

TERMOCRONOLOGIA DE ALGUMAS REGIÕES BRASILEIRAS ATRAVÉS DA ANÁLISE
DE TRAÇOS DE FISSÃO EM APATITAS

Aluno: Carlos Alberto Tello Sáenz

Orientador: Julio Cesar Hadler Neto

Co - orientador: Sérgio Roberto de Paulo

UNICAMP - INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN

Abril - 1994

Este exemplar corresponde à redação final da tese de mestrado de Carlos Alberto Tello Sáenz, tal como foi defendida pelo aluno e aprovada pela Comissão Julgadora

[Handwritten signature]
26/04/94

A banca examinadora:

Prof. Dr. Julio Cesar Hadler (IFGW-UNICAMP)

Prof. Dra. Marília Tereza Freitas Cesar Khouri (IPEN/CNEN)

Prof. Dr. Elson Paiva de Oliveira (I.G.-UNICAMP)

Suplentes:

Profa. Dra. Carola Dobrigkeit Chinellato (IFGW-UNICAMP)

Profa. Dra. Ana Maria Osorio Araya (UNESP/PRESIDENTE PRUDENTE)

AGRADECIMENTOS

Prof. Dr. Gilberto Amaral, Prof. Dr. Koji Kawashita, Prof. Dr. Elson Paiva de Oliveira, Prof. Dr. Delzio de Lima Machado Júnior e Prof. Dr. Helmut Born pela efetiva colaboração suprindo as amostras de apatita que foram analisadas neste trabalho.

À Dailton Silva pelo magnífico trabalho no polimento da lâmina contendo a amostra de apatita (E-1).

À Dra. Marina Koskinas e Dra. Marília Freitas pela valiosa colaboração nas irradiações das amostras estudadas neste trabalho.

À Ana Valdivia León pela amizade e colaboração na fase inicial da tese.

À Berenice López Milla pelo apoio na vinda ao Brasil.

À Yuko Yoshimoto pelo constante apoio na realização desta tese.

Aos funcionários da Biblioteca da IFGW.

Às entidades CAPES, CNPQ e FAEP, por seu auxílio financeiro.

À todas as pessoas que, de uma forma ou outra ofereceram sua colaboração.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Ao Prof. Dr. Julio pela amizade, dedicação, orientação e acima de tudo pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo pela valiosa orientação na realização deste trabalho.

A Pedro pela amizade, pela dedicação e constante apoio na realização deste trabalho.

A Lígia, Flávia, Ana Maria, Narciso e Agustín pela amizade e auxílio incansável durante a realização deste trabalho.

A Benito Tello V. pela força do seu carinho e apoio total,
A Amado Tello R. pelo apoio moral, confiança, amor e compreensão,
A Maria, Julio, Alfredo e especialmente à minha Mãe a quem amo mais
do que sou capaz de dizer,
Aos meus irmãos pelo seu carinho.

Índice

Resumo	3
Abstract	4
1.- Introdução.	5
2.- Modelo utilizado	11
3.- Procedimento experimental	39
4.- Aplicação do modelo à apatitas de algumas regiões brasileiras	48
5.- Conclusões	80
Apêndice I: Programa computacional utilizado.	82
REFERÊNCIAS	91

Resumo

Neste trabalho utilizou-se o método dos traços de fissão para se estudar a história térmica de amostras de apatitas originadas de três regiões brasileiras (craton do São Francisco, borda oriental da Bacia do Paraná e uma região entre o craton do São Francisco e a Bacia do Paraná). As histórias térmicas foram obtidas através da utilização do modelo "Análise de Traços de Fissão em Apatita" (Apatite Fission Track Analysis), desenvolvido pela "escola australiana", amplamente utilizado atualmente.

Neste trabalho, não se buscou fazer interpretações geológicas acerca das histórias térmicas observadas. Procurou-se mais se investigar se o modelo utilizado produz resultados coerentes e seletivos. Nossos resultados mostram que para se obter interpretações geológicas mais precisas serão necessárias mais amostras e mais informações sobre o gradiente geotérmico dos locais onde as amostras foram coletadas.

Abstract

In this work, thermal history of apatites originated from three brasilian regions (craton of São Francisco, region situated between the craton of São Francisco and Paraná Basin and oriental border of the Paraná Basin) were studied by using the fission track method.

Thermal histories were obtained applying the theoretical model named "Apatite Fission Track Analysis" into our experimental data.

Here, one do not aim to perform the geological interpretation concerning the thermal histories that were obtained. Our effort was driven to investigate the utilized model: the coherency and selectivity of its results.

Our results showed that in order to perform accurate geological interpretation additional samples should be provided and, also, the knowledge about the thermal gradient of the collection places should be improved.

1.- Introdução.

Os minerais, em geral, contêm urânio como impureza, em quantidades da ordem de algumas p.p.m. O U-238, isótopo mais abundante do urânio natural, tem uma certa probabilidade de se fissionar espontaneamente, e quando isto ocorre, é produzido no interior do mineral uma zona completamente desarranjada, devido à grande energia, massa e carga dos fragmentos de fissão. Esta região chama-se traço latente.

Os traços latentes são produzidos cumulativamente no mineral durante sua história geológica.

Se o mineral é submetido a um ataque químico conveniente, os traços latentes que se estenderam até a sua superfície, por serem mais reativos ao ataque químico que o corpo do mineral, ficam amplificados e podem ser observados ao microscópio óptico comum. O número de traços espontâneos (ou fósseis) visíveis ao microscópio óptico por unidade de superfície, ρ_s , permite que se determine a idade do mineral, T, através da relação:

$$\rho_s = N_0 C_{238} \frac{\lambda_f}{\lambda} [\exp(\lambda T) - 1] \epsilon_{238} \quad (1)$$

Onde: N_0 é o número de átomos de urânio, por unidade de volume, presente no mineral;

C_{238} é a concentração isotópica do U-238 no urânio

natural;

λ é a constante de decaimento alfa do U-238, em unidade de tempo⁻¹;

ϵ_{238} é um fator de eficiência de detecção, que representa a razão entre o número de traços de fissão espontânea do U-238, observados por unidade de superfície do mineral, e o número de fissões espontâneas do U-238, ocorridas por unidade de volume.

Para se evitar as difíceis determinações de N_U e ϵ_{238} , irradia-se o mineral a ser datado, num reator nuclear, com uma fluência de neutrons térmicos, ϕ_0 . Após uma segunda revelação química, pode-se contar, ao microscópio, o número de traços de fissão do U-235, induzida por neutrons térmicos, por unidade de superfície, ρ_I :

$$\rho_I = N_U C_{235} \sigma_0 \phi_0 \epsilon_{235} \quad (2)$$

Onde: C_{235} é a concentração isotópica do U-235 no urânio natural;

σ_0 é a seção de choque para fissão do U-235 induzida por neutrons térmicos.

ϵ_{235} é um fator de eficiência de detecção análogo a ϵ_{238} , para as fissões induzidas do U-235.

Assumindo que os traços latentes de fissão espontânea, permaneceram inalterados no mineral, durante sua história

geológica, pode-se escrever que $\epsilon_{238} = \epsilon_{235}$ (Bigazzi et al., 1991). Lembrando-se ainda que os átomos de U-238 e de U-235, são encontrados em amostras naturais numa razão isotópica constante, ou seja, $C_{238}/C_{235} = \eta$, se obtêm das equações (1) e (2) a idade do mineral pelo MTF (Método dos Traços de Fissão):

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{\lambda \sigma_0 \phi_0}{\lambda_p \eta} \frac{\rho_p}{\rho_r} \right) \quad (3)$$

O que foi resumido aqui resultou dos trabalhos pioneiros desenvolvidos por Fleischer, Price e Walker no início dos anos sessenta (Price and Walker, 1962a, b, c, d; Fleischer and Price, 1963; Price and Walker, 1963).

Uma boa síntese dos problemas e das possíveis aplicações do MTF pode ser encontrada em Fleischer et al., 1975.

Alguns estudos efetuados na década de 60 demonstraram que os traços de fissão são sensíveis a tratamentos térmicos (por exemplo, Bigazzi, 1967; Wagner, 1968). O que se observou foi que a idade de minerais que sofreram annealing (recozimento) durante suas histórias geológicas era menor que a idade de formação do mineral. Isto ocorreu porque o annealing faz com que os traços sofram uma redução no seu comprimento, acarretando em uma diminuição de ϵ_{238} em relação a ϵ_{235} .

O apagamento dos traços de fissão é devido à instabilidade térmica da região do mineral que foi danificada com a passagem do fragmento de fissão.

A natureza dos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante o annealing vem sendo estudada desde a década de 70 (por exemplo, Haack,1972; Dakowsky et al., 1974; Bertagnolli et al., 1981; Crowley, 1985; Bigazzi et al 1988) mas ainda hoje não é bem conhecida.

A distribuição dos comprimentos dos traços espontâneos, produzidos durante a história geológica do mineral, contém informações sobre sua história térmica. A história térmica é um parâmetro importante em alguns estudos geológicos. Por exemplo, na prospecção de petróleo (Gleadow et al., 1983) e na extração de minerais (Naeser, 1984; Etninam et al., 1984). Desta forma, no final da década de 80 e início desta década, alguns pesquisadores optaram pela descrição do processo de annealing como um todo (Laslett et al., 1987; Crowley et al., 1991), sem procurar isolar os parâmetros envolvidos (temperatura, anisotropia e gaps não atacáveis como veremos abaixo).

O mineral mais estudado foi a apatita devido à sua importância na prospecção de petróleo.

O petróleo se forma principalmente em temperaturas de 60 à 125°C, que é o mesmo intervalo de temperatura no qual em tempos geológicos, traços de fissão em apatitas têm seus comprimentos diminuídos, de forma facilmente mensurável. A história

térmica e a temperatura máxima a que foram submetidas as reservas que contêm hidrocarbonetos são fatores importantes na maturação de tais detritos. Muitos indicadores de paleotemperaturas máximas são utilizados rotineiramente, sendo que o mais importante deles é a medida da reflectância da vitrinita (ver por exemplo Kantsler et al., 1978). Porém, possíveis variações da temperatura através do tempo podem somente ser obtidas através da história do enterro, via o chamado "Lithospheric Stretching model" (ver por exemplo, Hegarty, 1985; Hegarty et al., 1988).

O estudo do annealing dos traços de fissão em apatitas fornece uma nova ferramenta para se obter a história térmica a que foram submetidas rochas que contêm hidrocarbonetos e também é um indicador da paleotemperatura máxima.

A dinâmica do annealing de traços de fissão em apatita foi estudada e estabelecida por um grupo australiano, depois de laboriosos trabalhos experimentais (Green et al., 1986, Laslett et al., 1987; Duddy et al., 1988; Green et al., 1989). A partir do modelo proposto pelo grupo australiano, a história térmica de amostras geológicas pode ser inferida conhecendo-se a idade do mineral e a distribuição dos comprimentos dos traços espontâneos, através do chamado "modelo inverso" (Lutz e Omar, 1991). O modelo inverso pode ser encarado como um complemento do modelo do grupo australiano.

Neste trabalho o modelo do grupo australiano e o modelo inverso foram aplicados a algumas apatitas da Bahia, São Paulo,

Goiás e Minas Gerais.

O objetivo deste trabalho é cumprir uma etapa inicial de um estudo mais amplo que o grupo de Cronologia da UNICAMP pretende realizar sobre o annealing de traços de fissão em apatitas. Desta forma preferimos primeiro nos familiarizar com um modelo bastante utilizado a nível mundial (Green, 1989; Arne et al., 1990; Fitzgerald e Gleadow, 1990; Giegengack et al., 1990; Kamp e Green, 1990; Brown and Green, 1991; Arne, 1992; Hansen, 1992; Kamp et al., 1992; Corrigan, 1993; Murphy e Bakke, 1993) aplicando-o a amostras brasileiras.

2.- Modelo utilizado

Em trabalhos anteriores aos do grupo australiano (Naeser and Faul, 1969; Wagner and Reimer, 1972; Nagpaul et al., 1974; Koul, 1979; Hammerschmidt et el., 1984), os resultados de annealing em laboratório foram apresentados em termos de tempo, temperatura e densidade de traços. Nos trabalhos do grupo australiano foram medidos comprimentos de traços, ao invés de densidades. O principal motivo alegado é que a medida de comprimento é muito mais precisa que a de densidade, já que esta última depende do critério adotado na contagem dos traços (que pode variar de um pesquisador p/ outro, tornando difícil a comparação de diferentes estudos). Desta forma foram relacionados tempo e temperatura de annealing com distribuição de comprimento dos traços.

As distribuições de comprimento dos traços foram obtidas medindo-se apenas os traços confinados, que são aqueles que estão contidos inteiramente dentro do mineral (como mostra a figura 1). Neste trabalho, para facilitar e tornar mais precisa a medição, só foram medidos os traços confinados paralelos à superfície de observação.

Abaixo estão descritos os procedimentos experimentais utilizados pelo grupo australiano para a obtenção do seu conjunto de dados (Green et el., 1986).

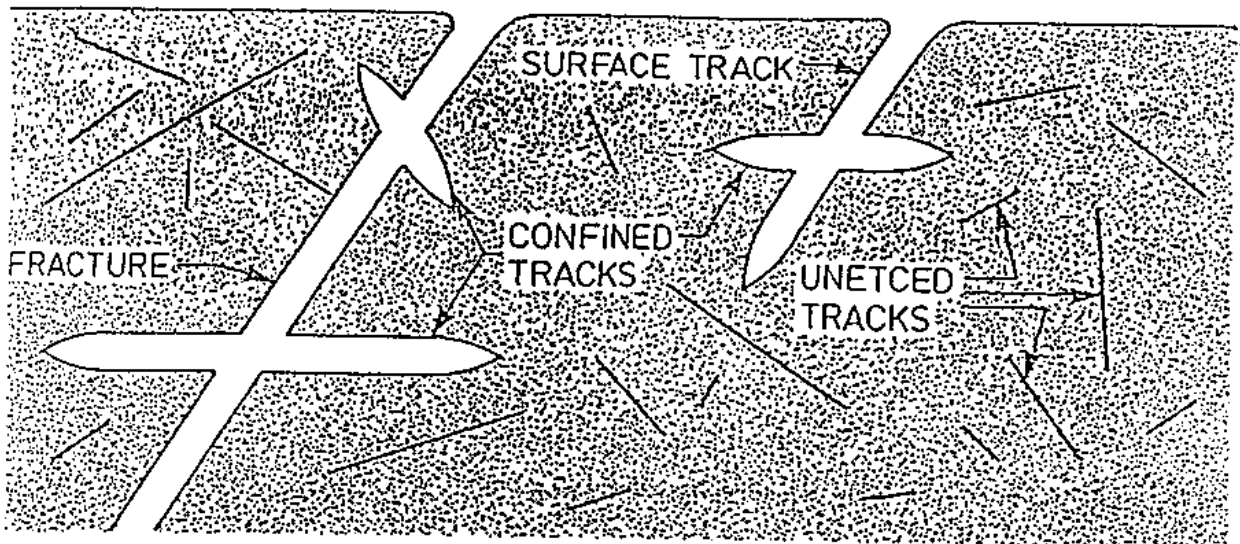


Figura 1: Ilustração de traços confinados em um mineral.

O annealing de traços de fissão foi estudado em cristais da apatita de Durango, México (Young et al., 1969). Tais cristais foram submetidos a uma temperatura de 450⁰C durante 5 horas (para se obter o apagamento total dos traços espontâneos) e em seguida irradiados com uma fluência de 10¹⁶ neutrons/cm² para-se obter uma densidade adequada de traços de fissão induzidos. Finalmente submeteu-se as amostras a annealing artificiais de intensidade variável (temperaturas de 95 a 400⁰C e tempos de 20 Minutos a 500 dias).

Para se observar os traços ao microscópio óptico as amostras foram montadas, polidas e atacadas quimicamente (5 M HNO₃ por 20seg a 20⁰C). As medidas dos comprimentos dos traços foram efetuadas com uma régua calibrada, com divisões de aproximadamente 1 µm, que foi acoplada convenientemente à ocular do microscópio

A tabela 1 foi extraída de Green et al., (1986). Nela são mostrados os resultados de medidas de comprimento de traços, feitas em amostras que sofreram annealing a temperatura constante para várias combinações de tempo-temperatura. O chamado comprimento reduzido dos traços L/L_0 , (razão entre os comprimentos de traços que sofreram annealing, L, e de traços que não sofreram annealing, L_0) foi obtido utilizando-se medidas de L e L_0 efetuadas pelo mesmo observador. Ha uma boa concordância quando se compara os valores de L/L_0 obtidos por dois observadores diferentes, para a mesma combinação tempo -

Tabela 1:

Annealing time	Annealing temperature (°C)	Track length (µm)		Standard deviation of track length distribution		Df,	Number of tracks	
		{F.F.G.}	{L.R.D.}	{F.F.G.}	{L.R.D.}			
Unannealed control		15.81 ± 0.09	16.34 ± 0.11	0.89	1.11	1.00	100	
		16.35 ± 0.10**	16.51 ± 0.08**	1.02	0.82	1.00	100	
20 min.	230		16.48 ± 0.09		0.91	0.947 ± 0.009	50	
	240		16.64 ± 0.09		0.68	0.987 ± 0.009	50	
	255		16.27 ± 0.10		0.78	0.935 ± 0.009	50	
	278		14.59 ± 0.09		0.70	0.911 ± 0.008	50	
	304		14.07 ± 0.09		0.72	0.891 ± 0.008	50	
	320		13.61 ± 0.10		0.70	0.833 ± 0.008	50	
	339		12.47 ± 0.10		0.79	0.763 ± 0.008	50	
	355		11.48 ± 0.13		0.92	0.703 ± 0.009	50	
	377		8.01 ± 0.45**		1.87	0.488 ± 0.027	14	
	398	0	0	0	0	0	0	
	1 h.	200	15.17 ± 0.09		0.86		0.953 ± 0.008	100
		210	15.20 ± 0.09		0.88		0.959 ± 0.008	100
222		14.81 ± 0.10		0.87		0.931 ± 0.009	100	
225		15.04 ± 0.09		0.86		0.945 ± 0.008	100	
230		14.37 ± 0.09		0.91		0.903 ± 0.009	100	
238		14.70 ± 0.09		0.80		0.924 ± 0.009	100	
250		14.51 ± 0.10		0.88		0.912 ± 0.009	100	
258			14.89 ± 0.09		0.84	0.911 ± 0.008	80	
260		14.24 ± 0.08		0.80		0.895 ± 0.007	100	
271		13.75 ± 0.08		0.79		0.864 ± 0.008	100	
275		14.01 ± 0.10		1.02		0.881 ± 0.008	100	
281		13.98 ± 0.11		0.76		0.879 ± 0.008	80	
292		13.27 ± 0.13		0.98		0.834 ± 0.008	80	
300		13.00 ± 0.10		0.95		0.817 ± 0.008	100	
312		12.81 ± 0.11		0.80		0.792 ± 0.008	80	
320		12.83 ± 0.14		0.87		0.806 ± 0.010	80	
325		11.96 ± 0.14		0.96		0.733 ± 0.010	80	
330		11.79 ± 0.15		1.03		0.741 ± 0.011	50	
333		11.04 ± 0.15		1.03		0.694 ± 0.010	50	
338			11.02 ± 0.15		0.89	0.674 ± 0.010	50	
340		10.42 ± 0.17		1.17		0.658 ± 0.011	50	
348		10.12 ± 0.18		1.27		0.639 ± 0.012	50	
354		10.42 ± 0.17		1.17		0.654 ± 0.011	80	
361		8.88 ± 0.28		2.03		0.664 ± 0.018	50	
367		7.94 ± 0.30		2.12		0.499 ± 0.018	50	
370		0	0	0	0	0	0	
2 h.		358		14.58 ± 0.09		0.81	0.892 ± 0.008	50
		328		9.77 ± 0.18		1.80	0.598 ± 0.012	50
4 h.	358		14.18 ± 0.10		0.83	0.879 ± 0.008	50	
	326		8.88 ± 0.20		1.83	0.603 ± 0.018	35	
9 h.	185	15.17 ± 0.11		0.78		0.953 ± 0.008	50	
	210	14.89 ± 0.11		0.74		0.923 ± 0.009	50	
	230	14.34 ± 0.11		0.75		0.901 ± 0.009	50	
	259	13.73 ± 0.13		0.84		0.863 ± 0.009	50	
	278	12.88 ± 0.13		0.93		0.790 ± 0.009	50	
	294	11.81 ± 0.13		0.94		0.733 ± 0.009	50	
	304	10.88 ± 0.14		0.98		0.688 ± 0.009	50	
	317	8.84 ± 0.30		2.10		0.543 ± 0.038	50	
	330	0	0	0	0	0	0	
	3.2 days	210	14.44 ± 0.10**		1.02		0.889 ± 0.008	100
		295	8.89 ± 0.33**		2.84		0.531 ± 0.017	99
	4 days	175	14.95 ± 0.12		0.84		0.938 ± 0.010	50
210		14.37 ± 0.12	14.44 ± 0.11	0.87	0.81	0.903 ± 0.010**	50	
						0.884 ± 0.009**	60	
240		13.04 ± 0.13		0.93		0.820 ± 0.009	50	
260		11.03 ± 0.22		1.66		0.631 ± 0.014	35	
280		10.35 ± 0.24		1.66		0.682 ± 0.016	57	
	395	8.01 ± 0.30	8.67 ± 0.28	2.16	1.63	0.603 ± 0.019**	80	
						0.681 ± 0.016**	80	
	300	0	0	0	0	0	0	
5 days	210		14.88 ± 0.09**		0.87	0.888 ± 0.007	100	
	295		8.28 ± 0.26**		1.84	0.508 ± 0.014	50	
7 days	250	10.13 ± 0.20**		2.02		0.610 ± 0.013	100	
	280	9.27 ± 0.22**		2.24		0.673 ± 0.014	100	
30 days	100		16.00 ± 0.08		0.59	0.979 ± 0.008	30	
	150		16.48 ± 0.09		0.72	0.948 ± 0.008	150	
	180		14.84 ± 0.09		0.84	0.908 ± 0.008	50	
	205		13.76 ± 0.09		0.82	0.841 ± 0.008	50	
	225		12.72 ± 0.12		0.85	0.776 ± 0.008	100	
	235		11.98 ± 0.12		0.85	0.723 ± 0.009	80	
	250		10.84 ± 0.12		0.84	0.683 ± 0.009	100	
	268		9.75 ± 0.21		1.45	0.684 ± 0.014	100	
	280	0	0	0	0	0	0	
	110 days	95		16.25 ± 0.09**		0.98	0.987 ± 0.008	100
123		15.76 ± 0.09**		0.81		0.963 ± 0.008	103	
300 days	95		16.30 ± 0.10**			0.987 ± 0.008	100	
	123	15.36 ± 0.10**	15.72 ± 0.09**	0.95	0.95	0.939 ± 0.008**	100	
						0.952 ± 0.008**	100	
500 days	95	15.84 ± 0.09**	15.94 ± 0.07**	0.89	0.74	0.987 ± 0.008**	100	
	123	15.28 ± 0.09**	15.48 ± 0.08**	0.89	0.79	0.968 ± 0.007**	100	
						0.936 ± 0.008**	100	
						0.936 ± 0.007**	100	

**Measured using digitizing tablet.
 Analysts: **{F.F.G.}** {L.R.D.}

temperatura. Isto permite que os resultados obtidos individualmente possam ser utilizados para a construção de um modelo geral.

As figuras 2 e 3 também foram extraídas de Green et al. (1986). Na figura 2 estão graficados os valores de L/L_0 para 5 tempos diferentes de annealing. Nela pode ser notado que em um pequeno intervalo de temperaturas (de ≈ 10 $^{\circ}\text{C}$) há uma queda brusca nos valores de L/L_0 , quando estes são menores que $\approx 0,65$.

Na figura 3 são mostradas distribuições de comprimentos de traços para valores de $\approx 16\mu\text{m}$ até $8\mu\text{m}$. Pode ser notado que as distribuições têm formas semelhantes para comprimentos médios entre 16 e $11\mu\text{m}$ (são simétricas e estreitas, com desvio padrão de $\approx 1\mu\text{m}$). Também pode ser notado que conforme o comprimento médio diminui a partir de $11\mu\text{m}$, a largura da distribuição aumenta.

Antes de Laslett et al. (1987) já existiam vários modelos que tentavam descrever o annealing como um processo predominantemente de difusão no qual átomos deslocados, retornam à rede cristalina sob a influência de incrementos de temperatura Haack, 1972; Märk et al., 1973, Dakowski et al., 1974; Mantovani, 1974; Bertagnolli et al., 1981; Bertel and Märk, 1983; Crowley, 1985; Bigazzi et al., 1988). Porém tais modelos não eram aplicáveis aos dados do grupo australiano. Isto ocorreu provavelmente, devido a outros fenômenos

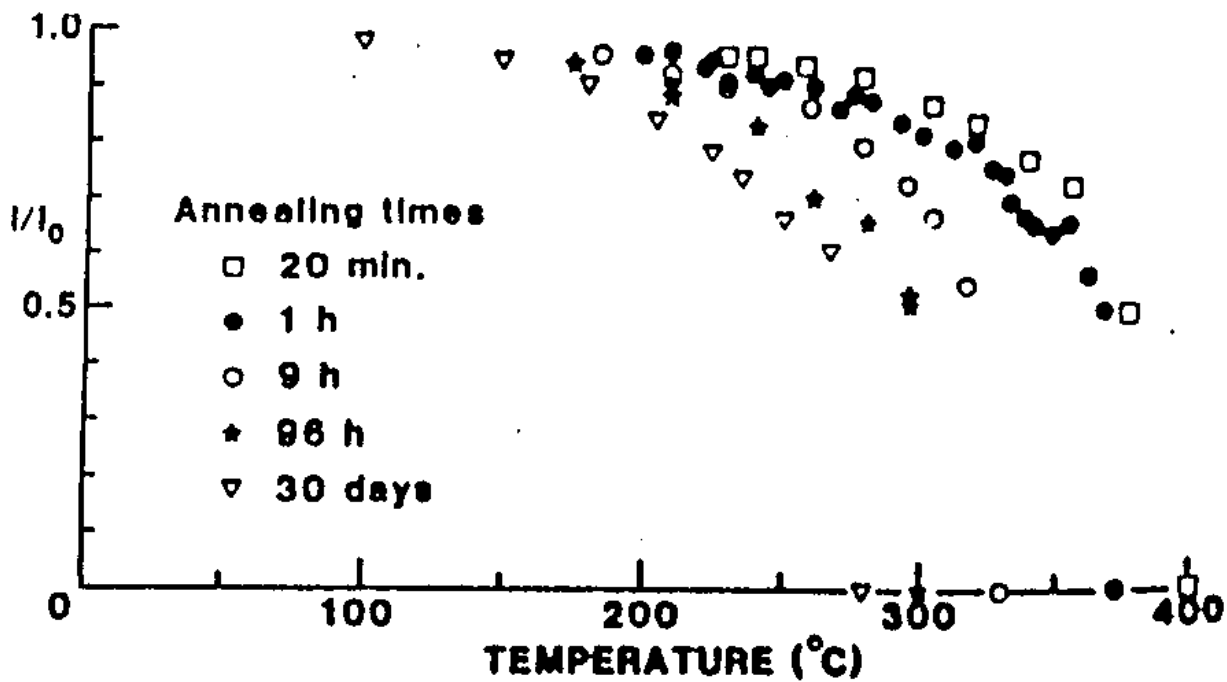


Figura 2: Annealing a diferentes temperaturas para um tempo fixo.

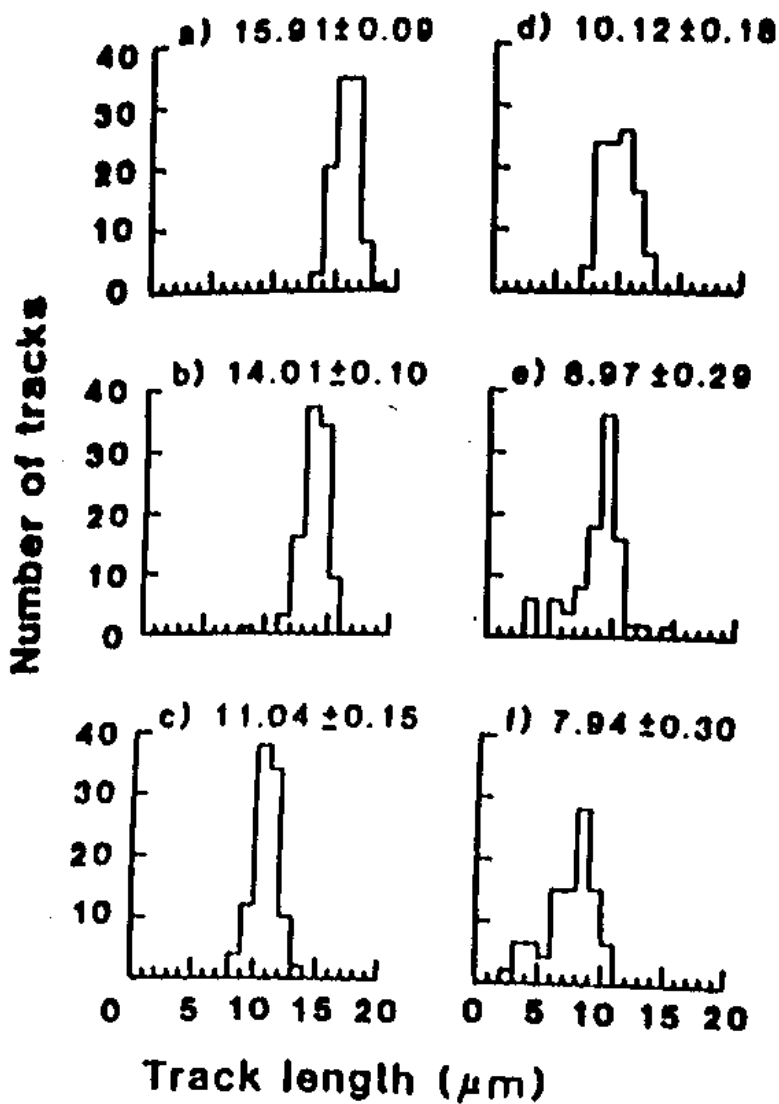


Figura3: Distribuição de comprimentos de traços de fissão.

relacionados com o annealing em apatitas. Os principais deles, serão descritos abaixo.

Antes de Green et al., (1986), já se sabia que os traços de fissão em apatitas em diferentes orientações cristalinas não respondiam da mesma forma ao annealing (Green and Durrani, 1977; Green., 1981; Laslett et al., 1984). Já havia sido mostrado que os traços paralelos ao eixo C do cristal (mostrado na figura 4) são mais resistentes ao annealing do que os perpendiculares a este eixo. Porém, foi em Green et al., (1986) que se ilustrou de forma mais clara a anisotropia do annealing. Neste trabalho, lâminas cujas superfícies são paralelas ao eixo C foram submetidas durante uma hora a temperaturas de 260, 310, 336, 352, e 366°C . Na figura 5 são mostrados os traços contidos nestas lâminas, com o eixo C orientado verticalmente no plano de cada fotografia. A partir da figura 5d vê-se claramente que os traços paralelos ao eixo C são mais resistentes ao annealing.

Pouco se conhece a respeito da estrutura de um traço de fissão que não sofreu ataque químico (traço latente) e, conseqüentemente, ainda menos se conhece acerca dos processos físicos que ocorrem durante o annealing. Depois do primeiro trabalho resumidos em Fleisher et al. (1975), o único avanço significativo no entendimento a este respeito resultou dos estudos de dispersão de raios X, para baixos ângulos, feitos em traços formados em silicatos por ions pesados (Dartyge et al., 1978, 1981). Estes estudos sugerem que traços latentes são

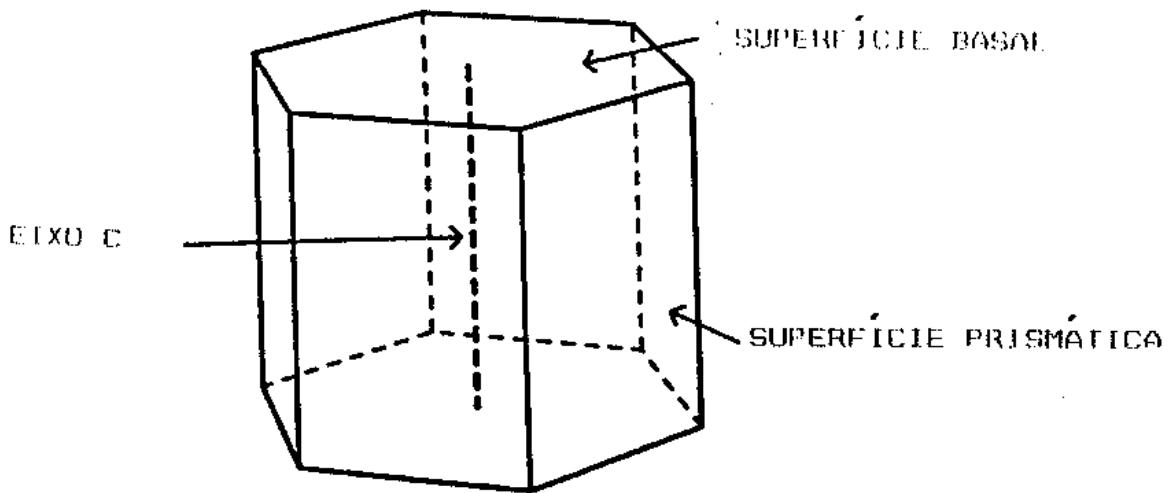


Figura 4: Estrutura de um cristal de apatita.

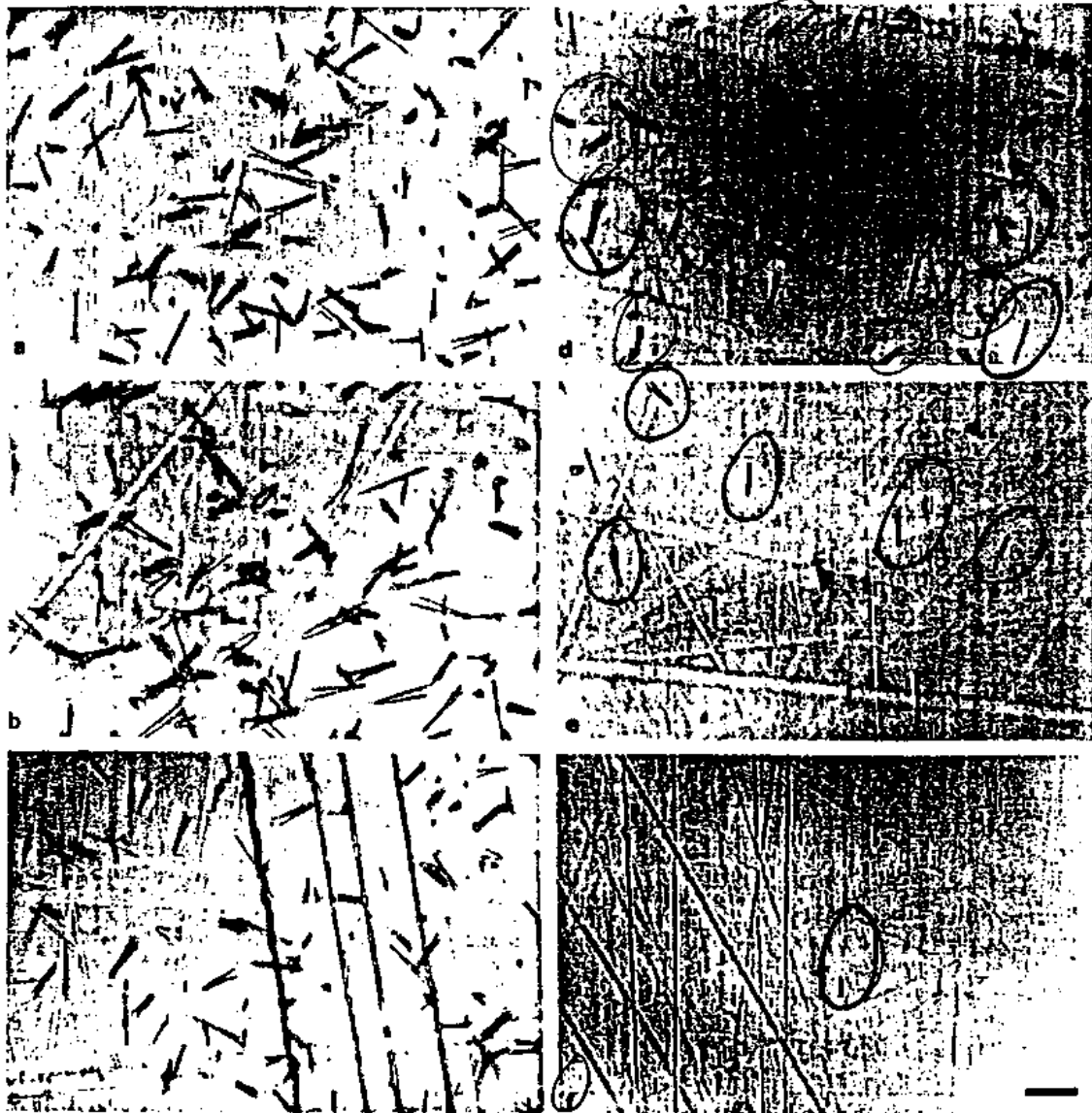


Figura 5: Fotomicrografias de traços de fissão na apatita de Durango: a) não submetida a annealing e submetida à b) 260oC c) 310oC d) 336oC e) 352oC e f) 366oC durante 1 hr.

compostos de grandes componentes ($15-40\text{\AA}$), que são agrupamentos de defeitos atômicos ou "defeitos estendidos", os quais estão interligados por um grande número de "defeitos pontuais" muito pequenos. Os defeitos estendidos sofrem maior alargamento, com o ataque químico ao longo do traço, do que os defeitos pontuais. Durante o annealing, primeiro são removidos os defeitos pontuais, ficando os defeitos estendidos separados essencialmente por regiões não danificadas. Isto conduz ao conceito de "gap" relacionado com o processo de ataque químico de traços que sofreram annealing: o ataque é impedido de prosseguir em seu caminho ao longo do traço pela presença de regiões restauradas. No trabalho de Green et al., 1986 este efeito foi observado na apatita de Durango.

Outro fator importante no estudo do annealing em apatitas é a composição química da amostra estudada. Por exemplo, em Green et al., (1986), uma cloroapatita pura, contendo traços fosseis de $\approx 15\mu\text{m}$, foi submetida a uma temperatura de 370°C durante 1 hora e o comprimento dos traços não foi alterado. No entanto, como pode ser visto na tabela I, isto seria suficiente para apagar completamente os traços na apatita de Durango (uma fluorapatita).

Como há vários fenômenos que influenciam o processo de annealing, é razoável que modelos empíricos sejam propostos para se descrever tal processo. No próximo item apresentaremos o modelo proposto em Laslett et al., (1987).

O grupo australiano optou por descrever seus resultados

utilizando um conceito puramente empírico e bastante utilizado por pesquisadores que já haviam trabalhado com annealing de traços de fissão, a chamada lei de Arrhenius. Neste caso, plots de Arrhenius são retas que passam por pontos $\ln t$ vs. T^{-1} (onde t e T são tempos e temperaturas de annealing, respectivamente) responsáveis pelo mesmo grau de apagamento de traços. Convencionalmente um plot de Arrhenius para um determinado grau de annealing é escrito na forma:

$$\ln(t) = A + B T^{-1} \quad (4)$$

Onde A é uma constante e B é normalmente interpretado em termos de uma energia de ativação.

Em Laslett et al., (1987), foram tentados ajustes com uma forma funcional da equação 4, na qual todos os dados apresentados em Green et al., (1986) pudessem ser utilizados:

$$\ln(t) = A(r) + B(r) T^{-1} \quad (5)$$

onde $r = L/L_0$

O ajuste mais significativo estatisticamente resultou em:

$$\ln(t) = -28.12 + \frac{[g(r) + 4.87]}{0.000168} T^{-1} \quad (6)$$

onde:

$$g(r) = \frac{\left[\frac{(1-r^{2.7})}{2.7} \right]^{0.35} - 1}{0.35} \quad (7)$$

onde t está em segundos e T em Kelvin.

Para estender o tratamento visto nas equações anteriores à temperaturas variáveis com o tempo, em Duddy et al., (1988) foi utilizado o chamado princípio do "tempo equivalente", que já havia sido proposto neste contexto por Goswami et al., (1984). O conceito "tempo equivalente" postula que um traço que já havia sofrido annealing até um determinado grau $r(L/L_0)$ se comporta diante de um novo annealing de uma forma totalmente independente das condições de tempo e temperatura que causaram o annealing anterior. Ou seja, quando se submete um traço a uma nova condição de tempo e temperatura o único parâmetro antigo que será utilizado para se descrever o comportamento do traço neste novo annealing será o grau de annealing r já sofrido.

Abaixo será mostrado como o princípio do "tempo equivalente" foi utilizado pelo grupo australiano.

Suponha que um tratamento térmico seja dividido em uma série de intervalos, Δt_i , de temperaturas constantes, T_i . Suponha que no início de um dado intervalo (denotado por i) o traço já havia sido encurtado a um comprimento reduzido $r_{i-1} = L_{i-1}/L_0$. Se o traço tivesse sido submetido a uma temperatura constante T_i , para que ele

chegasse ao comprimento reduzido r_{i-1} ele deveria ter ficado durante um tempo equivalente, t_{eq} , (equação 6):

$$\ln(t_{eq}) = -28.12 + \frac{[g(r_{i-1}) + 4.87]}{0.000168} T_i^{-1} \quad (8)$$

No fim do intervalo i , de duração Δt_i , o comprimento reduzido do traço, r_i , pode ser calculado como tendo sido produzido à temperatura T_i em um "tempo efetivo" igual a $(t_{eq} + \Delta t_i)$, resolvendo-se a equação:

$$\ln(t_{eq} + \Delta t_i) = -28.12 + \frac{[g(r_i) + 4.87]}{0.000168} T_i^{-1} \quad (9)$$

Este procedimento é ilustrado na figura 6. Esta figura consiste em dois intervalos de duração Δt (onde $\Delta t = t_1 = t_2 - t_1$) separados por um degrau onde a temperatura saltou instantaneamente de T_1 para T_2 . Durante o primeiro intervalo isotérmico (A-B) a redução no comprimento dos traços pode ser calculada simplesmente utilizando a descrição isotérmica desenvolvida por Laslett et al. (1987).

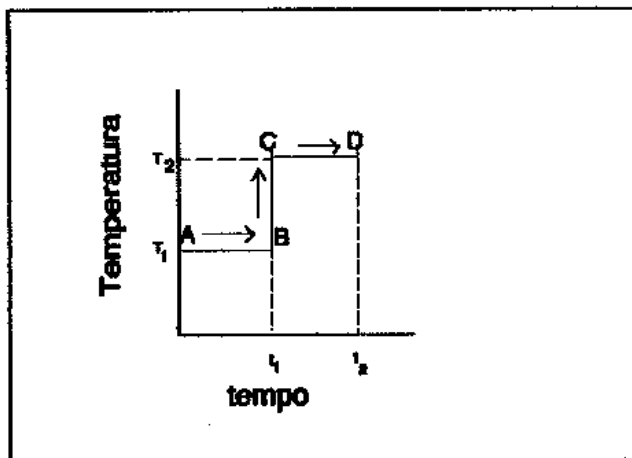


fig. 6.

De acordo com o conceito do "tempo equivalente" os traços localizados em B se comportam subsequentemente como se tivessem sofrido uma redução no comprimento, para r_1 , a uma temperatura constante T_2 em um tempo equivalente t_{eq} . Assim a redução de r_1 para r_2 no segundo intervalo pode ser calculada usando a descrição isotérmica (adicionando t_{eq} a Δt em uma temperatura T_2).

A aplicação do modelo mostrado acima exige que as curvas das histórias térmicas sejam descritas por degraus de temperaturas constantes, como será ilustrado abaixo.

Na figura 7 (Green et al., 1989) estão mostrados os comportamentos da distribuição de comprimentos de traços (7c) e da idade (7d) em uma amostra submetida a um esfriamento linear (7b). Nesta amostra foi imposto que os traços começaram a ser registrados pelo mineral há 200 Ma (idade corrigida da amostra). A partir daí foi suposto que os traços formados a cada intervalo de 10 Ma tiveram a mesma história térmica. Assim se obteve o comportamento de 20 blocos de traços presentes hoje na amostra.

Em Green et al., (1989) não está descrita de forma clara os procedimentos adotados para se obter a distribuição de comprimento (fig. 7c) e a evolução da idade (fig.7d). Abaixo, descreveremos os procedimentos utilizados em Lutz e Omar (1991).

A função densidade de probabilidades do comprimento de traço, $p(r)$ é estimada através do comprimento de n traços utilizando a estimativa Kernel de densidade. Um estimador Kernel é definido por:

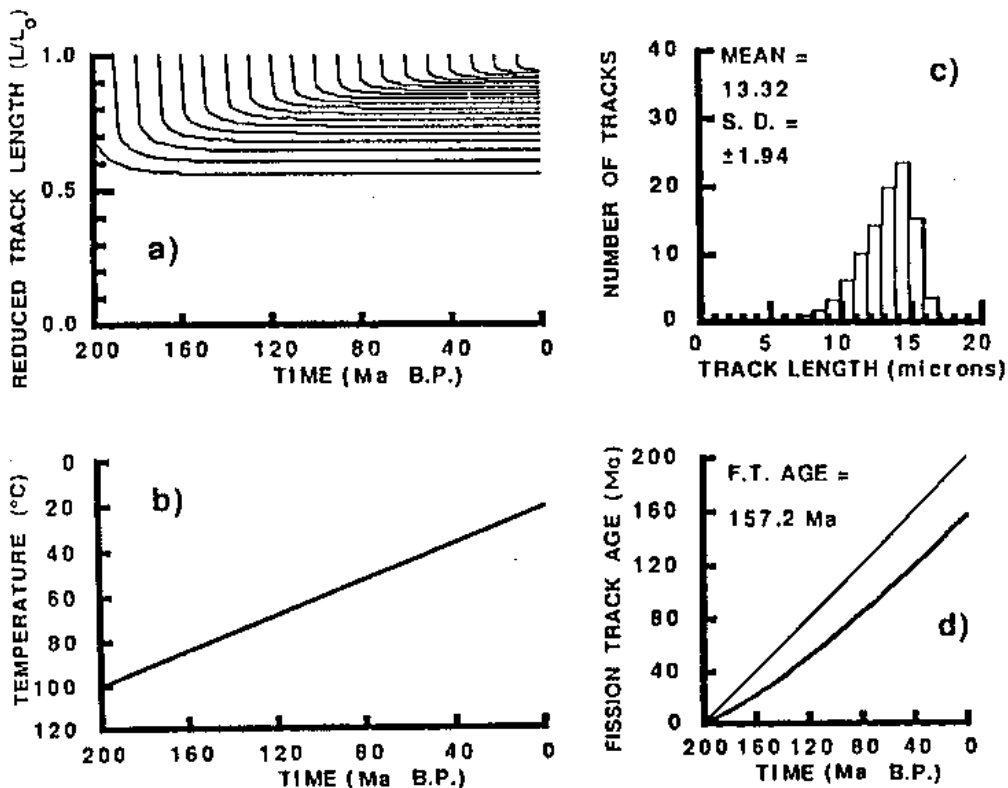


Figura 7: a) Evolução do comprimento dos traços produzidos em cada subintervalo a que se dividiu a idade da amostra. b) História térmica que foi transformada em um conjunto de retas à temperatura constante. c) Distribuição do comprimento dos traços gerados pelo esfriamento linear. d) Evolução da idade da amostra.

$$\rho(r) = (1/n) \sum_{i=1}^n \frac{K(x)}{h} \quad (10)$$

onde:

$$K[x] = (1/2\pi)^{1/2} \exp(-x^2/2)$$

onde:

$$x = \frac{r - r_f}{h}$$

$$\begin{aligned} \text{onde:} \quad h = h(r) &= 1,32 - 0,47r & ; & \quad 0,68 < r \leq 1 \\ &= 6,50 - 8,10r & ; & \quad 0,43 < r \leq 0,68 \\ &= 3 & ; & \quad 0 < r \leq 0,43 \end{aligned}$$

A função $h(r)$ relaciona o desvio padrão do comprimento e o comprimento médio dos traços. Ela foi obtida experimentalmente utilizando os dados de Green et al (1986).

O histograma da figura 7c pode ser obtido integrando-se numericamente $\rho(r)$ em cada célula do histograma (intervalos de comprimento que compõem o histograma) e então multiplicando-se o resultado pelo número total de traços contidos no histograma. Por exemplo, para se obter o número de traços com comprimento entre 9 e 10 μm , $\rho(r)$ deve ser integrado de $r = 0,551$ à $r = 0,612$ (onde foi tomado $L_0 = 16,34 \mu\text{m}$) e, o resultado da integração, multiplicado pelo número total de traços do histograma (no caso da fig. 7, $N = 100$).

A "idade aparente" da amostra, obtida através do método dos traços de fissão, foi calculada somando-se a contribuição de cada um dos 20 blocos de traços à densidade de traços. A densidade reduzida é definida como:

$$d = P/A_0$$

onde P é a densidade de traços que sofreram annealing e A_0 a densidade de traços que não sofreram annealing. A relação entre a densidade reduzida e comprimento reduzido foi obtida através dos dados de Green (1988):

$$\begin{aligned} \text{onde:} \quad d_j &= r_j && ; \quad 0,66 < r_j \leq 1 \\ &= 2,15r_j - 0,76 && ; \quad 0,35 < r_j \leq 0,66 \\ &= 0 && ; \quad 0 < r_j \leq 0,35 \end{aligned}$$

A "idade aparente" FTA é a média das densidades reduzidas multiplicada pela idade da amostra, t_0 , (no caso da figura 7, $t_0=200$ Ma):

$$FTA = t_0 \frac{(\sum d_j)}{n} \quad (11)$$

A tabela II apresenta os resultados das reduções de comprimentos dos traços previstas pelo modelo e as observadas experimentalmente. Estes dados mostram um bom acordo entre modelo e experimento.

Com o que foi descrito acima pode-se obter distribuições de comprimento de traços e idades de apatitas conhecendo-se a

Tabela II: Comparação entre resultados obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo dos australianos (Duddy et al., 1988).

Thermal treatment	Predicted mean length (μm)	Observed mean length (μm)	Thermal treatment	Predicted mean length (μm)	Observed mean length (μm)
<i>Step heating:</i>			<i>Linear cooling (cont.):</i>		
258°C, 1 hr.	11.37	10.81 \pm 0.13	330-290°C, 2 hr.* ²	12.25	12.30 \pm 0.08
338°C, 1 hr.				11.92* ¹	11.70 \pm 0.11* ¹
<i>Step cooling:</i>			330-250°C, 4 hr.* ²	12.25	12.28 \pm 0.09
				11.92* ¹	11.68 \pm 0.10* ¹
337°C, 1 hr.	11.43	10.64 \pm 0.30	330-170°C, 8 hr.* ²	12.25	12.22 \pm 0.09
258°C, 1 hr.				11.92* ¹	12.03 \pm 0.11* ¹
<i>Linear cooling:</i>			<i>Linear heating:</i>		
340-258°C, 1 hr.	12.85	13.46 \pm 0.12	170-190°C, 1 hr.* ²	16.07	15.70 \pm 0.08
338-258°C, 20 min.	13.69	13.87 \pm 0.13		15.64* ¹	15.29 \pm 0.09* ¹
370-290°C, 1 hr.	11.01	11.55 \pm 0.13	170-230°C, 3 hr.* ²	15.53	15.18 \pm 0.10
258-338°C, 1 hr.	12.89	12.85 \pm 0.12		15.11* ¹	14.69 \pm 0.10* ¹
370-333°C, 1 hr.	9.99	9.77 \pm 0.23	170-270°C, 5 hr.* ²	14.66	14.36 \pm 0.09
370-230°C, 1 hr.	11.69	10.55 \pm 0.14		14.26* ¹	13.97 \pm 0.14* ¹
310-230°C, 1 hr.	14.03	14.32 \pm 0.10	170-310°C, 7 hr.* ²	13.19	13.31 \pm 0.08
250-170°C, 1 hr.	15.44	15.56 \pm 0.10		12.84* ¹	12.64 \pm 0.11* ¹
310-170°C, 1 hr.	14.30	14.11 \pm 0.11	170-330°C, 8 hr.* ²	12.12	12.31 \pm 0.08
210-170°C, 1 hr.	15.84	15.85 \pm 0.10		11.80* ¹	12.12 \pm 0.10* ¹
340-200°C, 1 hr.	13.25	13.33 \pm 0.10	<i>Complex treatments:</i>		
340-300°C, 1 hr.	12.28	12.45 \pm 0.13	250-330°C, 1 hr.		
310-270°C, 1 hr.	13.67	13.61 \pm 0.12	330-285°C, 20 min.		
370-210°C, 1 hr.	11.84	10.86 \pm 0.14	285°C, 20 min.		
345-210°C, 50 min.	13.14	12.91 \pm 0.14	285-318°C, 20 min.		
315-210°C, 40 min.	14.15	14.25 \pm 0.12	318°C, 1 hr.	12.02	11.59 \pm 0.12
290-210°C, 30 min.	14.87	14.85 \pm 0.10	250-330°C, 1 hr.		
290-210°C, 1 hr.	14.61	14.75 \pm 0.13	330-285°C, 20 min.		
250-210°C, 30 min.	15.45	15.03 \pm 0.10	285°C, 20 min.		
370-290°C, 1 hr.	11.00	10.20 \pm 0.16	285-318°C, 20 min.	12.73	13.18 \pm 0.12
355-290°C, 50 min.	12.00	11.25 \pm 0.14	290-330°C, 30 min.		
340-290°C, 40 min.	12.80	12.72 \pm 0.12	330-285°C, 20 min.		
330-290°C, 30 min.	13.33	13.05 \pm 0.14	285°C, 20 min.		
370-210°C, 2 hr.	11.00	10.16 \pm 0.17	285-318°C, 20 min.		
340-210°C, 100 min.	12.80	12.76 \pm 0.12	318°C, 1 hr.	12.05	12.42 \pm 0.12
315-210°C, 80 min.	13.85	13.79 \pm 0.13	330-285°C, 20 min.		
370-165°C, 1 hr.	11.82	12.15 \pm 0.12* ¹	285°C, 20 min.		
370-215°C, 30 min.	12.07	12.22 \pm 0.12* ¹	285-318°C, 20 min.		
370-237°C, 45 min.	11.42	11.55 \pm 0.14* ¹	318°C, 1 hr.	12.28	12.72 \pm 0.11
370-290°C, 15 min.	12.24	11.90 \pm 0.12* ¹	330-285°C, 20 min.		
290-165°C, 45 min.	14.53	14.63 \pm 0.10* ¹	285°C, 20 min.		
231-164°C, 30 min.	15.41	15.43 \pm 0.13* ¹	285-318°C, 20 min.	13.27	13.45 \pm 0.13
193-158°C, 15 min.	15.73	15.67 \pm 0.11* ¹	285°C, 10 min.		
262-210°C, 40 min.	15.23	15.09 \pm 0.10	285-318°C, 20 min.	12.45	13.44 \pm 0.14
240-210°C, 20 min.	15.63	15.55 \pm 0.10	318°C, 1 hr.		
320-290°C, 20 min.	13.83	14.02 \pm 0.11			
305-290°C, 10 min.	14.46	15.18 \pm 0.07			
283-210°C, 20 min.	15.39				

*¹Measured using digitizing tablet.
 Analyte: *¹ (F.F.O.); *² (I.R.D.)

história térmica a que foi submetida a amostra. Porém, na prática o que se tem são dados referentes a distribuições de comprimentos e a idades e se deseja conhecer a história térmica responsável por esses dados. Para isto, neste trabalho foi utilizado um método baseado no modelo inverso proposto por Lutz e Omar (1991). Abaixo utilizaremos os dados referentes a uma amostra de apatita de Jacupiranga para ilustrar este método. Os procedimentos experimentais utilizados para se obter tais dados serão descritos no capítulo seguinte.

Na figura 8 está mostrado a distribuição de comprimento de traços da amostra JA-1 de Jacupiranga, cedida pelo Professor Helmut Born da Escola Politécnica da USP. A idade de traços de fissão, FTA, obtida com o auxílio da equação 3 foi de (90 ± 14) Ma e a razão entre o comprimento médio dos traços de fissão espontânea e os de fissão induzida foi $0.65 (\pm 2.1\%)$. Desta forma, utilizando-se o método de correção por tamanho (Storzer e Wagner, 1969) e uma curva de correção para apatitas (Green, 1988) se obtêm que a idade corrigida, t_0 , desta amostra é (135 ± 20) Ma.

Para uma outra amostra de Jacupiranga (JA-Ca), também cedida pelo Professor Born, os valores de FTA e t_0 obtidos foram respectivamente (93 ± 12) Ma e (143 ± 19) Ma. Assim, para nossas apatitas de Jacupiranga os valores de FTA e t_0 foram tomadas como (92 ± 9) Ma e (140 ± 14) Ma respectivamente.

A temperatura atual, T_H , das amostras de Jacupiranga foi

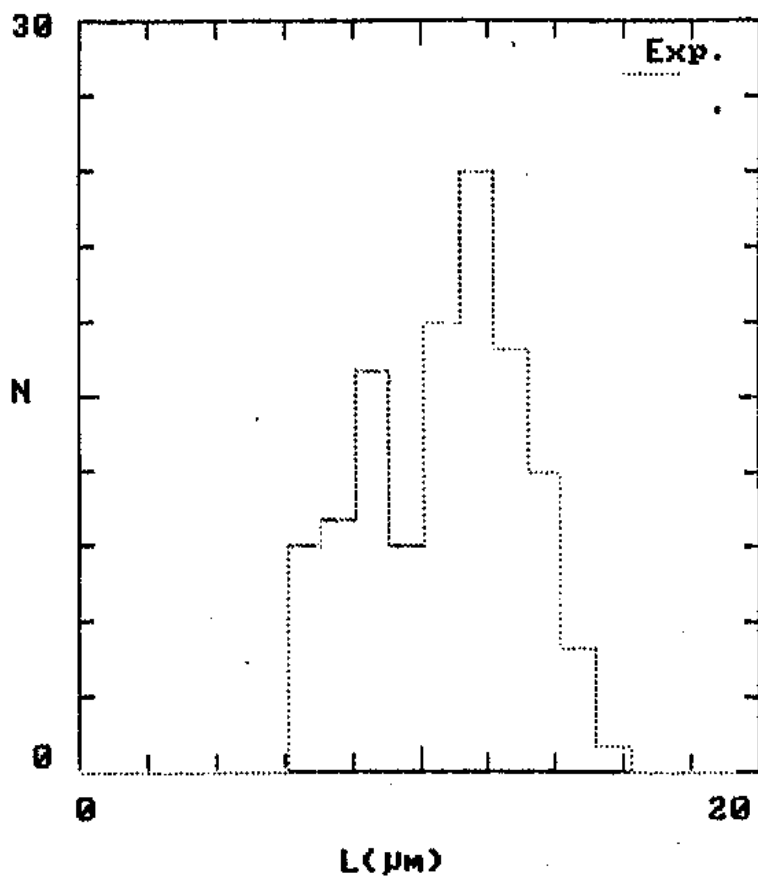


Figura 8: Histograma dos traços fósseis da amostra JA-1.

tomada como sendo 25°C.

Utilizando-se o método de Monte Carlo (ver por exemplo Shreider, 1966) podemos gerar aleatoriamente histórias térmicas. Para cada história térmica gerada teremos um valor de FTA e um histograma obtidos com o auxílio das equações (8), (9), (10) e (11). Comparando estatisticamente estes resultados com os resultados experimentais podemos dizer se as histórias térmicas geradas aleatoriamente são ou não compatíveis com nossos dados.

Na figura 9 são mostradas 3 "caixas" de Monte Carlo utilizadas para se encontrar histórias térmicas compatíveis com os dados referentes à amostra JA-1. Estas caixas serão responsáveis por um determinado número de histórias térmicas geradas aleatoriamente. Cada história será formada por 3 semi-retas que ligam pontos gerados dentro das caixas, por meio do método de Monte Carlo (com exceção do ponto onde $t = 0$ e $T = 25^\circ\text{C}$ que é fixo). Ou seja, para se gerar uma história se sorteia, via Monte Carlo, um ponto em cada uma das caixas e em seguida são geradas semi-retas que unem o ponto da 1ª caixa com a 2ª, o da 2ª com a da 3ª. e o da 3ª com o ponto fixo ($t = 0$ e $T = 25^\circ\text{C}$).

Neste trabalho foram utilizadas 3 caixas de Monte Carlo porque com isto pudemos obter uma grande gama de formas de curvas em um tempo computacional apropriado (5 minutos p/ 200 histórias em um computador PC 486).

Para se definir os limites de cada caixa utilizou-se o fato

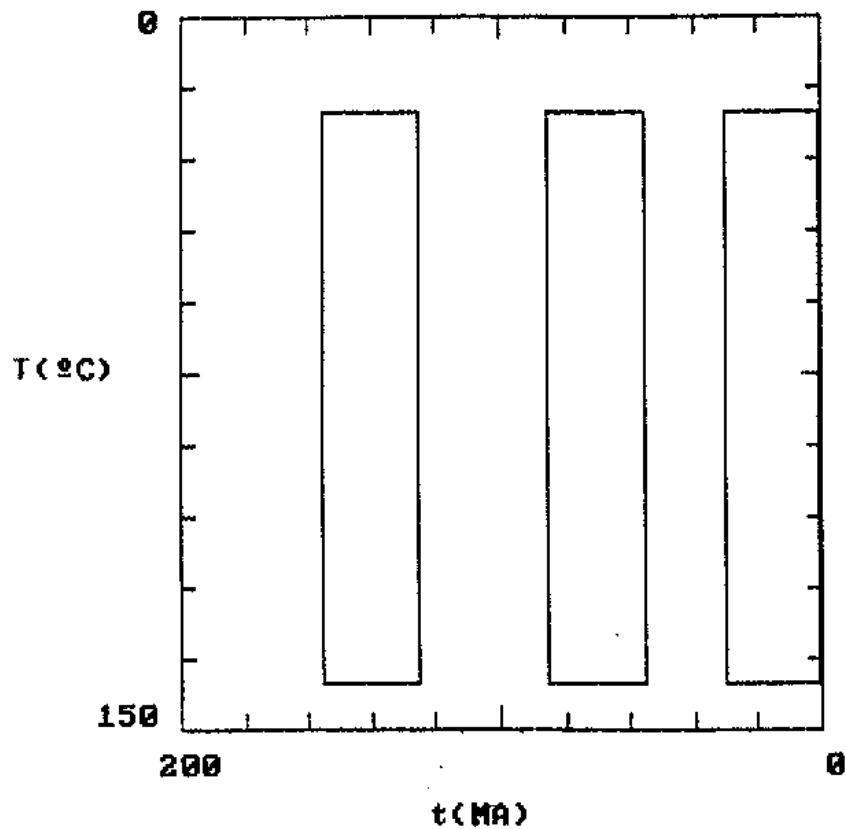


Figura 9: Caixas de Monte Carlo utilizadas para se obter as histórias térmicas compatíveis com as dados da amostra JA-1.

de que poucos milhões de anos são necessários para que os traços sofram apagamento total, se a temperatura é 140°C. Além disto assumiu-se que a amostra não foi submetida, por um tempo significativo, a temperaturas inferiores à 20°C. Assim todas as caixas vão de 20 a 140°C.

Em termos temporais, a 1ª caixa vai de $t_0 + \sigma$ à $t_0 - \sigma$, a 2ª de $t_0/2 + 1\sigma$ à $t_0/2 - 1\sigma$ e a 3ª de $\sigma + \sigma$ à 1 Ma.

Para se testar se uma história térmica é compatível com os dados experimentais ela tem que ser transformada numa curva composta por vários degraus com temperaturas constantes. Isto é necessário para que se possa usar o tratamento para temperaturas variáveis em passos discretos, descrito acima, e, com o auxílio das equações (8), (9), (10) e (11) obter um valor de FTA e um histograma.

O valor de FTA será então comparado com a idade aparente obtida experimentalmente. Se este valor estiver fora do intervalo $t_0 \pm 2\sigma$, a história será rejeitada, caso contrário serão comparados os histogramas. Para se aceitar ou rejeitar um histograma foi utilizado o teste do χ^2 , pelo qual se aceita que os traços pertencentes a cada célula do histograma obedecem a estatística de Poisson. Desta forma o χ^2 pode ser escrito como (Bavington, 1969).

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{n^*} \left(\frac{[FTLD_j, obs - FTLD_j, prev]^2}{FTLD_j} \right) \quad (12)$$

onde: $FTLD_{j,obs}$ e $FTLD_{j,prev}$ são, respectivamente, os números de traços observados experimentalmente e gerados pela história térmica testada na j -ésima célula do histograma; n^+ é o número de células onde $FTLD_{j,obs}$ ou $FTLD_{j,prev}$ não sejam nulos; $FTLD_j$ é igual à $FTLD_{j,obs}$ caso $FTLD_{j,obs}$ seja diferente de zero e igual à $FTLD_{j,prev}$ caso $FTLD_{j,obs}$ seja zero.

Depois de obtido o valor de χ^2 este valor é transformado em χ^2 reduzido, χ^2_v efetuando-se a divisão pelo número de graus de liberdade, v (no nosso caso $v = n^+ - 1$). Caso a probabilidade $P_{\chi^2}(\chi^2_0)$ de se obter um valor de χ^2_0 maior que o valor obtido, se situar dentro do intervalo $0.1 \leq P_{\chi^2}(\chi^2_0) \leq 0.9$, o histograma gerado a partir da história térmica testada será considerado estatisticamente compatível com o histograma obtido experimentalmente. Caso contrário a história térmica será rejeitada.

A tabela contendo os valores de χ^2 , v e $P_{\chi^2}(\chi^2_0)$ foi extraída de Bevington (1969).

Neste trabalho foram testadas 200 histórias térmicas com o auxílio das caixas mostradas na figura 9. Apenas 1 destas histórias não foi rejeitada pelos testes descritos acima (ver figura 10). A partir desta história as caixas de Monte Carlo foram restringidas mudando-se os intervalos de temperaturas para 50 - 120°C, 50 - 120°C e 30 - 60°C, na 1ª, 2ª e 3ª caixa,

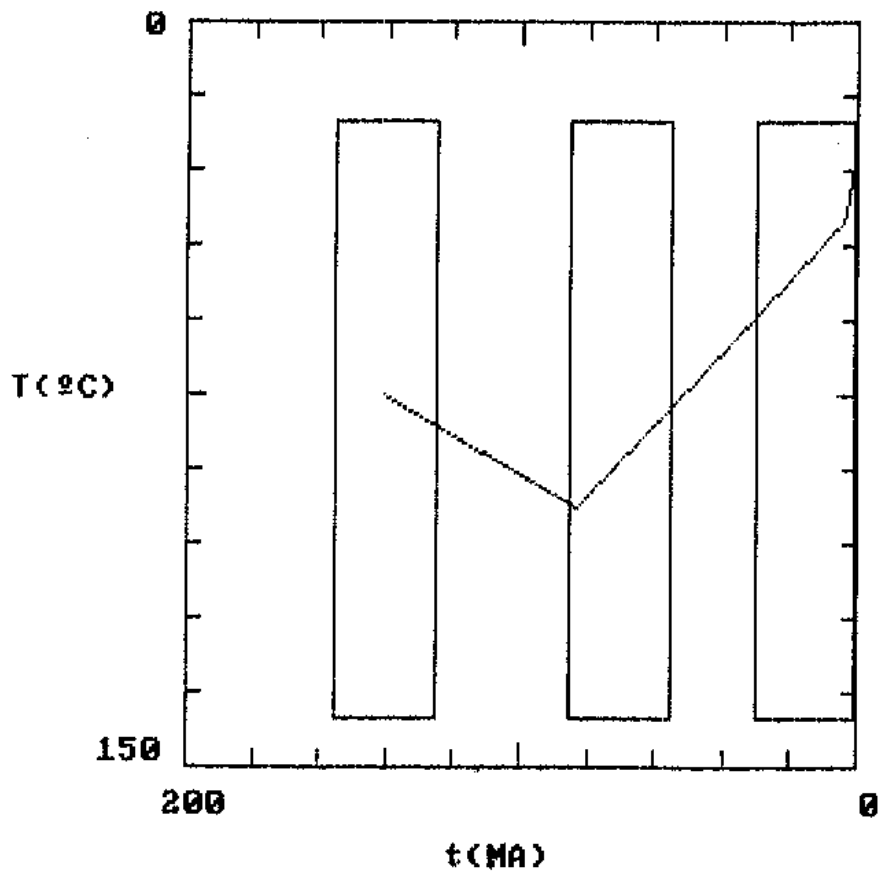


Figura 10: História térmica de amostra JA-1 obtida utilizando-se a 1ª restrição.

respetivamente. Novamente 200 histórias térmicas foram testadas e as histórias aceitas estão mostradas na figura 11. Desta forma vemos um número bem maior de histórias térmicas compatíveis com os resultados experimentais, o que nos dá informações sobre a dispersão de tais histórias.

Os procedimentos descritos acima foram utilizados no capítulo 4 desta tese. O programa computacional com tais procedimentos está no apêndice I.

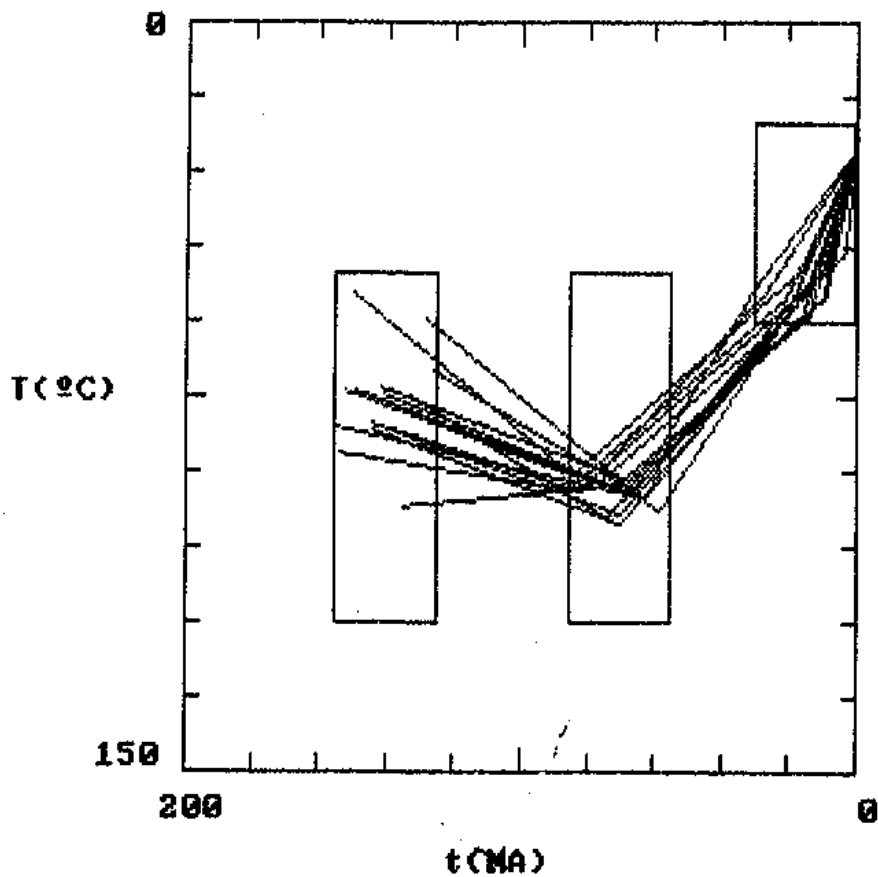


Figura 11: Histórias térmicas da amostra JA-1 obtidas utilizando-se a 2ª restrição.

3.- Procedimento experimental

Para se observar os traços de fissão ao microscópio óptico é necessário que os grãos de apatita sejam montados em uma resina transparente, polidos e atacados quimicamente.

As amostras de apatitas, no nosso caso, possuem granulometria $\geq 100 \mu\text{m}$.

Para se obter as apatitas montadas na resina, inicialmente untamos um molde (uma casca cilíndrica $\approx 2 \text{ cm}$ de raio e tampa móvel no fundo) com graxa dissolvida em benzina. Após isto, despejamos ≈ 200 grãos de apatita no fundo do molde e em seguida 5 mL de resina líquida (resina epoxi) misturada com 8 gotas de endurecedor (catalisador). Depois de aproximadamente 30 minutos a montagem pode ser retirada do molde pois a resina já está solidificada. Desta forma obtemos um bloco cilíndrico de resina transparente no qual em uma das superfícies estão incrustados grãos de apatita.

Para se polir as amostras utilizamos uma politriz com controles automáticos de tempo e rotação do disco de polimento.

Antes de iniciar o polimento das amostras com pastas de diamante, foi efetuado um lixamento com uma lixa de granulometria $10 \mu\text{m}$, durante 5 minutos à 200 RPM e com uma massa de 300 g acima da montagem.

O polimento com pasta de diamante foi efetuado em três etapas. Inicialmente foi utilizada uma pasta de granulometria $6 \mu\text{m}$, durante 15 minutos à 180 RPM, com 400 g acima da amostra. Em seguida se

utilizou granulometria 3 μm , durante 20 minutos, à 150 RPM, com 500 g acima da amostra. E finalmente granulometria 1 μm durante 30 minutos, à 120 RPM, com 500 g acima da amostra.

É importante notar que as montagens devem ser lavadas após cada um dos passos descritos acima, já que as granulometrias vão diminuindo a cada passo.

Para se obter o ataque químico padrão utilizado neste trabalho amostras de apatitas contendo traços de fissão espontânea e induzida foram submetidas a HNO_3 2.5%, à 20⁰C durante tempos que variaram de 10 a 60 segundos.

Nas tabelas III e IV são apresentados valores das densidades e dos comprimentos médios dos traços de fissão espontânea e induzida em função do tempo de ataque. Os erros das medidas das densidades são desvios padrões de médias de distribuição poissonianas e os dos comprimentos, de distribuições gaussianas.

Nas figuras 12 e 13 estão mostrados os resultados das tabelas III e IV. Nestas figuras pode ser notado que há uma rápida subida nos valores de ρ e L até o tempo de 30 s seguida de uma estabilização. Desta forma o ataque padrão foi tomado como HNO_3 2.5%, 20⁰C durante 40 segundos.

O microscópio utilizado para se efetuar as medidas deste trabalho (Dialux 20 EB, Leitz/Wetzlar) é dotado de um sistema de eixos (X e Y) que possibilita a orientação espacial ao longo da superfície do montagem contendo os grãos de apatita.

As medidas de densidade foram efetuadas com o auxílio de um

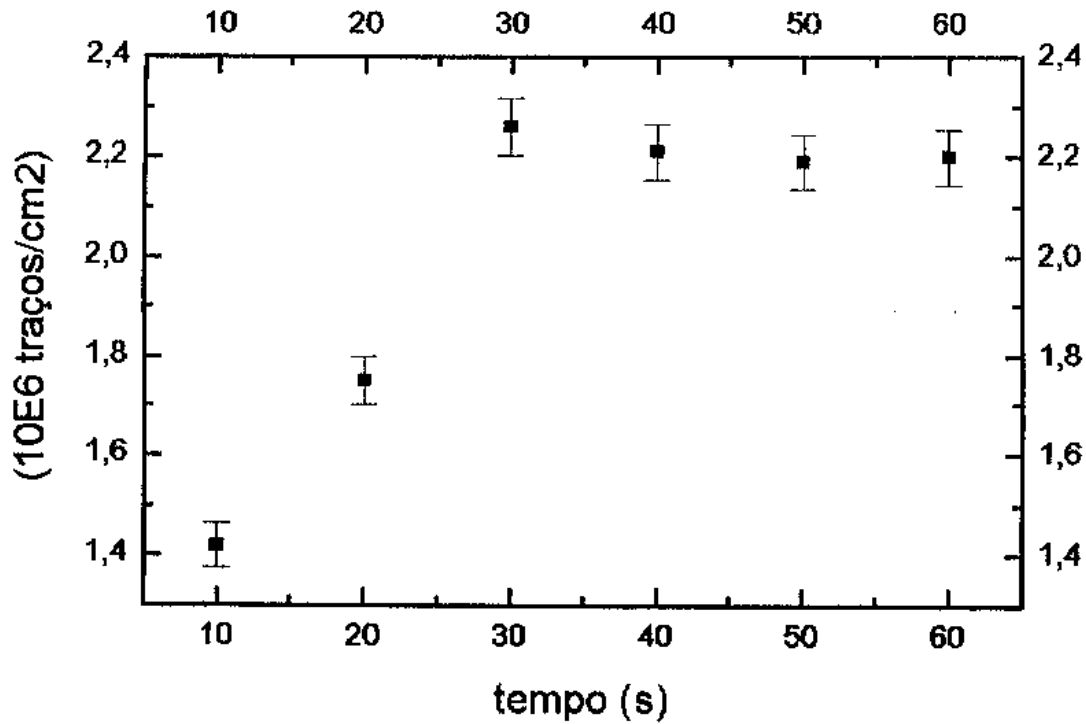
Tabela III: Densidade e comprimento de traços fósseis em função do tempo de ataque .

Tempo de Ataque (segundos)	ρ (10^6 traços/cm ²)	ΣX_i (Traços)	L (μ m)	n° de traços confinados
10	1.42 \pm 0.045	982	-	-
20	1.75 \pm 0.050	1216	9.52 \pm 0.11	134
30	2.26 \pm 0.056	1653	11.59 \pm 0.17	157
40	2.21 \pm 0.055	1621	11.71 \pm 0.16	171
50	2.19 \pm 0.055	1582	11.35 \pm 0.18	166
60	2.20 \pm 0.055	1612	11.59 \pm 0.16	166

Tabela IV: Densidade e comprimento de traços induzidos em função do tempo de ataque

Tempo de Ataque (segundos)	ρ (10^5 traços/cm ²)	$\Sigma X:$ (traços)	L (μ m)	n° de traços confinados
10	4.01 \pm 0.27	223	-	-
20	6.20 \pm 0.33	358	11.66 \pm 0.22	128
30	7.03 \pm 0.35	403	15.18 \pm 0.11	130
40	7.44 \pm 0.36	427	15.92 \pm 0.08	130
50	8.09 \pm 0.37	464	15.73 \pm 0.11	129
60	7.65 \pm 0.37	432	15.77 \pm 0.10	131

(a)



(b)

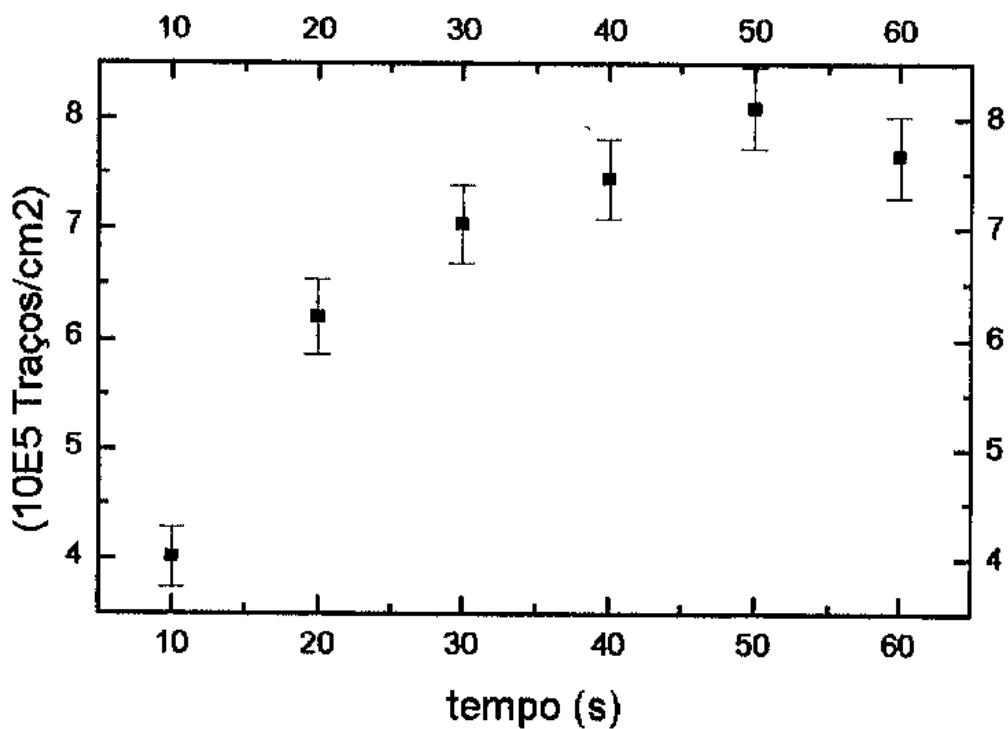
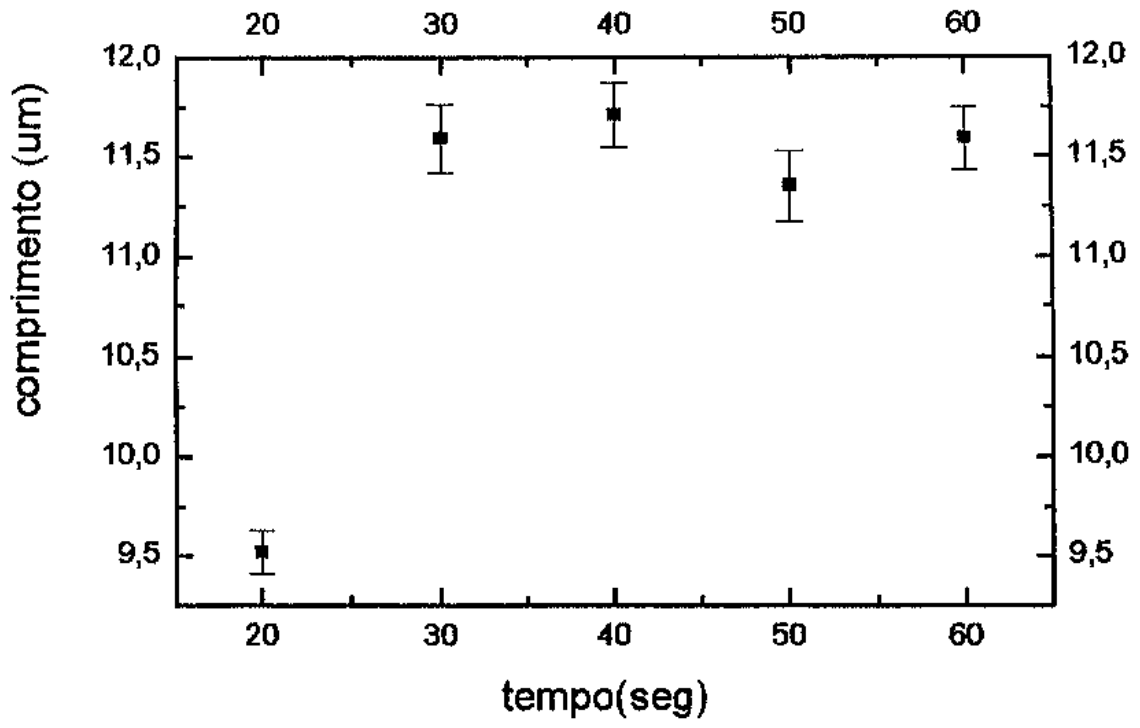


Figura 12: Densidade de traços a) fósseis e b) induzidos, em função do tempo de ataque.

(a)



(b)

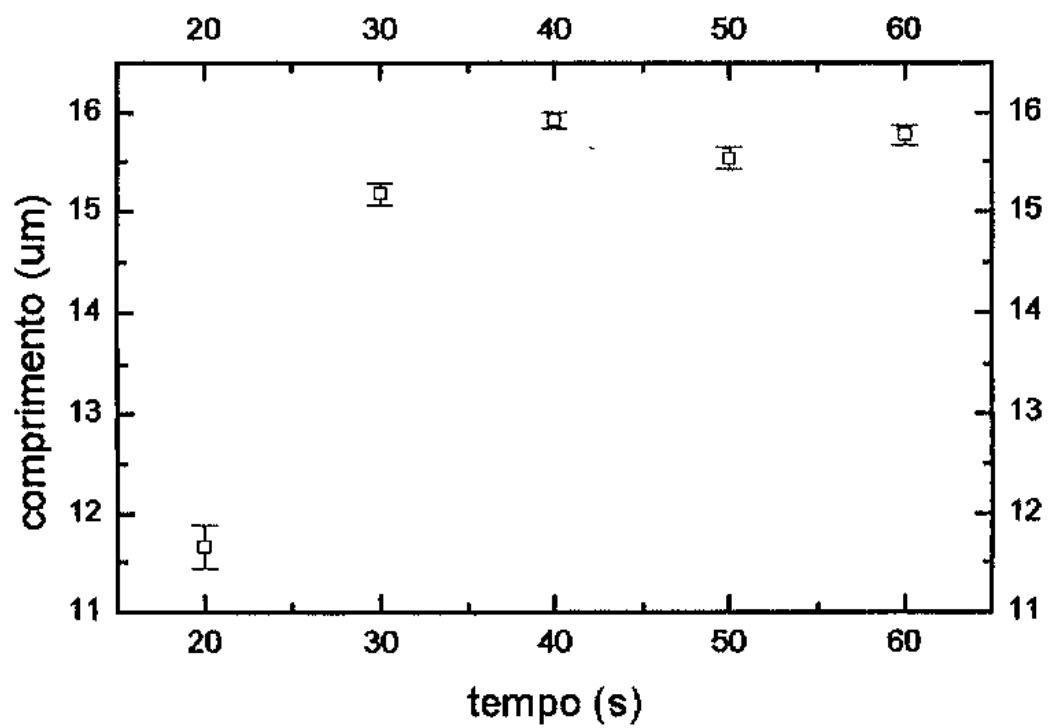


Figura 13: Comprimento de traços a) fósseis e b) induzidos, em função do tempo de ataque.

retículo calibrado acoplado à ocular do microscópio. Esta área é chamada de campo do microscópio. As medidas de comprimento foram efetuadas com o auxílio de uma régua calibrada acoplada a outra ocular. A menor divisão desta régua é de 1.050 μm .

Ao serem efetuadas as medidas, tanto da densidade quanto de comprimento, utilizou-se o seguinte método: mapeou-se com um aumento nominal de 12.5 x 25 toda a "área útil" da montagem tomando-se um campo definido pelas coordenadas X e Y, para cada grão de apatita, ou seja, um campo por grão. A contagem dos traços foi feita com aumento 12.5 x 100 à óleo, em cada ponto mapeado, com o cuidado de não se favorecer nenhuma área específica do grão de apatita. Um procedimento análogo foi adotado para se determinar o comprimento dos traços. Neste caso, mediu-se o primeiro traço confinado encontrado em cada grão mapeado, não se dando preferência para nenhum deles. Em cada caso mapeou-se aproximadamente 150 campos.

Como foi dito anteriormente, as apatitas possuem estrutura cristalina hexagonal e as superfícies polidas se distribuem aleatoriamente entre 0 e 90^o em relação ao eixo prismático (eixo c). Os traços atacados em uma superfície basal (perpendicular ao eixo c), são mais largos do que aqueles contidos numa superfície prismática. Se não for utilizado um óleo com o mesmo índice de refração da lente, a contagem de traços em uma superfície basal se torna difícil, como pode ser visto na figura 14a. Porém, a utilização do óleo torna possível que as medidas

(a)



(b)

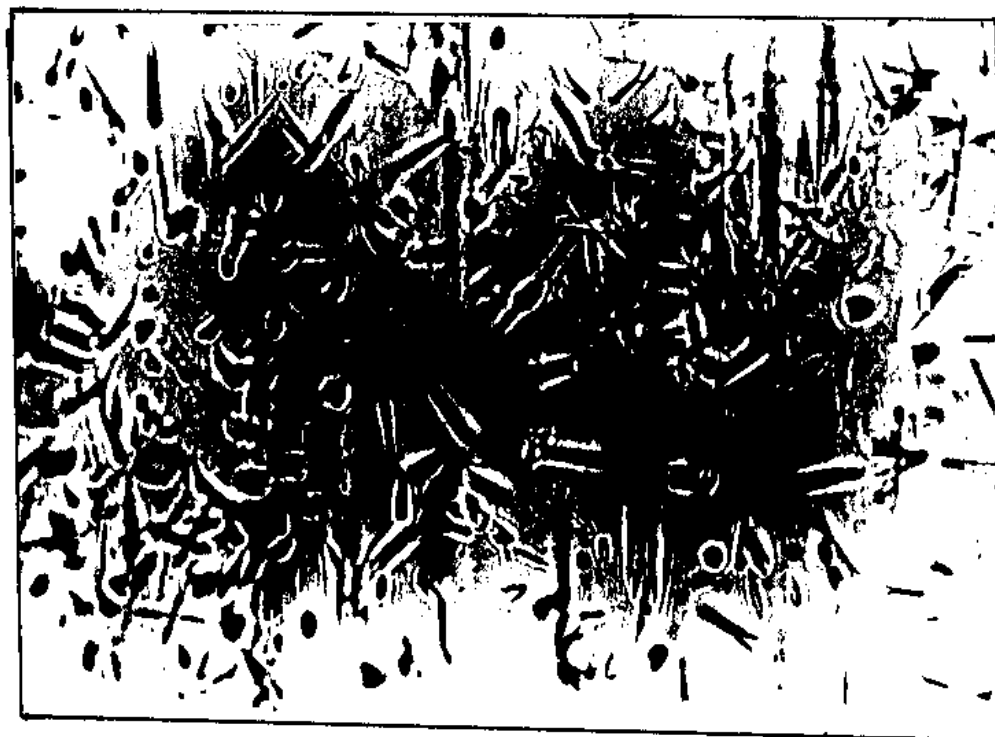


Figura 14: Fotomicrografias de traços de fissão em uma superfície basal em aumentos a) 12,5 x 25 e b) 12,5 x 100 à óleo.

de densidade e comprimento sejam efetuadas em superfícies basais, como pode ser visto na figura 14b.

4.- Aplicação do modelo à apatitas de algumas regiões brasileiras

As amostras estudadas neste trabalho foram coletadas em três regiões diferentes: i) Craton de São Francisco (K-1 é originária de Rio do Peixe-Ba, A-1 é de Itambé-Ba e E-1 da mina Caraíba- BA), ii) Jacupiranga - SP (Ca.Ja e Ja.1) e iii) uma região situada entre o Craton do São Francisco e a Bacia do Paraná (C3D1(329), C3B2(128) e C3D1(66) são de Catalão-GO TA-1 é de Tapira-MG). Na figura 15 estão mostradas as localizações das amostras.

As amostras foram cedidas pelo Prof. Dr. Koji Kawashita do IG - USP (amostra K-1), Prof. Dr. Gilberto Amaral do IG - UNICAMP (amostra A-1), Prof. Dr. Elson Faiva de Oliveira do IG - UNICAMP (amostra E-1), Prof. Dr. Delzio de Lima Machado Junior do IPT (C3D1(329), C3B2(128) e C3D1 (66)) e pelo Prof. Dr. Helmut Born da Escola Politécnica da USP (Ca.Ja, Ja.1 e TA.1).

As amostras TA-1, Ja-1 e Ja.ca são fluorapatitas (Lenharo, 1994), como a amostra de Durango (Green et al., 1986). Porém a amostra K-1 (que é um monocristal como a A-1 e possui a mesma coloração) está entre fluor e cloroapatita (Veiga e Couto, 1981).

Na tabela VI estão mostrados os comprimentos médios de traços de fissão nas amostras de Durango, Catalão, TA-1, K-1 e A-1 depois destas amostras terem sido irradiadas e aquecidas durante 1 hora em temperaturas que variaram de 288 a 350⁰C. Nesta tabela vemos as apatitas em questão se comportando de maneira semelhante frente aos tratamentos térmicos a que foram

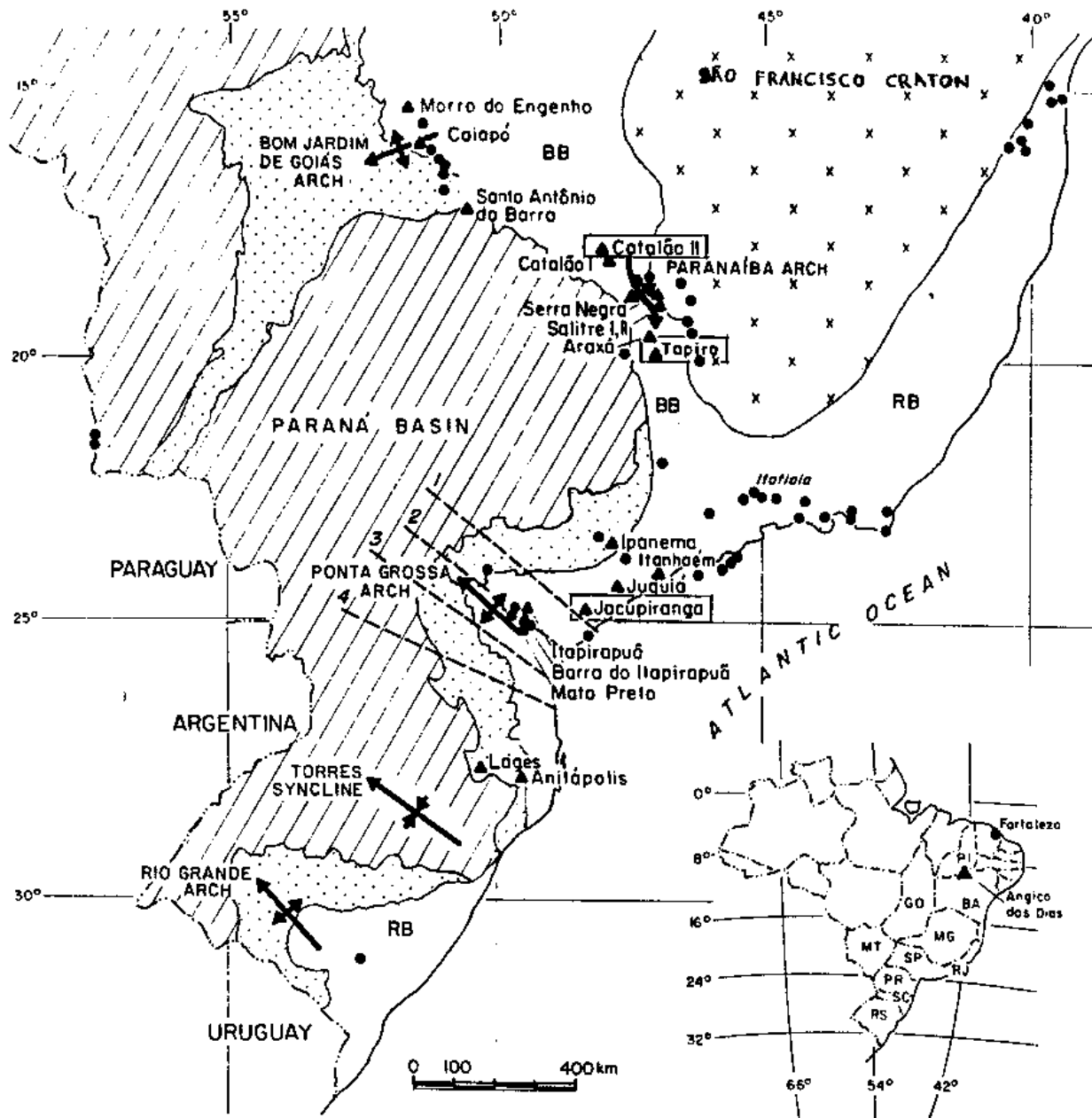


Figura 15: Localização das amostras.

Tabela VI: Resultado das medidas de L/L_0 para as amostras submetidas à 1 h de tratamento térmico.

Amostra	Temperatura			
	288° C	325° C	336° C	350° C
Durango	-	0.76 ± 0.02	0.69 ± 0.02	0.60 ± 0.03
Catalão	-	0.74 ± 0.03	0.69 ± 0.03	0.63 ± 0.05
TA-1	-	0.74 ± 0.02	-	-
K-1	0.88 ± 0.02	0.73 ± 0.03	0.71 ± 0.03	0.63 ± 0.03
A-1	-	0.75 ± 0.02	-	-

submetidas. Além disto, os resultados estão de acordo com os mostrados na tabela I, levando-se em conta que os observadores são diferentes.

A amostra E-1 não possui composição química conhecida e não foi submetida a tratamentos térmicos artificiais. Para esta amostra foi suposto um comportamento semelhante às anteriores frente a tratamentos térmicos.

Deve ser notado também que na amostra E-1, as apatitas não foram separadas da rocha. Neste caso específico os polimentos foram efetuados no instituto de Geociências da UNICAMP por Dailton Silva.

Em seguida serão mostrados os resultados obtidos neste trabalho considerando-se que as apatitas analisadas obedecem o modelo descrito no capítulo 2.

Para se efetuar as datações com o método dos traços de fissão, as amostras foram irradiadas com neutrons no reator do IPEN/CNEN em São Paulo com o auxílio da Profa. Dra. Marília Cesar Khourí e da Profa. Dra. Marina Koskinas.

Antes de cada irradiação as amostras foram aquecidas durante 10 horas à 450°C para se eliminar os traços fósseis.

Os resultados das medidas de densidade e comprimento de traços espontâneos (P_s e L_s respectivamente) e induzidos (P_i e L_i respectivamente) estão mostrados na tabela V.

Nas figuras 16a, 16b, 16c estão mostrados os histogramas de comprimento de traços fósseis espontâneos das amostras K-1, A-1

Tabela V: Resultados das medidas de ρ_s , L_s , η_s , ρ_f , L_f para as amostras analisadas neste trabalho onde: η é o N° de campos medidos, N é o N° total de traços contados, L é o comprimento médio (μm) e ρ a densidade média.

AMOSTRAS	TRACOS FÓSSEIS					TRACOS INDUZIDOS				
	η_s	N_s	ρ_s	$L_s \pm 1\sigma$	η_f	N_f	ρ_f	$L_f \pm 1\sigma$		
K-1	166	1480	2.32×10^3	11.71 ± 0.15	130	427	7.05×10^3	13.92 ± 0.08		
A-1	135	2,439	3.60×10^6	12.10 ± 0.15	160	986	1.35×10^8	16.24 ± 0.06		
E-1	248	1,172	9.18×10^3	12.56 ± 0.15	162	776	4.13×10^3	16.44 ± 0.12		
CSB1 (12B)	158	605	9.70×10^4	12.49 ± 0.16	116	363	7.89×10^4	16.37 ± 0.08		
CSB2 (12B)	189	845	1.36×10^5	12.35 ± 0.17	127	540	1.07×10^5	16.37 ± 0.08		
CSB1 (12A)	168	471	1.01×10^5	12.17 ± 0.18	152	910	8.46×10^4	16.37 ± 0.08		
TA-1	199	598	7.48×10^4	10.59 ± 0.19	162	372	8.90×10^4	16.21 ± 0.09		
Ja-1	181	219	3.05×10^4	10.60 ± 0.21	161	129	2.02×10^4	16.21 ± 0.09		
Ca-Ja	136	368	9.95×10^4	10.34 ± 0.19	198	237	3.78×10^4	16.21 ± 0.09		

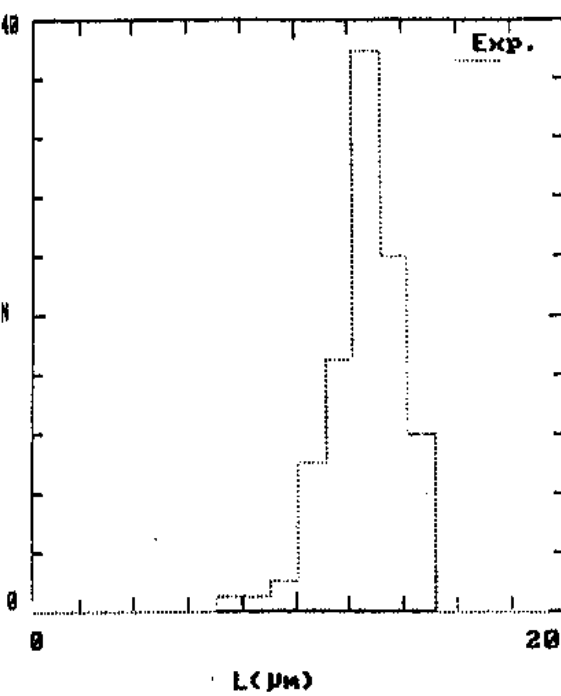
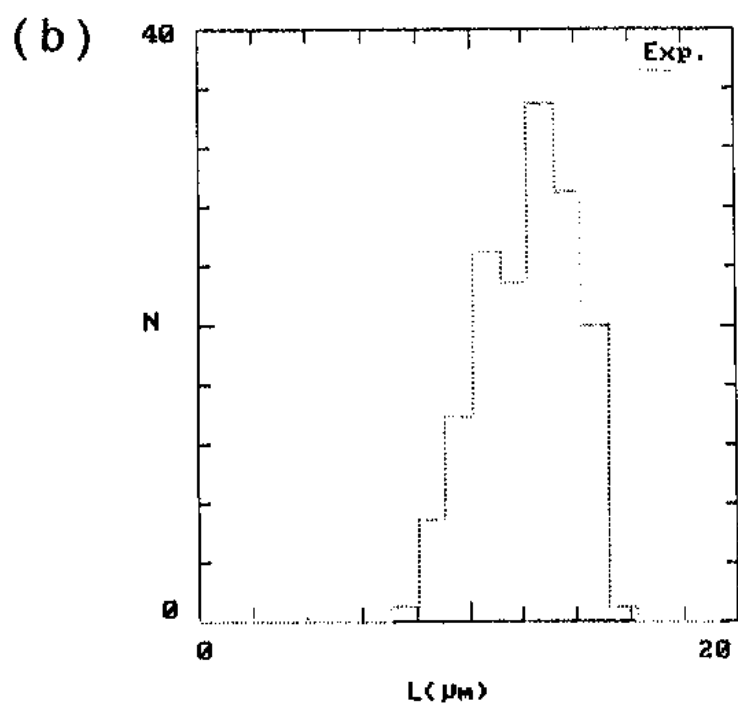
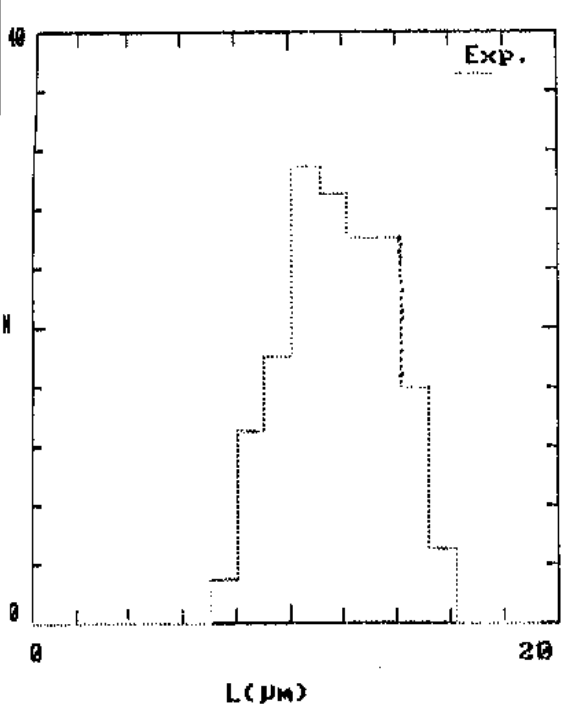


Figura 16: Histogramas dos traços fósseis das amostras a) K-1, b) A-1 e c) E-1.

e E-1, respectivamente.

Nas figuras 17a, 17b, 17c e 17d estão mostrados os histogramas de comprimento de traços fósseis das amostras C3D1(329), C3B2(128), C3D1(66) e TA-1, respectivamente.

Nas figuras 18a e 18b estão mostrados os histogramas de comprimentos de traços fósseis das amostras Ca.Ja e JA-1, respectivamente.

Para se obter as idades aparentes das amostras (FTA experimental) foi utilizado o método das populações (ver por exemplo Gleadow, 1981) onde a equação 3 foi utilizada com os seguintes valores de λ , λ_f , l , σ e Φ :

$$\lambda = 1.55 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1} \text{ (Jaffey et al., 1971)}$$

$$\lambda_f = 7.03 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1} \text{ (Roberts et al., 1968)}$$

$$l = 7.253 \times 10^{-3} \text{ (Cowan e Adler, 1976)}$$

$$\sigma = 580.2 \text{ b (Hannah et al., 1969)}$$

$$\Phi = (1.0 \pm 0.1) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ (fluxo nominal para as amostras K-1, A-1, C3D1(329), C3d1(66), C3b2(128), TA-1, Ca.Ja e JA-1).}$$

$$\Phi = (1.46 \pm 0.15) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ para a amostra E-1 (Dra Marina Koskinas, comunicação pessoal, 1993).}$$

Para se obter os valores da idade corrigida (t_0) foi utilizado o método de correção por tamanho (Storzer e Wagner, 1973) e o fato de que para valores de $L/L_0 \geq 0.65$, a diminuição do comprimento dos traços é igual à diminuição de sua densidade superficial (Green, 1988). Assim, a idade corrigida pode ser escrita como:

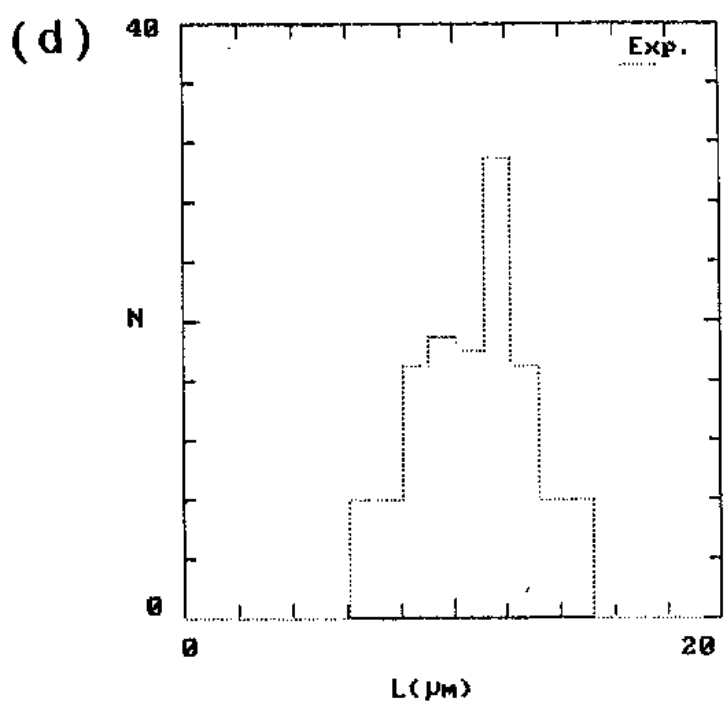
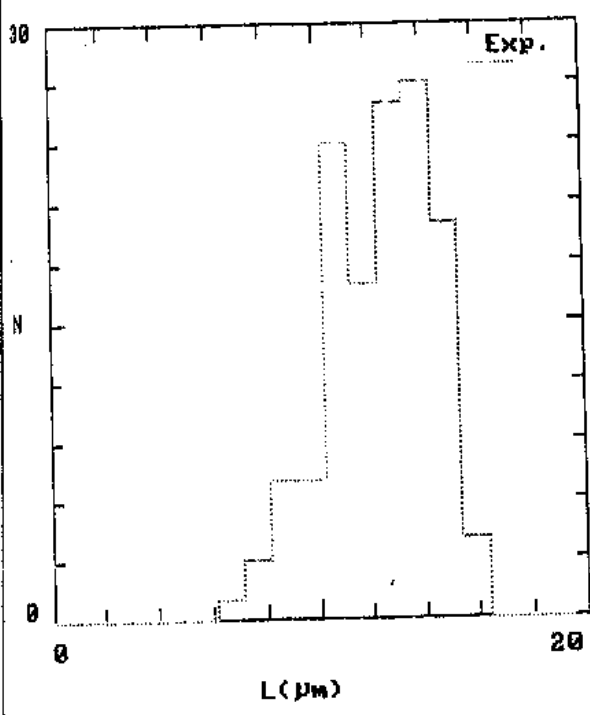
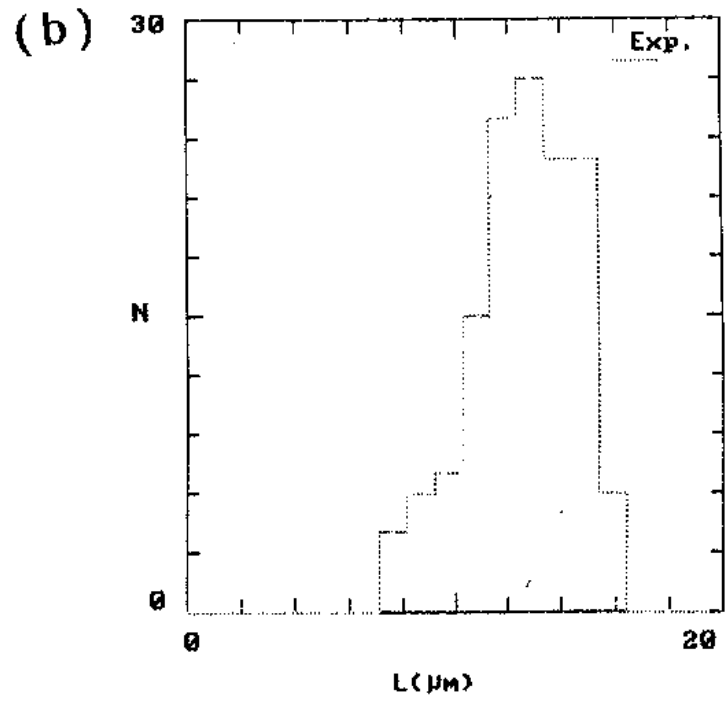
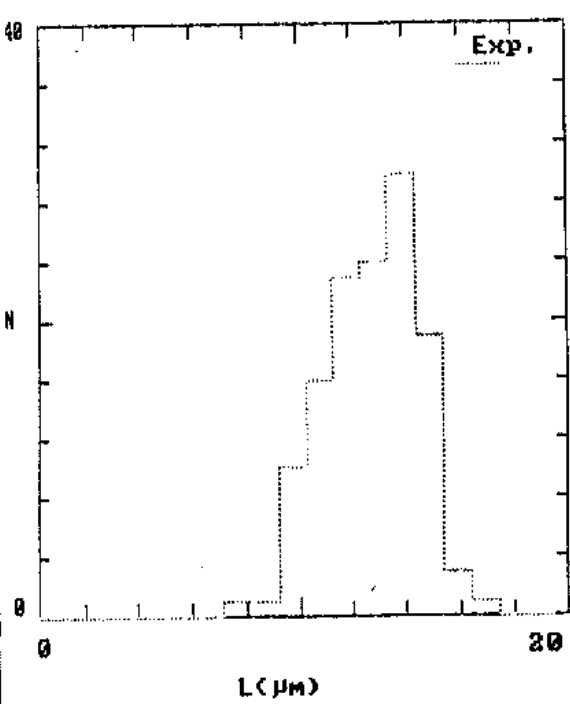


Figura 17: Histogramas de traços fósseis das amostras a) C3D1(329), b) C3B2(128), c) C2D1(66) e d) TA-1.

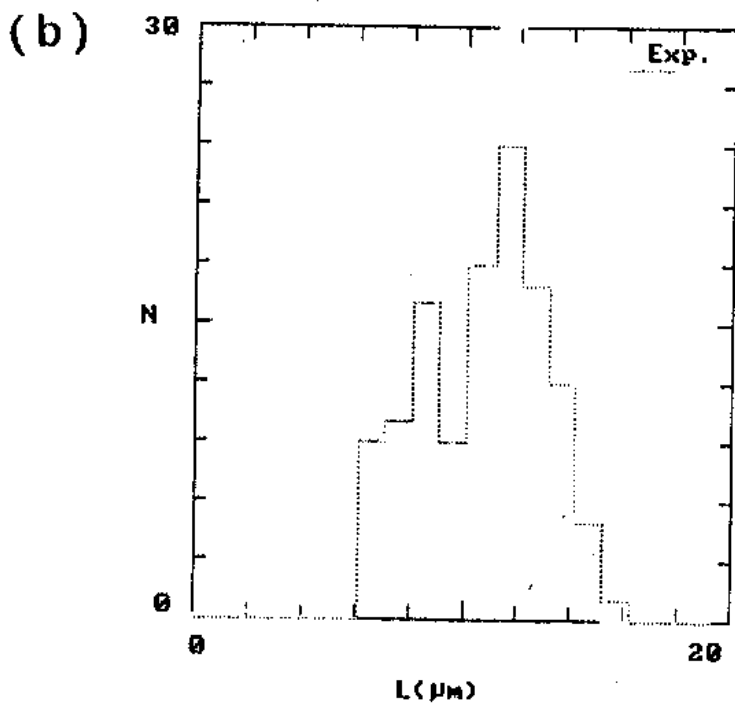
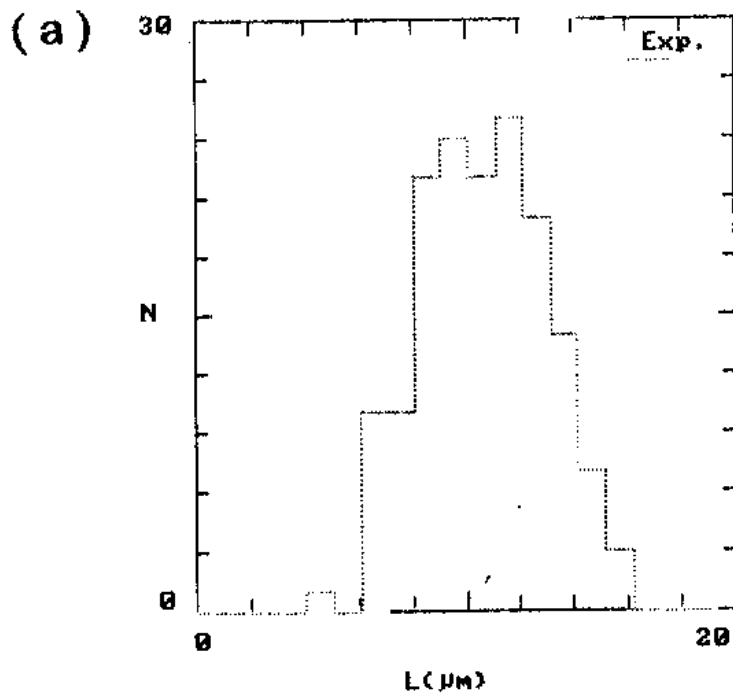


Figura 18: Histogramas de traços fósseis das amostras a) Ja.Ca e b) Ja.1.

$$t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{\lambda \sigma \phi I}{\lambda_F} \left(\frac{\rho_B}{\rho_I} \right) \frac{1}{(L/L_0)} \right] \quad (14)$$

Na tabela VII estão mostrados os valores de ρ_B/ρ_I , L/L_0 , t_{ap} e t_0 obtidos neste trabalho.

Deve ser notado que as idades corrigidas das amostras de Jacupiranga, Tapira e Catalão, obtidas com o auxílio do método dos traços de fissão (tabela VII), são concordantes com as da tabela VIII obtidas utilizando-se outros métodos de datação (ver por exemplo Gomes et al., 1990). Nesta tabela também pode ser visto que uma amostra localizada no Craton do São Francisco (Angico dos Dias-BA cuja idade foi extraída de Silva et al., 1988) possui idade muito maior que as de traços de fissão. Ou seja, neste caso grande parte dos traços gerados desde a formação destas rochas foram apagados .

Os valores da idade aparente, idade corrigida, comprimento dos traços induzidos e da temperatura atual utilizados neste trabalho para se obter a história térmica das amostras de Jacupiranga - SP (JA-1, JA.CA) foram:

$$FTA_{exp} = (92 \pm 14) \text{ Ma}$$

$$t_0 = (140 \pm 15) \text{ Ma}$$

$$L_0 = 16.2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$T_H = 25^\circ\text{C}$$

Na tabela IX são mostradas as dimensões das caixas de Monte

Tabela VII: Valores de (ρ_s/ρ) , (l/l_0) , t_{ap} e t_{corr} para as amostras.

Amostra	ρ_s/ρ	L/L_0	T_{ap} (a)	t_{corr} (a)
K-1	3,29 ($\pm 3,8\%$)	0,75 ($\pm 1,4\%$)	$1,94 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)	$2,61 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)
A-1	2,67 ($\pm 3,8\%$)	0,75 ($\pm 1,3\%$)	$1,58 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)	$2,10 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)
E-1	2,22 ($\pm 4,6\%$)	0,76 ($\pm 1,4\%$)	$1,91 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)	$2,50 \times 10^8$ ($\pm 11\%$)
C3D1(329)	1,22 ($\pm 6,6\%$)	0,76 ($\pm 1,4\%$)	$7,26 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)	$9,41 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)
C3D1(66)	1,19 ($\pm 0,59\%$)	0,74 ($\pm 1,6\%$)	$7,08 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)	$9,43 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)
C3B2(128)	1,27 ($\pm 5,5\%$)	0,75 ($\pm 1,6\%$)	$7,56 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)	$9,92 \times 10^7$ ($\pm 12\%$)
Ca.Ja	1,57 ($\pm 8,3\%$)	0,64 ($\pm 1,9\%$)	$9,33 \times 10^7$ ($\pm 13\%$)	$1,43 \times 10^8$ ($\pm 13\%$)
Ja.1	1,51 ($\pm 11,1\%$)	0,65 ($\pm 2,1\%$)	$8,97 \times 10^7$ (15%)	$1,35 \times 10^8$ ($\pm 15\%$)
TA-1	1,07 ($\pm 5,9\%$)	0,65 ($\pm 1,9\%$)	$6,37 \times 10^7$ (14%)	$9,78 \times 10^7$ ($\pm 14\%$)

Tabela VIII: Idades das amostras obtidas através de métodos de datação diferentes do método dos traços de fissão (Gomes et al., 1990).

Localização	Idade (Ma.)
Catalão - Co	84 ± 4
Tapira - Mg	entre* 70 e 90
Jacupiranga - SP	entre* 130 e 155
Angico dos Dias - Ba	2011 ± 6

Tabela IX: Restrições impostas às amostras de Jacupiranga.

Restrições	1ª Caixa de Monte Carlo		2ª Caixa de Monte Carlo		3ª Caixa de Monte Carlo	
	Interv. t (Ms)	Interv. T (°C)	Interv. t (Ms)	Interv. T (°C)	Interv. t (Ms)	Interv. T (°C)
1ª	155-125	140-120	85-55	140-120	30-1	140-20
2ª	155-125	120-50	85-55	120-50	30-1	60-20
3ª	155-125	100-60	85-55	110-75	30-1	40-25

Carlo definidas pela 1^a, 2^a e 3^a restrições para as amostras de Jacupiranga .

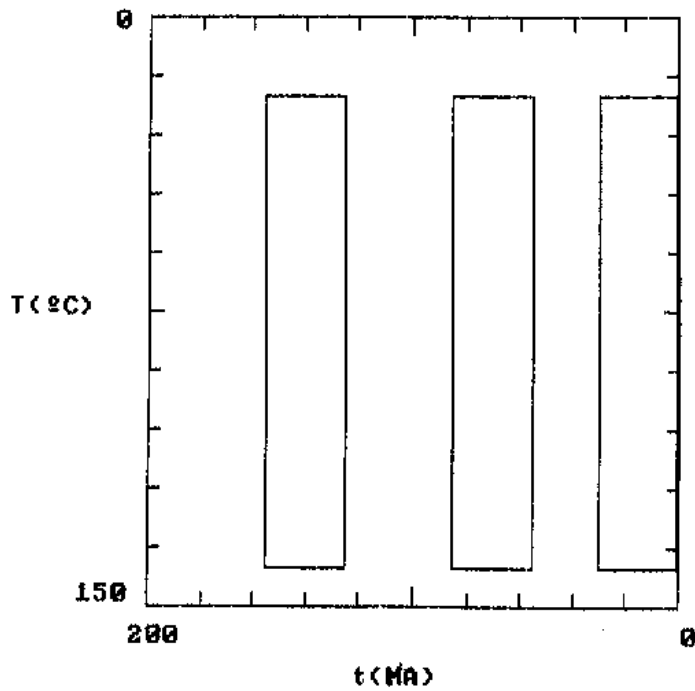
Nas figuras 19a e 19b são mostradas as histórias térmicas estatisticamente compatíveis como os dados experimentais referentes à primeira restrição imposta às amostras Ja.Ca e Ja-1 respectivamente. Das 200 histórias testadas em cada caso, nenhuma foi aceita pela amostra Ja.Ca e apenas uma aceita pela amostra Ja-1.

A partir da história aceita na primeira restrição pela amostra JA-1 se definiu a segunda restrição mostrada na tabela IX. Neste caso, vemos na figuras 20a e 20b que um número razoável de histórias térmicas são estatisticamente compatíveis com os dados referentes às amostras de Jacupiranga.

Impondo-se a terceira restrição vemos nas figuras 21a e 21b que existem duas tendências nas amostras de Jacupiranga. A principal tendência é a de um esquentamento maior que 20^oC (à partir de \approx 75^oC) ocorrido entre 140 e 60 Ma. Na outra tendência nota-se um resfriamento menor que 20^oC (à partir de \approx 100^oC) neste mesmo período. Nas duas tendências vemos que de 60 Ma até hoje a amostra passou de \approx 80^oC à 25^oC.

Como não há indícios geológicos de que tenha ocorrido um evento térmico significativo na região de Jacupiranga desde a formação das rochas, acreditamos que a história térmica geologicamente mais provável seja a de que as amostras analisadas sofreram um resfriamento de 100 a 80^oC entre 140 e 60 Ma atrás

(a)



(b)

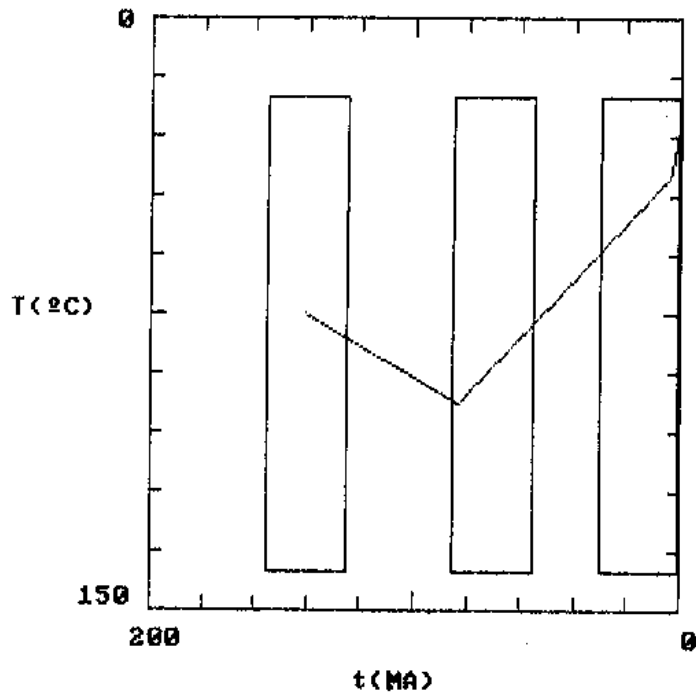
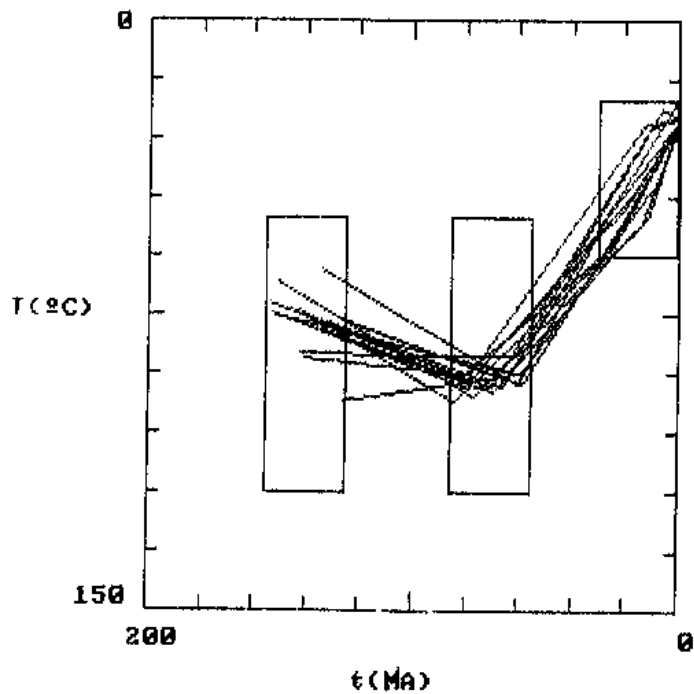


Figura 19: Histórias térmicas resultantes da 1ª restrição imposta as amostras a) Ja.Ca e b) Ja-1.

(a)



(b)

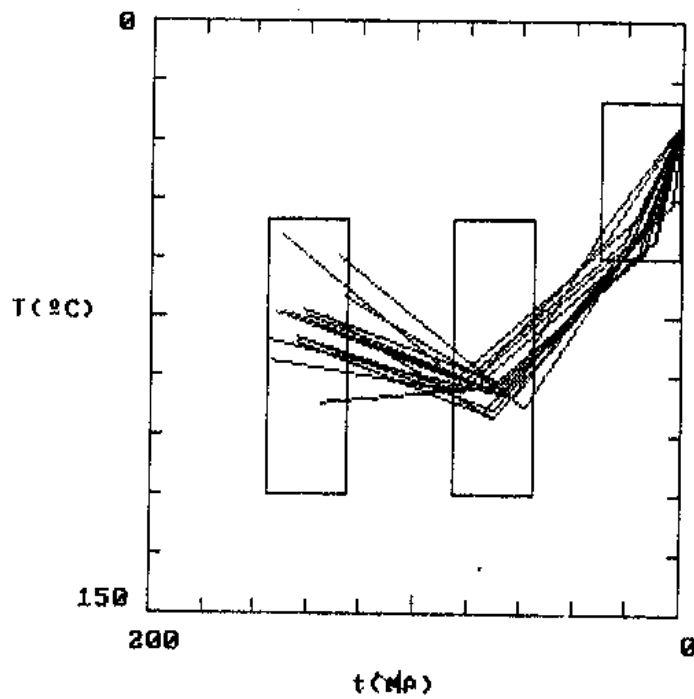
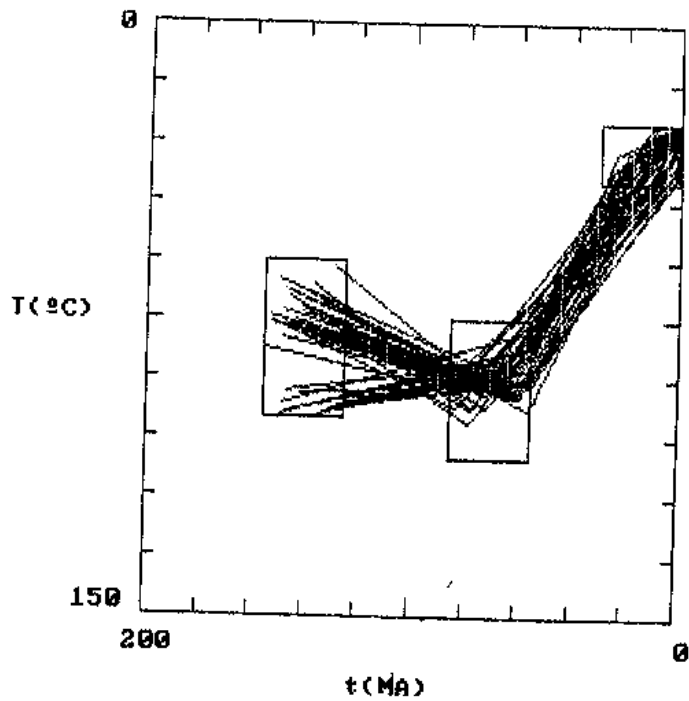


Figura 20: Histórias térmicas resultantes da 2ª restrição imposta às amostras a) Ja.Ca e b) Ja-1.

(a)



(b)

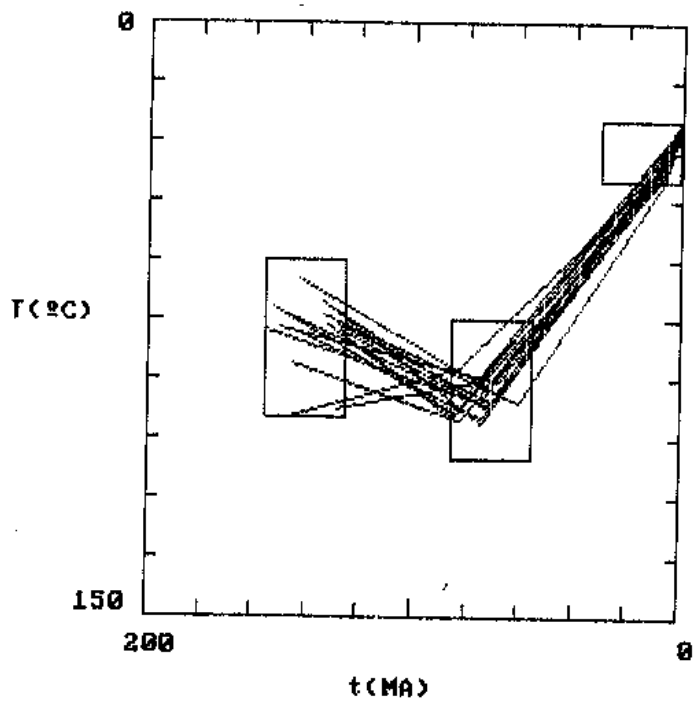


Figura 21: Histórias térmicas resultantes da 3ª restrição imposta às amostras a) Ja.Ca e b) Ja-1.

e em seguida um esfriamento mais rápido de 80 a 25^oC de 60 Ma atrás até hoje. Utilizando-se um gradiente geotérmico de 20^oC/Km (este valor foi utilizado baseando-se em medidas apresentadas em Hamza et al., 1989) esta história térmica equivale a uma taxa de erosão de 13 m/Ma entre 140 e 60 Ma, seguida por outra taxa de 46m/Ma desde 60 Ma atrás até hoje.

Os valores da idade aparente, da idade corrigida, do comprimento dos traços induzidos e da temperatura atual utilizados neste trabalho para se obter a história térmica das amostras do Craton do São Francisco (K-1, A-1 e E-1) foram:

$$FTA_{exp} = (181 \pm 20) \text{ Ma}$$

$$t_0 = (240 \pm 30) \text{ Ma}$$

$$L_0 = 16.2 \text{ } \mu\text{m}$$

$$T_H = 25^{\circ}\text{C}$$

Na tabela X são mostradas as dimensões das caixas de Monte Carlo definidas pela 1^a, 2^a e 3^a restrições para as amostras do Craton de São Francisco.

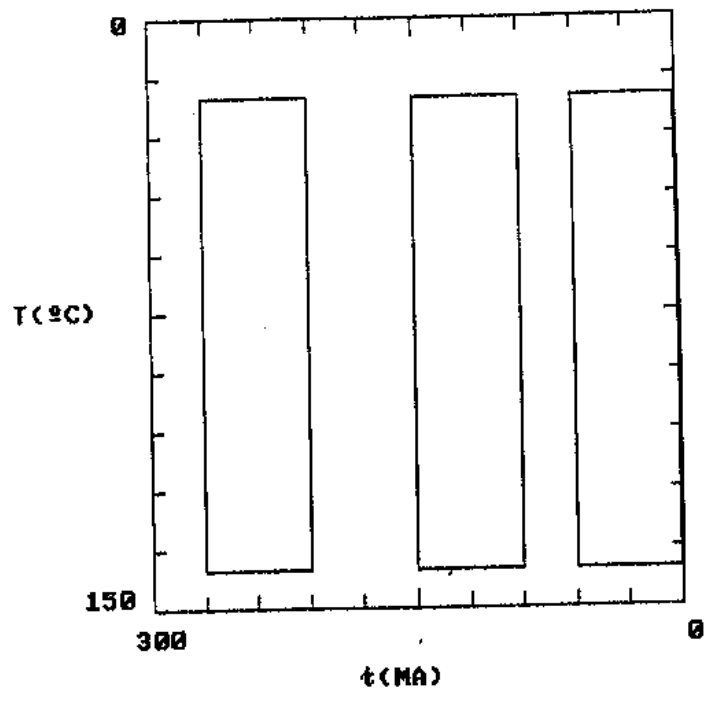
Nas figuras 22a, 22b e 22c são mostrados as histórias estatisticamente compatíveis com os dados experimentais referentes à 1^a restrição imposta às amostras K-1, A-1 e E-1, respectivamente. Das 200 histórias testadas em cada caso, nenhuma foi aceita pelas amostras K-1 e A-1, porém 3 histórias foram aceitas pela amostra E-1.

A partir das histórias aceitas na 1^a restrição pelas

Tabela X: Restrições impostas às amostras do craton do São Francisco.

Restrições	1ª Caixa de Monte Carlo		2ª Caixa de Monte Carlo		3ª Caixa de Monte Carlo	
	Interv. t (Ma)	Interv. T (°C)	Interv. t (Ma)	Interv. T (°C)	Interv. t (Ma)	Interv. T (°C)
1ª	270-210	140-20	150-90	140-20	60-1	140-20
2ª	270-210	140-75	150-90	100-20	60-1	100-20
3ª	270-210	105-80	150-90	80-50	60-1	40-20

(a) (b)



(c)

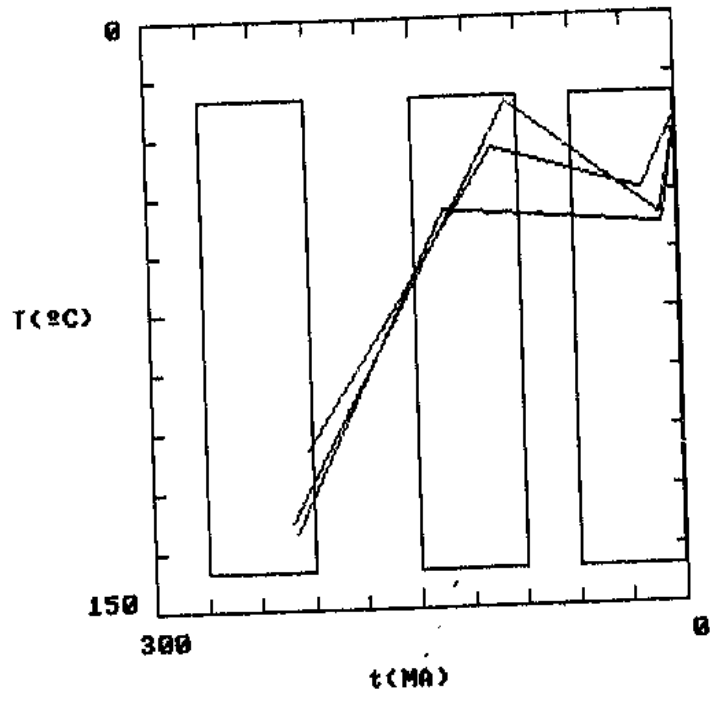


Figura 22: Histórias térmicas resultantes da 1ª restrição imposta às amostras a) K-1, b) A-1 e c) E-1.

amostras do Craton de São Francisco (amostra E-1), se definiu a 2ª restrição mostrada na tabela X. Neste caso, vemos na figura 23a, 23b e 23c que além de aparecerem histórias térmicas compatíveis com a amostra E-1, aparecem histórias compatíveis com as amostras K-1 e A-1. Porém, os comportamentos das amostras K-1 e A-1 (são parecidos), diferem do comportamento da amostra E-1.

Em um trabalho anterior, onde somente a amostra E-1 foi analisada (Hadler et al., 1993) foi colocado que, apesar de possível, um esfriamento inicial (à partir de 250 Ma.) rápido no Craton de São Francisco não era embasado por dados geológicos. Porém um esfriamento lento desde 240 Ma até hoje (como o indicado pelas amostras K-1 e A-1) é geologicamente provável (Dr. Gilberto Amaral, comunicação pessoal, 1994). Assim, há a necessidade de se impor uma terceira restrição (mostrada na tabela X) para checar se os dados referentes a amostra E-1 são compatíveis com a história térmica sugerida pelas amostras K-1 e A-1.

As figuras 24a, 24b e 24c mostram que uma história térmica compatível com as três amostras é um resfriamento linear de 90 a 25°C desde 240 Ma atrás até hoje utilizando-se um gradiente geotérmico de 15°C/Km (Hamza et al., 1989). Esta história térmica equivale a uma taxa de erosão de 18m/Ma desde 240 Ma até hoje. Deve ser notado que a história térmica sugerida pela figura 23c além de ser geologicamente pouco provável, não é aceita pelas amostras K-1 e A-1.

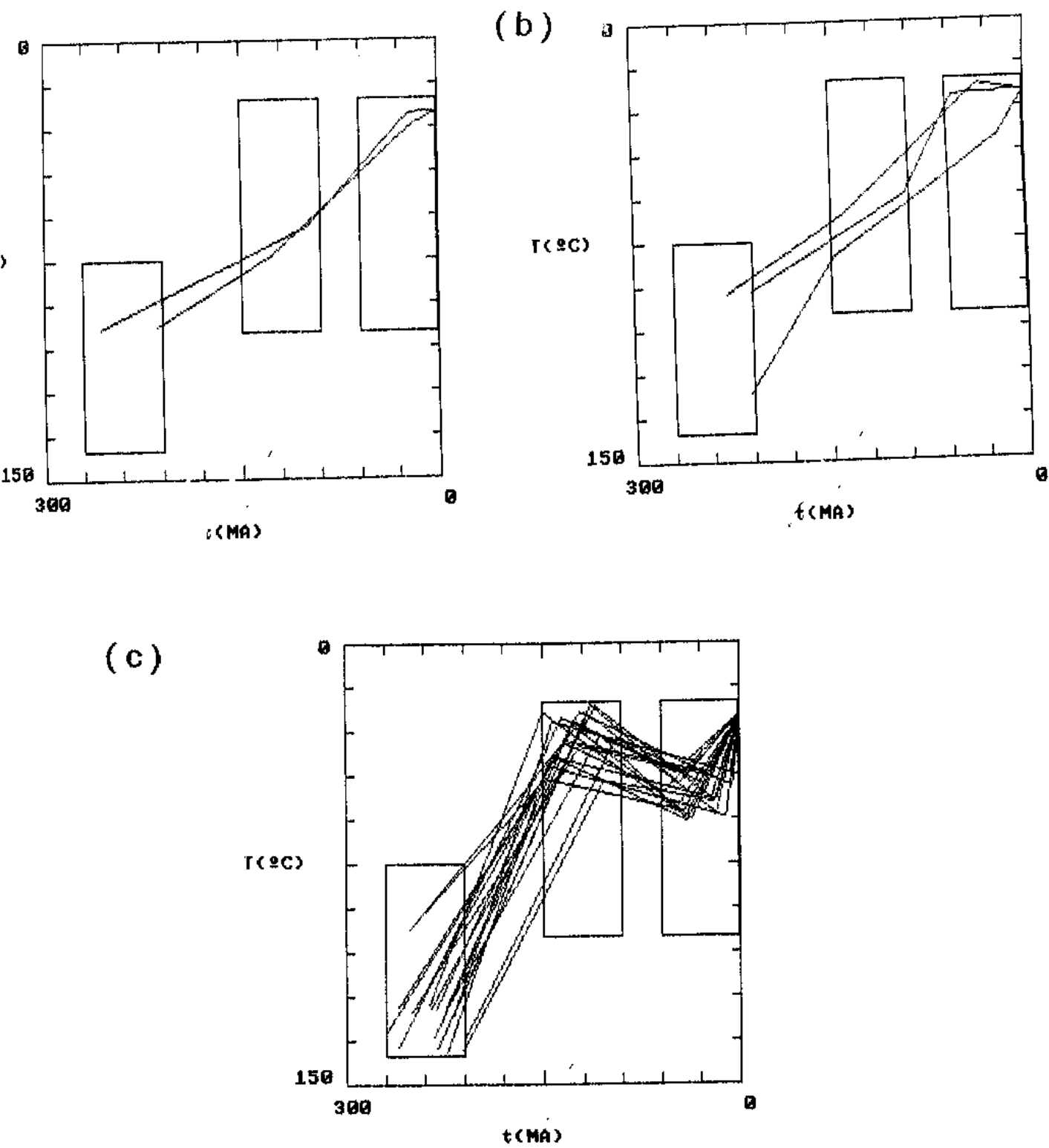


Figura 23: Histórias térmicas resultantes da 2ª restrição imposta às amostras a) K-1, b) A-1 e c) E-1.

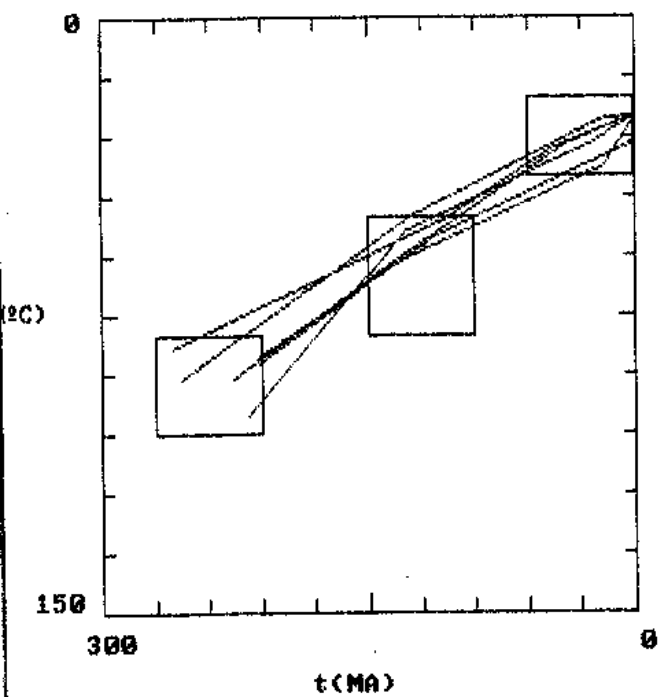
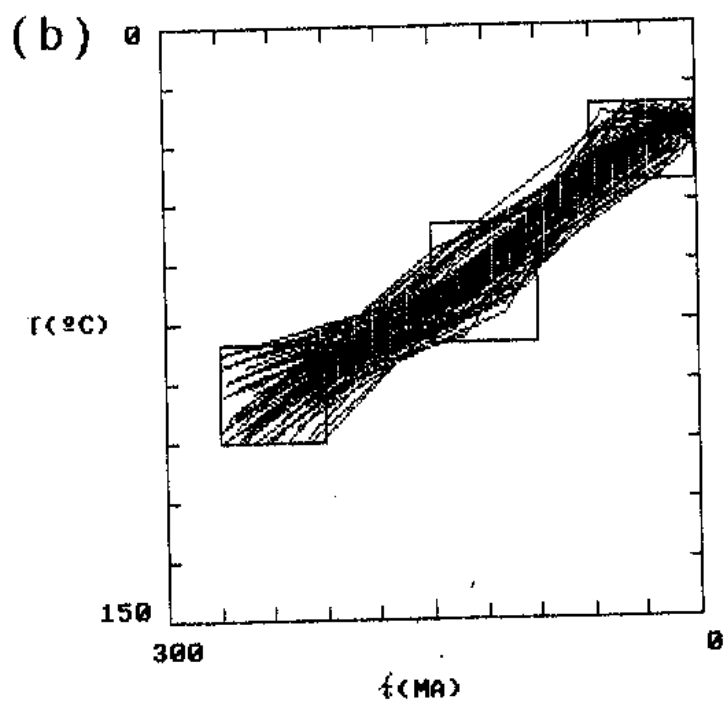
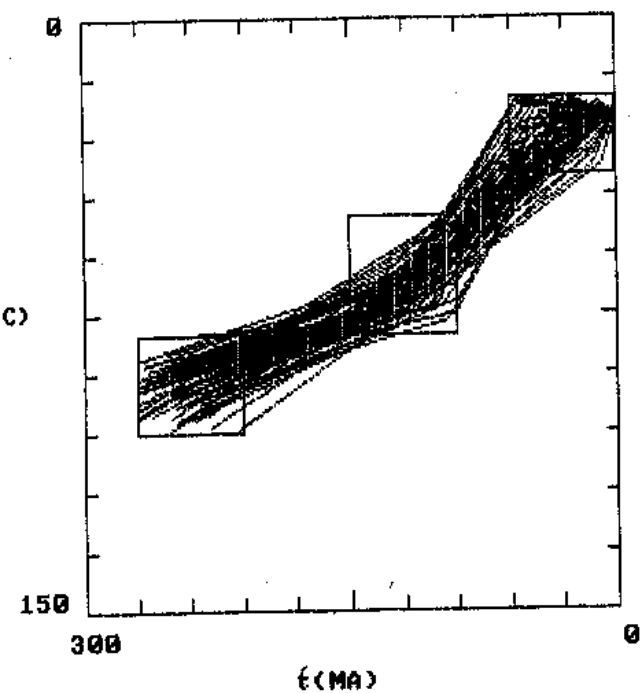


Figura 24: Histórias térmicas resultantes da 3ª restrição imposta às amostras a) K-1, b) A-1 e c) E-1.

Os valores das idades aparentes, da idade corrigida, do comprimento dos traços induzidos e da temperatura atual utilizados neste trabalho para se obter a história térmica das amostras de Catalão-GO e Tapira-MG (C3D1(329), C3B2(128), C3D1(66) e TA-1) foram:

$$FTA_{exp} = (70 \pm 9) \text{ Ma}$$

$$t_0 = (96 \pm 14) \text{ Ma}$$

$$L_0 = 16.3$$

$$T_H = 25^{\circ}\text{C} \text{ (p/ TA-1)}$$

$T_H = 30^{\circ}\text{C}$ (p/ as amostras de Catalão, pois estas amostras foram coletadas à profundidades de 66, 128 e 329m em uma região onde o gradiente não é baixo).

Na tabela XI estão mostrados as dimensões das caixas de Monte Carlo definidas pela 1^a, 2^a, 3^a e 4^a restrição para as amostras de Catalão e Tapira.

Devido às características peculiares do histograma da amostra TA-1 (mostrada na figura 17d), foi efetuada uma remediação do comprimento dos traços fósseis, cujo resultado está mostrado na figura 25.

Nas figuras 26a, 26b, 26c, 26d e 26e estão mostradas as histórias estatisticamente compatíveis com os dados experimentais referentes à 1^a restrição imposta às amostras TA-1 (+ Taff-1), C3D1(66), C3B2(128) e C3D1(329). Das 200 histórias testadas em cada caso, apenas uma foi aceita pela amostra C3D1(329). A partir dela se definiu a 2^a restrição supondo que o gradiente

Tabela XI: Restrições impostas às amostras de Catalão e Tapira.

Restrições	1ª Caixa de Montecarlo		2ª Caixa de Montecarlo		3ª Caixa de Montecarlo	
	interv. t (Ms)	interv. T (°C)	interv. t (Ms)	interv. T (°C)	interv. t (Ms)	interv. T (°C)
1ª	110-82	140-20	70-50	140-20	20-1	140-20
2ª	110-82	120-60	70-50	70-20	20-60	70-20
3ª	110-82	105-75	70-50	95-65	20-1	60-30
4ª	110-82	98-82	70-50	88-72	20-1	53-37

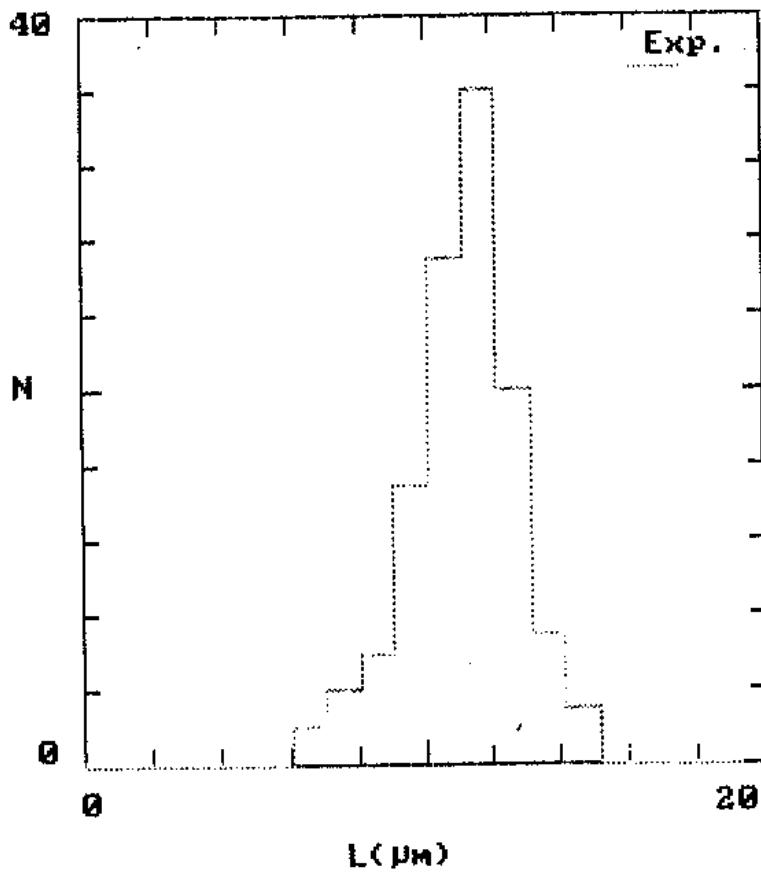


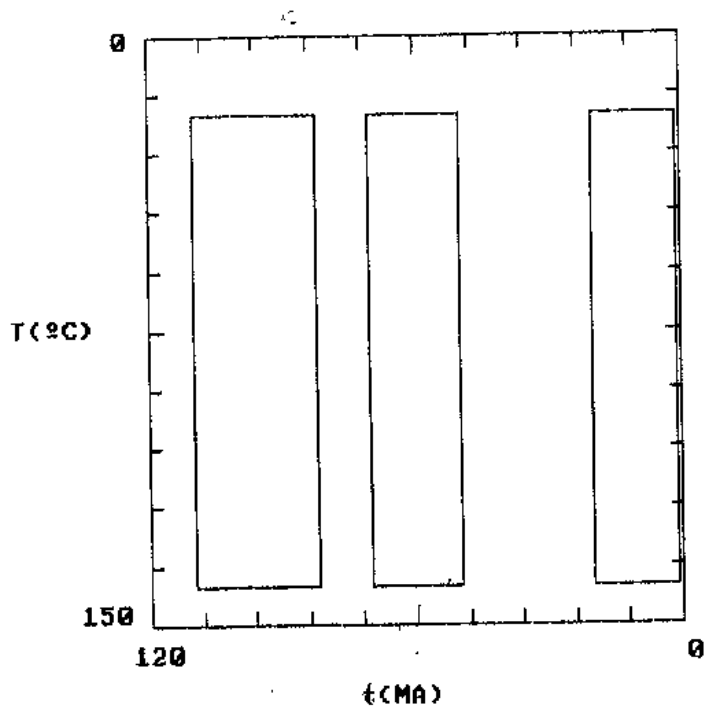
Figura 25: Histogramas obtidos com a remedição dos comprimentos de traços fósseis da amostra TA-1 (Taff. 1).

(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

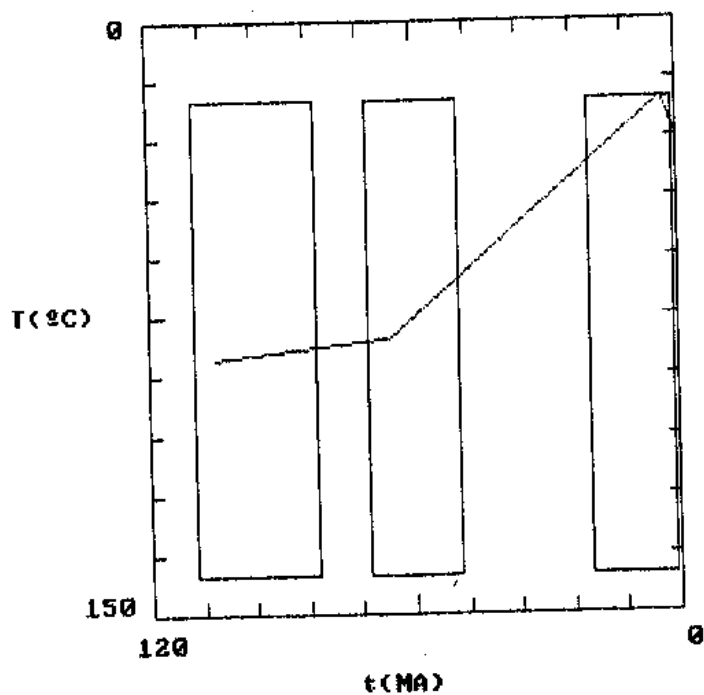


Figura 26: Histórias térmicas resultantes da 1ª restrição imposta às amostras a) Taff.1, b) TA-1, c) C3D1 (66), d) C3B2(128) e e) C3D1 (329).

geotérmico em Tapira é parecido com o de Catalão.

Deve ser notado que esta hipótese necessita de confirmação experimental já que na região em questão existe uma grande variedade de gradientes geotérmicos (Hamza et al., 1989). Porém, ela serve como ponto de partida já que as amostras pertencem a localidades com características geológicas semelhantes (Dr. Delzio de Lima Machado Junior, comunicação pessoal, 1994).

Nas figuras 27a, 27b, 27c, 27d e 27e vemos que as amostras de Catalão parecem concordar entre si, porém não concordam com a amostra de Tapira (note-se que as duas medidas efetuadas nesta amostra são concordantes).

Impondo-se a 3^a restrição, ainda vemos um comportamento diferente das histórias térmicas compatíveis comparando-se as amostras de Catalão e Tapira (figuras 28a, 28b, 28c, 28d e 28e).

Na 4^a restrição (apesar de nas 200 histórias testadas não terem sido encontradas histórias compatíveis com as amostras Taff1 e C3B2(128)) pode ser visto na figura 29 que as amostras TA-1, C3D1(66) e C3D1(329) parecem ter um comportamento semelhante de 90 a 60 Ma atrás. Além disto, para estas amostras, o comportamento médio de 60 Ma até hoje não é significativamente diferente. Assim, supondo-se o mesmo gradiente geotérmico em Tapira e Catalão, podemos esperar que nesta região tenha ocorrido um esfriamento de 95 a 85^oC no intervalo de 90 a 60 Ma atrás, seguido de esfriamento mais rápido de 85 a 27^oC ocorrido desde 60 Ma atrás até hoje. O gradiente geotérmico em Tapira é de

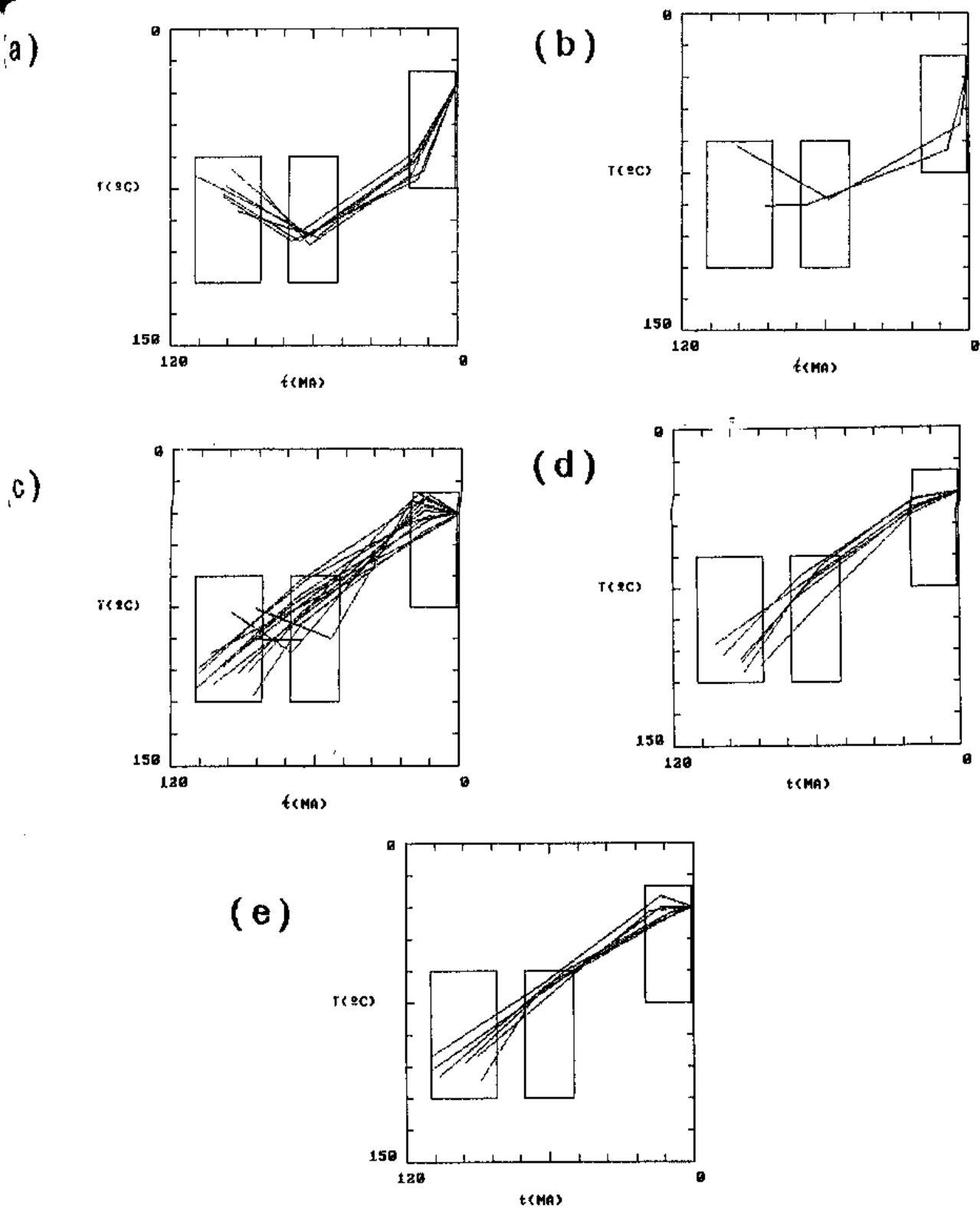


Figura 27: Histórias térmicas resultantes da 2ª restrição imposta às amostras a) Taff.1, b) TA-1, c) C3D1 (66), d) C3B2 (128) e e) C3D1 (329).

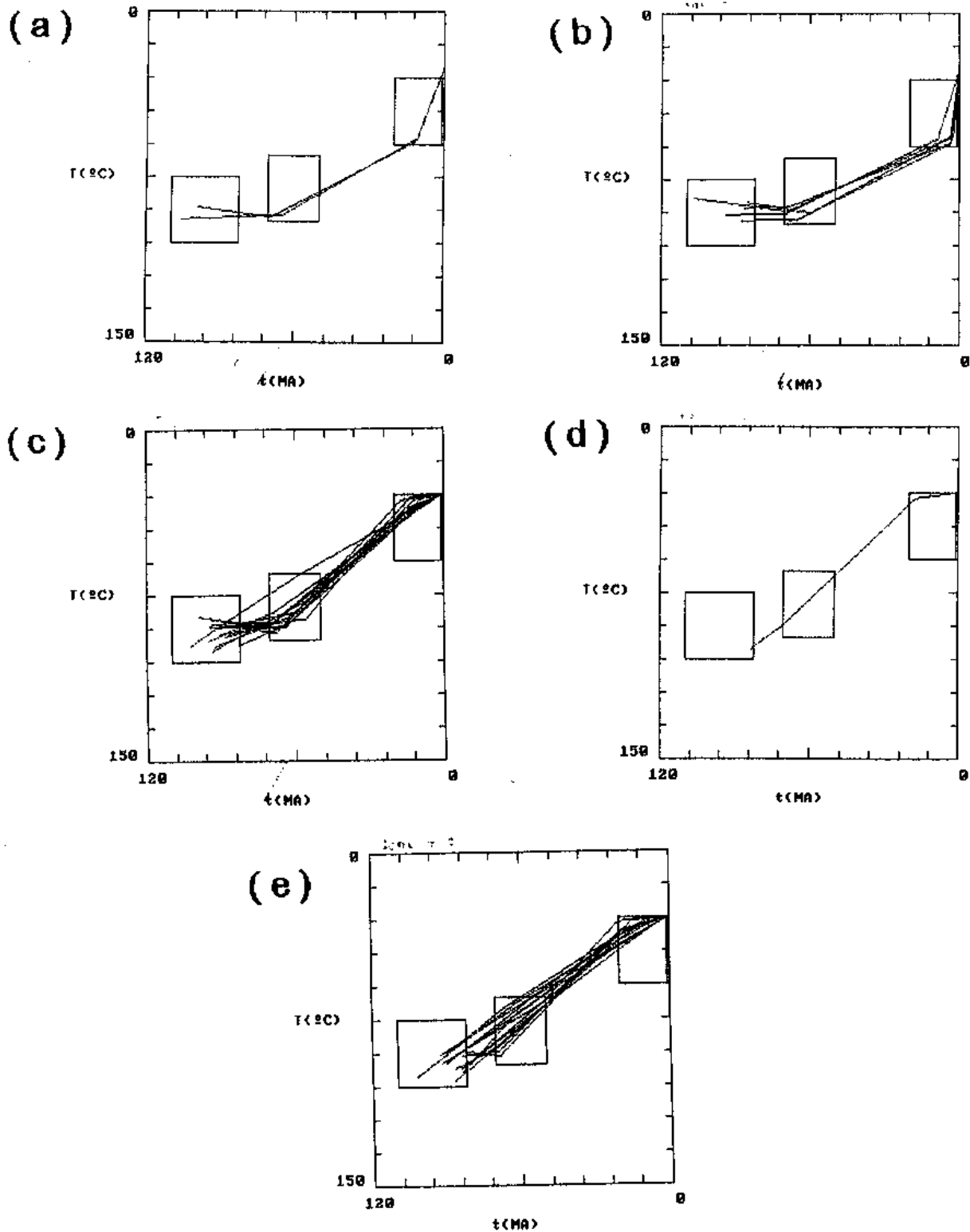


Figura 28: Histórias térmicas resultantes da 3ª restrição imposta às amostras a) Taff.1, b) TA-1, c) C3D1 (66), d) C3B2 (120) e e) C3D1 (329).

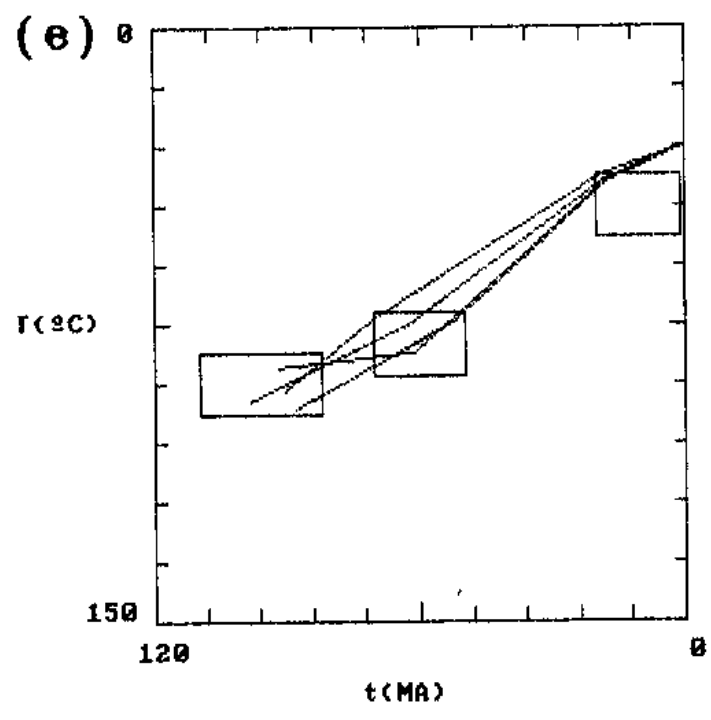
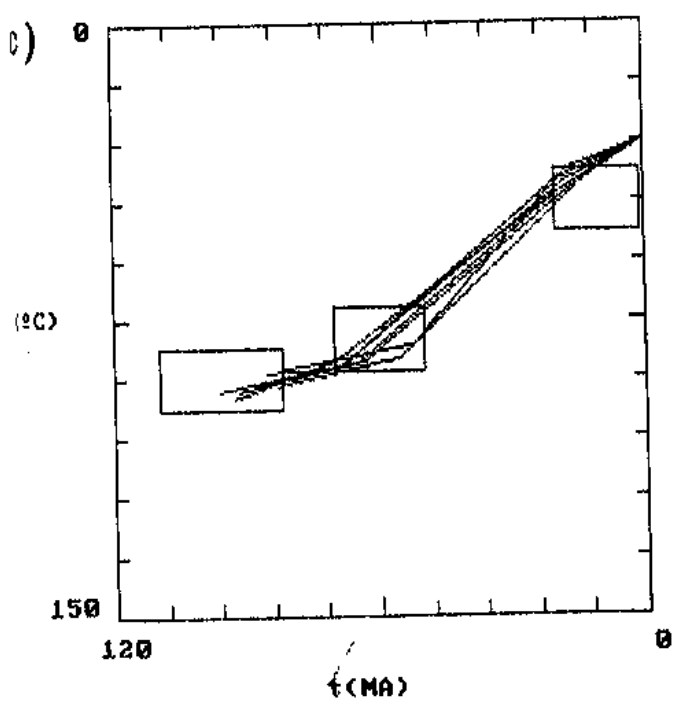
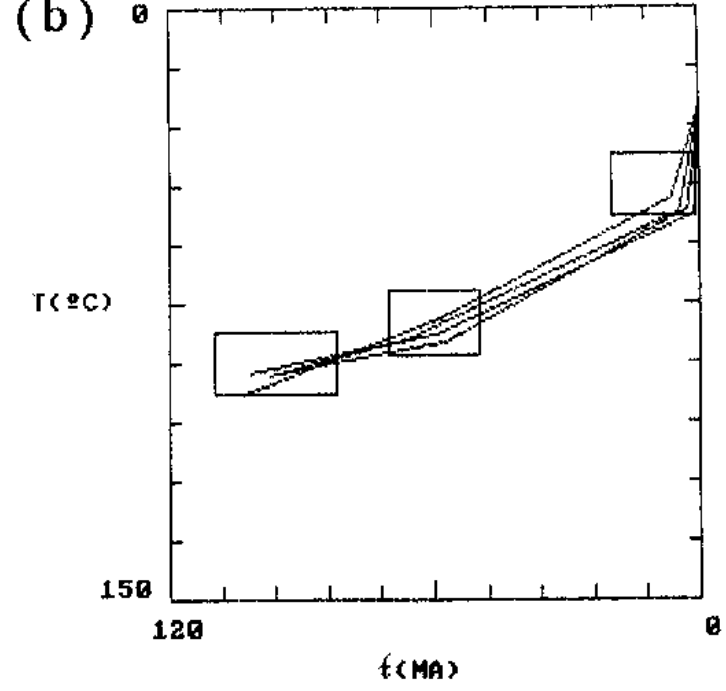
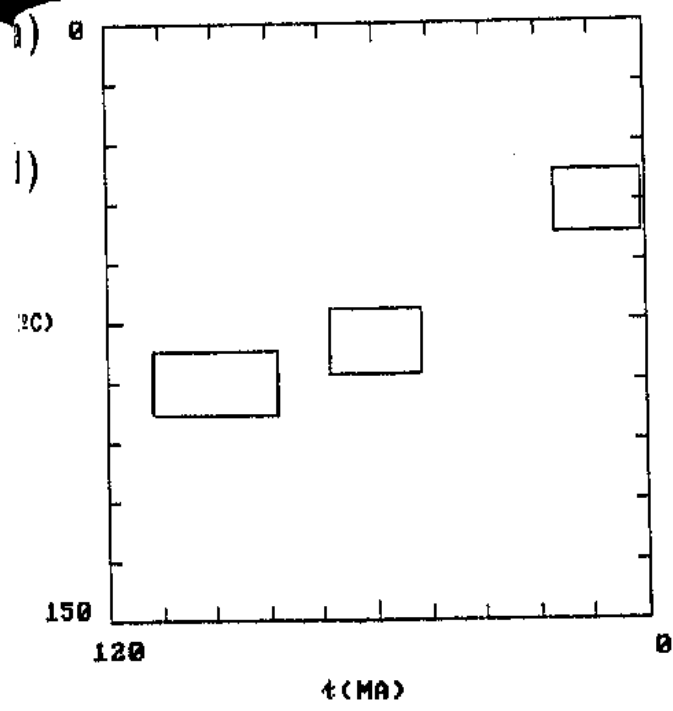


Figura 29: Histórias térmicas resultantes da 4ª restrição imposta às amostras a) Taff.1, b) TA-1, c) C3D1 (66), d) C3B2 (128) e e) C3D1 (329).

27⁰C/Km (Hamza et al., 1989). Assim a história térmica acima é equivalente a uma taxa de erosão de 12m/Ma entre 90 e 60Ma atrás, seguida de uma taxa de 36m/Ma desde 60MA até hoje. Estas taxas são semelhantes às encontradas em Jacupiranga. Porém acreditamos que para fazermos uma afirmação mais precisa a esse respeito necessitamos de amostras de outras localidades de tais regiões e de medidas de gradiente geotérmico nas localidades estudadas.

5.- Conclusões

Este trabalho de tese, significou para o grupo de Cronologia o ingresso efetivo na "era da apatita". Conseguiu-se dominar a parte experimental (montagens e polimento de seções lúcidas, irradiação ao reator, medição dos traços ao microscópio) e o modelo utilizado para efetuar a reconstrução da história térmica das amostras de apatitas estudadas. Utilizou-se o modelo desenvolvido pela "escola australiana" e conhecido como AFTA (Apatite Fission Track Analysis), porém se fez uma leitura própria deste modelo. O programa computacional desenvolvido é original e já contém os aperfeiçoamentos do assim chamado "modelo inverso" proposto por Lutz e Omar, 1991.

Neste trabalho se datou e se estudou as histórias térmicas de 9 amostras de apatitas originadas de 3 regiões (craton do São Francisco, borda oriental da Bacia do Paraná e uma região situada entre o craton do São Francisco e a Bacia do Paraná).

As idades obtidas aqui (não se buscou minorar os erros associados a estas idades, já que datação não era o objetivo principal deste trabalho), via MTF, são consistentes com idades de mesmos locais obtidas por outros métodos radiométricos.

Quanto às histórias térmicas obtidas preferiu-se descrevê-las factualmente ao invés de se buscar interpretações geológicas, já. Analizando os dados se vê que medidas de gradiente geotérmico nas regiões estudadas seriam de grande valia para que as histórias térmicas aqui sugeridas pudessem ser melhor interpretadas,

geologicamente.

Analisando-se o modelo do ponto de vista estritamente metodológico, este parece ser promissor. As histórias térmicas de amostras da mesma região são concordantes (craton do São Francisco e Jacupiranga) e quando isto não ocorre, resultados sugestivos são observados. As 4 amostras de Tapira e Catalão indicam 2 histórias térmicas diferentes. Uma para 3 medidas (TA-1, C3D1(329) e C3D1(66)) e outra para 2 medidas (Taff1, C3B2(128)). Porém a concordância das 5 histórias térmicas ainda não pode ser totalmente descartada, como foi visto utilizando-se a 4ª restrição.

Acreditamos que a análise de outras amostras (com vínculos geológicos com as estudadas neste trabalho e em localidades onde o gradiente geotérmico é conhecido) é necessária para que nossos resultados forneçam informações mais precisas sobre a termocronologia das regiões estudadas. Este estudo está nos planos futuros do grupo de cronologia da UNICAMP. Porém, os resultados obtidos parecem bastante apropriados dentro de uma etapa inicial de um estudo mais amplo que pretendemos realizar sobre o annealing de traços de fissão em apatitas.

Apêndice I: Programa computacional utilizado.

Abaixo está mostrado o programa computacional (em Quick Basic) utilizado neste trabalho.

```

' *****
' ***          PROGRAMA LUTZ.BAS          ***
' ***
' ***  OBJETIVO: Atraves do histograma experimental do comprimento  ***
' ***                de tracos, obter historias termicas compatíveis  ***
' ***                utilizando o metodo de Lutz e Omar.              ***
' *****

DIM TEMPO(102)
DIM TEMPER(102)
DIM TMED(1002)
DIM REG(1002)
DIM TRPITV(102)
DIM HISTDAT(102)
DIM LEXP(102)
DIM NEXP(102)
DIM HDATEXP(130)
DIM PP(22, 22)
DIM YY(25)
DIM PR(22)
DIM PRR(22)
DIM PBAR(22)

DIM TPOREG1(12)
DIM TPOREG2(12)
DIM TPAREG1(12)
DIM TPAREG2(12)

DIM TPOBOM(102, 15)
DIM TPABOA(102, 15)

C1 = -28.12
C2 = 4.87
C3 = .000168
C4 = 2.7
C5 = .35

CLS
LOCATE 10, 1
PRINT "Modo de video: 1 = CGA; 2 = VGA"
LOCATE 12, 1
INPUT "Entre com a opcao desejada: ", VMODO
CLS
LOCATE 10, 1
INPUT "Entre com a idade da amostra (MA): ", IDADE
LOCATE 12, 1
INPUT "Entre com a idade aparente da amostra (MA): ", IDADEAP
LOCATE 14, 1
INPUT "Entre com o erro da idade aparente (MA): ", ERRIDADEAP

LOCATE 16, 1
INPUT "Entre com a temperatura atual (°C): ", THOJE
LOCATE 18, 1
INPUT "Entre com l0 (microns): ", l0
LOCATE 20, 1
INPUT "Entre com o maior valor na escala de tempo: ", TMAXIM
```

100 LOCATE 15, 1: INPUT "Entre com o nome do arquivo de dados experimentais:
", c\$

```

ON ERROR GOTO 4000
OPEN c$ FOR INPUT AS #1
I = 1
DMIN = 100
NEXPMAX = 0
NTR = 0
DO WHILE NOT EOF(1)
  INPUT #1, LEXP(I), NEXP(I)
  PRINT LEXP(I); NEXP(I)
  *$ = INPUT$(1)
  NTR = NTR + NEXP(I)
  IF NEXP(I) > NEXPMAX THEN NEXPMAX = NEXP(I)
  DIF = ABS(LEXP(I) - LEXP(I - 1))
  I = I + 1
  IF DIF <= DMIN AND DIF <> 0 THEN DMIN = DIF
LOOP
CLOSE #1
NDAT = I - 1
DL = DMIN
IND1 = INT(LEXP(1) / DL)
FOR I = 1 TO NDAT
  HDATEXP(I + IND1) = NEXP(I)
NEXT I

```

TFECH = 150'Temperatura de fechamento (graus C)
NMAX = 40'Numero maximo de tracos no histograma
LO = Tamanho (em microns) do traco que nao sofreu fading
LMAX = 20'Maior valor (em microns) do histograma

```

FOR K = 1 TO 20
  PP(2, K) = TFECH
  PP(3, K) = 20
NEXT K

```

```

IF VMODO = 2 THEN
  XTMAX = 640: YTMAX = 480
  CLS : SCREEN 12: WIDTH 80, 60
  LOCATE YTMAX / 30, 1: PRINT "T(°C)"
  LOCATE YTMAX / 14, XTMAX / 30: PRINT "t(MA)"
  LOCATE YTMAX / 30, 46: PRINT "N"
  LOCATE YTMAX / 14, XTMAX / 30 + 40: PRINT "L(fm)"
  cor = 15: TICX = 5: TICY = 5
  LOCATE YTMAX / 15, 7: PRINT TMAXIM
  LOCATE YTMAX / 15, 40: PRINT "0"
  LOCATE 30, 4: PRINT TFECH
  LOCATE 2, 7: PRINT "0"
  LOCATE YTMAX / 15, 49: PRINT "0"
  LOCATE YTMAX / 15, 77: PRINT LMAX
  LOCATE 30, 47: PRINT "0"
  LOCATE 2, 45: PRINT NMAX
  MAXLIN = 60

```

```

LOCATE 1, 10
IF OPC = 1 THEN
  PRINT "Conv = chi-q."
ELSE PRINT "Conv = G"
END IF

```

VIEW PRINT 37 TO MAXLIN

```

ELSE
  XTMAX = 640: YTMAX = 200
  CLS : SCREEN 2
  LOCATE YTMAX / 30, 1: PRINT "T(°C)"
  LOCATE YTMAX / 14, XTMAX / 30: PRINT "t(MA)"
  LOCATE YTMAX / 30, 46: PRINT "N"
  LOCATE YTMAX / 14, XTMAX / 30 + 40: PRINT "L(fm)"
  cor = 1: TICX = 4: TICY = 2
  LOCATE YTMAX / 14, 7: PRINT TMAXIM
  LOCATE YTMAX / 14, 40: PRINT "0"
  LOCATE 13, 4: PRINT TFECH
  LOCATE 2, 7: PRINT "0"

```

```

LOCATE YTMAX / 14, 49: PRINT "0"
LOCATE YTMAX / 14, 77: PRINT LMAX
LOCATE 13, 47: PRINT "0"
LOCATE 2, 45: PRINT NMAX
MAXLIN = 25

```

```

LOCATE 1, 10
IF OPC = 1 THEN
PRINT "Conv = chi-q."
ELSE PRINT "Conv = G"
END IF

```

```

VIEW PRINT 16 TO MAXLIN

```

```

END IF
XGFMIN = XTMAX / 2 + 65
XGFMAX = XTMAX - 6
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXB = (XGFMAX - XGFMIN) / LMAX
ESCYB = (YGFMAX - YGFMIN) / NMAX
GOSUB 1000

```

```

XGFMIN = XTMAX / 10
XGFMAX = XTMAX / 2 - 10
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXA = (XGFMAX - XGFMIN) / (TMAXIM)
ESCYA = (YGFMAX - YGFMIN) / TFECH
GOSUB 1000

```

'Plotando o histograma dos dados experimentais:

```

XGFMIN = XTMAX / 2 + 65
XGFMAX = XTMAX - 6
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXB = (XGFMAX - XGFMIN) / LMAX
ESCYB = (YGFMAX - YGFMIN) / NMAX
NITVH = INT(LO / DL)
DELTA XT = (XGFMAX - XGFMIN) * LO / (NITVH * LMAX)

```

```

YTANT = YGFMAX
FOR I = 1 TO INT(NITVH * LMAX / LO)
XTATUAL = XGFMIN + (I - 1) * DELTA XT
YTATUAL = YGFMAX - HDATEXP(I) * ESCYB
LINE (XTATUAL, YTANT)-(XTATUAL, YTATUAL)
LINE (XTATUAL, YTATUAL)-(XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL)
YTANT = YTATUAL
NEXT I
LINE (XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL)-(XTATUAL + DELTA XT, YGFMAX)

```

```

LOCATE MAXLIN, 3: PRINT
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "Em quantos intervalos a historia term. deve ser
dividida? ", NINTERV
IF NINTERV > 1000 THEN
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Maximo 1000 intervalos "
NINTERV = 1000
END IF

```

```

CONT = 1

```

200 ' DEFINE-SE A HISTORIA TERMICA SUBDIVIDINDO A IDADE EM SUBINTERVALOS

```

IF CONT <= 1 THEN GOTO 210
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Historia termica esta prestes a ser novamente s
ubdividida"
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Continua (S/N) ?"
a$ = INPUT$(1)
IF a$ = "n" OR a$ = "N" THEN GOTO 300

```

```

210 DL = DMIN
FOR K = 1 TO 20
PP(2, K) = TFECH
PP(3, K) = 20
NEXT K

```



```

CONT = CONT + 1
TEMPO(CONT) = 0
TEMPER(CONT) = THOJE
IF CONT > 20 THEN
    LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
    LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Dados incompatíveis com qualquer histor
ia termica"
    GOTO 500
END IF

300 ' DEFINE REGIOES PARA METODO DE MONTE CARLO:

I = 0
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Vamos definir as regioes para metodo de Monte C
arlo:"
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
301 I = I + 1
IF I > 10 THEN
    LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
    LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Maximo 10 regioes!"
    GOTO 310
END IF
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Canto superior esquerdo da"; I; "& regioe:"
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "TEMPO (MA) = "; TPOREG1(I)
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "TEMPERATURA (°C) = "; TPAREG1(I)
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Canto inferior direito da"; I; "& regioe:"
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "TEMPO (MA) = "; TPOREG2(I)
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "TEMPERATURA (°C) = "; TPAREG2(I)
cor = 15: GOSUB 1500 'Desenha regioe
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Continua (S/N) ou descarta ultima regioe (D) ?"
a$ = INPUT$(1)
IF a$ = "d" OR a$ = "D" THEN cor = 0: GOSUB 1500 'Desenha regioe
IF a$ = "s" OR a$ = "S" THEN GOTO 301
IF a$ = "d" OR a$ = "D" THEN I = I - 1: GOTO 301

310 'Sorteio de Monte Carlo:

LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: INPUT "Quantas historias termicas devem ser sorteadas
?", NUMHIST

LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Sorteando e verificando historias termicas..."
CONT = I + 1
CNT = CONT
TEMPO(CONT) = 0
TEMPER(CONT) = THOJE

NHTBOAS = 0
FOR TK = 1 TO NUMHIST
    'RANDOMIZE TIMER
    FOR W = 1 TO CNT - 1
        RANDOMIZE TIMER
        TEMPO(W) = TPOREG2(W) + RND * (TPOREG1(W) - TPOREG2(W))
        TEMPER(W) = TPAREG1(W) + RND * (TPAREG2(W) - TPAREG1(W))
    NEXT W
    GOSUB 1300
    GOSUB 10000
    IF IDAPTED <= IDADEAP + 2 * ERRIDADEAP AND IDAPTED >= IDADEAP -
2 * ERRIDADEAP THEN
        IF QUIQ# > CHIMIN AND QUIQ# < CHIMAX THEN
            NHTBOAS = NHTBOAS + 1
            'GOSUB 1700
            FOR ABC = 1 TO CNT
                TPOBOM(NHTBOAS, ABC) = TEMPO(ABC)
                TPABOA(NHTBOAS, ABC) = TEMPER(ABC)
            NEXT ABC

```

```

        END IF
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT TK
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Historias compativeis = "; NHTBOAS
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "CHIQ = "; QUIQ#
'a$ = INPUT$(1)
NEXT TK

```

```

a$ = INPUT$(1)
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Plotando hist.termicas compativeis com os dados
experimentais..."

```

```

XGFMIN = XTMAX / 10
XGFMAX = XTMAX / 2 - 10
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
LINE (XGFMIN + 1, YGFMIN + 1)-(XGFMAX - 1, YGFMAX - 1), 0, BF
GOSUB 1000

```

```

OPC = 10
FOR F = 1 TO NHTBOAS
FOR W = 1 TO CNT
    TEMPO(W) = TPOBOM(F, W)
    TEMPER(W) = TPABOA(F, W)
NEXT W
GOSUB 1300
NEXT F

```

```

a$ = INPUT$(1)
cor = 15
OPC = 1
FOR I = 1 TO CNT
GOSUB 1500
NEXT I

```

```

500 a$ = INPUT$(1)
END

```

```

1000 'SUB-ROTINA PARA CONFECCAO DE GRAFICO
LINE (XGFMIN, YGFMIN)-(XGFMAX, YGFMAX), cor, B
DX = (XGFMAX - XGFMIN) / 10
DY = (YGFMAX - YGFMIN) / 10
FOR I = 1 TO 10
    LINE (XGFMIN, YGFMIN + I * DY)-(XGFMIN + TICX, YGFMIN + I * DY)
    LINE (XGFMAX, YGFMIN + I * DY)-(XGFMAX - TICX, YGFMIN + I * DY)
    LINE (XGFMIN + I * DX, YGFMIN)-(XGFMIN + I * DX, YGFMIN + TICY)
    LINE (XGFMIN + I * DX, YGFMAX)-(XGFMIN + I * DX, YGFMAX - TICY)
NEXT I
LINE (XGFMIN, YGFMIN + 5 * DY)-(XGFMIN + TICX + 2, YGFMIN + 5 *
DY)
LINE (XGFMAX, YGFMIN + 5 * DY)-(XGFMAX - TICX - 2, YGFMIN + 5 *
DY)
LINE (XGFMIN + 5 * DX, YGFMIN)-(XGFMIN + 5 * DX, YGFMIN + TICY +
2)
LINE (XGFMIN + 5 * DX, YGFMAX)-(XGFMIN + 5 * DX, YGFMAX - TICY -
2)

RETURN

```

```

1300 ' Plota a historia termica:

LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Divisooes = "; CNT - 1
FOR M = 1 TO CNT
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "TEMPO("; M; ") = "; TEMPO(M)
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "TEMPER("; M; ") = "; TEMPER(M)
NEXT M
'a$ = INPUT$(1)
XGFMIN = XTMAX / 10
XGFMAX = XTMAX / 2 - 10
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXA = (XGFMAX - XGFMIN) / (TMAXIM)
ESCYA = (YGFMAX - YGFMIN) / TFECH

```

```

, 0, BF
GOSUB 1000
FOR I = 2 TO CNT
    LINE (XGFMAX - TEMPO(I - 1) * ESCXA, YGFMIN + TEMPER(I - 1) * ESCYA)-(XGFMAX - TEMPO(I) * ESCXA, YGFMIN + TEMPER(I) * ESCYA)
    NEXT I

RETURN

1500 'Desenha regio no grafico da historia termica

XGFMIN = XTMAX / 10
XGFMAX = XTMAX / 2 - 10
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXA = (XGFMAX - XGFMIN) / (TMAXIM)
ESCYA = (YGFMAX - YGFMIN) / TFECH
LINE (XGFMAX - TPOREG1(I) * ESCXA, YGFMIN + TPAREG1(I) * ESCYA)-(XGFMAX - TPOREG2(I) * ESCXA, YGFMIN + TPAREG2(I) * ESCYA), cor, B
RETURN

1700 'Salva historias termicas compativéis com os dados experimentais:

FOR C1 = 1 TO CNT
    TPOBOM(NHTBOAS, C1) = TEMPO(C1)
    TPABOA(NHTBOAS, C1) = TEMPER(C1)
NEXT C1

RETURN

2000 'Dado temperatura (TPRATUAL) e tempo (TPOATUAL), calcula r
    ri = 0: rf = 1
    Intatual = LOG(TPOATUAL) + 31.0828
    FOR Z = 1 TO 20
        rm = (rf + ri) / 2
        gr = (((1 - rm ^ C4) / C4) ^ C5 - 1) / C5
        Int = C1 + ((gr + C2) / C3) / TPRATUAL
        IF Int > Intatual THEN
            ri = rm
        ELSE
            rf = rm
        END IF
    NEXT Z
    ratual = rm
RETURN

3000 'Traca linha pontilhada vertical
    IF YTANT2 < YTATUAL2 THEN
        KMIN = YTANT2: KMAX = YTATUAL2
    ELSE
        KMIN = YTATUAL2: KMAX = YTANT2
    END IF
    FOR K = KMIN TO KMAX
        IF K MOD 2 = 0 THEN PSET (XTATUAL, K)
    NEXT K
RETURN

3010 'Traca linha pontilhada horizontal
    FOR K = XTATUAL TO XTATUAL + DELTAXT
        IF K MOD 2 = 0 THEN PSET (K, YTATUAL2)
    NEXT K
RETURN

4000 'Erro de leitura de arquivo: arquivo nao encontrado

    IF ERR = 53 THEN
        LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
        LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Arquivo "; c$; " nao encontrado"
        RESUME 100
    ELSE
        RESUME NEXT
    END IF

4020 'Erro de leitura de arquivo: arquivo nao encontrado

    IF ERR = 53 THEN
        LOCATE MAXLIN, 3: PRINT ""
        LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Arquivo CHIQ.DAT nao encontrado"
        RESUME 500
    ELSE
        RESUME NEXT
    END IF

```

```

'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Aguarde... "
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Calculando a temperatura media em cada interva
10... "
DELTAT = (TEMPO(1) - TEMPO(CONT)) / NINTERV
DT2 = DELTAT / 10
FOR I = 1 TO NINTERV
TMI = 0
FOR J = 1 TO 10
TATUAL = TEMPO(I) - (I - 1) * DELTAT - (J - 1) * DT2
FOR K = 1 TO CONT
IF TATUAL > TEMPO(K) THEN MEM = K: K = CONT
NEXT K
IF TEMPER(MEM) = TEMPER(MEM - 1) THEN
TMI = TEMPER(MEM)
ELSE
AA = (TEMPO(MEM) - TEMPO(MEM - 1)) / (TEMPER(MEM) - TEMP
ER(MEM - 1))
BB = TEMPO(MEM) - AA * TEMPER(MEM)
TMI = TMI + (TATUAL - BB) / AA
END IF
NEXT J
TMED(I) = (TMI / 10) + 273.15 'Temperatura em graus Kelvin
NEXT I

'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Aguarde... "
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Calculando a reducao dos comprimentos dos trac
05... "
GOTO 10010

10010 ' incluindo formula para r:
DJ = 0
FOR I = 1 TO NINTERV 'Tracos latentes formados em cada intervalo
TPOATUAL = DELTAT
TPRATUAL = TMED(I)
ratural = (1! - 2.7 * (1! + .35 * (-4.87 + .000168 * TMED(I)) * (31.0822 +
LOG(TPOATUAL) + 28.12))) ^ 2.857) ^ .37
'GOSUB 2000
LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "ratural = "; ratural
a$ = INPUT$(1)

FOR J = I TO NINTERV - 1 'Reducao do traco calculado intervalo por inter
valo
'usando o conceito de tempo equivalente

qr = (((1 - ratural ^ C4) / C4) ^ C5 - 1) / C5
Inteq = C1 + ((qr + C2) / C3) / TMED(J + 1) - 31.0822/31.08 = co
nversao ln tempo em MA para segundos
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Inteq = "; Inteq
a$ = INPUT$(1)
IF Inteq < 80 AND Inteq > -80 THEN tq = EXP(Inteq)
IF Inteq < -80 THEN tq = 0
IF Inteq > 80 THEN tq = 10 ^ 20
TPOATUAL = tq + DELTAT
TPRATUAL = TMED(J + 1)
'GOSUB 2000
fator = (-4.87 + .000168 * TMED(J + 1)) * (31.0822 + LOG(TPOATUAL
) + 28.12))
IF fator < 0 THEN fator = 0
fator2 = (1! - 2.7 * (1! + .35 * (fator)) ^ 2.857)
IF fator2 < 0 THEN fator2 = 0
ratural = (fator2) ^ .37
NEXT J
REQ(I) = ratural
REQ(I) = ratural
IF REQ(I) <= .35 THEN DJI = 0
IF REQ(I) > .35 AND REQ(I) <= .66 THEN DJI = 2.15 * REQ(I) - .76
IF REQ(I) > .66 AND REQ(I) <= 1 THEN DJI = REQ(I)
DJ = DJ + DJI

'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "REQ("; I; ") = "; REQ(I)
a$ = INPUT$(1)
NEXT I
IDAPTEO = DJ * IDADE / NINTERV
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Id.ap.teo = "; IDAPTEO
a$ = INPUT$(1)

```

```
IF PLOTA <> 1 THEN GOTO 11000
```

```
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "  
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Aguarde... "  
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Refazendo histograma... "
```

```
XGFMIN = XTMAX / 2 + 65  
XGFMAX = XTMAX - 6  
YGFMIN = 10  
YGFMAX = YTMAX / 2  
LINE (XGFMIN + 1, YGFMIN + 1)-(XGFMAX - 1, YGFMAX - 1), 0, BF  
GOSUB 1000
```

```
NMAX = INT(NEXPMAX / 10 + 1) * 10
```

```
VIEW PRINT 1 TO MAXLIN
```

```
LOCATE 2, 45: PRINT NMAX
```

```
IF VMODD = 2 THEN
```

```
LINE (XGFMAX - 50, YGFMIN + 16)-(XGFMAX - 30, YGFMIN + 16), 12  
LINE (XGFMAX - 50, YGFMIN + 33)-(XGFMAX - 30, YGFMIN + 33), 14  
LOCATE 5, 75: PRINT "Teo."  
LOCATE 3, 75: PRINT "Exp."  
VIEW PRINT 40 TO MAXLIN
```

```
ELSE
```

```
LINE (XGFMAX - 15, YGFMIN + 16)-(XGFMAX - 40, YGFMIN + 16), 1  
YTATUAL2 = YGFMIN + 33  
XTATUAL = XGFMAX - 40  
DELTA = 25  
GOSUB 3010  
LOCATE 3, 76: PRINT "Teo"  
LOCATE 5, 76: PRINT "Exp"  
VIEW PRINT 18 TO MAXLIN
```

```
END IF
```

```
11000 NITVH = INT(LO / DMIN)
```

```
'Calculando numero de tracos por intervalo:
```

```
DL = 1! / NITVH
```

```
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
```

```
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "NITVH = "; NITVH
```

```
FOR I = 1 TO NITVH
```

```
TRPITV(I) = 0
```

```
FOR J = 1 TO NINTERV
```

```
IF REQ(J) <= I * DL AND REQ(J) > (I - 1) * DL THEN TRPITV(I) = T
```

```
RPITV(I) + 1
```

```
NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
'Calculando dados do histograma:
```

```
VALORMAX = 0
```

```
INDMAX = 0
```

```
FOR I = 1 TO NITVH 'Intervalos de tamanho DL
```

```
ri = (I - .5) / NITVH
```

```
IF ri > 0 AND ri <= .43 THEN hh = 3! / LO
```

```
IF ri > .43 AND ri <= .68 THEN hh = (6.5 - 8.1 * ri) / LO
```

```
IF ri > .68 AND ri <= 1 THEN hh = (1.32 - .47 * ri) / LO
```

```
rimax = ri + 4 * hh; rimin = ri - 4 * hh
```

```
JMAX = INT(10 * (NITVH * rimax + .5))
```

```
JMIN = INT(10 * (NITVH * rimin + .5))
```

```
IF JMAX > 10 * NITVH * LMAX / LO THEN JMAX = INT(10 * NITVH * LM
```

```
AX / LO)
```

```
IF JMIN < 0 THEN JMIN = 0
```

```
FOR J = JMIN TO JMAX 'Intervalos de tamanho DL/10; J = 10*I
```

```
rj = (J - .5) / (10 * NITVH)
```

```
xx = (ri - rj) / hh
```

```
kk = (EXP(-(xx ^ 2) / 2)) / hh
```

```
INDICE = INT((J / 10))
```

```
IF INDICE > INDMAX THEN INDMAX = INDICE
```

```
HISTDAT(INDICE) = HISTDAT(INDICE) + TRPITV(I) * kk
```

```
IF HISTDAT(INDICE) > VALORMAX THEN VALORMAX = HISTDAT(INDICE)
```

```
NEXT J
```

```
NEXT I
```

```
'Normalizando distribuicao de tamanho de tracos:
```

```

NTRTEO = 0
FOR I = 1 TO INDMAX + 1
  NTRTEO = NTRTEO + HISTDAT(I)
NEXT I
SPARAMED = 0
FOR I = 1 TO INDMAX + 1
  HISTDAT(I) = HISTDAT(I) * NTR / NTRTEO
NEXT I

```

'Plotando o histograma:

```

XGFMIN = XTMAX / 2 + 65
XGFMAX = XTMAX - 6
YGFMIN = 10
YGFMAX = YTMAX / 2
ESCXB = (XGFMAX - XGFMIN) / LMAX
ESCYB = (YGFMAX - YGFMIN) / NMAX
DELTA XT = (XGFMAX - XGFMIN) * LO / (NITVH * LMAX)

```

```

YTANT = YGFMAX
YTANT2 = YGFMAX
QUIQ# = 0
MAXDIF = 0
NMAIS = 0
GG# = 0

```

```

FOR Z = 1 TO INT(NITVH * LMAX / LO)
  IF PLOTA <> 1 THEN GOTO 12000
  XTATUAL = XGFMIN + (Z - 1) * DELTA XT
  YTATUAL = YGFMAX - HISTDAT(Z) * ESCYB
  IF YTATUAL < YGFMIN THEN YTATUAL = YGFMIN
  LINE (XTATUAL, YTANT)-(XTATUAL, YTATUAL), 14
  LINE (XTATUAL, YTATUAL)-(XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL), 14
  YTANT = YTATUAL
  YTATUAL2 = YGFMAX - HDATEXP(Z) * ESCYB
  IF VMOOD = 2 THEN
    LINE (XTATUAL, YTANT2)-(XTATUAL, YTATUAL2), 12
    LINE (XTATUAL, YTATUAL2)-(XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL2),

```

12

ELSE

```

  GOSUB 3000 'Traca linhas pontilhadas verticais
  GOSUB 3010 'Traca linhas pontilhadas horizontais

```

END IF

YTANT2 = YTATUAL2

'a\$ = INPUT\$(1)

12000

```

  IF HDATEXP(Z) > 0 THEN
    NMAIS = NMAIS + 1
    DIF = ABS(HDATEXP(Z) - HISTDAT(Z))
    IF MAXDIF < DIF THEN MAXDIF = DIF
    GG# = GG# + DIF ^ 2
    IF HISTDAT(Z) > 0 THEN QUIQ# = QUIQ# + (DIF ^ 2) / HISTD
    'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "Z = "; Z; "HISTDAT = "; HISTDA
    'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "QUIQ = "; QUIQ#
    'a$ = INPUT$(1)
  END IF

```

AT(Z)

T(Z)

NEXT Z

```

QUIQ# = QUIQ# / (NMAIS - 1) 'QUI-QUADRADO REDUZIDO
KS = MAXDIF / NMAIS 'KOLMOGOROV-SMIRNOV
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "GG = "; GG#
'a$ = INPUT$(1)
GG# = SQR(GG# / NMAIS)
IF PLOTA = 1 THEN
  LINE (XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL)-(XTATUAL + DELTA XT, YGFMAX), 14
  LINE (XTATUAL + DELTA XT, YTATUAL2)-(XTATUAL + DELTA XT, YGFMAX), 12
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "n+ = "; NMAIS
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "CHI-QUADRADO REDUZIDO = "; QUIQ#
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT " "
  'LOCATE MAXLIN, 3: PRINT "K-S = "; KS
END IF

```

RETURN

REFERÊNCIAS

Arne, D.C.(1992). Evidence from apatite fission track analysis for regional Cretaceous cooling in the Ouachita Mountain fold belt and Arkoma basin of Arkansas. Am. Assoc. Pet. Geol., Bull., 76: 392-402

Arne, D.C., P.F. Green and I.R. Duddy (1990). Thermochronologic constraints on the timing of Mississippi Valley - type ore formation from apatite fission track analysis. Nucl. Tracks Radiat. Measurements, 17: 319-323

Bertagnolli, E. Märk, E. Bertel, M. Pahl and T.D. Märk (1981). Determination of palaeotemperatures of apatite with the fission-track Method. Nucl. Tracks, vol 5 nos. 1/2, pp. 175-180.

Bertel, E. and T.D. Märk (1983). Fission tracks in minerals: annealing kinetics, track structure and age correction. Phys. Chem. Miner. 9:197-204.

Bevington, P.R. (1969). Data reduction and error analysis for the physical Sciences. Mc Graw-Hill, New York.

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

Bigazzi, G., J.C. Hadler and A.M. Osorio A.(1988). On Shukolyukov equation for the fading of fission tracks in minerals, Nuclear Tracks and Radiation Measurements, vol. 15, n° 1-4, pp.707-710.

Bigazzi, G., J.C.Hadler, P.J. Iunes and A.M. Osorio A. (1991) Fission track D_0/D_1 measurement in artificial glass at conditions free from fading and radiation. Nuclear Instruments and Methods, B 53: 67-70.

Brown, R.W. and P.F. Green (1991). Discussion on thermal and tectonic history of the East Midlands shelf (onshore UK) and surrounding regions assessed by apatite fission track analysis (discussion and reply).J. Geol. Soc., London, 148: 785-787.

Corrigan J.D. (1993). Apatite fission track analysis of Oligocene strata in South Texas, U.S.A.: Testing annealing models, Chemical geology(Isotope Geoscience Section),104,227-249

Cowan, G.A. and H.H. Adler (1976). The variability of the natural abundance of U-235. *Geochim. Cosmochim. Actas*, 40: 1487-1490.

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

Crowley, K.D., M. Cameron, and R.L. Shaefer (1991). Experimental studies of annealing of etched fission tracks in fluorapatite. *Geoch. Cosmoch. Vol 55* pp.1449-1465.

Dakowski M., J. Burchart and J. Galazca (1974). Experimental formula for thermal fading of fission tracks in minerals and Natural Glasses. *Science de la terra. vol XXII, n° 1.*

Dartyge, E., J.P. Durand, Y. Langevin and M. Maurtte (1978). A new method of investigating the past activity of ancient solar flare cosmic rays over a time scale of a few billion years. *Proc. 9th Lunar Planet. Sci. Cont.*, pp.2375-2398.

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

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

Etniman, H., F.B. Lambert, I. Buchhorn, S. Chann and G. C. Murphy (1984). Research into diagenetic and mineralising processes, Lennard shelf keef Complexes, W.A. In: P.G. Purcell (Editor), the Canning Basin, W.A. Proc. of Geol. Soc. Aust.-Pet. Explor. Soc. Aust. Symp., Perth, W.A., 1984, pp.447-453.

Fitzgerald, P.G. and A.J.W. Gleadow (1990). New approaches in fission track geochronology as a tectonic tool: examples from the Transantartic Mountains. Nucl. Tracks Radiat. Meas, 17: 351-357

Fleisher, R.L. and P. B. Price (1963). Charged particle tracks in glass. Journal of Applied Physics, 34, 2903-2904.

Fleisher, R.L. , P.B. Price and R. M. Walker (1975). Nuclear Tracks in solids: Principles and applications. University of California Press, Berkeley, California, 605p.

Giegegack, R., G.I. Omar, T.M. Lutz and K.R. Johnson (1990). Tectono-thermal history by fission-track analysis of the Bighorn Basin and adjacent highlands, Montana-Wyoming. Nucl. Tracks Radiat.Meas. 17: 412-413.

Gleadow, A.J.W. (1981). Fission-track Dating Methods: What are the real alternatives?. Nucl. Tracks, 5, 3-14

Gleadow, A.J.W., I.R. Duddy and J.F. Lovering (1983). Fission track analysis: a new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potencial. APEA (Aust. Pet. Explor. Ass.) J., 23: 93-102.

Gomes, C.B., E. Ruberti and L. Morbidelli (1990). Carbonatite complexes from Brazil: A review. Journal of South American Earth Sciences, Vol 3. N.1, 51-63.

Goswami, J.N., R. Jha and D. Lal (1984). Quantitative treatment of annealing of charged particle tracks in common rock minerals. Earth. Planet. Sci. Lett., 71:120-128.

Green, P.F. (1981). "Track-in-track" length measurements in annealed apatites. Nucl. Tracks, 5: 121-128.

Green, P.F. (1988). The relationship between track shortening and fission track age reduction in apatite: Combined influence of inherent instability, annealing anisotropy, length bias and system calibration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 89, 335-352.

Green, P.F. (1989). Thermal and tectonic history of the East Midlands shelf (onshore UK) and surrounding regions assessed by apatite fission track analysis. *J. Geol. Soc., London*, 146: 755-773.

Green, P.F., and S.A. Durrani (1977). Annealing studies of tracks in crystals. *Nucl. Tracks*, 1:33-39.

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

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

Haack U. (1972). Systematics in the Fission Track Annealing of Minerals. Congr. Mineralogy Heidelberg, 1-10.

Hadler, J.C., P.J. Iunes, E.P. Oliveira, A.M. Osório A., S.R. Paulo and C.A.Tello S. (1993). Thermal history of copper-bearing rocks from Caraiba mine, Brazil: preliminary results from fission track analysis. Expanded Abstract of 3th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Vol.2, 845-850.

Hammerschmidt, K., G.A. Wagner and M. Wagner (1984). Radiometric dating on research drill Core Urach. III: a contribution to its geothermical history. J. Geophys., 54:97-105.

Hamza, V.M., A.Frangipani, E.A. Becker and J.A. Mioto (1989). Mapas geotermiais do Brasil. Relatório interno do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil, IPT N. 27069.

Hannah, G.C., C.H. Wescott, H.D. Lemmel and B.R. Leonard (1969). Revision of values for the 2200 m/s neutron constants for four fissile nuclides, Gen. Electr. Co. (G.E.C.), At. Energy Rev., 7, 3-92

Hansen, K. (1992). Post-Orogenic tectonic and thermal history of a rifted continental margin: The Scoresby Sund area,

Hegarty, K.A. (1985). Origin and evolution of selected plate boundaries. Ph.D. Thesis, Columbia University, New York, N.Y., 255 pp.

Hegarty, K.A., J.K. Weissel and J.C. Mutter (1988). Subsidence history of Austria Southern Margin: on basis Models. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 72: 615-633.

Jaffey, A.H., K.F. Flynn, L.E. Glendenin, W.C. Bentley and A.M. Essling (1971). Precision measurements of the half-lives and specific activities of U-235 and U-238. Phys. Rev., 4: 1889-1906.

Kamp, P.J.J. and P.F. Green (1990). Thermal and tectonic history of Selected Taranaki Basin (New Zealand) Wells Assessed by apatite Fission Track Analysis. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin v.74, no.9. P.1401-1419.

Kamp, P.J.J., P.F. Green and J.M. Tippet (1992). Tectonic architecture of the mountain front-foreland basin transition, South Island, New Zealand, assessed by fission track analysis. *Tectonics*, 11:98-113.

Kantsler, A.J., G.C. Smith and A.C. Cook (1978). Lateral and vertical rank variation: Implications for hydrocarbon exploration. *APEA Journal*, 18(1), 1430-156.

Koul, S.L. (1979). On the fission track dating and annealing behavior of accessory minerals of eastern shales (Andhra Pradesh, India). *Radiat. Effects*, 40:187-192.

Laslett, G.M., A.J.W. Gleadow and I.R. Duddy (1984). The relationship between fission track length and density in apatite. *Nucl. Tracks*, 9:29-38.

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

Lenharo, S.L.R. (1994). Caracterização mineralógica/tecnológica da apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato. Master Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brazil.

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

Mantovani, M.S.M.(1974). Variations of characteristics of fission tracks in muscovites by thermal effects. Earth Planet. Sci. Lett., 24, 311-316.

Märk, E., M.Pahl, F. Purtscheller and T. D. Märk (1973). Thermische ausheilung von uran-spatsparen in apatiten alterskonnektunen und beiträge zur geothermochomologie (thermal annealing of uranium tracks in apatite, age conections and implications for geothermochronology): Tshermaks Mineralogische un Petrographische Miheilungen, v.20, p. 131-154.

Murphy, J.M. and A. Bakke (1993). Low temperature thermal history of the Gilmore Dame area, Fairbanks Muning District, Alaska. Can. J. Earth Sci, 764-768.

Naeser, C.W. (1984). Fission track dating applied to mineral exploration. 4th Int. F.T.D. (Fission Track Dating), Work Shop, Trog, N.Y.

Naeser, C.W., and H. Faul (1969). Fission track annealing in apatite and sphene. Journal of Geophysical Research, 74, 705-10.

Nagpaul, K.K., P.P. Mchta and M.L. Gupta (1974). Annealing studies on radiation damage in biotite, apatite and sphene and corrections to fission track ages. Pure and Applied Geophysics, 112, 131-39.

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

Price, P.B. and R.M. Walker (1962b). Observation of charged particle tracks in solids. Journal of Applied Physics, 33, 3400-3406.

Price, P.B. and R.M. Walker (1962c). Chemical etching of charged particle tracks in solids. Journal of Applied Physics, 33, 34107-3412.

Price, P.B. and R.M. Walker (1962d). A new track detector for heavy particle studies. *Physics Letters*, 3, 113-115.

Price, P.B. and R.M. Walker (1963). Fossil tracks of charged particles in mica and the age of the minerals: *Journal of Geophysical Research*, v.68, n° 16, p. 4847-4862.

Roberts, J.H., R. Gold and R.J. Armani (1968). Spontaneous fission decay constant of U-238. *Phys. Rev.*, 174, 1482-1484.

Shreider, U.A. (1966). *The Monte Carlo Method*. Pergamon Press, New York.

Silva, A.B., G.S. Liberal, J.H. Grossi Sad, A. Issa Filho, C.S. Rodrigues and B.F. Riffel (1988). Geologia e petrologia do complexo Angico dos Dias (Bahia, Brasil), uma associação carbonatítica precambriana. *Geochimica Brasiliensis* 2, 81-108.

Storzer, D, and G.A. Wagner (1969). Correction of thermally lowered fission track ages of tektites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 5, 463-468.

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

Wagner, G.A., and Reimer (1972). Fission track tectonic: The tectonic interrelation of fission track apatite ages. Earth and Planetary Science Letters, 14, 263-68.

Wagner, G.A., and D. Storzer (1972). Fission track length reduction in minerals and the thermal history of rocks. Trans. Amer. Nucl. Soc. 15:117

Young, E.J., A.T Myers, E.L. Munson and N.M. Conklin (1969). Mineralogy and geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap., 850-D: D84-D93.