Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física "Gleb Wataghin"

CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE *ANNEALING* DE TRAÇOS DE FISSÃO EM ZIRCÃO A PARTIR DE DADOS GEOLÓGICOS

Doutorado

Candidata: Rosane Palissari
Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Hadler Neto
Co-orientador: Prof. Dr. Peter Christian Hackspacher

Este exemplar corresponde à redação final
da tese de doutorado defendida pela aluna
Rosane Palissari e aprovada pela comissão julgadora.

21/07/08

Tese submetida ao Instituto de Física "Gleb Wataghin" da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutora em Física

Campinas - Dezembro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP

Palissari, Rosane

P176c Calibração de modelos de *annealing* de traços de fissão em zircão a partir de dados geológicos / Rosane Palissari. -- Campinas, SP : [s.n.], 2007.

Orientador: Julio Cesar Hadler Neto.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin".

1. Traços de fissão. 2. Zircão. 3. Annealing. I. Hadler Neto, Julio Cesar. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin". III. Título.

(vsv/ifgw)

- **Título em inglês:** Calibrating fission-track annealing models for zircon using geological information
- **Palavras-chave em inglês (Keywords):**
  1. Fission tracks
  2. Zircon
  3. Annealing
- **Área de concentração:** Geofísica Nuclear
- **Titulação:** Doutora em Ciências
- **Banca examinadora:**
  Prof. Julio Cesar Hadler Neto
  Prof. Ernesto Kemp
  Prof. Marcelo Morais Guzzo
  Prof. Alvaro Penteado Crósta
  Prof. Sandro Guedes de Oliveira
- **Data da defesa:** 13/12/2007
- **Programa de Pós-Graduação em:** Física

UNICAMP IFGW Instituto de Física Gleb Wataghin
Secretaria de Pós-Graduação - Tel: (19) 3521-5305 FAX: (19) 3521-4142

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **ROSANE PALISSARI - RA 855515,** APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA "GLEB WATAGHIN" DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 13/12/2007.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Julio Cesar Hadler Neto – DRCC/IFGW/UNICAMP
(Orientador da Candidata)

Prof. Dr. Sandro Guedes de Oliveira – DCET/UNIFESP/SP

Prof. Dr. Álvaro Penteado Crosta – DMG/IG/UNICAMP

Prof. Dr. Ernesto Kemp – DRCC/IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Marcelo Moraes Guzzo – DRCC/IFGW/UNICAMP

Às grandes mulheres da minha vida,
avó Amélia (in memoriam) e Neyde, minha mãe.

Agradecimentos

Ao Professor Julio, pela oportunidade única de retorno ao meio científico, pelo saudável convívio acadêmico e pela transparência na transmissão de valores científicos e morais.

Ao Sandro, pelos ensinamentos valiosos e permanentes, pela sua sagacidade, amizade e apoio.

Ao Pedro, mentor de todos nós, pelo apoio fundamental em todos momentos deste trabalho.

Ao Eduardo, Pedrão e Carlos, pelas boas risadas e troca de experiências atemporais e culturais. “Cê sabe o que é digoreste ?“

Ao Igor e ao Osvaldo, pratas novas da casa.

Ao Professor Peter, pelo exemplo de dedicação e paixão à Geologia.

À todo o pessoal da Unesp de Rio Claro que colaborou para este trabalho. Sem nomes, para não esquecer ninguém.

Aos funcionários do DRCC, Sandra e Nivaldo.

Aos funcionários da Secretaria da Pós-Graduação, Maria Ignêz, Armando e Cássia pela atenção e apoio.

À minha irmã Roselí, entre idas e vindas, a minha irmã.

À Mirnis e Sânzio, que enriqueceram nosso vocabulário afetivo.

Ao Dailto, amigo de profissão.

Aos novos amigos Maria Aparecida e Cristiano pelo convívio diário.

À turma toda (em ordem alfabética!): Ailton, Ana Cristina, Carlino, Gilmar, Gilson, Hypólito, Luiz, Luizinho, Maria Augusta, Rita, Rolf, Rosi, Silvia, Wônia ....

Em especial à amiga Mara, presente nas horas boas e incondicionalmente nas mais difíceis.

“A vida é maravilhosa, mesmo quando dolorida.
Eu gostaria que na correria da época atual a gente pudesse se permitir,
criar, uma pequena ilha de contemplação, de autocontemplação,
de onde se pudesse ver melhor todas as coisas:
com mais generosidade, mais otimismo, mais respeito,
mais silêncio, mais prazer. Mais senso da própria dignidade,
não importando idade, dinheiro, cor, posição, crença. Não importando nada”.

Lya Luft

RESUMO

O Método dos Traços de Fissão (MTF) é uma das técnicas mais poderosas usadas para descrever as histórias térmicas de rochas presentes na camada da superfície terrestre, sob condições de baixa temperatura. Se a rocha hospedeira teve a temperatura elevada em um dado período, os traços de fissão que se formaram desde então, são encurtados irreversivelmente ou apagados (os traços sofrem *annealing*), como conseqüência de um processo de difusão termicamente ativada.

Os minerais mais comumente utilizados no MTF são a apatita e o zircão, sendo este último o objetivo deste trabalho. O zircão é sensível ao *annealing* térmico sob temperaturas mais altas que a temperatura de fechamento da apatita, que é aproximadamente 120 ºC .

As características do *annealing* dos traços de fissão em zircão têm sido obtidas utilizando-se dados de experimentos de laboratório, que são executados em tempos menores que 1 ano, e comumente em tempos ainda menores. Estes dados são usados para calibrar modelos de *annealing* empíricos, que descrevem a dependência do encurtamento dos traços com o tempo e a temperatura. No entanto, um problema de ordem prática é a incerteza introduzida na extrapolação para tempos geológicos (10^6 – 10^8 anos), através dos modelos calibrados pelos dados de laboratório (< 1 ano).

Um dos objetivos deste estudo é fornecer condições de contorno adicionais para a faixa de tempo-temperatura da zona de *annealing* do zircão, através de dados de zircões de poços, cujas amostras foram expostas a temperaturas estáveis por ~1 milhão de anos. Desta forma, o

problema da extrapolação é abordado explicitamente ajustando-se os modelos a dados geológicos.

Vários modelos de *annealing* foram propostos na literatura de traços de fissão. A formulação básica destes modelos baseia-se na equação de Arrhenius e foi apresentada por Laslett *et al.* (1987). Existem outros modelos de *annealing* que são baseados no mesmo princípio: Crowley *et al.* (1991); Laslett e Galbraith (1996); Rahn *et al.* (2004) e Yamada *et al.* (2007). Estes modelos têm sido usados preferencialmente, uma vez que inúmeros fenômenos, desde a formação dos traços até o ataque químico, não são bem entendidos ainda. Porém, dois outros modelos calibrados no presente trabalho (Carlson, 1990; Guedes *et al.*, 2005a), procuram estabelecer uma correlação direta entre seus parâmetros e os fenômenos envolvidos. Os ajustes dos vários modelos foram comparados entre si, levando-se em conta considerações estatísticas.

Além das calibrações efetuadas ajustando-se os modelos a dados geológicos, foram abordadas comparações de previsões dos modelos (relacionadas com as fronteiras da Zona de *Annealing* Parcial) com outros dados geológicos baseados em densidades de traços de fissão.

ABSTRACT

Fission-track (FT) analysis has developed into one of the most useful technique used to constrain the low-temperature thermal history of rocks in the upper part of the Earth´s crust. If a host rock is subjected to elevated temperatures, fission tracks that have formed up to that point in time are shortened irreversibly or annealed, as a consequence of a thermally activated diffusion process.

The most commonly analysed minerals are apatite and zircon and the latter is the focus of this work, since this mineral is sensitive to thermal *annealing* at higher temperatures, while the close temperature for apatite is around 120 ºC.

Short-term *annealing* characteristics of FT in zircon are generally based on laboratory experiments which are performed on timescales of less than 1 year, and typically much less. These data have been used to calibrate *annealing* empirical models, that describe the temperature and time dependence of fission track shortening. However, a practical problem is the uncertainty introduced through the extrapolation of laboratory calibrated models (< 1 year) to geological timescales (10^6 – 10^8 years).

One of the purpose of this study is to give further constraints on the temperature range of the zircon *annealing* zone over a geological time scale using zircons data from boreholes, which samples have been exposed to a stable temperature for ~1 Ma. In this way, the extrapolation problem is explicity adressed by fit the zircon *annealing* models with geological timescale data.

Several empirical models formulations have been proposed to perform these calibrations and have been compared in this work. The basic formulation is an Arrhenius-type model and is

given by Laslett *et al.* (1987). There are other *annealing* models which are based on the same general formulation: Crowley *et al.* (1991); Laslett and Galbraith (1996); Rahn *et al.* (2004) and Yamada *et al.* (2007). These models equations have been preferred due to the great number of fenomena from track formation to chemical etching that are not well understood. However, two other calibrated models in this work (Carlson, 1990; Guedes *et al.*, 2005a) try to stablish a direct correlation between their parameters and the related fenomena. Several model fits are compared by themselves, considering statistical data.

Besides calibrating annealing models with geological timescale data, model predictions (related with Parcial Annealing Zone boundaries) were compared with another geological data.

Apoio financeiro

Este projeto foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior,CAPES, através de bolsa de pós-graduação entre agosto e dezembro de 2002, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, através de bolsa de pós−graduação entre agosto de 2003 e dezembro de 2004, e pelo Projeto Temático FAPESP número 00/3960-5, coordenado pelo Prof. Peter Christian Hackspacher do Instituto de Geociências Exatas Rio Claro/UNESP entre março de 2003 a junho de 2003.

Sumário

1. INTRODUÇÃO

O Método dos Traços de Fissão (MTF) é atualmente a técnica mais importante usada para se reconstruir a história térmica de rochas em tempos geológicos. O método, desenvolvido no início dos anos sessenta (Price e Walker, 1962 a, b, c, d; Fleisher e Price, 1963; Price e Walker, 1963), baseia-se no estudo de materiais dielétricos que em geral contêm algumas partes por milhão de urânio, como vidros naturais e minerais (por ex. apatita, zircão, titanita). Os fragmentos nucleares obtidos pelo decaimento por fissão espontânea do ^{238}U, isótopo mais abundante do urânio natural, liberam energia e atravessam a rede cristalina do mineral. A zona desarranjada gerada na rede pelos fragmentos de fissão, denomina-se “traço latente”. Ao longo da história geológica do mineral, os traços latentes são produzidos cumulativamente a uma taxa que depende somente da concentração de urânio.

A observação dos traços de fissão em um microscópio óptico é possível através de um ataque químico apropriado. Os reagentes químicos e as condições do ataque foram estudados em vários minerais (Fleisher *et al.* 1975; Wagner e Van den Haute, 1992).

Em princípio, vários parâmetros geológicos são capazes de influenciar a estabilidade dos traços latentes nos minerais, de modo que haja a reconstituição das zonas desarranjadas, e ocorra o apagamento do traço. A temperatura é o parâmetro que mais produz efeitos consideráveis. À sensibilidade dos traços de fissão a tratamentos térmicos com o tempo, dá-se o nome de *annealing* (Bigazzi, 1967; Wagner, 1968). Este processo faz com que haja o “encurtamento” dos traços, ou seja, uma redução em seu comprimento, reduzindo a densidade dos traços observáveis. Os traços mais antigos tendem a ser mais curtos que os formados recentemente, uma vez que eles estão sofrendo *annealing* há mais tempo e devem ter permanecido sob temperaturas mais altas. Sendo assim, os traços de fissão são termocronômetros poderosos e pode-se a partir de sua distribuição de comprimentos reconstruir a história térmica da rocha contendo o mineral onde os traços foram gerados.

Os fenômenos físico-químicos que ocorrem durante o *annealing* vem sendo estudados desde a década de 70 (por exemplo, Haack,1972; Crowley, 1985; Bigazzi *et al.*, 1988; Carlson, 1990; Tello, 1998) mas ainda hoje não são bem conhecidos. Uma série de trabalhos, inicialmente em apatitas, procurou dar uma descrição mais detalhada do processo de *annealing*. Um dos primeiros foi o desenvolvido por Green *et al.* (1986) que observaram a redução do comprimento em traços horizontais induzidos confinados em apatitas de Durango (México) em tempos de laboratório. Em seguida, Laslett *et al.* (1987) realizaram uma análise estatística destes dados e propuseram uma equação empírica que descrevia os resultados de laboratório satisfatoriamente e, em princípio, permitia a extrapolação para tempos geológicos. Duddy *et al.* (1988) apresentaram uma série de experimentos que suportavam a hipótese do *tempo equivalente*, que diz que o comportamento do *annealing* de um traço é função somente de seu comprimento e é insensível à história de tempo-temperatura prévia que foi responsável pelo comprimento em questão. Todas estas questões permitiram a Green *et al.* (1989) construírem um modelo completo para descrever a evolução da distribuição de comprimentos dos traços de fissão em função do tempo e da temperatura.

O Grupo de Cronologia do Instituto de Física “Gleb Wataghin” da UNICAMP, dirigido pelo Prof. Dr. Julio Cesar Hadler Neto, já efetuou estudos sistemáticos de *annealing* em laboratório. O grupo domina esta técnica e a vem empregando em trabalhos com os minerais apatita (Tello, 1998; Guedes *et al.*, 2007), zircão e epídoto (Curvo *et al.*, 2005). A metodologia descrita por Laslett *et al.*

(1987) tem sido usada e complementada pelo denominado “Modelo Inverso” proposto por Lutz e Omar (1991).

Embora a apatita seja o mineral mais largamente estudado, com temperatura de fechamento de ~ 120 ºC, o zircão também passou a ser usado, uma vez que este mineral apresenta temperatura de fechamento por volta de 230 ºC.

No caso do zircão, o conjunto de dados mais completo foi obtido por Yamada *et al.* (1995) e complementado por Tagami *et al.* (1998). Este conjunto de dados vem sendo usado para calibrar os modelos de *annealing* (Yamada *et al.*, 1995; Galbraith e Laslett, 1997; Tagami *et al.*, 1998; Guedes *et al.*, 2005a). Recentemente, foram somados a este conjunto, dados de Murakami *et al.* (2006) obtidos sob condições de aquecimento sob altas temperaturas em tempos curtos (< 4min).

Para o zircão, o conjunto de dados de laboratório abrange tempos de 3,5 segundos a 10.000 horas. As equações dos modelos de *annealing* são estritamente calibradas pelos dados que estão presentes na faixa de tempo dos experimentos. No entanto, as aplicações geológicas requerem, no mínimo, extrapolação para tempos de milhões de anos. Sendo assim, as previsões geológicas obtidas por estas equações devem ser comparadas com as evidências de campo. Rahn *et al.* (2004) compilaram um conjunto de evidências de campo, para a Zona de *Annealing* Parcial (ZAP) e temperatura de fechamento para diversas taxas de resfriamento. Comparando-se as previsões dos modelos com os dados de campo, notou-se que os modelos previam temperaturas de fechamento mais elevadas. Eles atribuíram esta discordância a defeitos causados pelo recuo dos átomos ao emitir partículas alfa em zircão, que modificam a estrutura cristalina de tal mineral (Palenik *et al.*, 2003).

Embora os defeitos causados pelo recuo dos átomos na emissão de partículas alfa não devam ser descartados, o erro ao se extrapolar as equações dos modelos deve ser considerado. Cada equação apresenta um comportamento peculiar e, deste modo, as diversas equações geram previsões diferentes, mesmo quando calibradas com o mesmo conjunto de dados. Um dos principais objetivos do presente trabalho está inserido neste contexto, que é a proposta de melhorar a extrapolação para tempos geológicos, incorporando-se dados geológicos aos conjuntos de dados de laboratório. Para isso se utilizou o conjunto de dados apresentado por Hasebe *et al.* (2003). Estes dados consistem em traços de fissão medidos em amostras pertencentes aos poços MITI-Nishikubiki e MITI-Mishima, Japão, coletadas a profundidades de ~3.5 – 6.2 km, com temperaturas na faixa de ~120 – 238 ºC. Existem evidências que estas amostras estiveram sob paleotemperaturas estáveis no último milhão de ano. Eles serão tratados como o "conjunto de dados de 1 Ma".

Nas seções abaixo estão descritos os modelos de *annealing* mais utilizados hoje dentro da análise de traços de fissão. Em seguida, são obtidos os parâmetros para as equações dos modelos descritos, usando-se conjuntamente os dados de laboratório e os geológicos. As previsões geológicas obtidas a partir destes dados são então comparadas com o conjunto de dados de campo de Rahn *et al.* (2004). Finalmente, as implicações destes procedimentos são discutidas.

2. MODELOS DE *ANNEALING* DE TRAÇOS DE FISSÃO

É possível se obter uma descrição quantitativa do *annealing* dos traços de fissão em função do tempo e da temperatura, através dos modelos de *annealing*. Basicamente, são feitas duas abordagens. A primeira é utilizar uma equação empírica, mas cineticamente possível, para ajustar os dados e a segunda é propor um modelo teórico para o *annealing* dos traços e com o auxílio de um conjunto de dados experimentais fazer ajustes para se encontrar os parâmetros desconhecidos, cada qual com um significado físico. A vantagem em se utilizar uma modelagem com parâmetros com significado físico é que isso pode permitir que parâmetros relacionados com os fenômenos envolvidos no processo de *annealing* sejam determinados também de forma independente, sem o auxílio dos dados utilizados exclusivamente para o ajuste dos modelos. Com isso, em princípio, pode-se obter uma extrapolação mais confiável para tempos geológicos de milhões de anos. No entanto, todas as abordagens vistas até o momento são essencialmente empíricas.

Os modelos de *annealing* têm a seguinte forma:

$$g(l;l_0,\alpha,\beta) = F(t,T;C_i) \tag{1}$$

onde g é uma função do comprimento médio dos traços, l, do comprimento inicial, l_0 e de dois parâmetros de ajuste α e β . F é uma função do tempo t e temperatura T com parâmetros C_i a serem obtidos através dos ajustes das equações.

2.1. Diagrama de Arrhenius

Os modelos de *annealing* podem ser definidos pelo diagrama de Arrhenius, onde a variável que representa o *annealing* dos traços de fissão é grafada no espaço 1/T, log t, onde T é a temperatura absoluta (em Kelvin) e t é o tempo (em segundos).

No diagrama de Arrhenius (Fig. 1), as curvas são descritas pela equação fundamental:

$$\ln t = A(r) + B(r)h(T) \qquad (2)$$

onde A é o coeficiente de intersecção, B é o coeficiente angular, t é o tempo normalizado (o fator normalizador é 1s), h(T) é a função de transformação da temperatura e r é o comprimento reduzido dos traços que é dado por:

$$\mathrm{r} = l \,/\, l_0 \qquad (3)$$

onde l é o comprimento medido do traço que sofreu *annealing* e l_0 é o comprimento do traço antes de sofrer *annealing*.

Quatro modelos de diagramas são obtidos em função das características de B e h(T), conforme mostrado a seguir (Fig. 1a-d). São eles:

(a)	h(T) = 1/T	B = constante	Paralelo-linear
(b)	h(T) = ln(1/T)	B = constante	Paralelo-curvilinear
(c)	h(T) = 1/T	$B = B$ (r)	*Fanning*-linear
(d)	h(T) = ln(1/T)	$B = B$ (r)	*Fanning*-curvilinear

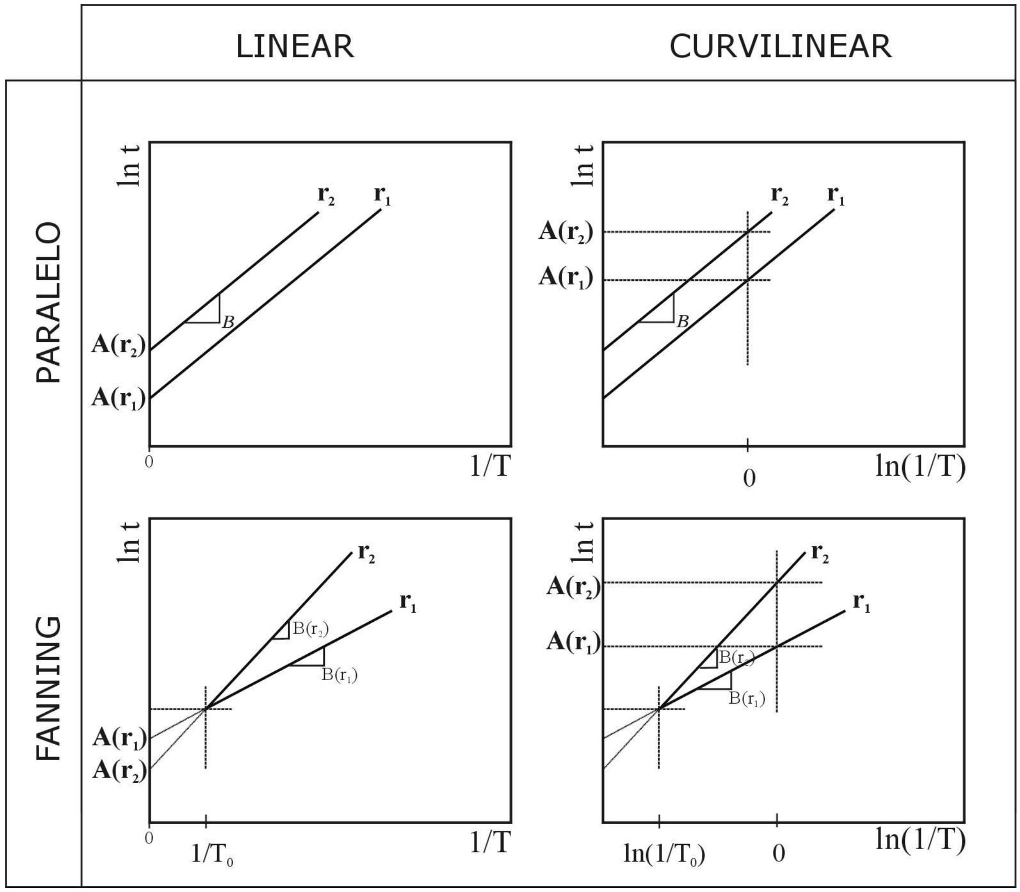

Fig.1. Esquema do diagrama de Arrhenius mostrando as diversas geometrias obtidas em função das características de B e *h*(T). (a) paralelo linear; (b) paralelo curvilinear; (c) *fanning* linear e (d) *fanning* curvilinear.

Os modelos descritos abaixo foram apresentados por: Laslett *et al.* (1987); Crowley *et al.* (1991); Laslett e Galbraith (1996); Rahn *et al.* (2004); Yamada el al. (2007); Carlson (1990) e; Guedes *et al.* (2005a). Sendo que, nos dois últimos tentou-se descrever mecanismos de *annealing* com significado físico.

2.2. *Fanning* Linear de Laslett *et al.* (1987)

Historicamente, o modelo de *annealing* mais popular é o modelo *Fanning* Linear de Laslett *et al.*(1987). A equação mais geral do modelo é dada por:

$$\ln(t) = A^{'}(r) + B(r)\left(1/T\right) \quad (4)$$

O modelo de Laslett *et al.* (1987) parametrizado considera:

$$A^{'}(r) = A(r) - B(r)(1/T_0) \quad (5)$$

substituindo a equação (5) em (4), tem-se:

$$\ln(t) = A(r) + B(r)\left[\left(1/T\right) - \left(1/T_0\right)\right] \quad (6)$$

A equação (6) define um conjunto de retas de contorno para annealing constante, ou seja para um mesmo valor da redução do comprimento, r , que se cruzam no ponto (ln (t_o); 1/T_o). A partir da equação (6) obtêm-se:

$$B(r) = \frac{\left[\ln t - A(r)\right]}{\left[\left(1/T\right) - \left(1/T_0\right)\right]} \quad (7)$$

O modelo supõe ainda:

$$g(r) = C_0 + C_1 B(r) \quad (8)$$

Substituindo-se a eq. (7) em (8), tem-se:

$$g(r) = C_0 + C_1\left[\frac{\ln(t) - A(r)}{(1/T) - (1/T_0)}\right] \tag{9}$$

ou ainda, na forma mais conhecida, onde $A(r) = C_2$ e $(1/T_0) = C_3$, tem-se:

$$F(t,T) = C_0 + C_1\left[\frac{\ln(t) - C_2}{(1/T) - C_3}\right] \tag{10}$$

Laslett e colaboradores adotaram a função de transformação *g* apresentada por Box e Cox (1964), tal que:

$$g(r) = \frac{\left[\left(1 - r^{\beta}\right)/\beta\right]^{\alpha} - 1}{\alpha} \tag{11}$$

Laslett *et al.* (1987) fez ajustes dos dados de Green *et al.* (1986) para a apatita de Durango e propôs o melhor ajuste fazendo $C_3 = 0$ na equação (10) acima.

Substituindo-se as equações (10) e (11) na equação (1) se chega no modelo *Fanning* Linear de Laslett *et al.*(1987).

2.3. *Fanning* Curvilinear de Crowley *et al.* (1991)

O modelo de Crowley *et al.* (1991) procurou generalizar o modelo proposto por Laslett *et al.* (1987), utilizando na equação (1) as seguintes funções g e F:

$$g(r) = \frac{\left[\left(1 - r^{\beta}\right)/\beta\right]^{\alpha} - 1}{\alpha} \tag{12}$$

$$F(t,T) = C_0 + C_1\left[\frac{\ln(t) - C_2}{\ln(1/T) - C_3}\right] \tag{13}$$

Nos dois modelos descritos acima foi usada a função de transformação *g* apresentada por Box e Cox (1964).

2.4. Paralelo linear de Lasllet e Galbraith (1996)

Lasllet e Galbraith (1996) propuseram um modelo paralelo linear utilizando-se na eq.(1) as seguintes funções g e F:

$$g(l) = \ln\left[1 - \left(l/l_{\max}\right)^{1/C5}\right] \tag{14}$$

$$F(t,T) = C_1 + C_2\left[\ln(t) - \frac{C_3}{T}\right] \tag{15}$$

2.5. *Fanning* linear de Lasllet e Galbraith (1996)

Lasllet e Galbraith (1996) propuseram um modelo *fanning* linear utilizando-se na eq.(1) as seguintes funções g e F:

$$g(l) = \ln\left[1 - \left(\frac{l}{l_{max}}\right)^{1/C^5}\right] \tag{16}$$

$$F(t,T) = C_1 + C_2\left[\frac{\ln(t) - C_3}{(1/T) - C_4}\right] \tag{17}$$

Nos modelos propostos por Laslett e Galbraith (1996), l_{max} descreve o "verdadeiro" (mas desconhecido, pois é obtido pelo ajuste) comprimento médio inicial do traço. Um dos motivos de se propor este ajuste para l_0 é devido aos resultados apresentado por Donelick *et al.*(1990) para apatitas, que sugerem que o *annealing* ocorre mesmo em amostras à temperatura ambiente logo após a irradiação das mesmas. No entanto, não há nenhum *annealing* em zircão nestas temperaturas, devido a maior resistência ao *annealing* comparado à apatita (Hasebe *et al.*, 1994).

Os modelos propostos por Laslett e Galbraith (1996) aplicado para apatitas foi logo em seguida revisto para o zircão em Galbraith e Laslett (1997).

2.6. Paralelo Linear de Rahn *et al.* (2004)

Rahn *et al.* (2004) propuseram um modelo paralelo linear utilizando-se na eq.(1) as seguintes funções g e F:

$$g(r) = \ln(1 - r) \tag{18}$$

$$F(t,T) = C_o + C_1(1/T) + C_2 \ln(t) \tag{19}$$

2.7. *Fanning* Linear de Rahn *et al.* (2004)

Rahn *et al.* (2004) propuseram um modelo *Fanning* linear utilizando-se na eq.(1) as seguintes funções g e F:

$$g(r) = \ln(1 - r) \tag{20}$$

$$F(t,T) = C_0 + C_1 T \ln(t) + C_2 T \tag{21}$$

Estes autores propõem o chamado modelo "zero-defeito" para o *annealing* de traços de fissão em zircão. Segundo os autores, a cinética do *annealing* é influenciada pelos defeitos na rede cristalina causados por decaimentos de partículas alfa (α mais recuo do núcleo). Os defeitos-α podem variar de acordo com a idade, conteúdo de tório e urânio e tratamento térmico sofrido pelo mineral. O termo "zero-defeito" é utilizado para descrever conjuntos de dados obtidos em zircões que sofreram tratamentos térmicos suficientemente fortes para apagar todos os danos de alfa, assim como traços de fissão (tratamentos de 800°C por 1 h). Em seguida os zircões são irradiados para se obter traços de fissão induzida e estes traços (livres de annealing) são submetidos a tratamentos térmicos para o estudo do annealing.

2.8. Paralelo Curvilinear (Yamada *et al.*, 2007)

Yamada *et al.* (2007) propuseram um modelo paralelo curvilinear utilizando-se na eq.(1) as seguintes funções g e F:

$$g(l) = \ln\left[-\ln\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)\right] \tag{22}$$

$$F(t,T) = C_0 + C_1\left[\ln(t) - C_2 \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right] \tag{23}$$

O ajuste de Yamada *et al.* (2007) foi o primeiro a utilizar os dados de Murakami *et al.* (2006), para tempos muito curtos.

Os tipos de modelos citados acima podem ser resumidos da seguinte forma:

***Fanning* Linear** Laslett *et al.* (1987)	$g(r) = \frac{\left[\left(1 - r^{\beta}\right)/\beta\right]^{\alpha} - 1}{\alpha}$	$F(t,T) = C_0 + C_1 \frac{\ln(t) - C_2}{1/T - C_3}$
***Fanning* Curvilinear** Crowley *et al.* (1991)	$g(r) = \frac{\left[\left(1 - r^{\beta}\right)/\beta\right]^{\alpha} - 1}{\alpha}$	$F(t,T) = C_0 + C_1 \frac{\ln(t) - C_2}{\ln(1/T) - C_3}$
Paralelo Linear Laslett e Galbraith (1996)	$g(l) = \ln\left[1 - \left(l/l_{\max}\right)^{1/C5}\right]$	$F(t,T) = C_1 + C_2\left[\ln(t) - \frac{C_3}{T}\right]$
***Fanning* Linear** Laslett e Galbraith (1996)	$g(l) = \ln\left[1 - \left(l/l_{\max}\right)^{1/C5}\right]$	$F(t,T) = C_1 + C_2\left[\frac{\ln(t) - C_3}{(1/T) - C_4}\right]$
Paralelo Linear Rahn *et al.* (2004)	$g(r) = \ln(1 - r)$	$F(t,T) = C_o + C_1(1/T) + C_2\ln(t)$
***Fanning* Linear** Rahn *et al.* (2004)	$g(r) = \ln(1 - r)$	$F(t,T) = C_0 + C_1 T\ln(t) + C_2 T$
Paralelo Curvilinear Yamada *et al.* (2007)	$g(l) = \ln\left[-\ln\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)\right]$	$F(t,T) = C_0 + C_1\left[\ln(t) - C_2\ln\left(\frac{1}{T}\right)\right]$

Tabela 1. Conjunto completo de equações parametrizadas para os modelos de annealing.

2.9. Modelo de Carlson (1990)

O modelo de Carlson (1990) é obtido substituindo-se na equação (1) as seguintes funções g e F:

$$g(r) = \ln(1 - r) \tag{24}$$

$$F(t,T) = \ln\left(\frac{A}{l_0}\right) + n\ln\left(\frac{k_B T}{h}\right) + n\left(\ln t - \frac{Q}{RT}\right) \tag{25}$$

onde k é a constante de Boltzmann (3.2997 x 10^{-27} kcal·K^{-1}), h é a constante de Planck (1.5836 x 10^{-37} kcal·s), e R é a constante universal dos gases (1.987 x 10^{-3} kcal·mol^{-1}·K^{-1}) e para normalização futura de nomenclatura: $A = C_0$; $n = C_1$; $Q = C_2$ e $l_0 = C_3$.

Neste modelo, a zona desarranjada é considerada cilíndrica próxima ao eixo axial central e cônica ao se aproximar das extremidades. O modelo prevê dois estágios no processo de *annealing* dos traços: primeiramente há uma redução axial que produz o encurtamento do comprimento e numa etapa subseqüente há a segmentação do traço.

Na Fig. 2 encontra-se uma representação esquemática da zona desarranjada, assumida por Carlson, para o traço de fissão latente. Nesta figura, vê-se uma região central cilíndrica de comprimento L e largura w da ordem de dezenas de Å. As extremidades desta região terminam em forma cônica.

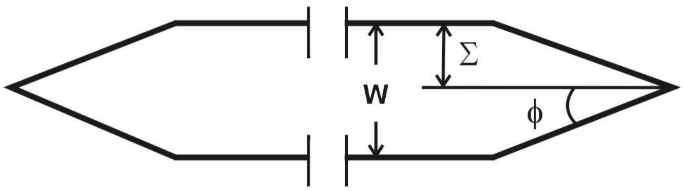

Fig. 2. Representação esquemática do traço latente após o *annealing* (sem escala).

O modelo procura calcular o comprimento l_{ea}, de um traço de fissão de comprimento inicial l_0 , durante um evento de *annealing* de duração Δt. O traço sofre um decréscimo no raio $\Delta\Sigma$, simultaneamente a um decréscimo no comprimento, $\Delta l/2$ em cada extremidade. De acordo com a geometria da Fig. 2, tem-se:

$$l = l_0 + \int_0^t \left(\frac{dl}{d\tau} \right) d\tau \tag{26}$$

$$l = l_0 + \frac{2(\frac{w}{2})}{tg\phi} \int_0^t \left(\frac{d\Sigma}{d\tau} \right) d\tau \tag{27}$$

Então:

$$l_{ea} = l_0 + \frac{w}{tg\phi} \Delta \Sigma \tag{28}$$

onde w é a largura inicial do traço. O decréscimo do raio da zona desarranjada ($\Delta\Sigma$) depende, segundo o autor, principalmente da taxa de eliminação de defeitos e da distribuição inicial de defeitos.

Carlson (1990) assume que a taxa de eliminação de defeitos obedece a seguinte equação:

$$\frac{dN}{dt} = -C\left(\frac{kT(t)}{h}\right)\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{29}$$

Onde k é a constante de Boltzman; h é a constante de Planck; C (> 0) é uma constante empírica; Q (>0) é a energia de ativação necessária para que os átomos retornem ao seu lugar de origem; R é a constante universal dos gases; e T(t) é a temperatura absoluta no tempo t. A equação (29) se assemelha à equação cinética para movimento de átomos através de uma interface coerente proposta por Turnbull (1956).

Carlson assumiu que a distribuição radial de defeitos nos traços é:

$$N(t = 0,\Sigma) = N_0(1 - \Sigma)^{1/n} \tag{30}$$

onde n é um número positivo menor que a unidade e N_0 é a distribuição de defeitos no centro do traço.

A quantidade $\Delta\Sigma$ na equação (28) pode ser expressa em termos da taxa de eliminação de defeitos dada pela equação (29) e da distribuição inicial de defeitos, dada pela equação (30). Para se obter tal expressão, primeiramente, a quantidade de defeitos, N, é dada em função do raio, Σ , e do tempo t :

$$N(t,\Sigma) = N(t = 0,\Sigma) + \int_0^t \left(\frac{dN}{d\tau}\right) d\tau \tag{31}$$

Substituindo a equação (30) na (31) tem-se:

$$N(t,\Sigma) = N_0(1-\Sigma)^{1/n} + \int_0^t \left(\frac{dN}{d\tau}\right) d\tau \tag{32}$$

Sendo assim:

$$\Sigma(t) = 1 - \left[\frac{N(t,\Sigma) - \int_0^t \left(\frac{dN}{d\tau}\right) d\tau}{N_0}\right]^n \tag{33}$$

O grau de *annealing* radial da zona desarranjada no tempo t, isto é $\Delta\Sigma(t)$, é então dado pela diferença entre os valores de Σ quando a equação (33) é avaliada em $t = 0$ e $t = t$:

$$\Delta\Sigma(t) = \Sigma(t) - \Sigma(0)$$

$$\Delta\Sigma(t) = \left[\frac{N(t,\Sigma)}{N_0}\right]^n - \left[\frac{N(t,\Sigma) - \int_0^t (\frac{dN}{d\tau}) d\tau}{N_0}\right]^n \tag{34}$$

Substituindo a equação (29) na equação (34) e estas duas na equação (28) obtêm-se:

$$l = l_0 + \frac{w}{tg\phi}\left\{\left[\frac{N(t,\Sigma)}{N_0}\right]^n - \left[\frac{N(t,\Sigma) - \int_0^t (\frac{-ck}{h})T(\tau)\exp(\frac{-Q}{RT(\tau)})d\tau}{N_0}\right]^n\right\} \tag{35}$$

Dartyge *et al.* (1981) notaram que a densidade de defeitos, nos extremos dos traços latentes, é muito pequena comparada com a densidade no centro. Esta observação foi usada por Carlson para negligenciar a quantidade N(t, Σ)/N_0. Deste modo, a equação (35) se reduz a:

$$l = l_0 - \frac{w}{tg\phi}\left\{\left[\int_0^t \left(\frac{c}{N_0}\right)\left(\frac{k}{h}\right)T(\tau)\exp(\frac{-Q}{RT(\tau)})d\tau\right]^n\right\} \tag{36}$$

Para um *annealing* isotérmico, a equação (36) tem a seguinte forma:

$$l_{ea} = l_0 - Ct^n \tag{37}$$

onde C é uma constante. Re-arranjando:

$$\ln(l_0 - l_{ea}) = \ln C + n\ln t \tag{38}$$

A equação (38) descreve os resultados obtidos por Carlson utilizando os dados de Green *et al.* (1986), nos quais se observou uma relação linear entre o logaritmo do encurtamento (Δl) e o logaritmo do tempo de *annealing* (Δt). Deste modo, definindo A como:

$$A = \frac{w}{tg\phi}\left(\frac{C}{N_0}\right)^n \tag{39}$$

a equação (36) fica:

$$l = l_0 - A\left(\frac{k}{h}\right)^n \left[\int_0^t T(\tau)\exp\left(\frac{-Q}{RT(\tau)}\right)d\tau \right]^n \tag{40}$$

A equação (40) descreve o *annealing* de traços de fissão em termos de três quantidades mensuráveis: comprimento inicial do traço, tempo e temperatura. Teoricamente, os parâmetros n, Q, e A, com significado físico, podem ser determinados por medições experimentais: A, é uma constante que incorpora fatores de geometria do traço latente e de densidade de defeitos na zona desarranjada; Q é energia de ativação requerida para que os átomos afastados pelos fragmentos de fissão retornem ao seu lugar de origem; e n é um parâmetro relacionado com a forma inicial da distribuição radial de defeitos.

Os experimentos realizados em laboratório são realizados sob condições de *annealing* isotérmico, ou seja, à temperaturas constantes, e deste modo, a equação para o modelo de Carlson, 1990 fica:

$$l_{ea} = l_0 - A\left(\frac{kT}{h}\right)^n \exp\left(\frac{-nQ}{RT}\right)t^n \tag{41}$$

Conforme o *annealing* se torna cada vez mais forte a previsão efetuada por este modelo é cada vez mais imprecisa. Para analisar os traços na condição de *annealing* forte, Carlson supôs que o processo predominante de encurtamento axial deixa de ser importante, quando comparado a um processo de segmentação.

Se um evento de segmentação quebra um traço de comprimento l em uma posição arbitrária ao longo do seu comprimento, o traço fica separado em duas seções de comprimentos x e l - x, onde x é um número arbitrário entre 0 e l. O comprimento médio das duas seções resultantes é [(l - x) + x]/2, ou seja, a metade do comprimento original.

Uma população de traços que entra em um estado de segmentação consistirá, de fato, de duas sub-populações, uma tendo o comprimento l, dado pela equação (41) e a outra com um comprimento médio igual a l/2. Se uma fração f, da população dos traços sofre segmentação, então o comprimento médio que resulta de todos os traços pode ser escrito como:

$$l_{sg} = \frac{[(1-f)l\ ] + [2f(\frac{l}{2})]}{(1-f)+2f} = \frac{l}{1+f} \tag{42}$$

Assim,

$$f = \frac{l}{l_{sg}} - 1 \tag{43}$$

Onde l_{sg} corresponde aos valores medidos em cada experimento de *annealing* e l é calculado da equação (41). Plotando-se um gráfico dos valores de f em função de l se encontra que a fração de traços que foram segmentados é aproximadamente zero para traços com comprimentos maiores que 12 μm (para apatitas), e aumenta significativamente até ≈ 0.5 para valores menores que 12μm. Nesta região f tem um comportamento linear que Carlson optou por descrever como $f = s(l_{sg0} - l)$ onde l_{sg0} é o comprimento dos traços quando o processo de segmentação começa a ser significativo. Considerando-se isto, a equação (42) pode ser rescrita como:

$$l_{sg} = \frac{l}{1 + S(l_{sg0} - l)} \quad \text{, para } l \leq l_{sg0} \qquad (44)$$

onde *S* é uma constante determinada a partir dos conjuntos de dados.

2.10. Modelo de Guedes *et al.* (2005a)

O modelo de Guedes *et al.* (2005a) é obtido substituindo-se na equação 1 as seguintes funções g e F:

$$g(r) = \ln\left[\frac{\ln(1/r)}{n}\right] \tag{45}$$

$$F(t,T) = \left\lfloor - w\left(U_0 - A_1 \ln(t) + A_2 \ln^2(t) - k_B T\right)^{1/2}\right\rfloor \tag{46}$$

O modelo cinético proposto por Guedes *et al.* (2005a) assume que o traço de fissão é formado por uma região com sítios atômicos vazios (vacâncias ou defeitos) (Yada *et al.*, 1987), que provocam a distorção da estrutura cristalina do mineral. A regeneração da rede cristalina se dá quando os átomos se deslocam ocupando estas vacâncias. A existência de uma barreira de potencial, que impede a imediata restauração da rede, garante a estabilidade do traço. Os átomos desarranjados têm que ultrapassar esta barreira de potencial para ocupar estas vacâncias. Assume-se também que a energia e a largura da barreira dependem do número de defeitos remanescentes e quando a energia térmica dos átomos é maior que a energia da barreira, o traço é restaurado.

Considerando-se uma amostra de zircão à temperatura em equilíbrio T, a variação do número de defeitos, ΔN_0, é dada pela quantidade de átomos com energia k_bT, que conseguem ultrapassar a barreira de potencial. Sendo assim:

$$\Delta N_0 = \tau\left(N_0, T\right) N_0 \tag{47}$$

Onde N_0 é a concentração de defeitos do traço que ainda não sofreu *annealing* e τ é o coeficiente de transmissão. A quantidade residual de defeitos no traço é:

$$N_1 = N_0 - \Delta N_0 \tag{48}$$

Após o *annealing* contínuo e um número *m* de sucessivas variações na concentração de defeitos:

$$\frac{N}{N_0} = \prod_{i=0}^{m-1}\left[1 - \tau\left(N_i, T\right)\right] \cong \exp\left[-\sum_{i=0}^{m-1}\tau\left(N_i, T\right)\right] \tag{49}$$

Uma vez que a grandeza mensurável desejada é o comprimento dos traços de fissão, a quantidade de defeitos remanescentes deve ser relacionada ao comprimento dos traços confinados atacados.

Guedes *et al.*, 2004, 2005b propõem que o ataque químico pelo qual é submetido o mineral, obedece às leis de taxas, como a maioria das reações químicas. Como os traços de fissão são simetricamente cilíndricos, o comprimento do traço pode ser tomado como a característica determinante do seu volume. Considerando-se o número de defeitos, *N*, proporcional ao volume e que a velocidade de ataque dos defeitos é muito maior que a da estrutura não danificada, tem-se:

$$L = kN^n \tag{50}$$

onde k e n são parâmetros relacionados ao volume do traço. Se o ataque químico do traço obedecer às leis de ataque da maioria das reações químicas, k e n também dependerão das condições do ataque. Sendo L_0 o comprimento inicial do traço confinado atacado, e N_0 a quantidade inicial de defeitos, a redução do comprimento do traço pode ser escrita como:

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^n \tag{51}$$

Das equações (49) e (51) tem-se que:

$$\frac{L}{L_0} = \exp\left[- n \sum_{i=0}^{m-1} \tau \left(N_i , T \right) \right] \tag{52}$$

Assumindo-se:

$$\tau \left(N_i , T \right) = \tau \left(N_o , N_1 , N_2 ,..........., N_{m-1} ; T \right) = \sum_{i=0}^{m-1} \tau \left(N_i , T \right) \tag{53}$$

Cada N_i pode ser associado a uma energia intermediária de uma barreira de potencial, U_i. O coeficiente de transmissão de uma barreira de energia *U*, pode ser definido como equivalente aos coeficientes de transmissão pelas barreiras intermediárias, *Ui´s.* Então, um coeficiente de transmissão dependente de *U* e T pode representar a probabilidade dos átomos desarranjados atravessarem uma barreira de potencial. Considerando-se a barreira potencial como uma solução JWKB para o coeficiente de transmissão (Sakurai, 1994), tem-se que:

$$\frac{L}{L_0} = \exp\left\{ - n \cdot \exp\left[- w \left(U - k_B T \right)^{1/2} \right] \right\} \tag{54}$$

A equação (54) descreve o comportamento de experimentos de *annealing* sob temperaturas variáveis e tempos constantes. A constante w depende da largura da barreira e das características dos átomos desarranjados.

À medida que o *annealing* ocorre e os átomos desarranjados ultrapassam a barreira de potencial, o número de defeitos diminui e consequentemente a energia da barreira também diminui. Portanto, para o modelo descrito, a dependência temporal do *annealing* é atribuída à evolução da barreira. Para considerar simultaneamente múltiplos *annealing*s com o tempo fixo, uma relação empírica da variação temporal da barreira foi proposta:

$$U = U_0 - \sum_{j=1}^{\infty} A_j \left[\ln(t)\right]^j \tag{55}$$

Na equação (55), t é o tempo normalizado e o fator de normalização é estabelecido como 1s. U_0 é a energia da barreira de potencial logo após a formação do traço e os $Aj's$ são coeficientes que controlam a dependência temporal da barreira de energia. Desta forma tem-se a seguinte equação cinética para o *annealing* do traço de fissão:

$$\frac{L}{L_0} = \exp\left\{ - n \cdot \exp\left[- w \left(U_0 - \sum_{j=1}^{\infty} A_j \left[\ln(t)\right]^j U - k_B T \right)^{1/2} \right] \right\} \tag{56}$$

O formato de cada curva de *annealing* é controlado pelos parâmetros n, w e U_0, sendo que o primeiro está relacionado aos efeitos do ataque químico e os dois últimos representam a barreira hipotética, ponto central deste modelo.

O ajuste satisfatório desta função aos dados experimentais, presentes na literatura, se dá com a expansão da série de logaritmos até a segunda ordem. Uma vez que, os coeficientes A_j's possuem uma dependência temporal implícita e tendem a zero muito mais rápido que a função logarítmica.

Deve ser notado o fato de que, pela primeira vez, o ataque químico foi levado em conta em um modelo descritivo de annealing de traços de fissão. Essa abordagem é importante já que os dados são extraídos de traços atacados quimicamente.

3. AJUSTE DE MODELOS DE ANNEALING PARA ZIRCÃO

Os modelos de *annealing* para zircão apresentados hoje na literatura utilizaram em seus ajustes apenas conjuntos de dados relacionados com tempos de laboratório. A única exceção foi o ajuste apresentado por Guedes *et al.* (2005a). No presente trabalho um conjunto de dados com tempos geológicos também foi utilizado no ajuste de cada um dos modelos supracitados e se efetuou uma comparação entre os modelos levando-se em conta o quão bem eles se ajustam aos dados a partir de critérios estatísticos. Também foram consideradas as previsões destes modelos com respeito a outros dados de annealing relacionados com densidade de traços em outras amostras geológicas de zircão.

3.1. Conjuntos de dados para zircão

Um dos conjuntos de dados de laboratório em zircão utilizados no presente trabalho foi extraido de Yamada *et al.* (1995). Estes autores apresentaram uma série de experimentos isocronológicos para 4,5 min, 1 h, 11 h, 100 h e 1000 h, em traços de fissão espontânea de zircão de Nisatai Dacite (NST), Japão. Essas amostras com traços de fissão espontânea que não sofreram annealing natural, possuem danos de alfa que as aproximam de outras amostras geológicas. Ou seja, este conjunto não é de “zero defeito” e se aproxima mais dos zircões encontrados na natureza. Também foram utilizados os dados de Tagami *et al.* (1998), onde são apresentados resultados adicionais para traços de fissão espontânea de zircões NST em experimentos de 10.000 h.

Visando uma melhor calibração dos modelos, se somou aos conjuntos de dados citados acima, experimentos de *annealing* sob tempos curtos (< 4 min) de Murakami *et al.* (2006). Neste caso, as amostras utilizadas foram também zircões NST aquecidos em temperaturas entre 550 e 910 ºC por ~4, 10 e 100 s. Experimentos nesta faixa de temperatura, ocasionam a restauração da rede cristalina, podendo apagar os traços. Sendo assim, se obteve um número reduzido de traços, especialmente para T > 850 ºC e tempos de 10 e 100s. Para se atingir um melhor controle destes experimentos foram utilizados procedimentos experimentais diferenciados tais como aquecimento das amostras em um forno de grafite e o uso de termômetros infravermelhos.

O conjunto de dados com tempos geológicos usado na presente calibração foi o apresentado por Hasebe *et al.* (2003) que mostra resultados de *annealing* de traços em amostras de zircões dos poços MITI-Nishikubiki e MITI-Mishima, região de Niigata, Japão. Esta área é uma das mais importantes para a produção de petróleo e gás. A similaridade entre os gradientes paleo-geotermais do embasamento e os gradientes geotermais atuais obtidos através da reflectância da vitrinita e da cristalinidade da ilita (Akiyama e Hirai, 1997) sugerem que as amostras permaneceram sob temperaturas estáveis por 1 milhão de anos. Devido a estas evidências, pode-se usar este conjunto de amostras para a calibração. As amostras foram coletadas a profundidades de ~3.5 – 6.2 km, com temperaturas na faixa de ~120 – 238 ºC.

Nos experimentos de laboratório, não há acúmulo significativo de novos traços durante o aquecimento. Então, é uma boa aproximação se considerar que todos os traços experimentaram o mesmo tratamento térmico. Não é o caso em se tratando de dados geológicos, uma vez que os traços são gerados durante toda a história térmica da amostra. No entanto, para os dados de Hasebe *et al.* (2003), o aquecimento sob temperaturas máximas só ocorreu de 1 Ma até hoje, enquanto que os traços começaram a ser gerados há 10 Ma. Isto significa que somente ~10% dos traços foram gerados durante o intervalo em que as amostras foram submetidas às altas temperaturas, enquanto que os 90% restantes experimentaram todo o tratamento térmico. Por esta razão, o conjunto de dados é considerado como “conjunto de dados de 1Ma“.

Em todos os conjuntos de dados citados acima, os autores apresentam os resultados de duas formas: comprimentos médios medidos em todos os traços e medidos em traços que formam ângulos > 60º com o eixo-c. A taxa de *annealing* depende da orientação cristalográfica dos traços de fissão. Observou-se que os traços paralelos ao eixo-c são mais resistentes ao *annealing* que os traços perpendiculares, tanto para a apatita (Donelick, 1991) quanto para o zircão (Tagami *et al*., 1990).

Desta forma, Yamada *et al.* (2005) recomendam o uso dos traços que formam ângulos > 60º com o eixo-c, a fim de se minimizar efeitos relacionados com a anisotropia do *annealing*. Porém, no presente trabalho as calibrações foram efetuadas utilizando-se as duas formas de conjunto, considerando-se os comprimentos médios medidos em todos os traços e medidos em traços que formam ângulos > 60º com o eixo-c. Além disso, para se fazer uma melhor avaliação das calibrações utilizando-se os dados com tempos geológicos, foram realizadas calibrações sem e com estes dados.

Os conjuntos de dados foram agrupados em três situações distintas, descritas na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Conjuntos de dados usados para calibração.

CASO 1	4,5 min, 1 h, 11 h, 100 h e 1000 h	Yamada *et al.* (1995)
	10.000 h	Tagami *et al.* (1998)
CASO 2	4,5 min, 1 h, 11 h, 100 h e 1000 h	Yamada *et al.* (1995)
	10.000 h	Tagami *et al.* (1998)
	1 Ma	Hasebe *et al.* (2003)
CASO 3	4,5 min, 1 h, 11 h, 100 h e 1000 h	Yamada *et al.* (1995)
	10.000 h	Tagami *et al.* (1998)
	1 Ma	Hasebe *et al.* (2003)
	~4, 10 e 100 s	Murakami *et al.* (2006)

Os dados referentes aos tempos e temperaturas de aquecimento citados acima estão mostrados na Tabela 3 (para o caso em que todos os traços de fissão são considerados) e na Tabela 4 (para o caso em que os traços formam ângulos > 60º com o eixo-c). O comprimento médio inicial para o conjunto que considera todos os traços é l_0 = (11,14 ± 0,08) μm e para o conjunto que considera os traços > 60º é l_0 = (11,05 ± 0,08) μm.

Tabela 3: Dados de *annealing* de traços de fissão em zircão NST (todos os traços).

t (h)	**T** (ºC)	**N**	**L** (μm)	**σ** (μm)	***t*** (h)	**T** (ºC)	**N**	**L** (μm)	**σ** (μm)
0,0010	599	56	10,90	0,07	11	397	50	10,96	0,09
0,0010	700	54	10,08	0,10	11	499	50	10,20	0,08
0,0011	751	63	9,32	0,20	11	548	50	9,42	0,10
0,0010	800	62	8,58	0,20	11	598	40	7,80	0,10
0,0011	912	10	5,68	0,30	100	350	50	10,83	0,10
0,0029	599	50	10,65	0,10	100	449	51	10,23	0,10
0,0030	649	56	10,28	0,20	100	501	50	9,37	0,10
0,0030	700	47	9,55	0,10	100	549	50	8,23	0,10
0,0029	750	58	8,53	0,20	100	599	6	7,24	0,50
0,0028	800	56	7,23	0,20	1000	398	48	10,46	0,08
0,0029	858	5	5,21	0,10	1000	450	51	9,58	0,10
0,028	549	56	10,85	0,10	1000	498	51	8,61	0,10
0,028	649	20	9,60	0,10	1000	535	12	7,14	0,30
0,028	698	33	9,01	0,20	10000	398	60	9,98	0,10
0,028	750	44	7,65	0,20	10000	498	51	7,43	0,21
0,028	805	11	5,57	0,40	$9*10^9$	124	62	10,60	0,20
0,075	500	51	10,85	0,09	$9*10^9$	136	64	10,30	0,20
0,075	600	50	10,25	0,08	$9*10^9$	147	41	10,70	0,30
0,075	650	50	9,29	0,09	$9*10^9$	164	59	10,80	0,20
0,075	700	50	8,41	0,10	$9*10^9$	174	53	10,20	0,30
0,075	750	2	7,07	0,20	$9*10^9$	200	38	10,20	0,30
1	395	53	10,85	0,10	$9*10^9$	187	17	9,90	0,20
1	446	83	10,73	0,06	$9*10^9$	205	53	9,90	0,10
1	500	50	10,67	0,10	$9*10^9$	223	4	9,20	0,50
1	550	50	10,18	0,08					
1	599	50	9,56	0,09					
1	650	50	8,55	0,10					
1	696	15	6,38	0,40					

Dados de Yamada *et al.* (1995), Tagami *et al.* (1998), Hasebe *et al.* (2003) e Murakami *et al.* (2006). *t* = tempo de aquecimento ; T = temperatura de aquecimento; N = número total de traços medidos; L = comprimento médio de todos os traços medidos; σ = erro padrão de L.

Tabela 4: Dados de laboratório de *annealing* de traços de fissão em zircão NST (traços com ângulos > 60º em relação ao eixo c).

t (h)	**T** (ºC)	$\mathbf{N_{60}}$	$\mathbf{L_{60}}$ (μm)	$\boldsymbol{\sigma_{60}}$ (μm)	***T*** (h)	**T** (ºC)	$\mathbf{N_{60}}$	$\mathbf{L_{60}}$ (μm)	$\boldsymbol{\sigma_{60}}$ (μm)
0,0010	599	37	10,72	0,09	11	397	28	10,89	0,12
0,0010	700	38	9,89	0,12	11	499	30	10,13	0,11
0,0011	751	38	8,92	0,22	11	548	35	9,26	0,13
0,0010	800	38	8,50	0,21	11	598	30	7,74	0,13
0,0011	912	4	5,86	0,49	100	350	35	10,79	0,12
0,0029	599	31	10,57	0,15	100	449	32	10,12	0,13
0,0030	649	35	10,13	0,20	100	501	36	9,20	0,12
0,0030	700	30	9,40	0,18	100	549	27	8,10	0,13
0,0029	750	35	8,35	0,20	100	599	3	6,73	0,77
0,0028	800	29	7,31	0,24	1000	398	33	10,27	0,10
0,0029	858	3	5,71	0,16	1000	450	42	9,48	0,11
0,028	549	38	10,72	0,12	1000	498	41	8,59	0,11
0,028	649	14	9,34	0,17	1000	535	10	7,11	0,37
0,028	698	25	8,74	0,18	10000	398	48	9,81	0,13
0,028	750	26	7,78	0,20	10000	498	39	7,35	0,21
0,028	805	6	5,23	0,49	$9*10^9$	124	38	10,40	0,30
0,075	500	34	10,78	0,11	$9*10^9$	136	40	10,10	0,30
0,075	600	38	10,11	0,10	$9*10^9$	147	27	10,40	0,30
0,075	650	37	9,26	0,10	$9*10^9$	164	33	10,80	0,20
0,075	700	36	8,40	0,13	$9*10^9$	174	50	10,30	0,30
0,075	750	2	7,07	0,19	$9*10^9$	200	22	10,50	0,30
1	395	32	10,83	0,16	$9*10^9$	187	12	10,10	0,20
1	446	37	10,60	0,08	$9*10^9$	205	34	9,80	0,10
1	500	35	10,57	0,12	$9*10^9$	223	3	9,20	0,70
1	550	39	10,16	0,09					
1	599	40	9,47	0,10					
1	650	32	8,20	0,16					
1	696	9	6,08	0,52					

Dados originais são de Yamada *et al.* (1995), Tagami *et al.* (1998), Hasebe *et al.* (2003) e Murakami *et al.* (2006). *t* = tempo de aquecimento ; T = temperatura de aquecimento; N_{60} = número de traços > 60º medidos; L_{60} = comprimento médio de traços > 60º medidos; σ_{60} = erro padrão de L_{60}.

3.2. Procedimentos de ajuste

Os ajustes dos modelos aos dados experimentais foram efetuados utilizando-se o método da minimização por χ^2, considerando-se o erro individual de cada dado. A minimização foi feita por interações combinadas Simplex e Langevin-Marquardt usando-se o programa Origin®.

Foram tabulados também os valores do χ^2 para cada ajuste final e o valor da probabilidade do χ^2, $P(\chi^2)$. O valor de $P(\chi^2)$ expressa a razão entre a área abaixo da curva de distribuição de χ^2 para valores de χ^2 maiores que o obtido e a área total abaixo da curva de distribuição de χ^2. Este valor está relacionado com a distância do valor de χ^2 obtido, em relação ao valor de maior probabilidade de ocorrência, que é o valor do número de graus de liberdade (número total de dados menos o número de parâmetros da função ajustada obtidos a partir dos dados). O intervalo de valores de $P(\chi^2)$ aceitos como "bons" na literatura, não é sempre o mesmo. O intervalo mais aceito é $0{,}95 > P(\chi^2) > 0{,}05$. Porém, existem trabalhos que sugerem que as regiões onde $0{,}99 > P(\chi^2) > 0{,}95$ e $0{,}05 > P(\chi^2) > 0{,}01$ não permitem que o teste χ^2 rejeite o ajuste de dados (Iunes *et al.*, 2002). A rejeição do ajuste ocorre quando $P(\chi^2) < 0{,}001$ ou $P(\chi^2) > 0{,}999$. Nestes casos o teste χ^2 indica que os erros dos dados estão subestimados ($P(\chi^2) < 0{,}001$) ou superestimados ($P(\chi^2) > 0{,}999$), ou que a função passa muito longe ($P(\chi^2) < 0{,}001$) ou muito perto ($P(\chi^2) > 0{,}999$) dos dados. Os χ^2 apresentados neste trabalho são χ^2 reduzidos, χ^2_ν, ou seja, são χ^2 normalizados pelos graus de liberdade, ν. Neste caso, o valor com maior probabilidade de ocorrência é $\chi^2_\nu = 1$, onde $P(\chi^2_\nu) = 0{,}5$.

Para simplificar a nomenclatura dos modelos de *annealing* foram utilizadas as seguintes abreviações:

FA	Fanning Linear	Laslett	*Laslett et al. (1987)*
FC	Fanning Curvilinear	Crowley	*Crowley et al. (1991)*
LGFL	Fanning Linear melhorado	Laslett e Galbraith FL	*Lasllet e Galbraith (1996)*
LGPL	Paralelo Linear melhorado	Laslett e Galbraith PL	*Lasllet e Galbraith (1996)*
RHFL	Fanning Linear	Rahn FL	*Rahn et al. (2004)*
RHPL	Paralelo Linear	Rahn PL	*Rahn et al. (2004)*
YPC	Paralelo Curvilinear	Yamada PC	*Yamada et al. (2007)*
CS		Carlson	*Carlson (1990)*
CR		Cronologia	*Guedes et al (2005a)*

3.3. Resultados dos ajustes dos modelos de *annealing* para zircão

3.3.1. Conjunto de dados com todos os traços

Os parâmetros obtidos para as calibrações dos modelos utilizando-se os conjuntos de dados com todos os traços para os casos 1, 2 e 3 (Tabela 3), estão mostrados nas Tabelas 5, 6 e 7, respectivamente. A Tabela 8 mostra os valores de χ^2_ν e $P(\chi^2_\nu)$ para o melhor ajuste de cada modelo considerando-se o conjunto de dados com todos os traços.

Tabela 5 Modelos de *annealing* para o conjunto de dados todos os traços

CASO 1: parâmetros dos modelos

Tipo modelo	ν	χ_ν^2	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	21	1,77	-17,86	0,00049	-21,36	0,00028	-0,180	-6,89
			(4,34)	(0,00046)	(9,32)	(0,00026)	(0,217)	(3,25)
FC	21	1,83	-41,5	0,97	-76,07	-8,82	-0,16	-5,08
			(74,0)	(1,85)	(8,70)	(0,16)	(0,62)	(20,69)
CS	23	2,95	2,28	0,221	69,28	11,05		
			(0,33)	(0,011)	(1,14)	(0,06)		
LGFL	22	2,44	11,26	-9,84	0,24	-29,77	0,04	1
			(0,11)	(2,30)	(0,06)	(10,42)	(0,28)	
LGPL	23	2,98	11,04	5,41	0,22	35724		1
			(0,06)	(0,36)	(0,01)	(576)		
RHFL	24	1,90	-10,79	2,60E-4	0,0081			
			(0,25)	(0,08E-4)	(0,0002)			
RHPL	24	2,37	4,98	-7386	0,206			
			(0,19)	(210)	(0,006)			
YPC	23	2,26	11,06	-74,24	0,249	41,84		
			(0,06)	(2,58)	(0,009)	(0,50)		
CR	23	3,46	3	2,659	0,1068	0,0028	5,0E-5	
				(0,038)	(0,0009)	(0,0002)	(0,8E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.
Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 27.
Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

---

n = número de dados ν = graus de liberdade p = número de parâmetros
χ_ν^2 = chi-quadrado reduzido $P(\chi_\nu^2)$ = probabilidade de χ^2 para ν onde ($\nu = n - p$)

Tabela 6 Modelos de annealing para o conjunto de dados todos os traços

CASO 2: parâmetros dos modelos

Tipo modelo	ν	χ_ν^2	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	30	2,69	-8,86	0,00024	-7,18	0,00066	-0,084	-5,36
			(19,02)	(0,00067)	(2,07)	(0,00006)	(0,836)	(7,78)
FC	30	1,67	-42,37	0,99	-85,50	-9,06	-0,15	-4,04
			(52,67)	(1,31)	(10,44)	(0,16)	(0,48)	(10,87)
CS	32	5,68	2,01	0,260	69,32	10,80		
			(0,33)	(0,011)	(1,10)	(0,04)		
LGFL	31	3,44	11,52	-5,22	0,11	-9,74	0,58	1
			(0,16)	(0,59)	(0,02)	(1,89)	(0,05)	
LGPL	32	5,71	10,79	6,55	0,26	35783		1
			(0,04)	(0,37)	(0,01)	(575)		
RHFL	33	3,44	-10,24	2,50E-4	0,0076			
			(0,23)	(0,08E-4)	(0,0002)			
RHPL	33	6,16	4,38	-6810	0,199			
			(0,18)	(194)	(0,006)			
YPC	32	2,17	11,04	-74,15	0,253	41,06		
			(0,06)	(2,52)	(0,009)	(0,37)		
CR	32	3,15	3	2,630	0,1049	0,00240	3,0E-5	
				(0,036)	(0,0006)	(0,00007)	(0,2E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.

Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 36.

Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

Tabela 7: Modelos de annealing para o conjunto de dados todos os traços								
CASO 3: parâmetros dos modelos								
Tipo modelo	ν	χ_ν^2	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	30	2,69	-7,48 (4,85)	0,00017 (0,00014)	-10,87 (1,81)	0,00062 (0,00005)	-0,00202 (0,288)	-3,44 (5,53)
FC	30	1,67	-45,5 (16,9)	1,05 (0,41)	-71,57 (9,27)	-8,66 (0,15)	-0,21 (0,09)	-7,14 (9,37)
CS	32	5,68	5,97 (0,55)	0,270 (0,009)	76,04 (0,72)	10,79 (0,03)		
LGFL	31	3,44	11,53 (0,13)	-5,99 (0,61)	0,12 (0,01)	-17,62 (1,85)	0,42 (0,05)	1
LGPL	32	5,71	10,79 (0,33)	7,98 (0,27)	0,27 (0,01)	39206 (366)		1
RHFL	33	3,44	-10,62 (0,17)	2,40E-4 (0,06E-4)	0,0081 (0,0001)			
RHPL	33	6,16	6,21 (0,14)	-8483 (163)	0,215 (0,005)			
YPC	32	2,17	11,01 (0,05)	-79,92 (1,82)	0,263 (0,007)	42,61 (0,28)		
CR	32	3,15	3	2,425 (0,024)	0,1067 (0,0002)	0,00250 (0,00004)	3,0E-5 (0,2E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.

Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 52.

Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

Tabela 8. Valores de χ^2_ν e $P(\chi^2_\nu)$ para o conjunto de dados todos os traços

Tipo modelo	CASO 1 χ^2_ν	CASO 2 χ^2_ν	CASO 3 χ^2_ν	CASO 1 $P(\chi^2_\nu)$	CASO 2 $P(\chi^2_\nu)$	CASO 3 $P(\chi^2_\nu)$
FA	1,77	2,69	4,00	2%		
FC	1,83	1,67	2,30	1%	2%	
CS	2,95	5,68	6,90			
LGFL	2,44	3,44	5,24			
LGPL	2,98	5,71	6,97			
RHFL	1,90	3,44	4,74	1%		
RHPL	2,37	6,16	7,62			
YPC	2,26	2,17	3,03			
CR	3,46	3,15	6,50			

Nota: Os valores de $P(\chi^2_\nu)$ não preenchidos são < 0,1%.

As Figuras 2, 3 e 4 mostram as curvas de ajuste obtidas para os modelos utilizando-se os conjuntos de dados com todos os traços para os casos 1, 2 e 3 (Tabela 3), respectivamente. Os gráficos mostram a redução do comprimento *r versus* temperatura T em Kelvin. Os pontos são os conjuntos de dados e as linhas sólidas são as curvas de calibração. São mostrados os ajustes para cada caso considerado conforme Tabela 2.

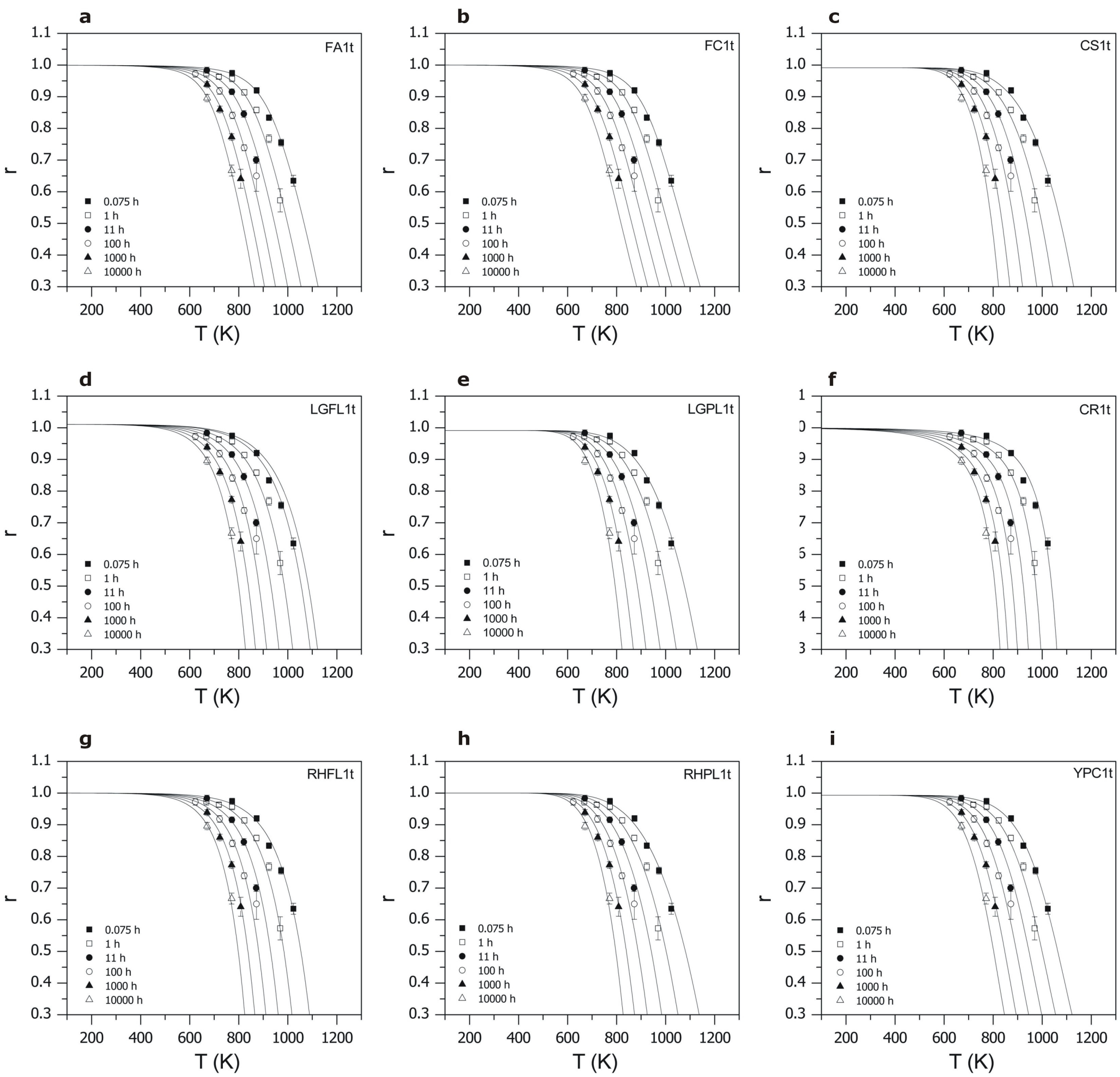

Fig. 2. Resultados da calibração para o conjunto de dados com todos os traços. CASO 1: 0,075, 1, 11, 100, 1000 e 10 000 h. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

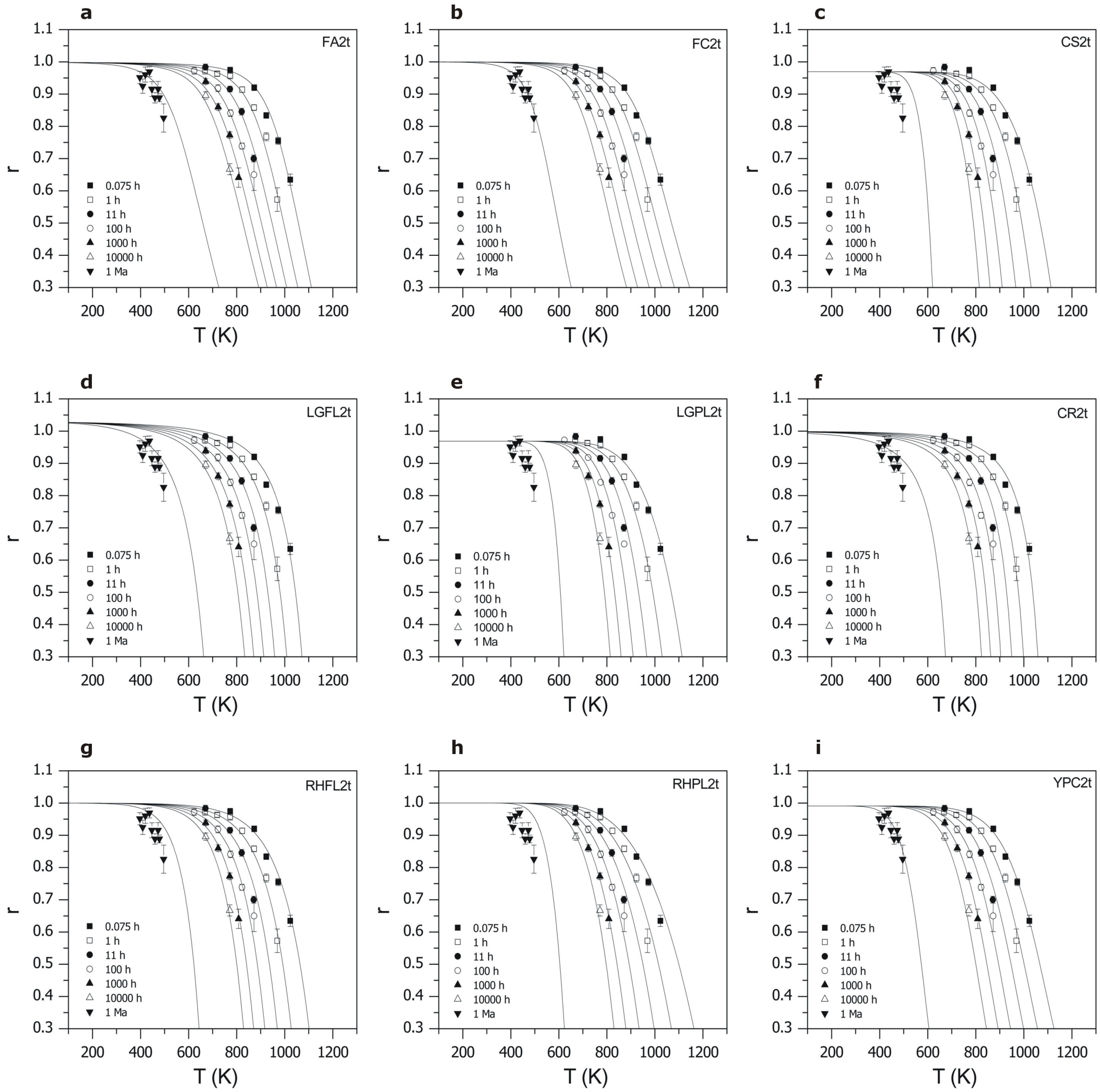

Fig. 3. Resultados da calibração para o conjunto de dados com todos os traços. CASO 2: 0,075, 1, 11, 100, 1000, 10 000 h e 1Ma. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

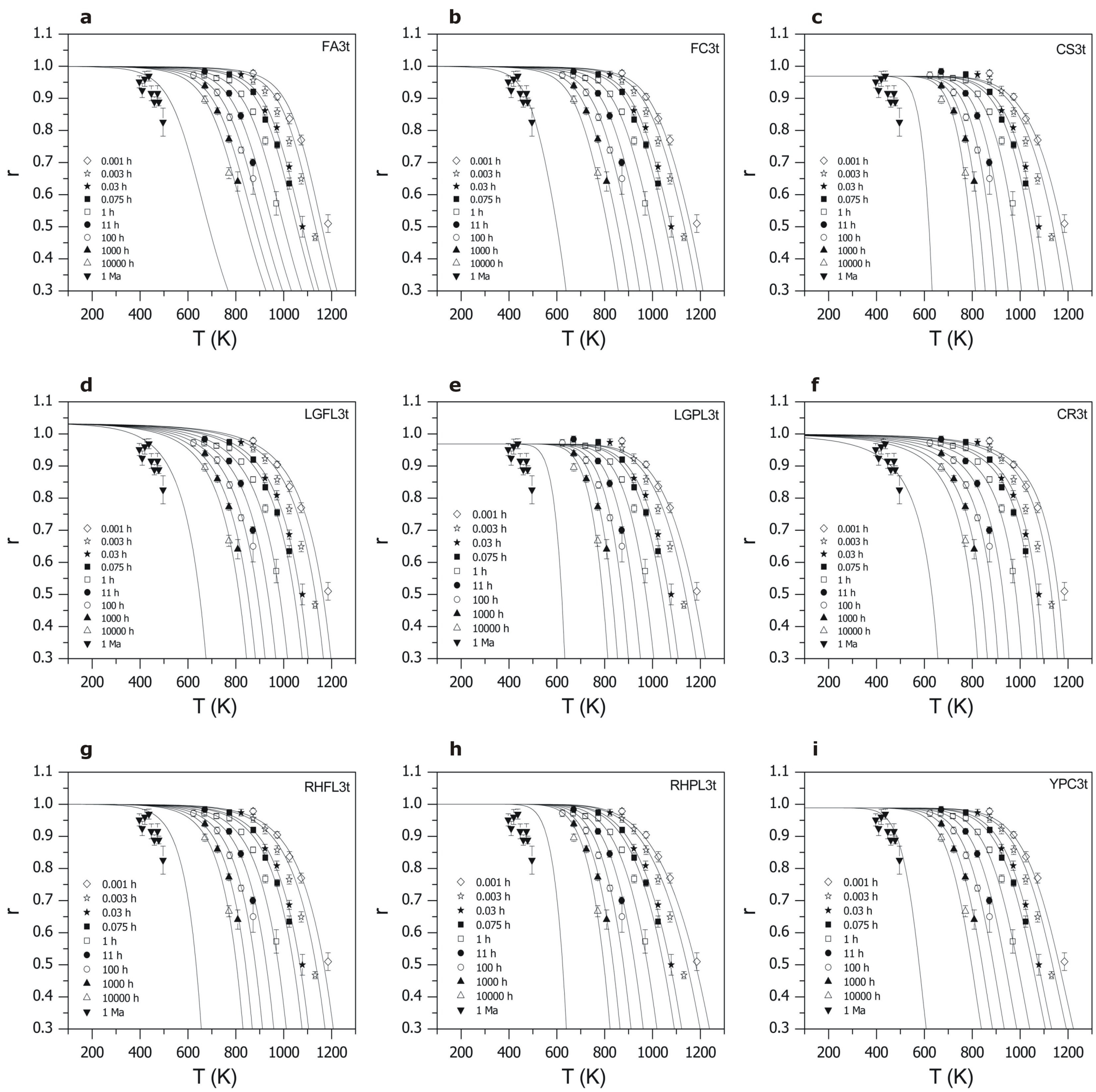

Fig. 4. Resultados da calibração para o conjunto de dados com todos os traços. CASO 3: 0,001, 0,003, 0,03, 0,075, 1, 11, 100, 1000, 10 000 h e 1Ma. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

Para o CASO 1, pode ser observado na Tabela 8 que os únicos modelos aceitos pelo teste χ^2 ($0,99 > P(\chi^2_\nu) > 0,01$) são FA (Laslett), FC (Crowley) e RHFL (Rahn FL).

Para o CASO 2, pode ser observado na Tabela 8 que a soma dos dados geológicos (1Ma) ao conjunto de dados fez com que os valores de chi-quadrado reduzido para os ajustes se elevassem. No entanto, ainda se encontra um modelo aceito pelo teste χ^2, o modelo de Crowley *et al.* (2003).

No CASO 3 os valores de chi-quadrado reduzido se elevam muito, de modo que nenhum modelo é aceito pelo teste χ^2. Para a obtenção do conjunto de dados de Murakami *et al.* (2006) foram utilizados equipamentos de ponta e os procedimentos experimentais parecem muito bem elaborados. Apesar disso, acreditamos que, como buscamos uma calibração onde dados para tempos geológicos devam ser privilegiados, devemos desconsiderá-lo.

3.3.2. Conjunto de dados com traços com ângulos > 60º com o eixo-c

Os parâmetros obtidos para as calibrações dos modelos utilizando-se os conjuntos de dados com traços com ângulos > 60° em relação ao eixo-c para os casos 1, 2 e 3 (Tabela 4), estão mostrados nas Tabelas 9, 10 e 11, respectivamente. A Tabela 12 mostra os valores de χ^2_ν e $P(\chi^2_\nu)$ para o melhor ajuste de cada modelo considerando-se o conjunto de dados com traços com ângulos > 60° em relação ao eixo-c.

Tabela 9 Modelos de annealing para o conjunto de traços > 60º

CASO 1: parâmetros dos modelos

Tipo modelo	ν	χ^2_ν	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	21	0,97	-17,46	0,00049	-17,74	0,00037	-0,187	-9,05
			(8,54)	(0,00028)	(8,03)	(0,00022)	(0,09)	(10,00)
FC	21	1,13	-42,2	1,00	-80,55	-8,95	-0,15	-4,84
			(91,8)	(2,31)	(11,07)	(0,20)	(0,78)	(22,58)
CS	23	2,18	2,24	0,220	69,02	10,97		
			(0,37)	(0,014)	(1,27)	(0,08)		
LGFL	22	1,48	11,28	-7,98	0,19	-22,46	0,24	1
			(0,15)	(1,81)	(0,05)	(7,80)	(0,21)	
LGPL	23	2,21	10,97	5,34	0,22	35600		1
			(0,08)	(0,42)	(0,01)	(641)		
RHFL	24	1,10	-10,70	2,60E-4	0,0080			
			(0,30)	(0,00E-4)	(0,0003)			
RHPL	24	1,58	4,97	-7360	0,206			
			(0,23)	(252)	(0,007)			
YPC	23	1,60	11,00	-72,29	0,244	41,46		
			(0,08)	(3,05)	(0,010)	(0,57)		
CR	23	1,91	3	2,651	0,108	0,0031	5,8E-5	
				(0,046)	(0,001)	(0,0002)	(0,9E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.

Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 27 .

Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

Tabela 10 Modelos de *annealing* para o conjunto de dados traços > 60^0

CASO 2: parâmetros dos modelos

Tipo modelo	ν	χ^2_ν	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	30	1,59	-7,66	0,00024	-6,86	0,00067	-0,024	-4,03
			(10,18)	(0,00035)	(2,32)	(0,00007)	(0,567)	(13,05)
FC	30	1,20	-42,22	0,99	-86,79	-9,07	-0,14	-4,08
			(65,15)	(1,61)	(12,00)	(0,20)	(0,59)	(13,22)
CS	32	4,63	1,91	0,270	69,22	10,64		
			(0,36)	(0,014)	(1,22)	(0,05)		
LGFL	31	2,21	11,56	-4,76	0,10	-8,59	0,61	1
			(0,21)	(0,61)	(0,02)	(1,80)	(0,05)	
LGPL	32	4,66	10,63	6,81	0,27	35748		1
			(0,05)	(0,45)	(0,01)	(615)		
RHFL	33	2,21	-10,12	2,51E-4	0,0075			
			(0,27)	(0,09E-4)	(0,0002)			
RHPL	33	4,47	4,21	-6622	0,196			
			(0,21)	(226)	(0,007)			
YPC	32	1,58	10,97	-73,23	0,249	41,13		
			(0,08)	(2,98)	(0,010)	(0,38)		
CR	32	2,07	3	2,602	0,1055	0,00249	3,0E-5	
				(0,044)	(0,0006)	(0,00007)	(0,3E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.

Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 36 .

Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

Tabela 11 Modelos de *annealing* para o conjunto de dados traços > 60^0

CASO 3: parâmetros dos modelos

Tipo modelo	ν	χ^2_ν	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	46	2,62	-8,59 (8,46)	0,00020 (0,00025)	-13,56 (2,86)	0,00054 (0,00007)	-0,042 (0,426)	-3,43 (8,75)
FC	46	1,36	-44,57 (14,15)	1,03 (0,35)	-73,95 (10,30)	-8,71 (0,18)	-0,19 (0,08)	-7,71 (8,09)
CS	48	4,71	4,48 (0,52)	0,267 (0,011)	74,41 (0,87)	10,66 (0,04)		
LGFL	47	3,47	11,48 (0,18)	-5,69 (0,70)	0,11 (0,02)	-16,90 (2,12)	0,43 (0,05)	1
LGPL	48	4,75	10,66 (0,04)	7,59 (0,34)	0,27 (0,01)	38379 (440)		1
RHFL	49	2,83	-10,17 (0,21)	2,32E-4 (0,07E-4)	0,0078 (0,0002)			
RHPL	49	4,69	5,57 (0,17)	-7810 (196)	0,203 (0,006)			
YPC	48	1,75	11,00 (0,07)	-72,66 (2,32)	0,241 (0,008)	42,19 (0,33)		
CR	48	3,74	3	2,406 (0,031)	0,1070 (0,0003)	0,00254 (0,00005)	3,4E-5 (0,2E-5)	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.

Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 52 .

Número entre parêntesis representa a variação do parâmetro dentro de 1σ.

Tabela 12. Valores de χ^2_ν e $P(\chi^2_\nu)$ para o conjunto de dados traços $> 60^0$

Tipo modelo	CASO 1 χ^2_ν	CASO 2 χ^2_ν	CASO 3 χ^2_ν	CASO 1 $P(\chi^2_\nu)$	CASO 2 $P(\chi^2_\nu)$	CASO 3 $P(\chi^2_\nu)$
FA	0,97	1,59	2,62	60%	5%	
FC	1,13	1,20	1,36	40%	3%	1%
CS	2,18	4,63	4,71			
LGFL	1,48	2,21	3,47	10%		
LGPL	2,20	4,66	4,75			
RHFL	1,10	2,21	2,83	40%		
RHPL	1,58	4,47	4,69	5%		
YPC	1,60	1,58	1,75	5%	2%	1%
CR	1,91	2,07	3,74	1%		

Nota: Os valores de $P(\chi^2_\nu)$ não preenchidos são < 0,1%.

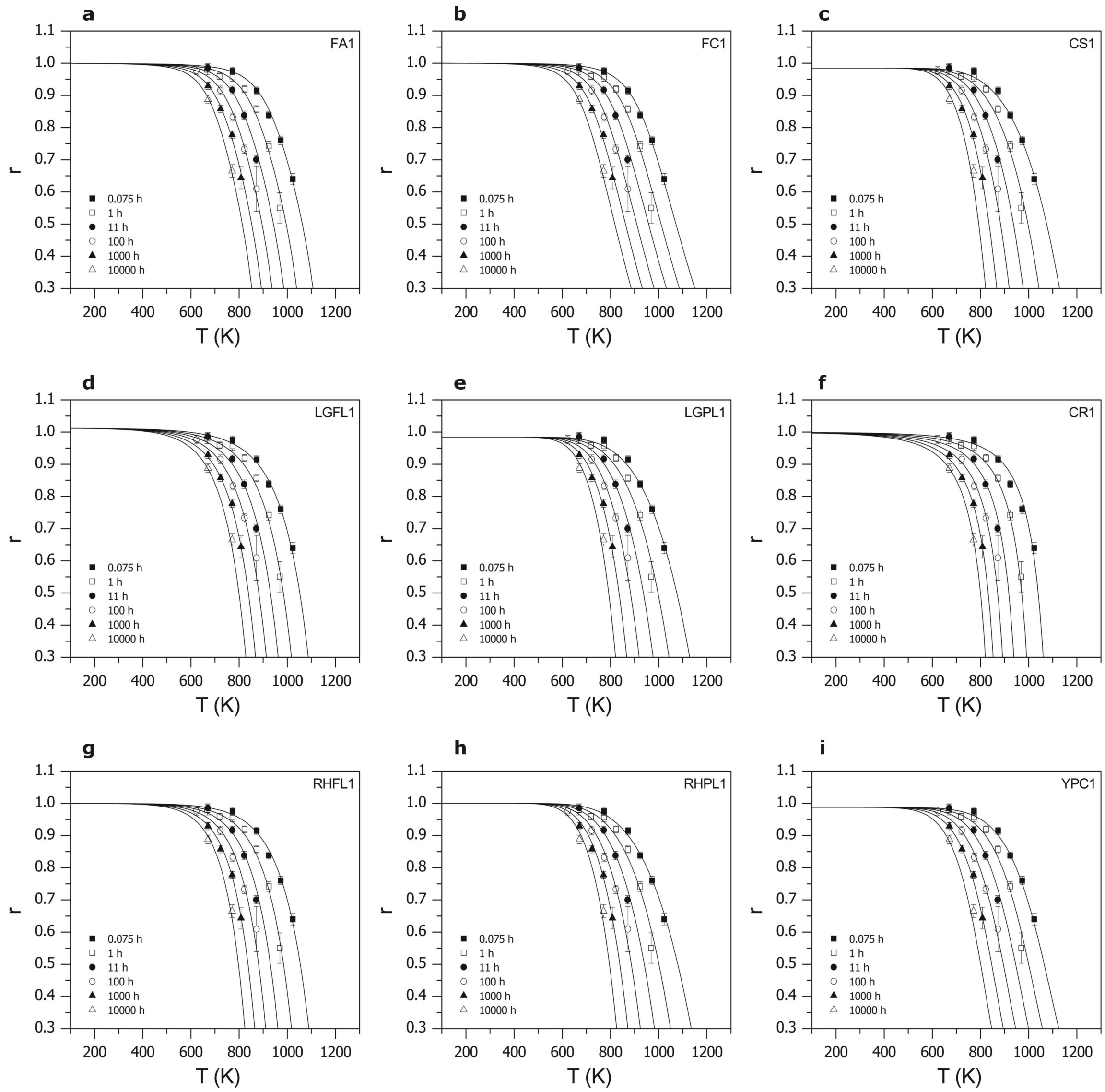

Fig. 5. Resultados da calibração para o conjunto de dados com traços > 60º. CASO 1: 0,075, 1, 11, 100, 1000 e 10 000 h. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

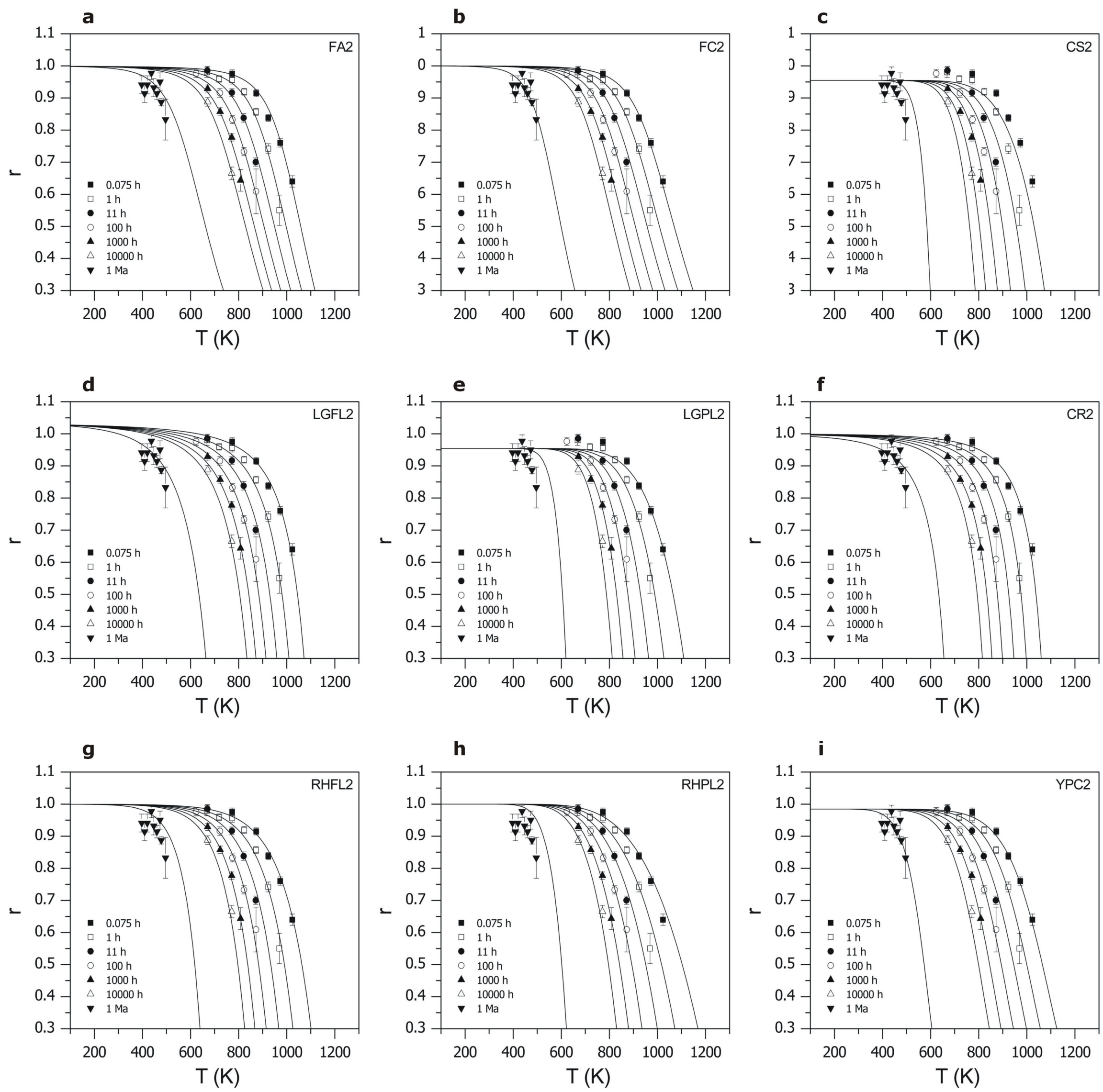

Fig. 6. Resultados da calibração para o conjunto de dados com traços > 60º. CASO 2: 0,075, 1, 11, 100, 1000, 10 000 h e 1Ma. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

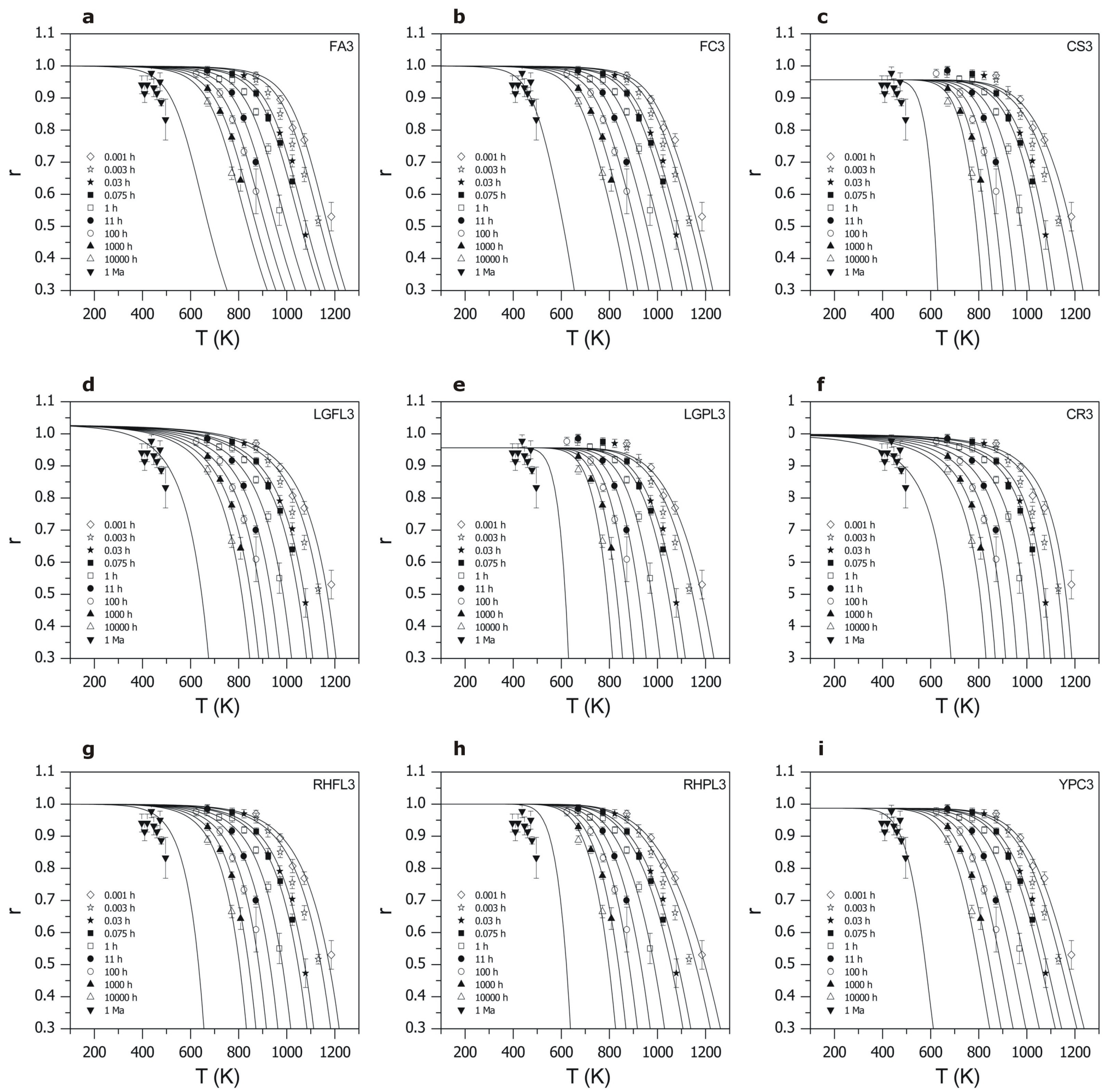

Fig. 7. Resultados da calibração para o conjunto de dados com traços > 60º. CASO 3: 0,001, 0,003, 0,03, 0,075, 1, 11, 100, 1000, 10 000 h e 1Ma. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

Similarmente ao estudo anterior, as Figuras 5, 6 e 7 apresentam as curvas de calibração obtidas em gráficos da redução do comprimento *r versus* temperatura T em Kelvin. Os pontos são os conjuntos de dados e as linhas sólidas são as curvas de calibração, para cada caso considerado, conforme Tabela 2.

A Fig. 5 mostra o conjunto de dados utilizado no CASO 1 e as curvas de calibração dos modelos de *annealing*, conforme parâmetros da Tabela 9. Observa-se que os todos os modelos, em sua maioria, se ajustam bem aos dados ($0,99 > P(\chi^2_\nu) > 0,01$).

A Fig. 6 mostra o conjunto de dados utilizado no CASO 2 e as curvas de calibração dos modelos de *annealing*, conforme parâmetros da Tabela 10. Como na análise com os conjuntos com todos os traços, vê-se que a soma dos dados geológicos (1Ma) faz com que os valores de chi-quadrado para os ajustes se elevem. No entanto, no caso destes dados (>60º), mais de um modelo ainda se ajusta bem, são eles: FA (Laslett), FC (Crowley), e YPC (Yamada PC).

A Fig. 7 mostra o conjunto de dados utilizado no CASO 3 e as curvas de calibração dos modelos de *annealing*, conforme parâmetros da Tabela 11. Como também observado anteriormente, os valores de chi-quadrado aumentam, mas os modelos de FC (Crowley), e YPC (Yamada PC) ainda permitem um bom ajuste.

A comparação entre os dois conjuntos de dados, todos os traços (Tabela 8) e traços com ângulos > 60º (Tabela 12), mostra melhor ajuste das curvas para o último conjunto de dados, com valores menores de chi-quadrado. Isto pode ter ocorrido porque os conjuntos de dados para traços com ângulos > 60º possuem um número menor de traços medidos por aquecimento (e conseqüentemente um erro maior para cada ponto) que os conjuntos com todos os traços. Porém, devido ao fato de que os conjuntos de dados para traços com ângulos > 60º são livres de problemas relacionados com a anisotropia do annealing (e ataque químico), estes conjuntos serão utilizados nas avaliações de previsões para tempos geológicos.

A Fig. (8) abaixo ilustra uma comparação, mais generalizada, que pode ser feita entre os vários tipos de modelos. A figura mostra a as equações de *annealing* no diagrama de Arrhenius, ln$t$ *versus* 1/T. Tem-se aqui as curvas de iso-*annealing*, isto é curvas onde r é constante, para r = 0,1 e r = 0,9, que definem a Zona de *Annealing* Parcial (ZAP), conforme definida mais a frente. Os dados no gráfico são o conjuntos de dados com todos os traços, CASO 2.

As curvas de iso-*annealing* para os modelos *fanning* se encontram no ponto (t_0, T_0) e para temperaturas maiores que T_0, as curvas se cruzam e a partir deste ponto perdem o significado físico. Os modelos paralelos não convergem e por isso não descrevem tão bem o comportamento do *annealing* na região de temperaturas altas. Os modelos curvilineares são os que melhor descrevem o processo de *annealing* para toda a faixa de temperatura.

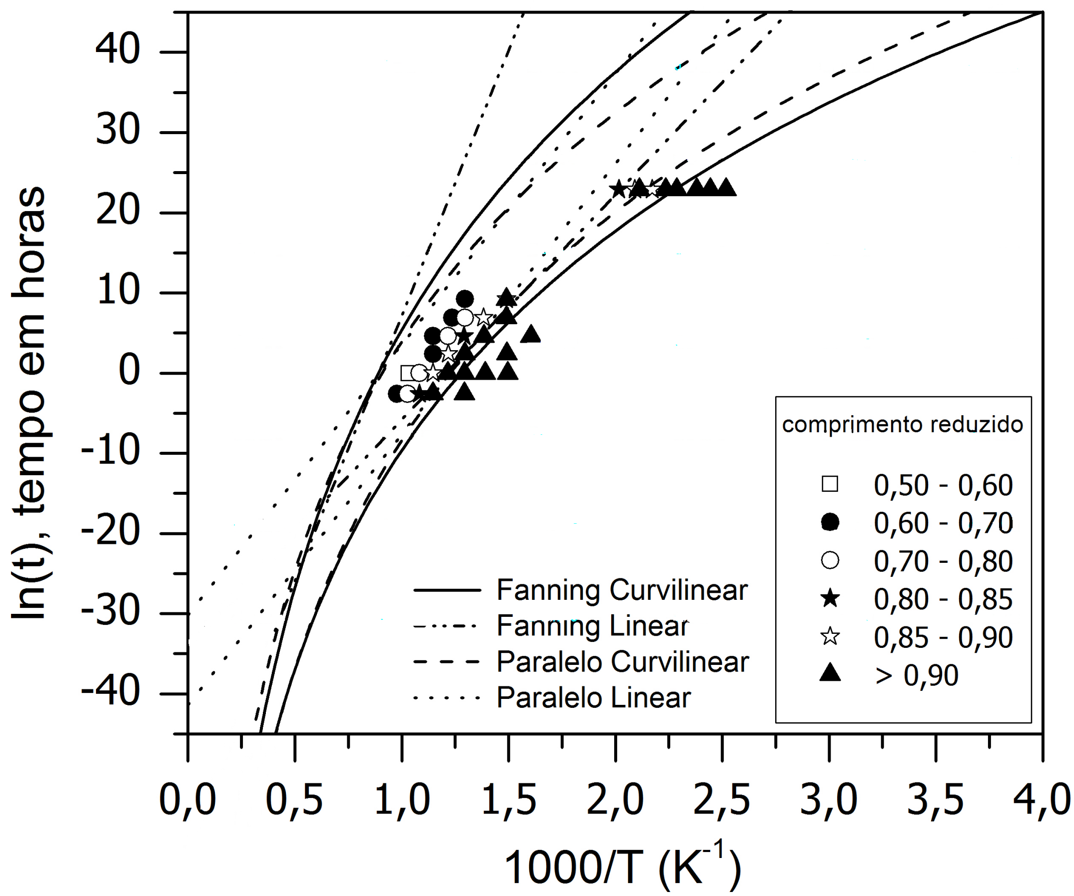

Fig. 8. Equações de modelos de annealing, para zircão, plotados no espaço de Arrhenius.

4. AVALIAÇÃO DE PREVISÕES PARA TEMPOS GEOLÓGICOS

No intuito de avaliar previsões efetuadas com o auxílio de modelos de *annealing* de traços de fissão, são calculadas as fronteiras da zona de *annealing* parcial (ZAP) dadas por cada modelo para tempos geológicos e esses resultados são comparados com resultados experimentais.

A zona de *annealing* parcial é uma região no espaço tempo-temperatura limitada por contornos de iso-*annealing* de 10 e 90% de redução na densidade de traços (Rahn *et al.*, 2004; Durrani e Khan, 1970; Tagami e Dumitru, 1996). Uma vez conhecido l_0, calcula-se a redução do comprimento para uma dada temperatura para cada um dos modelos de *annealing*. A fim de se calcular a ZAP é necessário se conhecer a redução da densidade $d = \rho / \rho_o$. No entanto, não se tem, para os conjuntos de dados considerados, estes valores medidos. Foi utilizada então a transformação da redução do comprimento para a redução da densidade calculada a partir da equação (57) apresentada por Guedes *et al.* (2004):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{1}{l_0}\right) \frac{\left[1 - [1 + (kl_0 (l/l_0)^n)]^{-2}\right]}{\left[1 - [1 + (kl_0)^n]^{-2}\right]} \qquad (57)$$

onde *k* e *n* são parâmetros relacionados às características particulares dos minerais. Os valores de *k* e *n* utilizados neste trabalhos foram extraídos de Guedes *et al.* (2004), $k = 0{,}18$ e $n = 2{,}5$.

Durante o processo de *annealing* considera-se que novos traços são gerados continuamente. O intervalo de aquecimento, t, é dividido em N_p intervalos de duração (t/N_p), e a redução da densidade de traços calculada para um dado intervalo é considerada para todos os intervalos subseqüentes. Esta soma das reduções é considerada desde o tempo em que os traços foram gerados até o presente. A redução de densidade final será a média das reduções ocorridas em todos os intervalos N_p. Sendo assim, varia-se a duração do aquecimento, *t*, e são calculadas as temperaturas para as quais a redução da densidade seja 10% e 90%. Desta forma, tem-se os limites base e topo para a ZAP, respectivamente.

Rahn *et al.* (2004) apresentaram resultados experimentais de *annealing* de traços de fissão em zircão em tempos geológicos de um conjunto de vários autores, conforme Figura 9, onde são mostradas as condições de *annealing* total (áreas pretas), condições de *annealing* parcial (cinza escuro) e traços sem *annealing*, (cinza claro). Deve ser notado que o *annealing* total deve ser encarado como redução de 90% da densidade e o sem *annealing* como redução de 10%.

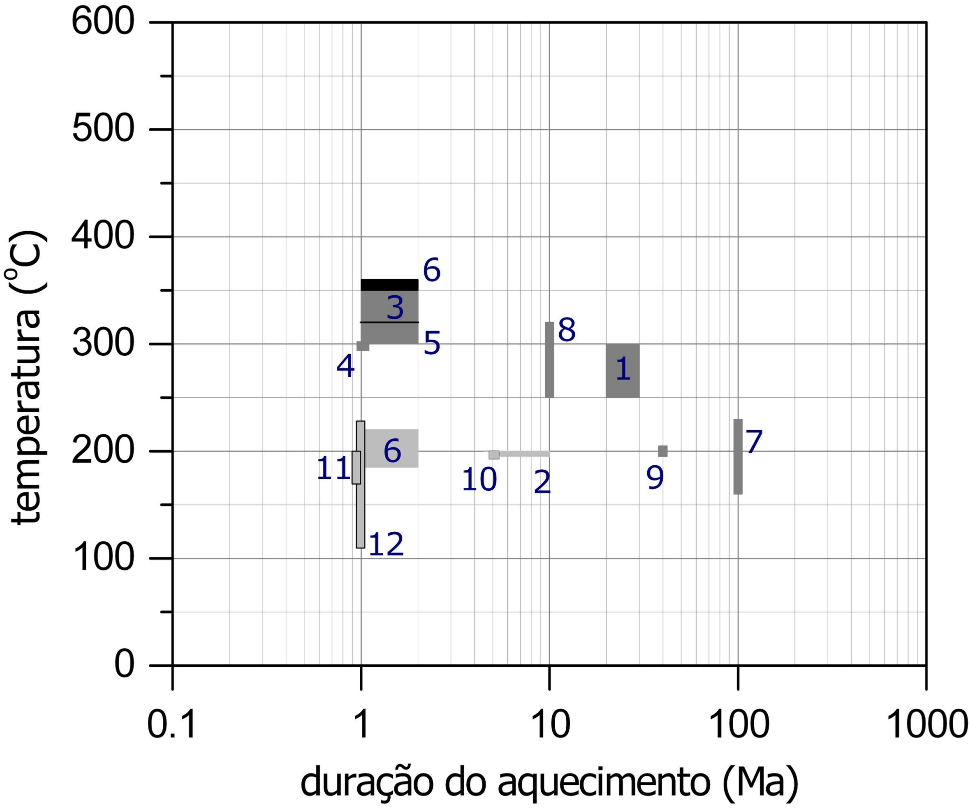

Fig. 9. Dados da literatura para *annealing* de traços de fissão em zircão: (1) Árkai *et al.* (1995); (2) Tagami *et al.* (1995); (3) Carpéna e Caby (1984); (4) Ito e Tanaka (1995); (5) Ranh e Brandon (1998); (6) Rahn *et al.* (2000); (7) Zaun e Wagner (1985); (8) Hasebe et al. (1997); (9) Ohmori *et al.* (1997); (10) Tagami e Shimada (1996); (11) Roden *et al.* (1993); (12) Hasebe *et al.* (2003).

Os valores calculados dos limites topo e base da ZAP para a calibração do conjunto de dados do CASO 2 e considerando os traços > 60º (Tabela 10 e Figura 6) são apresentados nas Tabela 13 e na Figura 10. São apresentadas as temperaturas estimadas da ZAP para o aquecimento isotérmico de 0,1 a 1000 Ma.

Tabela 13. Comparação das zonas de *annealing* parcial estimadas para as condições de aquecimento isotérmico de 1 a 1000 Ma.

Tipo modelo	**0,1** (Ma)		**1** (Ma)		**10** (Ma)		**100** (Ma)		**1000** (Ma)	
	topo	base	topo	base	topo	base	topo	base	topo	base
FA	505	242	481	220	458	201	437	183	147	166
FC	439	230	404	202	371	175	339	150	309	127
CS	387	284	359	265	334	247	311	228	290	214
LGFL	428	241	404	219	381	200	360	182	339	165
LGPL	387	286	360	266	335	248	312	231	291	215
RHFL	403	258	377	237	353	218	330	201	309	184
RHPL	391	275	363	255	336	237	312	219	289	203
YPC	388	233	352	206	318	180	286	155	255	132
CR	411	225	391	206	376	191	364	179	356	172

Nota: O topo e a base da ZAP são calculados definindo a redução na densidade d=0,1 e 0,9, respectivamente.Temperaturas em (ºC).

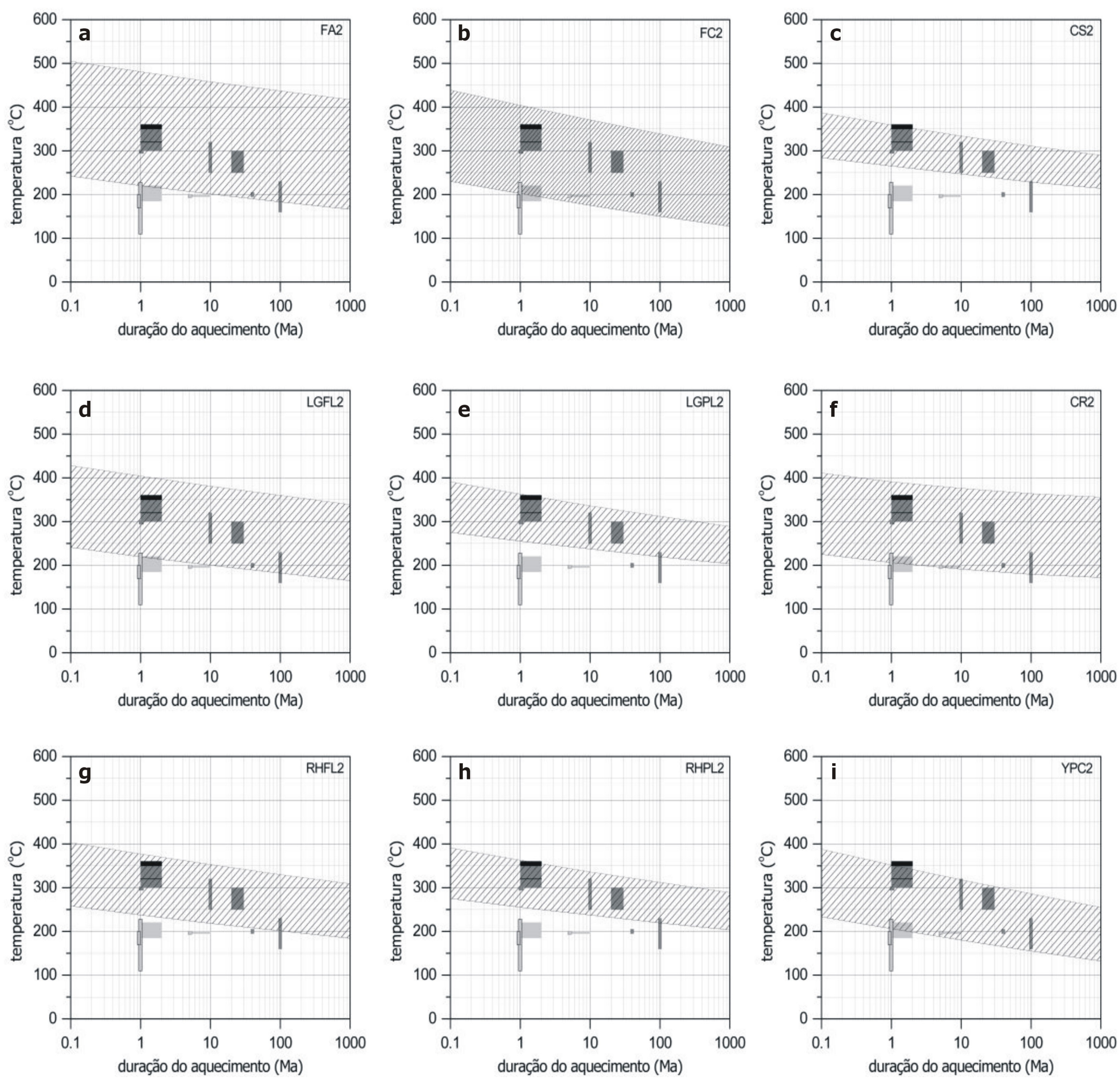

Fig. 10. Comparação das ZAP calculadas para os modelos de *annealing* calibrados com conjunto de dados CASO 2 e traços > 60º. Modelos: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

Observa-se na Fig. 10(i) que o modelo Paralelo Curvilinear de Yamada *et al.* (2007) (YPC) é o que melhor prevê a ZAP para os dados geológicos apresentados. O modelo de Crowley *et al.* (1991) (FC) na Fig. 10(b) prevê razoavelmente bem a ZAP, apresentando valores ligeiramente altos para o topo da zona.

O modelo da Fig. 10(a) Laslett *et al.* (1987) (FA) apresenta temperaturas muito altas para o topo, tornando a ZAP muito larga, enquanto que os modelos da Cronologia (CR) de Guedes *et al.* (2005a), Fig. 10(f), e o de Laslett e Galbraith (1996) FL (LGFL), Fig. 10(d), apresentam temperaturas ligeiramente altas para o topo.

Os modelos das Fig. 10(c), (e), (g) e (h), Carlson (1990) (CS), Laslett e Galbraith (1996) PL (LGPL), Rahn *et al.* (2004) PL (RHFL) e Rahn *et al.* (2004)PL (RHPL), respectivamente, apresentam valores muito altos para a base e a ZAP configura-se mais estreita que o esperado.

Considerando-se os modelos com significado físico, que são Carlson (1990) e Guedes *et al.* (2005a), o último se sobressai, com melhores ajustes dos dados e com a previsão da ZAP mais de acordo com o esperado.

Um ajuste "ideal" seria o de um modelo que descrevesse bem os dados de laboratório e de tempos geológicos (com $0{,}99 > P(\chi^2_\nu) > 0{,}01$) e que sua ZAP previsse as condições de *annealing* das amostras geológicas mostradas na Fig. 9. Como isso não foi encontrado neste estudo, uma "re-calibração" dos modelos através da configuração "ideal" da ZAP, que se assemelha à apresentada pelo modelo de Yamada *et al.* (2007) PC (Fig. 9i), foi efetuada.

As novas calibrações foram feitas sem se considerar a minimização do chi-quadrado, mas sim a forma da ZAP. Os parâmetros obtidos para a re-calibração dos modelos estão mostrados na Tabela 14 e a Fig. 10 mostra a PAZ calculada com estes parâmetros.

Tabela 14 Modelos de *annealing* para o conjunto de dados traços $> 60^0$

CASO 2: parâmetros dos modelos re-calibrados

Tipo modelo	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
FA	-12,00	0,00042	-4,15	0,00075	-0,16	-12,22
FC	-43	1,03	-86,79	-9,07	-0,14	-4,08
CS	20,36	0,182	78,17	10,48		
LGFL	11,70	-4,40	0,99	-8,59	0,61	1
LGPL	10,10	6,00	0,27	34000		1
RHFL	-8,95	2,00E-4	0,0076			
RHPL	2,80	-5550	0,196			
YPC	10,97	-73,23	0,250	41,13		
CR	3	2,8	0,1028	0,00222	2,0E-5	

Nota: Para FA e FC, $C_4 = \alpha$ e $C_5 = \beta$. Para LGFL e LGPL, $C_0 = l_{max}$.
Para CR, $C_0 = n$; $C_1 = w$; $C_2 = u$; $C_3 = A_1$ e $C_4 = A_2$. n = 36 .

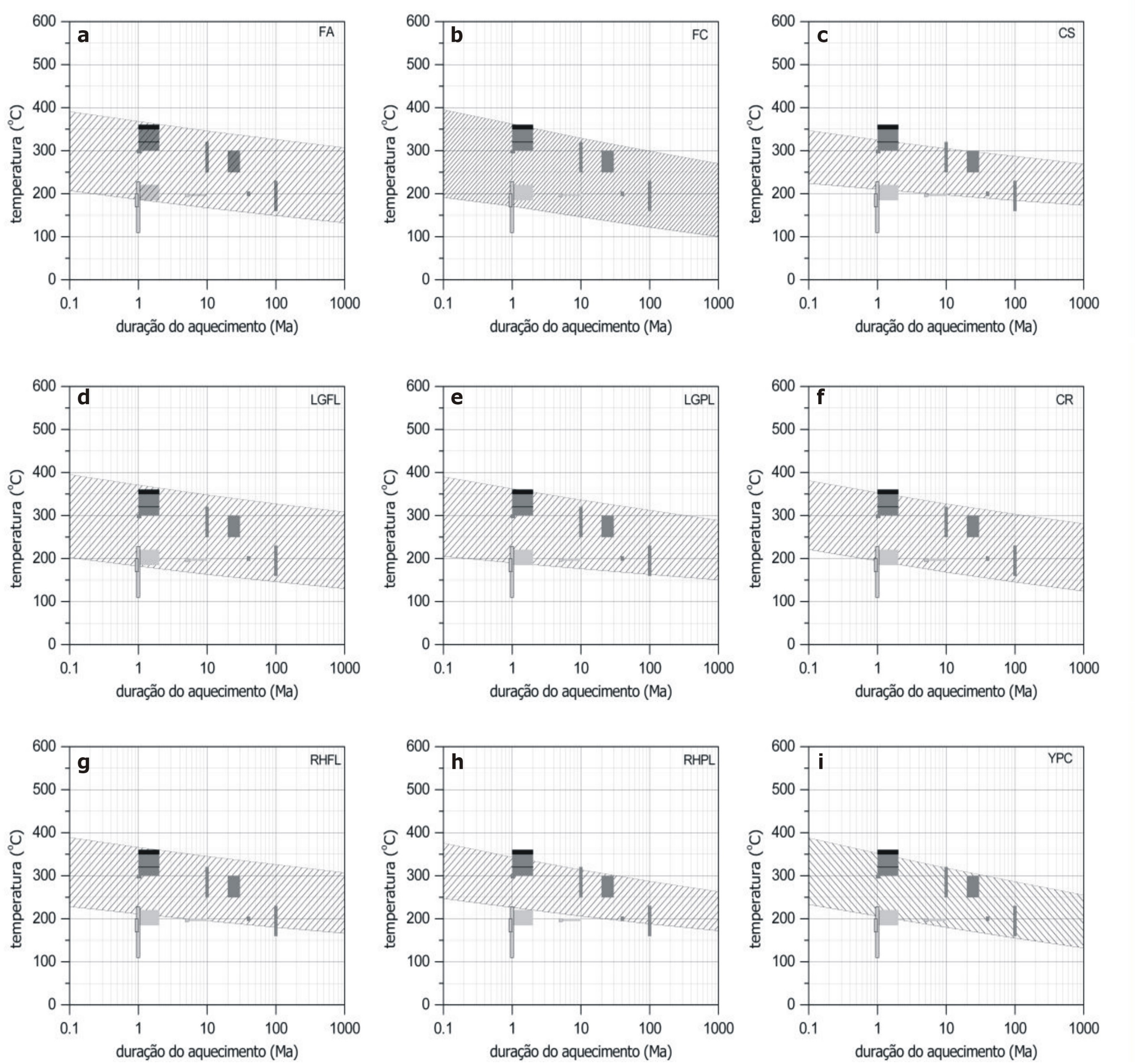

Fig. 11. Comparação das ZAP calculadas para os modelos de *annealing* “re-calibrados”. [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

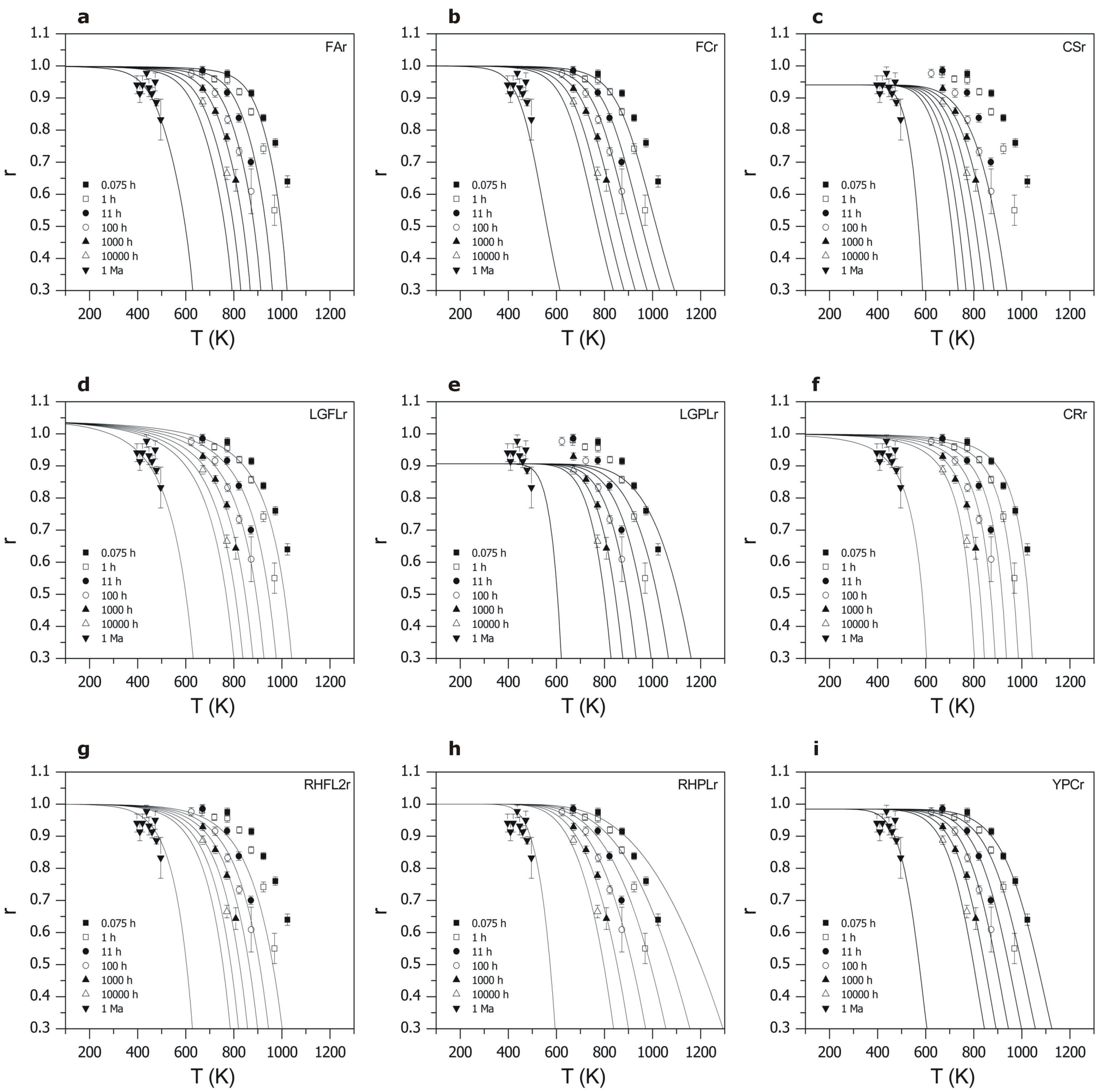

Fig. 12. Resultados da re-calibração para o conjunto de dados com traços > 60º, CASO 2. Modelos de *annealing*: [a] FA, [b] FC, [c] CS, [d] LGFL, [e] LGPL, [f] CR, [g] RHFL, [h] RHPL e [i] YPC.

Observa-se que a PAZ ajustada para estes novos parâmetros (Tabela 14) permite uma melhor descrição dos dados (com tempos geológicos) que se baseiam em densidade de traços. Uma vez que, esta nova calibração permite uma melhor previsão da Zona de *Annealing* Parcial para todos os modelos, é necessário conseqüentemente, verificar como estes parâmetros re-calibrados descrevem o comportamento do *annealing* para os dados de laboratório. A Fig. 12 mostra as curvas de ajuste feitas com os parâmetros re-calibrados da Tabela 14. Vê-se então, através desta figura que ao se calibrar os modelos de *annealing* através das evidências geológicas previstas no campo, a maioria dos modelos não ajustam os dados de laboratório.

O modelo de Yamada *et al.* (2007) PC (YPC) é o que apresenta o melhor comportamento quanto ao ajuste dos dados de laboratório e geológicos, conforme Tabela 10 e Fig. 6(i), e prevê mais precisamente a ZAP, Fig. 10(i). Ele não teve necessidade de ser re-calibrado.

O modelo de Laslett *et al.* (1987) (FA) apesar de apresentar bom ajuste frente aos dados de laboratório e geológicos inicialmente, não prevê satisfatoriamente a ZAP e na re-calibração, os dados de laboratório não permitem ajuste, conforme Fig. 12(a).

Os modelos de Laslett e Galbraith (1996) FL e PL, Rahn *et al.* (2004) FL e PL , não apresentam bom ajuste nem na calibração inicial e nem na previsão da ZAP e com a "re-calibração" o ajuste dos dados de laboratório são altamente prejudicados.

O modelo de Crowley *et al.* (1991) (FC) ajusta bem os dados de laboratório e geológicos, Tabela 10 e Fig. 6(b), no entanto, a ZAP apresenta, como já comentado, valores elevados para o topo (Fig. 10(b)). Sendo assim, ao se fazer a re-calibração, os ajustes para os dados de laboratório são prejudicados.

Considerando-se os modelos com significado físico, Carlson (1990) e Guedes *et al.* (2005a), vê-se que o primeiro não ajusta bem os dados de geológicos e nem a ZAP e após a “re-calibração”, o modelo não se comporta satisfatoriamente. O modelo da Cronologia (CR) de Guedes *et al.* (2005a) não apresenta valores satisfatórios para o ajuste inicial dos dados, prevê a ZAP razoavelmente e após a “re-calibração”, se observa um bom ajuste para os dados de laboratório.

5. Conclusões

Foram feitas calibrações dos modelos de *annealing* de traços de fissão em zircão usando-se dados de laboratório e dados geológicos. O conjunto de dados de laboratório abrangeu experimentos isotérmicos na faixa de ~4s a 10.000 h, com temperaturas entre 350 a 910 ^{O}C. O conjunto de dados geológicos é o apresentado por Hasebe *et al.* (2003), que mostra os resultados de *annealing* de traços de amostras de zircões dos poços MITI-Nishikubiki e MITI-Mishima, Japão.

Foram calibrados os seguintes modelos de *annealing*: i) Classificados como empíricos, Laslett *et al.* (1987); Crowley *et al.* (1991); Lasllet e Galbraith (1996); Rahn *et al.* (2004) e Yamada *et al.* (2007) e ii) Com modelagem mais física, Carlson (1990) e Guedes *et al.* (2005a).

As calibrações preliminares que obtiveram melhor ajuste, segundo a minimização do chi-quadrado, foram as obtidas para os conjuntos de dados que consideram os traços com ângulos maiores que 60^{O} com o eixo-c e os modelos com ajustes satisfatórios foram o Fanning Linear de Laslett *et al.* (1987), o Fanning Curvilinear de Crowley *et al.* (1991) e o Paralelo Curvilinear de Yamada *et al.* (2007).

A fim de se avaliar as previsões dadas pelos modelos de *annealing* com evidências geológicas baseadas em densidade de traços, as fronteiras da zona de *annealing* parcial para o zircão (ZAP) foram calculadas. O modelo que melhor descreveu a ZAP foi o de Yamada *et al.* (2007). Tomando-se este perfil para a ZAP como o “ideal”, foi proposta uma “re-calibração” dos modelos de *annealing*, desconsiderando-se a minimização do chi-quadrado para os ajustes.

Uma vez realizada esta re-calibração, verificou-se que para a maioria dos modelos a ZAP se ajusta de modo satisfatório, ocorrendo no entanto, o desvio da calibração dos dados de laboratório.

No entanto, pode-se dizer que os modelos que se sobressaem tanto no ajuste de dados de laboratório e geológicos e na extrapolação para tempos de milhões de anos, através do cálculo da ZAP, são no grupo dos modelos empíricos o de Yamada *et al.* (2007) e para os modelos mais físicos, o de Guedes *et al.* (2005a).

Referências

Akiyama, M., Hirai, A. (1997) Maximum paleotemperature gradient using vitrinite reflectance mainly of the government MITI exploratory test wells. J. Jpn. Assoc. Pet. Technol. 62, 69–79 (in Japanese).

Árkai, P., Balogh, K., Dunkl, I. (1995) Timing of low-temperature metamorphism and cooling of the Paleozoic and Mesozoic formations of the Bükkium, innermost Western Carpathians, Hungary. Geologische Rundschau, 84, 334–344.

Carpéna, J., Caby, R. (1984) Fission-track evidence for late Triassic oceanic crust in the French Occidental Alps. Geology, 12, 108–111.

Bigazzi, G. (1967) Length of fission track an age of muscovite samples. Earth and Planetary Science Letters, 3, 313-318.

Bigazzi, G., Hadler N., J. C., Norelli, P., Osorio A., A. M., Paulino, R., Poupeau, G., Stella de Navia, L. (1988) Dating of glass: the importance of correctly identifying fission tracks. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 15, 711-714.

Box, G.E.P., Cox, D.R. (1964) An analysis of transformations. J.R. Stat. Soc., Ser. B, 26: 211-252.

Carlson, W. D. (1990) Mechanisms and kinetics of apatite fission-track annealing. Amer. Mineral. 75, 1120-1139.

Crowley, K. D. (1985) Thermal significance of fission-track length distributions. Nucl. Tracks, 10, 311-322.

Crowley, K.D., Cameron M., Shaefer R.L. (1991) Experimental studies of annealing of etched fission tracks in fluor apatite. Geoch. Cosmoch., 55, 1449-1465.

Curvo, E. A. C., Hadler N., J. C., Iunes, P. J., Guedes, S., Tello S., C. A., Paulo, S. R., Hack-spacher, P. C., Palissari, R., Moreira, P. A. F. P. (2005) On Epidote fission track dating. Radiation Measurements, 39 (6), 641-645.

Dartyge, E., Durand J. P., Langevin Y., Maurtte M. (1981) A new model of nuclear particle tracks in dieletric minerals. Phys. Rev. B, 23, 5213-5229.

Durrani, S.A., Khan, H.A. (1970) Annealing of fission tracks in tektites: corrected ages of bediasites. Earth and Planetary Science Letters, 9, 431–445.

Donelick, R.A., Roden, M. K., Mooers, J. D., Carpenter B. S., Miller, D. S. (1990) Etchable length reduction of induced fission tracks in apatite at room temperature (~23 ^{0}C): crystallographic orientation effects and "initial" mean lengths. Nuc. Tracks Radat. Meas. 17, 3, 261-265.

Donelick, R.A. (1991) Crystallographic orientation dependence of mean etchable fission track length in apatite: An empirical model and experimental observations. American Mineralogist, 76, 83-91.

Duddy, I.R., Green P.F., Laslett G.M. (1988) Thermal annealing of fission tracks in apatite. 3.Variable temperature behaviour. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.), 73, 25-38.

Fleisher, R.L., Price, P.B. (1963) Charged particle tracks in glass., J. Appl. Phys., 34, 2903-2904.

Fleisher, R. L., Price, P. B., Walker, R. M. (1975) Nuclear tracks in solids: Principles and applications. J. Geophys. Res., 79, 339-342.

Galbraith, R.F., Laslett, G.M. (1997) Statistical modelling of thermal annealing of fission tracks in zircon. Chem. Geol., 140, 123-135.

Green, P.F., Duddy, I.R.,. Gleadow, A. J. W, Tingate, P. R , Laslett, G. M. (1986) Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. A Qualitative Description. Chemical Geology, 59, 237-253.

Green, P.F., Duddy, I.R.,. Laslett, G. M,. Hegarty, K.A, Gleadow, A. J. W., Lovering, J. F. (1989) Thermal annealing of fission tracks in apatite: 4. Qualitative modeling techniques and extension to geological timescales. Chemical Geology, (Isot. Geosci. Sect.), 79, 155-182.

Green, P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W., Tingate P.R., Laslett G.M. (1986) Thermal annealing of fission tracks in apatite, 1. A qualitative description. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.), 59, 237-253.

Guedes, S, C. A., Hadler N., J. C., Iunes, P., Tello S. (2004) Kinetic model for the relationship between confined fission-track length shortening and fission-track age reduction in minerals. Nucl. Instr. Meth. B, 217, 627–636.

Guedes S., Hadler J. C. N., Iunes P. J., Oliveira K. M. G., Moreira P. A. F. P., Tello C. A. S. (2005a) Kinetic model for the annealing of fission tracks in zircon. Radiat. Meas., 40, 517-521.

Guedes S., Iunes P.J., Neta J.C.H., Bigazzi G., Tello C.A.S., Alencar I., Palissari R.,. Curvo E.A.C, Moreira P. (2005b) Kinetic model for the relationship between mean diameter shortening and age reduction in glass samples. Radiat. Meas., 39, 647–652.

Guedes, S., Curvo E. A. C., Tello S., C. A., Hadler N., J. C., Iunes, P., Paulo S. R., Palissari R. (2007) On the annealing of fission tracks in randomly oriented grains of apatite. Nucl. Instr. Meth. B, 256, 683–692.

Haack, U. (1972) Systematics in the fission track annealing of minerals. Contrib. Mineral. Petrol., 35, 303-312.

Hasebe N., Tagami T., Nishimura S., (1994) Towards zircon fi ssion-track thermochronology: reference framework for confined track length measurements. Chem Geol 112:169-178

Hasebe, N., Tagami, T., Nishimura, S. (1997) Melange-forming processes in the development of an accretionary prism: Evidence from fission track thermochronology. Journal of Geophysical Research, 102, 7659–7672.

Hasebe, N., Mori, S., Tagami, T., Matsui, R. (2003) Geological partial annealing zone of zircon fission-track system: additional constraint from the deep drilling MITI- Nishikubiki and MITI-Mishima. Chem. Geol., 199, 45-52.

Ito, H., Tanaka, K. (1995) Insights on the thermal history of the Valles Caldera, New Mexico: evidence from zircon fission-track analysis. Journal of Vocanology and Geothermal Research, 67, 153–160.

Iunes, P.J., Bigazzi G., Hadler J.C., Paulo S.R. (2002) Study of the inhomogenety of particle source using Legendre polynomials. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 254, 387-389.

Laslett, G.M., Green P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W. (1987) Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.), 65, 1-13.

Laslett, G.M. , Galbraith, R.F. (1996) Statistical modeling of thermal annealing of fission tracks in apatite. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 5117 – 5131.

Lutz, T.M., G. Omar (1991) An inverse Method of modeling thermal histories from apatite fission-track data. Earth and Planetary Science Letters, 104, 181-195.

Murakami, M., Yamada, R., Tagami, T. (2006) Short-term annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon: A qualitative description. Chem. Geol. (Isot. Geosc. Sect.), 227, 214-222.

Ohmori, K., Taira A., Tokuyama, H., Sakaguchi, A., Okamura, M., Aihara, A., (1997) Paleothermal structure of the Shimanto accretionary prism, Shikoku, Japan; role of an out of sequence thrust. Geology, 25, 327-330.

Palenik, C.S., Nasdala, L., Ewing, R C. (2003) Radiation damage in zircon. Am. Mineral., 88, 770-781.

Price, P.B., Walker, R.M. (1962a) A new detector for heavy particle studies. Phys. Lett., 3, 113-115.

Price, P.B., Walker, R.M. (1962b) Observations of charged-particle tracks in solids. J. Appl. Phys., 33, 3400-3406.

Price, P.B., Walker R.M. (1962c) Chemical etching of charged-particle tracks in solids. J. Appl. Phys., 33, 3407-3412.

Price, P.B., Walker, R.M. (1962d) Observation of fossil particle tracks in natural micas. Nature, 196, 732-734.

Price, P.B., Walker, R.M. (1963) Fossil tracks of charged particles in micas and the age of minerals. J. Geophys. Res., 68, 4847-4862.

Rahn, M.K., Brandon, M. T. (1998) Prograde subgreenschist metamorphism in the Olympic Mountains: constraints on mineral stability and partial annealing temperatures for zircon fission tracks. EOS Transactions, supplementary abstract volume, AGU Spring Meeting, Boston, S380.

Rahn, M.K., Mullis, J., Brandon, M.T., Hurford, A.J. (2000) Field constraints on the zircon fission track partial annealing zone boundaries in fast evolving orogens. GSA Annual Meeting 2000, AAPG, A–152.

Rahn M. K., Brandon M. T., Batt G. E., Garver J. I. (2004) A zero-damaged model for fission-track annealing in zircon. Am. Mineral., 89, 473-484.

Roden, M.K., Elliott, W.C., Aronson, J.L., Miller, D.S. (1993) 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, 101, 633–641.

Sakurai, J.J. (1994) Modern Quantum Mechanics. Addison-Wesley, MenloPark, CA, 500pp.

Tagami, T., Ito. H., Nishimura, S. (1990) Thermal annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon. Chemical Geology, 80 (2), 159-169.

Tagami, T., Carter, A., Hurford, A. J. (1995) 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, 130 (1-2), 147-157.

Tagami, T., Dumitru, T.A. (1996) Provenance and thermal history of the Franciscan accretionary complex; constraints from fission track thermochronology. Journal of Geophysical Research, B101, 11353–11364.

Tagami, T., Galbraith, R.F., Yamada, R., Laslett, G.M. (1998) Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. In: P. Van den haute and F. De Corte, Eds. Advances in fission-track geochronology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 330 pp.

Tagami, T., Shimada C. (1996) Natural long-term annealing of the zircon fission track system around a granitic pluton. Journal of Geophysical Research, B101, 8245-8255.

Tello S., C.A. (1998). Estudo de annealing de traços de fissão em apatitas, tanto em seções basais como em seções sem orientação preferencial a partir do comprimento e da densidade de traços de fissão. Dissertação de tese de doutorado apresentada no Instituto de Física "GlebWataghin", UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.110 pp.

Turnbull, D. (1956) Phase Changes. Solid State Physics, 3, 225-306.

Yada K., Tanji T., Sunagawa I. (1987) Radiation induced lattice defects in natural zircon (ZrSiO4) observed at atomic resolution. Phys. Chem. Min., 14, 197–204.

Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S., Ito, H. (1995) Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental-study. Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect), 122, 249-258.

Yamada, R., Murakami, M., Tagami, T. (2007) Statistical modeling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. Chem. Geology, 236, 75-91.

Wagner, G. A. (1968) Fission track dating of apatites. Earth Planet. Sci. Lett., 5, 463-468.

Wagner, G. A., P. Van den Haute. (1992) Fission-track dating. Kluwer Acad., Norwell, Mass., 285 pp.

Zaun, P.E., Wagner, G.A. (1985) Fission track stability in zircons under geological conditions. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 10, 303–307.