por um período determinado, para então serem lidas e poder-se observar o efeito causado pelo desvanecimento no sinal em função do tempo. Deve-se destacar que as leituras foram feitas com e sem tratamento térmico pré-leitura, afinal essa metodologia é utilizada para eliminar os picos de menor sinal, e consequentemente os que mais sofrem com o desvanecimento.

Cada um dos subgrupos previamente separados, foi irradiado com uma dose diferente, sendo essas doses de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 10 mGy.

No CIDRA, a fonte utilizada fica armazenada em um poço, na qual para irradiar algum detector deve ser alçada até uma posição específica. Por isso, o tempo necessário para posicionar a fonte na posição correta de irradiação, pode ser suficiente para causar uma variação significativa em doses menores, que necessitam de um tempo de exposição menor. Assim, foi realizado um teste de tempo de trânsito da fonte, de modo a permitir avaliar a sua influência nas irradiações do grupo de menor dose. Esse teste foi realizado cronometrando o tempo de subida e descida, através de 10 medidas sequenciais, com sua média e desvio apresentados nos resultados.

Após irradiados, os grupos foram lidos com intervalos de tempo pré-determinados, sendo armazenados no escuro e longe de fontes de calor antes da leitura. Os intervalos de tempo escolhidos entre a irradiação e a leitura foram de 0 dias (com 15 minutos de intervalo entre a irradiação e a leitura, para padronização), 1 dia, 2 dias, 5 dias, 10 dias, 20 dias, 30 dias, 45 dias e 60 dias. Todo o processo de irradiação e leitura dos grupos levou um total de 174 dias, e por isso, o experimento em específico não foi realizado em triplicata. As análises realizadas com tratamento térmico pré-leitura foram realizadas nos mesmos intervalos de tempo, porém com máximo intervalo entre a irradiação e a leitura de 30 dias.

Para o tratamento estatístico dos dados referentes às curvas de brilho foi utilizado um sistema de pacotes Python (3.8), na qual foram utilizados dois filtros. Inicialmente, os dados foram pré-tratados com um filtro de média móvel para retirada de ruídos presentes nas leituras. Na sequência, os dados foram tratados com um segundo filtro de suavização chamado *butterworth*.

Existem diversas maneiras de se analisar uma curva de brilho, como já explicado anteriormente. Nesse trabalho, o método de análise das curvas de brilho foi baseado na integração do sinal TL em regiões de interesse (ROI, do inglês *region of interest*), sendo aplicada uma ROI para o pico de menor sinal (Pico 1), que se encontra entre 50°C e 185°C, e uma segunda ROI para o pico de maior sinal (Pico 2), que se encontra entre 185°C e 350°C.

Para quantificar e analisar o desvanecimento das pastilhas, as seguintes informações presentes na Tabela 2 foram analisadas como comparação ao longo dos dias:

Tabela 2 - Parâmetros utilizados neste trabalho, e suas características.

Parâmetros	Características
IntT	Integral do sinal TL, dado pela soma do Pico 1 e Pico 2
LMax	Maior leitura TL em toda a curva
IntP1	Integral na região pré-estabelecida como Pico 1
IntP2	Integral na região pré-estabelecida como Pico 2
LMaxP1	Maior leitura na região pré-estabelecida como Pico 1
LMaxP2	Maior leitura na região pré-estabelecida como Pico 2
$\frac{\text{IntP1}}{\text{IntT}}$	Razão da integral do sinal na região do Pico 1 pela integral do sinal total. Fornece uma informação de quanto que a integral do P1 contribui diretamente com a integral Total do sinal
$\frac{\text{IntP2}}{\text{IntT}}$	Razão da integral do sinal na região do Pico 2 pela integral do sinal total. Fornece uma informação de quanto que a integral do P2 contribui diretamente com a integral total do sinal
$\frac{\text{IntP1}}{\text{IntP2}}$	Razão da integral do sinal na região do Pico 1 pela integral do sinal na região do Pico 2. Fornece uma informação de quanto da integral P1 corresponde com a integral P2
$\frac{\text{LMaxP1}}{\text{IntT}}$	Razão da leitura máxima do P1 pelo sinal da integral total
$\frac{\text{LMaxP2}}{\text{IntT}}$	Razão da leitura máxima do P2 pelo sinal da integral total
$\frac{\text{LMaxP1}}{\text{LMaxP2}}$	Razão da leitura máxima na região do Pico 1 pela leitura máxima na região do Pico 2. Fornece uma informação da proporção de contribuição do Pico 1 em relação ao Pico 2 (dosimétrico)

Os valores dos parâmetros estudados são apresentados em tabelas e gráficos ilustrando seu comportamento ao longo tempo no tópico 4.4.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados ao longo de todo o trabalho.

4.1. Curva de brilho

A Figura 5 exibe o sinal (curva vermelha) de uma pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, dado como intensidade termoluminescente em função da temperatura, e os picos de emissão (curvas coloridas) obtidos através da deconvolução do sinal. Cada pico individual que compõe sinal dosimétrico está relacionado à armadilhas em diferentes profundidades (energias) no cristal. A deconvolução do sinal total foi feita seguindo metodologia apresentada na literatura, em que características do fósforo são usadas para obtenção dos picos de emissão em função da temperatura. (A. Harvey, L. Rodrigues, & J. Kearfott, 2011)

Figura 5 - Deconvolução do sinal de uma pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ do grupo experimental. É possível observar o sinal integral em vermelho, e os picos coloridos representam o sinal deconvoluido

A Figura 5 apresenta a curva de brilho típica para as pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ conforme registrada pela leitora TL utilizada no trabalho. Pode-se observar os dois picos característicos do sinal desse material, sendo que o pico 2 (P2) apresenta um sinal mais intenso que o do pico 1 (P1). Já é conhecido que o pico 1 apresenta uma forte dependência com o tempo entre a irradiação e a leitura, sendo responsável por grande parte do desvanecimento do sinal, diferentemente do Pico 2, que é chamado de pico dosimétrico, pois é comumente considerado

na dosimetria. Desta forma, a diferença presente entre o P1 e o P2 será amplamente discutida ao longo deste trabalho, sendo observada essa diferença na Figura 6.

Figura 6 - Curva de brilho típica de pastilha de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, mostrando a intensidade TL em função da temperatura

Como observado na figura 6, P1 ocorre por volta de 165 $^{\circ}\text{C}$ e P2 por volta de 260 $^{\circ}\text{C}$, para leitura imediatamente posterior à irradiação e para os parâmetros de leitura utilizados, com rampa de aquecimento de 5 $^{\circ}\text{C/s}$. Porém, ao longo do tempo após a irradiação, o sinal TL total perde intensidade devido ao efeito do desvanecimento, sendo que P1 apresenta maior desvanecimento que P2 devido à menor estabilidade das armadilhas relacionadas à essa emissão, como é possível observar na Figura 7.

Figura 7 - Intensidade do sinal TL em função da temperatura e do tempo, mostrando o comportamento do perfil do sinal da pastilha 10 ao longo do tempo.

Como observado na Figura 7, ao longo do tempo após a irradiação, P1 perde intensidade, sendo possível observar um leve sinal, sem um pico bem definido, em 10 dias, e o seu completo desaparecimento na leitura do dia 20. Importante salientar, também, que, mesmo que P2 não seja tão fortemente afetado pelo desvanecimento quanto P1, é possível observar variações no sinal dosimétrico relacionado a esse pico. As variações no sinal de P2 podem ser causadas pelos efeitos de “retrapping”, como já discutido anteriormente, além do desvanecimento.

4.2. Testes dosimétricos

4.2.1. Teste de desempenho da leitora

O teste de reprodutibilidade da luz de referência apresentou uma média para as 10 leituras de 140,18 nC, com um desvio médio de 0,29 nC, como pode-se observar no Anexo 1 na Tabela 13.

A reprodutibilidade do nível de ruído da leitora apresentou uma média de 0,773 nC, com desvio médio de 0,58 nC, podendo ser observado também no Anexo 1, na Tabela 14.

4.2.2. Avaliação geral da resposta TL do grupo de 100 pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

Na Figura 8 pode-se observar as leituras médias individuais de cada pastilha, para irradiação em quadruplicata com dose de 2 mGy em fonte de ^{137}Cs . Nessa figura, a linha verde representa a intensidade TL média para o grupo de pastilhas. Já as linhas vermelhas e azuis, representam os desvios de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, respectivamente, em relação à intensidade TL média do grupo.

Figura 8 - Média da leitura individual de cada pastilha acompanhado de sua barra de erro. Em verde temos a linha representando a média das 100 pastilhas, e em azul e vermelho linhas guia, na qual representam o desvio de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ em relação à média.

A média de intensidade TL para o grupo foi de $271,38 \pm 12,62$ nC. A pastilha 47 foi a de menor valor individual de leitura, com 156,47 nC, com desvio médio de 3%, enquanto a pastilha 75 apresentou o maior valor de leitura, que foi de 359,55 nC, com um desvio médio também de 3%. A pastilha 9 foi a que apresentou a maior incerteza, que foi de 17%. Pode-se perceber que existe um grande número de pastilhas dentro do desvio de 10% em relação à média do grupo, porém mesmo com desvios aceitáveis em relação à média, algumas pastilhas apresentaram uma grande flutuação individual em relação às quatro calibrações, como é possível perceber pelas barras de incerteza.

4.2.3. Homogeneidade de grupo

Uma característica desejada dentro de um grupo de estudo dosimétrico é a homogeneidade do grupo, sendo possível observar que, quando comparado o menor valor de leitura, que foi de 156,47 nC, dado pela pastilha 47, com o maior valor de leitura, que foi de 359,55 nC, dado pela pastilha 75, encontra-se um coeficiente de variação de homogeneidade em torno de 129%, sendo que o valor máximo permitido é de 15% (ISO, 1997)

4.3. Grupo de estudo

A partir dos dados obtidos na quadruplicata de irradiações iniciais realizadas, foram selecionadas as 50 pastilhas que apresentaram os menores desvios individuais ao longo do experimento, como explicado no capítulo 3.3. As médias de leitura podem ser observados na Tabela 16, presente no anexo 1.

O novo grupo de 50 pastilhas, chamado *Grupo de estudo*, apresenta uma média de 270,1 $\pm$ 37,81 nC, resultando em um desvio percentual de 14%. Nota-se que ainda há uma dispersão importante entre as sensibilidades das pastilhas dentro desse grupo e, por isso, essas 50 pastilhas foram separadas em 5 subgrupos de 10 pastilhas cada, na qual a divisão foi feita levando em consideração o desvio de cada pastilha em relação à nova média do grupo de estudo. Com isso, as pastilhas com leituras próximas uma da outra foram agrupadas em um mesmo subgrupo, diminuindo, assim, o desvio de cada subgrupo.

Devido a isso, o grupo que inicialmente era de 100 pastilhas, e apresentavam um comportamento heterogêneo, passa a ser um grupo de 50 pastilhas divididos em 5 subgrupos homogêneos de 10 pastilhas cada. As pastilhas que compõem cada subgrupo, e seu valor de leitura para as irradiações iniciais com 2 mGy estão representados nas Tabelas 17 a 21, no anexo 1.

A média e o desvio padrão dos subgrupos são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Média de leitura, e o desvio padrão dos 5 grupos em irradiação com 2 mGy em fonte de ^{137}Cs

Grupo	Leitura média (nC)
Grupo 1	$219,79 \pm 23,41$
Grupo 2	$250,38 \pm 8,09$
Grupo 3	$273,89 \pm 5,16$
Grupo 4	$287,50 \pm 5,85$
Grupo 5	$318,94 \pm 21,52$

O grupo 1 apresentou o maior desvio entre os 5 grupos, e isso foi devido à pastilha de número 47 que apresentou uma média de leitura de 156,47 nC, que é 28,80% menor que a média do grupo o que leva ao aumento do desvio padrão do grupo. Essa pastilha, entretanto, apresenta uma alta reprodutibilidade, com desvio percentual de 3% nas irradiações em quadruplicata. O grupo 5 apresentou a maior leitura média entre os 5 grupos, devido à pastilha 75, que é a pastilha de maior leitura média do grupo inicial de 100 pastilhas.

Após a formação dos grupos de estudo com pastilhas com reprodutibilidade de resposta e formando grupos homogêneos, foi obtida a curva de dose-resposta e a sensibilidade de cada grupo.

4.3.1. Curva de dose-resposta

Na Figura 9 é possível observar a leitura média dos 5 grupos em função da dose. Na figura fica evidente a característica do comportamento linear de resposta em função da dose para os grupos de pastilhas, dado pelos ajustes lineares aos dados experimentais. A linearidade de resposta reforça a metodologia utilizada para escolha dos grupos de estudo, tendo-se obtido ajustes lineares com r^2 melhor que 0,998 (grupo 2).

Figura 9 - Curva de dose-resposta típica, demonstrando a linearidade dos grupos experimentais

Ainda a partir da Figura 9 pode-se obter a sensibilidade dos grupos, dada através da derivada da leitura média em função da dose. Dado que os ajustes aos pontos experimentais são retas, a sensibilidade é dada pelo coeficiente angular dos ajustes, que são dados na Tabela 12.

Tabela 4 - Sensibilidade dos grupos experimentais, e seu desvio padrão.

Grupo	Sensibilidade (nC/mGy)
Grupo 1	108,80 ± 11,96
Grupo 2	123,95 ± 3,70
Grupo 3	135,60 ± 2,71
Grupo 4	142,32 ± 2,84
Grupo 5	157,89 ± 9,47

Na Tabela 4 observa-se a sensibilidade de cada grupo, e devido aos resultados apresentados, foi designado um valor de dose para cada grupo, afinal, devido a menor sensibilidade, faz-se necessário uma maior dose. E a distribuição pode ser observada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Divisão dos subgrupos com a dose de exposição, e o tempo de irradiação necessário para a dose estabelecida.

Grupo	Dose (mGy)	Tempo irradiando
Grupo 1	10	2h 26min 24s
Grupo 2	1	14min 38s
Grupo 3	0,5	7min 19s
Grupo 4	0,2	2min 56s
Grupo 5	0,1	1min 28s

Assim como já discutido anteriormente, existe uma variação no tempo de exposição dado pelo tempo de subida e descida da fonte. Os tempos médios de subida e descida foram medidos, com um tempo para posicionar a fonte de $3,62 \pm 0,69$ segundos, e um tempo de $4,01 \pm 1,01$ segundos para guardar a fonte. Afinal, alguns segundos de variação em um tempo de mais de 2 horas não apresentam relevância, diferentemente de um tempo de irradiação de 1 minuto e 28 segundos.

Através da curva dose-resposta também foi possível calcular o fator de calibração e a dose mínima detectável dos grupos, como demonstrado a seguir na Tabela 6.

Tabela 6 - Dose mínima detectável (D_0), e fator de calibração (F_c)

Grupo	D_0(mGy)	F_c (mGy/nC)
Grupo 1	0,059	0,009
Grupo 2	0,091	0,008
Grupo 3	0,097	0,007
Grupo 4	0,095	0,007
Grupo 5	0,091	0,006

Pela Tabela 6 é possível observar que as doses utilizadas durante os experimentos são maiores que a dose mínima detectável de cada grupo.

4.4 Desvanecimento

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos das leituras dos grupos de pastilhas termoluminescentes ao longo do tempo entre a irradiação e a leitura, e discutido o efeito do desvanecimento do sinal nas regiões de interesse 1 e 2. Os resultados de sinal TL obtidos com pastilhas tratadas termicamente antes da leitura e não tratadas termicamente antes da leitura são apresentados.

4.4.1. Leituras sem tratamento térmico

A Figura 10 retrata os sinais TL típicos em função da temperatura, lidos em dias diferentes após a irradiação, evidenciando o efeito do desvanecimento no sinal TL. Na figura é mostrado o sinal TL da pastilha 67 do Grupo 1, como exemplo. Pode-se perceber um sinal TL inicialmente com dois picos bem definidos (curva preta), para leitura logo após a irradiação (dia 0), com um pico em, aproximadamente, 168°C (P1), e outro em 266°C (P2).

Figura 10 - Sinal TL em função da temperatura: todos os sinais são referentes a mesma pastilha, porém em dias de leitura diferentes após a irradiação.

Na Figura 10 fica evidente o efeito de desvanecimento no P1, sendo possível perceber a queda significativa que ocorre com o sinal TL da leitura do dia 0 para os dias 10 e 60 após a irradiação. No sinal do dia 10 (curva vermelha) ocorre o quase completo desaparecimento do Pico 1, e o ponto de máximo da região se encontra na divisão entre as duas regiões pré-definidas anteriormente, localizado na temperatura de 185°C, de modo que não se tem uma definição de um pico no sinal. No sinal TL do dia 60 (curva azul), ocorre novamente uma diminuição do sinal, tornando a região de interesse 1 quase que irrelevante para contribuição do sinal total da pastilha, mensurado através de uma análise da integral da região. Já na região de interesse 2, que se inicia na temperatura de 185°C, fica evidente a maior resistência do P2 ao desvanecimento, ocorrendo um leve decaimento do pico de leitura dosimétrico. Nesse exemplo específico, o decaimento do sinal nessa região de interesse foi de 11% no período de 60 dias, em uma análise das integrais desses sinais. Análises quantitativas do desvanecimento em cada região são apresentadas nas seções seguintes.

Ainda em específico para o exemplo mostrado na Figura 10, ocorreu um leve deslocamento do pico para temperaturas menores (2°C), não apresentando um padrão entre as outras pastilhas ou outros grupos, que puderam apresentar também deslocamento, mas sem um padrão definido. Devido à pequena diferença de temperatura entre esses picos, o deslocamento pode ser justificado pelo ajuste causado pelo filtro utilizado nos sinais de modo a eliminar ruídos da leitura.

4.4.1.1 Região de interesse 1 - Pico 1

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados referentes a região de interesse 1, relacionada ao Pico 1, de todos os *Grupos de estudo*. Essa região teve a temperatura de 185°C estabelecida como limite superior nas análises realizadas.

Devido ao desvanecimento do pico de leitura na região 1, os valores encontrados para a leitura máxima relacionada ao pico 1 ($LMaxP1$) a partir do dia 10 se encontram exatamente na temperatura de 185°C, temperatura limite entre as regiões 1 e 2. Assim, as $LMaxP1$ não são relacionadas a um pico do sinal dosimétrico, mas ao sinal no intervalo superior de temperatura da região sendo analisada. Deste modo, não são apresentados valores de $LMaxP1$ para leituras após 10 dias da irradiação, dado que o Pico 1 não é aparente no sinal total. Logo, a razão $\frac{LMaxP1}{IntT}$ e $\frac{LMaxP1}{LMaxP2}$ também não são apresentadas no trabalho em questão. Entretanto, mesmo com o desaparecimento de um pico de leitura nessa região, ainda se observa um sinal residual, que pode ser mensurado e contribui para a integral do sinal total.

A Figura 11 representa o comportamento da integral do sinal TL na região 1 ao longo do tempo entre a irradiação e a leitura para o Grupo 1, que apresenta comportamento semelhante aos demais grupos e é exibido como exemplo. Além apresentar um menor valor de integral do sinal em comparação com o Pico 2, essa região demonstra uma forte dependência do sinal com o tempo entre a irradiação e a leitura, e isso pode ser observado pelo rápido decaimento de mais de 80% do sinal ao longo de 60 dias. Esse desvanecimento ocorre principalmente nos primeiros 10 a 15 dias após a irradiação, tendendo a um patamar para tempos maiores, dentro do intervalo total estudado neste trabalho. Esse comportamento se deve ao desvanecimento do Pico 1, relacionado a armadilhas de menor energia (com menor meia-vida), mas, ao mesmo tempo, manutenção do sinal relacionado ao início do Pico 2.

Figura 11 - Integral do Pico 1 ao longo dos dias entre a irradiação e a leitura para o Grupo 1.

Na Tabela 7 é possível observar os valores das integrais do sinal TL da região 1 ao longo do tempo para todos os 5 grupos de pastilhas. Todos os resultados foram normalizados tendo-se a leitura no mesmo dia da irradiação como referência.

Tabela 7 - Integral do Pico 1 ao longo do tempo entre irradiação e leitura para os 5 grupos do estudo.

Tempo (Dias)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,56	0,69	0,59	0,67	0,87
2	0,54	0,58	0,49	0,59	0,68
5	0,42	0,42	0,43	0,46	0,62
10	0,27	0,33	0,33	0,33	0,43
20	0,19	0,28	0,27	0,40	0,63
30	0,19	0,25	0,25	0,45	0,51
45	0,20	0,38	0,42	0,61	0,70
60	0,14	0,23	0,34	0,53	0,87

A Tabela 1 demonstra o desvanecimento do sinal Pico 1 ao longo do tempo, apresentando um decaimento de 57% a 73% entre os grupos nos primeiros 10 dias.

Nos grupos 1 e 2, nos dias iniciais, ocorre a maior parte do desvanecimento da integral do Pico 1, sendo possível observar que, após os 10 dias, o grupo atingi uma região de

estabilidade nos resultados obtidos. Diferentemente, os grupos 3, 4 e 5 não apresentam esse padrão bem definido, devido aos desvios relativos nas medidas, já esperado causado pela piora da relação sinal ruído devido às baixas doses recebidas.

A figura 12 exibe a integral do sinal P1 e seu desvio relativo, nas partes superior e inferior, respectivamente, em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura. Na figura é possível observar a normalização dos resultados para o dia 0 (reta azul constante no valor igual a 1,0). O maior desvanecimento ocorre nos primeiros dias como já discutido anteriormente, para os grupos de doses mais altas, principalmente no primeiro dia. Quando comparado a variação sofrida do dia 10 para o dia 60, observa-se uma variação nos grupos de maior dose (grupo 1, 2 e 3) em torno de 13-17%, enquanto nos grupos de menor dose (grupo 4 e 5) sofrem uma variação de 28-44%. A análise dos desvios relativo das integrais do Pico 1 evidencia que doses abaixo de 0,5 mGy apresentam altos desvios dos resultados, de até 35% (grupo5), dificultando a análise do comportamento da integral do Pico 1 para as regiões de baixa dose.

Figura 12 - Integral P1 (superior), e desvio padrão (inferior) em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura

4.4.1.2 Região de interesse 2 - Pico 2

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados referentes à região de interesse 2, relacionada ao Pico 2, de todos os *Grupos de estudo*.

Neste tópico não são apresentados os resultados referentes a L_{MaxP2} , e $\frac{L_{MaxP2}}{IntT}$. Os parâmetros apresentados referem-se apenas a integral P2, e a $\frac{IntP2}{IntT}$.

Na Tabela 8 é possível observar os valores das integrais do Pico 2 ao longo do tempo entre a irradiação e a leitura para todos os 5 grupos. Todos os valores foram normalizados para a integral do sinal obtida no dia 0.

Tabela 8 - Integral do Pico 2 ao longo do tempo entre irradiação e leitura para os 5 grupos do estudo.

Tempo (Dias)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,86	0,87	0,75	0,65	0,73
2	0,87	0,88	0,77	0,65	0,57
5	0,96	0,90	0,77	0,64	0,54
10	0,86	0,92	0,86	0,69	0,65
20	0,85	0,92	0,86	0,86	0,79
30	0,92	1,00	0,93	0,90	0,97
45	0,88	1,02	0,97	1,03	1,07
60	0,89	1,05	1,04	1,14	1,32

Os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram que o sinal do Pico 2 sofre desvanecimento inicial dos dias 1 e 2, mas torna a aumentar o sinal ao longo do tempo, apresentando, em 60 dias, valores maiores do que o medido inicialmente para maioria dos casos, com exceção do grupo 1. Os grupos 4 e 5 apresentaram um aumento da integral do sinal TL da região 2 de 14% e 32%, respectivamente, quando comparados às leituras do dia 0 e 60. Novamente, essas variações ocorrem nos grupos de menor dose, devido a piora da qualidade de relação sinal ruído.

A Figura 13 exibe a integral do Pico 2 em função da dose e ao longo do tempo (parte superior) e seu desvio relativo (parte inferior). Para doses mais altas é possível observar que a integral do Pico 2 apresentou um menor desvanecimento, com uma variação de 15% no Grupo 1, e 18% no Grupo 2. Porém, para doses menores, o desvanecimento apresenta uma variação

de até 78% para o Grupo 5. Assim, como já citado anteriormente, os maiores decaimentos da integral do Pico 2 ocorreram nos dias iniciais, principalmente nos dias 1 e 2 (linha laranja e verde, respectivamente).

Figura 13 - Integral do sinal do Pico 2 (superior) e seu desvio padrão (inferior) em função da dose e ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.

4.4.1.3 Análise da curva completa do sinal TL

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados referentes à análise do sinal TL como um todo, sem separá-lo em região 1 e 2.

Na Tabela 9 é possível observar os valores da integral total do sinal TL ao longo do tempo entre irradiação e leitura para todos os 5 grupos.

Tabela 9 - Integral total do sinal TL ao longo do tempo para os 5 grupos do estudo

Tempo (Dias)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,84	0,85	0,74	0,65	0,74
2	0,84	0,86	0,74	0,65	0,58
5	0,92	0,86	0,74	0,63	0,55
10	0,81	0,86	0,81	0,66	0,64
20	0,79	0,87	0,80	0,82	0,78
30	0,86	0,93	0,86	0,85	0,94
45	0,82	0,97	0,92	1,00	1,05
60	0,83	0,98	0,97	1,09	1,29

Os resultados apresentados na Tabela 9 demonstram que a integral total também sofre desvanecimento nos primeiros dias (16%), mas torna a aumentar, com um comportamento muito similar ao da Tabela 8.

A Figura 14 exibe a integral total do sinal TL (superior) e seu desvio relativo (inferior) em função da dose e ao longo do tempo. Novamente, assim como para a integral do Pico 2, a integral Total apresenta valores bem dispersos na região de baixa dose, com variações entre - 45% e +29% em relação à integral do sinal TL no dia 0. Dado que a contribuição da região 1 (Pico 1) é pequena em relação ao sinal total, as características observadas nessa figura são muito similares às da Figura 4. Para os Grupos 1 e 2, a variação máxima na integral do sinal TL é de 21% para todo o intervalo de tempo estudado. Já para os Grupos 3 a 5 é possível notar um aumento na variação dos sinais, chegando a uma dispersão de 74%.

Figura 14 - Integral Total do sinal TL (superior) e seu desvio padrão (inferior) em função da dose e ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.

Na Tabela 9 é possível observar os valores da razão F, dada pela $\frac{IntP2}{IntT}$, ao longo do tempo, para todos os 5 grupos de estudo.

Tabela 10 - Razão da integral do Pico 2 pela integral total ($\frac{IntP2}{IntT}$) para os 5 grupos de estudo.

Tempo (Dias)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0	0,91	0,91	0,90	0,92	0,93
1	0,94	0,92	0,92	0,91	0,92
2	0,94	0,94	0,94	0,92	0,92
5	0,96	0,95	0,94	0,94	0,92
10	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95
20	0,98	0,97	0,97	0,96	0,94
30	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
45	0,98	0,96	0,95	0,95	0,95
60	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95

Pela Tabela 10, é possível observar a contribuição do sinal do Pico 2 em relação ao sinal TL total, podendo contribuir inicialmente com pouco mais de 90% do sinal, e podendo chegar a até 98% do sinal total. Novamente, esse aumento da contribuição do Pico 2 ao longo do tempo mostra que o maior responsável pelo desvanecimento é o Pico 1, conforme esperado.

A Figura 15 exhibe o comportamento da razão F (parte superior) e seu desvio relativo (parte inferior) em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e leitura, sendo possível observar, no geral, um aumento da razão F com o passar dos dias para as doses mais altas. Para o Grupo 5 (menor dose), as variações da razão F com o tempo estão dentro das incertezas relativas para cada dose, conforme pode ser observado na parte inferior da figura. No geral a contribuição do P2 para o sinal total aumenta ao longo do tempo. O aumento da razão F não ocorre por um aumento do sinal P2, mas sim por uma diminuição do sinal total, que tem seu valor influenciado pela presença do P1.

Nesses resultados é importante salientar que a escala da figura apresentada é muito pequena, mostrando que a variação da razão F com o tempo é menor que 7% para todo o intervalo de doses estudado, e, portanto, menor que nas análises realizadas para o Pico 2 individualmente.

Figura 15 - Razão F (superior) e seu desvio relativo (inferior) em função da dose e do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.

4.4.2. Análise do sinal TL com tratamento térmico

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos com os mesmos 5 grupos de pastilhas utilizados anteriormente e irradiados com as mesmas doses, porém foi utilizada uma metodologia padrão com tratamento térmico pré-leitura, aplicada em laboratórios nacionais e internacionais.

Diferentemente dos resultados apresentados no tópico 4.4.1, ao invés de apresentar o comportamento dos resultados dos sinais TL ao longo de 60 dias entre a irradiação e a leitura, os experimentos foram realizados com intervalo máximo de 30 dias. Também é importante salientar que os resultados apresentados a seguir são dados exclusivamente da integral do Pico 2 e da integral total do sinal TL, devido à eliminação do Pico 1, decorrente do tratamento térmico.

A Figura 16 retrata o sinal TL em função da temperatura para a pastilha 67 do Grupo 1, que foi lida posteriormente à irradiação e após ser tratada termicamente. Comparando esse sinal TL com o da Figura 1, para a mesma pastilha e irradiada com a mesma dose, consegue-se perceber a ausência do Pico 1, que se fazia presente na curva inicialmente.

Figura 16 - Sinal TL em função da temperatura para a mesma pastilha utilizada na Figura 1, porém com tratamento térmico realizado previamente à leitura.

A Figura 16 ilustra o porquê do uso da disseminação dessa metodologia de pré-aquecimento para a leitura, pois com a eliminação do Pico 1, evita-se que o desvanecimento e o *retrapping* da região de baixas temperaturas influencie no sinal.

Na tabela 11 pode-se observar a integral do Pico 2 e a integral total ao longo do tempo decorrido entre irradiação e leitura para todos os 5 grupos.

Tabela 11 - Integrais do sinal TL do Pico 2 e integral total do sinal TL ao longo do tempo para os 5 grupos de estudo.

Tempo (Dias)	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
	IntP2	IntT	IntP2	IntT	IntP2	IntT	IntP2	IntT	IntP2	IntT
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1,01	1,02	0,96	0,95	0,94	0,92	0,93	0,90	0,88	0,81
2	1,02	1,03	0,97	0,97	0,92	0,91	0,92	0,92	0,85	0,78
5	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,96	1,04	1,09	1,00	1,01
10	0,95	0,95	0,94	0,94	0,97	0,98	1,01	1,03	1,19	1,20
20	0,99	0,99	1,03	1,02	1,05	1,06	1,22	1,27	1,46	1,48
30	0,99	0,99	1,02	1,02	1,04	1,02	1,15	1,12	1,27	1,15

Na tabela é possível observar como essas duas variáveis apresentam valores bem próximos, algo já esperado devido ao efeito do tratamento térmico, afinal eliminando-se o Pico 1 e o Pico 2 passa a ser responsável por praticamente toda a integral total. Com isso, com o tratamento térmico pré-leitura, os valores encontrados para o sinal TL sofrem uma menor variação ao longo do tempo, com exceção dos grupos de menor dose, que ainda apresentam valores muito dispersos, e com incertezas relativas mais altas, causado pelo erro propagado em doses baixas.

A Figura 17 exhibe o comportamento da integral P2 (superior) e seu desvio relativo (inferior) em função da dose ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e leitura.

Figura 17 - Integral P2 (parte superior do gráfico), e o desvio padrão (parte inferior do gráfico) em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.

A Figura 17 apresentou um comportamento semelhante ao da Figura 13, e devido ao tratamento térmico é possível notar a diminuição da dispersão dos pontos nos grupos de maneira geral, mas principalmente nos de doses maiores, que convergiram para pontos próximos de 1,0.

Quando a Figura 17 é comparada, dentro do mesmo período de 30 dias, com a Figura 13 (integral do Pico 2 sem tratamento térmico pré-leitura), no geral, é possível observar uma redução da dispersão dos pontos de 15% para 7% no Grupo 1, de 13% para 9% no Grupo 2, de 25% para 13% no Grupo 3, de 36% para 30% no Grupo 4. A única exceção é o Grupo 5, que quando comparado apenas no período de 30 dia, ocorreu um aumento da dispersão de 46% para 61% para as leituras efetuadas com o tratamento térmico.

Analisando o desvio relativo da integral total (parte inferior da figura), nota-se um comportamento similar do apresentado na Figura 13, em que ocorre um aumento do desvio

relativo para menores doses, com exceção do Grupo 1 no dia 0 que apresentou um desvio relativo de quase 10%.

Na Figura 18 observa-se a integral Total em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura, sendo que a figura apresenta muita semelhança com a Figura 8, algo já esperado devido aos resultados apresentados na Tabela 5.

Figura 18 - Integral Total (parte superior do gráfico), e desvio padrão (parte inferior do gráfico) em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura.

Nas Figuras 17 e 18 nota-se o mesmo comportamento de convergência para valores próximos a 1,0. Quando comparado a Figura 17, com a integral total sem tratamento térmico da Figura 14, pode-se perceber que o Grupo 1, que anteriormente apresentava uma dispersão de 21%, apresentou uma redução para 7%. O Grupo 2 reduz de 25% para 8%, e o Grupo 3 também apresentou uma redução, de 26% para 15%. Já os grupos 4 e 5, que são os de menores dose, não apresentaram melhora em sua dispersão. No Grupo 4 não houve uma redução da dispersão entre os pontos, e o Grupo 5 aumentou a dispersão de 45% para 70%.

Na Tabela 12 é possível observar os valores da razão F, dada pela $\frac{IntP2}{IntT}$, ao longo do tempo, para todos os 5 grupos de estudo.

Tabela 12 - Razão dada pela integral do Pico 2 pela integral total do sinal TL ($\frac{IntP2}{IntT}$) para os 5 grupo do estudo.

Tempo (Dias)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
0	0,99	0,96	0,95	0,93	0,88
1	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95
2	0,97	0,96	0,95	0,93	0,95
5	0,98	0,96	0,94	0,89	0,94
10	0,98	0,96	0,94	0,90	0,86
20	0,99	0,97	0,94	0,90	0,86
30	0,98	0,96	0,96	0,96	0,97

Devido à semelhança de comportamento entre as integrais Total e do Pico 2, era esperado que os resultados da razão F apresentassem valores próximos de 1, devido ao tratamento térmico. Essa estabilidade dos valores ocorre até mesmo nos grupos de menor dose, que apresentou uma variação de 11% (grupo 4 e 5).

A Figura 19 demonstra o comportamento da razão F em função dose, sendo possível destacar que essa análise diminui a dispersão dos pontos, sendo importante destacar a pequena escala utilizada no eixo y.

Figura 19 - Razão F em função da dose, e seu comportamento ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura

Comparando a razão F realizada com tratamento térmico da Figura 19, com a razão F da Figura 15, na qual não foi realizado tratamento, é possível observar que ambas figuras apresentam uma baixa dispersão entre os pontos, mostrando que a razão F pode ser um potencial parâmetro dosimétrico que independe do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura. Vale ressaltar que para os grupos de doses maiores (1, 2 e 3), a dispersão dos pontos apresentados pela Figura 19 (2%) foram menores que a da Figura 15 (7%). Porém para os grupos de menor dose (4 e 5) a razão F com tratamento térmico apresentou uma maior dispersão de valores, aumentando no grupo 4 de 6% para 7%, e no grupo 5, de 5% para 11%.

Isso mostra que a razão F sem tratamento térmico além de apresentar uma independência em relação ao tempo de desvanecimento, também apresenta uma independência em relação a dose.

4.5. Discussão geral

Pelos resultados mostrados neste capítulo é possível afirmar que a região 1 é extremamente dependente do desvanecimento com o tempo, apresentando decaimento de até 80% do sinal, que só é possível ser mensurado pela integral dessa região. Por isso, na tentativa de contornar esse problema, é comum que laboratórios de dosimetria realizem o tratamento térmico prévio à leitura, utilizando apenas o Pico 2, ou pico dosimétrico, para quantificação da

dose. Esse tipo de procedimento, entretanto, onera operacionalmente o serviço, dado que o tratamento térmico das pastilhas exige tempo e pessoal para realização.

A região 2 apresentou resultados mais consistentes ao longo do tempo, mas ainda assim pode-se perceber a influência do efeito do desvanecimento e o efeito de *retrapping*, com uma queda de até 46% para grupos de baixa dose, resultado corroborado pela literatura. (Montalvo, 2016) (Nascimento, 2010) (Forner, 2019)

Os resultados apresentados mostram uma melhor qualidade de resposta para doses maiores, mostrado pelos menores desvios relativos encontrados. Porém, em aplicações como na dosimetria individual, por exemplo, se faz necessário uma exatidão para estimativas de doses mais baixas, sendo que esse aumento do desvio relativo em função da dose já foi demonstrado nas literaturas (Theinert, 2018) (Ávila, Ramírez-Barbosa, & Gamboa-Debuen, 2014).

Os resultados obtidos apontam para a potencialidade da utilização da razão F para dosimetria, que apresentou um comportamento semelhante em todo o intervalo de dose estudada e do tempo de desvanecimento. Para o intervalo de 30 dias, usado em ambos os estudos com e sem tratamento térmico pré-leitura, foi encontrada uma de variação dessa razão de até 7% (leitura sem tratamento térmico) e 11% (leitura com tratamento térmico). Essa metodologia de não utilização apenas do sinal dosimétrico (Pico 2) é similar à proposta Theinert e colaboradores (Theinert, 2018). O menor desvanecimento encontrado para o sinal, dado como a integral do Pico 2 pela integral total, para as pastilhas sem tratamento térmico pré-leitura indicam a potencialidade de uso dessa metodologia tanto para melhorar a precisão da estimativa de dose com vistas ao desvanecimento, quanto à redução de custo operacional em serviços de dosimetria, pela otimização do fluxo do serviço com a exclusão de um ciclo de tratamento térmico.

5. Conclusão

Neste trabalho foram avaliados parâmetros dosimétricos das pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e seu desvanecimento, além da necessidade de uma metodologia operacional de tratamento térmico utilizado em laboratórios nacionais e internacionais.

Pelos resultados apresentados e discutidos, é possível concluir que os dosímetros apresentaram uma incerteza considerável para doses baixas, não sendo uma característica desejada para a dosimetria individual.

Outro fator importante é que o atual parâmetro de avaliação dosimétrica utilizado, que é a integral P2 após tratamento térmico, reduz a variação entre as leituras ao longo do tempo decorrido entre a irradiação e a leitura, o que mostra que essa metodologia é eficaz.

Porém, foi possível observar que o novo parâmetro F, que é dado pela razão da integral P2 pela integral Total, apresenta uma independência em relação ao tempo decorrido entre a última irradiação e a leitura, tanto para as leituras realizadas posteriormente ao tratamento térmico, quanto para as que não foram tratadas, apresentando potencial para avaliações dosimétricas. Porém, ainda foi possível observar que para as leituras sem tratamento térmico apresentaram uma variação maior do que com tratamento térmico para os grupos de maior dose. Já para os grupos de menor dose, a razão F sem tratamento térmico se manteve constante, com uma variação similar ao longo do tempo decorrido, diferente da razão F com as pastilhas tratadas termicamente, que aumenta consideravelmente em doses mais baixas.

Isso evidencia que a razão F é um parâmetro dosimétrico útil, sendo as pastilhas tratadas termicamente ou não, apresentando uma independência em relação ao tempo decorrido entre irradiação e leitura, e, em específico, quando não tratadas termicamente elas apresentam também uma independência em relação a dose. Desta forma, o uso da razão F pode representar um potencial ganho para laboratórios de dosimetria individual, no sentido de facilitar o processamento dos dosímetros individuais sem a necessidade de tratamentos térmicos pré-leitura e mantendo-se a exatidão da quantificação das grandezas operacionais.

Referências

- A. Harvey, J., L. Rodrigues, M., & J. Kearfott, K. (2011). A computerized glow curve analysis (GCA) method for WinREMS thermoluminescent dosimeter datausing MATLAB. *Applied Radiation and Isotopes*, pp. 1282-1266.
- Al-Ghorabie. (2005). Measurements of indoor gamma radiation dose in At-Taif City, Saudi Arabia using CaSO₄:Dy (TLD-900). *Radiation Protection Dosimetry*, pp. 178-184.
- Ávila, O., Ramírez-Barbosa, E., & Gamboa-Debuen, I. (2014). Energy dependence of TLD-900 dosimeters exposed to low energy X-rays. *Raiation Measurements*, pp. 127-132.
- Aypar, A. (1978). Studies on Thermoluminescent CaSO₄:Dy for dosimetry. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, pp. 369-372.
- Barsanelli, C. (2003). Metodologia de Calibração de Dosímetros Termoluminescentes. Campinas, São Paulo, Brasil.
- Batista, B. J. (2011). Dissertação de mestrado. *Avaliação de dosímetros termoluminescentes para uso em radioterapia com fótons de alta energia*. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Burke, K. (1997). Optimization and Deconvolution of Lithium Fluoride TLD-100 in Diagnostic Radiology. *The British Journal of Radiology*, pp. 261-271.
- BURKE, K. (1997). Optimization and Deconvolution of Lithium Fluoride TLD-100 in Diagnostic Radiology. *The British Journal of Radiology*, pp. 261-271.
- Cameron J, R., Zimmerman, D., Kenney, G., Buch, R., Bland, R., & Grant, R. (Janeiro de 1964). Thermoluminescent Radiation Dosimetry Utilizing LiF. *Health Physics*, pp. 25-29.
- CNEN. (2005). Diretrizes básicas de proteção radiológica. *Resolução CNEN 48/05*. Brasil.
- Eisberg, R., & Resnick, R. (1974). *Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Elsevier editora.
- Forner, L. A. (2019). *Estudo e desenvolvimento de materiais termoluminescentes para aplicações em dosimetria das radiações ionizantes*. Ribeirão Preto.
- Furetta, C., & Weng, P.-S. (1998). *Operational Thermoluminescence Dosimetry*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Harvey, J. A., Haverland, N. P., & Kearfott, K. J. (2010). Characterization of the glow-peal fading properties of six common thermoluminescent materials. *Elsevier*.
- ISO, I. O. (1997). Individual Thermoluminescence Dosemeters for Extremities and Eyes.
- Izak-Biran. (1996). Low pre and post-irradiation fading of LiF:Mg,Ti (TLD-100, TLD-600, TLD-700) using a preheat technique. *Radiation Protection Dosimetry*, pp. 269-274.
- Konstantinidis, P., Tsoutsoumanos, E., Polymeris, G., & KitisGorbics, G. (2020). Thermoluminescence response of various dosimeters as a function of irradiation temperature. *Radiation Physics and Chemistry*.
- Martins, R. d. (1997). A descoberta dos raios-x: O primeiro comunicado de Rontgen. Campinas, São Paulo, Brasil.

- Montalvo, S. D.-S.-G. (2016). Thermoluminescent characteristics of LiF:Mg, Cu, P and CaSO₄:Dy for low dose measurement. *Applied Radiation and Isotopes*, pp. 50-55.
- Nascimento, S. R. (2010). *Dosimetria termoluminescente do quartzo natural de solonópole (CE) pra aplicação em radiodiagnóstico*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco.
- Nunes, M. G., & Rodrigues, L. L. (2012). Perfil de dose de feixes de elétrons obtidos com dosímetros termoluminescentes de CaSO₄:Ce, Eu. *Revista Brasileira de Física Médica*, 159-162.
- O Junot, D. (2014). Feasibility study of CaSO₄:Tb, Yb as a thermoluminescent dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 119-121.
- Oberhofer, M., & Scharmann, A. (1979). *Applied Thermoluminescence Dosimetry*. Ispra.
- Okuno, E. (2013). Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. São Paulo, Brasil.
- Okuno, E., & Yoshimura, E. (2010). *Física das Radiações*. São Paulo.
- Pavan, A. L. (2011). Preparo (calibração e tratamento) de Dosímetros Termoluminescentes de Flúoreto de Lítio (TLD-LiF). Botucatu, São Paulo, Brasil.
- Randall, J. T., & Wilkins, M. H. (1940). Phosphorescence and electron traps. Birmingham, Inglaterra.
- Rodrigues, M. G. (2012). Perfil de dose de feixes de elétrons obtidos com dosímetros termoluminescentes de CaSO₄:Ce, Eu. *Revista Brasileira de Física Médica*.
- Silva Lima, R., & Ferreira Pimental, L. C. (2009). Raios X: Fascinação, Medo e Ciência. *Química Nova*, pp. 263-270.
- Sorger, D., Stadmann, H., & Sprengel, W. (2020). Fading study and readout optimization for routinely use of LiF:Mg, Ti thermoluminescent detectors for personal dosimetry. *Radiation Measurements*.
- Suntharalingam, N., Cameron, J. R., & Fowler, J. F. (1968). Fading Characteristics of Thermoluminescent Lithium. *Physics in Medicine and Biology*, pp. 97-104.
- Theinert, R. (2018). Fading time and irradiation dose estimation from thermoluminescent dosimeters using glow curve deconvolution. *Radiation Measurements* 108, pp. 20-25.
- Thermo Electron Corporation. (2002). *Model 3500 manual TLD reader technical service manual*.

Apêndice 1

Neste apêndice 1 são apresentados tabelas e resultados complementares ao trabalho.

Tabela 13 - 10 leituras de luz de referência, com sua média e desvio padrão

Leituras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média (desvio)
Valores (nC)	139	139,7	140,2	140,6	139,9	140,2	140,5	140,4	140	140,5	140,18 (0,21%)

Tabela 14 - 10 leituras do ruído da fotomultiplicadora, com sua média e desvio padrão

Leituras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média (desvio)
Valores (nC)	0,84	0,57	0,26	0,44	1,55	0,11	0,79	0,44	0,75	1,98	0,773 (75%)

Tabela 15 - Média de cada calibração com seu desvio médio, seguido da média das quatro calibrações e seu desvio.

	Calibração 1	Calibração 2	Calibração 3	Calibração 4	Média Final
Leitura média	269,89 (14,4%)	277,59 (12,43%)	258,13 (12,45%)	279,90 (12,55%)	271,38 (4%)

Tabela 16- Seleção das 50 melhores pastilhas, com a leitura média das quadruplicadas, e seu desvio percentual individual, e o desvio em relação à média do grupo todo

Identificação	Média das quatro calibrações	Desvio em relação à média total
11	252,09 ($\pm 2\%$)	-7%
12	246,77 ($\pm 5\%$)	-9%
17	284,96 ($\pm 4\%$)	5%
21	227,70 ($\pm 3\%$)	-16%
22	262,73 ($\pm 2\%$)	-3%
24	281,44 ($\pm 5\%$)	4%
25	267,20 ($\pm 3\%$)	-2%
27	313,69 ($\pm 4\%$)	16%
29	248,03 ($\pm 4\%$)	-9%
30	284,37 ($\pm 3\%$)	5%
31	322,48 ($\pm 3\%$)	19%
34	282,10 ($\pm 4\%$)	4%
36	236,82 ($\pm 3\%$)	-13%

38	285,23 ($\pm 3\%$)	5%
39	271,22 ($\pm 4\%$)	0%
41	331,91 ($\pm 3\%$)	22%
43	271,08 ($\pm 3\%$)	0%
44	292,10 ($\pm 4\%$)	8%
45	244,05 ($\pm 4\%$)	-10%
46	298,46 ($\pm 4\%$)	10%
47	156,47 ($\pm 4\%$)	-42%
48	341,49 ($\pm 3\%$)	26%
49	262,16 ($\pm 4\%$)	-3%
50	278,24 ($\pm 3\%$)	3%
52	216,51 ($\pm 5\%$)	-20%
53	276,97 ($\pm 4\%$)	2%
54	248,77 ($\pm 5\%$)	-8%
55	295,52 ($\pm 5\%$)	9%
57	287,23 ($\pm 3\%$)	6%
61	226,66 ($\pm 2\%$)	-16%
62	278,69 ($\pm 3\%$)	3%
63	230,84 ($\pm 3\%$)	-15%
66	246,24 ($\pm 4\%$)	-9%
67	230,52 ($\pm 3\%$)	-15%
71	283,56 ($\pm 3\%$)	4%
72	230,40 ($\pm 5\%$)	-15%
73	301,84 ($\pm 3\%$)	11%
74	277,98 ($\pm 4\%$)	2%
75	359,55 ($\pm 3\%$)	32%
76	317,93 ($\pm 5\%$)	17%
77	289,23 ($\pm 2\%$)	7%
82	256,10 ($\pm 4\%$)	-6%
84	280,47 ($\pm 2\%$)	3%
88	293,99 ($\pm 3\%$)	8%
89	317,33 ($\pm 3\%$)	17%
90	234,50 ($\pm 4\%$)	-14%
93	211,56 ($\pm 4\%$)	-22%
97	232,73 ($\pm 3\%$)	-14%

98	270,84 ($\pm 4\%$)	0%
99	266,22 ($\pm 2\%$)	-2%

Tabela 17 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.

1º grupo	21	47	52	61	63	67	72	90	93	97
Médias	227,70	156,47	216,51	226,66	230,84	230,52	230,40	234,50	211,56	232,73
(Desvio)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 2\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)

Tabela 18 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.

2º grupo	11	12	22	29	36	45	49	54	66	82
Médias	252,09	246,77	262,73	248,03	236,82	244,05	262,16	248,77	246,24	256,10
(Desvio)	($\pm 2\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 2\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 4\%$)

Tabela 19 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.

3º grupo	25	39	43	50	53	62	74	84	98	99
Médias	267,20	271,22	271,08	278,24	276,97	278,69	277,98	280,47	270,84	266,22
(Desvio)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 2\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 2\%$)

Tabela 20 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.

4º grupo	17	24	30	34	38	44	46	55	57	71
Médias	284,96	281,44	284,37	282,10	285,23	292,10	298,46	295,52	287,23	283,56
(Desvio)	($\pm 4\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 5\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)

Tabela 21 - Subgrupo 1, com suas 10 pastilhas, e seu valores de leitura média, e seu desvio percentual.

5º grupo	27	31	41	48	73	75	76	77	88	89
Médias	313,69	322,48	331,91	341,49	301,84	359,55	317,93	289,23	293,99	317,33
(Desvio)	($\pm 4\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 2\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 4\%$)	($\pm 2\%$)	($\pm 3\%$)	($\pm 3\%$)