



Universidade Estadual de Montes Claros
Pró-Reitoria de Pós-Graduação



Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional e Sistemas



Jeniffer Uberty Garcia Ferreira Cunha

**PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS DE DISCOS DE QUARTZO-
TEFLON EXPOSTOS A UM FEIXE DE RAIOS X PARA
MAMOGRAFIA**

Montes Claros – MG
Dezembro de 2023

Jeniffer Uberty Garcia Ferreira Cunha

**PROPRIEDADES DOSIMÉTRICAS DE DISCOS DE QUARTZO-
TEFLON EXPOSTOS A UM FEIXE DE RAIOS X PARA
MAMOGRAFIA**

Relatório Técnico de Pesquisa apresentado ao Mestrado Profissional em Modelagem Computacional e Sistemas, da Universidade Estadual de Montes Claros, como exigência para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro B. de Carvalho Júnior

Coorientador: Prof. Dr. René Rojas Rocca

Montes Claros – MG

Dezembro de 2023



Unimontes

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MONTES CLAROS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL E
SISTEMAS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Propriedades Dosimétricas de Discos de Quartzo-Teflon Expostos a um Feixe
de Raios X para Mamografia

JENIFFER UBERTY GARCIA FERREIRA CUNHA

Trabalho de conclusão de dissertação defendido e aprovado pela banca examinadora constituída
pelos professores:

PROF. DR. ÁLVARO BARBOSA DE CARVALHO JÚNIOR - Orientador
Departamento de Ciências Exatas – Universidade Estadual de Montes Claros
(UNIMONTES)

PROF. DR. RENÉ ROJAS ROCCA – Coorientador
Departamento de Ciências do Mar – Universidade Federal de São Paulo
(UNIFESP)

PROF. DR. LEONARDO BRUNO FERREIRA DE SOUZA – Avaliador
Departamento de Física – Universidade Católica de Pernambuco
(UNICAP)

PROFa. DRa. BEATRIZ REZENDE MARINHO – Avaliadora
Departamento de Enfermagem – Universidade Estadual de Montes Claros
(UNIMONTES)

PROF. DR. MAURÍLIO JOSÉ INÁCIO - Avaliador
Departamento de Ciências da Computação – Universidade Estadual de Montes Claros
(UNIMONTES)

PROF. DR. ALLYSSON STEVE MOTA LACERDA - Avaliador
Departamento de Ciências da Computação – Universidade Estadual de Montes Claros
(UNIMONTES)

C972p

Cunha, Jeniffer Uberty Garcia Ferreira.

Propriedades dosimétricas de discos de quartzo-teflon expostos a um feixe de Raios X para mamografia [manuscrito] / Jeniffer Uberty Garcia Ferreira Cunha – Montes Claros (MG), 2023.

64 f. : il.

Bibliografia: f. 61-64.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas/PPGMCS, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro B. de Carvalho Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. René Rojas Rocca.

1. Quartzo. 2. Termoluminescência. 3. Radiação - Dosimetria. 4. Mamografia. I. Carvalho Júnior, Álvaro B. de. II. Rojas Rocca, René. III. Universidade Estadual de Montes Claros. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço Àquele que me presenteou com o bem mais precioso que poderia receber um dia, a vida, e com ela a capacidade para pensar, amar e lutar pelos meus objetivos. Muitas foram às lutas, maiores as vitórias, e isso porque o Senhor se fez sempre presente.

Ao meu esposo Denys Cunha Fonseca Garcia e a minha mãe Débora Uberty Dos Santos, pela compreensão e por serem os meus maiores exemplos de determinação e por me incentivarem a nunca desistir, mesmo nos momentos mais difíceis. A minha irmã Jhael Garcia, pelo incentivo e exemplo de dedicação.

Ao Prof. Dr. Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação; pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do mestrado.

Ao meu coorientador Prof. Dr. René Rojas Rocca, que também representou parte fundamental na construção dessa pesquisa, pela contribuição essencial para a realização das medidas experimentais e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Professor Leonardo Bruno pela contribuição no capítulo de tempo de vida útil.

Ao Laboratório de Metrologia das radiações Ionizantes (LMRI) pela disponibilização do local para as medidas TL nas amostras.

Ao PPGMCS pela disponibilização da infraestrutura para a realização dos experimentos. Aos professores do PPGMCS que repartiram comigo os seus conhecimentos. Enfim, deixo o meu agradecimento a todos aqueles que, de um modo ou de outro, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este relatório técnico de pesquisa apresenta os resultados das propriedades termoluminescentes (TL) de um lote de discos de quartzo natural prensados com Teflon, visando aplicações dosimétricas para feixes de raios X utilizados em exames de mamografia. Resultados preliminares, tais como; resposta TL linear com a dose, reprodutibilidade e desvanecimento da resposta TL, foram observados no passado por outros autores e já indicavam que os discos de quartzo-teflon eram passíveis de uso na dosimetria TL para feixes de raios X em radiodiagnóstico. Entretanto, até presente momento, ainda não havia sido realizado um estudo mais abrangente sobre as propriedades dos discos de quartzo-teflon expostos, especificamente, em feixes de raios X para mamografia. Como isso, ao final desta pesquisa, constatou-se a sensibilidade, linearidade, reprodutibilidade, desvanecimento e tempo de vida útil do sinal TL dos discos de quartzo, sendo estes resultados comparados e discutidos em relação àqueles apresentados pelos dosímetros TL comerciais. Além disso, também foi possível constatar a importância de realizar a leitura TL sempre na face irradiada dos discos, tendo em vista que a morfologia da superfície degradada pela manipulação e pelos procedimentos de irradiação, leitura TL e tratamentos térmicos; pode diminuir a sensibilidade dos discos, ocasionando maiores variações da resposta TL. Estas evidências foram fundamentadas por meio das imagens obtidas com microscopia óptica e pela análise comparativa entre as leituras TL realizadas na face irradiada e na face oposta dos discos expostos a um feixe de raios X.

Palavras chave: quartzo; termoluminescência; propriedades; dosimetria; mamografia

ABSTRACT

This technical research report presents the results of the thermoluminescent (TL) properties of a batch of natural quartz pellets pressed with PTFE to dosimetric applications on X-ray beams used in mammography examinations. Preliminary results, such as linear TL response, reproducibility and fading, were observed in the past by other authors and already indicated that quartz pellets could be used in TL dosimetry for X-ray beams in radiodiagnosis. However, a more comprehensive study on the properties of quartz-PTFE pellets for dosimetric studies in mammography had not yet been carried out. Therefore, at this research, the sensitivity, linearity, reproducibility, fading and lifetime of the TL signal from quartz pellets were verified and these results were compared and discussed in relation to those presented by commercial TL dosimeters. In addition, it was also possible to observe the importance of always taking the TL reading on the irradiated side of the pellets, given that the surface morphology degraded by handling and by the irradiation, TL reading and heat treatment procedures can reduce the sensitivity, causing greater variations in the TL response. This evidence was supported by optical microscopy images and by comparative analysis of the TL readings taken on the irradiated side and the opposite side of the pellets exposed to X-ray beam.

Key-words: quartz; thermoluminescence; properties; dosimetry; mammography

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo simples de banda de energia.....	16
Figura 2.2 – Esquema representativo de uma armadilha.....	18
Figura 2.3 – Representação dos picos TL de primeira ordem (I) e segunda ordem (II).....	20
Figura 2.4 – Ilustração dos parâmetros geométricos do pico TL.....	21
Figura 2.5 – Variação de μ com ordem da cinética b	21
Figura 2.6 – Exemplo de deconvolução em uma curva de intensidade TL.....	23
Figura 2.7 – Curva de resposta TL em função da dose de radiação.....	24
Figura 2.8 – Curva de intensidade TL em função da temperatura.....	25
Figura 2.9 – Esquema simplificado do sistema de leitura TL.....	27
Figura 2.10 – Áreas de aplicação da dosimetria TL.....	28
Figura 2.11 – Representação dos componentes constituintes de um tubo de raios X.....	29
Figura 2.12 Conceitos usuais para dosimetria de raios X.....	31
Figura 2.13 – Exemplo de fantoma antropomórfico para medidas de kerma.....	34
Figura 3.1 – Discos de quartzo teflon selecionados para este estudo.....	35
Figura 3.2 – Discos de quartzo- teflon (a) pesagem dos discos (b) aferição do diâmetro.....	35
Figura 3.3 – Leitora TL Harshow–Bicron, modelo M 3500.....	37
Figura 3.4 – Representação da curva de intensidade TL para os discos de quartzo.....	38
Figura 3.5 – Representação da curva de intensidade TL para o TLD-100.....	38
Figura 3.6 – Discos de quartzo com teflon com diâmetro de aproximadamente 6 mm.....	39
Figura 3.7 – Forno PTW utilizado para tratamento térmico das amostras.....	39

Figura 3.8 – Representação da curva TL para os discos de quartzo-teflon na região de leitura entre 200 e 350 ° C (Leitora TL Victoreem 2800 M).....	40
Figura 3.9 – Sistema utilizado para microscopia óptica nos discos de quartzo.....	41
Figura 4.1 – Curva de intensidade TL para os discos de quartzo.....	43
Figura 4.2 – Curva de intensidade TL para os dosímetros TLD-100.....	44
Figura 4.3 – Resposta TL em função da dose para os discos de quartzo.....	45
Figura 4.4 – Resposta TL em função da dose para os dosímetros TLD-100.....	45
Figura 4.5 – Resposta do sinal TL integrado para os discos de quartzo.....	46
Figura 4.6 – Resposta do sinal TL integrado para os dosímetros TLD-100	46
Figura 4.7 – Relação entre a resposta TL e energia.....	48
Figura 4.8 – Reprodutibilidade dos discos com dose de 9,72 mGy.....	49
Figura 4.9 – Resposta TL das faces irradiadas e oposta dos discos.....	52
Figura 4.10 – Imagens obtidas com microscópio óptico na superfície dos discos.....	53
Figura 4.11 – Estabilidade da resposta TL na região entre 200 e 375 °C em função do tempo de estocagem para uma dose de 9,72 mGy.....	54
Figura 4.12 – Curva de intensidade TL e parâmetros geométricos do pico TL principal.....	55
Figura 4.13 – Curva média da intensidade TL antes e após a deconvolução.....	55
Figura 4.14 – Parâmetros geométricos do pico TL após a deconvolução.....	56

LISTADE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de qualidade dos feixes de raios X simulados para aplicações em radiologia e mamografia.....	32
Tabela 2.2 – Valores adaptados para o cálculo da dose equivalente.....	33
Tabela 2.3 – Valores de ponderação para órgãos do corpo humano.....	34
Tabela 4.1 – Coeficiente de determinação (R^2) angular (A) e linear (B) para os discos de quartzo e para os dosímetros TLD-100 irradiados com feixe de raios x.....	36
Tabela 4.2 – Média da resposta TL ($\bar{X}$), desvio padrão (dp) e variância ($dp/(\bar{X})$) (dose = 9,72 mGy).....	39
Tabela 4.3 – Sinal e resposta TL para o disco 2.....	40
Tabela 4.4 – Sinal e resposta TL para o disco 8.....	40
Tabela 4.5 – Sinal e resposta TL para o disco 14.....	40
Tabela 4.6 – Valores calculados da energia de ativação (E).....	46
Tabela 4.7 – Fator de frequência (s) e tempo de vida (t) do pico TL deconvoluído....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEN	Departamento Energia Nuclear
GDOIN	Grupo de Dosimetria e Instrumentação
ICRU	Comissão Internacional de Unidades e Medições de Radiação
LMRI	Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes
PPGMCS	Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas
TL	Termoluminescente
TLD	Dosímetros Termoluminescentes
UNIMONTES	Universidade Estadual de Montes Claros

LISTADE SÍMBOLOS

n_o Concentração inicial de elétrons nas armadilhas,

s Fator de frequência (s^{-1}),

b Taxa de aquecimento ($^{\circ}C/s$),

E Energia de ativação (eV),

T Temperatura (K)

k Constante de Boltzmann.

γ Raios gama

μ Fator de simetria

p Probabilidade

Gy Unidade da grandeza dosimétrica para dose absorvida

Sv Unidade da grandeza dosimétrica para dose equivalente

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO PARA JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	12
2. CONCEITOS E FUNDAMENTOS IMPORTANTES	15
2.1 Princípio básico da TL	15
2.2 Modelos físicos para o fenômeno TL	16
2.3 Tempo de vida útil do pico TL	20
2.4 Propriedades dos dosímetros TL	24
2.4.1 Leitura dos dosímetros TL e suas aplicações	27
2.4.2 Raios X e dosimetria TL para radiodiagnóstico	28
3. TECNOLOGIA E FERRAMENTAS UTILIZADAS	35
3.1 Características dos dosímetros de quartzo-teflon	35
3.2 Propriedades dosimétricas dos discos de quartzo-teflon	36
3.2.1 Curva de intensidade TL (<i>Glow Curve</i>)	36
3.2.2 Reprodutibilidade da resposta TL	39
3.2.3 Estabilidade da resposta TL	41
3.2.4 Resposta TL em função da dose	41
3.2.5 Determinação do tempo de vida útil do pico TL	42
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS	43
4.1 Análise da curva de intensidade TL	43
4.2 Resposta TL dos discos de quartzo	44
4.3 Resultado da reprodutibilidade do sinal TL	48
4.4 Análise do desvanecimento da resposta TL	53
4.5 Análise do tempo de vida útil do pico TL	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
Sugestões de novas etapas para trabalhos futuros	60
6. REFERÊNCIAS	61

1. CONTEXTUALIZAÇÃO PARA JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Sabe-se que nos últimos anos o uso crescente das radiações ionizantes tem incentivado muitas pesquisas com o intuito de desenvolver novos materiais termoluminescentes (TL) para medidas de dose (HOROWITZ, 2023). Estes materiais, produzidos na forma de pequenos dispositivos, são chamados de dosímetros TL. Autores como, McKeever (1985), Campos (1998) e Bos (2001), vêm ressaltando há muitos anos, algumas vantagens no uso dos dosímetros TL, tais como; suas pequenas dimensões; ausência de cabos ou equipamentos auxiliares para a medida da dose; e ampla faixa de aplicações em radiodiagnóstico.

Hoje, existe uma diversidade de estudos sobre materiais que possuem propriedades TL. Entretanto, existem requisitos para que um material TL possa ser utilizado como dosímetro das radiações ionizantes. Bos (2001) e Furetta (2009), resumiram alguns destes requisitos; dentre os quais se destacam: (a) uma curva de intensidade TL simples, preferencialmente com a presença de um pico situado entre 180 e 400 °C (região de maior estabilidade do sinal TL); (b) capacidade de armazenar o sinal TL à temperatura ambiente durante longos períodos de tempo; (c) possuir um espectro de emissão TL entre 300 e 500 nm (faixa de sensibilidade das fotomultiplicadoras das leitoras TL); (d) ser passível de reutilização após os tratamentos térmicos utilizados para apagar sinais TL remanescentes; (e) resistência aos agentes externos como luz, umidade, solventes e gases; (f) comportamento linear entre a intensidade TL e a dose aplicada de radiação; (g) possuir baixo custo de fabricação.

No que se refere aos minerais naturais, geralmente, suas propriedades TL são utilizadas nos protocolos de datação geológica e arqueológica. Entretanto, vários autores constataram que certos minerais, como o quartzo e outros silicatos, podem ser utilizados na dosimetria das radiações γ para doses da ordem de 10^{-2} Gy (Gray) (SOUZA *et al.* 2001; ROCHA *et al.*, 2003; KHOURY *et al.*, 2008; NASCIMENTO *et al.*, 2009).

McKeever (1984) e Roque *et al.* (2004) destacam o quartzo como o mineral TL mais utilizado nas pesquisas de datação geológica e arqueológica. Isto porque sua natureza iônica-covalente das ligações silício-oxigênio (Si-O) e a presença de canais paralelos ao eixo de crescimento do cristal, permitem o surgimento de defeitos pontuais relacionados aos picos TL observados nas temperaturas entre 50 e 400 °C. Estes defeitos foram estudados no passado por McKeever, Chen e Halliburton (1985); Iwasaki *et al.* (1991) e Guzzo *et al.* (1997).

Carvalho Jr., Khoury e Guzzo (2007) e Carvalho Jr. *et al* (2012) afirmaram que, mesmo existindo muitos estudos sobre as propriedades TL do quartzo para fins de datação geológica e arqueológica, acredita-se que o quartzo natural ainda não seja utilizado como dosímetro porque sua curva TL é muito dependente da procedência dos cristais, podendo apresentar diferentes níveis de complexidade, e pelo fato dos defeitos responsáveis pela emissão dos picos TL, ainda hoje, não estarem satisfatoriamente caracterizados. Outro ponto importante é que poucos estudos foram realizados para caracterizar a resposta TL do quartzo natural para baixas doses de radiação obtidas com raios γ e X. Contudo, Guzzo *et al.* (2006), Khoury *et al.* (2008), Carvalho Jr. (2010) e Carvalho Jr. *et al.* (2012) mostraram evidências de que no quartzo, um pico TL situado entre 200 e 300 °C, pode ocorrer em altas intensidades mesmo para doses muito baixas de radiação ionizante.

Embora tenha sido constatada a alta intensidade do pico TL do quartzo para baixas doses, Silva (2005) e Guzzo *et al.* (2009) verificaram que amostras preparadas a partir de um mesmo monocristal podem apresentar divergências na intensidade TL. Nascimento (2010) também constatou estas divergências em monocristais de quartzo expostos a doses de raios X diagnóstico. A variação na intensidade TL foi associada às diferentes concentrações de impurezas (defeitos responsáveis pela emissão dos picos TL) de uma amostra para outra, sendo comum ocorrer segregação de impurezas no crescimento dos cristais naturais (IHINGER e ZINK, 2000).

Com a finalidade de utilizar o quartzo natural como dosímetro, Carvalho Jr. (2010) buscou encontrar um procedimento para minimizar o efeito da heterogeneidade da distribuição de impurezas sobre a resposta TL. Neste sentido, com base nos procedimentos descritos por Mahesh, Weng e Furetta (1989), partiu-se da hipótese que a utilização de materiais particulados poderia contribuir para uma diminuição da dispersão na resposta TL, permitindo a utilização de blocos de quartzo natural com distribuição heterogênea de impurezas. A hipótese foi confirmada por Carvalho Jr. (2010), que investigou a resposta TL do quartzo particulado classificado em diferentes faixas granulométricas. Contudo, devido à propriedade piezelétrica do quartzo, existe uma certa dificuldade em se realizar a compactação mecânica do quartzo particulado sem adição de materiais aglomerantes. Uma alternativa sugerida nos estudos realizados por Carvalho Jr. (2010) e Carvalho Jr. *et al* (2012), consiste na mistura do quartzo particulado com teflon (politetrafluoretileno - PTFE) para a produção de discos policristalinos aglomerados com compactação mecânica e tratamento térmico.

Com base no exposto acima, o Grupo de Dosimetria e Instrumentação Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (GDOIN), tem estudado a resposta TL do quartzo visando sua utilização como dosímetro TL para aplicações médicas. Os estudos realizados em amostras monocristalinas e policristalinas, submetidas a uma sensibilização prévia com alta dose de radiação γ e tratamentos térmicos, mostraram resultados que indicam à utilização do quartzo como dosímetro TL das radiações ionizantes (SILVA, 2005; GUZZO *et al.*, 2006; KHOURY *et al.*, 2008; GUZZO *et al.*, 2009; CARVALHO JR., 2010; CARVALHO JR. *et al.*, 2012 e SOARES, ASFORA e GUZZO, 2022).

Uma vez constatada a viabilidade do quartzo sensibilizado para a produção de discos policristalinos expostos a doses de raios γ , Carvalho Jr. *et al.* (2011) investigou a resposta TL de discos de quartzo policristalinos expostos a diferentes feixes de raios X usados nos estudos dosimétricos em mamografia. Os resultados preliminares da pesquisa indicaram que os discos de quartzo possuem uma resposta TL maior do que os dosímetros TL comerciais TLD-100 (LiF:Mg,Ti), que são comumente utilizados nos procedimentos de mamografia. Entretanto, alguns discos de quartzo apresentaram variação da resposta TL fora do intervalo delimitado pela média geral das respostas TL dos discos mais ou menos o valor do desvio padrão.

Uma maior sensibilidade TL, associada ao baixo custo estimado de produção em relação ao TLD-100, motiva a investigação dos discos de quartzo prensados com teflon para estudos dosimétricos em mamografia. Este fato é reforçado pela Sociedade Brasileira de Mastologia, que recomenda que todas as mulheres a partir dos 40 anos de idade façam o exame de mamografia anualmente. Além disso, pesquisas que utilizam feixes de raios X para a caracterização de novos dosímetros são importantes, uma vez que podem melhorar a qualidade das calibrações realizadas nos laboratórios de dosimetria (IAEA, 2007).

Portanto, a necessidade de uma caracterização mais abrangente das propriedades dosimétricas, além de um estudo mais aprofundado sobre a variação da resposta TL dos discos de quartzo, estão entre os principais motivadores deste trabalho, que teve como objetivo principal, avaliar as propriedades TL de um lote de discos policristalinos de quartzo, visando no futuro o uso na dosimetria de raios X e nos programas de controle de qualidade em mamografia.

2. CONCEITOS E FUNDAMENTOS IMPORTANTES

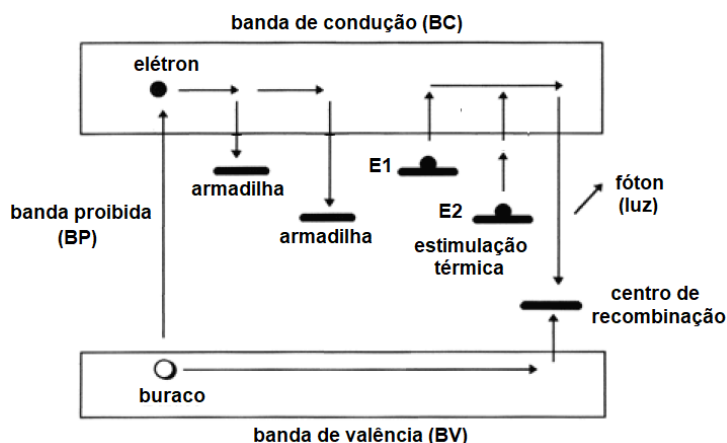
Neste capítulo se encontra uma breve revisão bibliográfica abordando alguns pontos que ajudarão na compreensão deste relatório técnico de pesquisa. Assim, foram revisados os seguintes temas: princípio TL, modelos físicos para o fenômeno TL, tempo de vida útil do pico TL, propriedades dos dosímetros TL, produção de raios X e dosimetria TL para radiodiagnóstico.

2.1 Princípio básico da TL

A termoluminescência (TL) corresponde à propriedade de certos materiais que, após serem expostos à radiação ionizante, podem emitir luz quando posteriormente aquecidos (MCKEEVER, 1985). Campos (1998) ressalta que o fenômeno TL é conhecido há muitos anos, desde que em 1663, Robert Boyle notificou à "Royal Society", em Londres, uma observação da emissão de luz por um diamante aquecido no escuro. A partir da década de 1940 a aplicação TL na dosimetria das radiações passa a entrar em vigor, quando o número de trabalhadores expostos às radiações ionizantes aumentou, sendo necessário desenvolver novos tipos de dosímetros para o monitoramento dos indivíduos.

O fenômeno TL pode ser explicado utilizando um modelo simples de bandas para os níveis de energia dos elétrons nos sólidos. Um modelo simples de bandas de energia está apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Modelo simples de banda de energia



Fonte: adaptado de Campos (1998).

Geralmente, os materiais TL são cristais iônicos, onde a banda de valência (BV) está repleta de elétrons e a banda de condução (BC) está vazia (Figura 2.1). Estas bandas estão separadas por uma faixa larga de estados energéticos chamada de banda proibida (BP), na qual não é permitida a presença dos elétrons.

No momento em que o cristal iônico é exposto à radiação, pares de elétrons e buracos são produzidos. Isto ocorre porque os elétrons são excitados da BV para BC, deixando buracos em BV. Os elétrons podem ser capturados por armadilhas com diferentes níveis de energia (armadilhas rasas E_1 ou profundas E_2). Já os buracos podem caminhar pela estrutura do cristal, sendo aprisionados por níveis de energia formados por centros de defeitos, conhecidos por centros de buracos ou centros de recombinação. Depois da excitação causada pela radiação ionizante, elétrons e buracos permanecem aprisionados pelos centros de defeitos em um sistema de equilíbrio metaestável.

Com o aquecimento do cristal os elétrons ganham energia e podem passar novamente à BC. Neste caso, algumas possibilidades podem ocorrer com os elétrons, tais como; a recaptura pelas armadilhas, o retorno à BV, ou ainda, uma recombinação com os buracos armadilhados nos chamados centros de recombinação. Se os elétrons se recombinarem com os buracos ocorrerá a emissão de luz visível e este fenômeno será chamado de termoluminescência. A quantidade de luz emitida durante a estimulação térmica pode ser medida e sua intensidade estará em função da quantidade de elétrons ou buracos armadilhados. Logo, a termoluminescência depende da quantidade de elétrons e buracos, que, por sua vez, depende em um primeiro momento dos centros de armadilhas e dos centros de recombinação e, num segundo momento, da dose absorvida pelo cristal (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG E FURETTA, 1989).

2.2 Modelos físicos para o fenômeno TL

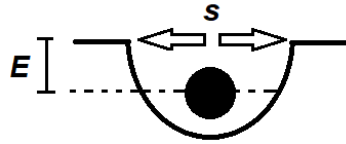
Existem alguns modelos físicos que se propõem a explicar o fenômeno TL. Entre eles, um modelo físico simples proposto em 1945 por Randall e Wilkins. (CHEN e MCKEEVER, 1997). Neste modelo, existem apenas um único tipo de armadilha com energia de ativação (E) e um tipo de centro de recombinação. A probabilidade (p), por unidade de tempo, para que um elétron possa escapar da armadilha está apresentada na Equação 2.1 (MAHESH, WENG E FURETTA, 1989). Nesta equação: p = probabilidade de escape do elétron (dias, meses, anos); E = energia de ativação (eV); s =

fator de frequência do elétron (varia entre 10^{12} e 10^{14} s^{-1}); k = constante de Boltzmann ($8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$); T = temperatura (K).

$$p = s \cdot e^{-E/kT} \quad (2.1)$$

Na Figura 2.2 encontra-se uma ilustração do significado de E e s no aprisionamento de um elétron em uma armadilha representada no modelo de bandas de energia da Figura 2.1. Supondo que $E \gg kT$, o tempo médio que o elétron pode ficar armadilhado (p^{-1}) é bastante longo. Chen e McKeever (1997) exemplificam da seguinte forma: para $E = 1,5 \text{ eV}$, $s = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ e $T = 298 \text{ K}$, o valor de p^{-1} será de $7,3 \times 10^5$ anos.

Figura 2.2 – Esquema representativo de uma armadilha para elétrons com energia de ativação (E) e fator de frequência (s)



Fonte: adaptado de Chen e McKeever (1997).

O modelo proposto por Randall e Wilkins está fundamentado na teoria do quase-equilíbrio, que consiste na probabilidade desprezível de rearmadilhamento, quando comparada com a probabilidade de recombinação. Como abordado anteriormente, a intensidade TL será proporcional à taxa de preenchimento dos centros de recombinação que, por sua vez, será igual à taxa de esvaziamento das armadilhas. Assim, a intensidade TL pode ser descrita pela Equação 2.2 (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; CHEN e MCKEEVER, 1997). Nesta equação, n_o é a concentração inicial de elétrons nas armadilhas, s é o fator de frequência para cinética de primeira ordem, b é a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$), E é a energia de ativação (eV), T é a temperatura (K) e k é a constante de Boltzmann.

$$I(T) = n_o s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \exp\left[-\frac{s}{\beta} \int_{T_o}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right] \quad (2.2)$$

O modelo de Randall e Wilkins também é conhecido como modelo de primeira ordem ou modelo de ordem 1. Isto porque a intensidade TL depende da concentração dos portadores de cargas elevada à primeira potência (n_o). Este modelo é válido quando os picos na curva de intensidade TL estão separados. Entretanto, ressalta-se que os picos TL são geralmente compostos pela superposição de dois ou mais picos. Desta forma, a separação dos picos TL para análise pode ser feita por meio de processos de deconvolução (KITIS, GOMEZ-ROS e TUYN, 1998; KITIS e PAGONIS, 2007).

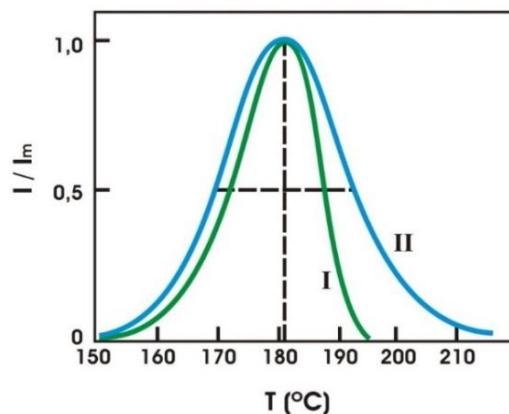
A superposição dos picos TL está diretamente relacionada com a probabilidade de rearmadilhamento dos elétrons. Assim, um modelo proposto em 1948 por Garlick e Gibson, considerou a possibilidade do rearmadilhamento (CHEN e MCKEEVER, 1997). Isto admite que os elétrons liberados de suas armadilhas pelo aquecimento térmico podem ser novamente armadilhados. No modelo Garlick e Gibson a intensidade TL é representada pela Equação 2.3 (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; CHEN e MCKEEVER, 1997): Nesta equação, n_o é a concentração inicial de elétrons nas armadilhas, s é o fator de frequência para cinética de segunda ordem, b é a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$), E é a energia de ativação (eV), T é a temperatura (K) e k é a constante de Boltzmann.

$$I(T) = \frac{n_o^2 s' \exp\left[-\frac{E}{kT}\right]}{\left[1 + \left(\frac{n_o^2 s'}{\beta}\right) \int_{T_o}^T \exp\left[-\frac{E}{kT}\right] dT\right]^2} \quad (2.3)$$

O modelo Garlick e Gibson também é conhecido como modelo de segunda ordem ou modelo de ordem 2. Isto porque a intensidade TL depende da concentração dos portadores de cargas elevada à segunda potência (n_o^2).

Na Figura 2.3 estão apresentadas duas curvas de intensidade TL com picos TL característicos para os modelos de primeira e segunda ordem. Estas curvas foram simuladas numericamente com o valor da energia de ativação (E) e normalizadas em relação à intensidade máxima para efeito de comparação (CHEN e MCKEEVER, 1997). No item de revisão sobre as propriedades dos dosímetros TL serão apresentados mais detalhes sobre a curva de intensidade TL.

Figura 2.3 – Representação dos picos TL de primeira (I) e segunda ordem (II)



Fonte: adaptado de Chen e McKeever (1997).

Na curva de primeira ordem (curva de linha verde na Figura 2.3), percebe-se uma assimetria do pico TL, que é mais largo do lado de menor temperatura. Para a curva de segunda ordem (curva de linha azul na Figura 2.3), nota-se um pico TL mais simétrico. Entretanto, sabe-se que alguns dosímetros possuem picos TL que não são de primeira ordem e nem de segunda ordem. Para esses casos, May e Partridge (1964) propuseram no passado uma expressão de ordem geral, que está representada na Equação 2.4.

$$I(T) = n_o s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[1 + \frac{s(b-1)}{\beta} \int_{T_o}^T \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dT\right]^{\frac{b}{b-1}} \quad (2.4)$$

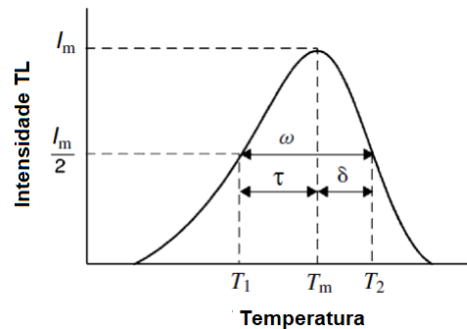
Para o modelo de ordem geral: n_o é a concentração inicial de elétrons nas armadilhas, s é o fator de frequência para cinética de ordem geral, b é a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$), E é a energia de ativação (eV), T é a temperatura (K), k é a constante de Boltzmann, b é a ordem da cinética diferente de 1 e 2.

2.3 Tempo de vida útil do pico TL

A forma geométrica do pico TL é uma característica importante do material que será usado como dosímetro das radiações ionizantes. Esta característica pode ser avaliada com o método de forma de pico, que tem como base as medições de alguns pontos do pico TL para a determinação do seu tempo de vida útil. Entretanto, existem outros métodos de análise do pico TL, como por exemplo, o método de subida inicial e o método de múltiplas taxas de aquecimento (CHEN e MCKEEVER, 1997). Contudo, o

método da forma do pico se destaca por não necessitar de medidas TL adicionais. Na Figura 2.4 encontra-se ilustrado os parâmetros geométricos do pico TL.

Figura 2.4 – Ilustração dos parâmetros geométricos do pico TL

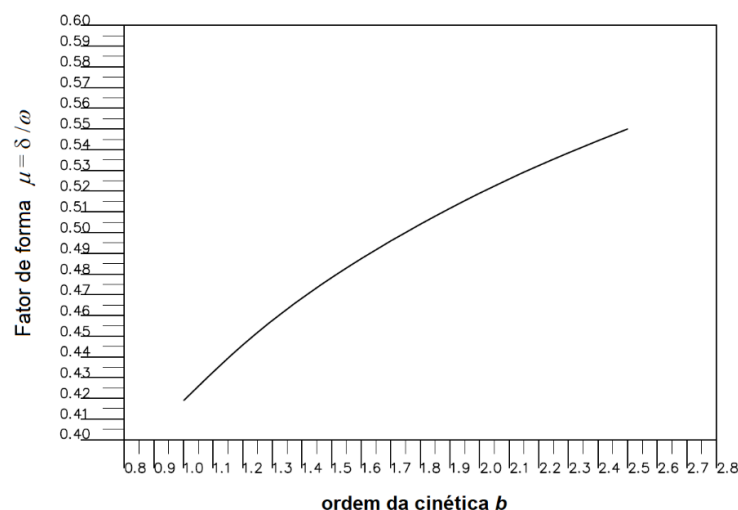


Fonte: Adaptado de Chen e McKeever (1997).

Analisando a figura, é possível definir os seguintes parâmetros geométricos, sendo: T_m = temperatura na intensidade máxima; T_1 e T_2 = temperaturas a esquerda e a direita de T_m , correspondentes à metade da intensidade máxima do pico TL; $\tau = T_m - T_1$ é a meia largura no lado da temperatura mais baixa; $\delta = T_2 - T_m$ é a meia largura no lado da temperatura mais alta; $\omega = T_2 - T_1$ é a meia largura total e $\mu = \delta / \omega$ (não mostrado na Figura 2.4) é o fator de forma geométrica (CHEN e MCKEEVER, 1997).

O fator μ é adotado como 0,42 para picos TL com cinética de primeira ordem e 0,52 para cinética de segunda ordem. Para os picos TL com cinética de ordem geral são adotados valores de μ diferentes de 0,42 e 0,52.

Figura 2.5 – Variação de μ com a ordem da cinética b



Fonte: Adaptado de Chen e McKeever (1997).

No caso, após determinar o fator de forma μ , o valor do parâmetro b , que correspondente a ordem da cinética do pico TL, pode ser estimado a partir da curva apresentada na Figura 2.5. Para os picos TL com cinética de ordem geral, a energia de ativação E (eV) pode ser calculada com a Equação 2.5, que requer apenas o conhecimento dos parâmetros geométricos apresentados, quais sejam: τ , δ , ω e μ . Nesta equação, o índice α é o parâmetro geométrico escolhido para a análise e k é a constante de Boltzmann (CHEN e MCKEEVER, 1997).

$$E_{\alpha} = C_{\alpha} \frac{kT_m^2}{\alpha} - B_{\alpha}(2kT_m) \quad (2.5)$$

Os valores de C_{α} e B_{α} podem ser calculados de forma diferente, dependendo do parâmetro geométrico adotado para a análise, que pode ser τ , δ ou ω . Neste caso, é possível utilizar as seguintes equações propostas por Chen e McKeever (1997):

$$C_{\tau} = 1,51 + 3(\mu - 0,42) \text{ e } B_{\tau} = 1,58 + 4,2(\mu - 0,42) \quad (2.6)$$

$$C_{\delta} = 0,976 + 7,3(\mu - 0,42) \text{ e } B_{\delta} = 0 \quad (2.7)$$

$$C_{\omega} = 2,52 + 10,2(\mu - 0,42) \text{ e } B_{\omega} = 1 \quad (2.8)$$

O valor do fator de frequência (s) dos elétrons nas armadilhas pode ser obtido por meio do modelo matemático descrito na Equação 2.9 (BOS, 2001). Nesta equação: b é a taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C/s}$), E é a energia de ativação (eV), T_m é a temperatura na intensidade máxima (K), k é a constante de Boltzmann, b é a ordem da cinética determinada na Figura 2.4.

$$s = \left(\frac{E}{kT_m^2} \right) \frac{1}{1 + (b - 1) \left(\frac{2kT_m}{E} \right)} \exp \left(\frac{E}{kT_m} \right) \quad (2.9)$$

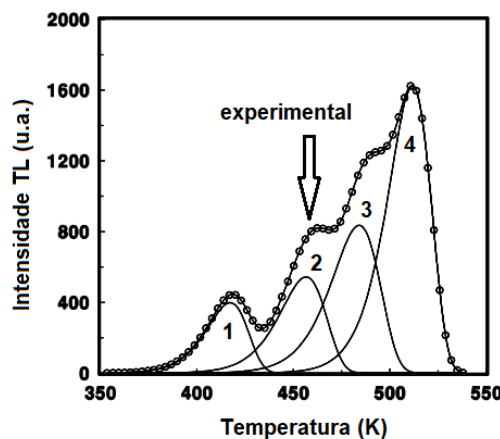
O tempo de vida útil ou tempo de permanência dos elétrons nas armadilhas na temperatura ambiente, pode ser analisado com o método da forma do pico TL, antes e depois da deconvolução da curva de intensidade TL. A deconvolução consiste em um método matemático para separar curvas TL sobrepostas, criando novas curvas

simuladas por meio de parâmetros, tais como; energia de ativação, fator de frequência e taxa de aquecimento, que são determinados teoricamente e experimentalmente (KITIS, GOMEZ-ROS e TUYN, 1998; KITIS e PAGONIS, 2007).

Um exemplo do procedimento de deconvolução em uma curva de intensidade TL está apresentado na Figura 2.6. Neste exemplo, a curva experimental possui quatro picos TL sobrepostos, quais sejam: pico 1, pico 2, pico 3 e pico 4. Estes picos TL podem ser mais facilmente identificados após a deconvolução. O procedimento de deconvolução pode ser realizado por métodos computacionais que envolvem o uso de linguagem de programação ou aplicação de *softwares*, tais como; R[®] ou Origin[®].

A acurácia do método usado na deconvolução pode ser avaliada com a análise da Figura de Mérito (FOM), que representa a similaridade entre as curvas experimental e teórica. Alguns autores classificam como “Bom Resultado” um valor de FOM inferior a 2,5% (BALLIAN e EDDY, 1977; KITIS, GOMEZ-ROS e TUYN, 1998).

Figura 2.6 – Exemplo de deconvolução em uma curva de intensidade TL



Fonte: Adaptado de Kitis, Gomez-Ros e Tuyn (1998).

O tempo de permanência dos elétrons nas armadilhas (t) pode ser determinado pelo modelo matemático proposto na Equação 2.10 (MCKEEVER, 1985; CHEN E MCKEEVER, 1997).

$$t = s^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (2.10)$$

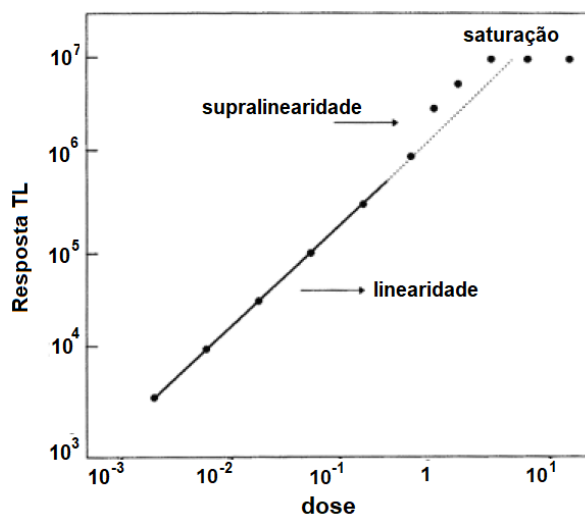
Mahesh, Weng e Furetta (1989) ressaltam que os materiais investigados com finalidades dosimétricas devem apresentar uma certa estabilidade do pico TL em

temperatura ambiente (entre 20 e 25 °C) com o decorrer do tempo. Isso porque o decaimento do sinal TL pode ocorrer por várias causas, principalmente, se o material for armazenado na presença da luz ou do calor. O decaimento do sinal TL, que também é conhecido como desvanecimento ou *fading*, pode acontecer de forma anômala, sendo mais importante para o estudo dosimétrico o desvanecimento térmico.

2.4 Propriedades dos dosímetros TL

Muitos materiais TL apresentam uma proporcionalidade entre a quantidade de luz emitida e dose absorvida de radiação ionizante (BOS, 2001). Em alguns casos, a resposta TL cresce inicialmente de forma linear com a dose, sendo observado posteriormente um comportamento de supralinearidade, seguido da saturação, como ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Curva de resposta TL em função da dose de radiação



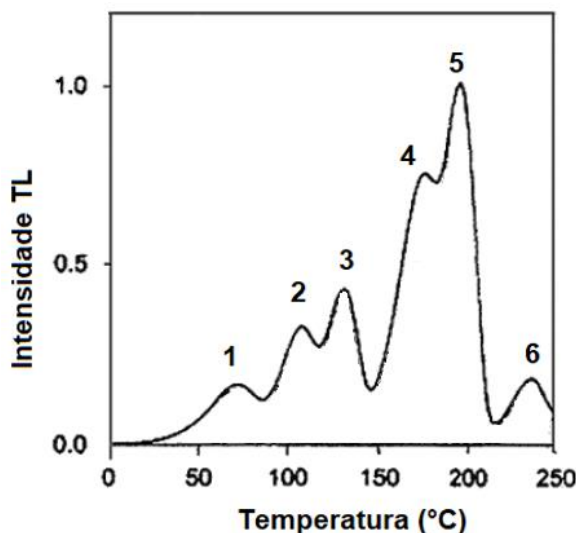
Fonte: adaptado de Campos (1998).

A curva de resposta TL pode ser construída a partir de outra curva, denominada de curva de intensidade TL. Neste caso, o valor da intensidade máxima do pico TL é investigado em função da dose absorvida pelo dosímetro.

A curva de intensidade TL é uma das principais características de um dosímetro. Esta propriedade corresponde a luz emitida em função da temperatura de aquecimento, conforme abordado anteriormente. Em alguns casos, a curva de intensidade TL também pode ser estudada em função do tempo de aquecimento. Geralmente, a curva de intensidade TL é constituída por vários picos. Cada um deles

está associado a uma determinada armadilha (que pode ser de elétrons ou buracos) de profundidade correspondente a uma energia de ativação (E). Além disso, os picos TL também são caracterizados pelo valor da temperatura onde ocorre o máximo de emissão de luz. Uma representação ilustrativa da curva de intensidade TL para o dosímetro comercial TLD-100 (LiF:Mg,Ti) está apresentada na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Curva de intensidade TL em função da temperatura



Fonte: adaptado de Campos (1998).

Em resumo, o surgimento dos picos TL está relacionado com a probabilidade de escape dos elétrons e recombinação nos centros de buracos. Isto significa que, quando o material TL é aquecido em baixas temperaturas, poucos portadores de carga (elétrons ou buracos) serão liberados, e a luz emitida será fraca. Por outro lado, se o material TL for aquecido em temperaturas mais altas, a probabilidade de escape dos portadores de carga aumenta, ocasionando um aumento na intensidade de luz, que será máxima na temperatura do pico TL. Em seguida, a intensidade TL deverá diminuir devido à redução de portadores de carga nas armadilhas.

Na introdução deste relatório de pesquisa foram mencionadas algumas propriedades requeridas aos dosímetros TL. Certamente, é muito difícil encontrá-las todas em um único material TL, seja ele natural ou sintético. Conforme comentado, na natureza são encontrados alguns materiais com propriedades passíveis de uso na dosimetria. Entre os materiais cerâmicos se destacam: óxido de berílio (BeO); óxido de alumínio (Al_2O_3) e fluoreto de cálcio ou fluorita (CaF_2). Entretanto, a possibilidade de

adição de impurezas (dopantes) para a criação de armadilhas e centros luminescentes possibilita a produção de um grande número de dosímetros TL comerciais.

Os dosímetros TL mais conhecidos produzidos em laboratório são: fluoreto de lítio dopado com magnésio e titânio (LiF:Mg,Ti); fluoreto de lítio dopado com magnésio, fosforo e cobre (LiF:Mg,P,Cu); fluoreto de cálcio dopado com manganês ($\text{CaF}_2\text{:Mn}$); fluoreto de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaF}_2\text{:Dy}$); sulfato de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$); sulfato de cálcio com manganês ($\text{CaSO}_4\text{:Mn}$); tetraborato de lítio com manganês ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$); tetraborato de lítio dopado com cobre ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$) e tetraborato de magnésio dopado com disprósio ($\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy}$) (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; BOS, 2001). Estes materiais reúnem características dosimétricas especiais que serão definidas a seguir:

(a) Resposta TL com a dose - A resposta TL com a dose pode ser definida como uma dependência funcional da intensidade da resposta TL em função da dose de radiação absorvida. É desejável que o dosímetro apresente uma resposta TL linear para uma ampla faixa de dose.

(b) Sensibilidade TL - A sensibilidade de um material TL pode ser compreendida como a intensidade do sinal TL emitido por unidade de dose de radiação absorvida. Nos procedimentos laboratoriais utiliza-se a sensibilidade TL relativa, ou seja, o sinal TL do material TL é comparado com a resposta TL do dosímetro comercial TLD-100.

(c) Resposta TL com a energia - A resposta TL com a energia pode ser compreendida como sendo a variação do sinal TL para uma determinada dose obtida com diferentes energias de fótons. Essa variação é muito dependente da interação da radiação com o material TL, ou seja, a resposta TL obtida com uma determinada dose de raios γ não será a mesma para uma mesma dose ministrada com raios X.

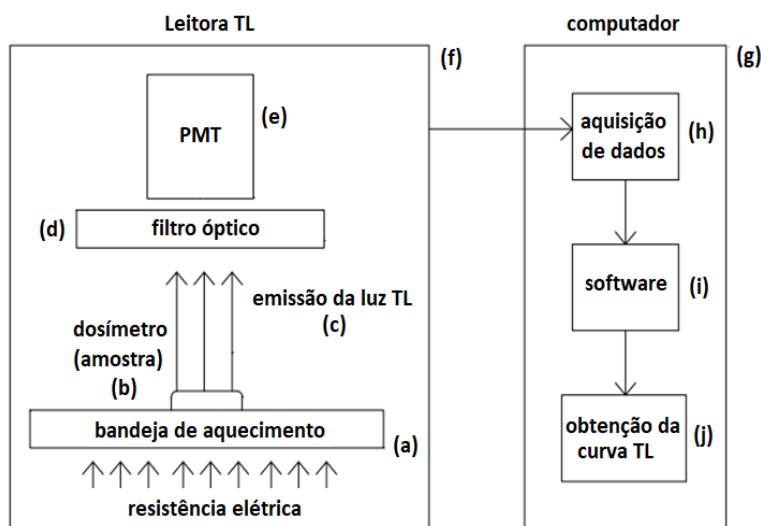
(d) Reuso – Uma das principais vantagens no uso dos materiais TL consiste na possibilidade de reutilização por longos períodos sem a perda de suas propriedades dosimétricas. Existem vários tratamentos térmicos pré-estabelecidos pelos fabricantes e específicos para cada material TL. Os tratamentos térmicos são realizados para eliminar sinais remanescentes da exposição à dose, permitindo, em seguida, a sua reutilização.

(e) Desvanecimento do sinal TL – O desvanecimento TL pode ser definido como sendo o decaimento da amplitude do sinal TL com o tempo decorrido após a exposição da dose. Este decaimento, também conhecido como *fading*, pode ser ocasionado por temperatura, exposição à luz, ou por outros fatores desconhecidos (*fading* anômalo).

2.4.1 Leitura dos dosímetros TL e suas aplicações

Campos (1998) esclarece de forma simples a instrumentação necessária para se observar o fenômeno da termoluminescência emitida pelos dosímetros. As leitoras TL são constituídas basicamente de um dispositivo para aquecer o dosímetro e uma fotomultiplicadora para captar a luz por ele emitida. Em alguns casos, podem ser utilizados filtros que permitem a passagem de comprimentos de ondas específicos e eliminam a influência da emissão de luz infravermelha proveniente da bandeja de aquecimento. Na Figura 2.9 encontra-se um esquema do sistema de leitura TL.

Figura 2.9 – Esquema simplificado do sistema de leitura TL



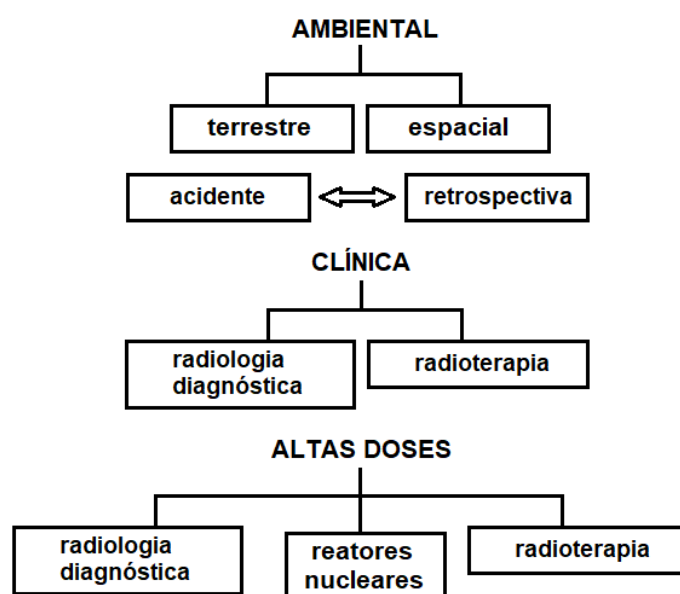
Fonte: adaptado de Campos (1998).

As aplicações dos dosímetros TL se expandem cada vez mais nas áreas da saúde, ciências biomédicas, proteção radiológica, monitoramento, e datação geológica e arqueológica. Na Figura 2.10 estão sumarizadas algumas das áreas de aplicações da dosimetria termoluminescente. A faixa de doses para aplicação dos dosímetros TL pode variar entre 10^{-6} a 10^3 Gy. O Gray é a unidade da grandeza dosimétrica utilizada para dose absorvida, enquanto que o Sievert (Sv) é a unidade utilizada para dose equivalente. Estas unidades quantificam a energia depositada (em um material ou um órgão humano)

por unidade de massa, sendo: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; CAMPOS, 1998).

Segundo Mahesh, Weng e Furetta (1989) e Campos (1998), a dosimetria ambiental é aplicada nos arredores das instalações radioativas e nucleares com o intuito de monitorar a liberação de gases e efluentes radioativos das instalações. Neste caso, o objetivo principal é monitorar a dose de radiação recebida pela população que reside ou trabalha nas proximidades das instalações. Se o objetivo for o monitoramento do local de trabalho, ou seja, dentro das instalações radioativas, utiliza-se a dosimetria de área.

Figura 2.10 – Áreas de aplicação da dosimetria TL



Fonte: adaptado de Campos (1998).

Campos (1998) relata que, com o aumento das viagens espaciais, surgiu a necessidade do monitoramento da radiação que os astronautas estão expostos. Este procedimento é chamado de dosimetria espacial. Por outro lado, o controle das doses nas práticas médicas como radiologia e radioterapia é chamado de dosimetria clínica (KRON, 1994; MCKEEVER, MOSCOVITCH e TOWNSEND, 1995).

McKeever, Moscovitch e Townsend (1995) e Campos (1998) destacam que, após eventos ou acidentes radioativos, como os ocorridos em Hiroshima e Nagasaki (Japão, 1945); Chernobyl (antiga União Soviética, 1986) e Goiânia (Brasil, 1987), surgiu a necessidade da dosimetria de acidente e dosimetria retrospectiva. Para estas dosimetrias são utilizados materiais TL naturais, disponíveis no local do acidente, para a estimativa da dose no momento do acidente. Assim, materiais TL como quartzo,

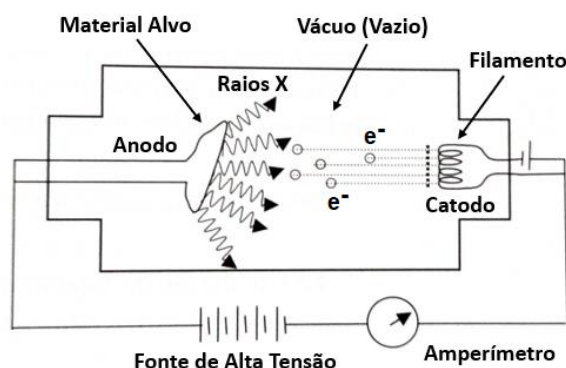
feldspato e alumina (ambos presentes em tijolos, telhas e outros materiais cerâmicos), além da presença da hidroxiapatita (extraída de ossos e dentes) e do carbonato de cálcio (extraído da casca de ovos, conchas, açúcar e concreto), podem ser utilizados para a determinação da dose.

2.4.2 Raios X e dosimetria TL para radiodiagnóstico

Okuno e Yoshimura (2010) relembram no contexto histórico que o físico, Wilhelm Conrad Röntgen, empenhou-se na descoberta da natureza dos raios X, os quais se propagam com velocidade da luz, e, como qualquer radiação eletromagnética, estão sujeitos aos fenômenos de refração, difração, reflexão, polarização e atenuação. Os raios γ emitidos espontaneamente pelos núcleos aos átomos radioativos são de natureza física igual aos raios X. Conclui-se então que os raios X e γ são ondas eletromagnéticas de frequência extremamente alta. A principal diferença entre estas radiações está na origem e produção, pois os raios X são originados fora do núcleo dos átomos, enquanto que os raios γ são provenientes do núcleo e da aniquilação de partículas.

Para tentar explicar de forma simples a origem e produção dos raios X, Okuno e Yoshimura (2010) propõem o esquema representativo da Figura 2.11. Este esquema consiste em um tubo de emissão de raios X, cujo filamento (catodo) quando atravessado por uma corrente elétrica gera calor.

Figura 2.11 – Representação dos componentes constituintes de um tubo de raios X



Fonte: adaptado de Okuno e Yoshimura (2010).

Depois de aquecido, o filamento emite elétrons pelo efeito termoiônico que são acelerados em direção ao material alvo (ânodo), devido a diferença de potencial existente entre estes eletrodos. Nos procedimentos de radiologia, em geral, as tensões

podem variar entre 30 e 150 kV. Quando os elétrons atingem o material alvo (material com alto ponto de fusão: molibdênio, tungstênio), eles sofrem uma desaceleração brusca, sendo a energia cinética convertida na maior parte em calor e também em raios X, por meio de um fenômeno chamado de *Bremsstrahlung*. Detalhes mais aprofundados sobre as partes integrantes do equipamento principiam e produção dos raios X, podem ser consultados em Okuno e Yoshimura (2010) e Tilly Jr. (2010).

Para observar as imagens radiográficas de um corpo material para fins de diagnósticos, os raios X transmitidos através deste corpo são, atualmente, o tipo de radiação mais utilizada nas radiografias convencionais e tomografias computadorizadas. Neste caso, algumas medidas devem ser tomadas referentes a proteção radiológica. Isto porque em uma exposição, os raios X são produzidos em todas as direções a partir da superfície do anodo, existindo uma pequena quantidade de radiação, chamada de radiação de fuga, que atravessa a blindagem protetora de chumbo do equipamento de raios X (OKUNO e YOSHIMURA, 2010; TILLY JR., 2010).

No que se refere especificamente sobre as técnicas radiográficas para mamografia, elas são bastante diferentes em relação às técnicas radiográficas convencionais, já que basicamente são examinados apenas tecidos moles. Os exames de mamografias são geralmente realizados em mulheres sintomáticas de elevado fator de risco ou em mulheres assintomáticas, cujo o intuito é detectar precocemente o câncer de mama. Este tipo de exame é chamado de mamografia de rastreamento, onde são realizados duas ou três de cada mama (TILLY JR., 2010).

Tilly Jr. (2010) ressalta que, como os tecidos mamários não atenuam fortemente o feixe de raios X, podem ser utilizados feixes de baixa energia (com até 40 kV) favorecendo a absorção diferencial nos tecidos, sendo possível distinguir tecidos mamários normais e anormais. Por meio do exame de mamografia é possível identificar, em um mesmo filme radiográfico, desde calcificações com altos contrastes, até regiões de tecido com pouco contraste, o que facilita o diagnóstico médico.

Considerando os conceitos dosimétricos, a radiação ionizante é potencialmente danosa para o corpo humano, bem como para todos os outros meios biológicos. As informações disponibilizadas por Tahuata *et al.* (2003) e Okuno e Yoshimura (2010), reforçam a afirmativa de Tilly Jr. (2010), de que, embora a radiação ionizante seja danosa para o corpo humano, por outro lado, os benefícios decorrentes do diagnóstico obtido com o auxílio radiológico são inegáveis, pois contribui para a melhora da saúde

de milhões de pessoas em todo o mundo. Logo, a exposição de pessoas a radiação deve receber um cuidado especial.

Na prática, os procedimentos que envolvem o uso das radiações ionizante devem alcançar um equilíbrio entre a menor dose de radiação e a melhor imagem possível, representada pela maior quantidade de informações disponível e uma radiografia. Segundo Tahuata *et al.* (2003) e Tilly Jr. (2010), a quantidade de energia que a radiação transfere para o corpo material, principalmente, na forma de energia cinética dos elétrons, é chamada de dose. Entretanto, este conceito na dosimetria pode ter vários significados diferentes, dependendo do local em que a dose foi medida ou em função do risco biológico do indivíduo exposto a radiação. Na Figura 2.12 encontra-se alguns parâmetros e tipos dose, segundo os conceitos da dosimetria de raios X.

Figura 2.12– Conceitos usuais para dosimetria de raios X



Fonte: adaptado de Tilly (2010).

A qualidade do feixe primário de raios X está relacionada com a capacidade de penetração do feixe, representada, sobretudo, pela camada semiredutora que caracteriza o feixe de radiação. De maneira geral, são considerados dois tipos de qualidades para a metrologia de radiodiagnóstico, quais sejam: leves e pesadas. As qualidades leves são aquelas utilizadas para simular feixes de radiação que incidem diretamente sobre a superfície da pele de um paciente durante a realização de um exame radiológico convencional. Por outro lado, as qualidades chamadas de pesadas são aquelas utilizadas para simular os feixes de radiação que atravessam o paciente.

As qualidades específicas (RQR) para alguns feixes primários de raios X, bem como suas características em função dos valores da tensão (kV) no tubo de raios X, energia média (keV) e primeira camada semi-redutora do filtro de alumínio em milímetros (1ª CSR), estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros de qualidade dos feixes de raios X simulados para aplicações em radiologia e mamografia

Qualidade de radiação	Tensão (kV)	Energia média (keV)	1ª CRS (mm de Al)
RQR M1	25	15,3	0,28
RQR M2	28	16,1	0,31
RQR M3	30	16,8	0,33
RQR M4	35	17,7	0,36
RQR 5	70	40,5	2,58
RQR 8	100	51,6	3,97

Fonte: *apud* Filho, Silveira e Caldas (2020)

Em radiodiagnóstico, a grandeza fundamental que os padrões nacionais são calibrados é o kerma no ar. Nos exames convencionais de raios X utiliza-se o kerma no ar incidente e kerma no ar na entrada da superfície (ICRU, 2005). O kerma no ar, ilustrado na figura como dose no ar, é uma medida de energia que o feixe de raios X deposita no ar. A unidade no sistema internacional de medidas (S.I) para a dose no ar e para a dose de entrada no paciente é o Gy. No passado, a unidade utilizada para dose absorvida era o Rad (10^{-2} J/kg). É importante destacar que o Gy é uma unidade utilizada para medir a dose absorvida de radiação, mas quando se trata de medir os danos biológicos da radiação para cada tipo de tecido utiliza-se o Sv, conforme abordado anteriormente.

Dose absorvida (D) é uma grandeza utilizada para todos os tipos de radiação e para qualquer tipo de material absorvedor. Por outro lado, a dose equivalente (H) é utilizada para estimar os danos biológicos, considerando o tipo de radiação e a energia e a distribuição da radiação no tecido humano. Logo, a dose equivalente é calculada por meio da Equação 2.11, considerando os dados da Tabela 2.2 (TAUHATA *et al.* 2003).

$$H = D \times Q \quad (2.11)$$

Em que:

H = dose equivalente (Sv); D = dose absorvida (Sv); Q = valor para o tipo de radiação

Tabela 2.2 – Valores adotados para o cálculo da dose equivalente

Tipo de radiação	Valor de Q
raios X, γ , partícula β , elétrons	1
nêutrons rápidos e prótons	10
partículas α e íons pesados	20

Fonte: adaptado de Tauhata *et al.* (2003).

A dose efetiva (He) é a dose recebida em cada parte do corpo humano multiplicada por um fator de ponderação, conforme expresso na Equação 2.12. Este procedimento é utilizado para minimizar os riscos dos efeitos estocásticos, que estão associados a probabilidade de ocorrência câncer e seus efeitos hereditários. Os diversos órgãos e tecidos do corpo humano possuem diferentes sensibilidades a doses de radiação. Por este motivo foram estabelecidos valores de ponderação que consideram as diferenças radiobiológicas entre tecidos. Os valores de ponderação também são chamados de peso para órgãos e tecidos (W_T). Estes valores estão apresentados na Tabela 2.3 e dependem do conhecimento prévio da Radiobiologia, sendo reavaliados de tempos em tempos.

$$He = \sum W_T \cdot H \quad (2.12)$$

Em que:

He = dose efetiva (Sv); W_T = valor de ponderação; H = dose equivalente (Sv)

Tabela 2.3 – Valores de ponderação para órgãos do corpo humano

Órgão	Valor de W_T
Gônadas	0,25
Mamas	0,15
medula óssea	0,12
pulmão	0,12
tireoide	0,03
Osso	0,03
restante do corpo	0,06

Fonte: adaptado de Tauhata *et al.* (2003).

A dose de entrada é geralmente medida no ar, no eixo central do feixe primário, campo, mas sem a presença do paciente. Ela também pode ser determinada utilizando objetos que simulem a presença do paciente (fantomas). Neste caso, o resultado da medida, obtido por meio da Equação 2.13, será maior, pois inclui a radiação retroespalhada devido à presença do paciente ou fantoma no feixe primário. A dose de entrada também é conhecida como dose de entrada na pele ou dose de entrada na superfície (TILLY JR., 2010).

$$Dp = De + RE \quad (2.13)$$

Em que:

Dp = dose de entrada na pele (Gy); De = dose de entrada (Gy); RE = radiação retroespalhada (Gy)

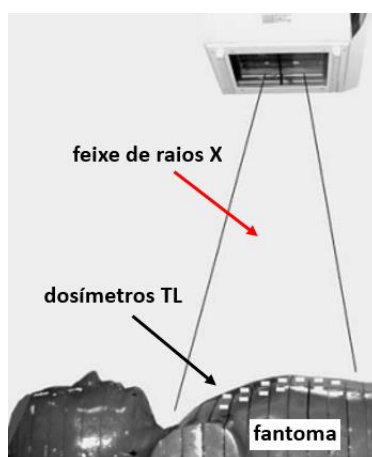
A dose de saída é a medida de dose que atravessou o fantoma ou paciente, sendo utilizada para avaliação da imagem radiográfica. Já a dose do receptor de imagem é aquela que atinge o filme radiográfico, o tubo intensificador de imagem ou o detector digital do sistema radiográfico (OKUNO e YOSHIMURA, 2010). A dose do receptor de imagem é geralmente menor que a dose de saída, tendo em vista que a radiação diminui pela absorção dos objetos dispostos atrás do corpo do paciente, como por exemplo, a grade antidifusora, a mesa de exames e a tampa do chassi radiográfico.

Para a determinação do kerma no ar na superfície do paciente podem ser utilizados dois métodos, um direto e outro indireto. No método direto, o kerma no ar na superfície do paciente pode ser determinado utilizando a resposta TL de dosímetros

comerciais, tais como; o TLD-100 (LiF:Mg,Ti) e o TLD-800 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), que são posicionados na superfície do paciente durante a exposição aos raios X. Logo, o valor do kerma será o produto entre a resposta TL e o fator de calibração, equivalente a qualidade do feixe de raios X (ICRU, 2005).

No método indireto, o kerma no ar na superfície também pode ser determinado por meio do posicionamento de dosímetros TL sobre fantasmas constituídos de água ou poliestireno, ou ainda, de materiais com número atômico efetivo equivalente aos tecidos e órgãos humanos. Os fantasmas antropomórficos são utilizados para auxiliar na determinação da dose em diversas partes do corpo do paciente, conforme ilustrado na Figura 2.13 (DAMILAKIS *et al.*, 2003).

Figura 2.13 – Exemplo de fantoma antropomórfico para medidas de kerma



Fonte: adaptado de Damilakis *et al.* (2003).

É importante destacar que os dosímetros comerciais TLD-100 e TLD-800 são os mais utilizados para dosimetria em radiodiagnóstico. Isto porque eles possuem uma combinação de propriedades dosimétricas requeridas, tais como; variação desprezível da resposta TL para diferentes energias (baixa dependência energética), alta sensibilidade para baixas doses, baixo desvanecimento e número atômico efetivo próximo aos tecidos humanos (ICRU, 2005). Por outro lado, poucos estudos foram realizados com o quartzo natural sensibilizado em aplicações dosimétricas de feixes de raios X para mamografia (CARVALHO *et al.* 2011).

3. TECNOLOGIAS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

3.1 Características dos discos de quartzo-teflon

Para a realização deste trabalho foram utilizados discos de quartzo particulado na faixa de granulométrica 75x150 μm prensados com teflon. Estes discos foram previamente produzidos e caracterizados no estudo realizado por Carvalho *et al.* (2012). A partir de um lote contendo 32 discos de quartzo-teflon, foram selecionados para este trabalho os 20 discos que apresentaram maior reprodutibilidade do sinal TL.

A seleção dos discos ocorreu com base em dois critérios simultâneos estabelecidos por Carvalho *et al.* (2012) para o estudo das propriedades dosimétricas de discos de quartzo prensados com teflon. Como primeiro critério, foram escolhidos os discos que apresentaram reprodutibilidade do sinal TL com valor de variância em torno da média geral ($\bar{X}$) menor do que 9%. Em seguida, foram selecionados os discos que apresentaram valor médio do sinal TL dentro do intervalo da média geral mais ou menos o desvio-padrão ($\bar{X} \pm 1s$). Na Figura 3.1 encontra-se uma imagem dos 20 discos selecionados. Em média, a massa, o diâmetro e a espessura são $48,75 \pm 1,28$ mg, $6,01 \pm 0,05$ mm e $0,98 \pm 0,04$ mm, respectivamente. A massa dos discos foi verificada usando uma balança analítica e as dimensões foram aferidas com o auxílio de um parquímetro digital, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.1 - Discos de quartzo-teflon selecionados para este estudo



Fonte: elaborada pela autora

Figura 3.2 - Discos de quartzo-teflon: (a) pesagem dos discos e (b) aferição do diâmetro



Fonte: elaborada pela autora

A seta em vermelho indica a posição do disco sobre a balança no momento da pesagem. Os discos produzidos por Carvalho *et al.* (2012) apresentam proporção em massa de 50% de quartzo particulado na faixa granulométrica 75x150 mm para 50% de teflon granulado. Isto significa dizer que no processo de fabricação dos discos por prensagem mecânica, estas proporções são: 25 mg de quartzo para 25 mg de teflon.

É importante destacar que os discos de quartzo-teflon foram sensibilizados com alta dose de radiação γ (25 kGy- ^{60}Co) e três tratamentos térmicos consecutivos a 400° C durante 1 hora. Este procedimento de sensibilização favorece o surgimento de um pico TL próximo a 300 °C para baixas doses, ou seja, da ordem de miligray (mGy). Mais detalhes sobre o processo de sensibilização do quartzo natural podem ser encontrados em Khoury *et al.* (2007), Khoury *et al.* (2008) e Carvalho (2010).

3.2 Propriedades dosimétricas dos discos de quartzo-teflon

3.2.1 Curva de intensidade TL (*Glow curve*)

No estudo realizado por Carvalho *et al.* (2012), as propriedades dosimétricas dos discos de quartzo foram investigadas com exposição à radiação γ , proveniente de fontes radioativas de cobalto 60 (^{60}Co) e Césio 137 (^{137}Cs). Entretanto, no presente trabalho, as propriedades dosimétricas foram estudadas após a exposição dos discos a um feixe de raios X para mamografia. A exposição aos raios X foi realizada no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes, situado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (LMRI/DEN/UFPE).

A qualidade de radiação utilizada seguiu o padrão ISO/IEC 4037-1 para equipamento de raios X Pantak, cujos parâmetros da condição LMRI - ISO N20 do referido laboratório de metrologia foram: a) tensão de 28 kV; b) energia média do feixe de 16 keV; c) camada semi-redutora de alumínio de 0,32 mm (CSR = 0,32 Al); d) taxa de Kerma no ar de 14,65 mGy/h (determinada a 3 m do ponto focal do feixe).

As curvas de intensidade TL em função da temperatura de aquecimento foram obtidas com uma leitora TL Harshaw-Bicron M3500, equipada com uma foto multiplicadora Hamamatsu R6094. Para a aquisição dos dados foi utilizado o *software* Net-Rems, que é do mesmo fabricante da leitora TL. Os dados foram obtidos no formato .asc, sendo convertidos para o editor de planilhas Microsoft Excel[®] e, posteriormente, analisados com o programa Origin8.0[®].

As leituras TL dos discos de quartzo foram realizadas 1 hora após o procedimento de irradiação com raios X. Os parâmetros de leitura foram: modo de aquecimento rampa, intervalo de temperatura entre 100 e 400 °C, taxa de aquecimento de 5 °C/s e doses entre 3,24 e 20,60 mGy. Neste trabalho, foi adotado o termo kerma no ar como dose. Para cada dose foi obtida uma curva de intensidade TL média a partir da leitura de 3 discos de quartzo-teflon. Uma imagem do disco de quartzo sendo posicionado sobre a bandeja da leitora TL Harshaw-Bicron está apresentada na Figura 3.3. No posicionamento para a leitura TL, os dosímetros podem ser manipulados com pinça ou com sugador odontológico.

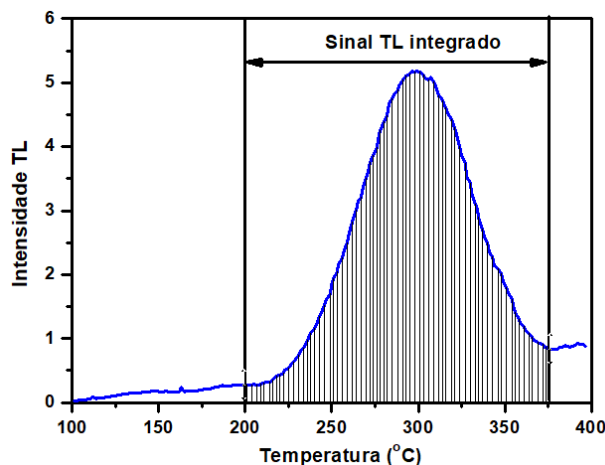
Figura 3.3 – Leitora TL Harshaw-Bicron, modelo M3500



Fonte: Thermo Fisher Scientific. Disponível em:
<<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/3500TLDDS3>>.
Acesso em: 18 de dez. de 2022.

Na Figura 3.4 encontra-se uma representação da curva de intensidade TL característica para o disco de quartzo-teflon exportada para o programa Origin8.0[®]. Nesta figura, as medidas de interesse correspondem ao sinal TL integrado da região de leitura compreendida entre 200 e 375 °C. Esta região foi escolhida para estabelecer os limites do pico TL após a leitura do disco de quartzo. A intensidade TL medida na leitora é representada de forma adimensional ou em unidade arbitrária (u.a.). Ressalta-se ainda que as leituras TL foram feitas uma hora após os discos de quartzo terem sido irradiados, realizando sempre a leitura TL da face irradiada do disco.

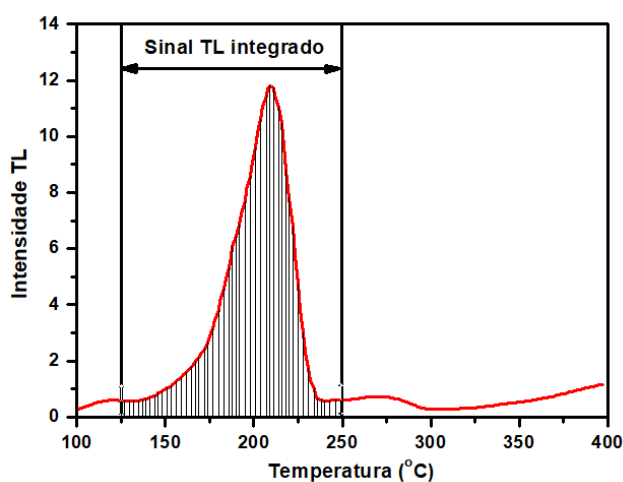
Figura 3.4 – Representação da curva de intensidade TL para o disco de quartzo-teflon com sinal TL integrado na região entre 200 e 375°C



Fonte: elaborada pela autora

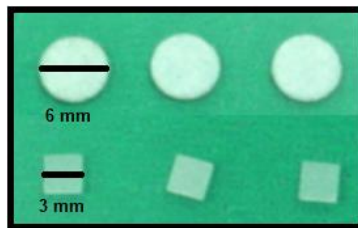
Para realizar uma análise comparativa de sensibilidade à dose, também foram irradiados juntos com os discos, dosímetros comerciais TLD-100 (LiF:Ti,Mg) da Harshaw, com massa de 24 mg e dimensões aproximadas de 3 mm x 3 mm e espessura de 1 mm. Neste caso, para os dosímetros comerciais TLD-100 o sinal TL foi integrado no intervalo compreendido entre 125 e 250 °C, onde encontra-se situado o pico TL. A região de integração está representada na Figura 3.5. Uma imagem ilustrativa dos discos de quartzo e dos dosímetros TLD-100 está apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.5 – Representação da curva de intensidade TL para o dosímetro TLD-100 com sinal TL integrado na região entre 125 e 250 °C



Fonte: elaborada pela autora

Figura 3.6 – Discos de quartzo com teflon com diâmetro aproximado de 6 mm e dosímetros TLD-100 com dimensões de 3 mm x 3 mm



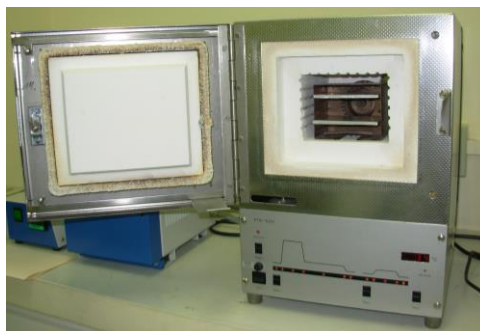
Fonte: imagem cedida pelo grupo GDOIN/LMRI/UFPE

3.2.2 Reprodutibilidade do sinal TL

A reprodutibilidade dos discos foi avaliada repetindo 4 vezes o procedimento de irradiação e leitura TL, sendo calculados para cada disco o valor médio das leituras e os respectivos desvios-padrão. A dose de 9,72 mGy foi escolhida por representar um valor intermediário entre as doses utilizadas para a obtenção das curvas TL. Antes de cada irradiação, os discos foram tratados termicamente com o intuito de eliminar a presença de sinais TL remanescentes. Para isso, os discos foram acondicionados entre duas bandejas de alumínio e colocados em um forno PTW do tipo mufla, específico para o tratamento térmico dos dosímetros TLD-100 (Figura 3.7). O ciclo térmico do forno PTW possui dois patamares de temperatura. O primeiro a 400 °C durante 1 hora e o segundo a 100 °C durante 2 horas.

Depois do tratamento térmico foram realizadas as leituras TL dos discos e dos dosímetros TL-100 para verificação da eficiência do tratamento. Este procedimento é conhecido como leitura do branco. O valor do branco foi subtraído da leitura TL obtida de cada amostra irradiada (disco e TLD-100). Depois de subtrair o valor do branco a resposta TL foi normalizada em relação à massa dos discos.

Figura 3.7 – Forno PTW utilizado para o tratamento térmico das amostras



Fonte: imagem cedida pelo LMRI/UFPE

Para o estudo da reprodutibilidade da resposta TL foi utilizada uma leitora TL Victoreen 2800M, no modo de aquecimento *step*, com os seguintes parâmetros de leitura: a) 1ª rampa (primeira região): aquecimento entre 20 e 200 °C, em 10 segundos; b) 2ª rampa (segunda região): aquecimento entre 200 e 350 °C, em 25 segundos. Diferente da leitora TL Harshaw-Bicron M3500, a leitora Victoreen 2800M utilizada neste estudo não oferece recursos para exportação dos dados, sendo as informações sobre as leituras TL coletadas diretamente na tela do equipamento. As medidas de interesse para o estudo da reprodutibilidade correspondem ao sinal TL apresentado na segunda região de leitura. Na Figura 3.8 encontra-se ilustrada uma curva de intensidade TL para os discos quartzo-teflon observada na tela da leitora TL. A área sob a curva foi apresentada na unidade de carga elétrica em nanoCoulomb (nC).

Figura 3.8 – Representação da curva TL para os discos de quartzo-teflon na região de leitura entre 200 e 350°C (tela da leitora TL Victoreen 2800M)



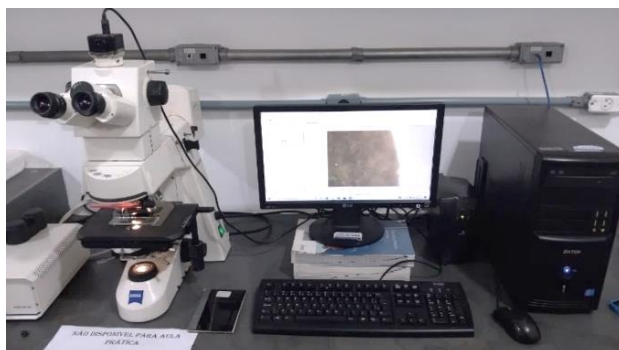
Fonte: imagem cedida pelo orientador.

A reprodutibilidade da resposta TL foi investigada no intervalo correspondente ao valor da média geral (obtido com a leitura TL de 20 discos) mais ou menos 3% ($\bar{X} \pm 3,0\%$). Este procedimento de análise foi adotado no LMRI/DEN/UFPE como critério de aceite dos discos. Em seguida, foi investigada a importância de manter a leitura TL sempre na face irradiada dos discos, tendo em vista sua influência na reprodutibilidade da resposta TL. Para esta etapa foram escolhidos 3 discos de quartzo, cujos valores do desvio-padrão estavam fora do intervalo ($\bar{X} \pm 1,5\%$).

Para investigar a morfologia da superfície dos discos foram realizadas microscopias ópticas. As imagens foram capturadas com o auxílio de um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo axioscope 40, utilizando uma lente objetiva de 20 vezes. O microscópio possui uma câmera acoplada que permite a captura e o tratamento da imagem com o programa computacional imageJ. A estrutura utilizada para captura e

análise das microscopias está apresentada na Figura 3.9. Esta etapa da pesquisa foi realizada no Laboratório de Química da Universidade Estadual de Montes Claros - MG.

Figura 3.9 – Sistema utilizado para microscopia óptica nos discos de quartzo



Fonte: própria autoria.

3.2.3 Estabilidade da resposta TL

A estabilidade da resposta TL em função do tempo de armazenamento (também chamada de desvanecimento do sinal TL) foi avaliada nos discos de quartzo. Para isso, os discos foram irradiados com dose 9,72 mGy e, em seguida, envolvidos em um filme de plástico preto para permanecerem estocados na ausência da luz natural e artificial. O local de armazenagem dos discos apresentava temperatura ambiente em torno de $22,0\text{ °C} \pm 1,3\text{ °C}$ e umidade relativa do ar de aproximadamente $47,3\% \pm 1,5\%$. Para aferir a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, foi utilizado um termo-higrômetro digital, da marca HIGHMED. Os discos de quartzo foram avaliados de três em três, sendo as leituras TL realizadas no período de 1, 7, 14, 21, 30, 45 e 60 dias.

3.2.4 Resposta TL em função da dose

Para verificar o comportamento da resposta TL em função da dose, três discos e três dosímetros comerciais TLD-100 foram utilizados para cada dose, sendo calculados os valores médios das leituras na região de integração do sinal TL e seus respectivos desvios-padrão. Nesta etapa, buscou-se realizar uma análise comparativa entre as curvas de resposta TL obtidas por meio do sinal TL integrado e com o valor médio da intensidade do pico TL. Para isso, as medidas TL foram realizadas com a leitora TL Harshaw-Bicron M3500, tendo em vista a possibilidade de aquisição dos dados para análise da intensidade máxima do pico TL com o programa Origin8.0[®].

3.2.5 Determinação do tempo de vida útil do pico TL

Para calcular o tempo de vida útil do pico TL dos discos foi utilizado o método da forma do pico, conforme o procedimento descrito previamente no item 2.3. O método da forma do pico foi realizado antes e depois da deconvolução da curva média de intensidade TL, obtida a partir da leitura de três discos expostos a dose de raios X de 20,60 mGy. As leituras TL foram enviadas para Departamento de Ciências do Mar, da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), onde foi realizada a deconvolução no programa Origin8.0[®]. Para a deconvolução na região compreendida entre 200 e 375 °C, foram utilizadas as equações descritas por Kitis, Gomez-Ros e Tuyn (1998), sendo ajustados matematicamente seis picos com cinética de ordem geral por meio dos parâmetros: Intensidade, Temperatura do Pico, Energia e Ordem de Cinética. Os valores de energia de ativação atribuídos para a simulação dos picos TL variaram entre 1,05 e 1,67 eV. Depois disso, os dados da deconvolução realizada na UNIFESP foram enviados ao PPGMCS/UNIMONTES para análise dos dados.

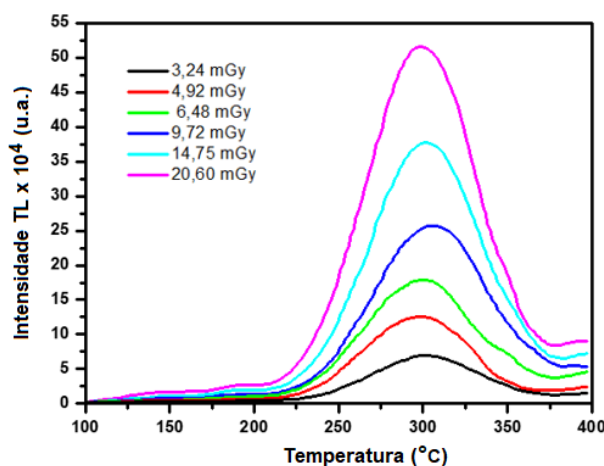
A acurácia do procedimento foi avaliada por meio da Figura de Mérito (FOM). Em seguida, foi identificado um pico TL isolado (pico principal), sendo posteriormente determinado os parâmetros geométricos para o cálculo do tempo de vida útil com a Equação 2.10. O tempo de vida útil foi avaliado na temperatura ambiente de 20 e 25 °C.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

4.1 Análise da curva de intensidade TL

Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas de intensidade TL em função da temperatura para os discos de quartzo. Nesta figura, observa-se um pico TL próximo a 300 °C, que cresce com o aumento da dose de 3,24 para 20,60 mGy. É comum a observação no quartzo natural de um pico TL que se encontra situado na faixa de temperatura compreendida entre 90 e 110 °C. Este conhecido pico TL foi investigado no passado com a finalidade de aplicações nos procedimentos de datação geológica e arqueológica (ZIMMERMAN, 1971; MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989). Entretanto, como a leitura TL dos discos de quartzo ocorreu 1 hora após a exposição aos raios X, o pico TL próximo a 100 °C não é observado devido ao rápido desvanecimento entre as etapas de irradiação e leitura TL. O decréscimo na intensidade do pico TL próximo a 100 °C, logo após a irradiação, evidencia um fenômeno conhecido por desvanecimento anômalo (MCKEEVER, 1985).

Figura 4.1 – Curva de intensidade TL para os discos de quartzo

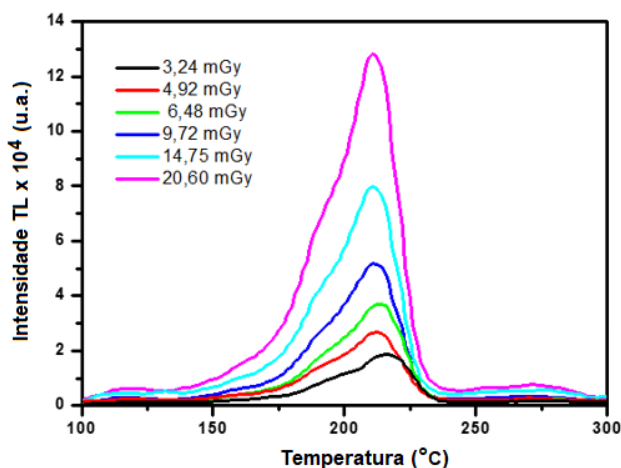


Fonte: resultado da pesquisa.

As curvas de intensidade TL para os dosímetros TLD-100 estão apresentadas na Figura 4.2. Como esperado, a intensidade TL do pico dosimétrico do TLD-100, o qual se encontra próximo a 210 °C, também cresce com o aumento da dose de 3,24 para 20,60 mGy. As propriedades dosimétricas do TLD-100 são bastante conhecidas. Entre elas, destacam-se sua sensibilidade, linearidade da resposta TL e, praticamente, nenhum

desvanecimento do sinal TL é observado no período próximo de um ano (MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; FURETTA, 2003).

Figura 4.2 – Curva de intensidade TL para os dosímetros TLD-100



Fonte: resultado da pesquisa.

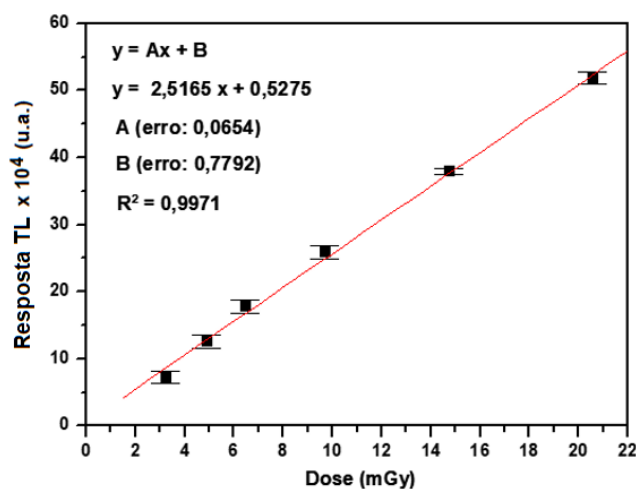
A intensidade do pico TL dos discos de quartzo é maior do que a intensidade do pico TL dos dosímetros TLD-100. Este fato pode ser constatado comparando os valores das intensidades TL nas escalas verticais das Figuras 4.1 e 4.2. Nota-se ainda que as curvas de intensidade TL para os discos de quartzo possuem uma forma mais simples, não sendo observada de forma clara a sobreposições de picos TL na curva.

Segundo alguns autores, uma curva de intensidade TL simples, com alta eficiência de emissão de luz associada ao processo de recombinação, linearidade da reposta TL e um pico TL bem definido na região entre 180 e 400 °C, estão entre os principais requisitos para um dosímetro TL (MCKEEVER, 1985; MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; CAMPOS, 1998). Logo, a partir do resultado apresentado na Figura 4.1, constata-se que os discos de quartzo prensados com teflon atendem a este requisito como dosímetro TL para doses de raios X com feixe de mamografia.

4.2 Resposta TL dos discos de quartzo

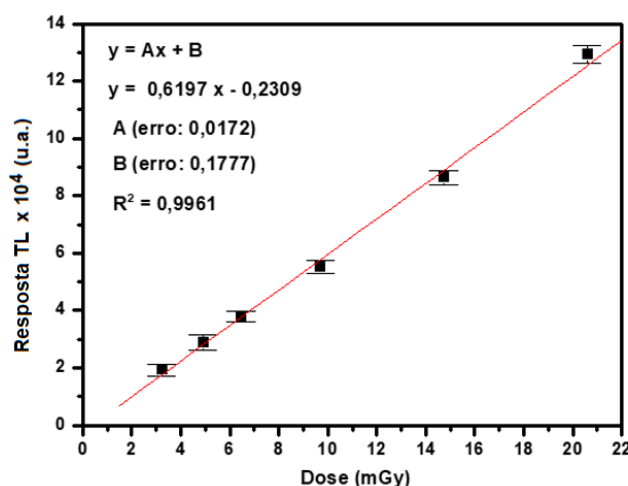
Nas Figuras 4.3 e 4.4 estão apresentadas as variações nas intensidades máximas das respostas TL em função da dose de raios X aplicadas nos discos de quartzo e nos dosímetros TLD-100, respectivamente. Os pontos experimentais nas figuras correspondem à média de três leituras TL e seus respectivos desvios-padrão.

Figura 4.3 – Resposta TL em função da dose para os discos de quartzo



Fonte: resultado da pesquisa.

Figura 4.4 – Resposta TL em função da dose para os dosímetros TLD-100



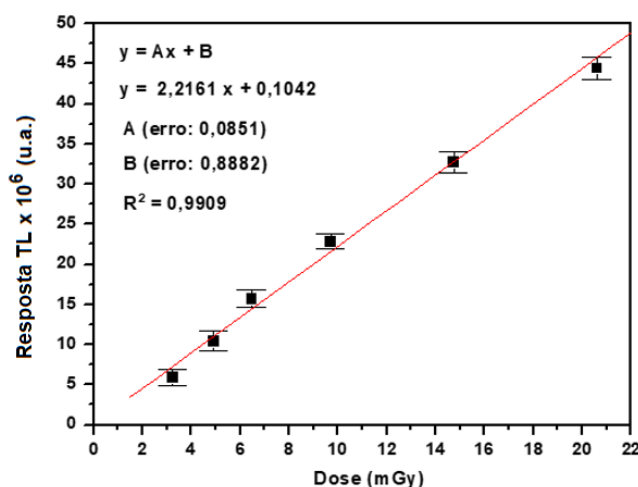
Fonte: resultado da pesquisa.

No resultado da Figura 4.3 nota-se um comportamento linear entre a intensidade do pico TL próximo a 300 °C (apresentado na Figura 4.1) e as doses utilizadas entre 3,24 para 20,60 mGy, conforme pode ser constatado pelo “bom” coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9971$), cujo valor representa a medida de ajuste de um modelo estatístico linear aos pontos experimentais. Este comportamento também é observado na Figura 4.4 para o pico TL próximo a 210 °C dos dosímetros TLD-100, onde o valor encontrado do coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,9961$.

Nos discos de quartzo, a intensidade do sinal TL integrado na região entre 200 e 375 °C (região do pico TL) também foi analisada em função das doses de raios X. De maneira semelhante, este procedimento de análise foi utilizado nos dosímetros TLD-100, mas na região compreendida entre 125 e 250 °C. Assim, os resultados encontrados

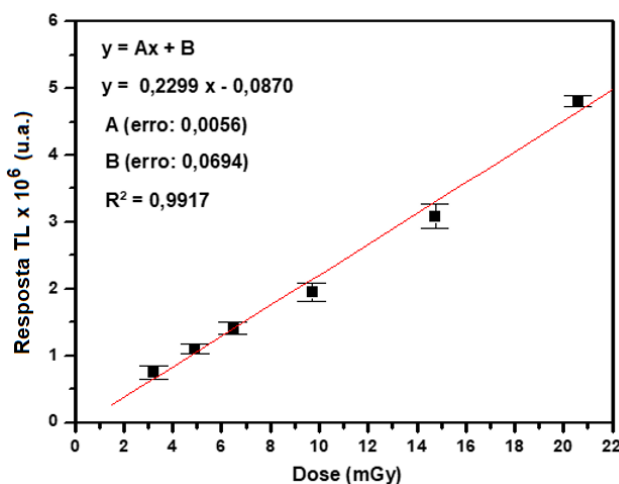
nos discos de quartzo e nos dosímetros TLD-100, atestaram a linearidade do sinal TL em função da dose, conforme observa-se nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Figura 4.5 – Resposta do sinal TL integrado para os discos de quartzo (região integrada entre 200 e 375 °C)



Fonte: resultado da pesquisa.

Figura 4.6 – Resposta do sinal TL integrado para os dosímetros TLD-100 (região integrada entre 125 e 250 °C)



Fonte: resultado da pesquisa.

Na Tabela 4.1 estão sumarizados os valores para os coeficientes de determinação (R^2), angular (A) e linear (B), obtidos a partir das equações reduzidas das retas apresentadas nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. Utilizando a intensidade do pico TL como método de análise, constata-se pela razão entre os coeficientes angulares que os discos de quartzo são cerca de 4 vezes mais sensíveis do que os dosímetros TLD-100. Este resultado pode ser ainda maior quando se utiliza como método de análise o sinal

TL integrado, sendo os discos de quartzo quase 10 vezes mais sensíveis. É importante destacar que a linearidade da intensidade máxima do pico TL pode não ser observada para o pico principal deconvoluído na região entre 200 e 375 °C.

Tabela 4.1 – Coeficientes de determinação (R^2), angular (A) e linear (B) para os discos de quartzo e para os dosímetros TLD-100 irradiados com feixe de raios X

Equação da regressão linear $y = Ax \pm B$	Discos de quartzo (pico TL a 300 °C)			TLD-100 (pico TL a 210 °C)		
Forma de análise	A	B	R^2	A	B	R^2
Intensidade do pico TL	2,5165	0,5275	0,9971	0,6197	0,2309	0,9961
Sinal TL integrado	2,2161	0,1042	0,9909	0,2299	0,0870	0,9917

Fonte: resultado da pesquisa.

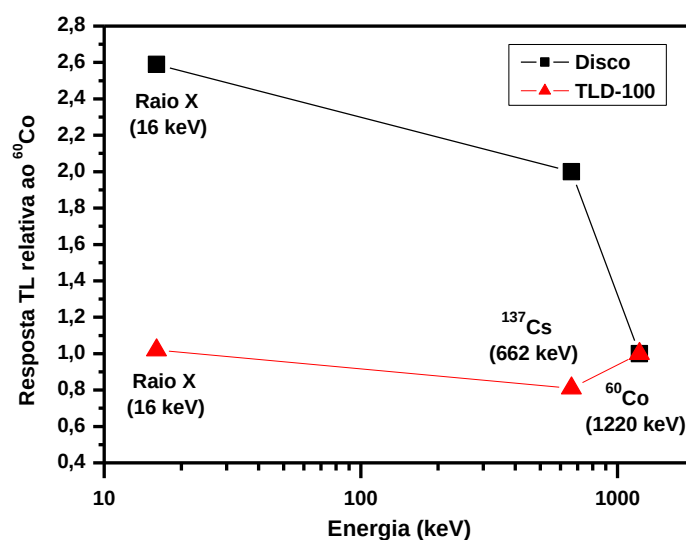
No estudo prévio realizado por Carvalho Jr. (2010) foi constatado que o sinal TL dos discos de quartzo também se apresenta linear ($R^2 = 0,999$) para uma faixa de doses entre 0,5 e 30 mGy, obtida com um feixe de raios γ provenientes de uma fonte de Césio 137 (^{137}Cs). Neste caso, a análise comparativa com os dosímetros TLD-100 revelou que os discos de quartzo são cerca de 1,6 vezes mais sensíveis.

É importante ressaltar que nos discos de quartzo, dependendo do tipo da energia de fótons utilizada, os valores encontrados para os coeficientes angulares podem acarretar diferentes inclinações da reta de ajuste linear aos pontos experimentais (BOS, 2001). Esta dependência do sinal TL em relação à energia de fótons está diretamente relacionada com o número atômico efetivo do quartzo ($Z_{\text{eff}} = 12$), que possui valor intermediário quando comparado com os dos dosímetros TL comerciais (HAN, DELMIR e SAHIN, 2009).

No caso dos dosímetros TLD-100, a inclinação da reta é pouco afetada com a energia dos fótons, estando sua menor dependência energética associada a um número atômico efetivo mais baixo ($Z_{\text{eff}} = 8,3$) e também mais próximo do número atômico efetivo do tecido humano ($Z_{\text{eff}} \cong 7,6$) (MAHESH, WENG e FURETTA, 1989; CAMPOS, 1998; BOS, 2001). Carvalho Jr (2010) realizou uma análise comparativa entre a dependência energética dos discos de quartzo e a dos dosímetros TLD-100. Como resultado, este autor constatou a alta dependência energética dos discos para raios X com energia de fótons entre 16 e 65 keV, enquanto que os TLD-100 apresentaram uma baixa variação da resposta TL para a mesma faixa de energia.

Para demonstrar a dependência energética dos discos de quartzo e dos dosímetros TLD-100, os valores apresentados na Tabela 4.1 para coeficientes angulares foram normalizados em relação aos valores dos coeficientes angulares correspondentes às energias do Césio (^{137}Cs) e Cobalto (^{60}Co), conforme apresentado na Figura 4.7. Neste caso, os valores utilizados dos coeficientes angulares para o Césio e Cobalto foram, respectivamente: disco de quartzo ($A_{\text{cs}137} = 1,253$; $A_{\text{co}60} = 0,972$), TLD-100 ($A_{\text{cs}137} = 0,768$; $A_{\text{co}60} = 0,607$). Estes valores foram encontrados no estudo de Carvalho Jr. (2010), Tabela 5.2; pág. 80.

Figura 4.7 – Relação entre resposta TL e energia



Fonte: resultado da pesquisa.

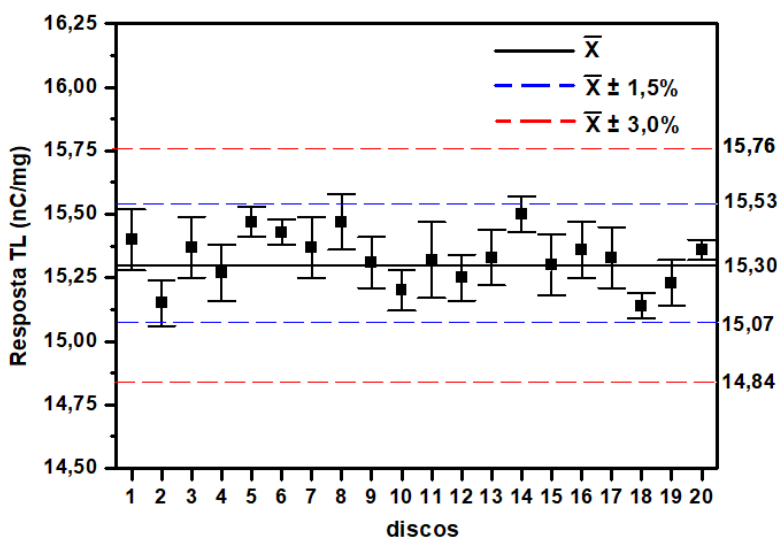
A maior dependência energética dos discos, em relação aos dosímetros TLD-100, não inviabiliza o uso dos discos para dosimetria com feixes de raios X de mamografia. Entretanto, será necessária a utilização de uma curva de resposta TL específica para a energia de 16 keV, bem como para as energias do ^{137}Cs (662 keV) e ^{60}Co (1220 keV).

4.3 Resultado da reprodutibilidade do sinal TL

A reprodutibilidade da resposta TL para o lote de 20 discos de quartzo está apresentado na Figura 4.8. Cada ponto na figura corresponde ao valor médio da resposta TL obtido a partir de quatro ciclos de tratamento térmico, irradiação e leitura TL. A linha contínua central consiste na média geral da resposta TL ($\bar{X}$) (normalizada pela

massa dos discos) e as linhas pontilhadas externas e internas correspondem ao intervalo $\bar{X} \pm 3,0\%$ e $\bar{X} \pm 1,5\%$, respectivamente. Os discos 2, 8 e 14 apresentaram valor de desvio-padrão fora do intervalo $\bar{X} \pm 1,5\%$. Por este motivo, eles foram escolhidos para o estudo da resposta TL em função da leitura da face do disco.

Figura 4.8 – Reprodutibilidade dos discos com dose de 9,72 mGy



Fonte: resultado da pesquisa.

Carvalho Jr. (2010) constatou que os discos de quartzo expostos a dose de 10 mGy- ^{137}Cs , possuem reprodutibilidade da resposta TL no intervalo aproximado de $\bar{X} \pm 10\%$. Logo, este resultado confirma que os discos de quartzo-teflon são mais reprodutíveis quando expostos a dose de 9,72 mGy obtida com feixe de raios X para mamografia. Este fato pode estar associado a diferença entre as energias dos fótons provenientes dos raios γ (662 keV) e dos raios X (16 keV), ou seja, a dependência energética. Além disso, no estudo de Carvalho Jr. (2010) não foi considerada a importância de padronizar os lados irradiados para a leitura TL dos discos de quartzo-teflon. Acredita-se que a heterogeneidade dos grãos de quartzo distribuídos na superfície dos discos pode ser responsável pelos valores mais altos de dispersão na resposta TL.

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores médios das respostas TL e seus respectivos desvios-padrão. De maneira geral, a variância dos discos é $\leq 0,78\%$. Apenas no disco 11 foi encontrado um valor de variância da resposta TL igual a 0,98%. Assim, a reprodutibilidade dos discos dentro do intervalo estabelecido no LMRI/DEN/UFPE e

o baixo valor de variância individual, estão de acordo com o esperado para os dosímetros TL utilizados em radiodiagnóstico e em feixes de raios X para mamografia (ICRU, 2005).

Tabela 4.2 – Média da resposta TL ($\bar{X}$), desvio padrão (dp) e variância ($dp / \bar{X}$) (dose = 9,72 mGy)

disco (N°)	$\bar{X}$ (nC/mg)	dp (nC/mg)	$(dp / \bar{X}) \%$
1	15,40	0,12	0,78
2	15,15	0,09	0,59
3	15,37	0,12	0,78
4	15,27	0,11	0,72
5	15,47	0,06	0,39
6	15,43	0,05	0,32
7	15,37	0,12	0,78
8	15,47	0,11	0,71
9	15,31	0,10	0,65
10	15,20	0,08	0,53
11	15,32	0,15	0,98
12	15,25	0,09	0,59
13	15,33	0,11	0,72
14	15,50	0,07	0,45
15	15,30	0,12	0,78
16	15,36	0,11	0,72
17	15,33	0,12	0,78
18	15,14	0,05	0,33
19	15,23	0,09	0,59
20	15,36	0,04	0,26

Fonte: resultado da pesquisa.

Os resultados encontrados no estudo da resposta TL em função da face do disco estão sumarizados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. Mantendo as leituras TL nas faces irradiadas dos discos 2, 8 e 14, constatou-se que, tanto o sinal TL (nC) como a resposta TL (nC/mg), foram maiores e com menores valores de desvio-padrão e variância. No disco 14 foi observado um percentual de diferença de 7% nos valores dos sinais TL obtidos entre as faces. Este percentual é um pouco menor para a resposta TL normalizada pela massa do disco, sendo de aproximadamente 6,5%.

Tabela 4.3 – Sinal e resposta TL para o disco 2

massa = 45,9 mg	Face irradiada		Face oposta	
Leitura TL	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)
1	698,20	15,21	673,50	14,67
2	700,90	15,27	626,80	13,66
3	697,00	15,19	649,00	14,14
4	687,50	14,98	655,20	14,27
Média ($\bar{X}$)	695,90	15,16	651,13	14,19
Desvio-padrão (dp)	5,83	0,13	19,27	0,42
Variância ($dp / \bar{X}$) %	0,84	0,86	2,96	2,96

Fonte: resultado da pesquisa.

Tabela 4.4 – Sinal e resposta TL para o disco 8

massa = 48,9 mg	Face irradiada		Face oposta	
Leitura TL	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)
1	754,90	15,44	748,80	15,31
2	760,00	15,54	738,20	15,10
3	757,60	15,49	725,60	14,84
4	746,70	15,27	752,70	15,39
Média ($\bar{X}$)	754,80	15,44	741,33	15,16
Desvio-padrão (dp)	5,79	0,12	12,14	0,25
Variância ($dp / \bar{X}$) %	0,77	0,78	1,64	1,65

Fonte: resultado da pesquisa.

Tabela 4.5 – Sinal e resposta TL para o disco 14

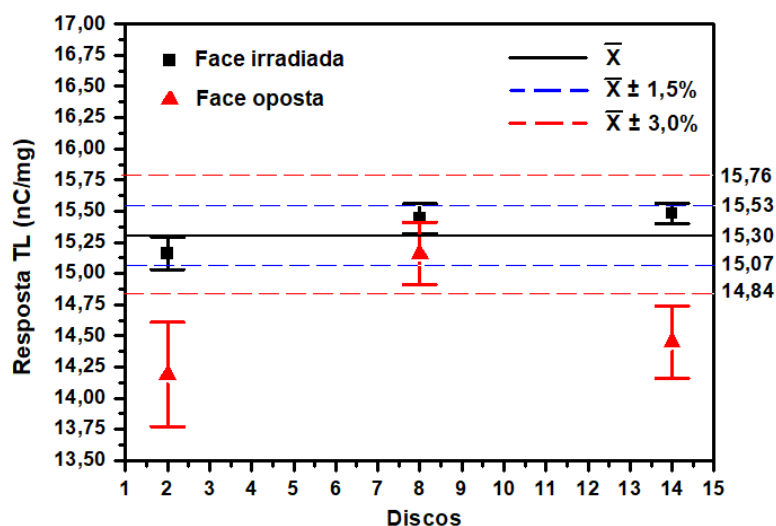
massa = 49,9 mg	Face irradiada		Face oposta	
Leitura TL	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)	Sinal TL (nC)	Resposta TL (nC/mg)
1	769,50	15,42	715,00	14,33
2	762,00	15,58	722,00	14,76
3	755,00	15,44	713,00	14,58
4	757,00	15,48	690,00	14,11
Média ($\bar{X}$)	760,88	15,48	710,00	14,45
Desvio-padrão (dp)	6,46	0,07	13,88	0,29
Variância ($dp / \bar{X}$) %	0,85	0,45	1,95	2,01

Fonte: resultado da pesquisa.

Para observar de forma mais clara a importância de padronizar a face irradiada do disco para a leitura TL, os resultados obtidos com os discos 2, 8 e 14 foram inseridos na Figura 4.9. Com as a leitura TL das faces irradiadas os discos apresentaram

praticamente os mesmos valores observados no estudo da reprodutibilidade (Figura 4.7). Por outro lado, as respostas TL obtidas nas faces opostas dos discos 2 e 14 foram 5,5 % abaixo da média geral. Consequentemente, estes discos ficaram fora do intervalo $\bar{X} \pm 3,0\%$. Em resumo, utilizando as faces irradiadas para a leitura TL os valores de variância foram: 0,86% para o disco 2; 0,78% para o disco 8 e 0,45% para o disco 14. Com a leitura TL das faces opostas a variância aumentou para: 2,96%, 1,65% e 2,00%, respectivamente.

Figura 4.9 – Resposta TL das faces irradiada e oposta dos discos



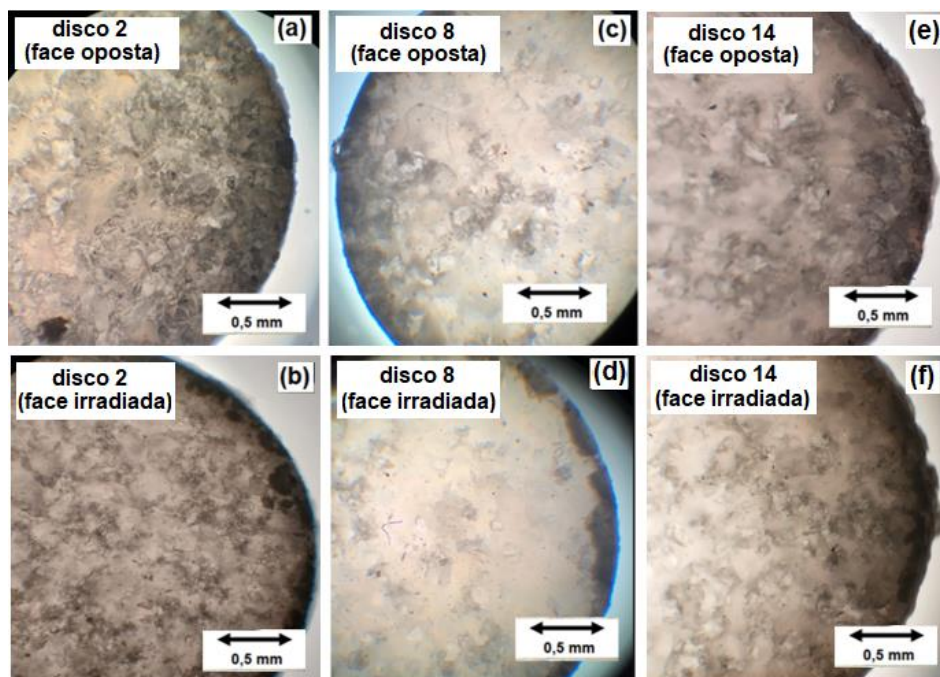
Fonte: resultado da pesquisa.

Embora os valores de desvio-padrão e variância tenham aumentado com a leitura TL da face oposta do disco 8, o valor médio da resposta TL permaneceu dentro do intervalo do intervalo $\bar{X} \pm 1,5\%$. Uma justificativa para este fato pode ser encontrada analisando a morfologia das superfícies das faces dos discos. Por exemplo, nas imagens obtidas por microscopia óptica (Figura 4.10) percebe-se que as superfícies das faces do disco 8 possuem, praticamente, o mesmo grau de integridade. Por outro lado, as faces opostas dos discos 2 e 14 estão mais degradadas do que as faces utilizadas para a leitura TL, possuindo diversas falhas e buracos deixados pela remoção dos grãos de quartzo.

O processo de degradação natural dos discos é proveniente dos ciclos de irradiação, tratamento térmico e leitura TL, e, sobretudo, da manipulação dos discos com pinça. Um procedimento que poderia ser adotado para a identificar a face irradiada seria a marcação com grafite ou a utilização de alguma coloração. Entretanto, estas

sugestões precisam ser bem investigadas para que estes artifícios não interfiram de alguma forma na leitura TL dos discos.

Figura 4.10 – Imagens obtidas com microscopia óptica na superfície dos discos 2, 8 e 14: faces opostas (a), (c) e (d); faces irradiadas (b), (d) e (f) (aumento 10 x)

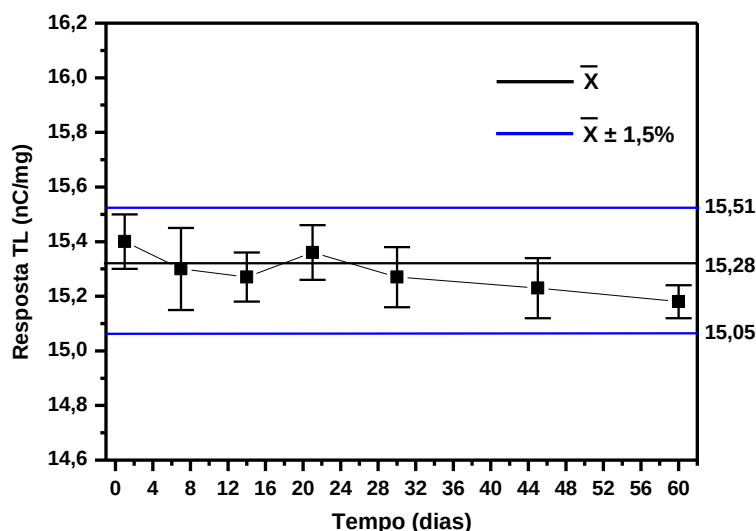


Fonte: resultado da pesquisa.

4.4 Análise do desvanecimento da resposta TL

Na Figura 4.11 está apresentado o comportamento da resposta TL em função do tempo de estocagem. Cada ponto na figura corresponde à média da resposta TL obtida com a leitura TL de três discos expostos a dose de 9,72 mGy. A linha central (na cor preta) representa a média geral da resposta TL ($\bar{X}$) normalizada pela massa dos discos. Já as linhas externas (na cor azul) correspondem ao intervalo $\bar{X} \pm 1,5\%$. Analisando o resultado nota-se que o desvanecimento da resposta TL não é significativo na faixa entre 200 e 375 °C, sendo constatada apenas uma pequena perda de aproximadamente 1,43% para um tempo de estocagem de 60 dias. No estudo de Carvalho (2010), o desvanecimento da resposta TL foi de 8% para o mesmo tempo de estocagem e dose de 10 mGy (^{137}Cs).

Figura 4.11 – Estabilidade da resposta TL na região entre 200 e 375 °C em função do tempo de estocagem para uma dose de 9,72 mGy



Fonte: resultado da pesquisa.

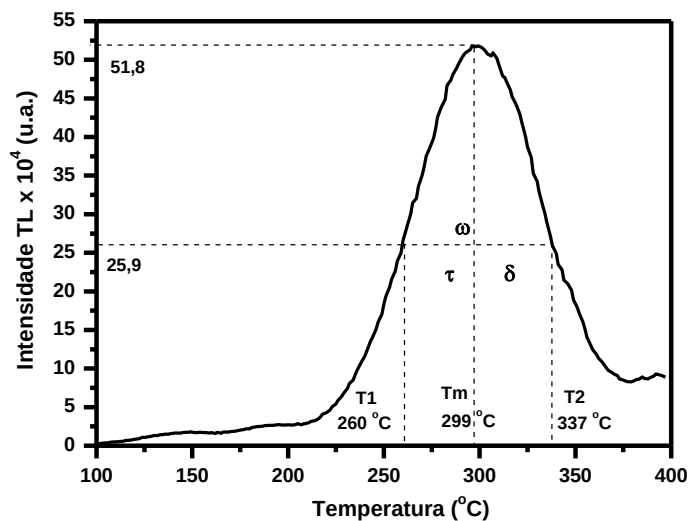
A estabilidade da resposta TL para os discos quartzo-Teflon é comparável aos valores apresentados para alguns dosímetros TL comerciais, tais como; Al_2O_3 , BeO , $\text{CaF}_2\text{:Dy}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ e $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy}$, conforme relatado por Mahesh, Weng e Furetta (1989) e Bos (2001). Nascimento *et al.* (2009) não observaram perdas na resposta TL dos discos monocristalinos de quartzo estocados sob as mesmas condições dos discos de quartzo-teflon. Este fato sugere o desvanecimento da resposta TL é maior no quartzo particulado do que para o quartzo monocristalino.

4.5 Análise do tempo de vida útil do pico TL

Na Figura 4.12 está apresentada a curva média de intensidade TL característica para os discos de quartzo, a qual foi obtida com dose de 20,60 mGy. Como pode ser observado, há um pico TL principal, cuja temperatura de máximo é $T_m = 299^\circ\text{C}$. As temperaturas na largura de meia altura são: $T_1 = 260^\circ\text{C}$ e $T_2 = 337^\circ\text{C}$. Na curva de intensidade TL os parâmetros geométricos do pico TL principal correspondem aos seguintes valores: $\omega = 77$; $\tau = 39$; $\delta = 38$ e $\mu = 0,49$. O valor de b foi obtido a partir da interpolação do valor de μ na Figura 2.5, resultando em $b = 1,15$. Ainda pode ser observado a presença de três picos TL, situados próximos das temperaturas de 150, 180 e 400 °C. O pico TL próximo a 400 °C, mesmo não se sobrepondo completamente ao pico TL principal, pode influenciar nos parâmetros geométricos, especialmente no que

se refere ao valor encontrado de $\delta = 38$. Desta forma, faz-se necessária a deconvolução da curva de intensidade TL para uma análise mais adequada dos parâmetros geométricos e, conseqüentemente, do tempo de vida útil do pico TL principal.

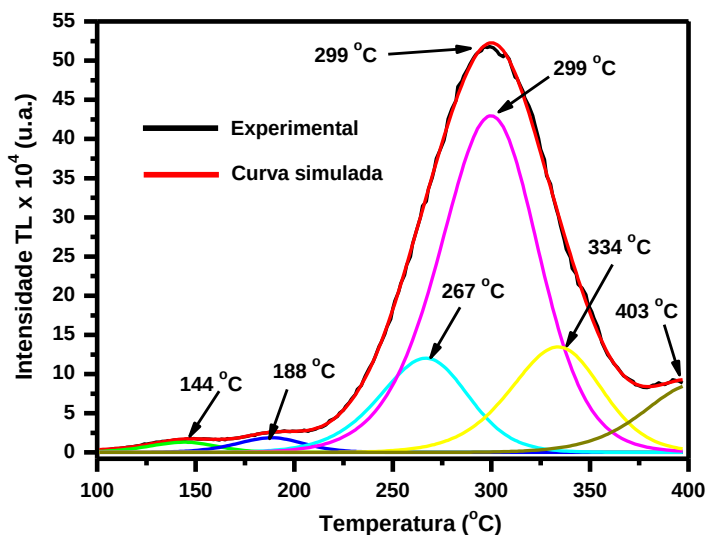
Figura 4.12 – Curva de intensidade TL e parâmetros geométricos do pico TL principal



Fonte: resultado da pesquisa

O resultado da deconvolução da curva de intensidade TL característica para os discos de quartzo está apresentado na Figura 4.13. Neste resultado, a curva TL experimental está representada pela linha de cor preta. A curva TL foi deconvoluída em seis picos, cujas temperaturas são: 144 °C, 188 °C, 267 °C, 299 °C, 334 °C e 403 °C.

Figura 4.13 – Curva média da intensidade TL antes e após a deconvolução



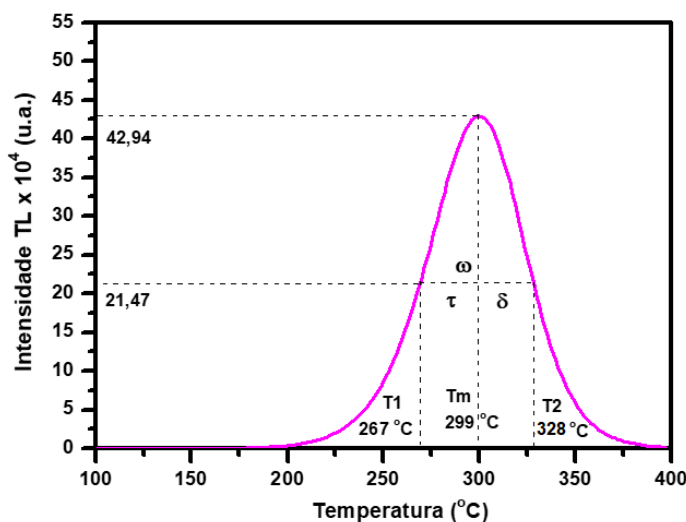
Fonte: resultado da pesquisa.

A soma dos picos TL deconvoluídos formam a curva de intensidade TL simulada, representada pela curva de linha vermelha. Comparando a curva TL experimental e a curva TL simulada, observou-se um FOM = 0,82%. Segundo Balian e Eddy (1977), McKeever (1985) e Kitis, Gomez-Ros e Tuyn (1998), é considerado como sendo “bom resultado” obtido na deconvolução os valores de $FOM \leq 2,5\%$.

Na Figura 4.14 está apresentado o pico TL principal deconvoluído e as temperaturas de máximo na largura a meia altura, cujos valores são $299\text{ }^{\circ}\text{C}$, $267\text{ }^{\circ}\text{C}$, e $328\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Estes valores foram utilizados para determinar os parâmetros geométricos, que são $\omega = 61$; $\tau = 32$; $\delta = 29$ e $\mu = 0,48$; indicando um pico TL de cinética de ordem geral. Com o valor de $\mu = 0,48$ interpolado na Figura 2.5, encontrou-se o valor de $b = 1,32$ para o pico TL principal. Como pode ser observado, comparando os parâmetros geométricos do pico TL experimental e do pico TL deconvoluído, os valores são menores para o pico TL deconvoluído, principalmente para o parâmetro δ , chegando a uma diferença maior que 30% do valor obtido com o pico TL experimental.

O valor de b foi maior para o pico TL deconvoluído em 13% comparado ao pico TL experimental, indicando que o pico TL deconvoluído está mais próximo de um modelo TL de 2ª ordem, ou seja, que possui maior probabilidade de rearmadilhamento dos elétrons. Visto que no pico TL deconvoluído a forma do pico não sofre efeito da sobreposição de picos TL próximos, este pico TL se mostra mais adequado para determinação da energia de ativação e, consequentemente, do tempo de vida útil, em comparação com o pico TL experimental.

Figura 4.14 – Parâmetros geométricos do pico TL após a deconvolução



Fonte: resultado da pesquisa.

Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores do fator geométrico (μ) e da energia de ativação média (E_m) do pico TL deconvoluído. Estes valores foram obtidos utilizando as Equações de 2.5 a 2.8. Com os valores calculados em função dos parâmetros geométricos (ω , τ e δ) foi obtido um valor médio da energia de $E_m = 1,33 \pm 0,01 \text{ eV}$.

Tabela 4.6 – Valores calculados da energia de ativação (E)

Pico TL	μ	T_m (°C)	E_ω (eV)	E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_m (eV)
Deconvoluído	0,49	299	1,33	1,33	1,34	$1,33 \pm 0,01$

Fonte: resultado da pesquisa.

Guzzo, Souza e Khoury (2011) investigaram um lote de discos monocristalinos de quartzo extraídos do mesmo cristal utilizado por Carvalho Jr (2010) para a produção dos discos de quartzo-teflon. Como resultado, os autores constataram que o pico TL a 300 °C dos discos monocristalinos, submetidos as mesmas condições de sensibilização dos discos de quartzo-teflon, apresentam fator geométrico $\mu = 0,51 \pm 0,02$ para uma dose de 20 mGy (^{137}Cs). Para os discos policristalinos de quartzo-teflon foi encontrado para o pico TL (deconvoluído) a 299 °C um valor de $\mu = 0,49$ para uma dose similar de 20,60 mGy (raios X). Neste mesmo trabalho foi determinada a energia de ativação do pico TL principal, que foi de $E = 1,36 \pm 0,09 \text{ eV}$. Este resultado, considerando o desvio padrão, é aproximadamente igual ao valor de $E_m = 1,33 \pm 0,01 \text{ eV}$ apresentado na Tabela 4.6 para o pico TL deconvoluído dos discos de quartzo-teflon.

É importante destacar que no quartzo natural não sensibilizado os valores da energia de ativação podem variar, principalmente em função da dose e da forma física da amostra. Por exemplo, Farouk *et al.* (2019) constataram em amostras de quartzo irradiadas com dose de 500 Gy (^{60}Co), que os picos TL deconvoluídos a aproximadamente 272 °C e 313 °C, possuem valores de energia de ativação de $1,16 \pm 0,022 \text{ eV}$ e $1,22 \pm 0,026 \text{ eV}$, respectivamente. Em outro estudo, Kaur *et al.* (2012) perceberam que o pico TL próximo a 250 °C pode apresentar uma variação no valor de E para amostras monocristalinas (pequenos cristais) e policristalinas (grãos), quando expostas a dose de 2 kGy (^{60}Co). Neste caso, para os cristais de quartzo o valor encontrado foi $E = 1,26 \text{ eV}$ e para os grãos de quartzo o valor foi $E = 1,18 \text{ eV}$.

Os valores calculados do fator de frequência (s) e do tempo de vida (t) estão apresentados na Tabela 4.7. O fator de frequência foi obtido com os valores de E_m e da ordem cinética b . Estes valores foram aplicados na Equação 2.9, que considera o pico TL com cinética de ordem geral. Já o tempo de vida foi estimado por meio da Equação 2.10, considerando temperaturas ambiente de 20 °C (253 K) e 25 °C (298 K).

Tabela 4.7 – Fator de frequência (s) e tempo de vida (t) do pico TL deconvoluído

B	E_m (eV)	s (s ⁻¹)	$t_{20^{\circ}C}$ (anos)	$t_{25^{\circ}C}$ (anos)
1,51	1,33	$1,12 \times 10^{11}$	19.942	8.242

Fonte: resultado da pesquisa.

A influência da temperatura ambiente fica evidente no cálculo do tempo de vida útil do pico TL a 299 °C. Embora o tempo de vida útil seja bastante longo para temperaturas ambiente de 20 °C e 25 °C, este parâmetro físico pode ser reduzido em aproximadamente 60% com a estocagem dos discos de quartzo em ambientes com 25 °C de temperatura. Esta análise pode contribuir com informações para o estudo do desvanecimento do pico TL, principalmente nos casos onde ocorre o desvanecimento anômalo, também chamado de *fading* anômalo (MAHESH, CHEN e FURETTA, 1989). A relação entre este tipo de desvanecimento e os parâmetros cinéticos e térmicos das armadilhas, ainda é pouco compreendida. De qualquer forma, os resultados indicam uma estabilidade considerável do pico TL principal para várias aplicações dosimétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados desta pesquisa foi possível concluir sobre as propriedades dosimétricas que os discos de quartzo-teflon apresentaram uma curva de intensidade TL simples, constituída de um pico TL a 299 °C, situado na região de interesse dosimétrico. O lote de discos utilizados apresentou reprodutibilidade da resposta TL dentro da faixa correspondente a mais ou menos 3% do valor da média geral. No que se refere a intensidade máxima da resposta TL em função da dose de raios X, constatou-se que os discos de quartzo-teflon são cerca de 4 vezes mais sensíveis do que os dosímetros comerciais TLD-100, para a faixa de doses entre 3,24 e 20,60 mGy. Esta sensibilidade pode chegar a 10 vezes mais, quando utilizado como forma de análise a integral do sinal TL na região entre 200 e 375°C.

O desvanecimento do sinal TL na região de interesse dosimétrico foi de apenas 1,43% para um período de estocagem de 60 dias. Este resultado, assim como o resultado da dependência energética, é compatível com os valores apresentados por vários dosímetros TL comerciais, tais como; Al_2O_3 , BeO, $\text{CaF}_2\text{:Dy}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$ e $\text{MgB}_4\text{O}_7\text{:Dy}$. Para o tempo de vida útil calculado na temperatura ambiente de 20 °C, encontrou-se no pico TL principal deconvoluído um valor próximo de 20 mil anos, que concorda com os valores encontrados por outros autores para os picos TL do quartzo usados nos protocolos de datação geológica e arqueológica. Entretanto, uma redução acentuada de 60% no tempo de vida útil foi observada para uma temperatura ambiente de 25 °C.

A importância de padronizar a face irradiada do disco para a leitura TL se apresenta como uma contribuição deste trabalho para os protocolos utilizados nos laboratórios de dosimetria. Até então, a influência da face irradiada para a leitura TL era desconsiderada, acarretando em variações da resposta TL. Ressalta-se ainda que é importante, no futuro, observar o comportamento da resposta TL dos discos de quartzo em exames reais de mamografia, com o intuito de confirmar sua maior sensibilidade TL em relação ao TLD-100.

Portanto, as propriedades dosimétricas investigadas neste trabalho, o aprimoramento no procedimento das medidas, visando manter as leituras TL sempre nas faces irradiadas e o baixo custo estimado de produção em relação aos dosímetros TLD-100, corroboram a viabilidade de utilização de discos quartzo-teflon para estudos dosimétricos que envolvem feixes de raios X de mamografia.

Sugestões e novas etapas para trabalhos futuros

- Utilizar os discos de quartzo em exames reais de mamografia;
- Realizar um levantamento de custos para a produção de discos de quartzo;
- Identificar possíveis parcerias entre universidades e laboratórios de dosimetria;
- Coletar mais informações sobre as propriedades TL dos discos expostos a uma faixa mais ampla de energia;

REFERÊNCIAS

- BALIAN, H. G.; EDDY, N. W. **Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks.** Nuclear Instruments and Methods, v.145, n.2, p.389–395, 1977.
- BOS, A. J. J. **High sensitivity thermoluminescence dosimetry.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 184:3-28, 2001.
- CAMPOS, L. L. **Termoluminescência em materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação.** Cerâmica 44 (290):1-21, 1998.
- CARVALHO JR., Á. B.; GUZZO, P.L.; KHOURY, H.J. **Obtenção de discos policristalinos de quartzo natural para dosimetria das radiações ionizantes.** In: XXII ENTMME Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 1:767-774, 2007.
- CARVALHO JR., Á. B. **Preparação e Caracterização de Quartzo Particulado e Discos Quartzo-Teflon para Dosimetria Termoluminescente das Radiações Ionizantes.** Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Pernambuco, 2010.
- CARVALHO JR., Á. B.; KHOURY, H. J.; BARROS, S. V.; GUZZO, P. L. **Caracterização e calibração de dosímetros de quartzo (QPS-100) com feixes de raios-X de mamografia. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA.** 2011.
- CARVALHO JR., Á.B.; BARROS, T.F.; GUZZO, P. L.; KHOURY, H. J. **Manufacturing polycrystalline pellets of natural quartz for application in thermoluminescence dosimetry.** Materials Research, v.15, p 536-543, 2012.
- CHEN, R.; MCKEEVER, S. W. S. **Theory of thermoluminescence and related phenomena.** Singapura: World Scientific Publishing Co. PTE. LTD., 1997, 541 p.
- DAMILAKIS, J.; PERISINAKIS, K.; PRASSOPOULOS, P.; DIMOVASILIS, E.; VARVERIS, H.; GOURTSOYIANNIS, N. **Conceptus radiation dose and risk from chestscreen-film radiography.** European Radiology, v. 13, p. 406–412, 2003.
- FAROUK, S.; AZAB-EL, H.; GAD, A.; NASHAR-EL, H. **Investigation of thermoluminescence glow curves in quartz extracted from the Central Eastern Desert, Egypt.** Luminescence. 2019; p 1-8.
- FILHO, J. M. X.; SILVEIRA, I. S.; CALDAS, L. V. E. **Espectros de feixes padrões de radiação X nas qualidades de radiodiagnóstico e mamografia a partir de simulações Monte Carlo.** Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes – CBMRI, 2020.
- FURETTA, C. **Handbook of thermoluminescence.** World Scientific, 2009, 564 p.
- GUZZO, P. L.; IWASAKI, F.; IWASAKI, H. **Al-related centers in relation to γ -irradiation response in natural quartz.** Phys. Chem. Minerals, v.24, p.254-263, 1997.
- GUZZO, P.L.; KHOURY, H. J.; SOUZA, C. P.; SOUZA JR. A. M.; SCHWARTZ, M. O. E.; AZEVEDO, W. M. **Defect Analysis in Quartz from Brazilian Sites for Ionizing Radiation Dosimetry.** Radiation Protection Dosimetry 119:168-171, 2006.

GUZZO, P. L.; KHOURY, H. J.; MIRANDA, M. R.; BARRETO, S. B.; SHINOHARA, A. H. **Point Defects and Pre-dose Requirements for Sensitization of the 300°C TL peak in natural quartz**. Phys. Chem. Minerals 36:75-85, 2009.

GUZZO, P. L.; SOUZA, L. B. F.; KHOURY, H. J. **Kinetic analysis of the 300 °C TL peak in Solonópole natural quartz sensitized by heat and gamma radiation**. Radiation Measurements. 46:1421-1425, 2011.

HAN, I.; DEMIR, L.; SAHIN, M. **Determination of Mass Attenuation Coefficients, Effective Atomic and Electron Numbers for Some Natural Minerals**. Radiation Physics and Chemistry 78:760- 764, 2009.

ICRU. **Patient Dosimetry for X Rays Used in Medical Imaging**, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Report 74, Bethesda, MD, 2005.

IHINGER, P. D.; ZINK, S. L. **Determination of Relative Growth Rates of Natural Quartz Crystals**. Nature, 404:865-869, 2000.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice**. Technical Reports Series N°. 457. 2007.

IWASAKI, F; IWASAKI, H.; OLIVEIRA, R. A. V; HUMMEL, D. C. A.; PASQUALI, M. A.; GUZZO, L. P.; WATANABE, N.; SUZUKI, C. K. **Impurity Contents Characterization of Brazilian Quartz Lascas**. Jpn. J. Appl. Phys., v.30, p.1489-1495, 1991.

KAUR, S.; MURTHY, K. V. R.; DHOBLE, S. J. **TL glow curve and kinetic of gamma irradiated quartz collected from Rasmada mines of C.G. basin**. Recent Research in Science Technology. v 4 (8); p.58-60; 2012.

KITIS, G.; PAGONIS, V. **Peak Shape Methods for General Order Thermoluminescence Glow-Peaks: A Reappraisal**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. v.262, p. 313-322, 2007.

KITIS, G.; GOMEZ-ROS, J. M.; TUYN, J. W. N. **Thermoluminescence Glow-Curve Deconvolution Functions for First, Second and General Order of Kinetics**. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 31, p. 2636-2641, 1998.

HOROWITZ, Y. S. **Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry: volume III**. CRC Press, 2023, 200 p.

KHOURY, H. J., GUZZO, P. L., BRITO, S. B., HAZIN, C. A. **Effect of high gamma dose on the sensitization of natural quartz using for thermoluminescence dosimetry**. Radiation Effects and Defects in Solids 162:101-107, 2007.

KHOURY, H. J.; GUZZO, P. L.; SOUZA, L. B. F; FARIAS, T. M. B.; WATANABE, S. **TL Dosimetry of Natural Quartz Sensitized by Heat-Treatment and High Dose Irradiation**. **Radiation Measurements** 43:487-491, 2008.

KRON, T. **Thermoluminescence Dosimetry and its Applications in Medicine, Part 1: Physics, Materials and Equipament**, Australasian Phys. & Eng. Sci. in Medicine 17, 4 (1994) 175-199.

- LEE, J. I.; KIM, S. Y.; CHANG, K. S.; CHUNG, H.S. **Developments in The Synthesis of LiF: Mg, Cu, Na, Si, TL**. Radiation Protection Dosimetry 108(1):79-83, 2004.
- MAHESH, K.; WENG P, S.; FURETTA, C. Thermoluminescence in Solids and its Applications. **Nuclear Technology Publishing, England**, 1989, 306 p.
- MAY, C. E.; PARTRIDGE, J. A. **Thermoluminescent Kinetics of Alpha-Irradiated Alkali Halides**, The Journal of Chemical Physics, 40, 1401-1409, 1964.
- MCKEEVER, S. W. S. **Thermoluminescence in Quartz and Silica**. Radiation Protection Dosimeter 8(1/2):81-98, 1984.
- MCKEEVER, S. W. S. **Thermoluminescence of Solids**. Cambridge Univ. Press, 1985, 376 p.
- MCKEEVER, S. W. S.; MOSCOVITCH, M.; TOWNSEND, P. D. Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses. Ashford: **Nuclear Technology Publishing**; 1995.
- MCKEEVER, S. W. S.; CHEN, C. Y.; HALLIBURTON, L. E. **Point Defects and Pre-Dose Effect in Natural Quartz**, Nucl. Tracks. 10(4-6):489-495, 1985.
- NASCIMENTO, S. R. V.; SOUZA, L. B. F.; GUZZO, P. L.; KHOURY, H. J. **Study of Dosimetric Properties of Sensitized Solonópole Quartz**. In: INAC - International Nuclear Atlantic Conference, pp.1-5, 2009.
- NASCIMENTO, S. R. V. **Dosimetria Termoluminescente do Quartzzo Natural de Sonolópole (CE) para Aplicação em Radiodiagnóstico**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas Nucleares) Universidade Federal de Pernambuco, 2010
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, M.E. **Física das Radiações**. Oficinas de textos. São Paulo, 19 fevereiro. 2010.
- ROCHA, F. D. G.; OLIVEIRA, M. L.; CECATTI, S. G. P.; CALDAS, L.V.E. **Properties of Sintered Amethyst Pellets as Thermoluminescent Dosimeters**. Applied Radiation and Isotopes 58:85-88, 2003.
- ROQUE, C.; GUIBERT, P.; DUTTINE, M.; VARTANIAN, E.; CHAPOULIE, R.; BECHTEL, F. **Dependence of Luminescence Characteristics of Irradiated Quartz with the Thermal Treatment and Consequences for TL Dating**. Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology, v.23, p.1-8, 2004.
- SILVA, C. P. S.; **Estudo da Resposta de Cristais de Quartzzo Natural para Dosimetria Termoluminescente**. 83p. (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco/UFPE). 2005
- SOARES, B. R.; ASFORA, V. K.; GUZZO, P.L. **Effect of Blue Light Bleaching in a High TL Sensitivity Natural Quartz Crystal**. Brazilian Journal of Radiation Sciences.10-02A (2022) 01-11.
- SOUZA, D. N.; VALÉRIO, M. E. G.; LIMA, J. F.; CALDAS, L.V.E. **The Use of Pellets of Brazilian Natural Topaz as Radiation Dosimeters**. Radiation Effects and Defects in Solids 156:325-330, 2001.
- THAUHATA, L.; SALATI, I. P.; PRINZIO, Di. R.; PRINZIO, Di. A. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro. IRD/CNEN 242. p. 5º revisão agosto/2003

TILLY JR., J. G. **Física Radiológica**. Ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro. 2010.

ZIMMERMAN, J. **The Radiation-Induced Increase of the 110 °C Thermoluminescence Sensitivity of Fired Quartz**. J. Phys. C: Solid State Phys. 4:3265-3276, 1971.