

Obtenção dos Parâmetros Cinéticos dos Picos Termoluminescentes em 190°C e 255°C do Quartzo Extraído de Material de Construção

S. S. Campos, G. M. Almeida, A. S. Lima, F. C. L. Ferreira, L. X. Cardoso, H. N. Santos, R. A. P. Oliveira, L. L. de Lima, S. O. Souza.

*Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe
(Recebido em 29 de julho de 2008; aceito em 29 de setembro de 2008)*

O uso da termoluminescência (TL) é bastante útil para aplicação em dosimetria retrospectiva, isto é, para a determinação da dose de radiação a que foi exposto determinado material, e, por consequência, os seres vivos deste lugar. Para isto, a determinação do tempo de vida pode ajudar a esclarecer qual intensidade TL é devida à dose da radiação ambiente e qual é proveniente de um acidente com radiação. Picos de TL que ocorrem no intervalo de temperatura de 150°C – 250°C, correspondendo ao nível intermediário, são comumente utilizados para dosimetria retrospectiva por apresentar um tempo de vida relativamente curto comparado ao sinal geológico termoluminescente. Sendo assim, neste trabalho, foram obtidos a ordem de cinética (b), a energia de ativação (E_T) e o fator de frequência (s) dos picos em 190°C e 255°C de amostras de quartzo extraídos de materiais de construção. Ambos foram avaliados utilizando diversos métodos, e com eles foi possível estimar o tempo de vida de cada um, estando na ordem de dias para aquele, em torno de 190°C e em centenas de anos para o de 255°C, caso a amostra esteja submetida a uma temperatura ambiente de 15°C. Isso indica que este último poderá ser utilizado em dosimetria retrospectiva de quartzo não queimado.

Palavras-chaves: termoluminescência, quartzo, parâmetros cinéticos, dosimetria retrospectiva.

The use of thermoluminescence (TL) is very useful for application to retrospective dosimetry, that is, to determine the dose of radiation to which certain material was exposed, and consequently the living beings from this place. The determination of the TL peak lifetime may help to clarify if the TL intensity is due to the environment radiation dose or if it is provided from an accident with radiation. TL peaks occurring in the range of 150°C - 250°C, the intermediate levels, are commonly used to retrospective dosimetry by presenting a relatively short lifetime compared to the thermoluminescent geological signal. Thus in this work it was obtained the of kinetic order (b), the activation energy (E_T) and the frequency of factor (s) of the peaks at 190°C and 255°C, from quartz samples extracted from building materials. Both were assessed using various methods, and with them was possible estimate the life time of each of the TL peaks, with the order of days for that around 190°C and hundreds of years to that of 255°C, in the case the sample submitted to an ambient temperature of 15°C. This indicated that the latter can be used in retrospective dosimetry of unfired quartz.

Keywords: thermoluminescence, quartz, kinetics, retrospective dosimetry.

1. INTRODUÇÃO

A radiação ionizante produz defeitos (elétrons e buracos capturados em armadilhas) em diversos materiais. Estes defeitos podem ser quantificados através de algumas técnicas como a termoluminescência, em que se utiliza o calor para estimular as cargas aprisionadas. Como resultado, a carga liberada irá dar origem à luminescência. Em princípio, a intensidade da luminescência é proporcional à dose acumulada [1].

A dosimetria retrospectiva é uma das formas para encontrar a dose da exposição devido a um acidente envolvendo radiação ionizante. A termoluminescência tem sido aplicada à dosimetria das radiações ionizantes desde 1940, quando o número de trabalhadores expostos a estas radiações aumentou e foram iniciados esforços no sentido de se desenvolver novos tipos de dosímetros [2]. Esses materiais contêm o quartzo (SiO_2), um dosímetro natural que pertencem à família dos silicatos, composto binário de oxigênio e silício mais abundante na natureza, e que apresenta propriedades termoluminescentes bastante importantes. Normalmente usa-se para a realização de tal técnica amostras de materiais que sofreram um prévio recozimento, tais como o

tijolo, telha e cerâmica, pois nesse caso o calor durante a fabricação elimina o sinal TL acumulado devido a exposição à radiação natural desde a formação geológica dos cristais [3].

Contudo, materiais não recozidos, como argamassa e concreto, são mais comumente encontrados em locais industriais e particularmente em instalações nucleares. Estes materiais também contêm o quartzo, que normalmente é menos sensível que sua contraparte aquecida. Portanto, agora o interesse está voltado para a utilização de materiais de construção, como argamassa e concreto, para ampliar o âmbito de aplicação, sendo um dos novos desafios da dosimetria retrospectiva de materiais não queimados. [4].

Os parâmetros cinéticos dos picos termoluminescentes desses materiais são importantes, pois permitem obter o tempo de vida do pico termoluminescente do material, que estava presente durante o acidente, dando suporte para a dosimetria de acidentes radioativos. Estes parâmetros são: a ordem cinética (b), a energia de ativação (E_T) e o fator de frequência (s) [5]. O conhecimento do tempo de vida dos materiais de interesse em dosimetria retrospectiva é relevante para se fazer obter a dose proveniente de acidentes com radiação, usando diversos materiais que possam ser expostos durante um acidente.

Há exigências primárias para tais dosímetros: 1) ausência de uma dose natural saturada acumulada do período geológico, 2) a habilidade para reter um registro da exposição ao acidente com desvanecimento desprezível, no intervalo de tempo entre exposição e a medida e 3) a habilidade para determinar a dose acumulativa de fontes de radiação naturais. O quartzo é um dosímetro natural que satisfaz freqüentemente estas exigências.

Oliveira et al. [6] determinaram os parâmetros cinéticos do pico do quartzo natural em 225°C. Eles encontraram um tempo de vida que mostra a possibilidade de seu uso para dosimetria retrospectiva. Porém, atualmente há ainda pouco conhecimento dos parâmetros de armadilhas de picos TL de materiais não queimados e uma grande discordância dos valores publicados por diferentes autores.

Ainda, a extração dos grãos de quartzo dos materiais de construção, seja ele recozido ou não, é um dos maiores desafios para a avaliação correta da dose. Como se sabe, uma cerâmica, como, por exemplo, um tijolo, contém uma série de impurezas, como material orgânico, materiais magnéticos e uma grande quantidade de outros cristais, como feldspatos.

Este trabalho tem por finalidade apresentar as técnicas e dificuldades encontradas para a obtenção dos grãos de quartzo extraídos de material de construção, além de avaliar os parâmetros cinéticos dos picos termoluminescentes em 190°C e 250°C, os quais correspondem ao nível de energia intermediária comumente utilizada para dosimetria retrospectiva de acidente radioativo, devido a sua vida útil relativamente curta, em que a TL geológica é fraca se comparada com a TL resultante da radiação artificial. Os parâmetros cinéticos foram avaliados utilizando os métodos da forma do pico, da área, e do ajuste linear da curva, que permitiram calcular o tempo de vida dos picos termoluminescentes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Preparação da amostra.

A primeira etapa em um trabalho de dosimetria retrospectiva ou de datação arqueológica requer a separação do quartzo presente em uma cerâmica. Nesse trabalho, foi escolhido um tijolo comum de construção. A partir dele, a obtenção dos grãos de quartzo se deu através das seguintes etapas [1]:

1. Escovação do tijolo com escovas de cerdas de aço, para a eliminação das impurezas da superfície e de possíveis amostras de quartzo que não tenham sofrido queima e que, portanto, possuam sinal TL geológico;
2. Trituração das peças em almofariz de ágata, para permitir uma melhor penetração dos agentes químicos que serão utilizados na remoção dos resíduos indesejados.
3. Retirada de partes magnéticas por meio de movimento contínuo da amostra juntamente com a aproximação de um ímã;
4. Tratamento da amostra em HCl (6 M), durante 24 h, com o objetivo de dissolver o material orgânico presente. Em seguida o material foi lavado com água destilada;
5. Após dissolução da matéria orgânica pelo HCl, o material foi submetido a um ataque em meio básico com solução de NaOH (6 M) por 6 horas, que ajuda a remover o

material orgânico ainda presente. A remoção da solução básica foi feita com uma lavagem com água destilada;

6. O próximo passo foi tratar a amostra em HF (50%) por 1 hora para a eliminação de feldspatos e para um pequeno ataque na superfície dos cristais de quartzo. Os resíduos foram então removidos com uma lavagem em água destilada;
7. Para finalizar, a amostra foi colocada em estufa para secagem natural, por três dias.

O material peneirado com granulometria entre 75 μm – 200 μm pode então ser separado em alíquotas, uma para medida da emissão natural da amostra e outras alíquotas para medida da emissão após irradiação com diferentes doses. O peneiramento é fundamental para evitar o uso de grãos com tamanhos muito diferentes, o que pode alterar o sinal TL.

Tanto para a datação arqueológica quanto para a dosimetria retrospectiva toda a preparação da amostra deve ser feita em ambiente sem iluminação, pois está pode afetar o sinal TL. Isso aumenta a dificuldade do trabalho, visto que ele envolve a manipulação de substâncias perigosas, como ácidos. Portanto todo o cuidado na manipulação deve ser tomado, como o uso de luvas e máscara.

A escolha da fonte de radiação é de fundamental importância nestes experimentos, motivada pela variação dos fenômenos na interação das diferentes formas de radiação com a matéria. Partículas beta, por exemplo, devido ao seu baixo poder de penetração em comparação com raios gama, só irão penetrar nos grãos de quartzo que estiverem na superfície. Portanto, nesse caso, deve-se ter o cuidado de se usar uma fina camada de amostra durante a irradiação. Esse problema pode ser evitado, utilizando-se fontes emissoras de raios gama. Outros problemas são a taxa de irradiação e sua energia, além da temperatura durante a irradiação, que podem influenciar no sinal TL. No presente trabalho, as amostras foram irradiadas em temperatura ambiente, em uma fonte de ^{60}Co com taxa de 222,2 Gy/h, pertencente ao IPEN-SP.

As medidas de termoluminescência foram efetuadas duas semanas após a irradiação utilizando uma leitora construída no Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais (LPCM-DFI/UFS). O sistema é composto de um porta-amostra de platina, cuja função é armazenar a amostra para o aquecimento. Esta placa está contida dentro de uma caixa de madeira em forma de gaveta, isolando a parte interna de qualquer luz externa. Uma fotomultiplicadora EMI 9789-B é utilizada para captar a luz emitida pelo material. A temperatura do porta-amostra é monitorada através de um termopar tipo Chromel-Alumel, soldado diretamente sob o mesmo. Esse sistema de leitura TL possibilita medir a emissão de luz desde a temperatura ambiente até 500°C, em atmosfera aberta. Contudo, para temperaturas acima de 350°C o sistema detecta uma forte emissão infravermelha, graças à incandescência da platina. Com isso, tem-se a necessidade de utilizar um filtro calórico, acoplado ao sistema na porta de entrada da fotomultiplicadora.

A escolha da taxa de aquecimento é bastante importante para uma boa medida. Se ela for muito lenta, os picos TL serão pouco intensos e mal definidos. Porém se a taxa for muito alta há um grande gradiente de temperatura entre a prancheta e a amostra, o que pode prejudicar as medidas. Neste trabalho, a taxa escolhida foi de 10°C.s⁻¹, que possibilitou a observação de picos mais definidos sem um gradiente de temperatura prejudicial para os experimentos.

2.2. Ordem Cinética

Não foi verificada mudança na posição de ambos os picos com o aumento da dose, o que conduz a conclusão de se tratarem de cinética de primeira ordem, compatível com as descrições encontradas na literatura. [2]

2.3. Análise dos parâmetros cinéticos E_t e s [7]

Método da forma do pico

Este método utilizado para avaliar a energia de ativação das armadilhas e o fator de frequência baseia-se no formato do pico utilizando somente três pontos na curva experimental TL: a temperatura de máximo (T_m), e as temperaturas T_1 e T_2 na metade da intensidade máxima

do pico de modo que $T_1 < T_m$ e $T_2 > T_m$ (figura 1). Como a forma do pico depende fortemente da ordem cinética, este método pode ser utilizado também para estimar a ordem cinética. Chen (1969) analisou este método e obteve uma expressão mais detalhada e precisa, onde $\omega = T_2 - T_1$, $\tau = T_2 - T_m$, $\delta = T_m - T_1$, de maneira que para encontrar a energia de ativação temos:

$$E = c_\gamma \left(\frac{kT_m^2}{\gamma} \right) - b_\gamma (2kT_m) \quad (1)$$

onde $\gamma = \omega$, τ ou δ . Os valores do fator geométrico foram definidos como $\mu_g = \delta/\omega$, concluindo que μ_g para primeira e segunda ordem cinética corresponderiam a 0.42 e 0.52, respectivamente, para picos isolados [3]. Os valores de c_γ e b_γ para cinética de primeira ordem são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Valores de c_γ e b_γ são para cinética de primeira ordem

	ω	τ	δ
c_γ	2,52	1,51	0,976
b_γ	1,0	1,58	0

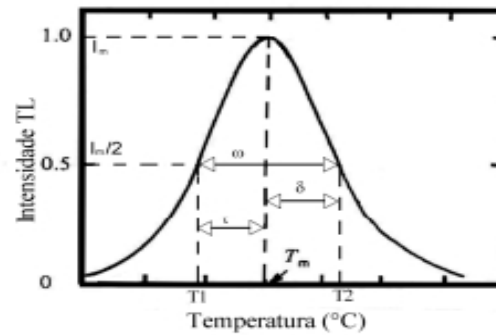


Figura 1. – Representação de um pico de TL isolado com destaque aos parâmetros geométricos, I_m e T_m , que são a intensidade máxima e a temperatura de máximo do pico, respectivamente; T_1 e T_2 são as temperaturas associadas a curva TL na metade da sua intensidade máxima.

A partir dos valores encontrados para as energias com os parâmetros geométricos ω , τ ou δ , podemos calcular o fator de frequência (s), que para cinética de primeira ordem é dado por:

$$s = \frac{\beta E_\gamma}{kT_m^2} \exp\left(\frac{E_\gamma}{kT_m}\right) \quad (2)$$

onde β , E_γ , k , T_m e T são, respectivamente, taxa de aquecimento, energia de ativação, constante de Boltzmann e temperatura de máximo do pico TL.

Método da área

Com este método também é possível calcular a energia de ativação (E), o fator de frequência (s) levando-se em consideração a ordem de cinética (b). Ele é baseado na expressão (3).

$$I(T) = \left(\frac{s^b}{\beta}\right) n^b \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (3)$$

É feito um gráfico de $\ln(I(T)/n^b)$ versus $1/T$ que gera uma reta com coeficiente angular igual a $(-E/k)$ e coeficiente linear igual a $\ln(s^b/\beta)$. Uma reta somente é obtida se for escolhido o valor correto para b , que para a cinética de primeira ordem é igual a 1.

O valor de n é encontrado utilizando a relação $I(T) = -dn/dt$, que pode ser escrita como:

$$n = \frac{1}{\beta} \int_{T_i}^{T_f} I(T) dT \quad (4)$$

Em que n é área sob a curva de TL desde a temperatura T até a temperatura final da curva (veja figura 2). A dificuldade maior desse método é que ele requer um pico completamente isolado.

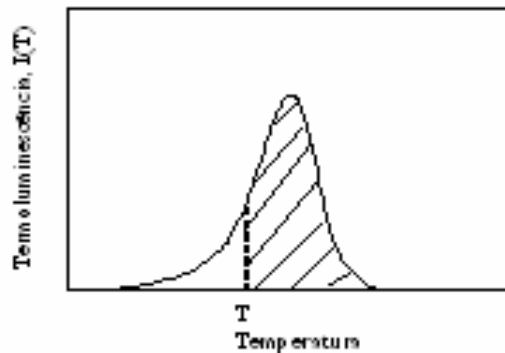


Figura 2. Esquema de um gráfico $I(T)$ versus T para um pico isolado.

Ajuste da curva

Este método consiste em ajustar à curva de emissão TL a uma curva teórica. O procedimento possibilita estabelecer a posição aproximada do pico, que está sendo analisado e estimar os valores de E , s e b . A curva computada é comparada com a curva de dados experimentais e o desvio entre as duas é calculado. Caso o pico a ser avaliado seja de primeira ordem, a curva teórica é gerada a partir da solução numérica da integral (5).

$$\int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) dT = T \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{kT}{E}\right)^{n-1} (-1)^{n-1} n! \quad (5)$$

No presente trabalho a curva teórica foi simulada no programa Origin® versão 6.0 utilizando a equação (6), que tem a vantagem de ser necessário apenas o ajuste da energia de ativação, já que os parâmetros T_m e I_m são facilmente obtidos da curva experimental [5].

$$I(T) = I_m \exp\left[1 + \frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m} - \frac{T^2}{T_m^2} \exp\left\{\frac{E}{kT} \frac{T - T_m}{T_m}\right\} (1 - \Delta) - \Delta_m\right] \quad (6)$$

O programa Origin® possui uma rotina que ajusta a curva gerada com a equação definida pelo usuário e retorna uma curva sobreposta aos dados experimentais, relatando o valor do teste Chi-quadrado, utilizado para escolher o melhor ajuste.

No caso de cinética de primeira ordem, o que conduz a uma probabilidade de recaptura desprezível, o método é considerado eficiente.

2.4. Tempo de vida

Conhecendo-se a energia de ativação (E) e o fator de frequência (s) através dos diferentes métodos, é possível encontrar o tempo de duração estimado de um pico TL (dado pela equação 7), ou seja, o seu tempo de vida (τ) quando submetido a determinada temperatura ambiente (T).

$$\tau = s^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right), \quad (7)$$

onde k é a constante de Boltzmann.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 apresenta a curva de emissão TL do quartzo estudado, obtida com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

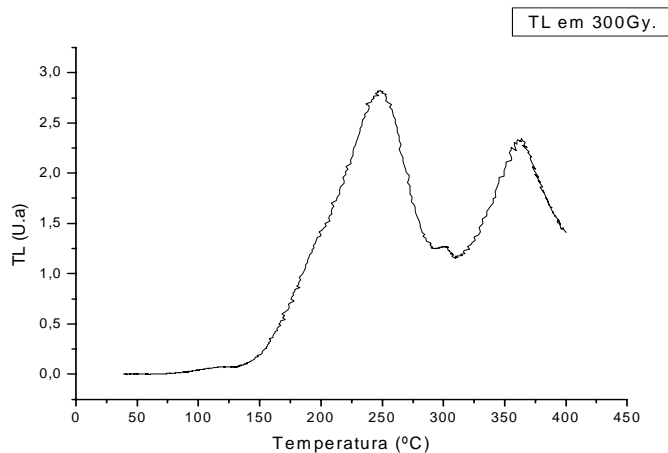


Figura 3 - Curva total de emissão TL do quartzo irradiado com dose de 300 Gy.

3.1. Forma do pico

A figura 4 mostra as curvas TL dos picos com temperatura de máximo em 190°C e 255°C . Para obtenção destas curvas foi necessário fazer um tratamento térmico ou limpeza térmica (thermal cleaning) [1], em 180°C , 200°C e 250°C , com o intuito de isolar os picos termoluminescentes, uma vez que o quartzo apresenta vários deles sobrepostos e para a aplicação de tal método é necessário tê-los devidamente isolados. Após a separação dos picos, foram determinados os parâmetros geométricos necessários, e o fator geométrico encontrado foi de $\mu_g = 0,416$ para ambas as curvas, o que condiz com cinética de primeira ordem. Desta forma foi possível determinar a energia de ativação, o fator de frequência e o tempo de vida de ambos os picos termoluminescentes que são apresentados na tabela 2.

3.2. Método da área

A figura 5 mostra os gráficos de $\ln(I(T)/n)$ versus $1/T$ que geraram retas com coeficiente angular $(-E/k)$ igual a (-5274 ± 89) para o pico em 190°C e $(-189 \pm 4,7) \times 10^2$ para o pico em 255°C e coeficiente linear $\ln(s/\beta)$ igual a $(10,0 \pm 0,2)$ para o pico em 190°C e (36 ± 1) para o pico em 255°C . Para a aplicação deste método é necessário que o pico esteja completamente isolado, uma vez que qualquer presença de picos adjacentes interfere na linearidade do mesmo, sendo este sensível ao número de pontos. A partir destes dados foi possível encontrar os parâmetros cinéticos resumidos na tabela 2.

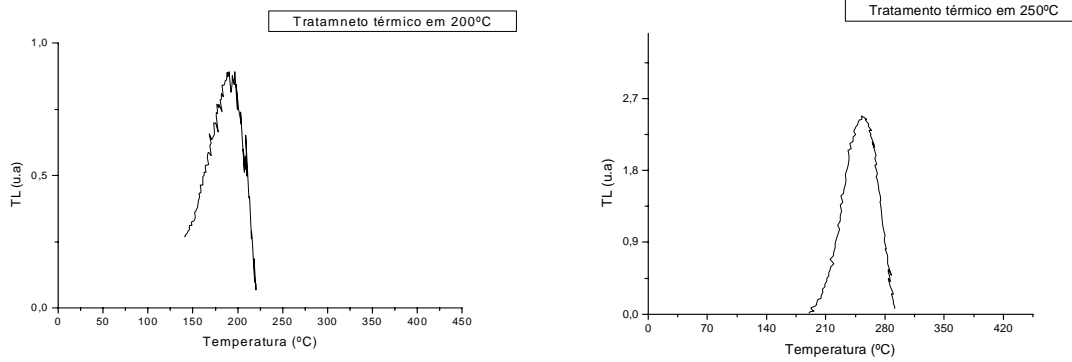


Figura 4 - Curva de emissão TL em 190°C e a curva de emissão TL em 255°C.

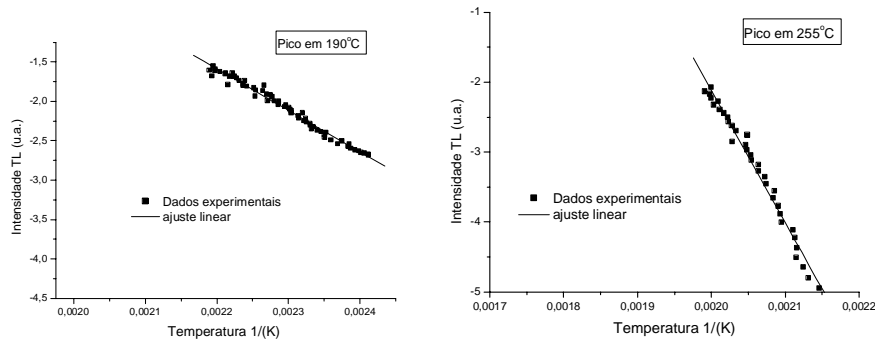


Figura 5- Gráficos de $\ln(I(T)/n)$ versus $1/T$ para os picos em 190°C e 255°C.

3.3. Ajuste da curva

Na figura 6, é apresentada a curva de dados experimentais e ajustados pela curva teórica para cinética de primeira ordem. Para a correta aplicação desse método bem como nos demais, é necessário que o pico esteja completamente isolado dos picos adjacentes. O fator de frequência foi obtido indiretamente através da equação (2). Os valores para os parâmetros cinéticos e o tempo de vida estão dispostos na tabela 2.

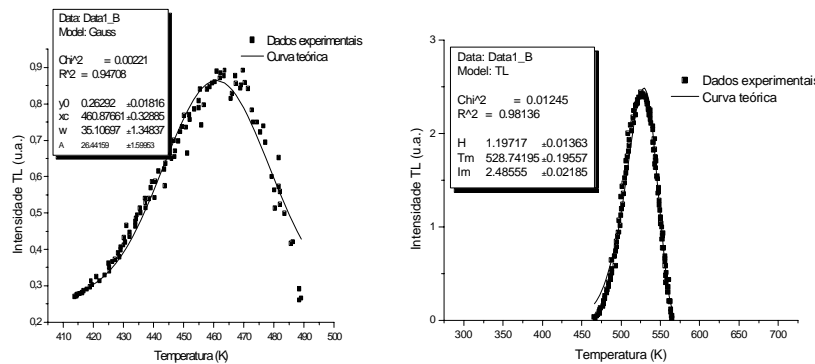


Figura 6 – Curva TL ajustada com os pontos gerados teoricamente para os picos em 190°C e 255°C.

A tabela 2 sumariza os resultados obtidos para os parâmetros cinéticos dos picos em 190 e 255°C. Como pode ser visto há uma boa concordância entre os dados encontrados pelos métodos da forma do pico e do ajuste da curva. Já o método da área não está em concordância com os outros dois métodos aplicados em nenhum dos dois picos. Isso é provavelmente devido ao problema da separação dos picos TL, pois nessa região há uma grande superposição e sua separação é bastante delicada, afetando demasiadamente o resultado quando aplicado o método da área, e que também justifica o fato da não linearidade dos pontos observados nos gráficos da figura 5.

Tabela 2- Parâmetros cinéticos dos pico em 190°C e 255°C do quartzo extraído do material de construção recozido obtidos pelos métodos de análise: FP- Método da forma do pico; MA – Método da Área; AC- Ajuste da Curva.

Temperatura do Pico (°C)	Profundidade da armadilha (eV)	Fator de frequência (s ⁻¹)	Método utilizado	Tempo de vida à 15°C
190 ±1	0,78 ±0,11	(1,35 ±0,40)x 10 ⁸	FP	(6,67±0,01) dias
190 ±1	0,79 ±0,01	(1,61 ±0,20)x10 ⁸	AC	(4,47±0,01) dias
190 ±1	0,45	(2,26 ±0,20)x10 ⁶	MA	61,8 s
255 ±1	1,170 ±0,004	(7,35±0,57)x10 ¹⁰	FP	(142±40) anos
255 ±1	1,190 ±0,013	(1,15±0,50) x 10 ¹¹	AC	(716±40) anos
252 ±1	1,63	(3±1)x10 ¹⁶	MA	3x10 ³ anos

Comparando com resultados encontrados na literatura, tanto os valores de energia quanto o fator de frequência encontrados neste trabalho para o pico em 190°C estão muito abaixo do identificado anteriormente. Além do mais, como as medidas foram realizadas 2 semanas após a irradiação e o tempo de vida dura em torno de poucos dias para esse faixa de temperatura, observa-se a incoerência nos dados experimentais. Mesmo nos valores publicados, não há uma boa convergência nos valores identificados de E e s para picos nessa região. Isso provavelmente está conectado à dificuldade de separação dos mesmos que estão sobrepostos, o que dificultaria também uma avaliação da dose acumulada em dosimetria retrospectiva.

Já para o pico em 255°C, os valores encontrados de E e s nesse trabalho são bastante compatíveis com aqueles encontrados na literatura [6] para picos nessa região. Isso provavelmente está conectado com o fato de ser este o pico mais intenso na região de temperaturas estudadas, o que facilita sua identificação e separação. Como seu tempo de vida calculado para temperatura de 15°C foi inferior a 1000 anos implica que ele não é suficientemente estável para datação. Neste caso, o sinal TL relacionando à dose de radiação natural é provavelmente bastante fraco, o que o torna interessante para dosimetria retrospectiva. Como o tempo de vida calculado é superior a centenas de anos, ele é suficientemente estável para avaliação da dose acumulada por um acidente radioativo, já que o decaimento do sinal seria desprezível em um período curto de avaliação e teria uma contribuição desprezível da TL geológica. Isso fortalece a idéia de usá-lo em dosimetria retrospectiva, mesmo em materiais não queimados, como argamassa ou mesmo cristais de quartzo natural.

4. CONCLUSÃO

O método da forma do pico apresentou resultados esperados, contudo por necessitar de picos isolados e sendo o quartzo um material que apresenta vários picos adjacentes, ele não é tão preciso uma vez que só utilizam-se três pontos e dois destes pontos T_1 e T_2 encontra-se em locais com provável existência de pontos com picos sobrepostos, o que pode implicar em uma possível incerteza no fator geométrico, bem como nos parâmetros cinéticos desejados. O método de ajuste linear da curva mostrou-se eficiente no cálculo dos parâmetros cinéticos, pois a curva teórica gerada pelo programa computacional (Origin®) encontra-se muito bem acoplada aos valores experimentais e os resultados encontrados estão de acordo o que se tem na literatura

[6]. Já o método da área não apresentou bons resultados para picos na faixa comumente usada para dosimetria, isso devido a presença de picos sobrepostos nesta região, o que interfere na linearidade dos mesmos, pois este método é muito sensível ao número de pontos gerados experimentalmente, e que provoca uma interferência considerável nos coeficientes linear e angular e, finalmente, nos parâmetros cinéticos desejados.

Justificado pela dificuldade de isolar os picos e o curto tempo de vida estimado, conclui-se que o pico de 190°C não deve ser utilizado para dosimetria de acidente radiativo. Contudo, o pico de 255°C apresentou tempo de vida bastante interessante, o que evidencia que ele poderá ser utilizado para a aplicação em dosimetria retrospectiva por apresentar a estabilidade desejada e pouca influência da TL geológica, bem como o tempo de vida desejado, sendo então útil na aplicação em dosimetria.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Apoio a Pesquisa e a Inovação Tecnológica de Sergipe (FAPITEC-SE), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-SP) pela irradiação das amostras.

-
1. MCKEEVER, Stephen W.S. *Thermoluminescence of solids*. 1st ed. Cambridge: Cambridge Uni. Press, 1997.
 2. Bull, Nucl. R. K. *Tracks Radiat. Meas.* 11 (1986) 105.
 3. AITKEN, Martin Jim. *Thermoluminescence Dating*. 1st ed. London: Academic Press, 1985.
 4. GOKSU, H.Y., Bailiff, I.K. V.B. Mikhailik, V.B. (2003) *New approaches to retrospective dosimetry using cementitious building materials* *Rad. Meas.* 37, 323 – 327
 5. CHEN, Reuven & MCKEEVER, Stephen W.S. *Theory of thermoluminescence and related phenomena*. 1st ed. Singapore: World Scientific, 1997.
 6. OLIVEIRA, Luiz C. de, BONFIM, Ana Paula S. SOUSA, Susana O.de: *Estudo dos Parâmetros Cinéticos do Pico Termoluminescente em 225°C do Quartzo Natural*. Scientia Plena. 2005.
 7. PAGONIS, Vasilis, KITIS, George, FURETTA, Claudio. *Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence*. 2006, XXII, Hardcover.
 8. OLIVEIRA, Luiz C.. *Estudo do Tempo de Vida dos Picos Termoluminescentes do Quartzo de Xingó e da Hidroxiapatita Sintética*. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Núcleo de Pós-graduação em Física da UFS. São Cristóvão, 2005.