

ESBOÇO DA EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DA PARTE SUL DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO: UMA INTERPRETAÇÃO COM BASE NOS DADOS Rb-Sr, K-Ar, Pb-Pb E TRAÇOS DE FISSÃO

W. Teixeira (IG-USP), Ariadne do Carmo Fonseca (IG-UFRJ), G. Poupeau (CBPF/CNPq), A.V. Padilha (SEME-MG), L.H. Zaparolli (estagiário IGA/SECT/CPGeo), K. Kawashita (IG-USP) e Marília César Khoury (CNEN/SP)

ABSTRACT

The results obtained by Rb-Sr, K-Ar and Pb-Pb isotopic and fission-track dating methods in samples collected in the meridional region of the São Francisco Craton are discussed in this paper.

The Rb-Sr and Pb-Pb dates, in total rock, allowed determine the episodes of crustal accretion, with eventual remobilization of pre-existent crust, during the Later Archean (3000 - 2600 m.y.) and Early Proterozoic (2400 - 2100 m.y.).

Three principal periods of cooling time were determined by K-Ar dating in micas, amphiboles and total rocks to the cratonic margin: 2200 - 1700 m.y., 1300 - 1100 m.y. and 900 - 400 m.y. related to the superimposition of the Transamazonian, Uruaçuano and Brazilian Cycles, respectively.

The cooling below 100°C, detected by fission-track dating in apatites, dated to 850 m.y. in the internal areas and 550 m.y. in the peripheral areas of the cratonic region, showing the progressive action of the Brazilian marginal mobile belts.

The use of the methods allowed evaluate the cooling history of dated rocks. The cooling of these rocks was "complex" in the period from 2700 to 2200 m.y. and "slow" since 2000 m.y.

The integrated treatment of several dating methods showed the fundamental importance to the geotectonic evolution knowledge of ancient terrains.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os primeiros resultados de um estudo conjunto através de diferentes métodos de datação isotópica (Rb-Sr, K-Ar e Pb-Pb) e Traços de Fissão de amostras coletadas no Estado de Minas Gerais, com o intuito principal de contribuir na elucidação geotectônica do setor meridional do Cráton do São Francisco. Os estudos processados fazem parte da tese de doutoramento de um dos autores (Teixeira, 1985), sendo que os traços de fissão em apatitas referem-se ao trabalho de dissertação de mestrado de Ariadne do Carmo Fonseca (1985). A totalidade das determinações radiométricas Rb-Sr e K-Ar foi efetuada no Centro de Pesquisas Geocronológicas da USP, sendo parte deste conjunto relativo ao convênio firmado com o Instituto de Geologia Aplicada - IGA/SECT de Minas Gerais. Os dados Pb-Pb, por sua vez, foram obtidos em laboratórios da Universidade de Oxford através do convênio bilateral de cooperação científica internacional (Processo CNPq/British Council nº 10.810.012/82). A metodologia dos traços de fissão foi desenvolvida no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/CNPq).

VALOR INTERPRETATIVO DOS MÉTODOS DE DATAÇÃO

O potencial interpretativo da geocronologia tem sido demons-

trado pelo seu emprego sistemático desde a década passada (volumes do RA DAMBRASIL e textos das cartas ao milionésimo do DNPM). O tratamento integrado dos vários métodos de datação tem importância fundamental para o conhecimento da evolução de terrenos antigos de caráter policíclico (Teixeira, op. cit.), como é o caso da parte meridional do Cráton do São Francisco. As interpretações vinculadas a cada metodologia permitem esboçar os eventos geodinâmicos maiores ocorridos durante a evolução geológica regional, além de eventuais processos tectônicos desenvolvidos. A seguir são feitas breves considerações a respeito do significado das datações nos vários métodos utilizados.

Os métodos Rb-Sr e Pb-Pb em rocha total indicam, em geral, a época da diferenciação geoquímica-metamórfica dos materiais analisados, podendo caracterizar se o material é juvenil, isto é, incorporado à crosta no evento datado ou se é produto de retrabalhamento de rochas crustais anteriores. No método Rb-Sr um importante indicador sobre a origem do material analisado é a razão isotópica inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, obtida a partir do diagrama isocrônico, que pode definir se uma rocha originou-se por processos de diferenciação de material a partir do manto ou por processos de fusão do material crustal pré-existente (retrabalhamento crustal). No método Pb-Pb esta diferenciação é passível de identificação através do parâmetro μ_1 obtido na isócrona, comparativamente ao intervalo estimado desta relação para materiais gerados em diferentes épocas.

O método K-Ar fornece uma idade de resfriamento regional relativo ao último evento térmico importante da história geológica, de acordo com o mineral datado. O significado físico de uma idade K-Ar representa o momento a partir do qual a rede cristalina se estabilizou, a uma dada temperatura ("closing temperature"), não permitindo a difusão do Ar no mineral. A temperatura de retenção total do Ar varia de acordo com o espécime mineral, sendo da ordem de 4000 a 5000°C para os anfibólios e 2500 a 3000°C para as micas (Harrison et alii, 1980).

Através do método dos traços de fissão (TF) é possível avaliar o momento a partir do qual os traços formados pela fissão espontânea do ^{238}U se tornaram estáveis num mineral, produzindo em geral uma idade de resfriamento. O mineral escolhido foi apatita, em virtude de sua ubiquidade, teor conveniente de urânio e temperatura de "retenção dos traços" relativamente baixa, da ordem de $1200 \pm 200^\circ\text{C}$ (Wagner, 1968; Naefer and Faul, 1969). Sendo assim, a datação por traços de fissão em apatita indica a época na qual a rocha resfriou abaixo de 1100°C .

A aplicação dos métodos Pb-Pb, Rb-Sr, K-Ar e traços de fissão, com base no exposto acima, permite propor uma evolução geocronológica desde o primeiro evento formador de rocha, determinando os períodos de acreção e retrabalhamento crustais durante os eventos geológicos posteriores, até o resfriamento regional e estabilização tectônica da área em questão.

CONTEXTO GEOTECTÔNICO-GEOLÓGICO

Numa aproximação genérica o sul do Estado de Minas Gerais, geotectonicamente, compartimenta-se em três unidades: a porção sul do Cráton do São Francisco, a faixa "Araxá-Canastra" e o Cinturão Ribeira (Fig. 1).

O Cráton do São Francisco, localizado na porção centro-oriental da plataforma sul-americana, tem por limites as faixas móveis, envolvidas pelo evento Brasileiro, Riacho do Pontal e Rio Preto (noroeste), Serapiquíana (nordeste), Ribeira (sudeste-sul), "Araxá-Canastra" (sudeste) e Brasília (oeste).

O embasamento da unidade cratônica, exposto preferencialmente no centro-leste do Estado da Bahia e no centro-sul do Estado de Minas Gerais, constitui-se de terrenos "granito-greenstone" arqueanos - como os de Brumado-Anajé (BA) e Grupo Nova no Quadrilátero Ferrífero (MG) -, cinturões supracrustais do Proterozóico Inferior - sequências Jacobina e Contendas-Mirante (BA) e o Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero (MG) - e fragmentos de terrenos granulíticos intensamente granitizados no Proterozóico Inferior - Complexos Jequiê-Mutuipe e Santa Isabel (BA) (Cordani e Brito Neves, 1982). No Proterozóico Médio, ocorreu o desen-

volvimento do sistema intracratônico Espinhaço (Brito Neves et alii, 1979), cuja representação é dada pela sedimentação psamítica e pelítica do Supergrupo Espinhaço. Finalmente, no Proterozóico Superior desenvolveu-se ampla cobertura de plataforma representada pelos sedimentos dos Grupos Una e Bambuí.

A faixa "Araxá-Canastra" (designação informal) estende-se desde o Estado de Goiás até o Triângulo Mineiro (Fig. 1), estreitando-se para sudeste entre o Cráton do São Francisco e o Maciço Guaxupé (Almeida et alii, 1976). O embasamento da faixa é constituído por rochas granito-gnáissicas alojando localmente "greenstone belts" arqueanos como os de Piunhí (Fritzens Jr. et alii, 1980) e Fortaleza de Minas (Teixeira, 1978) recebendo em sua extremidade sudeste a denominação de Complexo Campos Gerais (um conjunto litológico heterogêneo de evolução complexa e policíclica, com idades referíveis aos ciclos Transamazônico, Uruaçuano e Brasileiro - Cavalcante et alii, 1979). Sua porção metassedimentar é representada pelos Grupos Araxá e Canastra. Equivalências com as unidades da faixa Ribeira - Grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia - têm sido sugeridas recentemente (Machado Fº et alii, 1984).

O Cinturão Ribeira, que ocorre com direção NE-SW ao longo da faixa costeira atlântica, é uma unidade brasileira (Proterozóico Superior) desenvolvida sobre substrato mais antigo de fácies anfibolito e granulito. O cinturão metamórfico, com polaridade voltada para o Cráton do São Francisco, registra importante tectônica de empurrão em seu limite ocidental, onde as sequências do Supergrupo Espinhaço recobrem os sedimentos do Grupo Bambuí, ao passo que em setores específicos o padrão NE-SW da faixa Ribeira superimpõe-se ao NW-SE da faixa "Araxá-Canastra". No tocante ao quadro geocronológico do Cinturão Ribeira registram-se valores uraçuanos e brasileiros para as rochas dos Grupos Andrelândia e São João del Rei, conforme pesquisas atualmente em andamento no Centro de Pesquisas Geocronológicas da USP.

O cenário geológico regional da área investigada (Fig. 2) é representado em maior parte por litologias típicas de embasamento de áreas cratônicas antigas, destacando-se no conjunto as associações arqueanas de rochas granito-gnáissicas de médio a alto grau metamórfico e os "greenstone belts", aqui denominados respectivamente Complexo Gnáissico-Migmatítico e Supergrupo Rio das Velhas indiferenciado. Ocorrem ainda no domínio em pauta, as extremidades ocidentais das sequências relacionadas ao Supergrupo Minas, o batólito intrusivo Porto Mendes e a cobertura platformatal Bambuí, que recobre o embasamento cratônico ao norte e ao oeste.

O Complexo Gnáissico-Migmatítico tem como conteúdo litológico granito-gnaisses e migmatitos comumente apresentando estruturas estromáticas e "schlieren", além de ocorrerem de forma subordinada dioritos, gnaisses bandados, gnaisses facoidais, anfibolitos, charnockitos, metabasitos, meta-ultrabasitos e corpos graníticos intrusivos. Este conjunto apresenta nuances com relação à composição mineralógica, variando entre termos tonalíticos, granodioríticos e graníticos, e no tocante ao fácies metamórfico predominando o metamorfismo de médio grau. Localmente variedades litológicas de fácies granulito são registradas (Cavalcante et alii, 1979; Machado Fº et alii, 1984; Teixeira, 1985).

O "greenstone" arqueano Rio das Velhas (ver, por exemplo, La deira et alii, 1983; Schorsch et alii, 1982) possui na área em pauta exposições mais importantes no norte-nordeste (região de Pitangui - Pará de Minas - Itatiaiuçu) onde constituem extensa faixa metassedimentar. Entretanto reliquias dessa supraestrutura ocorrem em grande parte da área, em especial nos setores central e sudeste (Fig. 2). Por outro lado, as litologias do Supergrupo Minas tem sido interpretadas segundo um modelo tectônico com base no desenvolvimento de uma bacia intracratônica de margem continental ativa ("rift") com posterior transporte e colocação por nappes (Schorsch, 1980). Trabalhos geocronológicos recentemente efetuados em rochas granitoides associadas à orogenia Minas tem ratificado sua idade transamazônica (Cordani et alii, 1980; Teixeira, 1985). Relativamente ao plutonismo intrusivo, merece destaque o Maciço de Porto Mendes, de natureza granítica, localizado na extremidade sudoeste da área e cuja idade é proterozóica inferior (Teixeira, op. cit.; Machado Fº et alii, 1984).

Finalmente, com relação às rochas do Grupo Bambuí, estão presentes na área investigada as extremidades das Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, aqui não individualizadas no esboço geológico da figura 2. A distribuição desses depósitos sedimentares pré-Cambrianos sob a forma de um grande arco tipifica uma feição de erosão regressiva da borda da bacia relativamente ao embasamento cratônico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo a ilustrar ao leitor o quadro geocronológico regional são aqui comentadas algumas das isócronas Rb-Sr e Pb-Pb em rocha total obtidas em recente estudo de Teixeira (1985), bem como o quadro esquemático referente às idades aparentes K-Ar do domínio meridional do Cráton do São Francisco.

Gnaisses de composição granítica-granodiorítica, cortados por intrusões aplíticas e veios quartzo-feldspáticos, ocorrem na região de Emeraldas-Cachoeira dos Macacos. Em diagrama isocrônico Rb-Sr de referência, dez amostras estudadas indicaram idade de 2803 ± 70 m.a. para razão inicial (RI) $0,700 \pm 0,001$ (Fig. 3). A razão inicial obtida implica numa origem primária para o granitóide, sendo que o MSWD relativamente elevado (da ordem de 3,37) era de certa forma separado face à amostragem referir-se a afloramentos da unidade distantes entre si de vários quilômetros. Por outro lado, as análises efetuadas em amostras dos aplitos situaram-se sobre a isócrona construída indicando que a colocação desses materiais deu-se em época tardia porém integrando-se temporalmente ao evento maior de acreção crustal.

Gnaisses de composição tonalítica, exibindo grau variável de migmatização, ocorrem mais ao sul, entre Itauna e Itatiaiuçu. Tais litologias apresentam-se, por vezes, seccionadas por diques pegmatóides com direções variadas. A isócrona de referência Rb-Sr construída (Fig. 4) com onze análises registrou a idade de 2798 ± 43 m.a. interpretada novamente como a época de formação original dos materiais, fato corroborado pela baixa razão inicial ($0,70016 \pm 0,00075$).

A oeste de Itauna, região de Divinópolis, afloram migmatitos, também estudados geocronologicamente através de amostragem na pedreira Moura Coelho. Litologicamente são caracterizados por biotita-gnaisses de composição granodiorítica, cujo estudo radiométrico Rb-Sr em rocha total produziu diagrama isocrônico com idade de 2754 ± 48 m.a., para uma razão inicial $0,71050 \pm 0,00056$ (Fig. 5). O baixo MSWD (0,137) reflete a cogeneticidade da amostragem. Ressalte-se nesse afloramento a elevada razão inicial, evidenciando delongada residência crustal dos materiais datados.

No setor sudeste da área investigada (Fig. 2), região de Desterro de Entre-Rios e Oliveira, ocorrem exposições de rochas granulíticas que, no entanto, exibem retrometamorfismo. A isócrona Rb-Sr de referência em rocha total construída produziu idade de 2506 ± 53 m.a., para razão inicial $0,70624 \pm 0,00144$ (Fig. 6). O MSWD em torno de 0,64 evidencia novamente a cogeneticidade do material analisado fornecendo, consequentemente, segurança à hipótese de que o valor radiométrico seja referente ao retrabalhamento de materiais mais antigos.

Já no setor ocidental do embasamento, a amostragem efetuada na rodovia MG-25, altura de Campo Belo, revelou a idade Rb-Sr mais antiga até o momento nesta parte sul do Cráton do São Francisco. Os materiais analisados, correspondendo a gnaisses bandados de composição granodiorítica, produziram um valor radiométrico Rb-Sr isocrônico em rocha total de 2964 ± 48 m.a. para uma razão inicial $0,7012 \pm 0,0014$ (Fig. 7), sendo a baixa razão inicial condizente com uma origem primária dos materiais a partir do manto. O elevado MSWD obtido (da ordem de 3,7) sugere a possibilidade das rochas não serem rigorosamente cogenéticas, apesar de incluírem-se numa mesma unidade estratigráfica.

Finalmente cabe mencionar que amostras de granitoides da região de Itapeçerica e migmatitos de Cláudio foram adicionalmente selecionadas para estudo radiométrico Pb-Pb em rocha total, devido às dificuldades interpretativas inerentes aos resultados anteriormente encontrados pelo método Rb-Sr. Na figura 8 define-se uma isócrona com idade de 2732 ± 20 m.a. para $\mu_1 = 8,11 \pm 0,12$ (resultados obtidos nos laboratórios da U-

universidade de Oxford, Inglaterra). A posição das amostras WT-17 à esquerda da isócrona de primeiro estágio para 2730 m.a. é uma clara demonstração de que a evolução isotópica do Pb para as três rochas não pode ser descrita por um modelo simples de dois estágios. Além disso, o U_1 situa-se no limite superior do intervalo típico considerado para materiais arqueanos (7,5-8,0), o que sugere a existência de remobilizações importantes de Pb durante a evolução arqueana. Com base nesses resultados não é descartável a hipótese de uma origem anterior, à maneira dos gnaisses da região de Campo Belo datados em cerca de 2,9 b.a.. De qualquer forma, a idade encontrada somada aos demais resultados acima mencionados, além de outros pertencentes ao acervo radiométrico discutido em Teixeira (1985), são indicativos de episódios sucessivos de acreção crustal, com retrabalhamentos eventuais da crosta pré-existente, durante o Arqueano Tardio (3,0-2,6 b.a.).

Por outro lado, o conjunto radiométrico Rb-Sr existente para a porção sul do Cráton do São Francisco indica que o embasamento cratônico sofreu também retrabalhamento geodinâmico parcial no Proterozóico Inferior, estando associado ao período o metamorfismo do Supergrupo Minas (Cordani et alii, 1980; Teixeira, 1982). Numa ilustração geocronológica esquemática para a área investigada são apresentados dois dos resultados isocroniais obtidos recentemente por Teixeira (1985).

O primeiro deles é referente ao setor NW da área nas proximidades de Bom Despacho (Fig. 2), onde processos de contaminação e/ou retrabalhamento crustal são sugeridos pelos estudos isotópicos efetuados em gnaisses graníticos. Com efeito, define-se uma isócrona Rb-Sr em rocha total de idade 2092 ± 135 m.a., para razão inicial $0,70802 \pm 0,00175$ (Fig. 9). O outro exemplo pertencente a um domínio expressivo de rochas de idade proterozóica inferior (Teixeira, op. cit.) é relativo ao chamado granito "Alto Jacarandá" (NW de Entre-Rios de Minas), cuja isócrona Rb-Sr em rocha total revelou idade de 1900 ± 108 m.a., para uma razão inicial $0,70955 \pm 0,00181$ (Fig. 10). Notem-se em ambos os casos as elevadas razões iniciais obtidas que podem refletir retrabalhamentos de crosta mais antiga, ou mesmo misturas com material sedimentar ocorridas durante a granitização. Esta última possibilidade é reforçada pelo elevado MSWD obtido nos dois afloramentos, sugerindo uma heterogeneidade para os respectivos materiais-fonte.

Com referência ao panorama radiométrico K-Ar, no histograma da figura 11, revelam-se três períodos de tempo principais de resfriamento para a borda sul do cráton. O mais antigo com idades concentradas entre 2,2-1,7 b.a. denota a superimposição do Ciclo Transamazônico, rejuvenescendo micas, anfibólios e rochas totais dos terrenos metamórficos arqueanos, sobretudo nas áreas mais internas do domínio cratônico. Entre tanto, nas porções periféricas ocorreu forte influência termal nos retículos minerais de rochas cristalinas, devido à atuação progressiva das faixas móveis marginais brasileiras com idades indicando valores entre 900 e 400 m.a.. Segundo esta mesma linha de raciocínio pode ser interpretado o intervalo de idades entre 1300 e 1000 m.a., o qual deve representar os reflexos da imposição em áreas adjacentes do Ciclo Uruaçuano.

Com referência aos resultados obtidos através do método dos traços de fissão, selecionaram-se para essa etapa representantes dos terrenos arqueanos gnáissico-graníticos da parte central da figura 2. A amostragem foi efetuada nos afloramentos WT-15 e WT-19 (granitóide de Santo Antonio do Monte - Itapeacerica), WT-17 (migmatitos de Cláudio) e WT-22 (gnaiques tonalíticos a oeste de Itaúna) de forma a comparar os resultados da área geograficamente da borda cratônica com o quadro geocronológico antes caracterizado.

As apatitas, concentradas por bromofórmio na fração entre 60 e 100 mesh, foram irradiadas por neutrons térmicos no reator nuclear da CNEN/SP, e as datações realizadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Dependendo do tipo de distribuição de urânio na apatita de cada amostra foram utilizados diferentes métodos para se obter uma idade aparente. O procedimento na determinação das densidades de traços fósseis (D_f) formados pela fissão espontânea do ^{238}U e dos traços formados pela fissão induzida (D_i) do ^{235}U pela irradiação de neutrons no reator nuclear, densidades essas usadas no cálculo das idades aparentes, está su-

marizado nas figuras 12 e 13. As amostras WT-17 e WT-22 apresentaram a distribuição de urânio homogênea no interior de cada cristal, mas com variações significativas de grão a grão, e sendo assim foram datadas pelo método de "subtração" (Naeser, 1979). Essas duas amostras produziram idades de 836 ± 85 m.a. e 562 ± 87 m.a., respectivamente WT-17 e WT-22. Já as amostras WT-15 e WT-19 quando examinadas para a escolha do método a ser utilizado, mostraram possuir duas suítes de apatita (grãos de alta e baixa densidades de traços fósseis), o que produziria idades variando de 940 a 400 m.a. quando calculadas suas idades aparentes. Em virtude da bimodalidade observada na densidade dos traços fósseis das amostras WT-15 e WT-19 elas serão datadas pelo método de subtração sob diferentes condições de irradiação neutrônica, a fim de avaliar o comportamento das idades assim obtidas e a influência da dose de neutrons adotada.

As idades traços de fissão das amostras WT-17 e WT-22 mostram que o resfriamento abaixo de $110^\circ C$ ocorreu em diferentes épocas, isto é, nas partes internas da área cratônica a cerca de 850 m.a. e nas partes periféricas em torno de 550 m.a.. A semelhança da interpretação dos resultados K-Ar, as idades traços de fissão refletem a atuação progressiva das faixas móveis marginais brasileiras nas áreas cratônicas arqueanas. Com relação à bimodalidade da densidade de traços fósseis observada nas amostras WT-15 e WT-19, este fato vem confirmar a heterogeneidade dos materiais-fonte dessas amostras, já sugerida pela razão inicial isocronia $^{87}Sr/^{86}Sr$ e pelo parâmetro U_1 obtidos para essas rochas.

Plotadas num gráfico as idades obtidas em cada método versus as temperaturas estimadas para "zeragem" dos respectivos geocronômetros (isto é, a temperatura a partir da qual é registrado o evento a ser data do por cada método), é possível avaliar a história de formação e resfriamento das amostras assim datadas. Na figura 14 são traçadas as curvas de resfriamento das amostras WT-15, WT-19 e WT-22. No intervalo entre 2700 e 2200 m.a. a curva de resfriamento dessas amostras comportou-se de forma complexa, o que está de acordo com a evolução policíclica regional. Já a partir de 2000 m.a. o resfriamento ocorreu de forma lenta. A comprovação dos dois tipos de história de resfriamento propostos para os intervalos de 2700 a 2200 m.a. e 2000 a 500 m.a. poderá ser obtida através das datações K-Ar, em minerais com temperatura de retenção do Ar superior a micas e anfibólios (por exemplo plagioclásio e piroxênio), $^{39}Ar/^{40}Ar$, nos minerais datados por K-Ar, e traços de fissão, em minerais com temperatura de retenção dos traços superior a da apatita (por exemplo zircão e titanita).

CONCLUSÕES

O conjunto de dados radiométricos Rb-Sr, Pb-Pb e K-Ar disponível para a área de estudo definiu as épocas principais de eventos tectono-magmáticos desenvolvidos na porção meridional do Cráton do São Francisco, ratificando a importância fundamental do Arqueano Tardio e Proterozóico Inferior no contexto da evolução tectônica.

As interpretações geocronológicas decorrentes de um tratamento em diagramas isocroniais em combinação com um quadro esquemático de resfriamento regional vinculado às idades aparentes revelam a existência de duas províncias crustais antigas na parte sul do Cráton, com idades de 3000 a 2600 m.a. e 2400 a 2100 m.a.. Estes dois períodos foram considerados por Teixeira (1985), com base em significativo acervo de dados radiométricos, como o de crescimento continental generalizado da massa cratônica. O período mais antigo é sugestivo da principal etapa de espessamento crustal (formação e aglutinação de massa continental) e o mais jovem representa o próprio desenvolvimento do chamado "cinturão Mineiro" (designação informal), de natureza parcialmente ensialítica, e cuja atividade causou o rejuvenescimento da maioria dos valores aparentes K-Ar do domínio arqueano.

Por outro lado, a distribuição geográfica preferencial das idades K-Ar entre 650 e 400 m.a. ao longo do setor leste da figura 2 (região de Moeda para norte, principalmente) vinculam-se à evolução geodinâmica brasileira desenvolvida ao longo da margem cratônica e representam,

a grosso modo, uma posição da isógrada de 300°C ao final do Proterozóico Superior.

As idades traços de fissão em apatitas em torno de 850 e 550 m.a., obtidas para as amostras WT-17 e WT-22, indicam que o resfriamento abaixo de 110°C ocorreu de forma gradativa na área cratônica, do núcleo para a borda, refletindo a atuação progressiva das faixas móveis marginais brasileiras.

O uso desses métodos, conjuntamente, permitiu avaliar a forma de resfriamento das amostras assim datadas (Tabela 2 e Fig. 14). O resfriamento dessas amostras ocorreu de forma complexa no intervalo de 2700 a 2200 m.a. e lenta a partir de 2000 m.a.. A comprovação dessas posições poderá ser obtida através das datações K-Ar, em plagioclásio e piroxênio, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$, nos minerais datados por K-Ar, e traços de fissão, em zircão e titanita.

O tratamento integrado dos vários métodos de datação mostrou ter importância fundamental para o conhecimento da evolução geotectônica de terrenos antigos de caráter policíclico.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências Aplicadas (IGA/BH) pela liberação de parte dos dados geocronológicos; aos Drs. S. Moorbath e P.N. Taylor pelo processamento das análises de Pb na Universidade de Oxford; aos técnicos da Universidade de São Paulo pelo apoio laboratorial; a Christina Barreto Pinto pelo serviço de datilografia; os presentes autores agradecem o apoio recebido na elaboração deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. & BRITO NEVES, B.B. - 1976 - The upper precambrian of South America. *Bol. IG-USP*, 7: 45-80.
- BESANG, C.; EBERLE, W.G.; LAHNER, L.; MÜLLER, P. & PAULSEN, S. - 1977 - Radiometrische Altersbestimmung und Gestein aus Minas Gerais und Espírito Santo, Brasilien. *Hannover, Geol. JB. Helf.*, 24: 149-179.
- BIGAZZI, G. - 1981 - The problem of decay constant λ_f to ^{238}U . *Nuclear Tracks*, v. 5, nº 1/2: 35-44.
- BRITO NEVES, B.B.; KAWASHITA, K. & DELHAL, J. - 1979 - A evolução geocronológica da cordilheira do Espinhaço: dados novos e integração. *Rev. Bras. Geoc.*, 9(1): 71-85.
- CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.S.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; COUTINHO, M.G.N.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; DAITX, E.C.; ROSA, D.B. & RAMALHO, R. - 1979 - Projeto Sapucaí, Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais: relatório final de geologia. Brasília, DNP, São Paulo, CPRM, 299 p. (Série Geologia, 4, Seção Geológica Básica, 2).
- CORDANI, U.G. & TEIXEIRA, W. - 1979 - Comentários sobre as determinações geocronológicas existentes para as regiões das Folhas Rio de Janeiro, Vitória e Iguape. In: Carta Geológica do Brasil ao milionésimo, Folhas SF-23, SF-24 e SG-23, Rio de Janeiro, Vitória e Iguape. MME/DNPM, Brasília, p. 175-207.
- CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; MÜLLER, G.; QUADE, H.; REIMER, V. & ROESLER, H. - 1980 - Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. *An. Acad. Bras. Ciências*, 52(4): 785-799.
- CORDANI, U.G. & BRITO NEVES, B.B. - 1982 - The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. *Rev. Bras. Geoc.*, 12(1/3): 78-88.
- COWAN, G.A. & ADLER, H.H. - 1976 - The variability of the natural abundance of ^{235}U . *Geoch. et Cosm. Acta*, 40: 1487-1490.
- FONSECA, A.C. - 1985 - Geocronologia das rochas graníticas e suas encaixantes na Cidade do Rio de Janeiro. Tese de Mestrado a ser apresentada no Instituto de Geociências da UFRJ.

- FRITZSON, J.R., O.; BIONDI, J.C. & CHABAN, N. - 1980 - Geologia da região de Piunhi (MG). XXXI Cong. Bras. Geol., Camboriú, 5: 2906-2917.
- HARRISON, T.M. et alii - 1980 - Thermal models and cooling histories from Fission-Track, K-Ar, Rb-Sr and U-Pb mineral dates, Northern Coast Plutonic Complex, British Columbia. *Short Papers of the Fourth Intern. Conf., Geochr., Cosm., Isot. Geol.* Robert E. Zartman Editor. *Geol. Surv. Open: file Report*, 78-701: 167-170.
- HERZ, N. - 1970 - Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 641-B: 1-58.
- HERZ, N.; HURLEY, P.M.; PINSON, W.H. and FAIRBAIRN, H.W. - 1961 - Age measurements of Brazilian Shield. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72: 1111-1120.
- JAFFEY, A.H.; KFLYNN, K.S.; GENDENIN, L.C.; BENTLEY, W.C. & ESSLIGE, A.M. - 1971 - Precision measurement of half lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U . *Phys. Rev.*, c.4: 1889-1906.
- LADEIRA, E.A.; ROESER, H.M.P. & TOBSCHALL, H.J. - 1983 - Evolução petrogenética do cinturão de rochas verdes Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. II Simp. Geol. Minas Gerais, bol. nº 3: 149-165.
- MACHADO Fº, L.; RIBEIRO, M.W.; GONZALEA, S.R.; SCHENINI, C.A.; PALMEIRA, R.C.B.; GATTO, C.M.P.P.; SANTOS NETO, A.; SOUZA JR., J.J.; PIRES, J.L.; TEIXEIRA, W.; MARTINS, V.M.F.; CASTRO, H.E.F. & HERTER, A.M.R. - 1984 - Geologia. In: Brasil - DNPM. Projeto RADAMBRASIL. Folhas SF-23 Rio de Janeiro e SF-24 Vitória, Rio de Janeiro (Levantamento de Recursos Minerais, 32).
- NAESER, C.W. - 1967 - The use of apatite and sphene for fission track age determinations. *Geol. Surv. Amer. Bull.*, 78: 1523-1526.
- NAESER, C.W. & FAUL, H. - 1969 - Fission track annealing in apatite and sphene. *Journ. Geoph. Res.*, 74: 705-710.
- NAESER, C.W. - 1979 - Fission-track dating and geological annealing of fission tracks. *Lectures in Isotope Geology*: 154-169.
- PARENTI COUTO, J.G.; TEIXEIRA, W. & CORDANI, U.G. - 1983 - Considerações sobre as principais épocas de fraturamento do Cráton do São Francisco, com base em datações K-Ar de rochas básicas. II Simp. Geol. Minas Gerais, bol. nº 3: 38-49.
- PINSON, W.H.; WHITEMORE, D.O.; FAIRBAIRN, H.W. & HURLEY, P.M. - 1967 - Rb-Sr whole rock ages on rocks near Sete Lagoas, MG, Brazil. *An. Rep. MIT*: 37-39.
- POUPEAU, G. - 1982 - Fission-track dating methods for metamorphic rocks and intracratonic basins. *Anais do XXXII Cong. Bras. Geol.*, v. 4: 1442-1450.
- SHORSCHER, H.D. - 1980 - Geotectonic evolution of Quadrilátero Ferrífero, Brazil. XXVI Intern. Geol. Cong., Paris, Abstracts, 2: 613.
- SCHORSCHER, H.D.; SANTANA, F.C.; POLONIA, J.C. & MOREIRA, J.M.P. - 1982 - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais State: Rio das Velhas greenstone belt and Proterozoic rocks. *Excursions Annex, ISAP*, 44 p.
- TEIXEIRA, N.A. - 1978 - Geologia, petrologia e geoquímica da sequência vulcano-sedimentar do Morro do Ferro, Fortaleza de Minas, MG. Brasília, UnB (Tese de Mestrado, inédito).
- TEIXEIRA, W. - 1982 - Geochronology of the Southern part of the São Francisco Craton. *Rev. Bras. Geoc.*, 12(1/3): 268-277.
- TEIXEIRA, W. - 1985 - A evolução geotectônica da porção meridional do Cráton do São Francisco, com base em interpretações geocronológicas. Tese de Doutorado, IG-USP (inédito).
- WAGNER, G.A. - 1968 - Fission track dating in apatites. *Earth and Plan. Sci. Letters*, 1: 449-452.

TABELA 1 - Idades traços de fissão em apatitas.

AMOSTRA	TRAÇOS FÓSSEIS ($D_f \pm 1\sigma$)	TRAÇOS INDUZIDOS ($D_i \pm 1\sigma$)	IDADE (m.a.) ($t \pm 2\sigma$)
WT-15	48,00 $\pm$ 2,08	13,36 $\pm$ 1,42	938 $\pm$ 111
	14,25 $\pm$ 0,89	6,78 $\pm$ 0,43	566 $\pm$ 49
WT-17	8,88 $\pm$ 0,50	2,79 $\pm$ 0,22	836 $\pm$ 85
WT-19	4,61 $\pm$ 0,27	3,31 $\pm$ 0,32	401 $\pm$ 48
WT-22	2,96 $\pm$ 0,24	1,41 $\pm$ 0,18	562 $\pm$ 87

onde D_f e D_i são as densidades de traços fósseis e induzidos.

σ = desvio padrão.

Constantes usadas: $\lambda_d = 1,55125 \times 10^{-10}$ anos $^{-1}$; $I = 7,253 \times 10^{-3}$;

$\delta = 580 \times 10^{-24}$ cm $^{-2}$

Dose de neutrons: $\phi = (6,90 \pm 0,13) \times 10^{15}$ n. cm $^{-2}$

Parâmetro operacional: $\lambda_f = 10,32 \times 10^{-17}$ anos $^{-1}$

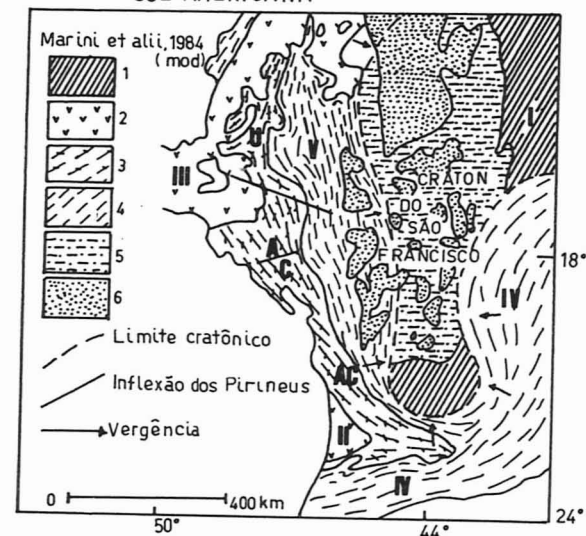
Cálculo de uma idade aparente:

$$t = \frac{1}{\lambda_d} \ln \left(1 + \frac{D_f}{D_i} \cdot \delta I \phi \frac{\lambda_d}{\lambda_f} \right)$$

TABELA 2 - Comparação dos métodos Pb-Pb, Rb-Sr, K-Ar e Traços de Fissão nas amostras datadas.

AMOSTRA	Pb-Pb (m.a.)	Rb-Sr (m.a.)	K-Ar (m.a.)	TF (m.a.)
WT-15			1896 $\pm$ 60	938 $\pm$ 111
				566 $\pm$ 49
WT-17	2732 $\pm$ 20		1996 $\pm$ 60	836 $\pm$ 85
	ou - 21		1926 $\pm$ 58	
WT-19	2732 $\pm$ 20		1789 $\pm$ 54	401 $\pm$ 48
	ou - 21			
WT-22		2798 $\pm$ 73		562 $\pm$ 87

FIGURA 1 - ESBOÇO TECTÔNICO DE PARTE DA PLATAFORMA SUL-AMERICANA



1- Embasamento cratônico (I); 2-Máfiços Guaxupé (II) e Goiás (III); 3- Faixa de Dobramentos Uruaçu (U); 4- Cinturões Araxá-Canastra (AC), Ribeira (IV) e Brasília (V); 5- Cobertura plataforma; 6- Coberturas fanerozoicas.

The map displays the São Paulo region with various sampling locations marked. Key locations include Cachoeira dos Macatós, Esmeraldas, AP/WT-1, Contagem, Moeda, AP/WT-15, AP/WT-18, AP/WT-17, Desterro de Entre-Rios, Resende Costa, Oliveira, Cláudio, WT-17, Formiga, Itapeverica, WT-19, WT-8, WT-7, WT-6, Campo Belo, WT-5, WT-4, WT-15, SB/WT-2, Divinópolis, Itaipava, WT-24, WT-25, Itaipava, WT-22, Itaipava, WT-23, AP/WT-23, Cachoeira dos Macatós, Esmeraldas, AP/WT-1, Contagem, Moeda, AP/WT-15, AP/WT-18, AP/WT-17, Desterro de Entre-Rios, Resende Costa, Oliveira, Cláudio, WT-17, Formiga, Itapeverica, WT-19, WT-8, WT-7, WT-6, Campo Belo, WT-5, WT-4. The map also shows the São Paulo Water Treatment Plant (WT) and the Cachoeira dos Macatós (AP) and Esmeraldas (AP) water treatment plants. The map includes labels for various locations such as Perdigão, Divinópolis, Itaipava, and Resende Costa, along with coordinates 19° 40' and 44° 00'.

Coberturas recentes
 Grupo Bambuí
 Granito Porto Mendes
 Sgr. Minas
 Sgr. Rio das Velhas
 Complexo Gnáissico-Migmatítico

10 0 10 20 30 40 50 km
 Falhas / fraturas
 Diques
 Cidades
 Datações: Rb-Sr
 K-Ar
 Pb-Pb
 TF

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
 0.86
 0.84
 0.78
 0.74
 0.70
 0.8
 1.6
 2.4
 3.2
 4.0
 $^{87}\text{Rb} / ^{86}\text{Sr}$

APWT-2D
 APWT-2F
 APWT-2G
 APWT-2E
 APWT-2B
 APWT-2I
 APWT-1C
 APWT-1E
 APWT-1H
 APWT-1D

T = 2803 ± 70 ma
 RI = 0.700 ± 0.001
 MSWD = 3.37
 Corr R = 0.99
 N = 10

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
 0.80
 0.75
 0.70
 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
 1.0
 2.0
 WT 24.1
 WT 24.2
 WT 25
 WT 22
 SBWT 1A3
 SBWT 1.5
 SBWT 1A5
 SBWT 1A2
 SBWT 1.1
 SBWT 1.4
 SBWT 1.10
 T = 2798 ± 73 ma
 RI = 0.70016 ± 0.00075
 MSWD = 2.96
 Corr R = 0.99
 N = 10

FIGURA 5 - DIAGRAMA ISOCRÔNICO Rb-Sr PARA
ROCHAS NAS IMEDIAÇÕES DE DIVINÓPOLIS

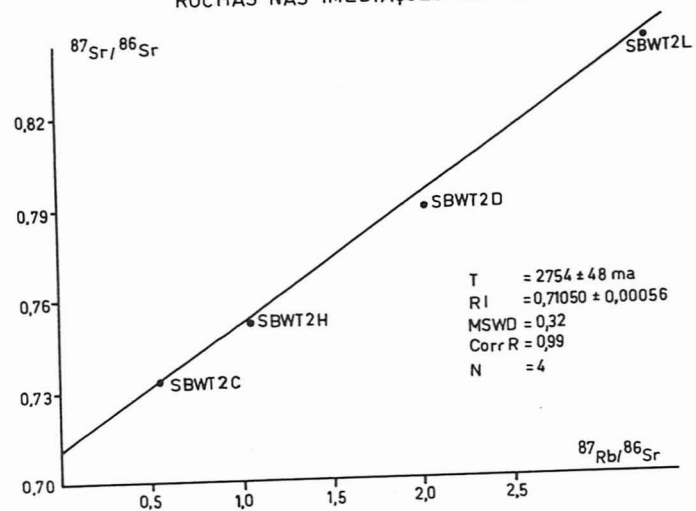


FIGURA 6 - ISÓCRONA Rb-Sr PARA ROCHAS DA REGIÃO
DESTERRO DE ENTRE RIOS-OLIVEIRA

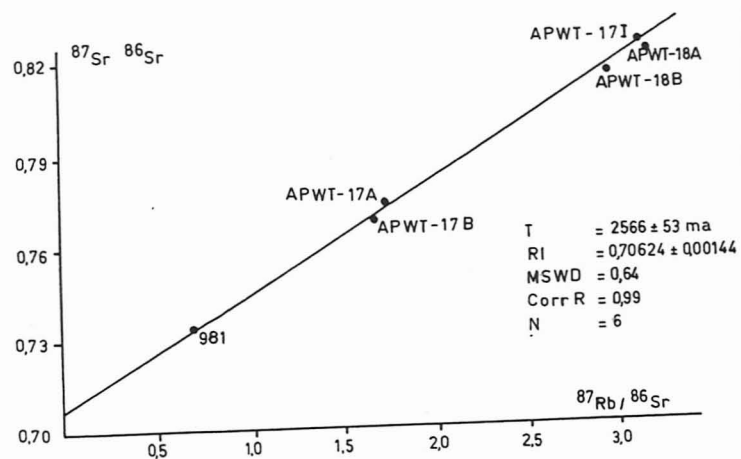


FIGURA 7 - ISÓCRONA DE REFERÊNCIA Rb-Sr PARA ROCHAS
DA REGIÃO DE CAMPO BELO - FORMIGA

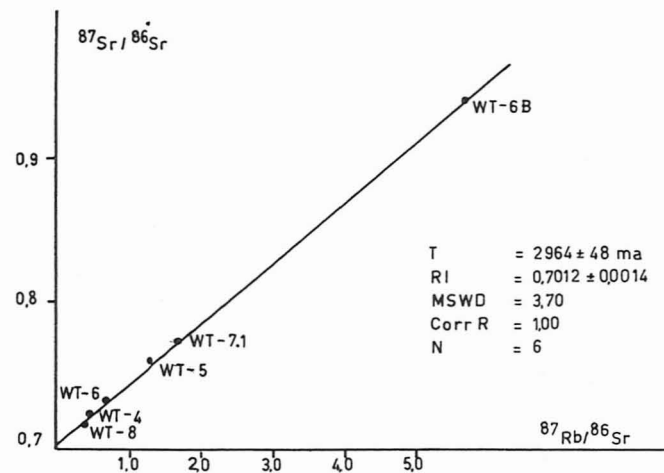


FIGURA 8 - ISÓCRONA Pb-Pb EM ROCHAS DA REGIÃO
ITAPECERICA - CLÁUDIO

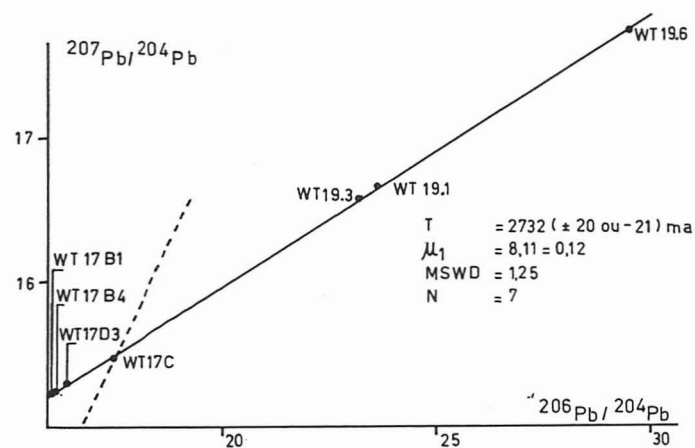


FIGURA 9 - DIAGRAMA ISOCRÔNICO Rb-Sr PARA ROCHAS DAS IMEDIAÇÕES DE BOM DESPACHO

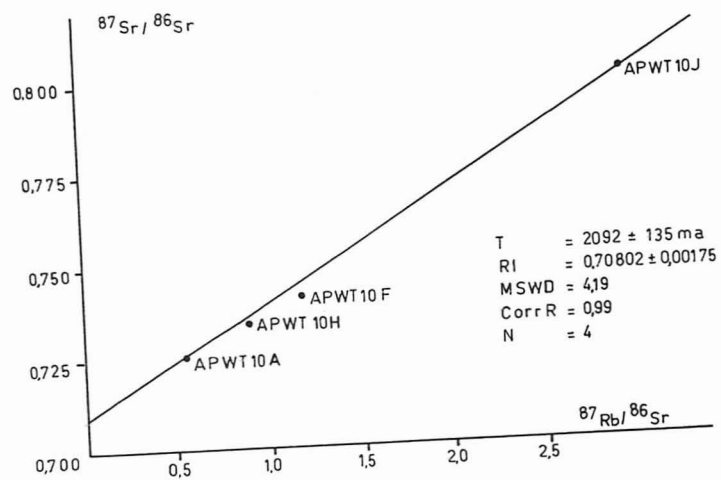


FIGURA 10 - DIAGRAMA ISOCRÔNICO Rb-Sr PARA O GRANITO "ALTO JACARANDÁ"

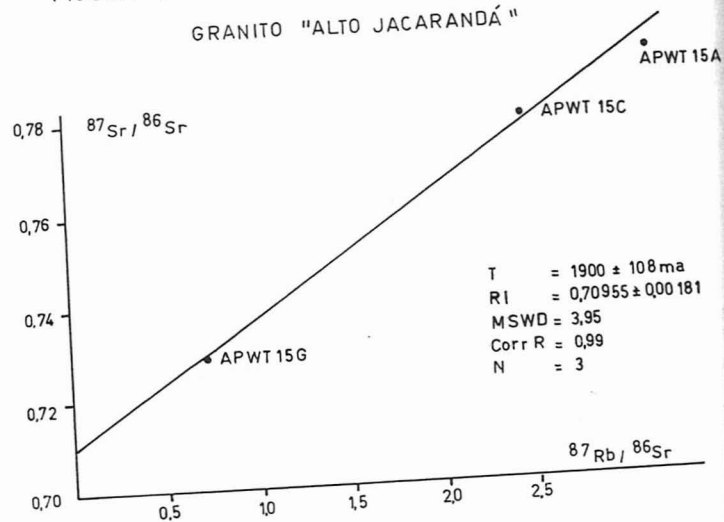


FIGURA 11 - HISTOGRAMA GEOCRONOLÓGICO K-Ar PARA AS ROCHAS METAMÓRFICAS DO EMBASAMENTO.

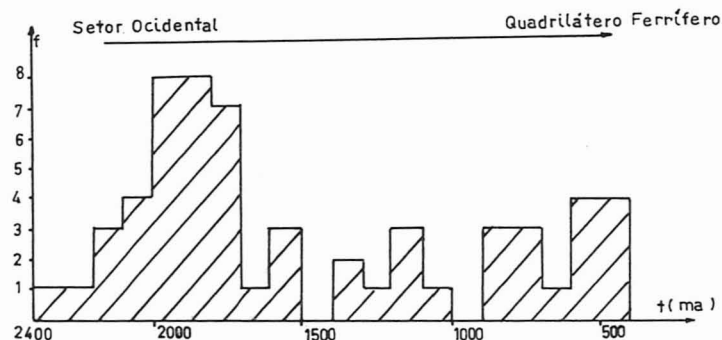


FIGURA 12 - PROCEDIMENTO NA DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES DE TRAÇOS FÓSSEIS E INDUZIDOS PELO MÉTODO DE SUBTRAÇÃO.

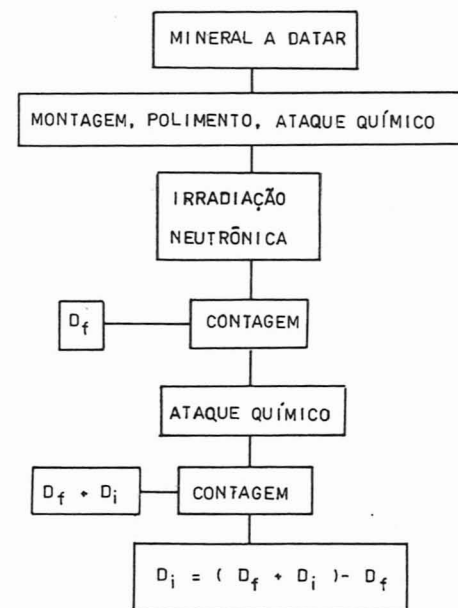


FIGURA 13 - PROCEDIMENTO NA DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES DE TRAÇOS FÓSSEIS E INDUZIDOS.

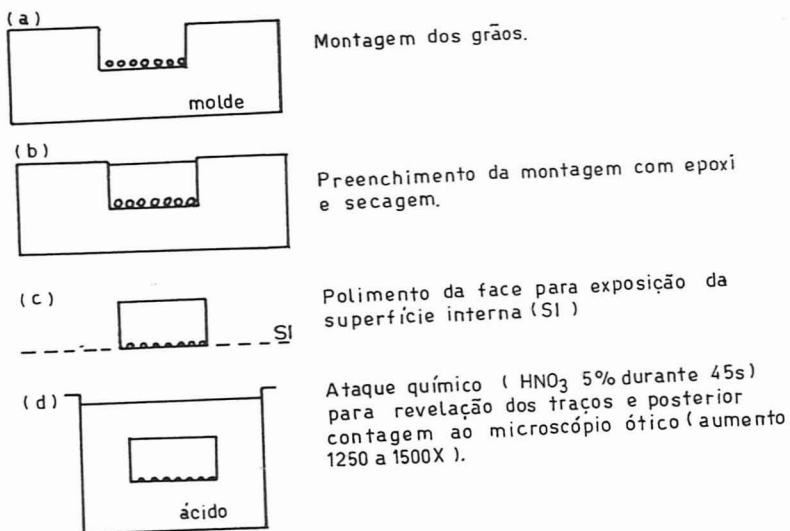


FIGURA 14 - CURVAS DE RESFRIAMENTO PROPOSTAS PARA AS AMOSTRAS DATADAS PELOS MÉTODOS Rb-Sr, K-Ar, Pb-Pb E TRAÇOS DE FISSÃO.

