

CONJUNTO DE DADOS DE ANNEALING DE TRAÇOS DE FISSÃO EM ZIRCÃO APLICADO À TERMOCRONOLOGIA POR TRAÇOS DE FISSÃO: ESTUDO DE CASO DE UMA AMOSTRA BRASILEIRA

Palavras-Chave: TERMOCRONOLOGIA POR TRAÇO DE FISSÃO; CONJUNTO DE DADOS DE ANNEALING, HISTÓRIA TÉRMICA.

Autores: MARCELA GUINThER MEDEIROS¹; LUCAS ALEXANDER NUNES¹; VINICIUS DE QUEIRÓS PEREIRA¹; ANTÔNIO SAID WEBBE SALES¹; AIRTON NATANAEL COELHO DIAS¹, ¹DFQM, CCTS, UFSCAR CAMPUS SOROCABA

Prof. Dr. NATANAEL COELHO DIAS¹, ¹DFQM, CCTS, UFSCAR CAMPUS SOROCABA

INTRODUÇÃO:

A Termocronologia por Traços de Fissão (TTF) vem sendo utilizada há décadas na datação e obtenção de história térmica (HT) de rochas em regiões de interesse geológico, a partir de diferentes minerais que possuem uma certa quantidade de U em sua composição, tais como zircão, foco deste trabalho. A metodologia baseia-se no estudo de traços de fissão gerados espontaneamente pelo ^{238}U ou induzidos em reator nuclear pelo ^{235}U . A idade da região geológica é obtida a partir da densidade superficial de traços e a HT é reconstruída a partir da medição dos traços confinados. No entanto, a obtenção da HT pode ser fortemente prejudicada se os traços foram apagados devido a um fenômeno térmico conhecido como *annealing*. Tal fenômeno pode ser melhor compreendido a partir de modelos cinéticos, conhecidos como modelos de *annealing*. Tais modelos usam um conjunto de dados que mostram como o fenômeno interfere nos traços de fissão. No entanto, o conjunto de dados disponível para a calibração de sistemas TTF foi obtido a partir de um zircão (chamado de NST) extraído de uma região que possui

uma história térmica definida por um rápido resfriamento e ausência de um posterior aquecimento geológico, sendo sua datação limítrofe da era geológica do Mioceno (~22 Ma). As características da amostra NST muitas vezes não se aplicam a outras regiões geológicas com histórias mais antigas e complexas, portanto, o objetivo deste estudo foi a obtenção de um novo conjunto de dados de annealing com zircões obtidos de uma região com uma história térmica e era geológica diferente. O novo conjunto de dados de *annealing* da amostra brasileira apresentado será aplicado a modelos de *annealing* e tem potencial como fonte de dados para reconstrução de histórias térmicas em regiões de interesse geológico.

METODOLOGIA:

Para tal foi escolhida uma amostra do complexo vulcânico denominado Serra Geral, Paraná, Brasil, chamada de ZAD cuja datação remonta à era mesozoica (~136 Ma). Os grãos de zircão foram separados usando técnicas convencionais como britagem, separação magnética e separação por

líquidos pesados, e foram divididos em duas alíquotas.

Uma alíquota dessa amostra foi preparada somente com traços de fissão induzidos (^{235}U) que então foi submetida a experimentos de aquecimento, por 1, 10 e 100 horas a temperatura entre 500 e 800 °C.

As amostras foram submetidas as mesmas condições experimentais (*annealing* e ataque químico) de Yamada et al. (1995a, 1995b). A amostra foi submetida ao ataque químico com KOH e NaOH (1:1) a 248 ± 2 °C. Apenas TINTs (*Tracks in Tracks*) com espessura de $1,0 \pm 0,5$ μm foram medidos. Os tempos de ataque foi de 45 horas.

Os traços foram medidos usando um microscópio Leica DM2700 M (à seco, aumento nominal de 1500 \times) com câmera acoplada Leica DMC2900 CCD.

Juntamente com os comprimentos dos rastros de fissão, seus ângulos relativos ao eixo C cristalográfico foram registrados usando o software de processamento de imagem LASV4.9. Os resultados dessas medições podem ser encontrados na Tabela 1.

Por fim, os resultados obtidos foram submetidos a análise usando dois modelos de *annealing*: Fanning Curvilinear de Crowley et al. (1991) e KM de Guedes et al. (2013). Os resultados são apresentados a seguir.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os dados plotados na Figura 1 e 2 nos mostram que modelo FC ajustado com os comprimentos reduzidos dos traços de fissão induzidos gerou bons ajustes de dados (Fig. 1a) e contornos de isoretenção coerentes (Fig. 1b). O mesmo pode ser percebido quando os dados são ajustados pelo modelo de Guedes et al. (2013).

Uma análise mais detalhada das extrapolações geológicas dos modelos de *annealing* apresentados pode ser extraída dos valores calculados da temperatura máxima (T_t) da PAZ, correspondendo a $r = 0,4$, e da temperatura mínima (T_b), correspondendo a $r = 0,9$. Os limites para duração de 1, 10, 100 e 1000 myr.

Tabela 1. Dados analíticos de medições do comprimento do traço de fissão do zircão ZAD.

t (h)	T (°C)	t _e (h)	N	L (μm)	sd (μm)	s _e (μm)	L/L ₀ (r)	Sdr (μm)
L ₀	-	45	75	10.21	1.18	0.12	-	-
1	600	45	89	9.04	3.16	0.33	0.88	0.03
1	625	45	176	8.27	2.28	0.17	0.81	0.01
1	675	45	165	7.68	1.66	0.13	0.75	0.01
1	700	45	169	7.45	1.26	0.10	0.73	0.01
1	750	45	6	7.12	0.79	0.32	0.70	0.03
1	775	45	11	6.23	2.13	0.64	0.61	0.06
1	800	45	-	-	-	-	-	-
10	575	45	271	8.40	2.17	0.13	0.82	0.01
10	650	45	48	7.56	1.26	0.18	0.74	0.02
100	500	45	100	8.43	2.48	0.24	0.83	0.02
100	550	45	330	7.70	1.48	0.08	0.75	0.01
100	600	45	126	7.34	1.15	0.10	0.72	0.01

t = tempo de aquecimento; T = temperatura de aquecimento; t_e = horas de gravação; N = número de traços medidas; L = comprimento médio do traço; sd = desvio padrão; s_e = erro padrão da média. L/L₀ (r) = razão de encurtamento do traço de fissão; Sdr = desvio padrão da razão L/L₀.

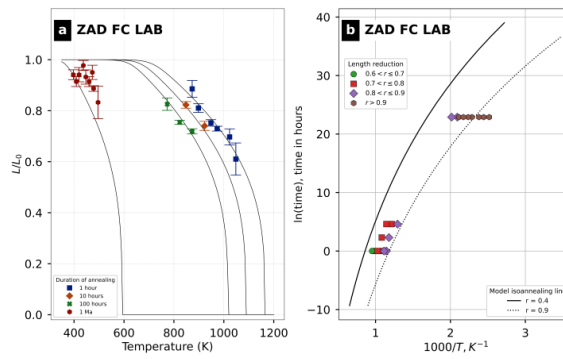


Figura 1 - Dados ajustados com o modelo Fanning Curvilnear, usando apenas dados obtidos no laboratório para a amostra ZAD. (a) Curvas de annealing e (b) Diagrama de Arrhenius.

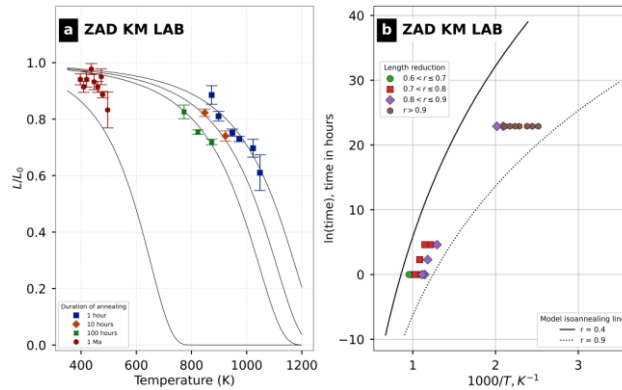


Figura 2 - Dados ajustados com o modelo de Guedes et al. (2013), usando dados obtidos no laboratório para a amostra ZAD. (a) Curvas de annealing e (b) Diagrama de Arrhenius.

A previsão dos modelos de FC e Guedes et al. (2013) usando apenas os dados de laboratório fornece temperaturas de limite para o recozimento de traços de fissão induzidos consistentes com a análise de energia de ativação.

Os intervalos de PAZ calculados para o ajuste do modelo são mostrados na Fig. 3. Em geral, incluir dados de 1 Ma no ajuste melhora a extrapolação do modelo quando comparado a referências geológicas tão antigas quanto 100 Ma.

A fim de caracterizar a amostra, foram realizadas análises de componentes pesados e Elementos Terras-Raras (ETR) via EMPA. A análise de componentes principais informa o conteúdo de ZrO_2 , SiO_2 e HfO_2 . Estes valores indicam uma cristalização a partir de um magma relativamente homogêneo em termos destes óxidos.

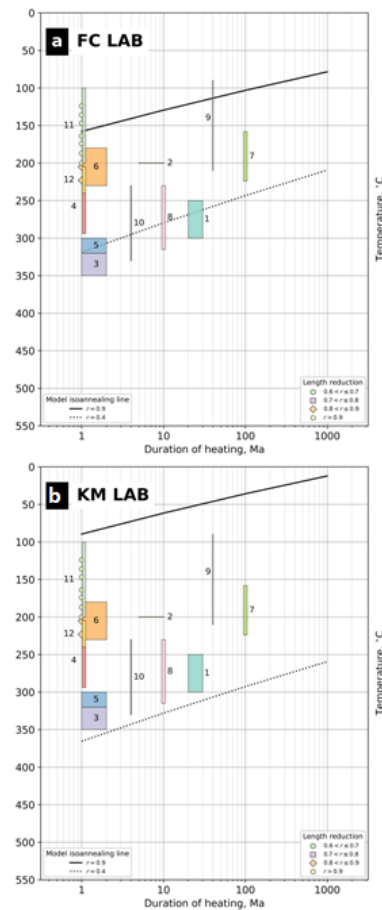


Figura 3 - Zona de annealing parcial (ZAP) calculada usando o modelo (a) FC e (b) KM usando dados obtidos em laboratório. A codificação de

cores corresponde ao intervalo de comprimentos reduzidos dos traços de fissão medidos em cada amostra. (1) Arkai et al. (1995), (2) Tagami et al. (1996), (3) Carpéna e Caby (1984), (4) Ito e Tanaka (1995), (5) Rahn e Brandon (1998), (6) Rahn et al. (2000), (7) Zaun e Wagner (1985), (8) Hasebe et al. (1997), (9) Ohmori et al. (1997), (10) Tagami e Shimada et al. (2003).

Níveis de HfO₂ acima de 2,0 wt% geralmente estão associados a uma maior evolução do magma, onde elementos incompatíveis, como o háfnio e zircônio, se concentram nos estágios finais de cristalização. O háfnio, quimicamente semelhante ao zircônio, frequentemente o substitui no cristal de zircão. Portanto, a variação nos níveis de HfO₂ pode refletir diferenças no ambiente ou na fonte magmática, sendo indicativa de processos de diferenciação magmática. Com um conteúdo de HfO₂ de 0,78 wt% na amostra analisada (ZAD), pode-se inferir que o magma não atingiu os últimos estágios de evolução, permanecendo relativamente homogêneo, como dito acima.

A razão entre os elementos traço Th/U para a amostra ZAD é 0,8, ou seja, para cada átomo de urânio há menos de um átomo de tório, essa razão é importante para a TTF, pois influencia a precisão das medições de dose de radiação e a interpretação dos dados geocronológicos. Uma alta proporção entre os números de átomos de tório em relação ao urânio faz com que a contribuição do tório para a radiação deve ser considerada.

A partir destes dados, também foi possível calcular o *displacement per atom* (dpa), utilizando a interface gráfica Radiation Damage in Materials (RDM) de Prearo et al. (2022). O dpa é definido como o número de átomos deslocados por interações energéticas de íons com a estrutura, normalizado pelo número de átomos no sólido. O dpa é calculado como o número total de átomos deslocados por interações de núcleos de recuo e partículas alfa de todos os decaimentos, que ocorreram durante a história

geológica desde o resfriamento através da zona de recozimento parcial de danos de recuo alfa, com a estrutura mineral, dividido pelo número total de átomos. O dpa é uma medida mais precisa de danos de radiação, porque considera diferentes energias envolvidas em diferentes decaimentos alfa. O resultado obtido neste trabalho foi de $1,07 \times 10^{-3}$.

CONCLUSÕES:

Este estudo apresenta novos dados de *annealing* dos traços de fissão induzidas em uma amostra de zircão. Em concordância com resultados anteriores da literatura, nosso estudo confirma que o dano por recuo alfa aumenta a taxa de *annealing* dos traços de fissão em zircão, particularmente em experimentos de *annealing* de temperatura mais baixa. Ainda, a cinética de *annealing* dos traços de fissão induzidas é coerente com o *annealing* em traços espontâneos em estágios avançados de temperatura.

Com base nos novos dados de *annealing*, parâmetros de ajuste são fornecidos para os modelos FC e KM de Guedes et al. (2013). A inclusão da extrapolação geológica de modelos ajustados apenas com os dados de laboratório produz temperaturas de *annealing* mais altas para os traços de fissão induzidas. A inclusão dos dados de recozimento de 1 Ma de Hasebe et al. (2003) orienta os modelos, ambos equipados com trajetórias de fissão induzida, para previsões geológicas mais precisas, mitigando pelo menos parcialmente os efeitos dos danos do recuo alfa na cinética de *annealing*.

BIBLIOGRAFIA

ARKAI, P.; BALOGH, K.; DUNKL, I. Timing of low-temperature metamorphism and cooling of the Paleozoic and Mesozoic formations of the Bükkium, innermost Western Carpathians, Hungary. *Geologische Rundschau*, v. 84, p. 334–344, 1995.

- CARPÉNA, J.; CABY, R. Fission-track evidence for late Triassic oceanic crust in the French Occidental Alps. **Geology**, v. 12, p. 108–111, 1984.
- CROWLEY, K. D.; CAMERON, M.; SCHAEFER, R. L. Experimental studies of annealing of etched fission tracks in fluorapatite. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 55, n. 5, p. 1449–1465, 1991.
- GUEDES, S.; MOREIRA, P. A. F. P.; DEVANATHAN, R.; WEBER, W. J.; HADLER, J. C. Improved zircon fission-track annealing model based on reevaluation of annealing data. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 40, n. 2, p. 93–106, 2013.
- HASEBE, N.; TAGAMI, T.; NISHIMURA, S. Melange-forming processes in the development of an accretionary prism: evidence from fission track thermochronology. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 102, p. 7659–7672, 1997.
- HASEBE, N.; MORI, S.; TAGAMI, T.; MATSUI, R. Geological partial annealing zone of zircon fission-track system: additional constrains from the deep drilling MITI-Nishikubiki and MITI-Mishima. **Chemical Geology**, v. 199, n. 1–2, p. 45–52, 2003.
- ITO, H.; TANAKA, K. Insights on the thermal history of the Valles caldera, New Mexico: evidence from zircon fission-track analysis. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 67, p. 153–160, 1995.
- OHMORI, K.; TAIRA, A.; TOKUYAMA, H.; SAKAGUCHI, A.; OKAMURA, M.; AIHARA, A. Paleothermal structure of the Shimanto accretionary prism, Shikoku, Japan; role of an out-of-sequence thrust. **Geology**, v. 25, p. 327–330, 1997.
- PREARO, I.; LIXANDRAO FILHO, A. L.; GUEDES, S. RDM: an R interface for high-throughput simulation of ion-material interactions using TRIM. **Computer Physics Communications**, v. 279, 108451, 2022.
- RAHN, M. K.; BRANDON, M. T. Prograde subgeenschist metamorphism in the Olympic Mountains: constraints on mineral stability and partial annealing temperatures for zircon fission tracks. In: **AGU Spring Meeting**, 1998.
- RAHN, M. K.; MULLIS, J.; BRANDON, M. T.; HURFORD, A. J. Field constraints on the zircon fission track partial annealing zone boundaries in fast evolving orogens. In: **GSA Annual Meeting 2000**, AAPG, A-152, 2000.
- RODEN, M. K.; ELLIOTT, W. C.; ARONSON, J. L.; MILLER, D. S. A Comparison of Fission-Track Ages of apatite and zircon to the K-Ar ages of illite-Smectite (I/S) from Ordovician K-Bentonites, southern Appalachian Basin. **The Journal of Geology**, v. 101, p. 633–641, 1993.
- TAGAMI, T.; CARTER, A.; HURFORD, A. J. Natural long-term annealing of the zircon fission-track system in Vienna Basin deep borehole samples: constraints upon the partial annealing zone and closure temperature. **Chemical Geology**, v. 130, p. 147–157, 1996.
- TAGAMI, T.; SHIMADA, C. Natural long-term annealing of the zircon fission track system around a granitic pluton. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 101, p. 8245–8255, 1996.
- YAMADA, R.; TAGAMI, T.; NISHIMURA, S. Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study. **Chemical Geology**, v. 122, n. 1–4, p. 249–258, 1995a.
- YAMADA, R.; TAGAMI, T.; NISHIMURA, S. Confined fission-track length measurement of zircon: assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. **Chemical Geology**, v. 119, n. 1–4, p. 293–306, 1995b.
- ZAUN, P. E.; WAGNER, G. A. Fission-track stability in zircons under geological conditions. **Nuclear Tracks**, v. 10, n. 3, p. 303–307, 1985.