

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Termocronologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de Eventos
de Deformação e Mineralização no
Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais,
Brasil.**

Naira Tainá de Mello Alvarenga

Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Stipp Basei
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Vasconcelos

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 06/38)

SÃO PAULO
2006

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Ar/Ar termocronologia de deformação e eventos de
mineralização aurífera no Quadrilátero Ferrífero,
Minas Gerais, Brasil**

Naira Tainá Mello Alvarenga

Monografia de Trabalho de Formatura



Banca Examinadora

Prof. Dr. Miguel Ângelo Stipp Basei

Prof. Dr. Wilson Teixeira

Prof. Dr. Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda

São Paulo

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Termocronologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de Eventos
de Deformação e Mineralização no
Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais,
Brasil.**

Naira Tainá de Mello Alvarenga



Orientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Stipp Basei
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Vasconcelos

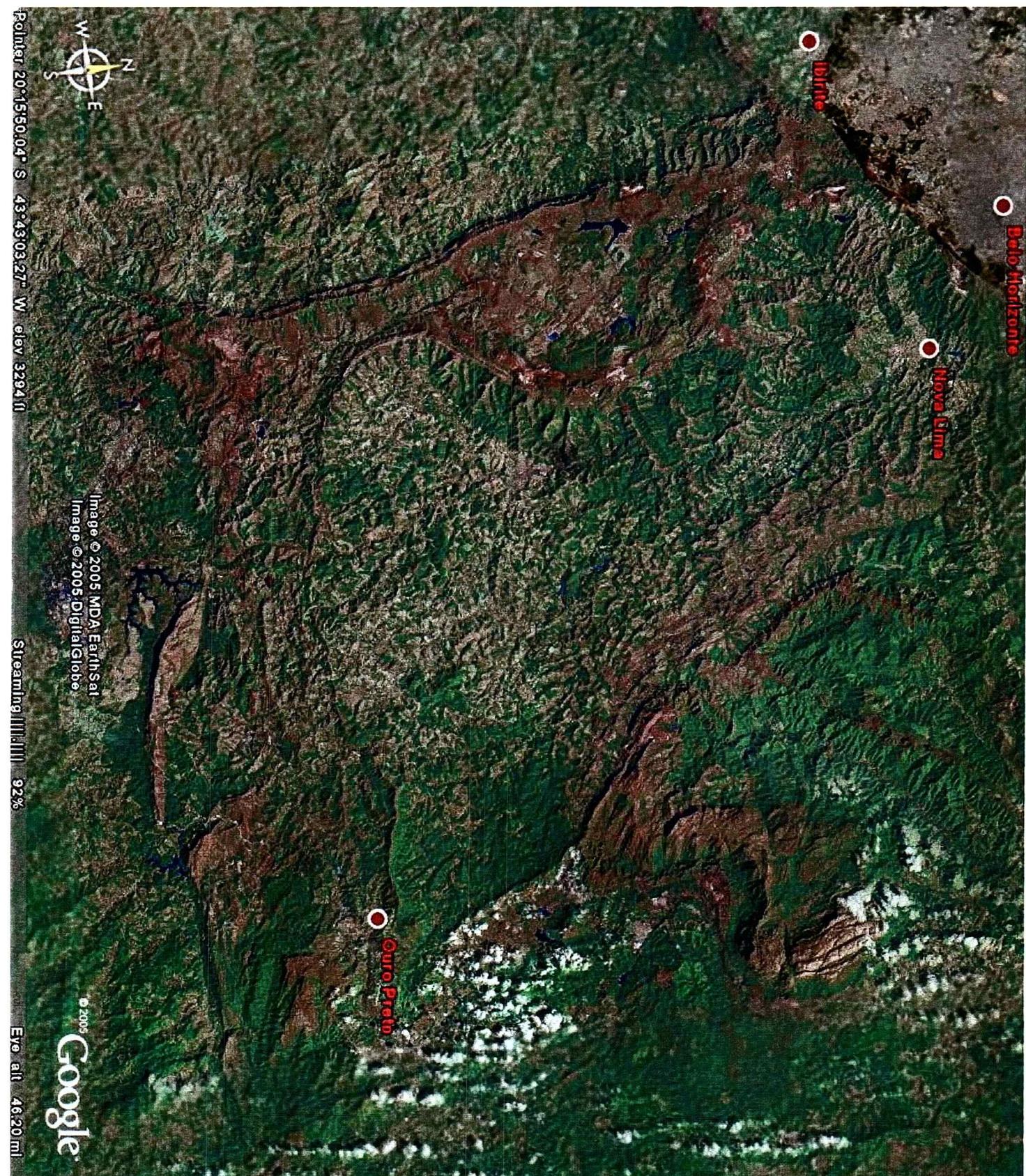
DEDALUS - Acervo - IGC



30900024351

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 06/38)

SÃO PAULO
2006



"Nós devemos ser
a transformação que
queremos ver no mundo."
(Gandhi)

Dedico este trabalho à
minha grande amiga,
companheira e mãe, Regina.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao meu supervisor Dr. Paulo Vasconcelos: nunca terei palavras para te agradecer por tudo. Sem ti este trabalho não teria sido possível. Dr. Paulo muito obrigada por toda a paciência, amizade e ensinamentos de geologia e de vida. Ter a oportunidade de conviver com sua experiência foi um grande privilégio. "O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis." (Pessoa). Dr. Paulo, você é uma das pessoas incomparáveis no mundo.

À minha mãe, obrigada por ser sempre companheira nas empreitadas da minha vida. Agradeço ao meu pai pelo apoio durante os anos de faculdade e na influência na construção da minha personalidade. Mário Latino, muito obrigada: seus ensinamentos foram preciosos para mim.

Ben, obrigada pelas pizzas de sextas feiras, amizade, solicitude e lições de Ar/Ar, câmera, free hand, mineralogia, culinária, mecânica...

À geóloga Isabela Carmo, sempre solicita para comigo, obrigada!

Arne, obrigada pelas lições de Map Info e boas risadas; Silvana, obrigada por sua ajuda neste trabalho, companhia e amizade (precisei ir do outro lado do mundo pra te encontrar!); Michael McMaster ("versão chinesa" de um red neck), muito obrigada por todos os bons momentos, apoio, opiniões e revisão do abstract deste trabalho; Gideon, Rod Holcombe, muito obrigada pelos ensinamentos e carinho que recebi de vocês. Ao pessoal da Universidade de Queensland: Maria (a melhor *flatmate* que eu poderia ter), Marcelle, Marinho (meu pai adotivo em Brisbane), Evelyn, Zorano, Peter, Fiona, Frank, John, Kathryn, Dinick, JP, Ed, "Michaels", Georgina, Rob, Sara, Amanda, Angela, Zara e Kurt agradeço muito por todos os bons momentos que me proporcionaram no período deste trabalho: vocês certamente tornaram minha estadia em Brisbane maravilhosa. À família McMaster: foi muito bom conhecer todos vocês.

Ao professor da UNESP e amigo Nelson Angeli: seus olhos brilhando ao falar de geologia enquanto eu cursava o segundo grau tiveram grande peso na minha escolha de profissão. Nelson, obrigada por sua gentileza de sempre e pela ótima influência.

Aos professores do IGC, todos vocês me ensinaram muito. Aos apaixonados por geologia que convivi de maneira mais próxima, foi um grande prazer. Muito obrigada Gergely, Caetano, Bley, Mário Campos, Marcos Egídeo, Eliane, Valdecir, Excelso, Sílvio, Bettencourt. Especiais agradecimentos aos professores Bley, Mário Campos, Colombo Tassinari e Cordani pela revisão e contribuição ao meu trabalho.

Ao meu “co-orientador” Miguel Basei, sua calma é um admirável. Obrigada pela força durante este ano. Ao Artur do CEPEGEO, muito, muito obrigada pela grande gentileza e solicitude.

Aos funcionários Pedro (informática), Diego, Marilda, Ivoneide, vocês sempre facilitaram minha vida através de sua solicitude.

Aos colegas de faculdade com os quais convivi durante estes anos, todos vocês me ensinaram algo de bom.

Ao amigo Gustavo, Tampax por alcunha: cinco anos morando juntos é praticamente um casamento mal sucedido. Foi muito bom Tampão, obrigada por todos estes anos.

Às amigas Adriana (Bisteka) e Marcela (Loira), conviver com vocês foi muito bom, espero um dia ter toda a força de vida que vocês têm. Danilo Rolim (Biva), Susi (Fidida), Silas (Dá Gostozo), obrigada pela amizade, risadas e ensinamentos de vida durante os anos juntos. Artur (Merda), Aranda, Luizemara (Cuca), Itamar (Jeitozo), Weder (Mineiro), Daniel (Chita), Igor (CP), Eduardo (Perereca), Anelise, Sérgio. Nossas vidas certamente tomarão rumos diferentes, mas espero que sempre possamos nos encontrar pelo caminho.

Aliás, quando eu era pequena (não que tenha mudado muito), um quadro pendurado na minha parede dizia “Quem tem amigos nunca está só”. Isto foi mais que reforçado durante a etapa final deste trabalho. Não teria conseguido contornar os imprevistos sem a ajuda de vocês, reforço o meu muito obrigada: Luizemara, Silas, Aranda e Artur!

Ao geólogo e amigo João Paulo (Pica nele), fica o meu muito obrigada. Foi muito bom te conhecer. Espero um dia ter um pouco de sua competência e coração.

Danilo Schwab, durante muitos dos anos de faculdade fostes meu companheiro em todas as circunstâncias, meu sincero obrigada. Você é inesquecível.

Ao meu grande companheiro, irmão de coração Lucas. Querido amigo, obrigada por todos estes anos junto a mim. É um grande privilégio te ter na minha vida.

Por último, sei que depois que entregar este trabalho lembarei de muitas pessoas a agradecer. Sendo assim, aos que esqueci de agradecer: Obrigada!

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----------|
| <u>1.IDENTIFICAÇÃO</u> | 3 |
| <u>2.RESUMO</u> | 3 |
| <u>3.ABSTRACT</u> | 4 |
| <u>4.INTRODUÇÃO</u> | 5 |
| 4.1.APRESENTAÇÃO AO TEMA | 6 |
| <u>5.METAS E OBJETIVOS</u> | 6 |
| <u>6.GEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO</u> | 7 |
| 6.1.ARQUEANO | 7 |
| <i>6.1.1.COMPLEXOS METAMÓRFICOS BASAIS</i> | <i>8</i> |
| <i>6.1.2.SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS</i> | <i>8</i> |
| 6.2.PROTEROZÓICO | 9 |
| <i>6.2.1.SUPERGRUPO MINAS</i> | <i>9</i> |
| <i>6.2.2.SUPERGRUPO ESPINHAÇO</i> | <i>10</i> |
| <i>6.2.3.GRUPO ITACOLOMI</i> | <i>10</i> |
| 6.3.FANEROZÓICO | 10 |
| <u>7.EVOLUÇÃO TECTÔNICA</u> | 11 |
| 7.1.EVENTOS DE FORMAÇÃO CRUSTAL | 11 |
| 7.2.EVENTO RIO DAS VELHAS | 12 |
| 7.3.EVENTO PALEOPROTEROZÓICO | 12 |
| 7.4.EVENTO MESOPROTEROZÓICO | 13 |
| 7.5.BRASILIANO | 13 |
| <u>8.MINERALIZAÇÕES</u> | 14 |
| 8.1 OURO | 14 |
| <i>8.1.1.CONSIDERAÇÕES SOBRE A GÊNESE DOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS</i> | <i>15</i> |
| 8.2.FERRO MANGANÊS E BAUXITA | 16 |
| 8.3.GEMAS | 16 |
| <u>9.GEOCRONOLOGIA</u> | 16 |
| 9.1.DATAÇÃO DE MINERALIZAÇÕES | 17 |
| 9.2.METODOLOGIAS APLICÁVEIS A DATAÇÃO DE MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS | 17 |
| 9.3.DATAÇÃO DE DEPÓSITOS AURÍFEROS OROGÊNICOS | 18 |

| | |
|--|------------------|
| 9.3.1. EXEMPLOS MUNDIAIS | 18 |
| 9.3.2. QUADRILÁTERO FERRÍFERO | 19 |
| <u>10. MATERIAIS E MÉTODOS</u> | <u>20</u> |
| 10.1. AMOSTRAGEM | 21 |
| 10.2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO | 21 |
| 10.3. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS | 22 |
| 10.4. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E ESTRUTURAL | 22 |
| <i>10.4.1. CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA</i> | 22 |
| <i>10.4.2. CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA</i> | 24 |
| 10.5. ANÁLISE GEOCRONOLÓGICA PELO MÉTODO $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | 25 |
| <i>10.5.1. PRINCÍPIO BÁSICO DE DATAÇÃO ATRAVÉS DO SISTEMA ISOTÓPICO $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$</i> | 25 |
| <i>10.5.2. RAZÃO K/CA</i> | 26 |
| <i>10.5.3. COMO A RELAÇÃO ENTRE ESTES ISÓTOPOS É UTILIZADA PARA DATAR ROCHAS?</i> | 27 |
| <i>10.5.4. PROCEDIMENTOS DAS ANÁLISES GEOCRONOLÓGICAS $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$</i> | 31 |
| 10.6. COMPILAÇÃO EM MAPA REGIONAL DE DADOS K-AR E $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | 34 |
| 10.7. PRODUÇÃO DE TEXTOS E FIGURAS: | 34 |
| <u>11. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</u> | <u>34</u> |
| <u>12. RESULTADOS OBTIDOS</u> | <u>36</u> |
| 12.1. DIQUE BÁSICO INTRUSIVO NA ZONA MINERALIZADA DO DEPÓSITO LAMEGO | 36 |
| <i>12.1.1. ANÁLISES $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DO DIQUE BÁSICO INTRUSIVO NA ZONA MINERALIZADA DO DEPÓSITO LAMEGO</i> | 37 |
| 12.2. AMOSTRAS DA UNIDADE LAPA SECA | 37 |
| <i>12.2.1. MICA BRANCA</i> | 38 |
| <i>12.2.2. MICAS VERDES</i> | 38 |
| <i>12.2.3. AMOSTRAS DE ROCHA TOTAL</i> | 39 |
| <i>12.2.4. GRÃOS DE MICA INCLUSOS EM GRÃOS DE SULFETO (DEPÓSITO LAMEGO)</i> | 41 |
| <i>12.2.5. GRÃOS DE MICA INCLUSOS EM GRÃOS DE SULFETO (DEPÓSITO MORRO VELHO)</i> | 42 |
| 12.3. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO REJUVENESCIMENTO BRASILIANO | 43 |
| <u>13. DISCUSSÃO</u> | <u>43</u> |
| <u>14. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u> | <u>46</u> |
| 14.1. SUGESTÕES | 47 |
| <u>15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | <u>48</u> |

| | |
|--|-----------|
| <u>ANEXOS</u> | <u>54</u> |
| I. TABELAS E QUADROS | 54 |
| II. DIAGRAMAS ⁴⁰ AR/ ³⁹ AR | 54 |
| III. PRANCHA DE FOTOS | 54 |
| IV. ANÁLISES DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA | 54 |
| V. MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE IDADES K-AR E AR- AR NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO | 54 |
| VI.CD | 54 |

1.IDENTIFICAÇÃO

Número: TF 38/2006

Título: Termocronologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de Eventos de Deformação e Mineralização no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.

Aluno: Naira Tainá de Mello Alvarenga.

Orientador: Prof. Prof. Dr. Miguel Ângelo Stipp Basei.

Co-orientador: Dr. Paulo Vasconcelos.

2.RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero localiza-se na porção sul do Cráton São Francisco e é uma das principais províncias minerais do Brasil, abrigando depósitos auríferos de classe mundial. A litoestratigrafia do Quadrilátero Ferrífero é constituída de um embasamento de trondjemitos, tonalitos, granitos e uma seqüência tipo *Greenstone belt*, conhecida como Supergrupo Rio das Velhas. As coberturas proterozóicas são as seqüências metassedimentares Supergrupos Minas, Espinhaço e Grupo Itacolomi. Grandes depósitos auríferos de gênese e idades desconhecidas estão concentrados nas rochas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas. Das três principais hipóteses para a origem das grandes mineralizações auríferas do Grupo Nova Lima (porção inferior do Supergrupo Rio das Velhas) duas consideram que eventos tectônicos tiveram grande importância na gênese destes depósitos. O estabelecimento das idades destas mineralizações é, portanto, uma das ferramentas analíticas necessárias para testar a validade dos modelos genéticos propostos. Estas informações, por sua vez, são úteis na elaboração de modelos de prospecção aplicáveis à região.

Neste trabalho, com objetivo de estabelecer a idade mínima das mineralizações auríferas dos depósitos Lamego e Morro Velho, a intensidade dos eventos térmicos que afetaram estes depósitos durante e após a mineralização e testar a aplicabilidade e limites da metodologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ na datação de grãos de mica inclusos em sulfetos co-precipitados com o ouro, foram datados, através do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, minerais associados às mineralizações. Os resultados das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de grãos de mica cristalizados na foliação S₂ e das amostras de rocha total demonstram que estes litotipos têm idades mínimas de 1.5 Ga e que foram reaquecidas durante o evento Brasiliano, sendo que este evento de reaquecimento atingiu temperaturas entre 300 e 400°C.

Adicionalmente, com o objetivo de determinar se há um padrão de distribuição regional do reaquecimento causado pelo evento Brasiliano no Quadrilátero Ferrífero, foram compilados em um mapa regional dados de K/Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ disponíveis na literatura (juntamente com os dados obtidos neste trabalho). Este mapa de distribuição demonstra que a porção oeste do Quadrilátero Ferrífero foi reaquecida durante o Neoproterozóico.

3.ABSTRACT

The Iron Quadrangle lies within the southern São Francisco Craton and is one Brazil's most important mineral provinces, hosting world-class gold deposits. The lithostratigraphy of this district consists of an Archean basement of tonalite- trondjemite - granodiorite and the Rio das Velhas Supergroup, a *Greenstone belt* sequence. This is overlain by Proterozoic supracrustal sequences, the Minas and Espinhaço Supergroups and the Itacolomi Group.

The Rio das Velhas Supergroup hosts world class gold deposits, but their age is uncertain and genetic models for mineralization still controversial. Dating these gold deposits is an important analytical tool for testing the reliability of genetic models, and it can be used to help establish regional exploration models and improve our understanding of the tectonic history of the Iron Quadrangle.

This report presents the results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Lapa Seca Unit from the Lamego and Morro velho deposits, and a basic dyke intruding the mineralized zone of the Lamego deposit. A dominant S_2 foliation was observed within the samples dated by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Dating of actinolite crystals within the mafic dyke gave an age of 2.5 Ga, establishing a minimum age for gold mineralization at the Lamego deposit.

A comparison between mica inclusions within sulphides (gold co-precipitated) and matrix micas within the same Lapa Seca samples, show that the sulphide grains partially protect their inclusions from ^{40}Ar exchange with the matrix. However $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the sulphide mica inclusions is not reliable for establishing the age of mineralization, as measured ages were significantly younger than those established from dating actinolite grains within the cross-cutting basic dyke.

Total rock and mica $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses for the Lapa Seca Unit place the resetting age of the S_2 foliation during the Brasiliano event. The closing temperature difference between micas and amphiboles help constrain the regional Brasiliano reheating temperature at Lamego deposit to 300-400°C. In addition the spatial distribution of K/Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages was plotted in a regional map of Quadrilátero Ferrífero. This distribution suggests a Neoproterozoic heating of the western part of The Quadrilátero Ferrífero.

4. INTRODUÇÃO

Situado na porção central do estado de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero (figura 4.1) é geograficamente delimitado pelas cidades de Belo Horizonte, Congonhas, Santa Bárbara e Mariana. No contexto geológico, está localizado na porção sul do Cráton São Francisco. Apresenta um “núcleo” constituído por blocos TTG (tonalito-thronjemito-granodiorito) e rochas vulcanossedimentares arqueanas (*greenstone belt* Rio das Velhas), bordejado por uma série de estruturas sinformais em rochas metassedimentares paleoproterozóicas (Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi) com eixos alinhados aproximadamente segundo as direções N-S e E-W (Chemale *et al.* 1994; Lobato *et al.* 2001a), resultando em uma feição quadrangular que delimita grandes depósitos de ferro.

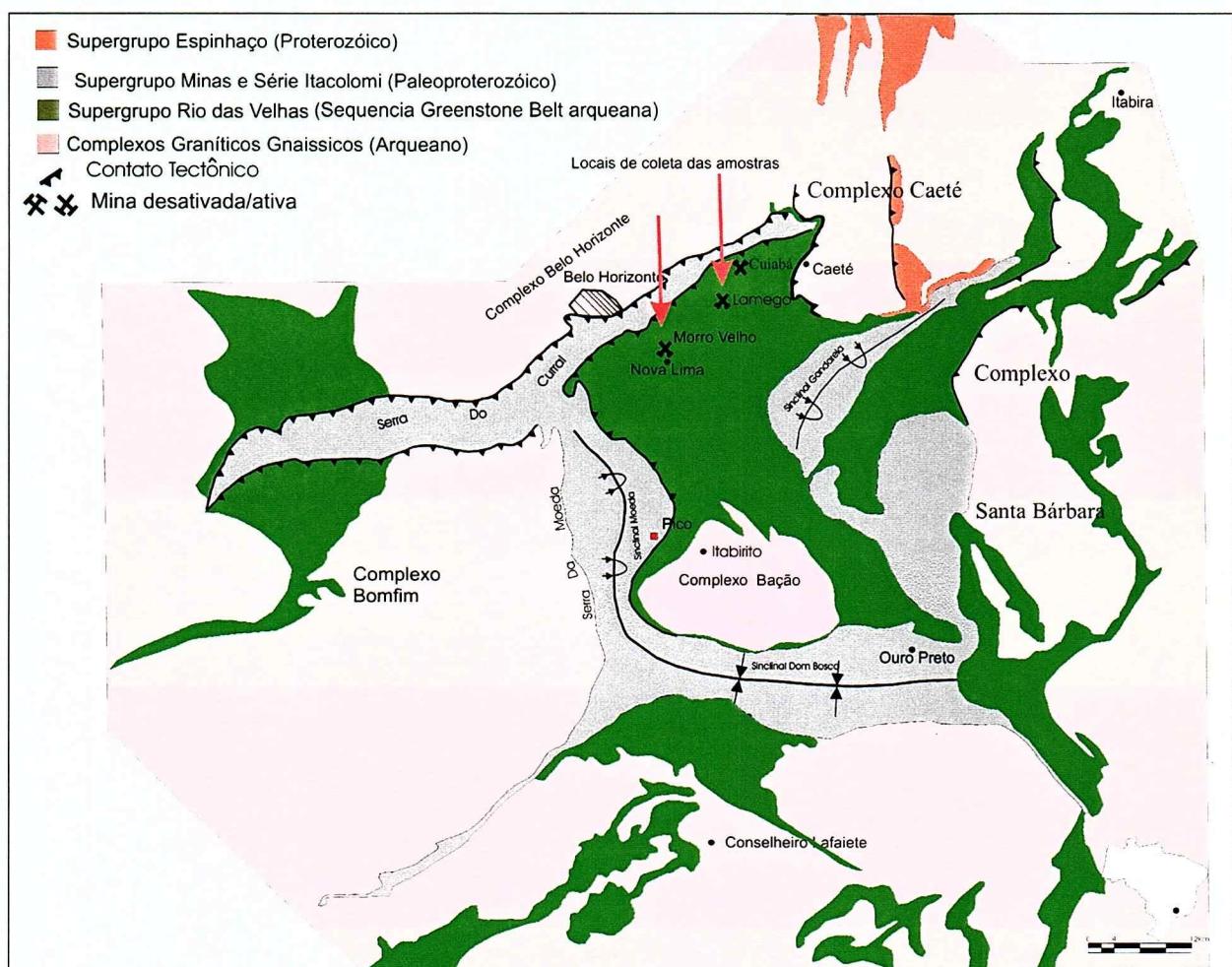


Figura 4.1. Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero. Modificado a partir de Sales & Holcombe (2004); Buzzi *et al.* (2002); Teixeira *et al.* (1998). As minas onde foram coletadas as amostras analisadas neste trabalho (Lamego e Morro Velho) estão indicadas pelas setas vermelhas.

4.1.Apresentação ao tema

Grandes depósitos auríferos estão concentrados nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, sendo que a idade e os modelos genéticos destas mineralizações não estão ainda bem definidos. Há três principais hipóteses para a origem destas mineralizações:

- juntamente com a deposição do Supergrupo Rio das Velhas ocorreu a mineralização (singenética);
- co- precipitação do ouro com a deposição do Supergrupo Rio das Velhas, seguida por uma concentração posterior, ocasionada por movimentação de fluidos hidrotermais mineralizantes durante processos de deformação associados a evento (s) tectônico (s);
- mobilização de fluidos mineralizantes condicionada por grandes estruturas geológicas associadas a evento (s) tectônico (s).

O conhecimento das idades das mineralizações auríferas do Supergrupo Rio das Velhas é uma das ferramentas que possibilita testar a validade dos modelos genéticos propostos para estes depósitos. A datação destes depósitos fornece informações adicionais quanto à idade do Supergrupo Rio das Velhas (datado principalmente pelo sistema isotópico Pb-Pb, na unidade vulcânica félssica do Grupo Nova Lima).

Neste trabalho, juntamente com os dados produzidos, será feita uma interpretação dos dados fornecidos pelo doutorando Márcio Salles e pelo Prof. Dr. Rod Holcombe objetivando avaliar a utilidade do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para a datação de eventos mineralizantes nos depósitos Lamego e Morro Velho.

5.METAS E OBJETIVOS

Após a deposição, as rochas do Supergrupo Rio das Velhas foram deformadas, e acredita-se que a principal deformação deste Supergrupo esteja associada ao evento tectônico Paleoproterozóico (2.2-1.8 Ga; Alkmim e Marshak, 1998). Acredita-se, também, que o Quadrilátero Ferrífero tenha sido pouco afetado pelo evento Brasiliano (último grande evento tectônico registrado na região sul do Cráton São Francisco). Idades K-Ar em micas e anfibólios, indicando rejuvenescimento pelo evento Brasiliano, são descritas principalmente na parte leste do Quadrilátero Ferrífero (Teixeira 1985). Na porção oeste deste distrito, Noce *et al.* (1998) obtiveram no Plutônio Alto Maranhão, idade U/Pb em zircão de 2124 Ma, e os sistemas isotópicos (K/Ar e Rb-Sr) apresentaram idades incoerentes entre si indicando que, após a deposição, as rochas arqueanas foram rejuvenescidas por eventos posteriores ao evento Rio das Velhas. Noce (2001) propõe que as idades K-Ar são progressivamente mais jovens do oeste para leste.

As mineralizações auríferas do Supergrupo Rio das Velhas foram tentativamente datadas através de minerais interpretados como co-precipitados com o ouro, principalmente Pb-Pb em galena, arseno-pirita e pirita provenientes dos depósitos hospedados por BIF/Chert.

O método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, na datação de processos mineralizantes hidrotermais, é utilizado para datar fases minerais interpretadas como co-precipitadas com a deposição do elemento de interesse. Em depósitos auríferos tais como os do Supergrupo Rio das Velhas é comum a presença de sulfetos e minerais potássicos tais como micas, co-precipitados com a mineralização (e.g., Ladeira 1988). As principais limitações do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ na datação de mineralizações são: os resultados dependem da correta interpretação da relação entre os minerais datados e a mineralização; e o sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ é suscetível a rejuvenescimento parcial ou total ocasionado por eventos termais posteriores à mineralização.

O método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ foi utilizado por York *et al.* (1982), Smith *et al.* (2001) para datar inclusões potássicas em grãos de pirita. Philips & Miller (2006) utilizaram com sucesso o método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para datar micas inclusas em sulfetos interpretados como co-precipitados com mineralização aurífera em dois depósitos arqueanos (*greenstone belt*) do Cráton Yligarn, Austrália. Os resultados destes trabalhos indicam que grãos de sulfeto protegem suas inclusões contra rejuvenescimentos do sistema isotópico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ocasionados por eventos térmicos posteriores à sua cristalização.

No presente trabalho propõe-se datar, pelo método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, minerais hidrotermais interpretados como co-precipitados com a mineralização com o objetivo de:

- estabelecer idade mínima da mineralização aurífera nos depósitos Lamego e Morro Velho (fig. 4.1) e/ou a intensidade dos eventos térmicos que afetaram estes depósitos durante e após a mineralização.
- testar a aplicabilidade e limites da metodologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em grãos de mica inclusos em sulfetos co-precipitados com o ouro, utilizando este procedimento para datar as mineralizações.

Adicionalmente, objetiva-se determinar se há um padrão de distribuição do rejuvenescimento causado pelo evento Brasiliano no Quadrilátero Ferrífero, através da compilação em um mapa regional de dados K/Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ disponíveis na literatura (e dos dados obtidos neste trabalho).

6.GEOLOGIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Na região do Quadrilátero Ferrífero há registros de três grandes eventos tectônicos: Rio das Velhas, Paleoproterozóico e Brasiliano. Durante o evento Rio das Velhas ocorreu a deposição da Sucessão vulcanossedimentar *Greenstone Belt* Supergrupo Rio das Velhas (Chemale Jr. *et al.* 2004). A seguir será apresentada uma breve revisão das principais unidades e da evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero.

6.1.Arqueano

As rochas Arqueanas do Quadrilátero Ferrífero incluem os complexos metamórficos basais e o *Greenstone Belt* Rio das Velhas (e.g., Noce *et al.* 1998). Os grandes depósitos

auríferos da região, objeto principal deste estudo, estão hospedados nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, que ocupam aproximadamente vinte e cinco por cento área do Quadrilátero Ferrífero.

6.1.1. COMPLEXOS METAMÓRFICOS BASAIS

Os complexos metamórficos basais são constituídos por gnaisses, migmatitos (TTG's- tonalito-thronjemito-granodiorito) e intrusões de granitóides pouco ou não deformados. Estes complexos metamórficos basais ocorrem em domos: e.g. Domo de Bonfim, Belo Horizonte, Caeté, Bação, Santa Rita e Santa Bárbara (Teixeira *et al.* 2000, Vlach *et al.* 2003).

A feição de domos foi originada durante a orogenia Transamazônica, devido ao soerguimento destes complexos TTG (Mashak *et al.* 1997; Teixeira *et al.* 2000).

6.1.2. SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

O Supergrupo Rio das Velhas corresponde a uma sucessão metavulcâno sedimentar de Greenstone Belt (Almeida 1976, Schorscher 1976). Foi inicialmente descrito por Dorr (1969) como Série Rio das Velhas e posteriormente, tal como proposto por Lockzy & Ladeira (1976), adotou-se a terminologia Supergrupo.

É composto por rochas vulcânicas ultramáficas, máficas e intermediárias, com ocorrências menores de rochas vulcânicas félscicas, e rochas sedimentares químicas, clásticas e vulcanoclásticas. O contato entre o Supergrupo Rio das Velhas e os terrrenos TTG's é discordante. Há diversas propostas de divisão litoestratigráfica para o Supergrupo Rio das Velhas (Quadro I, Anexo I), e.g., Dorr (1969), Ladeira (1988), Lobato *et al.* (2001 a,b).

De acordo com Dorr (1969), o Supergrupo Rio das Velhas apresenta, da base para o topo: Grupo Nova Lima (indiviso) e Grupo Maquiné (composto pelas formações Palmital e Casa Forte). Os contatos entre os Grupos Nova Lima e Maquiné são descritos como tectônico (*thrust faults*), concordante, gradacional e discordante.

O Grupo Nova Lima é composto de rochas metavulcânicas caracterizadas por filitos, *metacherts*, clorita xistos e lentes de formações ferríferas fácies carbonato e carbonato com magnetita. Também ocorrem meta-conglomerados mal selecionados (com seixos arredondados de quartzo, filitos e xistos), meta-grauvacas, meta-arenitos e siltitos, sendo que em alguns locais há feições sedimentares preservadas (Dorr .1969; Lobato *et al.* 2001 a).

O grupo Maquiné é dividido em Formações Palmital e Casa Forte (da base para o topo). A Formação Palmital é constituída por quartzitos sericíticos e filitos quartzosos, sendo que alguns destes filitos quartzosos contêm lentes de quartzito.

A formação Casa Forte está em contato gradual com a formação Palmital. Os litotipos desta formação estão metamorfizados em fácies xisto verde (Dorr, 1969). A formação casa forte é constituída de conglomerados e *metacherts*. Os seixos destes conglomerados são de quartzitos e filitos com poucas ocorrências de xistos sericíticos e cloríticos, sendo que há fragmentos provenientes da erosão do Grupo Nova Lima.

A idade do Supergrupo Rio das Velhas vem da datação de amostras do vulcanismo félscico, na porção inferior do Grupo Nova Lima, datado em 2.772 ± 0.006 Ga (Machado et al. 1992), U/Pb 2792 ± 11 a 2751 ± 9 Ma U/Pb (Noce et al. 2005). A idade deste vulcanismo félscico, de acordo com Noce et al. (2005), é a idade da principal atividade magmática no *Greenstone belt* Rio das Velhas.

De acordo com Lobato et al. (2001a), as rochas sedimentares acima das rochas félscicas da porção inferior do Grupo Nova Lima foram depositadas após 2,772 Ga, e a idade mínima da deposição não está estabelecida.

6.2. Proterozóico

As coberturas supracrustais Proterozóicas do Quadrilátero Ferrífero são o Grupo Itacolomi os Supergrupos Minas e Espinhaço, sendo que o Supergrupo Espinhaço apresenta poucas exposições no Quadrilátero Ferrífero. Estas coberturas supracrustais foram intrudidas por rochas posteriores à sua deposição, sendo que estas intrusões afetaram termalmente as unidades do embasamento.

6.2.1. SUPERGRUPO MINAS

O Supergrupo Minas (Fig. 6.1) no Quadrilátero Ferrífero compreende as rochas hospedeiras das grandes mineralizações de ferro e sobrepõe, em contato tectônico, as unidades arqueanas. É dividido nos seguintes grupos (Dorr 1969):

- Grupo Caraça, onde predominam quartzitos e filitos
- Grupo Itabira, subdividido em formações Cauê, composta de Formações Ferríferas Bandadas tipo *Lake Superior*, e Formação Gandarela, composta por carbonatos dolomíticos.
- Grupo Piracicaba, caracterizado por intercalações de quartzitos e filitos com lentes carbonáticas,
- Grupo Sabará (Almeida et al. 2005), composto por metadiamicítitos, metarritmitos.

A unidade carbonática intermediária (formação Gandarela) fornece uma idade Pb-Pb 2.42 Ga (Babinski et al. 1995) e a formação Sabará contém zircões detriticos de 2,125 Ga (Machado et al. 1996).

| Idade | Supergrupo | Grupo | Formação | Litologia |
|--------------|----------------|------------|---------------------------------|--|
| Proterozoico | Minas | Itacolomi | Indiviso | orthoquartzitos, quartzitos (matriz ferruginosa), filitos quartzosos, filitos e conglomerados com seixos de itabiritos |
| | | Sabará | Indiviso | clorita-xistos, grauvacas, metatufos, conglomerados e quartzitos |
| | | Piracicaba | Barreiro | filitos e filitos grafíticos |
| | | | Taboões | orthoquartzitos |
| | | | Fecho do Funil | filitos, filitos dolomíticos e dolomito silicoso |
| | | | Cercadinho | quartzitos ferruginosos, quartzitos, filitos ferruginosos e dolomitos |
| | | Itabira | Gandarela | dolomitos, filitos dolomíticos e calcários |
| | | | Cauê | itabiritos, itabiritos dolomíticos e hematíticos |
| | | Caraça | Batatal | filitos e filitos grafíticos |
| | | | Moeda | quartzitos sericíticos, conglomerados e filitos |
| Arqueano | Rio das Velhas | Maquiné | Casa Forte | quartzitos, conglomerados, sericita-quarzo-xistos e filitos |
| | | | Palmital | Grauvacas, xistos carbonáticos, quartzitos imaturos, quartzo xistos, conglomerados |
| | | | Unidade Clástica | |
| | | | Unidade Metassedimentar Química | Sed. Químico carbonático, filitos, chert, grauvacas, xistos carbonáticos, quartzitos, conglomerados. |
| | | Nova Lima | Unidade Metavulcânica | Xistos verdes, metatufos, Metaultramáficas |
| | | | Complexos Metamórficos | Gnaisses bandados, gnaisses migmatíticos, e granitos |

Figura 6.1 Coluna Litoestratigráfica modificada e adaptada de Dorr (1969) e Ladeira (1988).

6.2.2. SUPERGRUPO ESPINHAÇO

O Supergrupo Espinhaço é uma seqüência metassedimentar do tipo *rift*, com espessas camadas de quartzitos e intercalações de meta-conglomerados e filitos. A idade inicial de abertura da bacia deposicional do Supergrupo Espinhaço é marcada por magmatismo básico datado em 1714 ± 5 Ma e magmatismo ácido datado em 1.7 Ga por $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em zircões (Silva 1993, Dussin et al. 1995).

6.2.3. GRUPO ITACOLOMI

O Grupo Itacolomi, em contato discordante com o Supergrupo Minas, é composto de quartzitos e quartzitos conglomeráticos. Em muitos locais os quartzitos apresentam estratificação cruzada e ocasionalmente há filitos lenticulares intraestratais, podendo ocorrer cianita nestes filitos. Hematita e martita são constituintes intraestratais comuns.

Alguns conglomerados polimíticos indicam que o Supergrupo Minas foi erodido antes e durante a sedimentação do Grupo Itacolomi (Dorr 1969).

6.3. Fanerozóico

As principais ocorrências de depósitos Fanerozoícos no Quadrilátero Ferrífero são as bacias sedimentares Fanerozóicas, preenchidas por argilitos, arenitos, diamictitos e sedimentos caoliníticos parcialmente intemperizados, formando bauxita, e.g., Bacia do Fonseca, Gandarela, Gongo Soco (Gorceix 1984). Estas bacias foram datadas através de

palinomorfos como sendo de idade Paleógena (Pinto & Regali, 1991), e podem estar associadas com atividade tectônica extensional Paleógena Sant'Anna *et al.* (1997), ou colapso associado ao intemperismo das formações ferríferas bandadas subjacentes (Ribeiro & Zavaglia 1998).

Outros exemplos de depósitos Cenozóicos do Quadrilátero Ferrífero são corpos de minério de ferro amplamente distribuídos pela região, provenientes de profundo intemperismo das Formações ferríferas Bandadas do Grupo Itabira (Dorr 1969), intemperismo este de idade Cretácea a Neógena (Spier *et al.* 2006 *In press*)

7.EVOLUÇÃO TECTÔNICA

De acordo com os dados geocronológicos, a evolução dos complexos TTG foi independente até o Neoarqueano, compreendendo processos de formação crustal e metamorfismo. Após estes eventos iniciais de formação e reciclagem crustal, os blocos TTG amalgamaram-se (Almeida 1981, Teixeira *et al.* 2000) e este novo bloco foi afetado por três (principais) eventos tectônicos: Rio das Velhas (2,78-2,7 Ga), Transamazônico (2,1-1,8 Ga), e Brasiliano (0,75-0,45 Ga).

7.1.Eventos de formação crustal

As seguintes idades são interpretadas como correspondentes aos primeiros eventos de formação crustal e metamorfismo na região do Quadrilátero Ferrífero:

- Baseado nos dados Sm-Nd; Rb-Sr; Pb-Pb, do migmatito Campo Belo Teixeira *et al.* (2000) interpretam: a idade de 3,205+/-17 Ga ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em grãos de zircão) como evidência da primeira formação crustal neste bloco (Teixeira *et al.* 1998), 3,047±25 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em grãos de zircão) como evento de migmatização, 2,97-2,85 Ga metamorfismo de alto grau (no granulito gnaisse de Lavras-Oliveira Passatempo) e 2,8 Ga cristalização do neossoma.

- No Gnaisse Alberto Flores (Domo de Bonfim), Carneiro *et al.* (1998) obtiveram concórdia $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ em núcleo e sobrecrecimento de grão de zircão em 3280 Ma. O núcleo revelou a idade de 2920 Ma, com sobrecrecimento em 2772±6 Ma.

- No granodiorito Caeté, Machado *et al.* (1992) obtiveram por U-Pb em zircão idades de 2776 +7/-6 Ma

- No Domo de Belo Horizonte (Gnaisse Belo Horizonte), a idade de 2,923 Ga (obtida por $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ em grão de zircão) é interpretada como reliquiar e a idade de 2,860 ±17 Ma (discórdia U/Pb em grãos de zircão e titanita para mesma rocha) é interpretada como idade de migmatização (Noce *et al.* 1998).

- Alguns zircões detriticos nos Supergrupos Minas e Rio das Velhas apresentam idades U/Pb entre 3,45 e 3,26 Ga (Machado *et al.* 1996; Noce *et al.* 2005), mostrando que existia uma crosta siática antiga, área fonte destes zircões detriticos (Teixeira *et al.* 1996).

7.2.Evento Rio das Velhas

É o primeiro evento amplamente registrado na região. No Quadrilátero Ferrífero ocorreu no intervalo entre 2,78 e 2,7 Ga (Machado & Carneiro 1992, Teixeira *et al.* 2000, Lobato *et al.* 2001). Durante este evento houve a formação do *Greenstone Belt* Rio das Velhas (Noce *et al.* 2005), intrusões graníticas (Noce *et al.* 1998), retrabalhamento da antiga crosta TTG, colisão de terrenos e concomitantemente metamorfismo regional em fácies anfibolito (Teixeira *et al.* 2000).

No campo, este evento é anterior à discordância angular entre os Supergrupos Rio das Velhas e Minas (Dorr 1969). De acordo com Carneiro *et al.* (1995), a fase inicial deste evento foi um retrabalhamento crustal: magmatismo bimodal (caracterizado pela intrusão de granitos), e o magmatismo félscio observado na porção superior do Supergrupo Rio das Velhas.

Granitos tardi a pós tectônicos, de afinidade cálcio alcalina (Brumadinho, ~2,703 Ga, Carneiro *et al.* 1998) e sub alcalina (Mamona, ~2,721 Ga, Teixeira *et al.* 2000), fornecem as idades da última deformação para este evento. As intrusões das seqüências máfico-ultramáficas Ribeirão dos Motas e de diques gabro-noríticos entre 2.75 e 2.66 Ga, são interpretadas como reflexo do regime intra-placa operante no fim do Arqueano, contemporâneo com as intrusões dos granitos tardi-orogênicos e Crátonização (Teixeira *et.al.* 2000).

7.3.Evento Paleoproterozóico

É o segundo evento amplamente registrado na região, denominado Transamazônico, ocorreu há 2.1-1.7 (Chemale *et al.* 1994). Durante o Paleoproterozóico as coberturas supracrustais Proterozóicas foram deformadas e o embasamento cristalino foi soerguido (Chauvet *et al.* 1994), dando origem à atual feição de domos. A deformação das rochas supracrustais deu origem às grandes estruturas siniformes que delimitam o Quadrilátero Ferrífero (Chemale Jr. *et al.* 1994). A trama estrutural mais penetrativa presente nas rochas supracrustais arqueanas e paleoproterozóicas do Quadrilátero Ferrífero é uma xistosidade plano axial e/ou uma superfície de transposição relacionada ao evento Transamazônico (Marshak & Alkmim, 1989), sendo que o metamorfismo associado com a superfície S₂ localmente atingiu fácies anfibolito (zona da estaurolita).

De acordo com Alkmim & Noce (2006), a orogenia Transamazônica no Quadrilátero Ferrífero é manifestada em dois estágios: durante o primeiro, uma fase de contração, ocorreram os dobramentos e cavalgamentos com vergência NNW (Marshak & Alkmim, 1989) que afetaram as rochas do Grupo Itacolomi e dos Supergrupos Minas e Rio das Velhas. O Quadrilátero Ferrífero preservaria a margem contra a qual colidiu o cinturão Mineiro (ENE-WSW).

Durante o segundo estágio, extensional, teriam se formado as estruturas de domos e bacias. Intrusões que provocaram auréolas de metamorfismo de contato no Supergrupo Rio das Velhas, com indicações de duas gerações de monazita, datadas por U-Pb-Th, uma inclusa em grãos de granada, com $2,04 \pm 0,02$ Ga e outra, em grãos isolados, datada em $\sim 2,08 \pm 0,02$ Ga (Vlach *et al.* 2003) indicam o pico metamórfico deste evento, que de acordo com Machado *et al.* (1992); Noce *et al.* 1997, está contido no intervalo de idade 2.065-2.035 Ga.

7.4. Evento Mesoproterozóico

Este evento é descrito na porção norte do Cráton São Francisco como Ciclo Espinhaço. O auge de deformação e metamorfismo desse ciclo ocorreu entre 1300 e 1000 Ma (Brito Neves *et al.* 1980); ou em 1500 Ma (Cordani *et al.* 1992), gerando a faixa dobrada Espinhaço. Carneiro (1992), sugere baseado em idades Rb/Sr em rocha total (1.3-1.0 Ga) e K-Ar em biotitas (1.1-0.7 Ga), provenientes de amostras do complexo metamórfico Bonfim, que este evento também pode ter ocorrido na região do Quadrilátero Ferrífero. Idades K-Ar e Rb/Sr no intervalo definido para este evento, na região do Quadrilátero Ferrífero, também foram identificadas por Tassinari (informação verbal) bem como no presente trabalho.

7.5. Brasiliano

O último evento registrado na região, ocorreu principalmente durante o período Neoproterozóico. Durante este evento houve a colisão das faixas móveis que delimitam o Cráton São Francisco. O Brasiliano está registrado, predominantemente, na porção E do Quadrilátero Ferrífero, onde há um decréscimo do grau metamórfico regional de E para W e inúmeras idades K-Ar e Rb-Sr neoproterozóicas (e.g., Herz 1970; Cordani *et al.* 1980; Endo 1997; Noce 2001).

De acordo com Noce (1995), o evento Brasiliano no Quadrilátero Ferrífero não foi responsável por nenhum retrabalhamento tectônico significativo (remobilização isotópica e estruturas penetrativas) da região, sendo responsável por reativação de antigas zonas de falha. Alkmim & Marshak (1998) apontam que estruturas e clivagens associadas ao evento Brasiliano (S_3 ?) interceptam e sobrepõem estruturas Transamazônicas na porção leste do distrito. Baltazar & Pedreira (1996), afirmam que uma superfície incipiente de crenulação/fratura (S_3) de direção NS e/ou EW é observada em algumas partes do Quadrilátero Ferrífero.

Dados tais como: idades K-Ar (~ 540 Ma) obtidas em grãos de biotita (Carneiro *et al.* 1998) no Gnaisse Alberto Flores (Domo de Bonfim); idades U/Pb $2124 \pm$ Ma, K/Ar 1000 ± 22 Ma, 730 ± 25 Ma, Rb-Sr 664 ± 80 Ma e 484 ± 37 Ma provenientes do Plutônio Alto Maranhão (Noce *et al.* 1998), apontam que os eventos Neoproterozóicos rejuvenesceram alguns

sistemas isotópicos, mas não foram de intensidade e/ou tempo de atuação suficiente para rejuvenescer os sistemas com mais alta temperatura de fechamento, tais como U/Pb.

Sendo assim, na região central e W do Quadrilátero Ferrífero também há registros do evento Brasiliano. Carneiro *et al.* (1998) sugerem que os eventos pós arqueanos nesta região foram de intensidade abaixo de fácies anfibolito, sendo necessários estudos mais detalhados, tais como o presente trabalho, para determinar a intensidade destes eventos no Quadrilátero Ferrífero.

8. MINERALIZAÇÕES

Os principais recursos minerais encontrados no Quadrilátero Ferrífero são ferro, ouro, manganês, bauxita e gemas (topázio, água marinha e esmeralda). Os grandes depósitos de ferro são hospedados pelas rochas das formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas, especialmente a formação Cauê. Os depósitos de ouro são hospedados principalmente por rochas do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas). Os depósitos de bauxita e manganês ocorrem como produto de intemperismo e os depósitos de pedras preciosas estão associados a veios pegmatíticos.

8.1 Ouro

As mineralizações auríferas do Quadrilátero ferrífero ocorrem em rochas do Supergrupo Minas e Rio das Velhas, a idade da gênese dos grandes depósitos do Supergrupo Rio das Velhas não está estabelecida: são propostas idades desde o Arqueano até o Neoproterozóico para a gênese destes depósitos (Chauvet *et al.* 1994, Zucchetti e Baltazar 1998, Lobato *et al.* 2001a,b).

Depósitos de ouro tipo *paleoplacer* ocorrem nos meta-conglomerados da base Formação Moeda, Grupo Caraça (Supergrupo Minas). Estes depósitos de ouro estão associados a depósitos de urânio (Ladeira, 1988).

Também ocorrem no Quadrilátero Ferrífero depósitos de ouro paladiado, associados às formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas. Estes depósitos auríferos são conhecidos como Jacutinga e consistem em veios quartzosos mineralizados, portadores de Au-Pd-Pt e hematita espelcular, não sulfetados, intrusivos nas Formações Ferríferas Bandadas do Grupo Itabira, principalmente próximos ao contato entre Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas. O ouro destes depósitos apresenta granulometria grossa e normalmente é preto devido à presença de Pd-O e oxi-hidróxidos (Ladeira 1988), propõe uma origem epigenética, associada a metassomatismo para estes depósitos. O depósito mais famoso de Jacutinga no Quadrilátero Ferrífero é o depósito Gongo Soco.

Olivo *et al.* (1995) dataram por isótopos de Pb amostras de ouro, quartzo e hematita espelcular da mina Cauê e obtiveram isócrona Pb-Pb em 1.83 ± 0.10 Ga, correspondendo ao

evento Paleoproterozóico. Em contrapartida, a partir de relações de campo, Varajão *et al.* (2000) inferem que a mineralização de “Jacutinga” está relacionada ao evento Brasiliano.

8.1.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A GÊNESE DOS DEPÓSITOS AURÍFEROS DO SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS

Os principais depósitos auríferos do Supergrupo Rio das Velhas são hospedados por rochas do Grupo Nova Lima, especialmente as formações ferríferas bandadas (e.g. Cuiabá, São Bento) ou por uma unidade conhecida como Lapa Seca (e.g., Lamego, Morro Velho).

Há uma grande controvérsia quanto à sua origem, sendo propostos modelos epigenético (e.g., Ladeira 1988 , Lobato *et al.* 2001), singenético (e.g., Ladeira 1988, Bernasconi 1985) e singenético com remobilizações posteriores (e.g., Ladeira 1988). As classificações propostas para os principais depósitos estão sumarizadas no Anexo I b.

A própria origem da unidade Lapa Seca é controversa, sendo proposto por Lobato *et al.* 2001b que esta unidade é um horizonte de rochas vulcânicas félsicas hidrotermalmente alteradas e por De Witt *et al.* (1996) que é uma fácie carbonática de formação ferrífera, de origem sedimentar.

A hipótese de origem singenética para os depósitos auríferos do Supergrupo Rio das Velhas é de que estes foram depositados por centros exalativos submarinos, onde o gradiente geotérmico seria responsável pela circulação de água através do assoalho oceânico. Esta água teria ocasionado lixiviamento do ouro e demais metais do assoalho oceânico, depositando-os junto aos sedimentos carbonáticos e ferruginosos da interface assoalho oceânico/água. Os autores que propõe esta hipótese baseiam-se em evidências tais como: relação estratiforme dos depósitos concordantes com as formações ferríferas bandadas, grande continuidade de horizontes ricos em arsênio e mineralizados em ouro, e ausência de corpos intrusivos (que possam ter sido área fonte de fluidos mineralizantes) associados à mineralização.

A hipótese de origem epigenética é de que grandes estruturas crustais controlam o acesso de fluidos mineralizantes, e que lineamentos associados a estas estruturas controlam a distribuição dos depósitos auríferos. Estas estruturas teriam sido conduto de fluidos hidrotermais, e as características químicas das rochas hospedeiras agiram como fator controlante da deposição do ouro dissolvido nestes fluidos. Os autores que propõe esta hipótese excluem a de origem singenética para estes depósitos baseados nos seguintes argumentos: as mineralizações auríferas do Quadrilátero Ferrífero ocorrem em diversos tipos de rocha hospedeira, os grandes depósitos aparentemente estão associados a lineamentos provocados por grandes falhas regionais, não há significativas concentrações em metais básicos (o que é comum em sistemas convectivos submarinos), veios de quartzo mineralizados são comuns.

A hipótese de origem singenética com remobilizações posteriores é de que houve uma concentração inicial associada à centros exalativos em assoalho oceânico e posterior remobilização associada com metassomatismo.

8.2.Ferro Manganês e Bauxita

Os grandes depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero estão nas formações ferríferas bandadas do Supergrupo Minas, no Grupo Itabira (principalmente na formação Cauê). Estes minérios são localmente denominados de Itabirito. Os Itabiritos ocorrem em camadas com espessuras de até 250m e devido a processos de enriquecimento posterior à deposição destas formações ferríferas bandadas, apresentam altos teores de Fe (média de 68.5% na Mina do Pico, Spier *et al.* 2003).

Os depósitos de manganês, tais como o do Morro da Mina em Conselheiro Lafaiete, ocorrem associados à alteração de rochas básicas (Ughein e Oliveira, 2000). Os depósitos de manganês da borda ocidental da Serra do Espinhaço são constituídos por óxidos de manganês e ferro, formados a partir de alteração laterítica e processos de concentração supergênica associados aos ciclos geomorfológicos: Sul-americano, Velhas e Paraguaçú. (Dussin, 1983)

Os depósitos de bauxita ocorrem em bacias (e.g. bacia do Fonseca e Gandarela), como produto de intemperismo dos sedimentos depositados nas mesmas.

8.3.Gemas

As gemas no Quadrilátero Ferrífero estão associadas principalmente à veios de pegmatitos. As principais gemas da região são esmeralda (berilo verde), topázio, e água marinha (berilo azul).

Os famosos depósitos de topázio imperial ocorrem em veios quartzosos com dolomita, florencita (aluminofosfato de Ce) e rutilo, intrusivos em dolomitos alterados da Formação Gandarela (Gandini 1994). De acordo com Kwitk e Oliveira (2004) estes veios são co-genéticos aos veios auríferos da pedreira Antônio Pereira (flanco nordeste do anticlinal de Mariana).

Vasconcelos (informação verbal) datou estes pegmatitos mineralizados em topázio imperial pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e obteve idades Brasilianas para os mesmos.

Os depósitos de esmeralda também ocorrem em veios pegmatíticos, em rochas da seqüência vulcanossedimentar Supergrupo Rio das Velhas, formações ferríferas bandadas Paleoproterozóicas do Supergrupo Minas, e em pegmatitos associados a corpos graníticos (Suíte Borrachudos).

9.GEOCRONOLOGIA

A região do Quadrilátero Ferrífero foi afetada por múltiplos eventos tectono termais que atuaram com diferentes intensidades, desde o Arqueano até o Paleógeno. Para determinar as idades desta evolução tectônica são utilizados diferentes sistemas isotópicos.

A abordagem das idades por diferentes sistemas isotópicos para determinar evolução tectônica é necessária, pois um evento tectono termal pode rejuvenescer um sistema e não afetar outro que apresente maior temperatura de fechamento. A intensidade da perturbação causada pelos eventos tectono termais nos sistemas isotópicos depende de fatores tais como:

- Condições de pressão.
- Tempo de atuação dos eventos termais.
- Taxa de resfriamento do último evento termal.
- Interação com soluções aquosas.

Os principais avanços na geocronologia do Quadrilátero Ferrífero foram obtidos através da datação dos sistemas U/Pb, Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁶, Sm/Nd, Rb-Sr, K⁴⁰-Ar³⁹, Ar⁴⁰/Ar³⁹. O sistema (U-Th)/Pb em grãos de zircão é o menos susceptível à perturbações, e as idades mais antigas da região do Quadrilátero Ferrífero foram obtidas por este método.

9.1. Datação de Mineralizações

Uma das abordagens para datar mineralizações auríferas são geocronômetros de minerais co-precipitados com o ouro, tais como sulfetos. Nos casos em que a datação direta não é possível, é estabelecida uma cronologia relativa dos eventos, através da datação das rochas hospedeiras e/ou rochas que pós datam a mineralização. A seguir serão brevemente expostos os principais sistemas isotópicos aplicados à datação de mineralizações auríferas.

9.2. Metodologias Aplicáveis a Datação de Mineralizações Auríferas

A maneira mais precisa de datar as mineralizações auríferas é datar o próprio ouro. Outros minerais, co-precipitados com o ouro também podem ser datados, revelando idades precisas da mineralização. Os minerais comumente associados às mineralizações de ouro são sulfetos tais como galena, pirita, calcopirita e arsenopirita.

A única metodologia aplicável para datar diretamente o ouro é Re-Os. Alguns sulfetos como pirita e arsenopirita contêm baixas concentrações de Os radiogênico, favorecendo a obtenção de dados geocronológicos confiáveis. Os isótopos Re e Os são altamente calcofílicos (afinidade com sulfetos) e siderofílicos (afinidade com Fe), em oposição a outros sistemas tais como Rb-Sr, Sm-Nd e (U-Th)/Pb, que apresentam comportamento litofílico. O comportamento geoquímico calcofílico faz com que os isótopos Re e Os sejam incorporados durante a cristalização dos minerais sulfetados. Molibdenita é o

mineral mais comumente utilizado nas datações por Re-Os, pois apresenta alta concentração de Re e baixa concentração de ^{187}Os .

Outra metodologia, mais comumente utilizada do que o método Re-Os para datar sulfetos é o método Pb-Pb. Esta técnica tem restrições quanto à aplicação em depósitos Fanerozóicos, pois as concentrações de U em relação ao Pb nos sulfetos é baixa. Sendo assim, em depósitos Fanerozóicos, não houve tempo suficiente para gerar Pb radiogênico proveniente do decaimento do U. Praticamente todo o Pb contido nos minerais é o Pb da composição do mineral e do fluido hidrotermal no momento da cristalização.

Já em depósitos Pré Cambrianos, onde houve tempo suficiente para formar Pb proveniente de decaimento de U, já que o U, embora em baixas concentrações, não é completamente excluído de alguns minerais tais como pirita e calcopirita. Contudo, ao datar estes minerais deve-se assumir que o Pb e o ouro são derivados da mesma fonte, transportados e depositados a partir do mesmo fluido hidrotermal. Em geral esta situação é verdadeira, pois Pb, Cu, e Zn têm comportamento semelhante em fluidos hidrotermais (especialmente em depósitos magmáticos hidrotermais e depósitos ricos em Pb em ambientes sedimentares). Para sistemas auríferos, sistemas pobres em Pb, ou aqueles que envolvem a interação de múltiplas fontes de fluidos em um sistema hidrotermal, a fonte dos isótopos pode ser diferente, pois o fluido pode ter vindo de diferentes locais ao longo dos condutos.

U/Pb (zircão, monazita, badeleita, xenotimo, etc.), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (muscovita, biotita, anfibólitos), K-Ar (muscovita, biotita, anfibólitos) são amplamente aplicados na datação de minerais interpretados como contemporâneos à deposição do ouro. Por darem minerais resultantes de alteração hidrotermal, estes métodos dependem da determinação correta entre a relação do mineral a ser datado e o minério, pois as rochas hospedeiras podem ter alteração pré ou pós mineralização, não relacionadas com a mesma.

9.3. Datação de Depósitos Auríferos Orogênicos

Métodos geocronológicos de alta resolução têm sido aplicados com sucesso na determinação das idades de mineralizações auríferas Arqueanas e Proterozóicas (e.g., Kirk *et al.* 2002; Bierlenein *et al.* 1999). Dentre as metodologias de maior sucesso estão os sistemas isotópicos de Re-Os (em sulfetos), U/Pb (zircão, monazita, badeleita, xenotimo, etc.), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (muscovita, biotita, anfibólitos), aplicados a fases minerais interpretadas como contemporâneas à deposição do ouro.

9.3.1. EXEMPLOS MUNDIAIS

Os depósitos auríferos orogênicos estão presentes em praticamente todos os blocos cratônicos onde rochas Neo Arqueanas a Paleoproterozóicas estão expostas e.g., Western Australia, África do Sul, Índia, América do Sul, América do norte. De acordo com Goldfarb

(2005) os intervalos 2.8-2.55 Ga e 2.1-1.8 Ga compreendem épocas globais de concentração de ouro.

O Cráton Yilgarn (*western Australia*) é caracterizado por terrenos *Greenstone belt*, compreendendo rochas vulcânicas deformadas e metamorfizadas, e sedimentos intrudidos por granitos e por rochas vulcânicas félsicas (Wittt 1993 *apud* Phillips and Miller 2006). Nesta província, as mineralizações auríferas são hospedadas pelas rochas dos terrenos *Greenstone Belt* e geralmente pós datam metamorfismo.

Stein & Markey (2003), dataram o distrito aurífero Leonora (Cráton Yilgarn, Austrália), pelo método Re-Os em cristais de molibdenita associados com a deposição do ouro. Os experimentos foram conduzidos em amostras de dois diferentes depósitos no mesmo distrito, os dados obtidos (2760 ± 3 Ma) foram coerentes com os dados de U-Pb em grãos de zircão, provenientes de intrusões associadas às mineralizações neste mesmo distrito.

Phillips & Miller (2006), dataram os depósitos Mount Charlotte e Kanowna Belle (Cráton Yilgarn, *western Australia*) por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em grãos de muscovita inclusos em cristais de pirita. No depósito Kanowna Belle, as idades obtidas (2625 ± 9 Ma) são coerentes com idades de mineralização obtidas por U-Pb SHRIMP em cristais de zircão e Pb-Pb em cristais de galena ~ 2.63 Ga (Ross *et al.* 2004). De acordo com os autores, os grãos de pirita podem servir como “armadura”, impedindo, que os grãos de muscovita neles inclusos sejam rejuvenescidos por eventos posteriores à mineralização.

Kerr *et al.* (2006), compararam a precisão dos métodos Re-Os e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em mineralização aurífera estilo *Stockwork* do depósito Rattling Brook na porção oeste de Newfoundland. Neste trabalho, para amostras dos mesmos depósitos foram conduzidas análises de Re-Os em grãos de pirita interpretados como co-precipitados com a mineralização aurífera, e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em grãos de biotita e hornblenda provenientes de diques intrusivos, pré e pós mineralização. Os dados de Re-Os mostraram-se imprecisos, devido à baixa concentração de Os nos grãos de pirita (315 ± 47 Ma/ 327 ± 58 Ma). Os dados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mostraram-se mais precisos (417.6 ± 2 Ma, 412.9 ± 4.25 Ma) e contradizentes com os dados Re-Os. Os autores favorecem os dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ como corretos na interpretação da idade desta mineralização.

Os depósitos auríferos em conglomerados do Supergrupo Witwatersrand no Cráton Kaapvaal, África do Sul foram datados por Kirk *et al.* (2002) por Re-Os em ouro e sulfetos. Os dados obtidos em ambas análises (3.01 ± 0.11 Ga para o ouro e 2.99 ± 0.11 Ga para a pirita) são semelhantes entre si e concordam com as idades obtidas por isótopos de Pb em zircões detriticos (3.08 Ga).

9.3.2. QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Os autores que interpretam os depósitos auríferos do Quadrilátero Ferrífero como exemplo de mineralização singenética propõe idades Arqueanas para estes depósitos (idade de deposição da rocha hospedeira). Os autores que interpretam estes depósitos como epigenéticos ou singenéticos com remobilização posterior (e.g., Chauvet *et al.* 1994; Zucchetti e Baltazar 1998; Lobato *et al.* 2001a,b) não apresentam consenso quanto à idade da mineralização. Sendo assim, diferentes autores propõe diferentes idades, desde o Arqueano até o Neoproterozóico para a origem destes depósitos.

No Quadrilátero Ferrífero o principal evento de mineralização aurífera, embora de idade ainda controversa, relaciona-se ao final do Arqueano, entre 2,7 e 2,6 Ga, com remobilizações posteriores associadas aos ciclos orogênicos Paleoproterozóico e Brasiliano.

Em relação às idades das mineralizações, Lobato *et al.* (2001a), propõe que após um evento tectono metamórfico e magmático de 2,78 a 2,7 Ga, teria ocorrido a formação de mineralização aurífera em torno de 2,67 Ga, reportada por De Wittt *et al.* (1994) para a mineralização do depósito São Bento. Silva (2006), caracterizou três eventos mineralizantes entre 2,7 e 2,5 Ga para a Mina Cuiabá. Thorpe *et al.* (1984) indicam que possíveis eventos de mineralização de Pb, próximos a 2,4 afetaram algumas mineralizações da região. Nas mineralizações auríferas dos depósitos Cuiabá e Córrego do Sítio, Silva (2006) e David (2006) mostraram a atuação da orogenia Neoproterozóica, remobilizando os sulfetos mineralizados. No trabalho de caracterização isotópica do depósito Córrego do Sítio, hospedado em metapelito no topo do grupo Nova Lima, David (2006) demonstrou que eventos relacionados aos ciclos orogênicos Paleoproterozóico e Brasiliano produziram a circulação de fluídos hidrotermais nas rochas da seqüência tipo *greenstone belt* Rio das Velhas, remobilizando o ouro das formações Ferríferas e reprecipitando, de forma disseminada, nas rochas sedimentares mais novas.

As datações dos minerais interpretados como co-precipitados com o ouro são principalmente Pb-Pb em galena, arseno-pirita e pirita, nos depósitos hospedados por BIF/Chert em rochas félsicas. A idade mais antiga foi obtida no depósito Bela Fama (Pb/Pb em galena), 2710 Ma, interpretada por Thorpe *et al.* (1984) como idade da rocha hospedeira. A idade mais jovem (1.935 Ga) foi obtida por Pb-Pb em galena. Estas datações não são conclusivas para estabelecer a idade das mineralizações, pois os resultados variam de 2.7 a 1.9 Ga. De Wittt *et al.* (1996) obtiveram 2.650 Ma pelo método Pb-Pb para arsenopirita e pirita do depósito São Bento.

10. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras analisadas no presente trabalho foram coletadas pelo doutorando Márcio André Sales, Prof. Dr. Rod Holcombe e pelo Prof. Dr. Paulo Vasconcelos. O método inicial e essencial deste trabalho foi a análise estrutural de campo: estes dados foram fornecidos pelos Profs. Rod Holcombe e Paulo Vasconcelos, e pelo doutorando Márcio

Sales. Durante a etapa de campo, foram feitos trabalhos de mapeamento das minas visitadas, amostragem e mapeamento regional.

As amostras datadas foram caracterizadas petrograficamente sob luz refletida e transmitida. Para a determinação das fases minerais não reconhecidas sob microscopia óptica comum, foram utilizados *microssonda eletrônica* e *microscópio eletrônico de varredura*. Os dados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ utilizados neste trabalho foram coletados em três etapas: a primeira etapa consistiu de dados de minerais e rochas analisados por Márcio Sales; a segunda etapa consistiu de dados obtidos em micas e anfibólios selecionados para confirmação dos resultados da primeira etapa; e a terceira etapa consistiu de grãos de sulfetos (com micas inclusas) selecionados e analisados pela autora desta tese. Os dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ produzidos neste trabalho, foram compilados juntamente com dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e K-Ar disponíveis na literatura, em um mapa regional do Quadrilátero Ferrífero.

10.1.Amostragem

Em terrenos com múltiplas deformações, o controle estrutural das amostras coletadas é essencial para que os dados geocronológicos produzidos sejam contextualizados.

A amostragem, efetuada no ano de 2004 pelo doutorando Márcio Sales, Prof. Dr. Rod Holcombe e Prof. Dr. Paulo Vasconcelos foi acompanhada de mapeamento geológico local (do depósito Lamego) e regional (iniciado pelo Prof. Rod Holcombe em 2001). As amostras utilizadas neste trabalho provém do depósito Morro Velho e da zona mineralizada do depósito Lamego (unidade Lapa Seca), sendo o critério de seleção das amostras coletadas no depósito Lamego a representatividade em relação às estruturas, ausência de alteração intempérica, e ocorrência de minerais susceptíveis à datação pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

10.2.Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi a primeira etapa realizada neste trabalho. Para este levantamento foram utilizados os acervos da biblioteca do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e da biblioteca de Engenharia e Ciências da Terra da Universidade de Queensland, além de sites disponíveis na Internet.

Do acervo da biblioteca da Universidade de São Paulo foram utilizados principalmente periódicos nacionais, resumos de congressos e teses. O acervo da biblioteca da Universidade de Queensland foi especialmente utilizado para consulta a periódicos internacionais e livros texto. Os sites especialmente consultados foram os sites da Revista Brasileira de Geociências e bancos de dados tais como GEOREF e Web of Science.

10.3.Preparação de amostras

Os procedimentos de preparação de amostras para análise de microscópio eletrônico de varredura, microssonda eletrônica e isótopos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ são semelhantes, e consistiram nas seguintes etapas (Fig. 10.1);

- seleção visual dos minerais/ região da amostra em relação à deformação onde serão feitos os cortes para confecção de seções delgadas e polidas;
- confecção das seções delgadas e polidas;
- fragmentação das amostras a uma granulometria de 1-5 mm;
- banho em ultra-som, com a finalidade de retirar materiais finos. Para isso, as amostras são acondicionadas em bêqueres e estes preenchidos até a metade com água destilada e álcool etílico (50%). Os bêqueres são banhados em ciclos de aproximadamente 5 minutos, a solução é renovada e a amostra lavada novamente, até que a solução após o banho de ultra-som apresente aspecto transparente. Na última lavagem é utilizado apenas álcool etílico;
- secagem ao ar ou sob lâmpada comum, sendo as amostras acondicionadas em bêqueres destampados (deve-se evitar que as amostras sejam expostas a temperaturas superiores a 60°C);
- seleção visual com auxílio de lupa binocular, onde foram selecionados aproximadamente 20 grãos. Os grãos selecionados foram divididos em duas alíquotas, uma para análises de microssonda eletrônica e outra para análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Os grãos de sulfeto selecionados foram utilizados para análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e para confecção de blocos polidos, que foram estudados sob microscópio óptico e utilizados para análises microscópio eletrônico de varredura. Em algumas amostras, para facilitar a manipulação dos grãos durante a seleção visual, estes foram imersos em álcool etílico (nestes casos as amostras foram novamente secas ao ar ou lâmpada).

10.4.Caracterização mineralógica e estrutural

As caracterizações mineralógicas, compostonais e contextualização das deformações são essenciais para a seleção dos minerais a serem submetidos à análise geocronológica pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Além de essenciais na seleção, estes parâmetros também são utilizados na interpretação dos dados geocronológicos.

10.4.1.CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA

As amostras de mão foram descritas e documentadas fotograficamente com câmera fotográfica digital comum modelo *cybershot Sony 5.1 Mega pixels*.

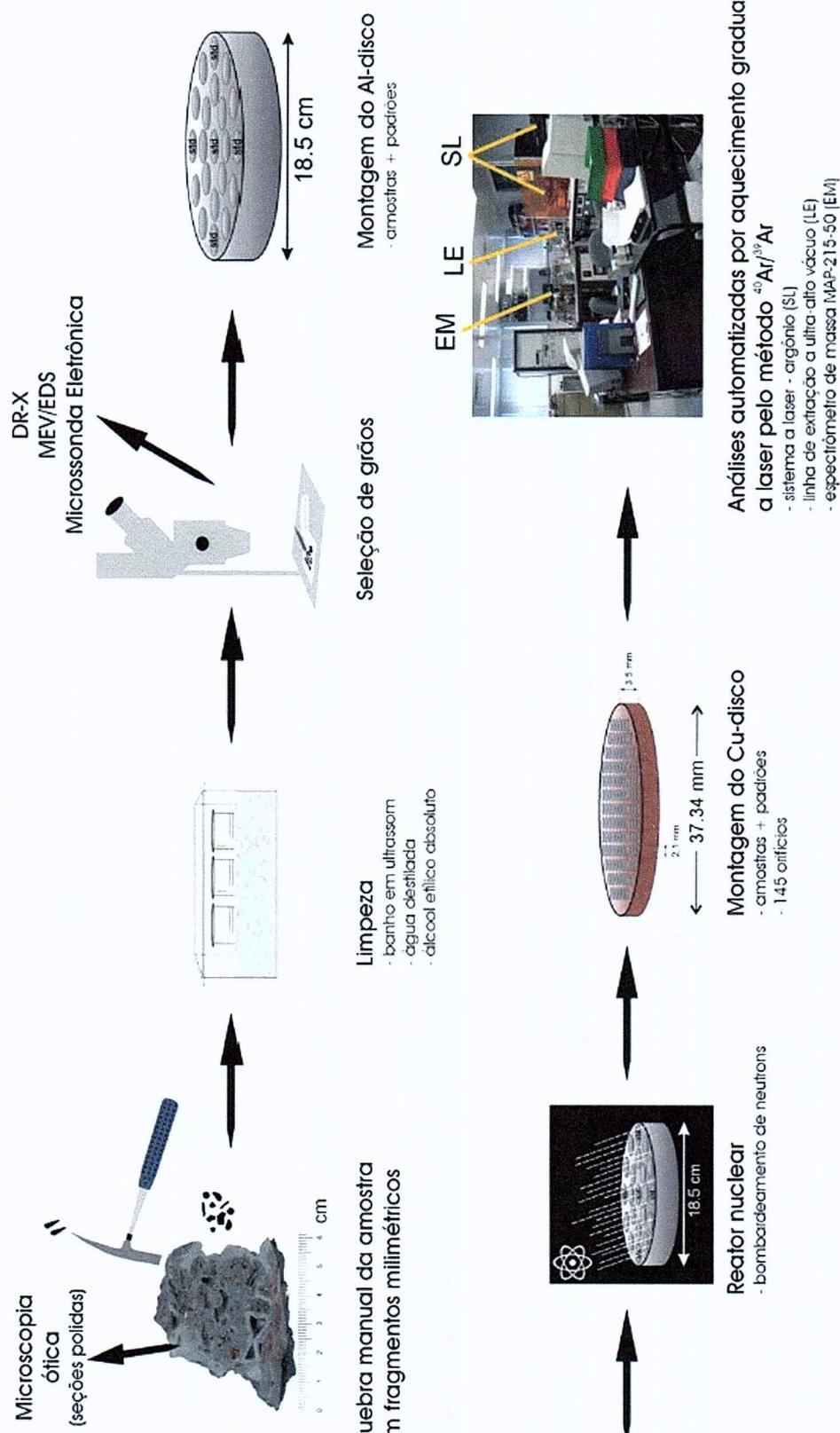


Figura 10.1: Fluxograma de preparação de amostras para datação por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Figura extraída de Carmo (2005).

10.4.2.CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

As amostras analisadas por seções delgadas foram preparadas de acordo com o procedimento descrito em 10.3, sendo que as seções polidas e delgadas foram confeccionadas no laboratório de preparação de amostras da Universidade de Queensland.

O procedimento de preparação de amostras para as análises em microssonda eletrônica e microscópio eletrônico de varredura foi o mesmo: depois de preparadas de acordo com o procedimento descrito em 10.3, as amostras foram acondicionadas em discos de acrílico. Estes discos foram polidos e cobertos com filme de carbono (o filme de carbono tem por finalidade evitar que a superfície sendo analisada seja eletricamente carregada durante a análise).

10.4.2.1.Microssonda eletrônica

As análises de microssonda eletrônica foram feitas no Centro de Microscopia e Microanálises da Universidade de Queensland. As amostras analisadas por microssonda eletrônica foram amostras de micas esverdeadas, sendo que a preparação deu-se de acordo com o descrito na seção 10.4.2. O equipamento (JEOL 8800L) é interconectado à plataforma PC, sendo seus resultados automaticamente convertidos em planilhas de Microsoft Excel versão 2003.

10.4.2.2.Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Este procedimento analítico foi utilizado para análise composicional e textural das inclusões nos grãos de pirita selecionados para datação pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. As análises foram feitas no equipamento JSM 6460LA, disponível no centro de micro análises da *University of Queensland*.

O microscópio utilizado é equipado com um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), permitindo análises químicas de elementos entre carbono e urânio. A estação deste equipamento utiliza sistema integrado em plataforma *Windows 2000*.

10.4.2.3.Microscopia óptica

Das amostras previamente coletadas em campo foram selecionadas as mais representativas das deformações e com minerais passíveis de serem datados por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Destas amostras selecionadas foram confeccionadas dezoito seções delgadas e polidas de onze amostras.

Estas amostras foram estudadas sob microscópio óptico modelo Nikon Eclipse ME 600 (disponível do laboratório de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ da University of Queensland) equipado com luz refletida, transmitida e equipamento de captura digital de imagens acoplado (câmera Polaroid DMC2 interligado à plataforma Windows).

O estudo microscópico permitiu a identificação dos minerais presentes nas amostras, texturas, granulação e da relação entre as gerações de minerais e as foliações.

10.5. Análise Geocronológica pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Os métodos de datação K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ têm sido amplamente aplicados na datação de processos ígneos, metamórficos ou hidrotermais. Geralmente estes métodos são utilizados para determinar o resfriamento de uma rocha ou mineral. A seguir será apresentada uma introdução ao princípio destes métodos, sendo o texto abaixo fundamentado de acordo com as publicações: Vasconcelos (1999 a,b), McDougal & Harrison (1999), Faure & Mensing (2005) e Carmo (2005).

O elemento potássio tem número atômico 19, é um metal alcalino, altamente reativo, oitavo elemento mais abundante na crosta continental (McDougall & Harrison, 1999) e ocorre em diversos minerais. São conhecidos três isótopos naturais deste elemento: ^{39}K , ^{40}K , ^{41}K e a abundância relativa entre eles é (^{39}K :93.2581 ^{40}K :0.01167 e ^{41}K :6.7302, Garner *et al.* 1985b *apud* McDougall & Harrison 1999). Os isótopos ^{39}K e ^{41}K são estáveis e o isótopo ^{40}K radioativo. O decaimento do ^{40}K produz 89,5% de ^{40}Ca (através de decaimento β , com emissão de um elétron) e 10,5% de ^{40}Ar , através da captura de um elétron extra nuclear, resultando na emissão de um neutrino e transformação de um próton nuclear em um nêutron.

O elemento argônio tem número atômico 18, é um gás nobre, inerte, terceiro elemento mais abundante na atmosfera terrestre, onde corresponde a 0.93% do total de gases presentes. São conhecidos cinco isótopos deste elemento: ^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{38}Ar e ^{39}Ar , ^{40}Ar . Os isótopos ^{40}Ar , ^{38}Ar , ^{36}Ar são estáveis e a abundância relativa entre eles na atmosfera terrestre é: 99,6%, 0,0632% e 0,3364%, respectivamente. Os isótopos ^{37}Ar e ^{39}Ar são radioativos: ^{37}Ar é produzido principalmente pelo decaimento de ^{40}Ca e tem meia vida de 35 dias. O ^{39}Ar é produzido pela interação entre raios cósmicos (esta reação só ocorre fora da atmosfera terrestre) com o elemento ^{40}Ar e tem meia vida de 269 anos (Faure & Mensing, 2005).

10.5.1. PRINCÍPIO BÁSICO DE DATAÇÃO ATRAVÉS DO SISTEMA ISOTÓPICO $^{40}\text{K}/^{40}\text{AR}$

O princípio básico de datação através do sistema isotópico $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ (e por conseguinte $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) baseia-se no decaimento radioativo do ^{40}K para ^{40}Ar . O argônio tem raio atômico maior que o elemento pai (K) e é um gás nobre, portanto não participa das

ligações químicas nos minerais. Este gás produzido tende a ficar preso nos retículos cristalinos dos minerais onde se forma. Quando um mineral está se cristalizando, há troca de Ar com o meio, até que o resfriamento atinja uma temperatura onde cessam-se estas trocas, chamada de temperatura de fechamento. Quando esta temperatura é atingida, o ^{40}Ar proveniente do decaimento radioativo do ^{40}K começa a se acumular. Se este mineral for reaquecido, em temperatura e tempo suficiente para dilatar seu retículo cristalino, o Ar acumulado pode ser total ou parcialmente liberado. Sendo assim, o método K-Ar aplicado em rocha total ou minerais separados quase sempre fornecerá a idade aparente mínima referente ao último evento térmico (Kinoshita, 1976). Algumas premissas são necessárias para que o método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e K/Ar possam ser aplicados para determinar a idade de formação de um mineral:

- após o último evento, o mineral permaneceu fechado para perdas ou ganhos de ^{40}Ar radiogênico ou de K;
- excesso de Ar não foi incorporado ao retículo cristalino do mineral potássico;
- os valores de Ar total foram corretamente corrigidos para a presença de Ar atmosférico incorporado durante a cristalização do mineral;
- a constante de decaimento do ^{40}K é conhecida ($5.543 \times 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$) é constante ao longo do tempo.

10.5.2.RAZÃO K/CA

A discriminação entre ^{40}Ar radiogênico e ^{40}Ar atmosférico é feita através do isótopo ^{36}Ar . Nesta discriminação é assumido que todo ^{36}Ar é atmosférico e que a razão ^{40}Ar (atmosférico) e ^{36}Ar é constante, com valor 295.5. Contudo, ^{36}Ar também pode ser gerado durante a irradiação artificial, a partir da interação de nêutrons com isótopos de Ca. Os parâmetros de irradiação são ajustados para minimizar a produção de ^{36}Ar derivado do decaimento de Ca e maximizar a produção de ^{39}Ar derivado do decaimento radioativo de ^{39}K . Em amostras com baixa porcentagem de Ca e em amostras com grande concentração de ^{40}Ar radiogênico (amostras antigas) a razão entre ^{40}Ar radiogênico e ^{40}Ar atmosférico é alta e os valores de ^{36}Ar não influenciam no cálculo das idades.

Por outro lado, existem limitações na datação de amostras jovens (<10Ma) com baixas razões K/Ca. A baixa quantidade de ^{40}Ar radiogênico em relação à quantidade total de ^{40}Ar e o ^{36}Ar gerado pelo decaimento de Ca podem levar a erros nos cálculos das idades.

Sendo assim, em amostras jovens (<10Ma, McDougall & Harrison 1999) ricas em Ca e pobres em K, tais como plagioclásio, anfibólito e rocha total onde a razão K/Ca é baixa (<0.001), devem ser feitas correções para ^{36}Ar : A razão K/Ca também permite identificar se há mais de um tipo de reservatório em análises de rocha total.

Todas as amostras analisadas no presente trabalho são mais antigas que 10 Ma e, portanto, as razões K/Ca não são irrelevantes na obtenção e interpretação dos dados.

10.5.3.COMO A RELAÇÃO ENTRE ESTES ISÓTOPOS É UTILIZADA PARA DATAR ROCHAS?

Para medir a quantidade, em moles, de ^{40}Ar , a amostra é fundida, liberando todo o Ar contido. Este gás é analisado por de espectrometria de massa. Uma data (tempo, T), é determinada através de:

$$T = (1/\lambda_c) \ln (1 + (\lambda/\lambda_c) ({}^{40}\text{Ar}/{}^{40}\text{K})) \text{ equação (1)}$$

Onde:

λ_c é a constante de decaimento de ^{40}K para ^{40}Ar ($5.81 \times 10^{-9} \text{ anos}^{-1}$)

λ é a constante de decaimento total para ^{40}K ($5.543 \times 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$)

${}^{40}\text{Ar}$ é o número de moles total de ^{40}Ar radiogênico, calculado a partir do total de ^{40}Ar medido por espectrometria de massa e corrigido para valores atmosféricos de ^{40}Ar .

${}^{40}\text{K}$ é o numero total de moles de ^{40}K , calculado a partir do número total de moles de K medidos por espectroscopia de absorção atômica ou *flame* fotometria.

O método de datação ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ pode ser entendido como uma sofisticação do método K/Ar. O princípio básico destes métodos é o mesmo, mas no método ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ a maneira de determinar a quantidade inicial de ^{40}K e a quantidade de ^{40}Ar radiogênico são diferentes.

Em um reator nuclear, as amostras a serem analisadas são irradiadas, por feixe de nêutrons rápidos. A intensidade de radiação capturada na reação nuclear artificial é medida através de amostras padrão, de idade conhecida, que são irradiadas juntamente com as amostras a serem analisadas.

A irradiação provoca a mutação de ^{39}K para ^{39}Ar tanto na amostra quanto no padrão. A quantidade de ^{39}Ar produzido no padrão, e a quantidade de ^{40}Ar contida neste padrão (medidas num espetrômetro de massa) são utilizadas para calcular o fator J. A quantidade de ^{39}Ar medida na amostra de idade desconhecida é utilizada, assumindo que a abundância relativa dos isótopos de K (${}^{39}\text{K}:93.2581$, ${}^{40}\text{K}:0.01167$ e ${}^{41}\text{K}:6.7302$) é constante, para determinar a quantidade de ^{40}K na amostra. Sendo assim, a razão ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$, que é proporcional à razão ${}^{40}\text{Ar}/{}^{40}\text{K}$, é utilizada no cálculo da idade da amostra (t), através da seguinte equação:

$$t = (1/\lambda) \ln [({}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}) \cdot J + 1] \text{ equação (2)}$$

Onde :

- λ é a constante de decaimento do ^{40}K ($5.543 \times 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$),

- ${}^{40}\text{Ar}$ é o número de moles total de ^{40}Ar radiogênico, calculado a partir do total de ^{40}Ar medido por espectrometria de massa, corrigido os valores atmosféricos e de interferência

nucleogênica. A correção atmosférica é feita assumindo que todo o ^{36}Ar é atmosférico, adotando-se a relação conhecida: $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$ (McDougall & Harrison, 1999).

^{39}Ar é o total de ^{39}Ar gerado pela reação $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$, também medido por espectrometria de massa e corrigido para interferências nucleogênicas.

-J é o parâmetro de irradiação, medido empiricamente pela análise de amostras adotadas como “monitores de fluência de nêutrons” com idade conhecida.

O cálculo do fator J dá-se através da seguinte equação:

$$J = (e^{-\lambda t} - 1) / ({}^{40}\text{Ar}^* / {}^{39}\text{Ar}_k) \quad (\text{equação 3})$$

Onde,

-t é a idade do padrão;

- λ é definido na equação 2;

- ${}^{40}\text{Ar}$ é a quantidade total de ${}^{40}\text{Ar}$ presente no padrão;

- ${}^{39}\text{Ar}$ é a quantidade de Ar nucleogênico gerado pela reação ${}^{39}\text{K}(n,p){}^{39}\text{Ar}$ no padrão.

Uma das vantagens do método ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ em relação ao método K/Ar é que no ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ podem ser aplicados diferentes procedimentos analíticos: fusão total ou aquecimento gradual (*step heating*). Pelo procedimento de fusão total a amostra é fundida, liberando todo o Ar, e a razão ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ obtida corresponde a uma análise K-Ar.

No aquecimento gradual (*step heating*), a amostra é aquecida em temperaturas pré-determinadas e progressivamente maiores. Este aquecimento provoca a difusão do Ar. O gás contido nas bordas dos grãos é liberado e o gás contido no centro vai sendo gradualmente difundido para as bordas até ser liberado. O resultado destas análises (*steps*) é uma série de idades aparentes. Se o sistema permaneceu fechado desde a sua cristalização, as idades de cada uma destas análises (*steps*), deve ser constante.

Nos casos onde houve perturbação e Ar radiogênico foi perdido de alguns locais do mineral e não de outros, as razões ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ de gás liberado em diferentes temperaturas pode variar, e a história termal do grão refletirá no comportamento do espectro das idades aparentes. Sendo assim, o gás liberado a altas temperaturas terá maiores razões ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$, correspondendo aos *sites* mais retentivos, onde menos Ar foi perdido.

Os resultados deste aquecimento gradual podem ser interpretados através de três métodos (Fig 10.2):

1) gráficos (XY) de % cumulativa de Ar liberada versus idade aparente (são calculadas para cada etapa usando a equação (2), sendo que a temperatura de liberação do Ar é progressivamente a direita do eixo x. A idade integrada é a idade aparente calculada a partir do total de gás liberado pela amostra. Na ausência de *recoil*, esta idade deve corresponder à idade K-Ar. Na ausência de **recoil*, perda e contaminação de Ar, a idade integrada deve corresponder à idade platô.

Idade platô é definida como degraus consecutivos que juntos representam mais de 50% do total de ^{39}Ar liberado pela amostra, sendo que, com um nível de confiabilidade de 95% não deve haver diferenças de idades entre quaisquer dois degraus consecutivos (Fleck *et al.* 1977). O espectro dos diagramas de aquecimento por etapas fornece informações sobre a história de retenção de K e Ar na amostra, presença ou ausência de contaminantes e de *recoil*.

Recoil (simplificadamente) é um fenômeno que ocorre durante a irradiação: os átomos de Ar podem ser deslocados de seus locais originais, provocando uma concentração maior do elemento em outros locais, principalmente nas regiões próximas à superfície dos minerais

2) isócrona. É utilizado em casos onde a razão $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, assumida como 295.5 não é correta, devido à incorporação de excesso de ^{40}Ar ou ^{36}Ar durante a cristalização do mineral. Nas idades obtidas por isócronas, são plotados diagramas de correlação $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$.

Quando uma amostra armazena Ar em diferentes locais cristalográficos, com diferentes razões de Ar atmosférico, nucleogênico e radiogênico, o resultado de diagramas $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ versus $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ serão retas, obtidas pela relação:

$$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m = (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_c + (^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_k \cdot (^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_m \text{ equação (3)}$$

Onde:

m são as razões medidas

c são razões de contaminação de Ar (excesso de ^{36}Ar ou ^{40}Ar)

k identifica os isótopos de argônio produzidos por potássio nas amostras (Faure 1986).

A inclinação destas retas é a razão $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_k$, que pode ser usada na equação 2 para calcular a idade da amostra. Sendo assim, contaminações de Ar podem ser identificadas pela discrepância entre o intercepto $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ e o valor atmosférico, 295.5. Quando há excesso de ^{40}Ar , a razão inicial é显著mente maior que 295.5. Quando há excesso de ^{36}Ar , a razão é menor que 295.5.

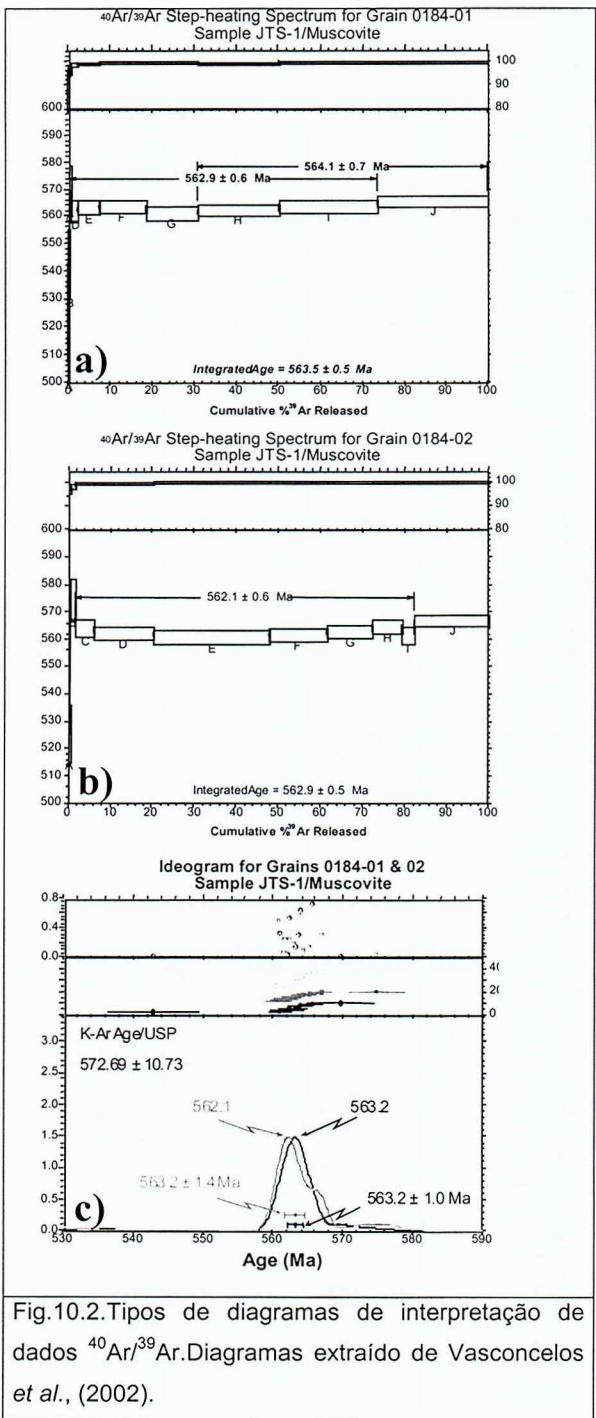


Fig.10.2.Tipos de diagramas de interpretação de dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.Diagramas extraídos de Vasconcelos et al., (2002).

3) ideogramas. Ideogramas são diagramas de probabilidade de idade, plotados com a premissa de que os erros em uma idade têm uma distribuição gaussiana. Na construção de um diagrama de probabilidade de idade, a soma dos valores da curva gaussiana individual para cada idade é plotada. Uma das desvantagens deste método de interpretação de dados geocronológicos é que estes ideogramas não consideram a quantidade de gás liberada em cada etapa. Sendo assim, uma idade representada por um degrau ou uma seqüência destas idades que apresenta (m) quantidade (s) insignificante (s) de gás mas com idade analítica precisa, pode levar à uma representação de uma estimativa de alta probabilidade falsa para a amostra. Uma das maneiras de identificar verdadeiros picos de

alta probabilidade e erros mascarados no método do ideograma é comparar os picos dos ideogramas com a idade platô da amostra. (fig. 10.2) Se os picos de alta probabilidade corresponderem à idades platô bem definidas, o ideograma identifica corretamente a idade mais provável de precipitação da amostra. Se os picos de alta probabilidade não tiverem idades platô correspondentes, estes picos são erros mascarados pelo método.

10.5.4. PROCEDIMENTOS DAS ANÁLISES GEOCRONOLÓGICAS $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Os procedimentos para análise geocronológica pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ consistem em preparação das amostras; irradiação; análises da abundância relativa entre os isótopos de Ar através de um sistema acoplado de raio laser, linha de extração, espectrômetro de massa; e redução e interpretação dos dados obtidos.

10.5.4.1. Preparação das amostras e Irradiação:

A preparação inicial das amostras deu-se de acordo com o procedimento indicado no item 10.3. Após a etapa de separação manual dos grãos (seção 10.3), foram selecionados grãos de mica branca, anfíbolio e grãos de sulfeto. Os grãos escolhidos foram os de maior granulometria possível, com o máximo de 2mm (tamanho dos orifícios do disco de cobre (fig. 10.4) utilizado na análises do laboratório $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do *University of Queensland*).

Este critério de seleção de grãos foi adotado devido à difusão de argônio. Sabendo-se que as amostras passaram por uma múltipla história de aquecimento é provável que os grãos de menor granulometria tenham sido mais rejuvenescidos em relação aos grãos de maior granulometria devido à difusão do argônio.

Os minerais alvo a serem analisados nos sulfetos foram as micas neles inclusas. Para minimizar a presença de grãos de mica que podem ter trocado Ar com a matriz (e.g., localizados nas periferias dos grãos de sulfeto), foram selecionados grãos de sulfeto sem faces cristalinas (fig. 10.3; Anexo III, prancha de fotos 1).

Os grãos selecionados foram acondicionados em discos de alumínio (fig 10.4) previamente identificados (tampa e fundo) e com marco de referência, para mapeamento das amostras inseridas. Juntamente com os grãos a serem irradiados, nas posições s (fig 10.5) foram colocados grãos de amostras padrão, de idade conhecida, com a finalidade de monitorar a fluênciia de nêutrons no reator, sendo este monitoramento utilizado para calcular o fator J.

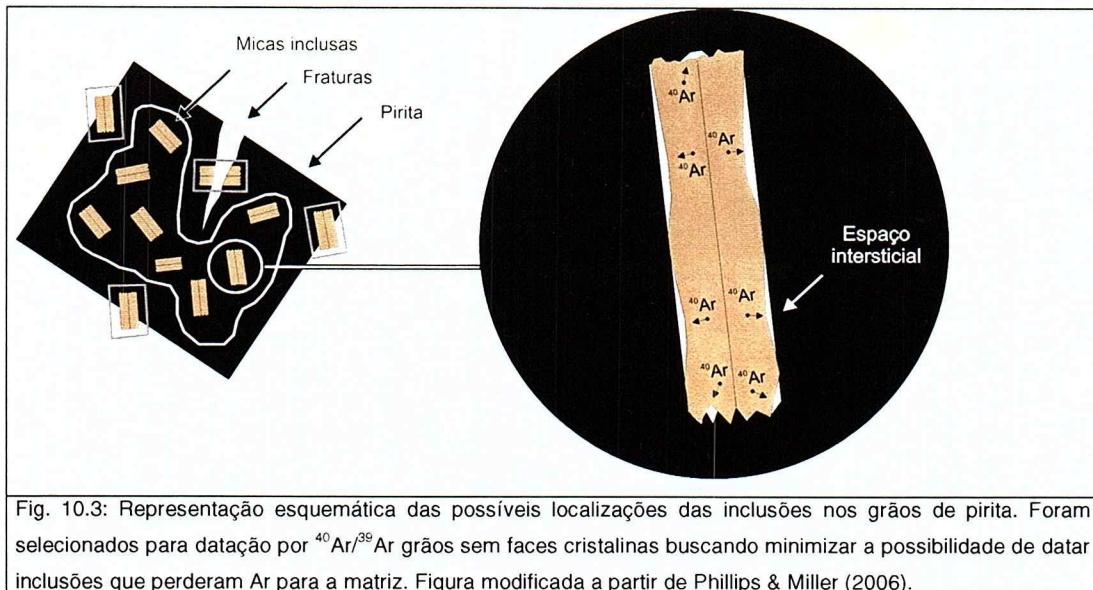


Fig. 10.3: Representação esquemática das possíveis localizações das inclusões nos grãos de pirita. Foram selecionados para datação por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ grãos sem faces cristalinas buscando minimizar a possibilidade de datar inclusões que perderam Ar para a matriz. Figura modificada a partir de Phillips & Miller (2006).

O disco contendo as amostras foi envolvido em papel alumínio e empilhado juntamente com outros cinco discos, novamente envolvidos em papel alumínio e encapsulados à vácuo. Estes discos foram enviados ao reator Triga, na Universidade *Oregon State*, Estados Unidos, onde foram irradiados por quatorze horas.

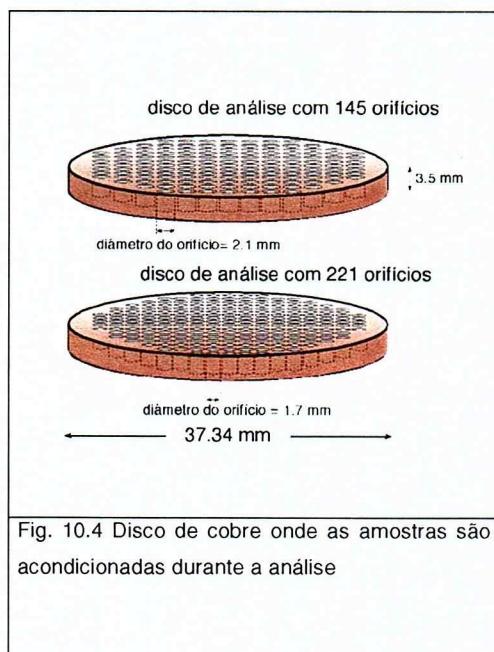


Fig. 10.4 Disco de cobre onde as amostras são acondicionadas durante a análise

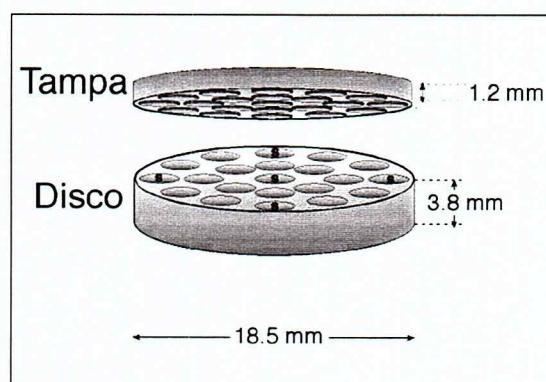


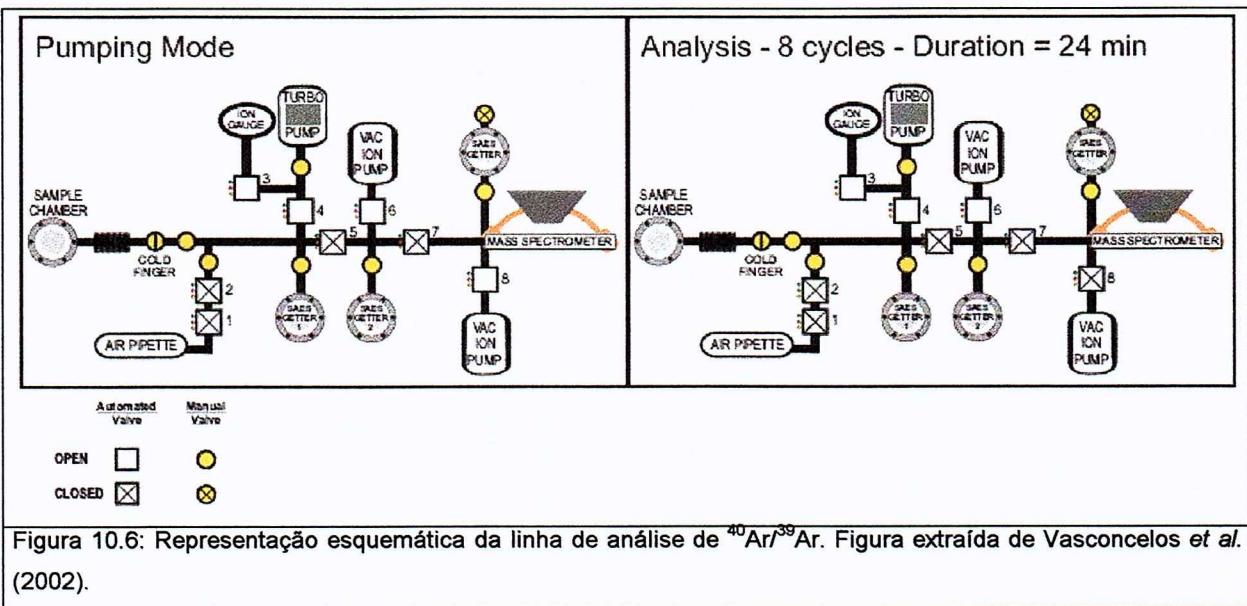
Fig. 10.5 Disco de alumínio onde as amostras são acondicionadas para irradiação.

10.5.4.2. Análise de isótopos:

As amostras irradiadas foram repousadas por trinta dias, para que o nível de radioatividade fosse reduzido antes da análise (amostra radioativa continua sofrendo decaimento). Após o tempo de descanso, os grãos são retirados dos discos de alumínio e colocados em discos de cobre, com cento e quarenta e cinco orifícios de 2.1 mm (Fig. 10.4).

Os discos de cobre são acondicionados na primeira etapa da linha de análise (Fig. 10.6) que consiste em:

- 1) pré-aquecimento, onde o disco de cobre contendo as amostras é aquecido à temperatura de aproximadamente 200°C com a finalidade de eliminar voláteis e matéria orgânica.
- 2) o disco de cobre é acondicionado em ultra-vácuo e, através de raio laser de intensidade controlada, a amostra é aquecida por dois minutos e o gás liberado entra na linha de limpeza.
- 3) a limpeza do gás inicia-se com a passagem do mesmo por um tubo (*cold finger*, Fig.) de temperatura -132°C . Nesta etapa gases como CO_2 , H_2O , hidrocarbonetos e outros gases ativos são congelados, restando gases nobres.
- 4) eventuais gases ativos não congelados no *cold finger* são destruídos e adsorvidos pela bomba *getter* ($400\text{-}500^{\circ}\text{C}$) à qual os gases são expostos por um período de 5 minutos, sendo em seguida aberta a válvula 5, permitindo que o gás passe para a segundo estágio da linha de extração.
- 5) no segundo estágio da linha de extração o gás é novamente exposto a uma bomba *getter* (25°C) por um período de 2 a 5 minutos.
- 6) é aberta a válvula 7, o gás expande no espectrômetro de massa e após 45 segundos a válvula é fechada; inicia-se a análise.
- 7) no espectrômetro de massa os átomos de argônio são separados por um campo magnético de intensidade controlada, ajustado a cada 20 segundos para a detecção de cada um isótopos individualmente. Os isótopos são medidos em um multiplicador de elétrons.
- 8) os isótopos detectados pelo coletor provocam uma corrente elétrica que é amplificada e corrigida para efeitos de discriminação pela comparação com amostras de ar atmosférico (*air pipettes*) e corrigidos os valores de *background* (brancos), sendo esta comparação feita automaticamente pelo programa *mass spec*, versão 7.1.1 de Alan L. Deino.



10.5.4.3.Redução de dados e significado das idades:

Após a análise, os dados dos isótopos de Ar são corrigidos para argônio atmosférico, argônio produzido pelo decaimento de Ca e fator J (gerado pela irradiação artificial).

Estes dados então são plotados (através do programa *Mass Spec*, versão 7.1.1 de Alan L. Deino) em isócronas, porcentagem de argônio liberado *versus* idade aparente ou diagramas de densidade de probabilidade.

Para as amostras analisadas neste trabalho foram plotados diagramas de porcentagens de argônio liberado *versus* idades aparentes, sendo estes diagramas os mais adequados para amostras que passaram por múltipla história termal.

10.6.Compilação em mapa regional de dados K-Ar e $^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$

Os dados K-Ar e $^{40}\text{Ar}^{39}\text{Ar}$ disponibilizados na literatura foram plotados em um mapa regional do Quadrilátero Ferrífero. Este mapa foi confeccionado no programa *Map Info* versão 8.5. Os mapas regionais disponíveis nas publicações das quais os dados foram extraídos foram escaneados em escaner de mesa comum, transformados em arquivos tipo *raster* e as escalas foram corrigidas para a escala do mapa base (previamente escaneado e transformado em imagem tipo *raster*).

Após este procedimento, os dados foram todos compilados em um único arquivo.

10.7.Produção de textos e figuras:

Todos os textos e figuras deste trabalho foram produzidos utilizando os seguintes softwares disponibilizados pela Universidade de Queensland:

Microsoft Word, versão 2003, Microsoft Word for Mac versão 2005, Microsoft Excel versão 2003, Microsoft Excel for Mac versão 2005, Microsoft Power Point versão 2003, Free Hand versão 2005 e Corel Draw versão 10.

11.DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Esta monografia é o resultado das atividades relacionadas à disciplina trabalho de formatura, cursada durante o ano letivo de 2006. Este trabalho foi apresentado em três principais etapas, sendo estas: apresentação do projeto inicial (março de 2006), relatório parcial (agosto de 2006) e apresentação da monografia final (novembro de 2006). Adicionalmente, será realizada na primeira semana de dezembro do ano corrente apresentação oral pública deste trabalho. O quadro 11.1 sumariza as etapas desenvolvidas e suas relações temporais

A primeira etapa foi o levantamento bibliográfico preliminar, utilizando principalmente o acervo da biblioteca do Instituto de Geociências USP e o acervo disponível na *Internet*.

Esta primeira etapa foi desenvolvida durante os meses de março a abril. O levantamento bibliográfico consistiu principalmente em aquisição de informações sobre geologia regional, estrutural e geocronologia do Quadrilátero Ferrífero bem como de princípios do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

Houve atividade de campo na região de *Mount Isa*, Austrália, durante a primeira quinzena de julho, com a finalidade de aperfeiçoar de técnicas de campo, bem como familiarizar a aluna com “problemas geológicos” semelhantes aos envolvidos no projeto do trabalho de formatura.

A parte analítica do trabalho, desenvolvida na *University of Queensland*, envolveu a preparação de amostras para análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; plotagem e interpretação de análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; descrição de seções delgadas e blocos polidos; e análises de microscopia eletrônica e microssonda.

As análises petrográficas foram importantes para determinar a mineralogia e contexto temporal dos minerais presentes na diferentes foliações. A petrografia permitiu a identificação de duas fases deformacionais penetrativas superimpostas, com cristalização de minerais e uma terceira fase de deformação não penetrativa. Estes resultados foram essenciais na interpretação dos resultados geocronológicos.

Para observar as inclusões dos grãos de sulfeto a serem datados por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, foram feitas análises de microscopia eletrônica. Destas amostras foram selecionadas três, sendo estas datadas por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. As análises de inclusões de sulfetos consistiram em um dos objetivos deste trabalho, que foi avaliar a aplicabilidade da metodologia de datação de sulfetos para datar mineralizações.

Com o intuito desenvolver as técnicas necessárias à interpretação dos resultados geocronológicos, a aluna participou do curso de microtectônica oferecido na *University of Queensland*. Este curso tem por objetivos aprimorar o entendimento de processos deformacionais que produzem as estruturas e texturas em zonas de deformação; técnicas de análise de estiramento e cinemática em rochas metamórficas; texturas que ocorrem em regime de alto e baixo *strain* em zonas de cisalhamento; de micro estruturas em relação ao tempo da deformação e à processos metamórficos; e mecanismos de deformação e inferência de condições físicas (P,T, taxa de deformação, fluidos) a partir de microestruturas.

A compilação de dados K-Ar disponíveis na literatura em um mapa do Quadrilátero Ferrífero permitiu a observação de uma tendência de distribuição de idades.

As dificuldades encontradas no presente trabalho foram a não visitação da área e a grande quantidade de dados não disponíveis em periódicos de circulação internacional. Contudo, estas dificuldades não trouxeram prejuízos críticos ao desenvolvimento do trabalho proposto.

| | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Levantamento Bibliográfico | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Preparação de amostras para datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| Petrografia macroscópica | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| Petrografia microscópica | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| Etapa de campo | | | | | | ■ | | | | | |
| Interpretação de dados | | | | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ | |
| Análises de microscopia e microssonda eletrônica | | | | | | | ■ | | | | |
| Confecção do relatório parcial | | | | | | ■ | ■ | | | | |
| Plotagem de idades K-Ar em mapa regional | | | | | | | | ■ | ■ | | |
| Confecção do relatório final | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | |
| Apresentação do relatório final | | | | | | | | | | | ■ |
| Quadro 11.1: Distribuição da relação temporal das atividades realizadas | | | | | | | | | | | |

12.RESULTADOS OBTIDOS

Os principais dados produzidos neste trabalho consistem em idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de amostras da unidade Lapa Seca e em amostras de um dique de básico interpretado como intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego. As amostras da unidade Lapa Seca foram coletadas nos depósitos Morro Velho e Lamego. Todas as amostras datadas neste trabalho têm uma múltipla história de deformação e cristalização de minerais (Anexo III, pranchas de fotos II, III, IV). Sendo assim, associado aos dados geocronológicos, foi feito um estudo micro-estrutural. Os minerais não identificados sob microscópio óptico comum foram analisados por microscopia eletrônica e microssonda eletrônica. Como complemento à interpretação das informações geocronológicas obtidas, visando determinar se há uma relação geográfica de rejuvenescimento isotópico causado durante o evento Brasiliano, os resultados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtidos neste trabalho foram plotados juntamente com dados K-Ar disponíveis na literatura em um mapa regional do Quadrilátero Ferrífero.

12.1.Dique básico intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego

Neste trabalho foram datadas duas amostras deste litotipo. O dique básico foi observado intrudindo corpo mineralizado no alvo Cabeça de Pedra mapeado em superfície (Sales e Holcombe, 2004) e na zona plano axial da megaestrutura (inferida a partir de testemunhos de sondagem) do depósito Lamego.

As amostras datadas correspondem à porção externa do dique, sendo que o mesmo apresenta núcleo e as bordas foliadas de acordo com a foliação mapeada regionalmente como S₂ (Sales & Holcombe 2004).

O estudo destas amostras sob microscópio petrográfico (Anexo III, prancha de fotos II) permitiu as seguintes observações:

- nas secções delgadas destas amostras predomina uma foliação S_2 marcada pela orientação de cristais de actinolita.
- nos *microlitons* desta foliação principal (S_2) há porfiroblastos de hornblenda sendo substituída por actinolita, com cristais de hornblenda/actinolita em alto ângulo em relação à S_2 , além de arcos poligonais de actinolita (resquícios da S_1).
- os porfiroblastos de hornblenda sendo substituídos por actinolita, com alto ângulo em relação à foliação principal (S_2) são resquícios de uma foliação anterior, que pode ser magmática ou S_1 .
- nas porções mais cloritzadas ocorrem carbonato e sulfetos precipitados em uma fase de hidrotermalismo tardio, posterior à deformação principal S_2 .
- a porção mais externa da borda do dique encontra-se intensamente cloritzada, predominando a foliação S_2 , onde grãos de clorita são pseudomorfos dos grãos de actinolita.

12.1.1. ANÁLISES $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DO DIQUE BÁSICO INTRUSIVO NA ZONA MINERALIZADA DO DEPÓSITO LAMEGO

Das duas amostras deste dique foram analisados seis grãos de actinolita (três da amostra MAS-31 e três da amostra MAS-32). O procedimento de separação destes grãos foi a quebra da amostra e seleção visual dos grãos. Sendo assim, não é possível distinguir qual das diferentes gerações de actinolita (identificadas na petrografia) foi separada para datação.

Os três grãos da amostra MAS-31 (Anexo II A) apresentam diferentes idades platô (2220 ± 40 Ma, 2570 ± 50 Ma e 2440 ± 70 Ma) e diferentes idades integradas (2340 ± 40 Ma, 2550 ± 50 Ma, 2560 ± 50 Ma).

Nenhum dos três grãos da amostra MAS-32 (porção externa do dique) apresenta idade platô, sendo as idades integradas destes grãos 2540 ± 30 , 2590 ± 30 e 2580 ± 30 Ma (Anexo II B). Estas idades são estatisticamente semelhantes às idades obtidas em dois dos grãos da amostra MAS-31. Embora não apresentem idade platô, dois grãos da amostra MAS-32 definem pseudo-platôs com idade aproximada de 2500 Ma. A idade mínima do dique é aproximadamente 2600 Ma, indicada pela idade aparente dos degraus mais antigos.

12.2. Amostras da unidade Lapa Seca

As amostras da unidade Lapa Seca foram coletadas nas zonas mineralizadas dos depósitos Lamego e Morro Velho. Foram feitas datações por rocha total, grãos de mica e grãos de mica inclusos em grãos de pirita, resultando em diferentes resultados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

12.2.1. MICA BRANCA

As amostras MAS-16, MAS-17, e MV1 apresentam mica branca de granulação fina a média como principal mineral formado durante a foliação principal mapeada como S₂ (Sales & Holcombe, 2004). Nas amostras MAS-1, MAS-13, MAS-16 e MAS-17 (Anexo III, prancha de fotos III), o acamamento sedimentar é nítido nas seções delgadas e nas amostras de mão, caracterizado por variações granulométricas e compostionais.

As amostras MAS 4, 03b e 13 apresentam bandas de segregação mineral associadas à zonas de intenso cisalhamento. O intenso cisalhamento oblitera o acamamento sedimentar, predominando segregação mineral associada à dissolução por pressão. Contudo, nas zonas de deformação menos intensa, onde a concentração de minerais micáceos é menor, predominando grãos de quartzo e carbonato, são observados *microlitons* de uma foliação anterior, identificada como S₁. Esta foliação pretérita é identificada em sombras de pressão associadas principalmente aos grãos de sulfetos.

Nas amostras MAS-16 e MAS-17 ocorre uma leve clivagem de crenulação, caracterizando uma terceira deformação (supostamente Brasiliana), contudo não há cristalização de minerais durante a terceira deformação. Sendo assim, em todas as amostras datadas por grãos de mica branca predomina a foliação S₂, associada à precipitação dos grãos de sericita/ mica branca datados.

Os diagramas de aquecimento, aonde são plotadas em porcentagens de Ar acumulada *versus* idades aparentes para os grãos de micas das amostras da unidade Lapa Seca, apresentam os seguintes resultados:

- os três grãos da amostra MV1 (Anexo II C) apresentam padrão de sela. Os vales destes diagramas estão em aproximadamente 550 Ma e os degraus com idade mais antiga atingem aproximadamente 750 Ma. As idades integradas para estes grãos variam de 669 ±4 Ma a 564 ±3 Ma. Sendo assim, esta amostra fornece uma idade mínima de 550 Ma e máxima de 750 Ma.

- as amostras MAS-16 e MAS-17 (Anexo II E e F) são caracterizadas por espectro ascendente de idades aparentes, sendo que as idades integradas destas amostras variam entre 1020±6 Ma (MAS-16) e 1105±27 (MAS-17) Ma. A idade mínima indicada pela amostra MAS-16 é 550-600 Ma, e a idade mínima da amostra MAS-17 é 600-700 Ma. As idades máximas indicadas pelas amostras MAS-16 e MAS-17 são 1200 e 1400 Ma, respectivamente.

11.2.2. MICAS VERDES

Além das micas brancas foram datadas amostras de mica de aspecto esverdeado, encontradas nas amostras MAS-56, MAS-57, MAS-63, MAS-70. A composição destas micas

foi determinada através de microscopia eletrônica, sendo os resultados destas análises sumarizados na tabela 9.1

Os resultados destas análises demonstram que a cor esverdeada das amostras MAS-57 e MAS-70 pode estar associada com os teores de V e Cr destas amostras. Estas micas ricas em Cr e V tem sido utilizadas como guia exploratório de mineralizações auríferas epigenéticas em terrenos *greenstone belt* arqueanos, acreditando-se que sua origem esteja associada à remobilização destes elementos, provenientes de rochas máficas e ultramáficas (Pan & Fleet 1992)

| | Cr2O3 | V2O3 | BaO | K2O | CaO | TiO2 | Na2O | MgO | Al2O3 | SiO2 | MnO | FeO | NiO | CuO | Total |
|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| MAS 70 | 0.96 | 0.13 | 0.13 | 6.48 | 0.02 | 0.15 | 0.72 | 0.22 | 38.76 | 51.09 | 0.00 | 0.39 | 0.02 | 0.03 | 99.10 |
| MAS 70 | 0.87 | 0.13 | 0.15 | 6.09 | 0.03 | 0.13 | 0.66 | 0.23 | 37.71 | 49.41 | 0.03 | 0.45 | 0.01 | 0.00 | 95.91 |
| MAS 70 | 0.97 | 0.13 | 0.07 | 6.08 | 0.05 | 0.05 | 0.72 | 0.17 | 38.49 | 51.21 | 0.02 | 0.29 | 0.02 | 0.00 | 98.24 |
| MAS 70 | 0.78 | 0.10 | 0.16 | 6.78 | 0.04 | 0.10 | 0.77 | 0.22 | 37.32 | 48.33 | 0.00 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 94.99 |
| MAS 70 | 0.94 | 0.16 | 0.15 | 5.83 | 0.02 | 0.13 | 0.67 | 0.20 | 38.84 | 51.45 | 0.04 | 0.30 | 0.03 | 0.00 | 98.76 |
| MAS 57 | 0.45 | 0.16 | 0.06 | 5.37 | 0.00 | 0.07 | 0.86 | 0.24 | 36.09 | 48.10 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 91.63 |
| MAS 57 | 0.98 | 0.15 | 0.17 | 5.42 | 0.02 | 0.13 | 0.92 | 0.21 | 38.50 | 50.61 | 0.02 | 0.33 | 0.00 | 0.00 | 97.47 |
| MAS 57 | 0.86 | 0.14 | 0.08 | 6.71 | 0.01 | 0.12 | 0.95 | 0.31 | 38.20 | 50.81 | 0.01 | 0.46 | 0.01 | 0.00 | 98.65 |
| MAS 57 | 0.66 | 0.12 | 0.06 | 5.12 | 0.00 | 0.10 | 1.04 | 0.16 | 37.11 | 49.77 | 0.04 | 0.13 | 0.03 | 0.03 | 94.36 |
| MAS 57 | 0.71 | 0.08 | 0.01 | 4.83 | 0.03 | 0.12 | 1.20 | 0.27 | 37.78 | 50.26 | 0.00 | 0.39 | 0.02 | 0.00 | 95.68 |
| MAS 69 | 0.09 | 0.05 | 0.03 | 5.67 | 0.01 | 0.19 | 1.08 | 0.29 | 37.92 | 50.96 | 0.00 | 0.73 | 0.00 | 0.00 | 97.03 |
| MAS 69 | 0.09 | 0.05 | 0.10 | 5.74 | 0.01 | 0.29 | 0.92 | 0.26 | 38.33 | 50.41 | 0.00 | 0.68 | 0.02 | 0.00 | 96.89 |
| MAS 69 | 0.11 | 0.06 | 0.08 | 5.60 | 0.01 | 0.14 | 0.73 | 0.25 | 37.89 | 49.86 | 0.00 | 0.68 | 0.02 | 0.03 | 95.46 |
| MAS 69 | 0.10 | 0.03 | 0.12 | 6.37 | 0.01 | 0.19 | 0.68 | 0.34 | 36.51 | 49.07 | 0.00 | 1.00 | 0.02 | 0.03 | 94.49 |
| MAS 69 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 5.84 | 0.00 | 0.17 | 0.66 | 0.25 | 37.80 | 49.99 | 0.00 | 0.70 | 0.05 | 0.02 | 95.55 |
| MAS 68 | 0.12 | 0.03 | 0.00 | 5.70 | 0.01 | 0.16 | 1.01 | 0.16 | 39.32 | 50.95 | 0.00 | 0.51 | 0.00 | 0.03 | 98.00 |
| MAS 68 | 0.13 | 0.04 | 0.09 | 5.75 | 0.03 | 0.14 | 1.04 | 0.16 | 39.17 | 51.28 | 0.00 | 0.44 | 0.00 | 0.03 | 98.29 |
| MAS 68 | 0.10 | 0.05 | 0.09 | 5.95 | 0.01 | 0.13 | 0.87 | 0.14 | 38.77 | 50.50 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.00 | 97.03 |
| MAS 68 | 0.13 | 0.03 | 0.03 | 5.75 | 0.00 | 0.07 | 1.03 | 0.14 | 39.17 | 49.83 | 0.02 | 0.35 | 0.00 | 0.05 | 96.59 |
| MAS 68 | 0.15 | 0.00 | 0.11 | 5.58 | 0.04 | 0.12 | 0.98 | 0.21 | 39.10 | 51.56 | 0.01 | 0.54 | 0.00 | 0.00 | 98.40 |
| MAS 56 | 0.09 | 0.05 | 0.01 | 5.60 | 0.00 | 0.12 | 0.81 | 0.24 | 37.19 | 48.73 | 0.02 | 0.57 | 0.00 | 0.00 | 93.41 |
| MAS 56 | 0.08 | 0.08 | 0.12 | 5.49 | 0.01 | 0.11 | 0.90 | 0.18 | 38.01 | 48.94 | 0.03 | 0.36 | 0.00 | 0.00 | 94.31 |
| MAS 56 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 5.27 | 0.01 | 0.13 | 0.87 | 0.15 | 38.15 | 48.70 | 0.00 | 0.48 | 0.00 | 0.02 | 93.98 |
| MAS 56 | 0.10 | 0.03 | 0.09 | 5.56 | 0.00 | 0.12 | 0.66 | 0.19 | 37.79 | 49.07 | 0.01 | 0.49 | 0.03 | 0.00 | 94.14 |
| MAS 56 | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 5.35 | 0.03 | 0.08 | 0.78 | 0.25 | 37.60 | 49.46 | 0.01 | 0.52 | 0.04 | 0.00 | 94.25 |
| MAS 56 | 0.17 | 0.02 | 0.17 | 5.59 | 0.03 | 0.16 | 0.74 | 0.20 | 38.00 | 48.43 | 0.00 | 0.58 | 0.00 | 0.01 | 94.09 |
| MAS 56 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 5.45 | 0.00 | 0.12 | 0.55 | 0.25 | 37.76 | 48.74 | 0.03 | 0.78 | 0.05 | 0.01 | 93.78 |
| MAS 56 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 5.39 | 0.00 | 0.10 | 0.85 | 0.25 | 37.97 | 49.18 | 0.03 | 0.66 | 0.00 | 0.01 | 94.53 |
| MAS 63 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 6.03 | 0.01 | 0.11 | 0.99 | 0.10 | 38.98 | 51.31 | 0.00 | 0.41 | 0.00 | 0.00 | 97.99 |
| MAS 63 | 0.11 | 0.02 | 0.06 | 6.07 | 0.01 | 0.12 | 1.09 | 0.08 | 39.09 | 51.64 | 0.00 | 0.69 | 0.00 | 0.04 | 99.03 |
| MAS 63 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 5.87 | 0.04 | 0.12 | 1.03 | 0.06 | 38.50 | 50.39 | 0.05 | 0.50 | 0.02 | 0.00 | 96.69 |
| MAS 63 | 0.09 | 0.05 | 0.06 | 5.60 | 0.01 | 0.13 | 0.79 | 0.07 | 37.80 | 48.21 | 0.00 | 0.54 | 0.02 | 0.00 | 93.36 |
| MAS 63 | 0.13 | 0.07 | 0.09 | 6.03 | 0.02 | 0.17 | 1.00 | 0.07 | 39.30 | 51.48 | 0.00 | 0.71 | 0.00 | 0.00 | 99.08 |

Tabela 12.1: Resultados das análises de microsonda eletrônica das amostras MAS 56, 57, 63, 68, 70. As amostras MAS 57 e 70 apresentam concentrações de Cr acima de 0.4% e de V variando de 0.08 a 0.16%. Cr ocorre como elemento menor substituindo Al na estrutura da muscovita ($\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Os resultados geocronológicos apresentados pelos diagramas de aquecimento por degraus das amostras listadas na tabela 12.1 (Anexo II G, H, I, J) apresentam padrão de idade ascendente, evidenciando evento (s) pretérito (s) de idade desconhecida. As idades mais antigas preservadas nos diagramas de aquecimento por degraus das micas esverdeadas variam entre 1200 Ma (amostras MAS 57 e 63) e 750 Ma (MAS 69). Todas estas amostras foram rejuvenescidas por volta de 550 Ma.

12.2.3. AMOSTRAS DE ROCHA TOTAL

As amostras analisadas por rocha total (MAS 3, 13, 4w, 4b) são metapelitos da porção superior da seqüência estratigráfica do depósito Lamego. Estas amostras apresentam variações granulométricas associadas ao acamamento sedimentar, particularmente notável a olho nu.

Sob microscópio óptico, esta variação composicional é observada como zonas de alta concentração de mica fina e carbonato intercaladas com zonas de alta concentração de quartzo. Predomina em todas as seções delgadas a foliação principal S_2 , caracterizada por intenso cisalhamento, com domínios Q e M, bem como resquícios de uma foliação anterior S_1 , observados nas zonas de deformação menos intensa.

Sendo assim, as idades obtidas correspondem às idades de um agregado de mica branca fina, clorita, carbonato (e pequenas concentrações de oligoclásio, zircão e turmalina), cristalizados na foliação S_2 . O potássio radiogênico destas amostras provém principalmente dos grãos de mica. Embora observada na seção delgada da amostra MAS 03, a foliação S_3 é discreta, caracterizada como uma clivagem de crenulação, sem recristalização de minerais.

A idade de reaquecimento indicada pelas amostras MAS 3 é 650 Ma, com evidência de evento anterior mais antigo que 1500 Ma, e idades integradas variando entre 766 ± 4 Ma e 853 ± 5 Ma (Anexo II L). A amostra Mas 13 (Anexo II M) apresenta idade de reaquecimento em 700 Ma e idade máxima de 1500 Ma, com idades integradas variando entre 784 ± 5 Ma e 883 ± 5 Ma.

As amostras Mas 4b e 4w (Anexo II N) indicam idade mínima de 700 Ma e máxima de 1000 Ma (idade indicada por pseudo platô da amostra Mas 4b).

Das onze amostras de sulfetos irradiadas foram datadas quatro, sendo duas destas amostras provenientes do depósito Lamego e uma do depósito Morro Velho, ambas coletadas da unidade Lapa Seca. Assim como descrito no item 10.5.1.1, o critério de seleção dos grãos a serem enviados para irradiação foi a ausência de faces cristalinas, buscando obter as porções dos cristais que estiveram isoladas de contato com a matriz.

Após a irradiação, o critério para seleção (entre os grãos irradiados) dos grãos a serem datados por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ foi a presença de inclusões de fases minerais ricas em K e ausência ou quantidade mínima de inclusões ricas em Ca. As composições e relações estruturais destas inclusões foram identificadas através de análises de microscopia eletrônica (Anexo IV).

Os resultados de microscopia eletrônica identificaram inclusões de quartzo e carbonato em todas as amostras de sulfeto. As amostras MVA, MAS 56, 69 e 70 (analisadas por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) apresentaram inclusões de micas ricas em K, com tamanhos variando entre 0,25 mm e 1 mm (Fig.12.1). Na amostra MAS 57 além das micas potássicas foram observadas micas ricas em Cr (Fig. 12.2) .

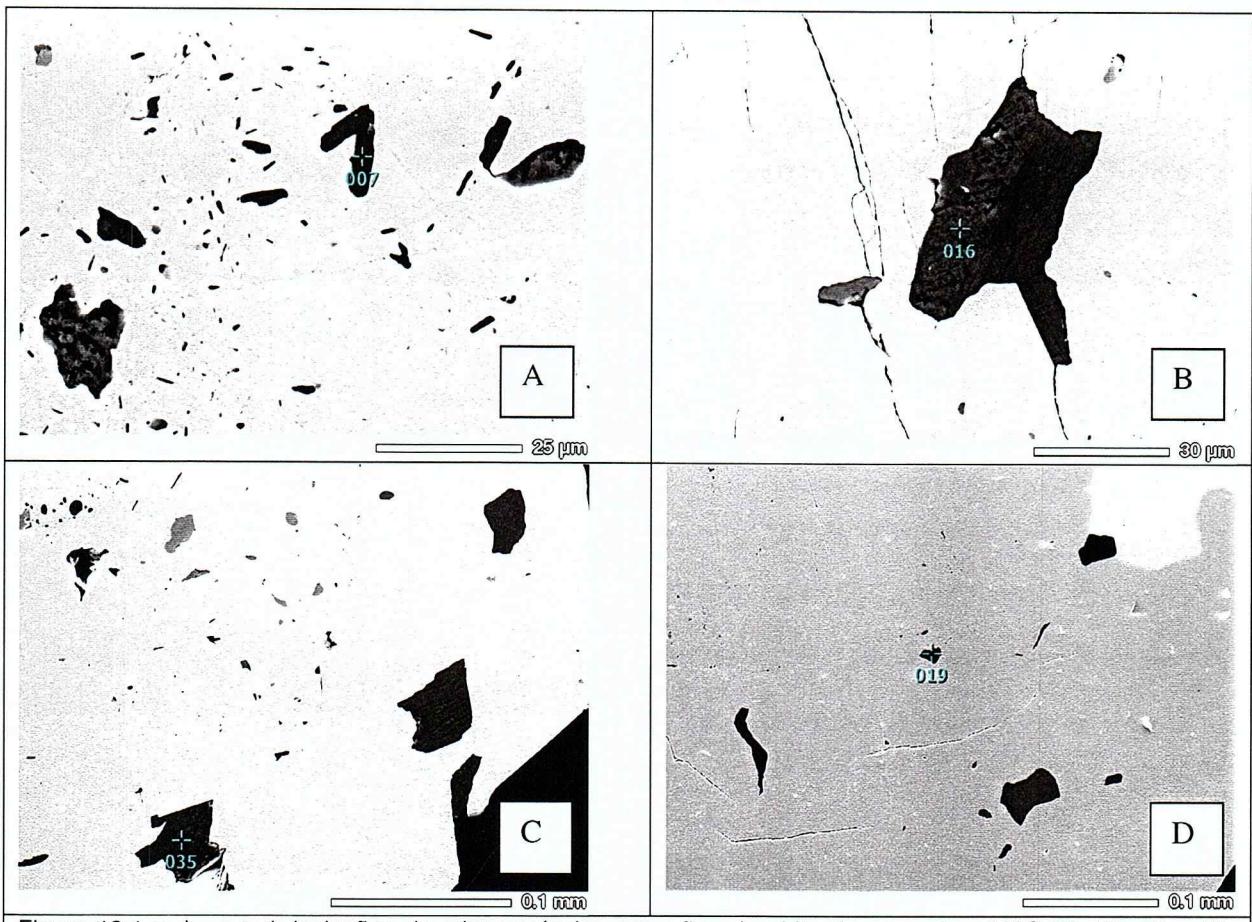


Figura 12.1 a, b, c e d: Inclusões de mica potássica em grãos de pirita das amostras MAS 56, 57, 69 e 70, respectivamente.

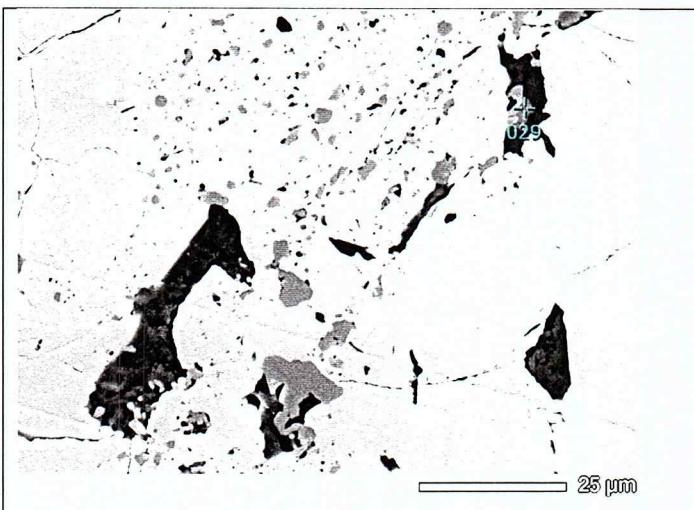


Figura 12.2: Foto e tabela de composição química de mica da amostra MAS 57, analisado por microscopia eletrônica. A composição química indica presença de fucksite, mica cromitífera utilizada como guia exploratório em mineralizações auríferas em depósitos mesotermais associados à rochas ultramáficas.

12.2.4. GRÃOS DE MICA INCLUSOS EM GRÃOS DE SULFETO (DEPÓSITO LAMEGO)

Foram analisados pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, através de aquecimento por etapas, seis grãos de pirita do depósito Lamego (MAS 56, MAS 69 e MAS 70).

Estas amostras apresentam uma foliação principal S_2 , caracterizada como foliação plano axial (demarcada por grãos de mica branca fina e ou clorita), crenulada. Esta crenulação da foliação S_2 caracteriza uma terceira superfície, descrita como clivagem de

crenulação, sem cristalização de minerais associada. A foliação S_1 é caracterizada principalmente por sombras de pressão associadas aos grãos de sulfeto. Estes grãos de sulfeto que preservam resquícios da foliação S_1 são posteriores ou sin tectônicos à primeira deformação. Uma outra geração de sulfetos, menos alterada e de menor granulometria, é observada nas amostras MAS 56 e 57. Esta geração de sulfetos não tem sombras de pressão, portanto estes grãos são posteriores à foliação principal S_2 . O procedimento de separação das amostras a serem datadas (quebra e seleção visual de grãos) não permite a qualificação dos grãos coletados em relação à sua geração.

Todas as análises por aquecimento gradual de micas inclusas em sulfetos apresentam idades platô, fato não observado nos grãos da matriz das mesmas amostras. Contudo, todas as idades platô, bem como as idades integradas, apresentam altas margens de erro. Os resultados das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ das micas inclusas em pirita agrupam-se em dois padrões de idade platô e um padrão de idade integrada. Os dois padrões de idades platô obtidos foram:

- $1090 \pm 70\text{ Ma}$ e $1200 \pm 140\text{ Ma}$ (Mas 69, Anexo II I) $1010 \pm 50\text{ Ma}$ (mas 56b, Anexo II G), interceptando-se em 1020-1060.
- as idades platô das amostras Mas 70b ($580 \pm 190\text{ Ma}$, Anexo II J) e MAS 70c são ($660 \pm 30\text{ Ma}$, Anexo II J), constituindo intervalo de 630 a 690 Ma.

O resultado do grão MAS 56c (Anexo II G) discorda dos dois padrões acima descritos, com idade platô de 820 ± 50 . Contudo, esta idade é compatível com as idades platô obtidas em grãos de sulfeto do depósito Morro Velho (12.2.5.2).

As idades integradas das micas inclusas em grãos de pirita do depósito Lamego para as amostras MAS 56b (Anexo II G), MAS56c (Anexo II G: 2170 ± 80 e $2190 \pm 110\text{ Ma}$, respectivamente), MAS 70b (Anexo II J: $2400 \pm 300\text{ Ma}$) e MAS 69 (Anexo II I: $2100 \pm 300\text{ Ma}$) interceptam-se no intervalo 2090-2250 Ma.

As amostras MAS 69b (Anexo II I) e MAS 70c (Anexo II J) apresentam idades integradas discordantes das outras análises, com valores de $1740 \pm 70\text{ Ma}$ e $3510 \pm 170\text{ Ma}$, respectivamente.

12.2.5. GRÃOS DE MICA INCLUSOS EM GRÃOS DE SULFETO (DEPÓSITO MORRO VELHO)

Foram analisados dois grãos da mesma amostra do depósito Morro Velho. As análises de microscópio eletrônico para esta amostra acusaram inclusões de micas potássicas, com tamanhos de $30 \mu\text{m}$ (figura 12.3). As análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ destes grãos não apresentam idades integradas coerentes entre si, com valores de $1360 \pm 30\text{ Ma}$ e $1970 \pm 40\text{ Ma}$, respectivamente. O grão MVA2 (Anexo II D) demonstra idade platô em $897 \pm 20\text{ Ma}$, e o grão MVA1 (Anexo II D) apresenta “pseudo platô” neste mesmo intervalo.

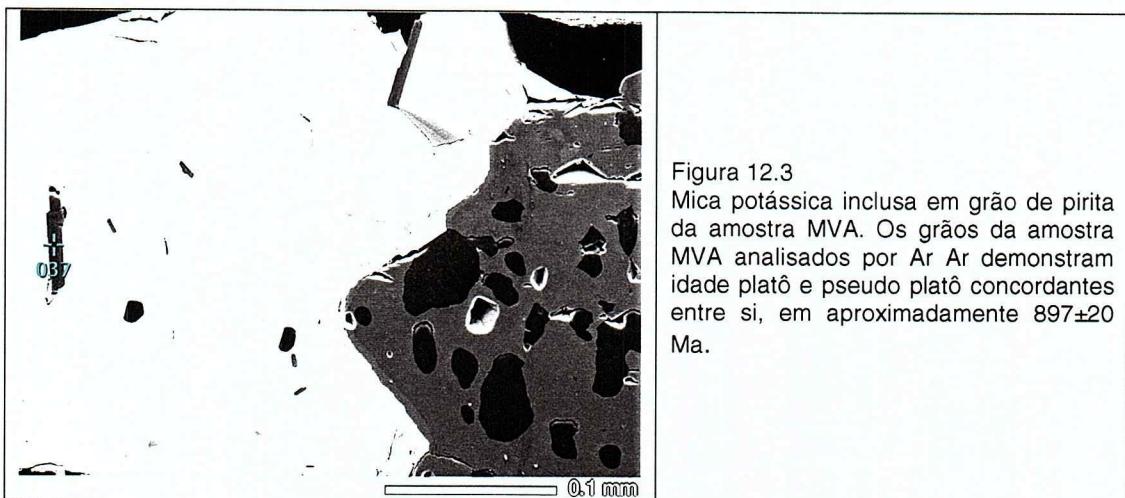


Figura 12.3

Mica potássica inclusa em grão de pirita da amostra MVA. Os grãos da amostra MVA analisados por Ar Ar demonstram idade platô e pseudo platô concordantes entre si, em aproximadamente 897 ± 20 Ma.

12.3.Distribuição geográfica do rejuvenescimento Brasiliano

O mapa de distribuição de idades K-Ar no Quadrilátero Ferrífero (Anexo V) mostra três grandes domínios de idades orientados NE-SW. Na região leste ocorrem idades neoproterozóicas; a porção central é a mais antiga, preservando idades arqueano-paleoproterozóicas; e a porção oeste preserva as idades mais jovens disponíveis.

13.DISCUSSÃO

Os dados apresentados no capítulo anterior são idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ da unidade Lapa Seca, datada por rocha total, grãos de mica, e grãos de mica inclusa em grãos de sulfeto. Esta unidade foi também indiretamente datada por um dique básico (de onde foram analisados cristais de actinolita) intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego. Estes diferentes litotipos datados por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ não apresentam idades semelhantes, o que indica que os resultados de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ revelam uma história térmica complexa para as rochas do Quadrilátero Ferrífero, em geral, e para os depósitos Lamego e Morro Velho, mais especificamente. Algumas vezes no texto será utilizado o termo datação de sulfetos ou datação de pirita, implicando que foram datadas as inclusões potássicas dos mesmos, pois sulfetos não apresentam K em sua estrutura.

O segundo evento de deformação, D_2 , forma a principal foliação metamórfica das rochas analisadas (S_2). O segundo evento regional, ocorrido no ciclo Paleoproterozóico, foi responsável pela formação das principais estruturas do Quadrilátero Ferrífero e ocorreu no intervalo de 2,1-1,8 Ma (Chemale. et al. 1994; Alkmim & Marshak, 1998). É provável que a maior parte das micas analisadas também tenham sido formadas durante este evento.

Dados deste trabalho indicam que o evento Brasiliano (0,75-0,45 Ga) foi o principal evento de reaquecimento na região do Quadrilátero Ferrífero: os espectros das idades aparentes revelam que todas as micas da matriz (e as amostras de rocha total) bem como

as micas inclusas em sulfeto foram submetidas a rejuvenescimento isotópico do sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ durante esse ciclo tectônico.

As micas da matriz (cristalizadas durante D₂) provenientes do depósito Lamego (Anexo II) apresentam idades aparentes mais jovens, no intervalo de 550-700 Ma, consistente com os resultados que seriam esperados para uma amostra de idade arqueana ou proterozóica reaquecida durante o Brasiliano. As idades dos degraus mais antigos variam entre 750 e 1500 Ma (degraus mais antigos em MAS 13 e 3). Estes degraus mais antigos fornecem idades mínimas para a amostra. A maioria dos degraus com idades mais antigas estão contidos no intervalo de idade definido para o ciclo Espinhaço (item 7.4).

As idades obtidas para as micas da matriz do depósito Morro Velho demonstram que este depósito também foi afetado pelo evento Brasiliano, sendo evidente o rejuvenescimento em 500-550 Ma. Contudo, diferentemente das amostras do depósito Lamego, onde se observam idades aparentes de até 1500 Ma, as idades aparentes mais antigas preservadas no depósito Morro Velho são 750-800 Ma. Silva (2006) obteve em grãos de sericita da zona mineralizada do depósito Morro Velho idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ platô em $507 \pm 1,7$ Ma e $506,4 \pm 1,7$ Ma. As idades aparentes mais jovens do depósito Morro Velho (em comparação às idades do depósito Lamego) indicam que o evento Brasiliano foi mais intenso neste depósito.

Silva (2006) obteve em grãos de sericita da zona mineralizada do depósito Morro Velho idades platô em $507 \pm 1,7$ Ma e $506,4 \pm 1,7$ Ma, comprovando também a importância do evento Brasiliano neste depósito.

Outra possibilidade a ser considerada para explicar as idades Brasilianas nas amostras da Unidade Lapa Seca seria a de que a foliação principal, identificada como S₂ tenha sido originada durante o evento Brasiliano. Esta hipótese não é a mais aceita neste trabalho pois se a foliação principal fosse Brasiliana ter-se-ia que assumir que as micas com idades aparentes mais antigas que 0,7 Ga seriam micas detriticas da S₁ e, nas micas que não preservam idades mais antigas que o Brasiliano, esperar-se-ia idades platô bem definidas no intervalo deste evento.

Embora o evento Paleoproterozóico não tenha sido identificado nas micas da matriz, este evento aparece nas idades integradas de grãos de pirita inclusos em grãos de sulfeto. Assim como as micas da matriz e as análises de rocha total, as micas inclusas em grãos de pirita passaram por um rejuvenescimento isotópico: o espectro de idades aparentes das micas inclusas em sulfetos é significativamente diferente do espectro das micas da matriz das mesmas amostras, indicando que o sulfeto parcialmente protege suas inclusões contra rejuvenescimentos do sistema isotópico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

As idades aparentes excessivamente antigas dos primeiros degraus dos grãos de sulfeto poderiam ser atribuídas a excesso de Ar (provenientes de inclusões fluidas), mas são mais provavelmente associadas a Ar liberado dos grãos de mica inclusos na pirita e acumulado na interface mica-pirita (Phillips & Miller 2006). Este acúmulo de Ar na interface

mica-pirita teria ocorrido pela difusão de Ar dos grãos de mica (figura 10.3) durante eventos térmicos posteriores à cristalização da mica. Este argônio expelido do grão de mica, ao invés de ser perdido para a matriz, fica acumulado na interface entre as inclusões de mica e pirita.

As análises dos grãos de sulfeto também apresentam idades platô, não observadas nos grãos de mica da matriz das mesmas amostras. Estas idades platô agrupam-se em 1020-1060 Ma e 630-690 Ma e podem significar eventos de reaquecimento, neste caso representando um evento de reaquecimento no intervalo 1020- 1060 Ma correspondendo ao intervalo de idades do ciclo espinhaço (Cordani *et al.* 1992), ou estas idades platô ocorrem nestas amostras devido à proteção parcial contra rejuvenescimento isotópico do sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ que os sulfetos proporcionam às inclusões, retardando o rejuvenescimento ocasionado pelo Brasiliano (evidente nos grãos de mica da matriz das mesmas amostras). O intervalo 630-690 Ma, observado em idades platô de grãos de pirita da amostra MAS 70 corresponde ao reaquecimento ocorrido durante o Brasiliano. As idades integradas das análises de grãos de pirita podem ser interpretadas como idades mínimas de cristalização dos mesmos, sendo que as idades integradas dos grãos de pirita do depósito Lamego (exceto MAS 69b e MAS 70c) interceptam-se no intervalo 2090-2250 Ma, correspondendo ao intervalo descrito para o evento Paleoproterozóico (2.1-1.7, Chemale *et al.* 1994).

As idades integradas das análises de grãos de pirita podem ser interpretadas como idades mínimas de cristalização dos mesmos. As idades integradas dos grãos de pirita do depósito Lamego (exceto MAS 69b e MAS 70c) interceptam-se no intervalo 2090-2250 Ma, correspondendo (não totalmente) ao intervalo descrito para o evento Paleoproterozóico (item 7.3). Silva (2006) obteve idades Pb-Pb em piritas associadas à mineralização da Mina Cuiabá variando entre 2,73 e 2,55 Ga, propondo que os principais eventos de mineralização teriam ocorrido em três curtos eventos hidrotermais no intervalo 2,73 e 2,55 Ga. Este intervalo de idade é condizente com os dados do dique básico, intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego , indicando a mineralização tem idade mínima de 2.6 Ga (Sales & Holcombe, 2004).

David (2006) obteve por Pb-Pb SHRIMP em zircão de um dique (muscovita-carbonato-clorita xisto) intrusivo na mineralização do depósito Córrego do Sítio idade de 2518 ± 290 Ma, concordante com as idades obtidas para o dique de anfibolito datado neste trabalho.

A idade máxima do Supergrupo Minas 2.612 ± 0.005 Ga (Noce *et al.* 1998, Alkmim 2004) concordante com as idades dos diques, pode sugerir que os mesmos podem ter sido colocados durante o evento extensional associado à origem da bacia deposicional do Supergrupo Minas. O dique anfibolítico intrusivo na mineralização aurífera do depósito Lamego indica uma idade mínima para esta mineralização. Contudo, as idades platô das micas inclusas em grãos de pirita (2090-2250 Ma ;1020-1060Ma e 630-690 Ma) do depósito

Lamego podem indicar idades de remobilização do ouro, semelhante ao modelo proposto por Silva (2006), que propõe que a mineralização da mina Cuiabá pode ter sido influenciada por magmatismo intrusivo Mesoproterozóico e pelo evento Paleoproterozóico.

As idades integradas das micas inclusas em sulfeto datados neste trabalho apresentam platô no intervalo 2090-2250 Ma, correspondendo ao intervalo descrito para o evento Paleoproterozóico. Além disso, outro conjunto de idades platô de micas inclusas em pirita estão no intervalo 1020- 1060 Ma, Mesoproterozóico. Idades mesoproterozóicas, de 1,1 e 1,2 Ga foram obtidas por Pb-Pb em ouro na mina Cuiabá e interpretadas como reabertura deste sistema provocado por remobilizações de Au posteriores ao Arqueano (Silva 2006).

A idade integrada excessivamente antiga da amostra MAS 70c não é de fácil explicação. As duas possíveis explicações: excesso de Ar em inclusões fluidas ou liberação parcial do Ar retido no restante do sulfeto são inconsistentes com os resultados observados para os outros grãos de sulfeto analisados. Estes não revelam nenhuma evidência clara de excesso de Ar e nem indicam que o método de aquecimento utilizado resultou somente na extração parcial do gás contido. A idade integrada da amostra MAS 69b (1140 ± 70 Ma) provavelmente corresponde à perda de Ar para o ambiente (através de fraturas no grão de sulfeto).

As análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ deste trabalho demonstram que a região dos depósitos Lamego e Morro Velho foi afetada pelo evento Brasiliano. Para investigar se esta explicação é plausível, foram plotados dados de K-Ar em um mapa regional do Quadrilátero Ferrífero. O mapa de distribuição de idades K-Ar no Quadrilátero Ferrífero (Anexo V) demonstra uma maior concentração de idades Brasilianas na porção oeste do distrito.

A porção leste apresenta reaquecimento decorrente da colisão da faixa Araçuaí, seguido de uma área central com idades antigas e, logo após, novamente uma região oeste com idades jovens. Para uma interpretação mais precisa do padrão de distribuição das curvas teria sido necessária uma análise a qualidade geológica de cada dado, fato este que só foi percebido durante a fase de conclusão deste trabalho. Como exemplo da limitação interpretativa, amostras de veios de idade Brasiliana intrusivos em uma unidade de idade Transamazônica que (não datada) seria erroneamente representado como uma região rejuvenescida no Brasiliano, o que estaria incorreto.

Contudo, mesmo sem a contextualização da continuidade geológica dos dados, a análise pontual dos mesmos indicam que a porção oeste do Quadrilátero Ferrífero foi rejuvenescida durante o Neoproterozóico.

14. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- O Ciclo Brasiliano atuou como um evento de reaquecimento na região do Quadrilátero Ferrífero, rejuvenescendo a maioria das micas e rochas totais

estudadas, não se descarta a possibilidade de também ter produzido reativações de estruturas e remobilizações de depósitos minerais;

- pelas idades obtidas foi possível caracterizar que o depósito Morro Velho foi mais intensamente rejuvenescido durante o evento Brasiliano do que o depósito Lamego;.
- Baseado na idade $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ das actinolitas do dique que corta a unidade Lapa Seca e a mineralização aurífera do depósito Lamego, foi possível posicionar-las (o evento mais importante) como mais antigas que 2600 Ma.
- Em função das idades neoproterozóica da muscovita e arqueana da actinolita propõe-se que o evento Brasiliano no depósito Lamego atingiu temperaturas entre 300 °C e 400 °C.
- A datação das inclusões de micas nos grãos de sulfetos não teve o resultado esperado pois foram obtidas idades mais jovens (entre 2.1, 1.2 e 0.6Ga) do que as do dique que corta a mineralização, confirmando a necessidade de aperfeiçoamento do método que possui como principal limitação o fato de não se conhecer a fase de geração do sulfeto analisado e a reproduzibilidade do resultado de um grão de sulfeto para outro; esse fator é fundamental nos depósitos auríferos do QF já que todos apresentam mais de uma fase de geração de sulfetos.

14.1.Sugestões

- Como a técnica de amostragem utilizada para concentrar os minerais não permitiu a separação quanto à sua geração, a idade de 2,6 Ga obtida nos cristais de actinolita pode ser interpretada como idade da deformação D1 ou magmática e preservada da superposição da S₂, possivelmente de idade Transamazônica. Uma precisão poderia ser obtida com uma micro amostragem a laser dos cristais de actinolita (técnica já existente em alguns laboratórios), onde seriam datados separadamente cristais de gerações diferentes.

15.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIN, F.F. & MARSHAK, S. 1998. Trans-Amazonian Orogeny In The Southern São Francisco Cráton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence For Paleoproterozoic Collision and Collapse in The Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.
- ALMEIDA, F.F.M. 1976. O Cráton do São Francisco e suas faixas marginais de dobramentos. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, **29**.
- ALMEIDA, F.F.M. 1981. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais*, **1**:1-10. Salvador, BA, Anais, Salvador, SBG.
- ALMEIDA, L.G.; CASTRO, P.T.A.; ENDO, I.; FONSECA, M.A. 2005. O grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma revisão Estratigráfica - *Revista Brasileira de Geociências*, **35** (2):177-186.
- BALTAZAR, O.F. & PEDREIRA, A.J. 1996. Associações de litofácies. In: CPRM. *Projeto Rio das Velhas: Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000*, Belo Horizonte, DNPM/CPRM, 43-48
- BIERLENEIN, F.P.; FOSTER, D.A.; McKNIGHT, S.; ARNE, D.C. 1999. Timing of gold Mineralization in The Ballarat Gold Fields, Central Victoria: Constrains From $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. In: *Australian Journal of Earth Sciences*, **46**: 301-309.
- BERNASCONI, A. 1985. Archaean gold mineralization in Central Eastern Brazil: a review. *Mineralium Deposita*, **20**: 277-283.
- BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; BAARS, F.J.; GONÇALVES, J.H.; DELGADO, I.D.M.; ABRAM, M.B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G.M.M.; SANTOS, J.O.S.; SILVA, L.C.; VIDOTTI, R.M. 2002. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Sistema de Informações Geográficas – SIG e Mapas na Escala 1:2.500.000. In: L.A. Buzzi, C. Schobbenhaus, R.M. Vidotti, J.H. Gonçalves (eds.) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas e SIG*. 2003. CPRM, Editora da Universidade de Brasília. Brasília.
- BRITO NEVES, B.B. ; CORDANI, U.G.; TORQUATO, J.R.F. 1980. Evolução geocronológica do precambriano do Estado da Bahia In: H.A.V. Inda & F.B. Duarte eds., *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*, Salvador,. CPM-SME BA, v.3, p. I -101. (Textos Básicos).
- CABRAL, A.R. 1986. Mineralização de Ouro Paladiado em tabiritos: A Jacutinga de Gongo Soco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Tese de mestrado – Unicamp,86p.
- CARMO, I.O. 2005. Geocronologia do Intemperismo Cenozóico no Sudeste do Brasil. Tese de doutoramento apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CARNEIRO, M. A. 1992. *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): Litoestratigrafia e Evolução Geológica de um Segmento de Crosta Continental do Arqueano*. São Paulo, 233p. (Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).
- CARNEIRO, M.A.; NOCE, C.M.; TEIXEIRA, W. 1995. Evolução Policíclica do Quadrilátero Ferrífero: Uma Análise Fundamentada no Conhecimento atual da Geocronologia U-Pb e Geoquímica Isotópica Sm-Nd. *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, **48**(4):264-273.

CARNEIRO, M.A.; TEIXEIRA, W.; CARVALHO JÚNIOR, I.M.; FERNANDES, R.A. 1998. Ensilic Tectonic Setting of The Archean Rio das Velhas Greenstone Belt: Nd and Pb Isotopic evidence from the Bonfim Metamorphic Complex, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**:189-200.

CHAUVET, A.; DUSSIN, I.A.; FAURE, M.; CHARVET, J. 1994. Mineralização Auríferas de Idade Proterozóica Superior e Evolução Estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **24**(3):150-159.

CHEMALE, F. JR.; ROSIERE, C.A.; ENDO, I. 1994. The Tectonic Evolution of The Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **65**:25-54.

CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; MUELLER, G.; QUADE, H.; REINER, V.; ROESER, H. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero / MG. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, **52** (4): 785-799.

CORDANI, U.G.; IYER, S.S.; TAYLOR, P.N.; KAWASHITA, K.; SATO, K.; MCREATH, I. 1992. Pb-Pb, Rb-Sr, and K-Ar systematics of the Lagoa Real uranium province (south-central Bahia, Brazil) and the Espinhaço Cycle (ca. 1.5-1.0 Ga). *Journal of South American Earth Sciences*, **5**(1):33-46 .

DAVID, M.E.V. 2006. Composição Isotópica de Pb –Sr e Nd da Mineralização de Ouro do Depósito Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero (MG): implicações na modelagem conceitual. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de mestrado, 75p.

DE WITT, E.D.; THORMAN, C.H.; LANDIS, G.P.; ZARTMAN, R.E. 1996. A progress report on the age and origin of gold deposits hosted by iron formation in the Belo Horizonte area, Minas Gerais, Brazil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, **39**:199-202.

DUSSIN, I.A. 1983. *Geologia, gênese e controle dos depósitos de manganês associados ao Grupo Macaúbas na borda ocidental da Serra do Cipó - MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

DUSSIN, T. M. ; DUSSIN, I. A. ; ROSSI, P. ; CHARVET, J. 1995. Idade do Supergrupo Espinhaço: Determinação $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ pelo Método de Evaporação do Pb sobre Monozircões de Metavulcanitos Sinsedimentares. In: VIII Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1995, Diamantina. *Anais do VIII Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Belo Horizonte : Sociedade Brasileira de Geologia*, 11-13.

DORR, J. V. N. II. 1969. *Physiographic, Stratigraphic and Structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, USGS/DNPM, Prof. Paper 641-A.

ENDO, I. 1997. *Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 243p.

FAURE, G. & MENSING, T.M. 2005. *Isotopes Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Ed., New York.

FIGUEIREDO, M.C.H. & TEIXEIRA, W. 1996. The Mantiqueira Metamorphic Complex, eastern Minas Gerais state: preliminary geochronological and geochemical results. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **68** (2) 223-246.

GANDINI, A. L. 1994. Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais.. 212p. il. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1994. (Dissertação de mestrado em Geologia).

- GORCEIX, H. 1984. Bacia Terciária d'água doce nos arredores de Ouro Preto Minas Gerais - Brasil. *Anais da Escola de Minas*, **3**: 75-92.
- GOLDFARD, R.J. 2005. Timing and global tectonic controls of gold deposits in metamorphosed terranes. In: Geological Association of Canada Newfoundland Section Annual Technical Meeting
- HERZ, H. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, **641-B**:1-58.
- KERR, O.; BREEMEM, O.V.; CREASER, R.A. 2006. The timing of gold Mineralization at The Rattling Brook Deposit, White Bay. Constraints from Re- Os e Ar-Ar Geochronology. *Geological Survey*, **06**:119-133.
- KINOSHITA, H. 1976. *Aplicabilidade do método 40Ar/39Ar em rochas policíclicas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- KIRK, J. 2002. A Major Archaean Gold- and Crust-forming Event in the Kaapvaal Craton, *Science*, **297**: 55-88.
- KWITK, R.R. & OLIVEIRA, C.G.O. 2004. Depósito Aurífero de Antônio Pereira, Quadrilátero Ferrífero: Condições P-T e natureza dos fluidos mineralizadores. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(1):117-126.
- LADEIRA, E.A. 1988. Metalogenia dos Depósitos de Ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais In: Schobbenhaus, E., Coelho, E.S. (coords.), *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, DNPM, Brasília, **3**: 302-377.
- LOBATO, L.M.; RODRIGUES, C.R.R.; ZUCHHETI, M.; NOCE, C.M.; BALTAZAR, O.F.; SILVA, L.C.; PINTO, C.P. 2001a. Brazil's premier gold province, Part I: The tectonic, magmatic and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, **36**:228-248.
- LOBATO, L.M.; RODRIGUES, C.R.R.; VIEIRA, F.W.R. 2001b. Brazil's premier gold province, Part II: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, **36**:249-277.
- LOCZY, L. & LADEIRA, E. 1976. Geologia estrutural e introdução à geotectônica. São Paulo. Blücher. 528p.
- MACHADO, L. F.; RIBEIRO, M.W.; GONZALEZ, S.R.; SCHENINI, C.A.; SANTOS NETO, A. PALMEIRA, R.C.; PIRES, J.L.; TEIXEIRA, W.; CASTRO, H.E.F. 1983. Projeto RadamBrasil- Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória (Geologia) Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro 780p.
- MACHADO, N. & CARNEIRO, M. 1992. U-Pb evidence of Late Archean Tecto Thermal activity in the Southern São Francisco Shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **29**:2341-2346.
- MACHADO, N.; NOCE, C.M.; LADEIRA, E.A.; BELO DE OLIVEIRA, O.A. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, **104**:1221 –1227.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. 1996. Idades de zircões detriticos de sequências arqueanas e paleoproterozóicas do Quadrilátero Ferrífero: Implicações para a evolução do greenstonebelt do Rio das Velhas e da bacia de foreland do Supergrupo Minas. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, **39**:110-113.

MARSHAK, S. & ALKMIM, F.F. 1989. Contraction/Extension Tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, **8**(3):355-371.

MARSHAK, S.; TINKHAM, D.; ALKMIM, F.F.; BRUECKNER, H. 1997. Dome-and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse core complexes, diapirs, or neither?: Examples from the Quadrilátero Ferrífero and the Penokean Orogen. *Geology*, **25**: 415-418.

MCDougall, I. & HARRISON, T.M. 1988. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method. Oxford University Press, New York.

MCDougall, I. & HARRISON, T.M. 1999. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method. Oxford University Press, New York.

NOCE, C. M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. São Paulo, 128p. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

NOCE, C.M. 2001. Geochronology of The Quadrilátero Ferrífero District: a review: *Geonomos*, **8**(1):15-23.

NOCE, C.M.; TEIXEIRA, W.; MACHADO, N. 1997. Geoquímica dos gnaisses TTG e granitóides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **27**:25-32.

NOCE, C.M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. 1998. U-Pb Gerocronology of Gneisses and Granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (Southern São Francisco Craton): Age Constraints for Archean and Paleoproterozoic Magmatism and Metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**:95-102.

NOCE, C.M.; ZUCCHETI, M.; BALTAZAR, O.F.; ARMSTRONG, R.; DANTAS, E.; RENGER, F.E.; LOBATO, L.M. 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoarchean Rio das Velhas Greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil):U-Pb zircon dating of volcaniclastic graywackes. *Precambrian Research*, **141**(1-2): 67-82.

OLIVO, G. R.; GAUTHIER, M.; BARDOUX, M. 1995. Palladium-bearing gold deposit hosted by Proterozoic Lake Superior Type Iron-formation at the Cauê Iron Mine, Itabira district, southern São Francisco Craton, Brazil: Geologic and structural controls. *Economic Geology*, **90**: 118-134.

PAN, Y. & FLEET, M.E. 1992. Mineral chemistry and geochemistry of vanadian silicates in the Hemlo gold deposit, Ontario, Canada. *Contrib Mineral Petrol*, **109**: 511-525.

PHILLIPS, D. & MILLER, D.J. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mica-bearing pyrite from thermally overprinted Archean gold deposits, *Geology*, **34**(5): 397-400.

PINTO, A.D.P. & PARES-REGALI, M.S. 1991. Palinoestratigrafia dos sedimentos terciários da bacia de Gandarela, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Escola de Minas*, **44**(1): 10-15.

- QUÉMÉNEUR J. & VIDAL P. 1989. Primeiras datações radiométricas dos granitos da Região de São João Del Rei (Minas Gerais) Anais do V Simpósio de Geologia , núcleo Minas Gerais/ Simpósio Geologia, núcleo Brasília 50 -53.
- RIBEIRO, D.T. & ZAVAGLIA, G. 1998. Bacias terciárias e enriquecimento de minério de ferro. In: SBG/Núcleo de Minas Gerais. *Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, Belo Horizonte. Anais 14:139–140.
- ROSS, A.A.; BARLEY, M.E.; BROWN, S.J.A.; MCNAUGHTON, N.J.; RIDLEY, J.R.; FLETCHER, I.R. 2004. Young porphyries, old zircons: new constraints on the timing of deformation and gold mineralisation in the Eastern Goldfields from SHRIMP U-Pb zircon dating at the Kanowna Belle Gold Mine, Western Australia, *Precambrian Research*, 128: pp 105-142
- SALES, M. & HOLCOMBE, R. 2004. Initial Analysis of Ar/Ar Dating results of Deformation Fabrics in Lamego Core. *Relatório Interno University of Queensland*.
- SANT'ANNA, L.G.; SCHORSCHER, H.D.; RICCOMINI, C., 1997, Cenozoic tectonics of the Fonseca basin region, eastern Quadrilátero Ferrífero, MG,Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, 10 (3-4): 275-284.
- SCHORSCHER, H.D. 1976. Polimetamorfismo do Pré Cambriano na Região de Itabira, MG, Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 29,.Ouro Preto,Resumos,p.194-195.
- SILVA, C.M.G. 2006. *Aplicação de isótopos radiogênicos na mineralização de ouro da mina Cuiabá, Greenstone Belt Rio das Velhas (MG)*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências Universidade de São Paulo, Brasil.
- SILVA, R.R. 1993. Sequências estratigráficas da fase rifte do Supergrupo Espinhaço, Diamantina, Minas Gerais. In: SIMP. DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, Salvador, Anais, 154-157.
- SMITH, P.E.; EVENSEN, N.M.; YORK, D.; SZATMARI, P.; DE OLIVEIRA, D. C. 2001. Single-crystal ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of pyrite: No fool's clock. *Geology*, 29 (5): 403–406.
- SPIER, C.A.; OLIVEIRA, S.M.B.; ROSIÈRE, C.A. 2003. Geology and Geochemistry of the Águas Claras and Pico Iron Mines Quadrilátero, Minas Gerais, Brazil. In: *Mineralium Deposita*. 38: 751-774.
- SPIER, C.A.; VASCONCELOS, P.; OLIVEIRA, S.M. 2006. 40Ar/39Ar Geochronology and the Evolution of Lateritic Iron Deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chemical Geology*. (in press).
- STEIN, H.J. & MARKEY, R.J. 2003. New Perspectives from Old Domains: Intrusion-Related Au in Suspicious Orogens, Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. EUG Joint Assembly, *Abstracts: meeting held in Nice, France*.
- TEIXEIRA, W. 1982. Geochronology of the Southern part of the São Francisco Craton, Revista Brasileira de Geociências 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,207 p.
- TEIXEIRA, W.; CORDANI, U.G.; NUTMAN, A.P.; SATO, K. 1998. Polyphase Archaean evolution in the Campo Belo metamorphic complex, Southern São Francisco Craton, Brazil: SHRIMP U-Pb zircon evidence, Brazil. In: *Journal of South American Earth Sciences*, 11(3): 279-289.

TEIXEIRA W., SABATÉ P., BARBOSA C., NOCE M., CARNEIRO M. A. 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds.) Tectonic Evolution of South America, In 31 Congresso Internacional de Geologia, 31, Rio de Janeiro, Brazil.

TEIXEIRA, W.; CARNEIRO, M.; NOCE, C. M.. 1996. Pb, Sr And Nd Isotope Constraints On The Archean Evolution Of Gneissic-Granitoid Complexes In Southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, **78** (1-2): 151-164.

THORPE, R.I.; CUMMING, G.L.; KRISTIC, D. 1984. Lead Isotope Evidence Regarding Age of Gold Deposits in the Nova Lima district, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **14** (3):147-152 .

UHLEIN, A. & OLIVEIRA, H. A. 2000. História Geológica do Quadrilátero Ferrífero. *Ciência Hoje*, **27**(160): 68 – 71.

VARAJÃO, C.A.C.; COLIN, F.; VIEILLARD, P.; MELFI, A.J.; NAHON, D. 2000 Early weathering of palladium gold under lateritic conditions, Maquiné Mine, Minas Gerais, Brazil. *Appl Geochem* **15**:245–263

VASCONCELOS, P.M. 1999a. K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Weathering Processes. *Earth Planet Sciences*, **27**:183-229.

VASCONCELOS, P.M. 1999b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Supergene Processes. Ore Deposits. *Reviews in Economic Geology*, **12**:73-113.

VASCONCELOS, P.M.; ONOE, A.T.; KAWASHITA, K.; SOARES, A.J.; TEIXEIRA, W. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology at the Instituto de Geociências, USP: instrumentation, analytical procedures, and calibration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **74**(2):297-342.

VLACH, S.R.F.; NETO, M.C.C.; CABY, R.; BASEI, M.S. 2003. Contact Metamorphism in Metapelites From the Nova Lima Group, Rio das Velhas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero: A Monazite Th-U-Pb Dating By The Electron-Probe Microanalyser. In: *South American Symposium on Isotope Geology, Short Papers*, **4**:307-310.

YORK, D.; MASLIWEC, A.; KUYBIDA, P.; HANES, P.; HALL, C.M.; KENYON, W.J.; SPOONER, E.T.C.; SCOTT, S.D. 1982. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Pyrite. *Nature*, **300**: 52-53.

ZUCCHETTI, M. & BALTAZAR, C. 1998. Projeto Rio das velhas, texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000, CPRM, Belo Horizonte, Brasil, **2**:13-42.

ANEXO

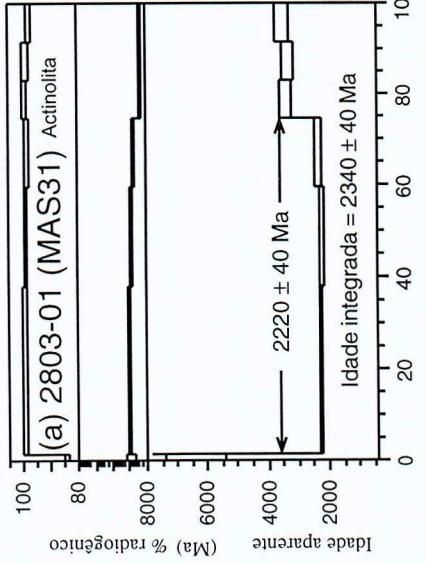
I

| Número Amostra | Minerais | Grãos irradiados | Grãos analisados |
|----------------|------------------------|------------------|------------------|
| MAS 03 | Rocha total (xisto) | | |
| MAS 04b | Rocha total (xisto) | 3 | |
| MAS 04W | Rocha total (xisto) | 3 | |
| MAS 13 | Rocha total (xisto) | | |
| MAS 16 | Mica Branca | 3 | |
| MAS 17 | Mica Branca | 3 | |
| MAS 29 | Actinolita | | |
| MAS 31 | Actinolita | 3 | |
| MAS 31a | Actinolita | | |
| MAS 32 | Actinolita | | 3 |
| MAS 32a | Actinolita | | |
| MAS 32b | Actinolita | | |
| MAS 56 | Mica Branca esverdeada | | |
| | pirita | 8 | |
| MAS 57 | Mica Branca esverdeada | | |
| | pirita | 7 | |
| MAS 63 | Mica Branca esverdeada | | |
| | pirita | 7 | |
| MAS 68 | Mica Branca esverdeada | | |
| | pirita | 8 | |
| MAS 69 | Mica Branca esverdeada | | |
| | pirita | 8 | |
| MAS 70 | Mica Branca esverdeada | | |
| | Calcopirita | | |
| | pirita | 5 | |
| MV 01 | Mica Branca | | 3 |
| MV 02 | Albita | | |
| MVA | Calcopirita | 15 | |
| | Pirita | | |
| MVAa | pirita | 8 | |
| MVB | Pirita | 7 | |
| MVBb | pirita | 7 | |

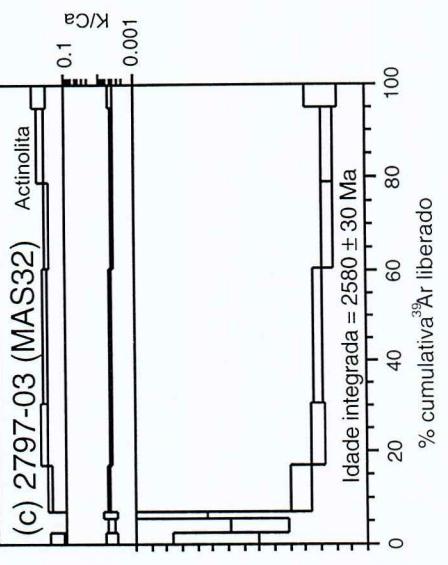
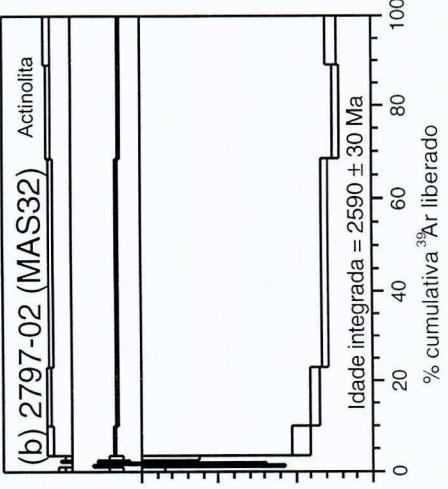
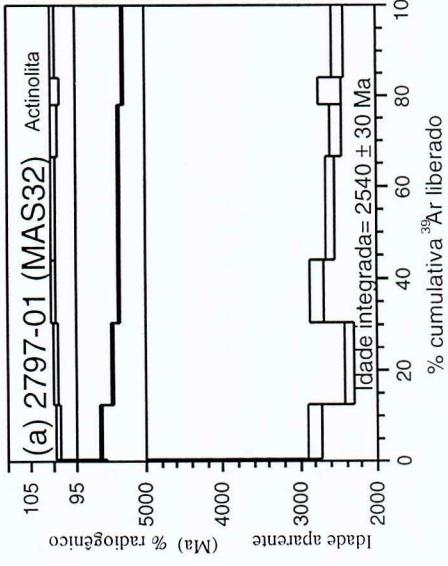
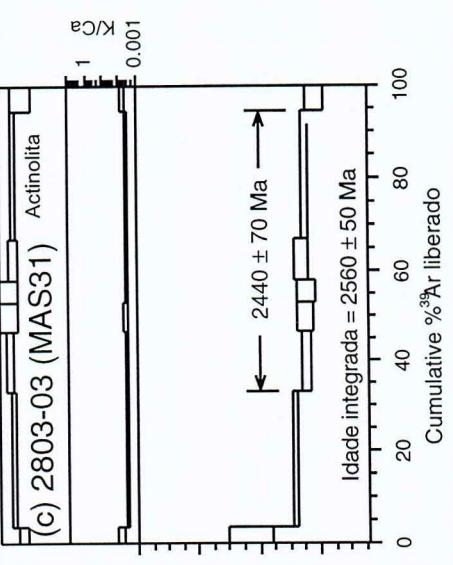
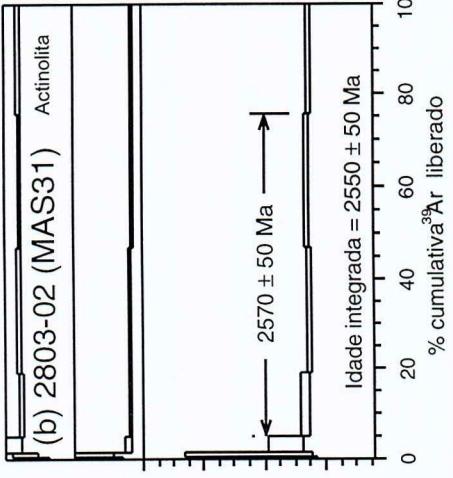
| Autor | Origem de mineralização | Obs. sobre a unidade Lapa Seca |
|------------------------|---|--|
| Ladeira 1988 | São Bento (formação ferrífera tipo algoma): Origem singenética exalativa modificada por cisalhamento dúctil. | Lapa Seca e Bif Raposos são precipitação química em assolo oceânico através da mistura de fluidos hidrotermais ascendentes e água do mar |
| | Raposos, Faria, Cuiabá (formação ferrífera tipo algoma): singenética exalativa | |
| | Morro Velho, Bicalho (Formação Lapa Seca) singenética exalativa | |
| | Bela Fama (Formação Lapa Seca) singenética exalativa modificada | |
| | Cuiabá, Faria, Raposos (Mineralização dispersa em rochas máfico ultramáficas e felsicas): possivelmente ligada a processos metamórficos/ metassomáticos. | |
| | Alguns pseudo conglomerados do Grupo Maquiné (hospedada em tectonitos de granulação rudácea) epigenética ligada a processos de remobilização metamórfica. | |
| | Jacutinga- hospedada em formação ferrífera bandada da fm. Cauê: Maquiné, Mariana, Conceição, Itabira, Gongo Soco- possivelmente epigenética ligada a metassomatismo | |
| | Depósitos associados a metaconglomerados da fm. Moeda- Gandarela, Serra das Gaivotas, Mina Cata Branca- depósito de placer metamorfizado. | |
| Vieira e Oliveira 1988 | epigenética | Lapa Seca unidade de alteração hidrotermal |
| Vial 1988 | Epigenética, relacionada a uma falha de empurrão (Passagem Mariana) | |
| Bernasconi 1985 | Singenética: Morro Velho, Raposos, São Bento | Origem vulcânica sedimentar para lapa seca |
| | | |

ANEXO

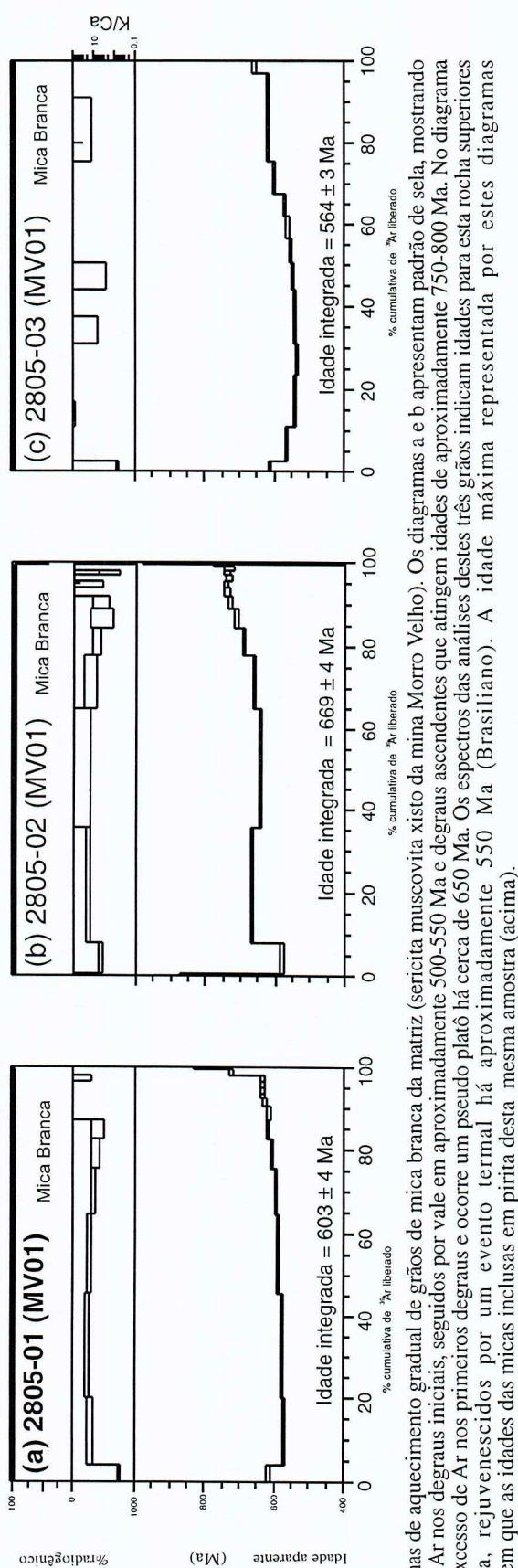
II



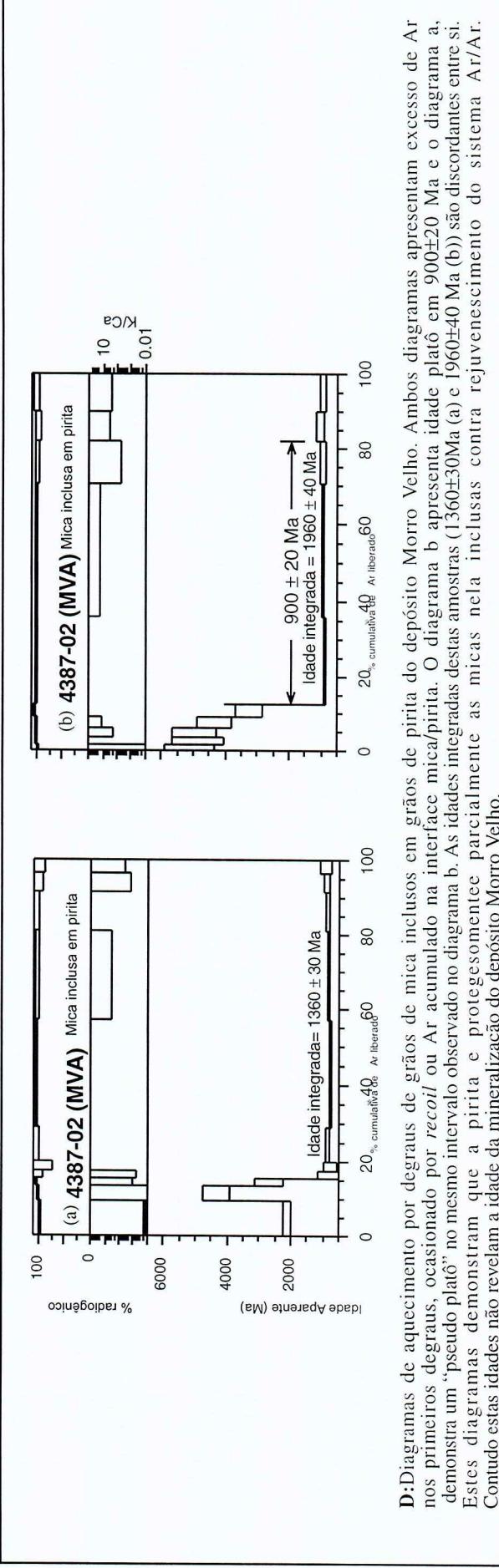
A: Nos gráficos de aquecimento por degraus em grãos de actinolita da amostra MAS 31 (dique de anfibolito intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego) os primeiros degraus correspondem a *recoil* ou excesso de Ar. A idade mínima da amostra é 2570 ± 50 Ma (b).



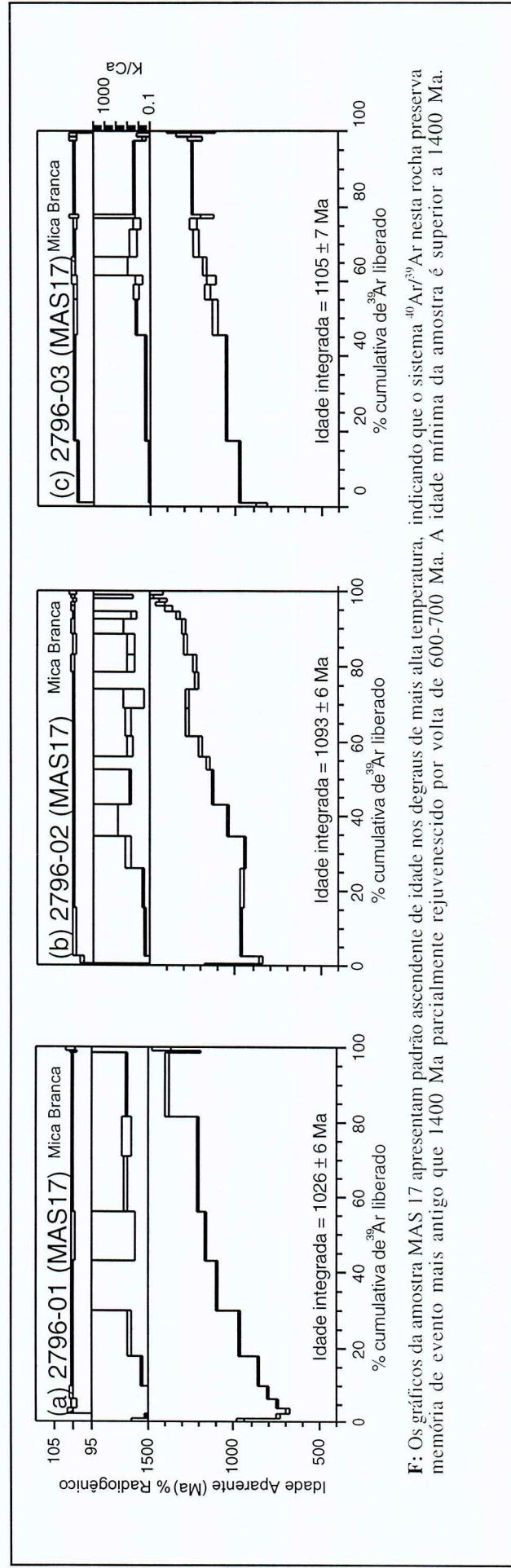
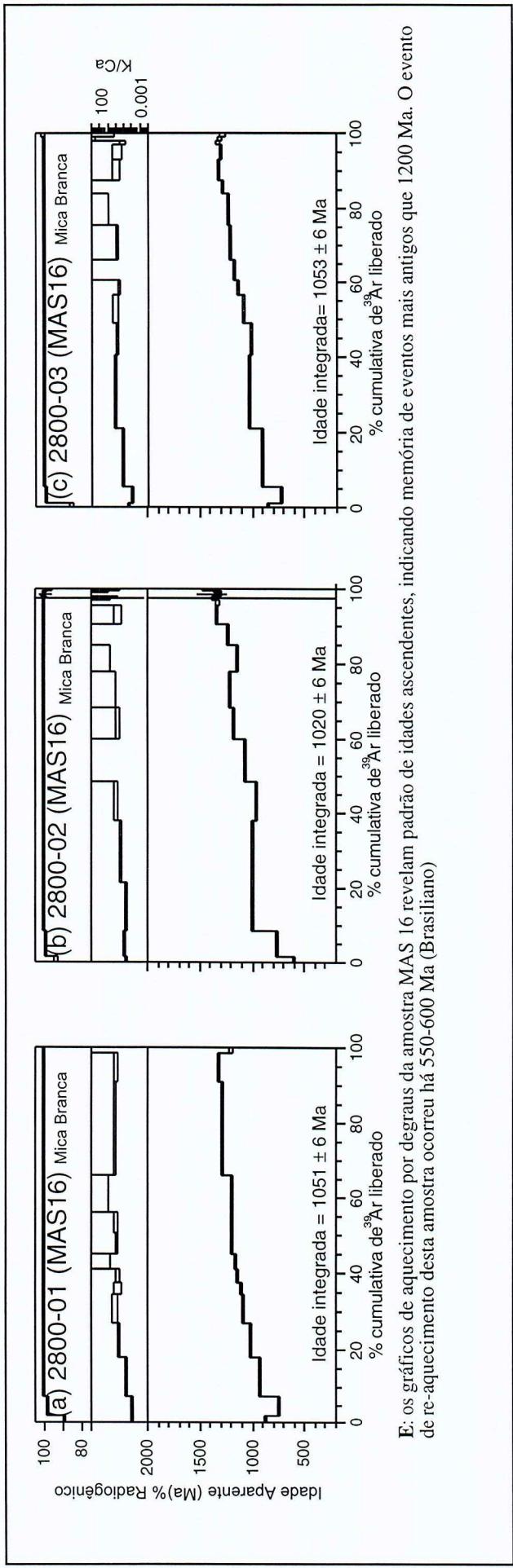
B: Nos gráficos de aquecimento por degraus em grãos de actinolita da amostra MAS 32 (dique de anfibolito intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego) os primeiros degraus dos diagramas correspondem a *recoil* ou excesso de Ar. Nos diagramas a e c também ocorre um pseudo plato em aproximadamente 2600 Ma, sendo esta a idade mínima para esta rocha, indentificada nos três diagramas. As idades integradas destas três análises estão no intervalo entre 2550-2560.

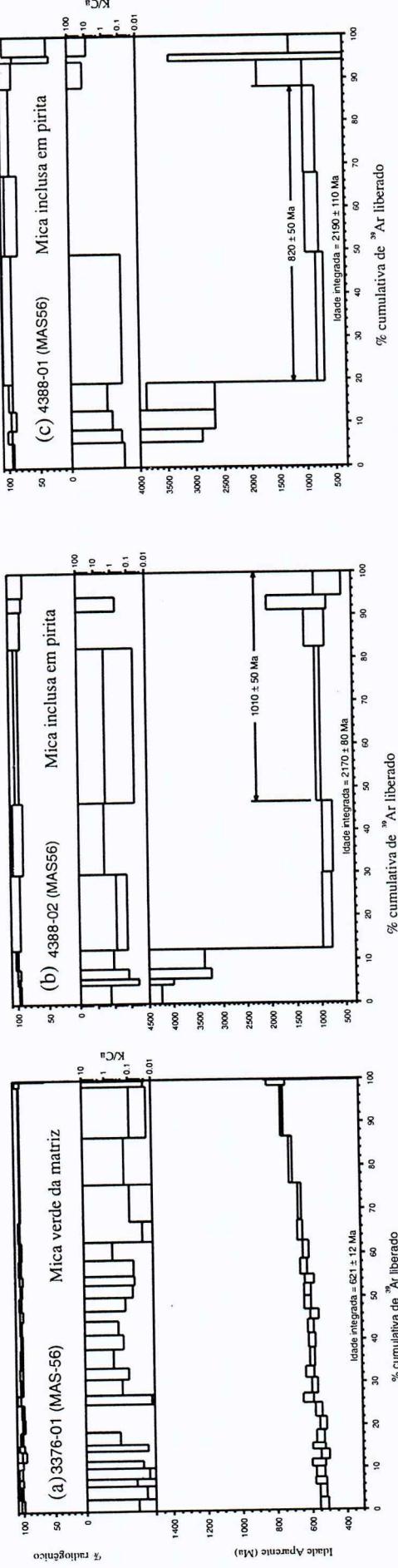


C: Diagramas de aquecimento gradual de grãos de mica branca da matriz (sericitita muscovita xisto da mina Morro Velho). Os diagramas a e b apresentam padrão de sela, mostrando excesso de Ar nos degraus iniciais, seguidos por vale em aproximadamente 500-550 Ma e degraus ascendentes que atingem idades de aproximadamente 750-800 Ma. No diagrama c, não há excesso de Ar nos primeiros degraus e ocorre um pseudo platô há cerca de 650 Ma. Os espectros das análises destes três gráficos indicam idades para esta rocha superiores a 650 Ma, rejuvenescendo por um evento térmico há aproximadamente 550 Ma (Brasiliano). A idade máxima representada por estes diagramas é mais jovem que as idades das micas inclusas em pirita desta mesma amostra (acima).

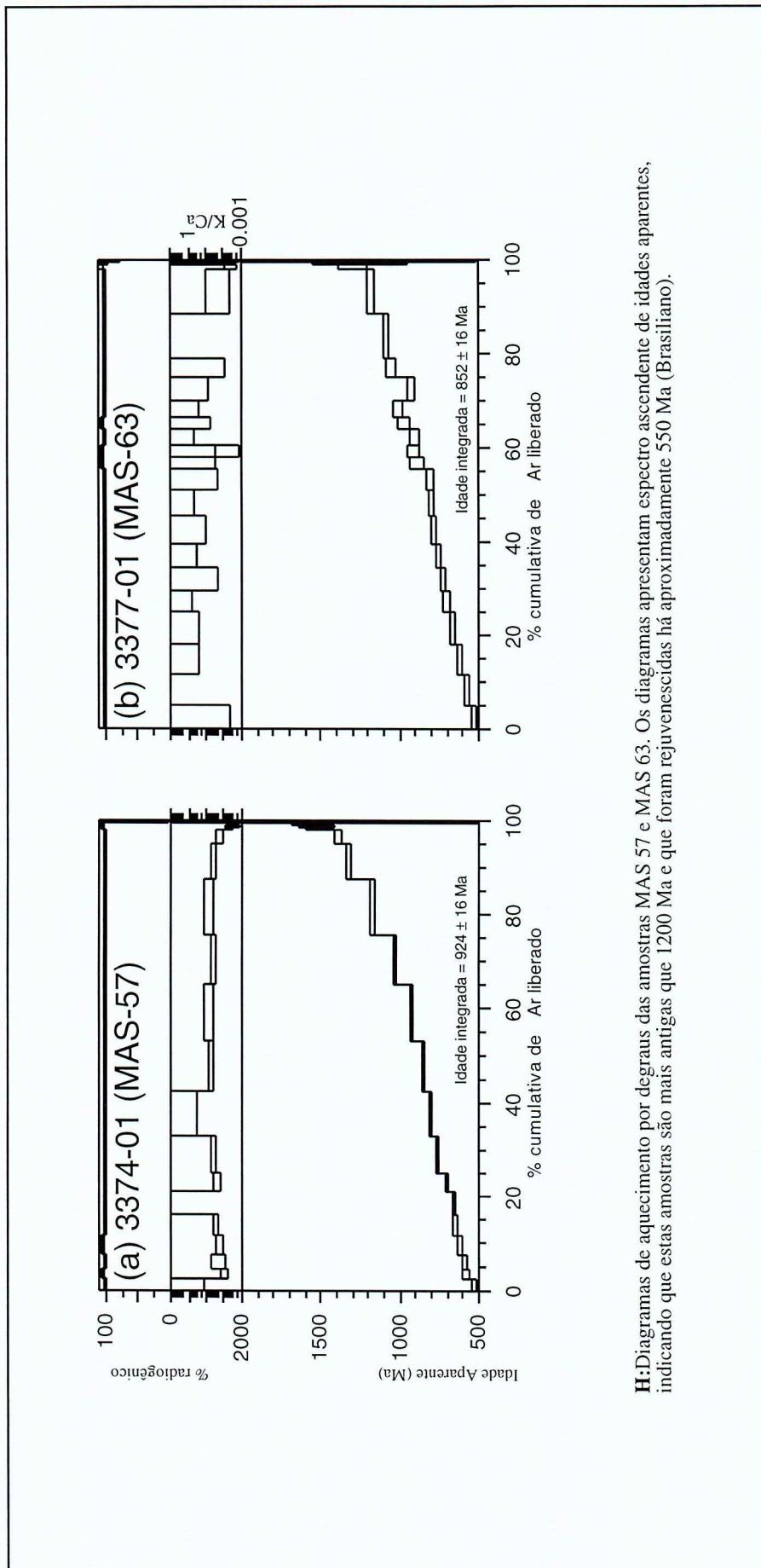


D: Diagramas de aquecimento por degraus de mica inclusos em grãos de mica na interface mica/pirita. O diagrama b apresenta idade platô em 900 ± 20 Ma e o diagrama a, demonstra um "pseudo platô" no mesmo intervalo observado no diagrama b. As idades integradas destas amostras (1360 ± 30 Ma (a) e 1960 ± 40 Ma (b)) são discordantes entre si. Estes diagramas demonstram que a pirita é protegida parcialmente as micas nela inclusas contra rejuvenescimento do sistema Ar/Ar. Contudo estas idades não revelam a idade da mineralização do depósito Morro Velho.

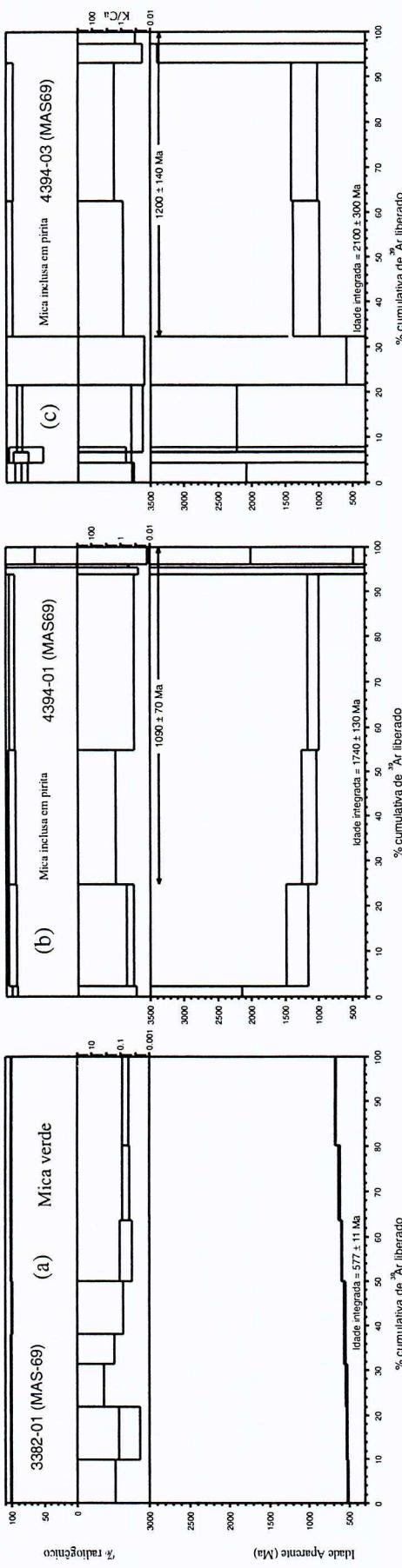




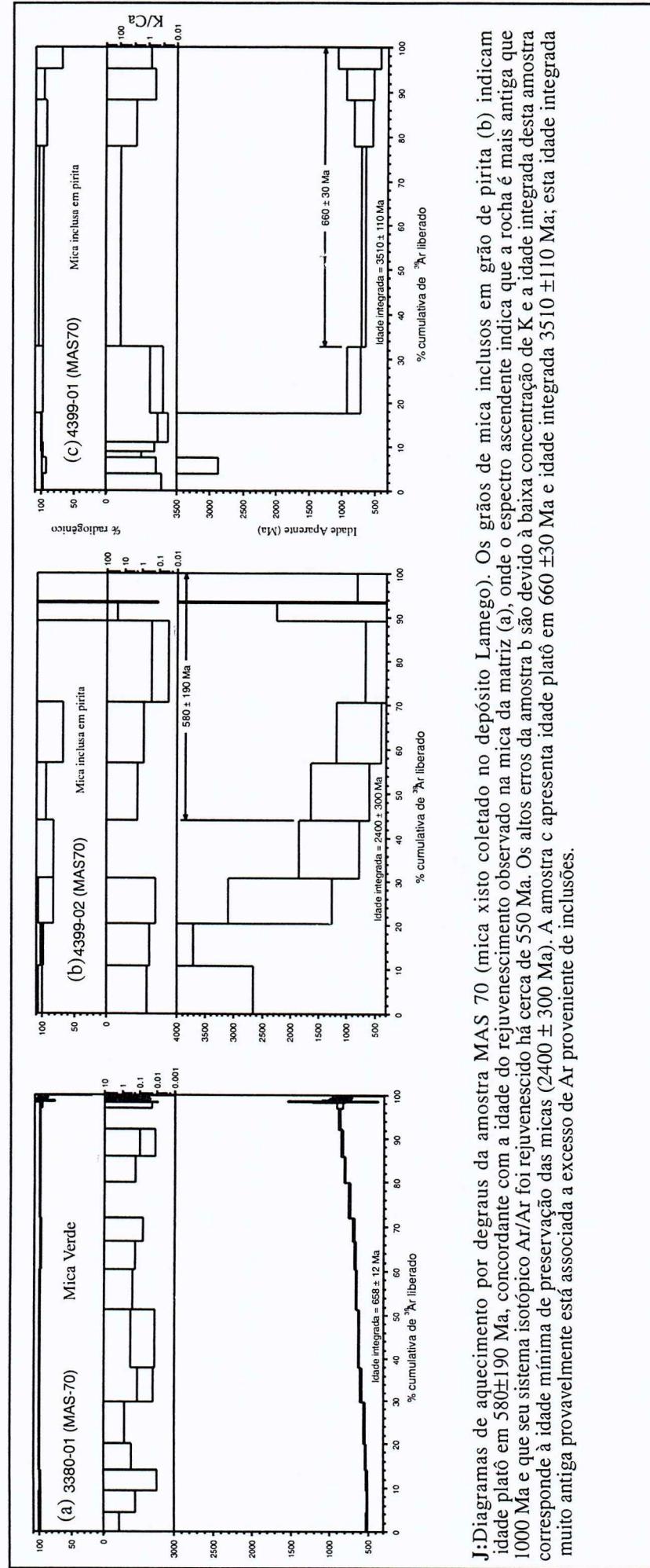
G: Diagramas de aquecimento por degraus de mica da matriz e mica inclusa em grãos de pirita da amostra MAS 56, carbonato quartzo xisto com pirita (depósito Lamego). O diagrama a, correspondente à mica da matriz, apresenta padrão ascendente de idades aparentes, indicando que esta amostra é mais antiga que 750 Ma e que foi rejuvenescida há 500-550 Ma (Brasiliano). As análises dos grãos de mica incluídos em pirita demonstram excesso de Ar nos primeiros degraus, ocasionado pelo acúmulo do gás rejuvenescido. O diagrama b apresenta idade platô em 1010 ± 50 Ma, diferente da idade platô obtida pelo grão do diagrama c, 820 ± 50 Ma. As idades integradas das análises das micas de matriz, em comparação aos resultados das análises dos grãos de pirita, indicam que os grãos de pirita protegem parcialmente suas inclusões contra rejuvenescimento do sistema Ar/Ar. No entanto, a diferença de idades platô para as duas micas sugere que o gás perdido das micas incluídas nos grãos de pirita só é parcialmente preservado. As idades integradas das duas análises de mica inclusa em sulfeto estão dentro da mesma margem de erro, 2090- 2250 Ma, estas idades integradas correspondem à idade mínima de preservação da mica, e, por conseguinte, idade mínima de precipitação do sulfeto e do ouro.



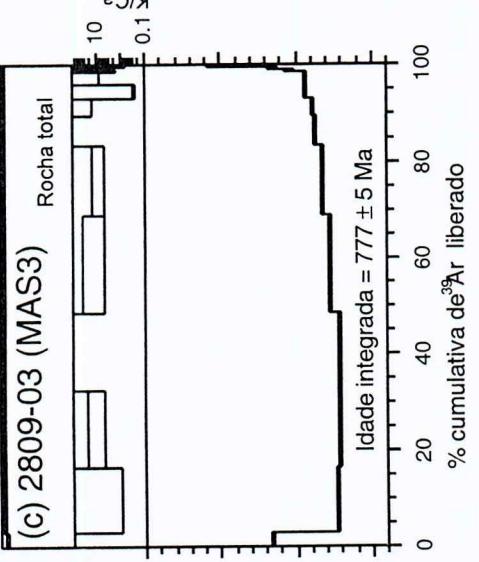
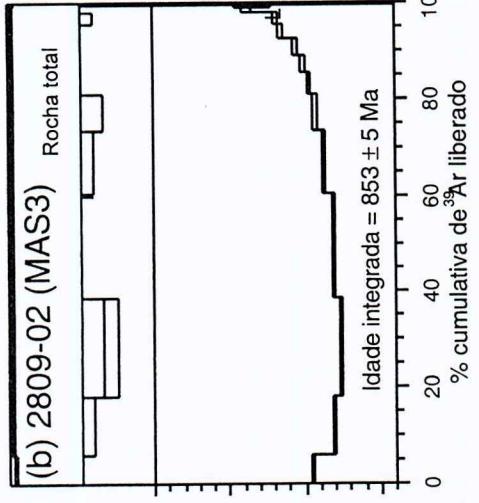
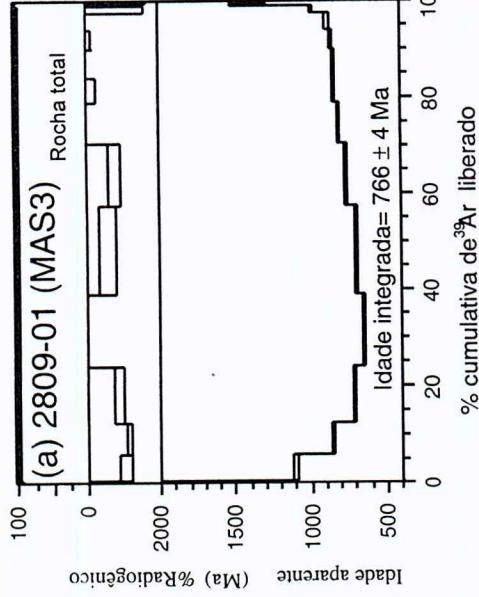
H: Diagramas de aquecimento por degraus das amostras MAS 57 e MAS 63. Os diagramas apresentam espectro ascendente de idades aparentes, indicando que estas amostras são mais antigas que 1200 Ma e que foram rejuvenescidas há aproximadamente 550 Ma (Brasiliano).



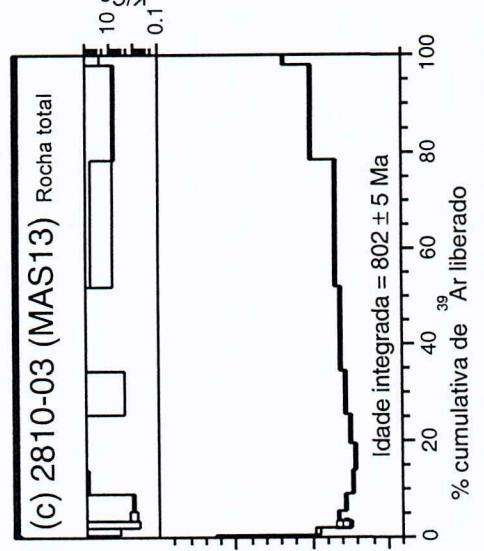
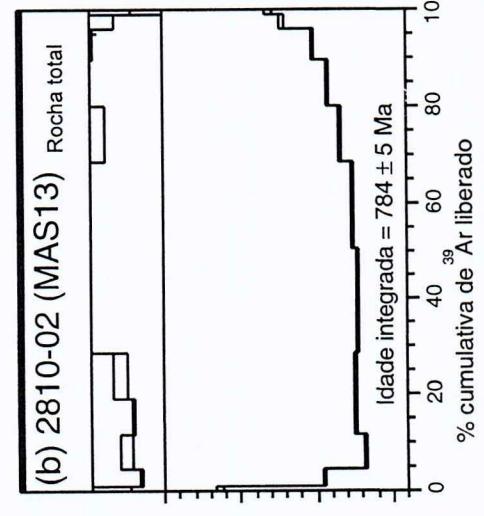
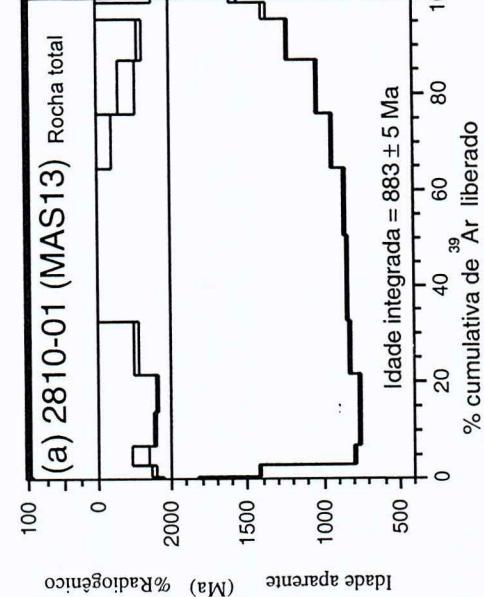
I: Diagramas de aquecimento por degraus da amostra MAS 69 (mica xisto do depósito Lamego). Da mesma alíquota da amostra foram extraídos grãos de mica da matriz e grãos de pirita. O diagrama (a), mica da matriz, apresenta padrão de idades aparentes ascendente, indicando que a amostra é mais antiga que 750 Ma e que seu sistema isotópico Ar/Ar foi rejuvenescido em 500-550 Ma (Brasiliano). Os diagramas das micas inclusas em sulfeto (b e c) demonstram idades platô em 1090 ± 70 Ma e 1200 ± 140 Ma, sendo ambas idades concordantes. Os degraus iniciais dos diagramas das micas inclusas em sulfeto (b e c) podem corresponder à excesso de Ar armazenado na interface entre o grão de mica e o grão de pirita ou *recoil*. Os resultados comparativos entre as análises de mica da matriz e micas inclusas em sulfeto demonstram que os grãos de sulfeto parcialmente protegem o sistema isotópico Ar/Ar de suas inclusões contra rejuvenescimentos. Os resultados das análises dos sulfetos, contudo, não demonstraram-se eficazes na datação da mineralização associada com as micas neles inclusas, pois apresentaram alta margem de erro, grande variações de idades platôs e integradas entre os vários grãos, e idade mais jovem que a idade obtida no dique intrusivo na mesma mineralização (2600 Ma).



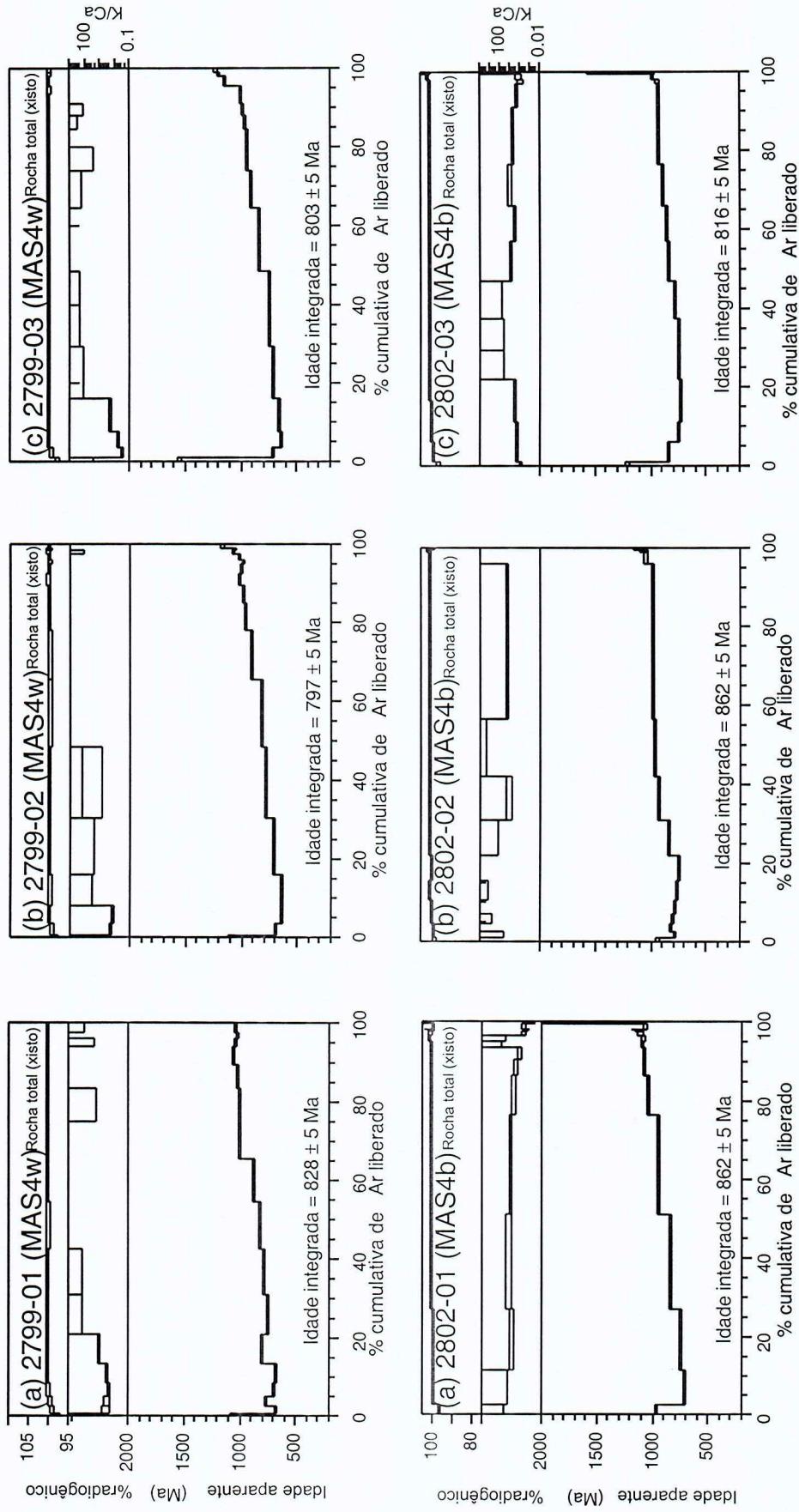
J: Diagramas de aquecimento por degraus da amostra MAS 70 (mica xisto coletado no depósito Lamego). Os grãos de mica inclusos em grão de pirita (b) indicam idade platô em 580 ± 190 Ma, concordante com a idade do rejuvenescimento observado na mica da matriz (a), onde o espectro ascendente indica que a rocha é mais antiga que 1000 Ma e que seu sistema isotópico Ar/Ar foi rejuvenescido há cerca de 550 Ma. Os altos erros da amostra b são devido à baixa concentração de K e a idade integrada desta amostra corresponde à idade mínima de preservação das micas (2400 ± 300 Ma). A amostra c apresenta idade platô em 660 ± 30 Ma e idade integrada 3510 ± 110 Ma; esta idade integrada muito antiga provavelmente está associada a excesso de Ar proveniente de inclusões.



L: Os gráficos de aquecimento em degraus de rocha total da amostra MAS 3 (clorita-calcita-muscovita quartzo xisto) revelam padrão de sela, onde os degraus iniciais, com idades maiores, descendem para um pseudo platô há 600-700 Ma e novamente ascendem para idades superiores a 1.5 Ga. O comportamento dos primeiros degraus nestes diagramas pode ser resultado de *recoil* ou excesso de ^{40}Ar ou exscesso de ^{39}Ar . Os diagramas indicam que a idade mínima da amostra é aproximadamente 650 Ma e que o sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar nesta rocha preserva memória de evento mais antigo que 1500 Ma , parcialmente rejuvenescido durante o Brasiliiano.



M: Todos os gráficos de aquecimento em degraus em rocha total para a amostra MAS13 (clorita-calcita-muscovita quartzo xisto) indicam *recoil* nos primeiros degraus . Os gráficos apresentam padrão de sela, com idade aparente ascendente nos degraus de maior temperatura. Este padrão indica que esta rocha tem idade mínima de aproximadamente 700 Ma e seu sistema $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar preserva memória de evento (s) durante o Brasiliiano.

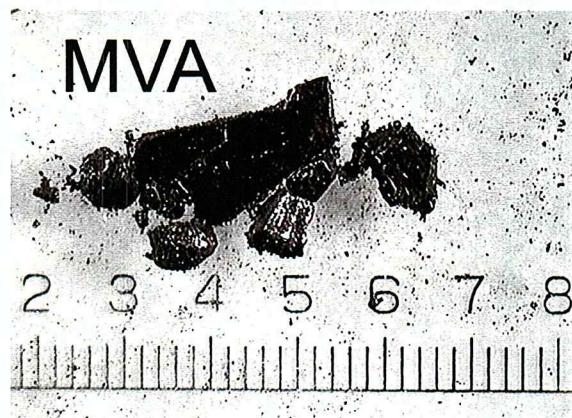


Nos primeiros degraus das análises por aquecimento em rocha total da amostra MAS 4W e 4b observa-se idades aparentes antigas, estas idades correspondem a *recoil* ou excesso de Ar. Os gráficos da amostras MAS4b e 4w apresentam padrão de sela com idade ascendente nos degraus de maior temperatura. No gráfico b ocorre um pseudo platô em 1000 Ma, o espectro dos diagramas indica que esta rocha tem idade mínima de aproximadamente 700 Ma e preserva memória de evento(s) mais antigo(s) que a idade do pseudo platô. As análises MAS 4b (a) e 4b(b) apresentam a mesma idade integrada 862 ± 5 Ma, mas esta idade não tem significado geológico.

ANEXO

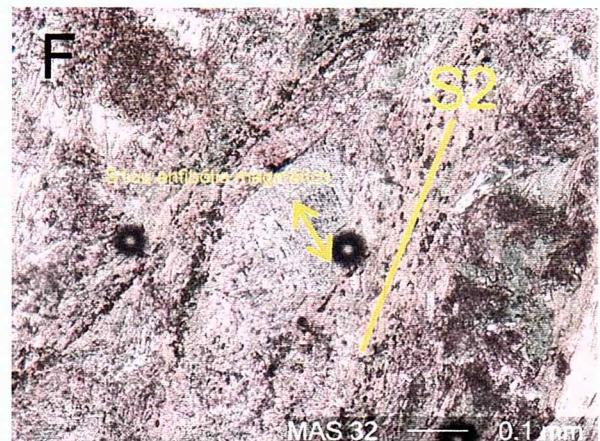
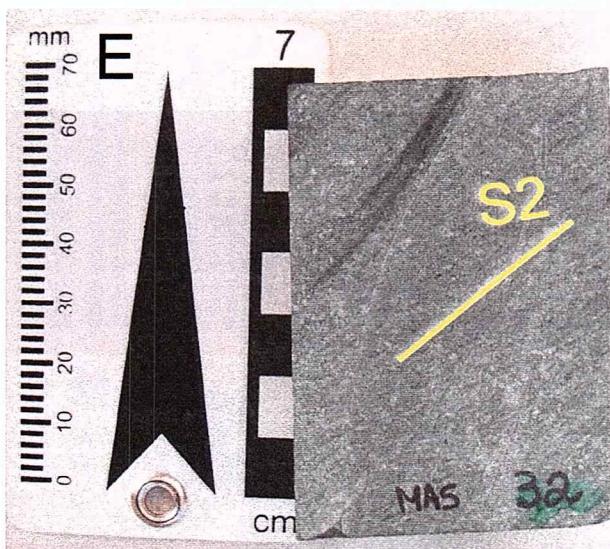
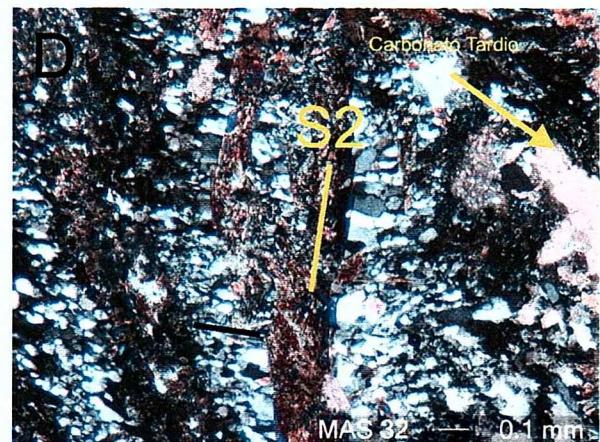
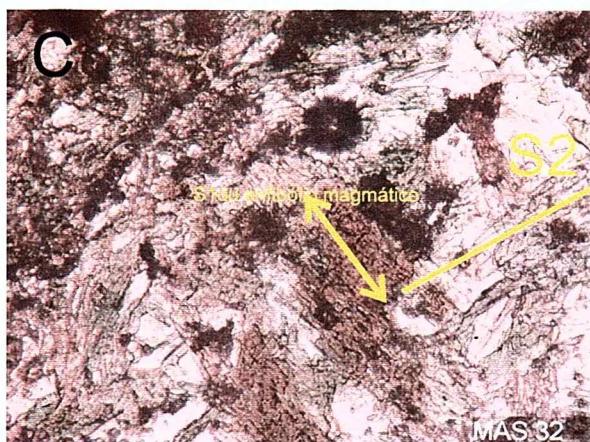
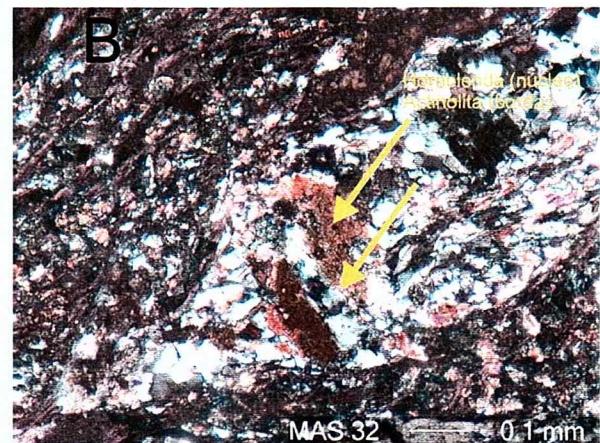
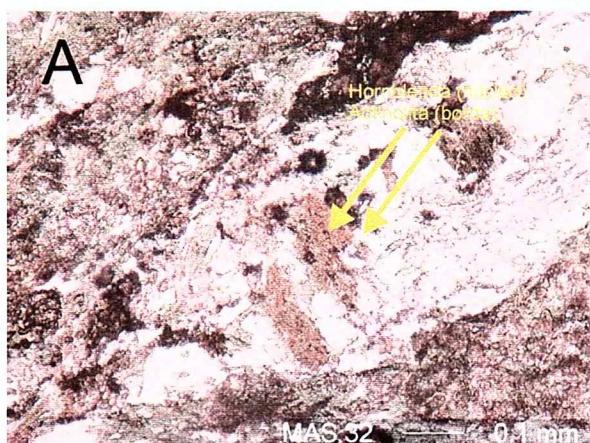
III

PRANCHA DE FOTOS I



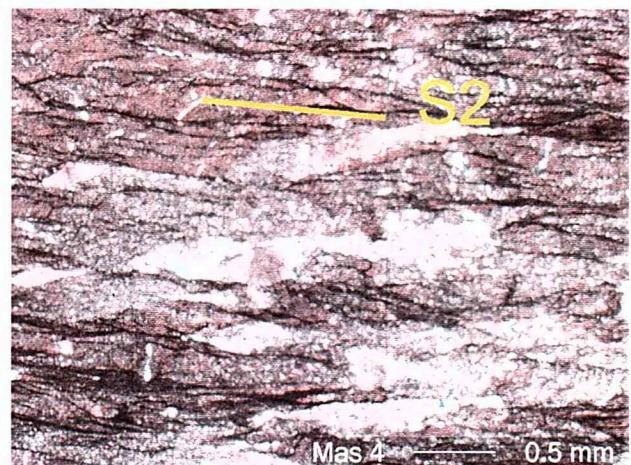
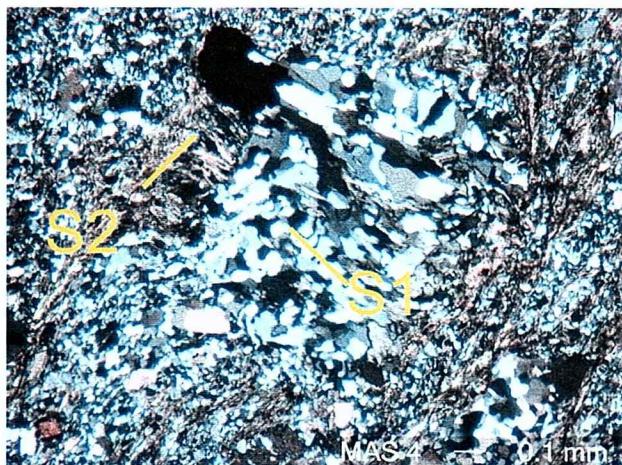
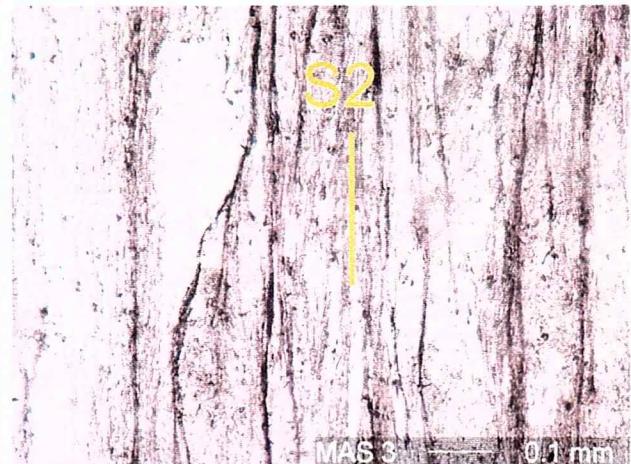
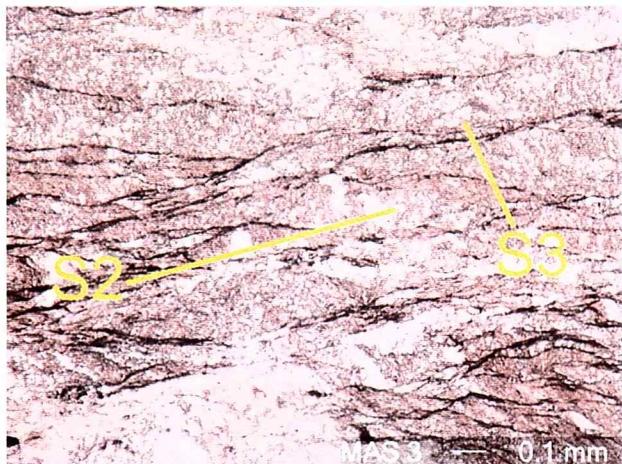
Grãos de sulfeto sem faces cristalinas selecionados para datação Ar/Ar. Escala em mm. A ausência de faces cristalinas minimiza a possibilidade das inclusões de mica dos sulfetos terem trocado Ar com a matriz.

PRANCHA DE FOTOS II



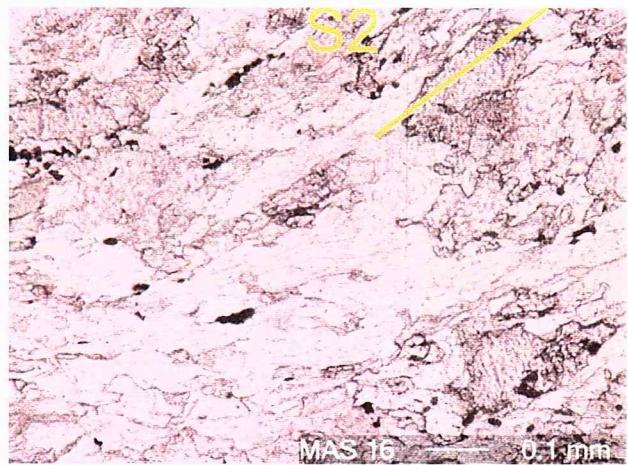
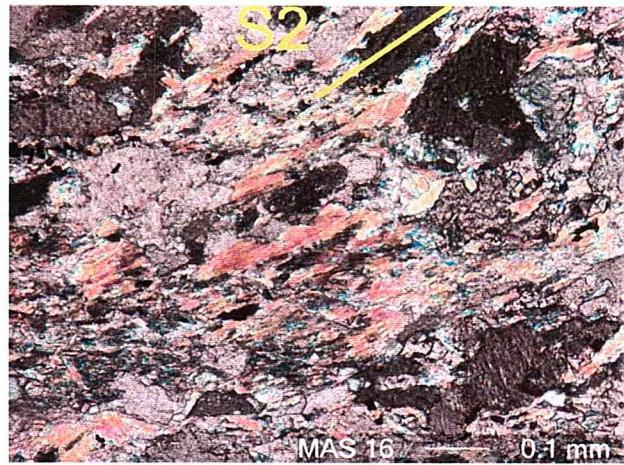
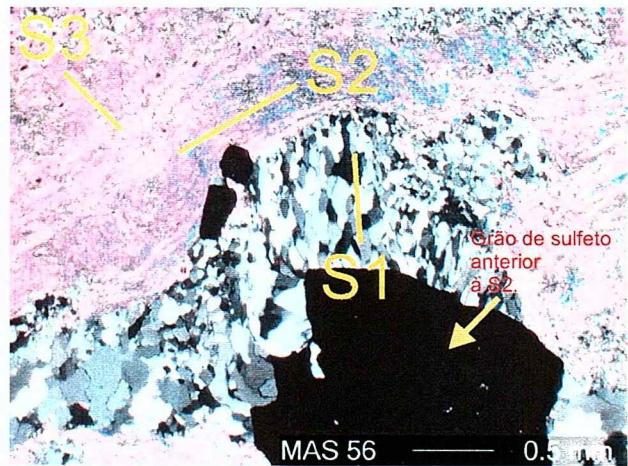
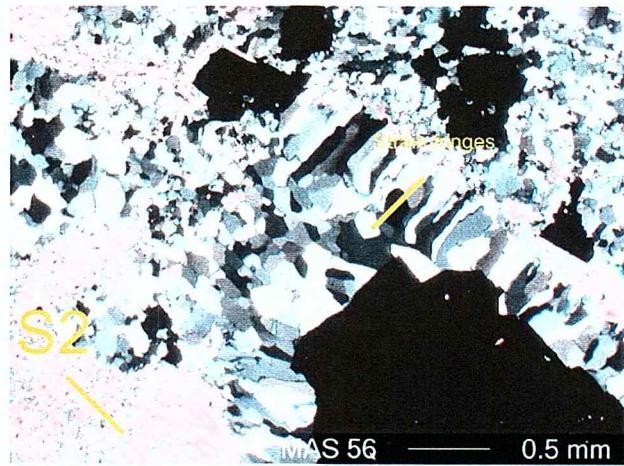
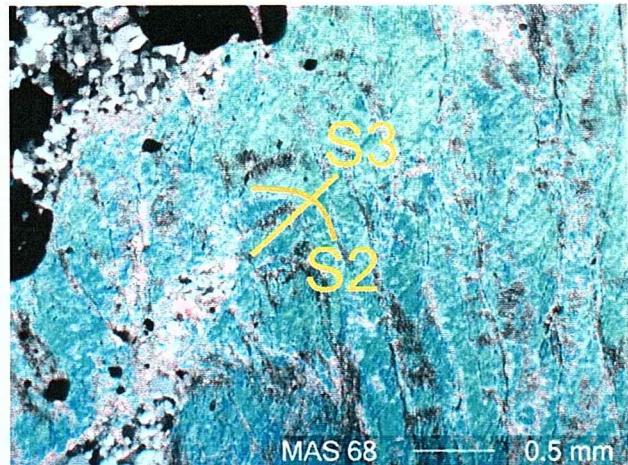
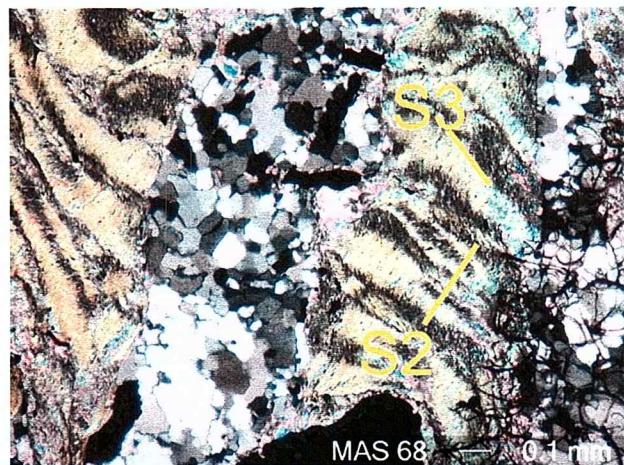
Amostra MAS 32, dique anfibolítico foliado intrusivo na zona mineralizada do depósito Lamego. A foliação principal do dique é ao menos uma S2. Cristais de hornblenda com bordas de substituição por actinolita(A e B) são provavelmente magmáticos. A idade Ar/Ar mínima desta amostra é 2.6 Ma.

PRANCHA DE FOTOS III



As seções delgadas das amostras datadas demonstram zonas de intenso cisalhamento, predominando uma foliação S2. A foliação S1 ocorre nas strain fringes de sulfetos anteriores à foliação principal S1.

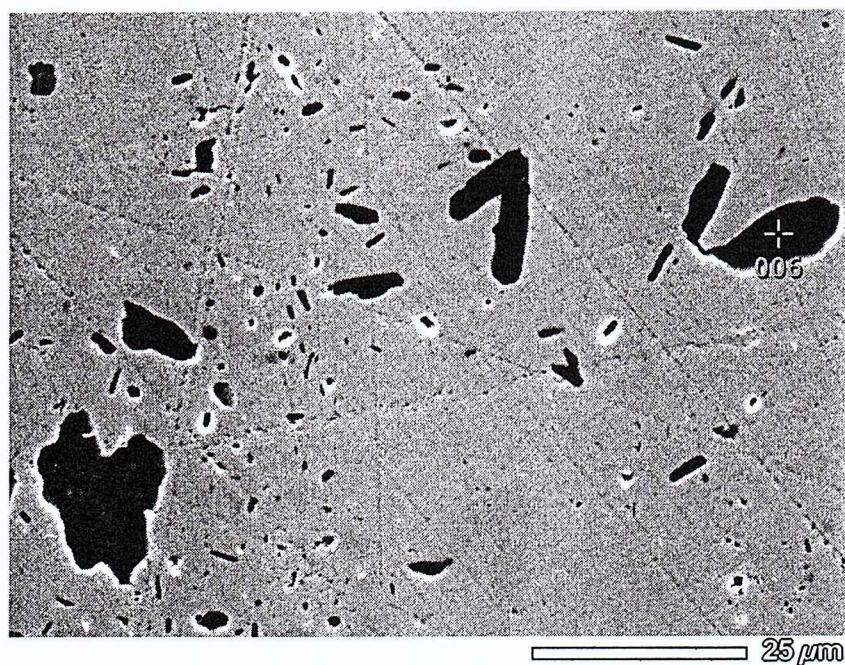
PRANCHA DE FOTOS IV



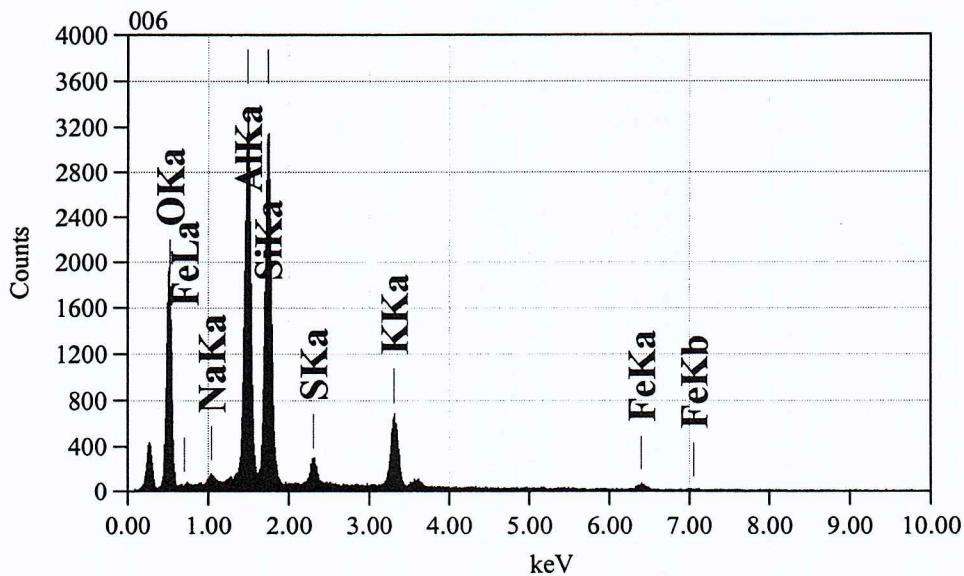
As seções delgadas dos metapelitos da Unidade Lapa Seca apresentam uma foliação principal S2. A foliação S1 ocorre preservada em zonas de strain shadow associadas aos grãos de sulfeto anteriores à S2. A foliação S3 ocorre como clivagem de crenulação, sem cristalização de novos minerais (as amostras numeradas como MAS 68 são MAS 63).

ANEXO

IV

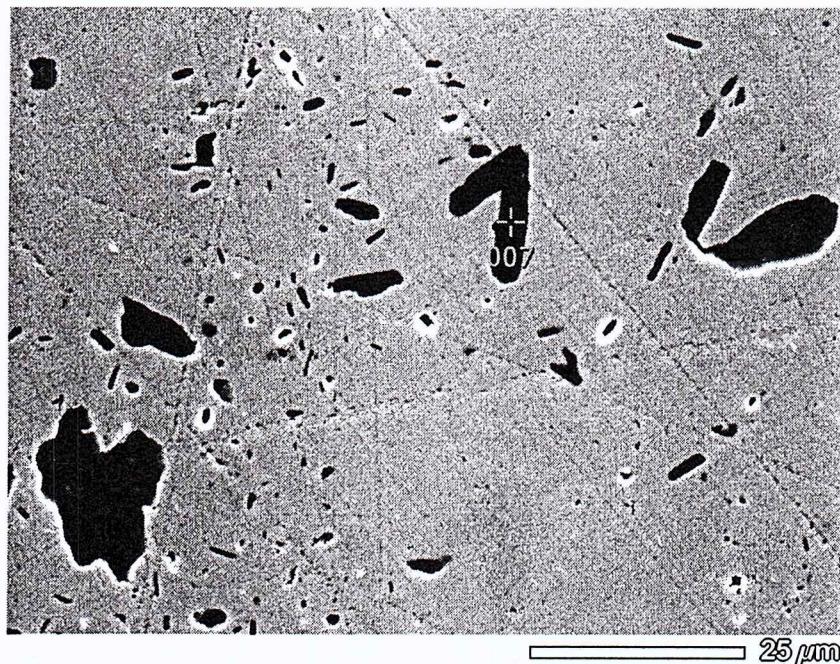


Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag. : x 1,300
Date : 2006/09
Pixel : 1280 x

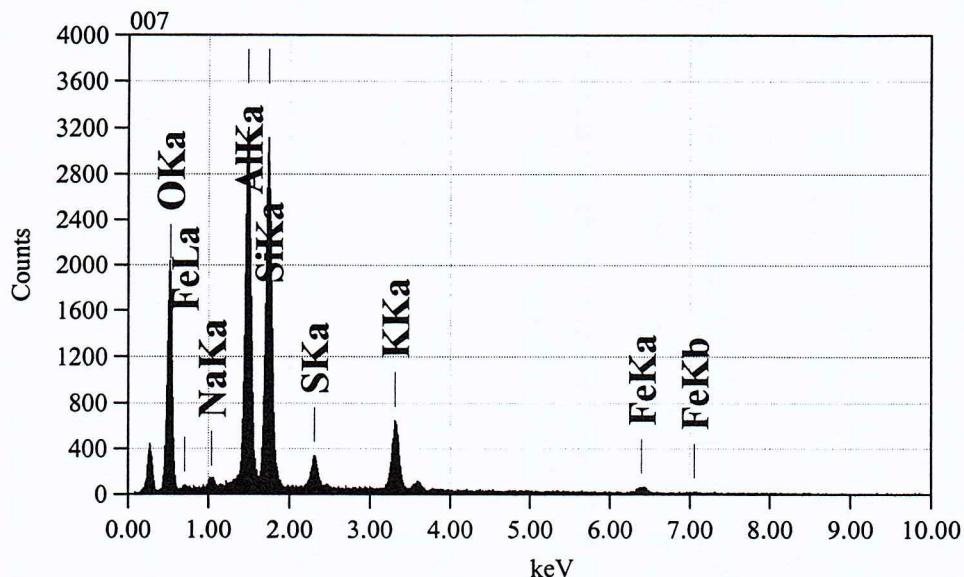


Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.0000
nA
PHA mode : T3
Real Time : 37.8
sec
Live Time : 30.0
sec
Dead Time : 20 %
Counting Rate: 4144 cp
Energy Range : 0 - 2
keV

| phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis | | | | | | |
|---|---------|--------|--------|--------|----------|--------------|
| Fitting Coefficient : 0.1602 | | | | | | |
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% Cation |
| K | | | | | | |
| O K | 64.4210 | 0.525 | 34.12 | 0.14 | 49.12 | |
| Na K | 1.5360 | 1.041 | 0.64 | 0.11 | 0.64 | |
| Al K | 22.2514 | 1.486 | 21.98 | 0.10 | 18.77 | |
| Si K | 24.6202 | 1.739 | 26.75 | 0.13 | 21.94 | |
| S K | 5.2028 | 2.307 | 2.77 | 0.13 | 1.99 | |
| K K | 61.5771 | 3.312 | 10.57 | 0.20 | 6.23 | |
| Fe K | 3.2795 | 6.398 | 3.16 | 0.69 | 1.30 | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | |



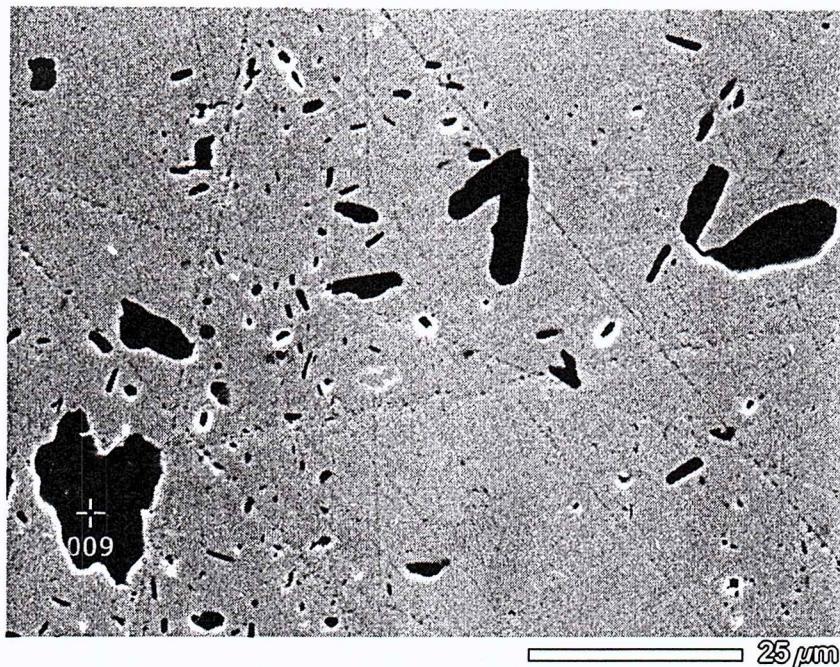
Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 1,300
Date : 2006/09/13
Pixel : 1280 x 960



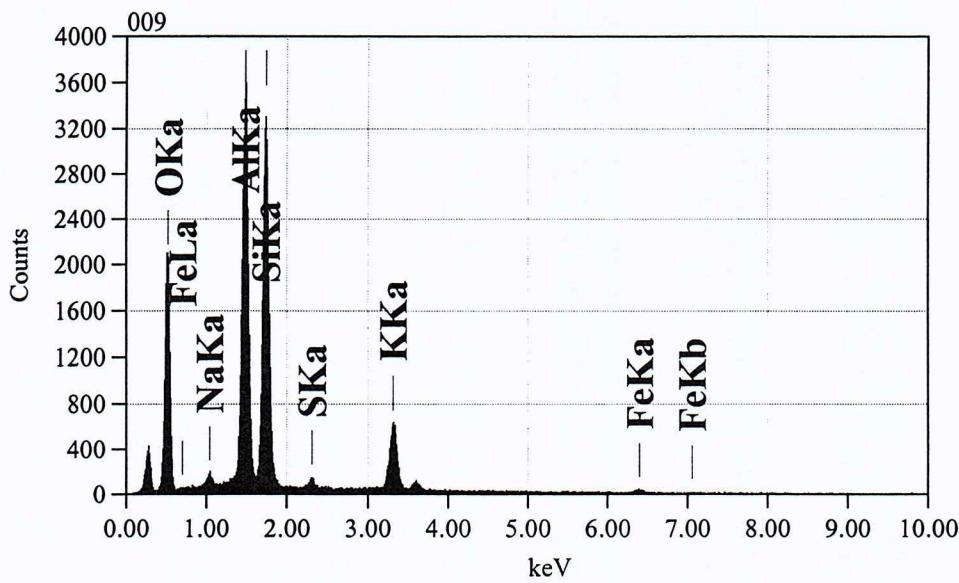
Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.000000
nA
PHA mode : T3
Real Time : 37.73
sec
Live Time : 30.00
sec
Dead Time : 20 %
Counting Rate: 4110 cps
Energy Range : 0 - 20
keV

phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis
Fitting Coefficient : 0.1648

| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|---------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | 66.7926 | 0.525 | 34.83 | 0.14 | 49.98 | | |
| Na K | 1.7731 | 1.041 | 0.76 | 0.12 | 0.75 | | |
| Al K | 21.6220 | 1.486 | 21.63 | 0.10 | 18.41 | | |
| Si K | 23.6748 | 1.739 | 25.92 | 0.13 | 21.18 | | |
| S K | 6.0736 | 2.307 | 3.24 | 0.13 | 2.32 | | |
| K K | 57.5037 | 3.312 | 9.92 | 0.21 | 5.82 | | |
| Fe K | 3.8371 | 6.398 | 3.71 | 0.73 | 1.53 | | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |



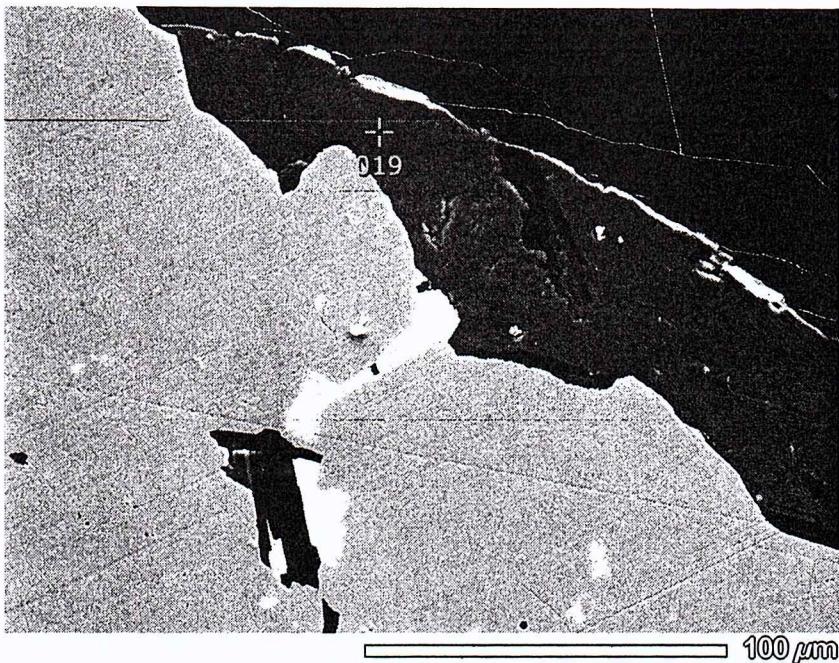
Title : IMG2
 --
 Instrument :
 Volt : 15.00 kV
 Mag : x 1,300
 Date : 2006/09/13
 Pixel : 1280 x 960



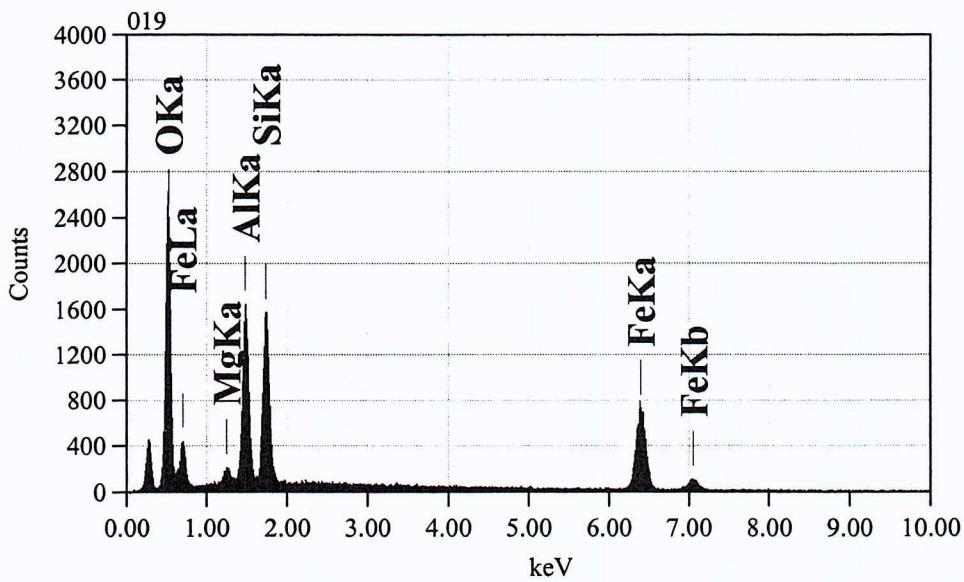
phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1578

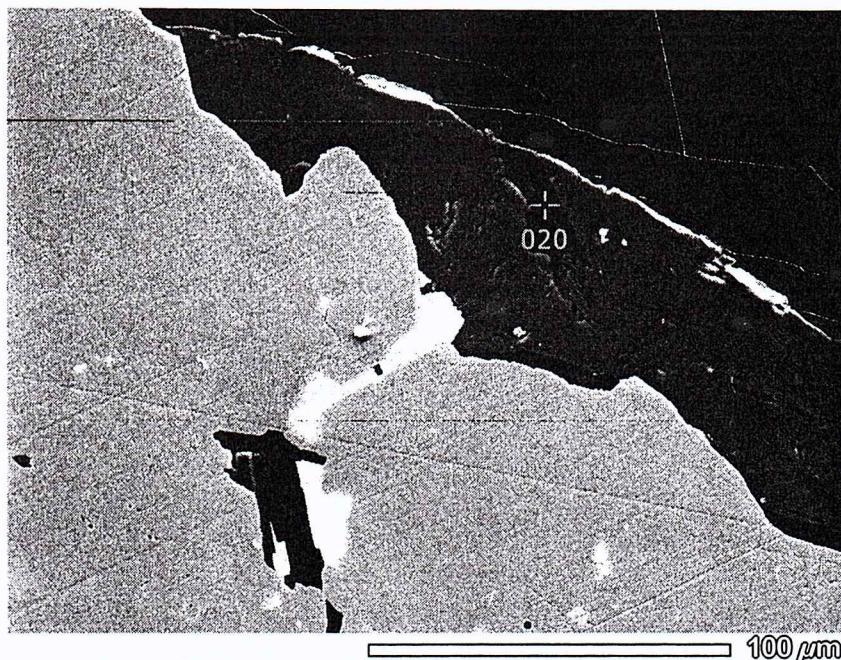
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|---------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | 69.6959 | 0.525 | 36.02 | 0.13 | 50.75 | | |
| Na K | 2.1219 | 1.041 | 0.88 | 0.11 | 0.86 | | |
| Al K | 23.2731 | 1.486 | 23.08 | 0.09 | 19.29 | | |
| Si K | 24.7461 | 1.739 | 27.38 | 0.13 | 21.98 | | |
| S K | 1.8555 | 2.307 | 1.01 | 0.13 | 0.71 | | |
| K K | 57.2423 | 3.312 | 9.94 | 0.20 | 5.73 | | |
| Fe K | 1.7377 | 6.398 | 1.70 | 0.69 | 0.69 | | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |



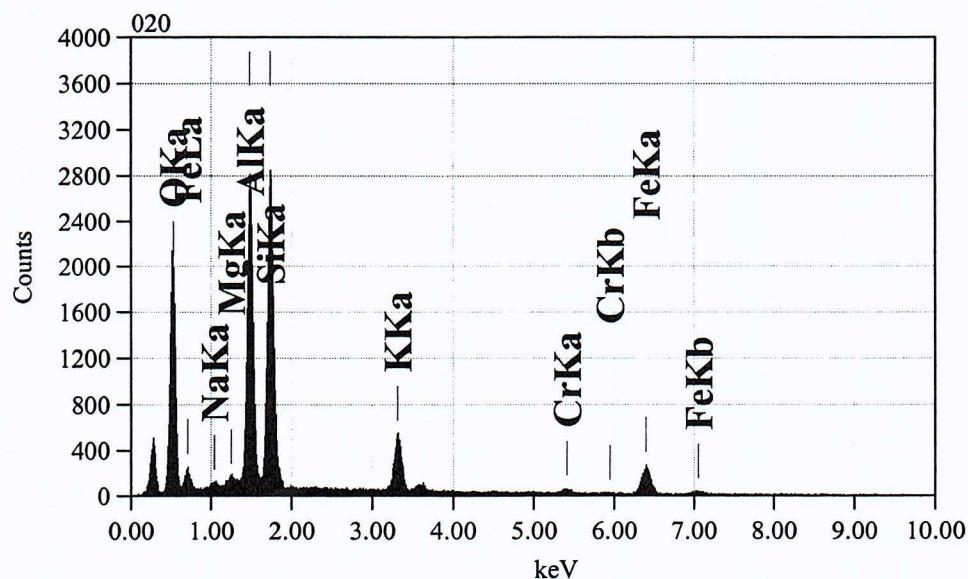
Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 550
Date : 2006/09/13
Pixel : 1280 x 960



| phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis | | | | | | | |
|---|-------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| Fitting Coefficient : 0.1920 | | | | | | | |
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
| K | | | | | | | |
| O K | | 0.525 | | 27.69 | | 0.08 | 48.84 |
| 71.0658 | | | | | | | |
| Mg K | | 1.253 | | 1.28 | | 0.14 | 1.49 |
| 0.6592 | | | | | | | |
| Al K | | 1.486 | | 12.93 | | 0.12 | 13.52 |
| 8.4684 | | | | | | | |
| Si K | | 1.739 | | 13.61 | | 0.13 | 13.67 |
| 9.8127 | | | | | | | |
| Fe K | | 6.398 | | 44.49 | | 0.61 | 22.48 |
| 43.2224 | | | | | | | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |



Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 550
Date : 2006/09/13
Pixel : 1280 x 960

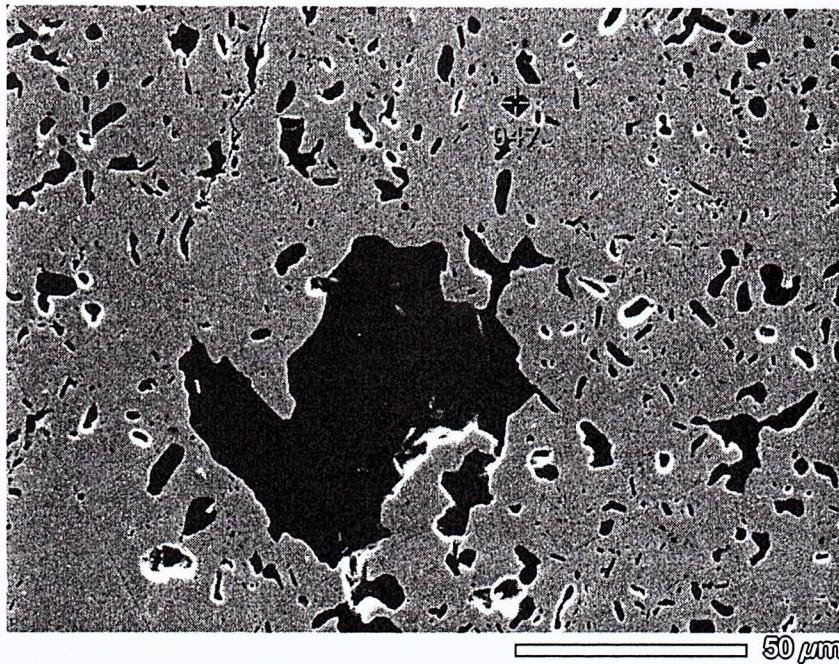


Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T3
Real Time : 37.65 sec
Live Time : 30.00 sec
Dead Time : 19 %
Counting Rate: 3988 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

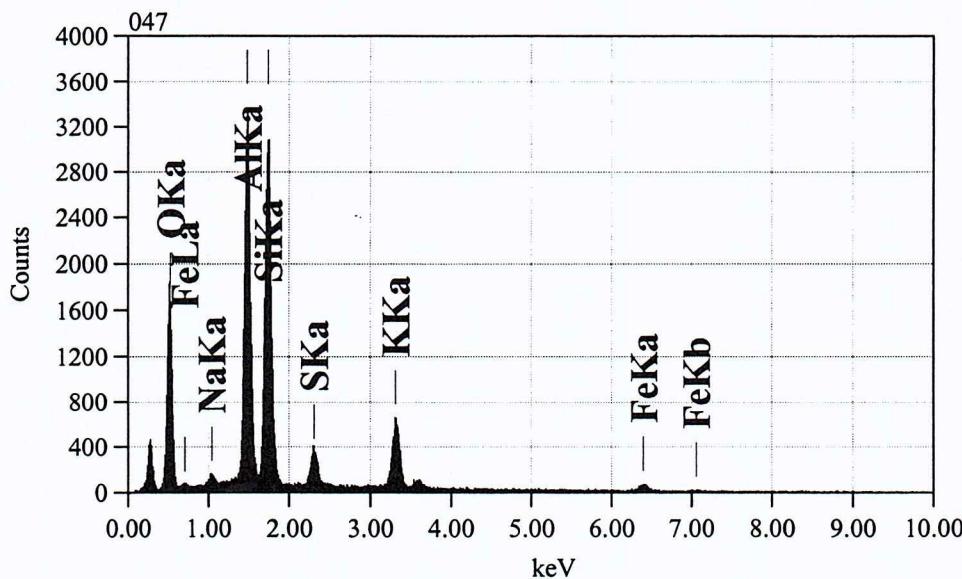
phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1683

| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|-------|-------|--------|-------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | | 0.525 | | 31.31 | | 0.12 | 48.17 |
| 65.8011 | | | | | | | |
| Na K* | | 1.041 | | 0.55 | | 0.13 | 0.59 |
| 1.0360 | | | | | | | |
| Mg K* | | 1.253 | | 0.59 | | 0.11 | 0.60 |
| 0.4408 | | | | | | | |
| Al K | | 1.486 | | 19.18 | | 0.10 | 17.50 |
| 17.0854 | | | | | | | |
| Si K | | 1.739 | | 23.68 | | 0.13 | 20.75 |
| 20.4931 | | | | | | | |
| K K | | 3.312 | | 7.71 | | 0.19 | 4.86 |
| 44.8562 | | | | | | | |
| Cr K* | | 5.411 | | 1.32 | | 0.46 | 0.62 |
| 1.4134 | | | | | | | |
| Fe K | | 6.398 | | 15.67 | | 0.65 | 6.91 |
| 16.2648 | | | | | | | |



Title : IMG2
 --
 Instrument :
 Volt : 15.00 kV
 Mag : x 700
 Date : 2006/09/13
 Pixel : 1280 x 960



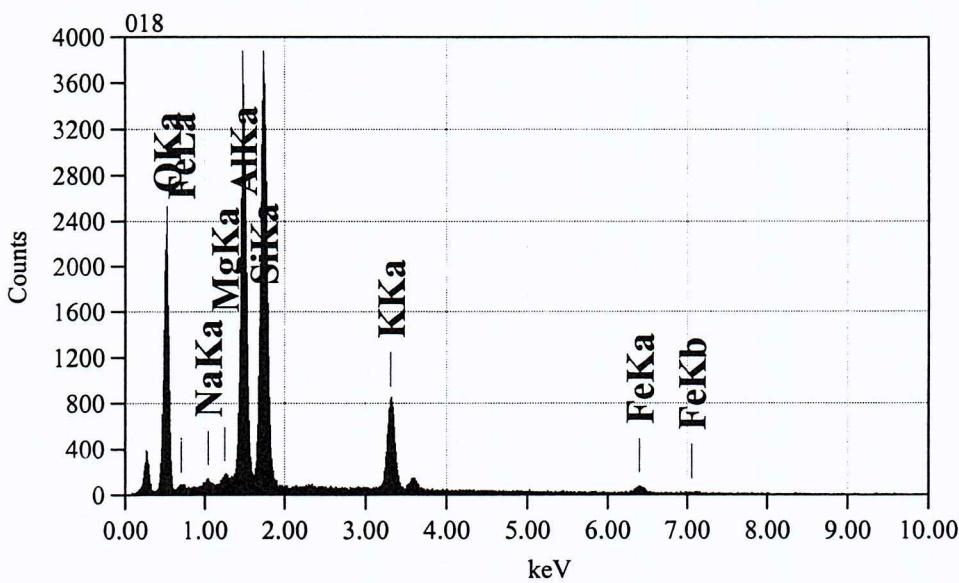
phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1803

| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|-------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | | 0.525 | | 32.90 | | 0.15 | 47.83 |
| 62.0312 | | | | | | | |
| Na K | | 1.041 | | 0.78 | | 0.13 | 0.79 |
| 1.8752 | | | | | | | |
| Al K | | 1.486 | | 22.27 | | 0.11 | 19.20 |
| 22.5697 | | | | | | | |
| Si K | | 1.739 | | 26.51 | | 0.14 | 21.95 |
| 24.4039 | | | | | | | |
| S K | | 2.307 | | 3.70 | | 0.14 | 2.68 |
| 6.9713 | | | | | | | |
| K K | | 3.312 | | 9.96 | | 0.22 | 5.93 |
| 58.1340 | | | | | | | |
| Fe K | | 6.398 | | 3.88 | | 0.76 | 1.62 |
| 4.0514 | | | | | | | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |

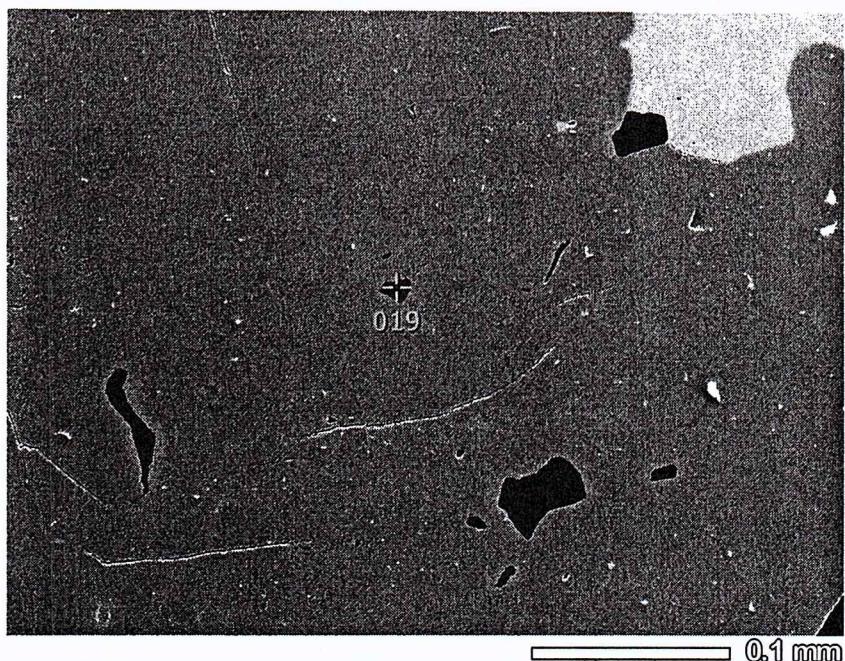


Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 300
Date : 2006/09/15
Pixel : 1280 x 960

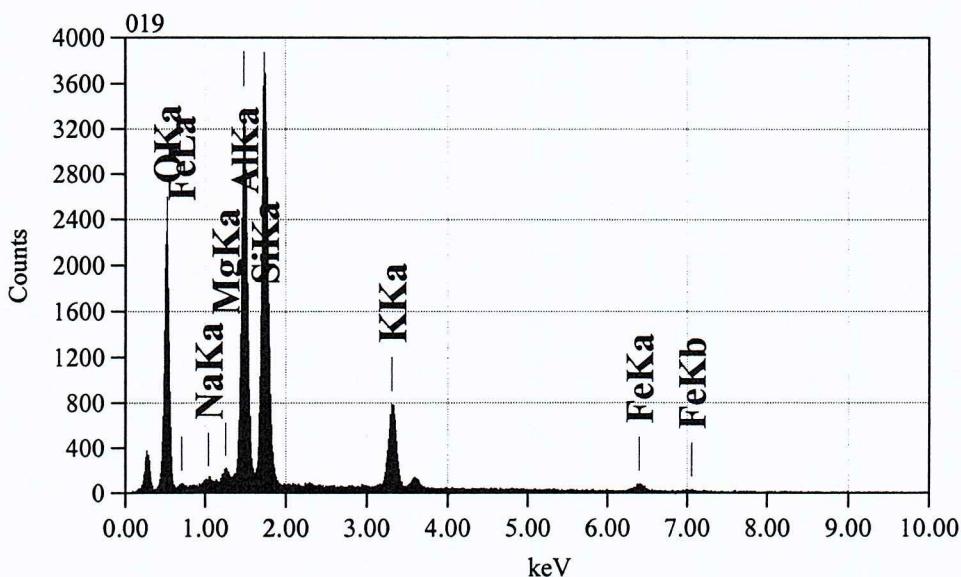


Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000
nA
PHA mode : T3
Real Time : 38.69
sec
Live Time : 30.00
sec
Dead Time : 22 %
Counting Rate: 4520 cps
Energy Range : 0 - 20
keV

| phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis | | | | | | | |
|---|-------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| Fitting Coefficient : 0.1505 | | | | | | | |
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
| K | | | | | | | |
| O K | | 0.525 | | 35.20 | | 0.12 | 50.44 |
| 66.8000 | | | | | | | |
| Na K* | | 1.041 | | 0.38 | | 0.10 | 0.38 |
| 0.8978 | | | | | | | |
| Mg K* | | 1.253 | | 0.42 | | 0.09 | 0.39 |
| 0.3643 | | | | | | | |
| Al K | | 1.486 | | 20.96 | | 0.09 | 17.81 |
| 20.9135 | | | | | | | |
| Si K | | 1.739 | | 27.60 | | 0.11 | 22.53 |
| 25.3866 | | | | | | | |
| K K | | 3.312 | | 12.02 | | 0.18 | 7.05 |
| 70.2757 | | | | | | | |
| Fe K | | 6.398 | | 3.42 | | 0.61 | 1.40 |
| 3.5338 | | | | | | | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |

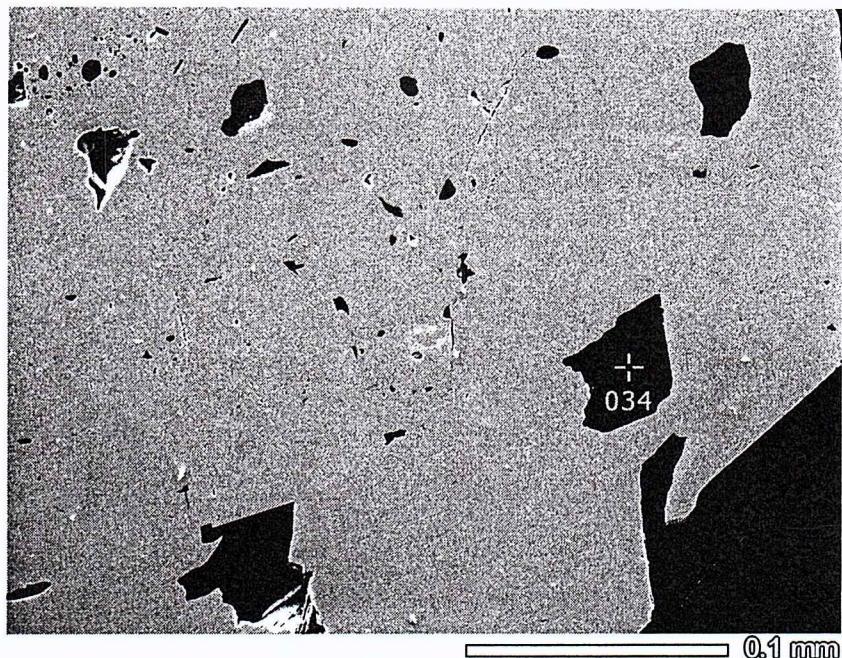


Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 300
Date : 2006/09/1
Pixel : 1280 x 96

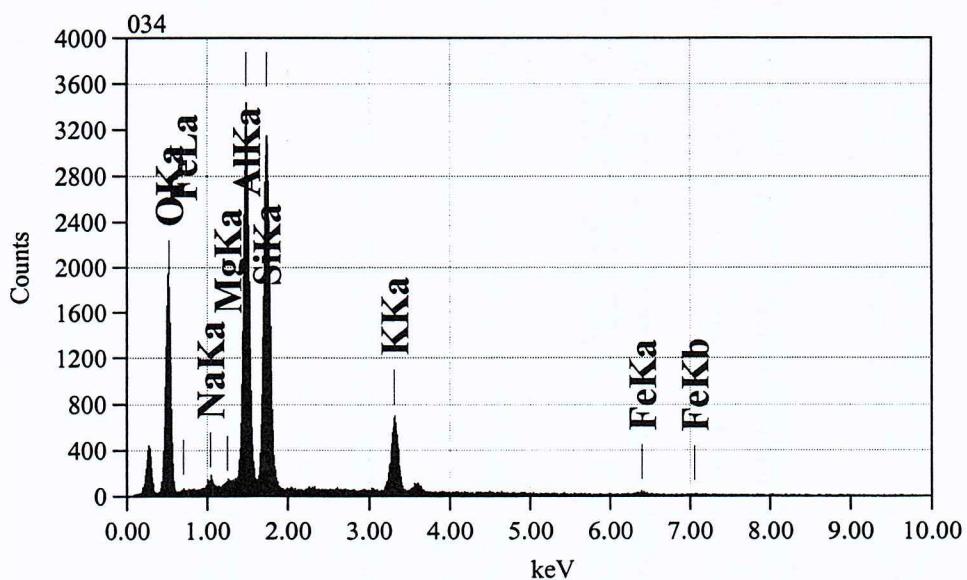


Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000 nA
PHA mode : T3
Real Time : 38.60 sec
Live Time : 30.00 sec
Dead Time : 21 %
Counting Rate: 4470 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

| phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis | | | | | | | |
|---|---------|--------|--------|------|----------|-------|--------|
| Fitting Coefficient : 0.1550 | | | | | | | |
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
| K | | | | | | | |
| O K | 68.7809 | 0.525 | 35.65 | 0.12 | 50.88 | | |
| Na K* | 0.6457 | 1.041 | 0.28 | 0.10 | 0.28 | | |
| Mg K* | 0.6993 | 1.253 | 0.81 | 0.09 | 0.76 | | |
| Al K | 19.9894 | 1.486 | 20.25 | 0.09 | 17.14 | | |
| Si K | 25.9868 | 1.739 | 28.30 | 0.11 | 23.01 | | |
| K K | 64.0460 | 3.312 | 11.02 | 0.18 | 6.44 | | |
| Fe K | 3.7975 | 6.398 | 3.69 | 0.62 | 1.51 | | |
| Total | | 100.00 | 100.00 | | | | |



Title : IMG2
 --
 Instrument :
 Volt : 15.00 kV
 Mag : x 400
 Date : 2006/09/13
 Pixel : 1280 x 960

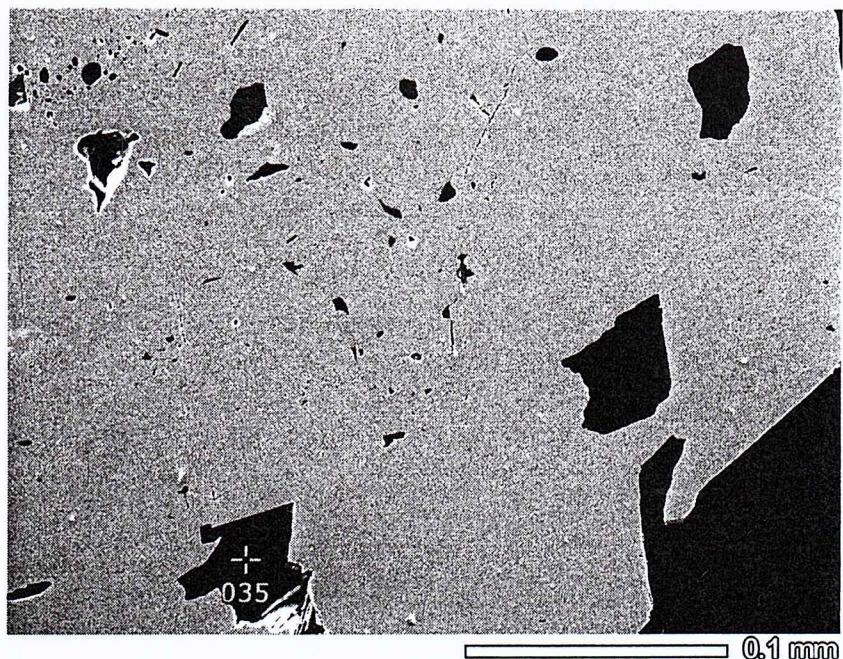


Acquisition Parameter
 Instrument : 6460(LA)
 Acc. Voltage : 15.0 kV
 Probe Current: 1.00000
 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 37.58
 sec
 Live Time : 30.00
 sec
 Dead Time : 19 %
 Counting Rate: 4012 cps
 Energy Range : 0 - 20
 keV

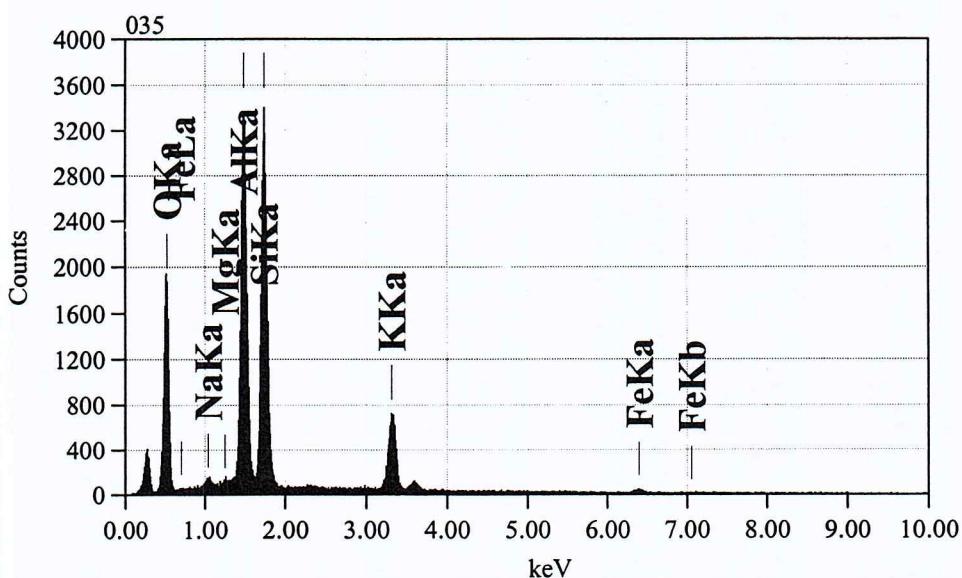
phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1705

| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|---------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | 67.8127 | 0.525 | 35.49 | | 0.15 | 50.19 | |
| Na K* | 1.9622 | 1.041 | 0.80 | | 0.12 | 0.79 | |
| Mg K* | 0.3566 | 1.253 | 0.40 | | 0.11 | 0.37 | |
| Al K | 23.2712 | 1.486 | 22.99 | | 0.11 | 19.29 | |
| Si K | 25.1844 | 1.739 | 27.70 | | 0.14 | 22.31 | |
| K K | 64.7383 | 3.312 | 11.14 | | 0.23 | 6.45 | |
| Fe K* | 1.5216 | 6.398 | 1.48 | | 0.78 | 0.60 | |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |



Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 400
Date : 2006/09/13
Pixel : 1280 x 960



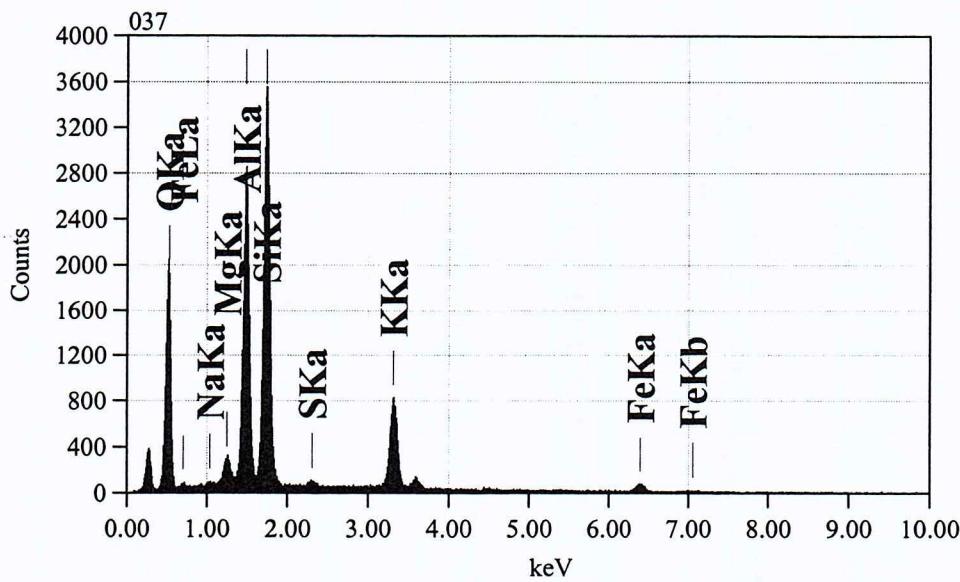
phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1670

| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|---------|--------|--------|--------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | | 0.525 | | 34.94 | | 0.14 | 49.78 |
| 66.2416 | | | | | | | |
| Na K* | 1.3871 | 1.041 | | 0.57 | | 0.12 | 0.57 |
| Mg K* | 0.2928 | 1.253 | | 0.33 | | 0.10 | 0.31 |
| Al K | 22.6848 | 1.486 | | 22.41 | | 0.10 | 18.93 |
| Si K | 25.7837 | 1.739 | | 28.14 | | 0.13 | 22.84 |
| K K | 66.8951 | 3.312 | | 11.47 | | 0.21 | 6.69 |
| Fe K* | 2.2095 | 6.398 | | 2.14 | | 0.72 | 0.87 |
| Total | | 100.00 | | 100.00 | | | |



Title : IMG2
--
Instrument :
Volt : 15.00 kV
Mag : x 350
Date : 2006/09/13
Pixel : 1280 x 960



Acquisition Parameter
Instrument : 6460(LA)
Acc. Voltage : 15.0 kV
Probe Current: 1.00000
nA
PHA mode : T3
Real Time : 38.03
sec
Live Time : 30.00
sec
Dead Time : 20 %
Counting Rate: 4201 cps
Energy Range : 0 - 20
keV

phi-rho-z Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1678

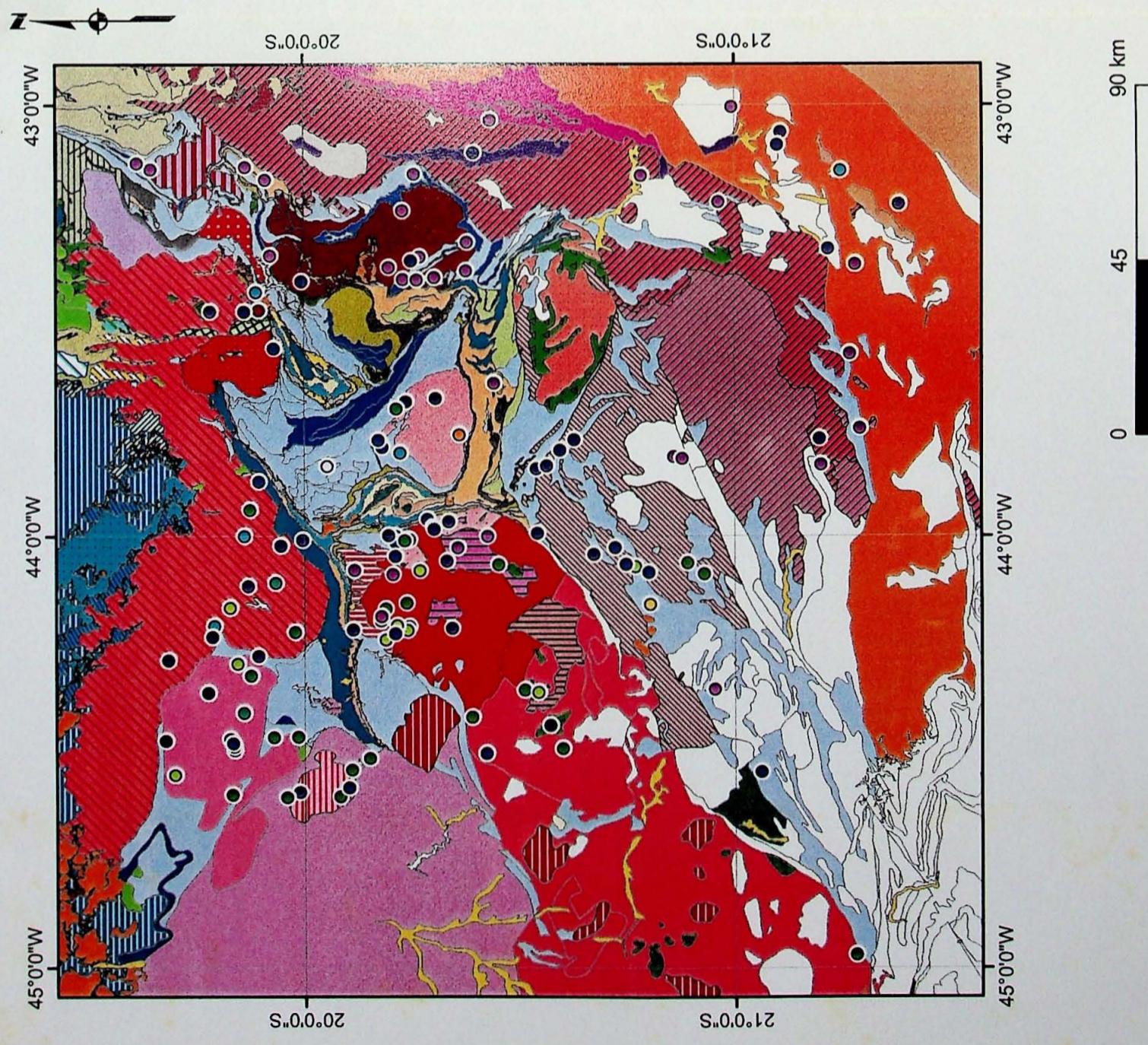
| Element | (keV) | mass% | Error% | At% | Compound | mass% | Cation |
|---------|---------|-------|--------|------|----------|-------|--------|
| K | | | | | | | |
| O K | 64.5836 | 0.525 | 34.32 | 0.13 | 49.70 | | |
| Na K* | 0.7040 | 1.041 | 0.30 | 0.11 | 0.31 | | |
| Mg K | 1.3255 | 1.253 | 1.52 | 0.10 | 1.45 | | |
| Al K | 17.9137 | 1.486 | 18.23 | 0.10 | 15.66 | | |
| Si K | 26.4497 | 1.739 | 28.20 | 0.12 | 23.27 | | |
| S K* | 1.0365 | 2.307 | 0.55 | 0.12 | 0.40 | | |
| K K | 73.3038 | 3.312 | 12.45 | 0.20 | 7.38 | | |
| Fe K | 4.6139 | 6.398 | 4.43 | 0.68 | 1.84 | | |

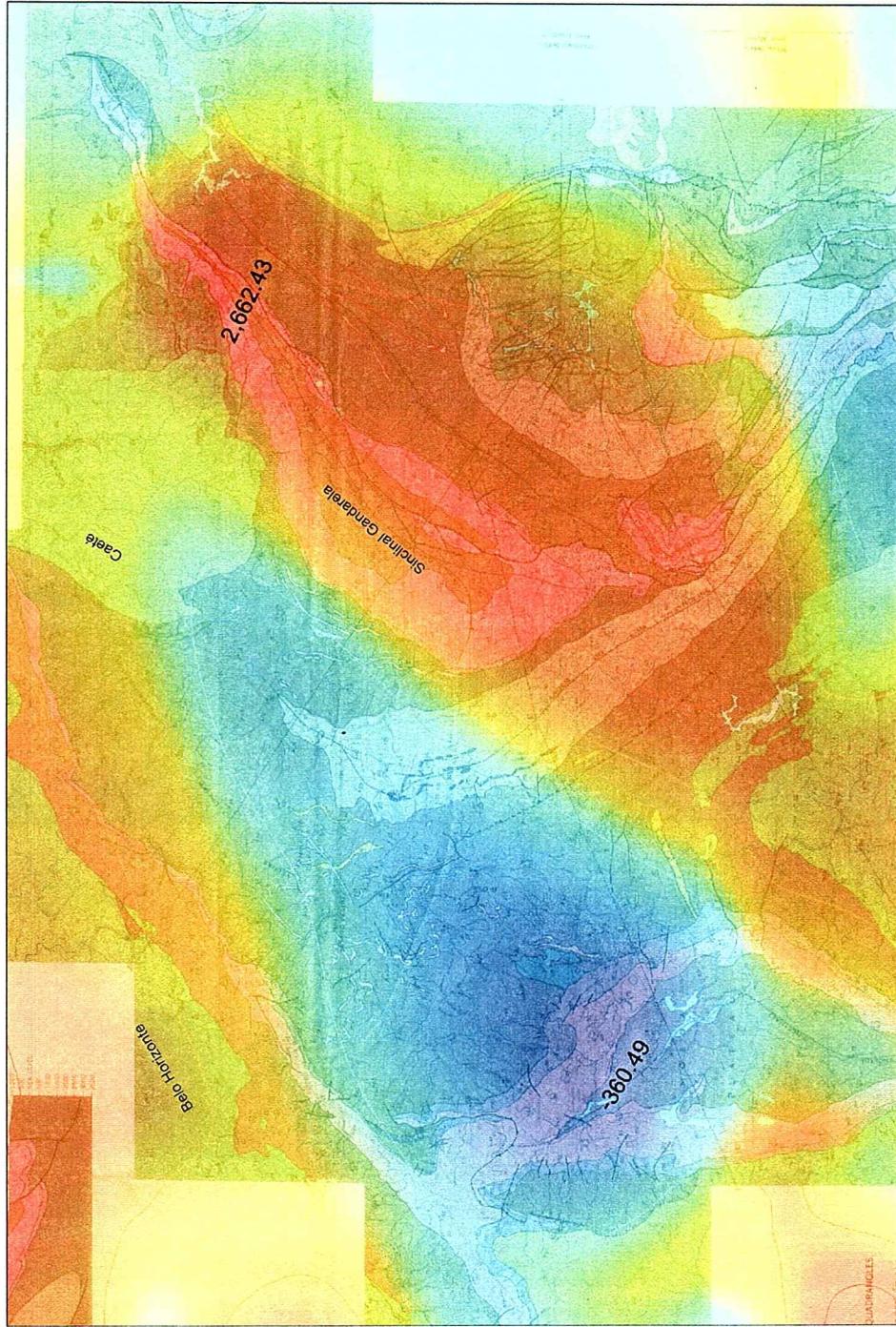
ANEXO

V

Mapa Geológico e de Pontos

Carta Belo Horizonte (SE23) e Rio de Janeiro (SF23) (CPRM, 2004)





Mapa de contorno das idades K-Ar e Ar/Ar do Quadrilátero Ferrífero.
As cores quentes são regiões mais antigas e as cores claras são regiões
mais jovens. Mapa base Dorr (1969). Referências das idades na página seguinte.

Nota:

As idades plotadas neste mapa foram retiradas do presente trabalho e de Teixeira W. (1982); Machado et al. (1983); Thorpe et al. (1984); Teixeira et al (1985); Quéméneur & Vidal (1989); Figueiredo & Teixeira(1996).

ANEXO

VI

De acordo,



Naira Alvarenga



Miguel Basei



