



Caminhos P-T-t retrometamórficos obtidos a partir do estudo de inclusões fluidas em granulitos do complexo Juiz de Fora

J.R. Nogueira¹, A. Choudhuri² & R.M.S. Bello³

1 Departamento de Geologia Regional e Geotectônica, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. TEKTOS – Grupo de Pesquisa em Geotectônica. Rua São Francisco Xavier 524, sala A-4034, Maracanã, Rio de Janeiro, Brasil. CEP 20559-900. E.mail: jrnog@uerj.br

2 Departamento de Metalogênese e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo. Caixa Postal 6152, CEP 13081-970, Brasil.

3 Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo. Rua do Lago 562 - CEP - 05508-080 - São Paulo, SP.

Abstract Fluid inclusion analyses in granulitic rocks are presented as an important source for relevant petrogenetic data for the study of the metamorphic evolution of the Juiz de Fora Tectonic Domain (DTJF) - Ribeira Belt, in the southwest Juiz de Fora (MG) region. The area is characterized by a complex association of different basement units, formed by hornblende gneisses and orthogranulites of the Juiz de Fora Complex, and metasedimentary units, correlated to the Andrelândia Group. In the basement rocks the latest fluid inclusions (trails) present systematically higher densities than the earlier ones (isolated). This observation indicates a near isobaric cooling during the retrometamorphic path of the Transamazonian Event. The P-T-t path for the Andrelândia Group supracrustal rocks is defined by a pattern of progressive lowering of inclusion densities. This indicates a more significant decrease in pressure than in temperature after the metamorphic peak and suggests an isothermal decompression situation, with a clockwise P-T-t path for the Brasiliano Event. The available data for structural domains in which basement rocks prevail, indicate that the granulite facies metamorphism can be related to a Transamazonian extensional tectonic event, associated to magmatic intra- and underplating. During this stage CO₂-rich fluids and the necessary heat excess to induce the older granulite metamorphism were provided by mafic rocks. During the Brasiliano, the collisional event that generated the Ribeira Belt caused intense anatexis that possibly removed large amounts of H₂O from the system, leading the metasediments to reach granulite facies metamorphism during the Brasiliano Event, with temperatures not higher than 800°C and pressures between 6-7 kb.

Keywords: granulite, fluids, P-T paths, Juiz de Fora Complex

INTRODUÇÃO Este trabalho pretende abordar os caminhos retrometamórficos sofridos pelas rochas granulíticas do Domínio Tectônico Juiz de Fora (DTJF), a partir da análise do comportamento de isócoras obtidas para inclusões fluidas ricas em CO₂, diferenciadas cronologicamente de acordo com suas distintas classes (primárias, pseudo-secundárias e secundárias). Inclusões fluidas aprisionadas em ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora (CJF), durante o pico metamórfico do Evento Transamazônico, são analisadas em função da variação dos valores de temperaturas de fusão final de CO₂ e homogeneização total, e comparadas com fluidos aprisionados em metassedimentos do DTJF, correlacionáveis ao Grupo Andrelândia, durante as diferentes fases de deformação do Evento Brasiliano.

CONTEXTO GEOLÓGICO A área estudada está localizada a SW de Juiz de Fora (MG), próximo à localidade de Monte Verde e é caracterizada por uma intercalação entre unidades ortognáissicas constituídas por hornblenda gnaisses e granulitos, e unidades metassedimentares compostas por

granada-biotita gnaisses e muscovita quartzitos. Ocorrem também corpos leucograníticos e charnockíticos resultantes da fusão parcial dos metassedimentos.

Os estudos de metamorfismo apontam para existência de dois diferentes eventos tectono-termiais (Ett) com diferentes evoluções nas condições de pressão e temperatura, que afetaram, respectivamente, os dois conjuntos litológicos principais, em ambas gerando associações mineralógicas de fácies granulito (Nogueira 1999). O último evento é seguramente relacionado ao Ett Brasiliano, com idades entre 610-490 Ma (Machado *et al.* 1996) e afetou tanto os ortognaisses do embasamento (CJF) como as rochas supracrustais, do Grupo Andrelândia, depositado entre 1,0 e 0,6 Ga (Ribeiro *et al.* 1995). Já o metamorfismo relacionado ao evento tectônico anterior ao Brasiliano, atingiu apenas as rochas ortognáissicas do embasamento e é correlacionável ao Evento Transamazônico, com idades entre 2,2-1,9 Ga (Machado *et al.* 1996).

As estruturas geradas pelo Evento Brasiliano foram analisadas separadamente por domínios



estruturais e evidenciam um comportamento associado à tectônica compressional de caráter progressivo, inicialmente com características tangenciais, com vergência de SE para NW, culminando com a formação de estruturas em “amêndoas” durante a fase direcional de maior intensidade (Nogueira 1999).

A relação entre as estruturas geradas nesse evento, pode ser entendida como uma evolução temporalmente contínua, onde um ambiente de tectônica tangencial é gradualmente modificado para outro onde predomina a tectônica direcional, ambos relacionados à fase D₂, culminando com movimentação essencialmente transcorrente durante a fase D₃ (Nogueira *et al.* 2003). Nos estágios finais do Brasiliano iniciou-se uma reversão tectônica, gerando milonitos tardios (D₄), pegmatitos e leucogranitos, que podem estar associados a um estágio de “relaxamento” crustal ou de abatimento do orógeno (Nogueira & Choudhuri 2000).

CLASSIFICAÇÃO E CONDIÇÕES DE APRISIONAMENTO DAS INCLUSÕES FLUIDAS

O esquema de classificação mais útil para as inclusões fluidas é o que se baseia na sua origem: primária, pseudosecundária e secundária (Roeder 1981). Outra divisão é baseada na natureza do fluido na época do aprisionamento, ou seja, se era homogêneo ou heterogêneo. Acredita-se que em mais de 99% dos casos as inclusões sejam aprisionadas a partir de um fluido homogêneo (Roeder 1981), embora Shepherd *et al.* (1985; p.70) mostrem que o sistema H₂O + NaCl + CO₂ permite o aprisionamento de inclusões a partir de um sistema heterogêneo, mesmo em condições de temperatura alta. Entretanto, como será descrito adiante, esse não é o caso das inclusões estudadas neste trabalho.

As inclusões primárias se formam durante o crescimento do cristal hospedeiro, e são caracterizadas por ocorrerem isoladas ou em agrupamentos isolados de inclusões não alinhadas. Fraturamentos ocorridos na presença de fluidos, durante o crescimento do cristal, podem gerar inclusões pseudosecundárias, que geralmente distribuem-se em trilhas internas ao cristal. Se tais fraturas são formadas em qualquer tempo posterior ao crescimento do cristal, podem gerar inclusões secundárias, dispostas em trilhas cortando mais de um cristal.

Essa classificação permite a determinação de uma ordem cronológica de formação das inclusões, indo desde as mais antigas até as mais novas: inclusões isoladas, em agrupamentos tridimensionais isolados no interior de cristais, em

trilhas intracristalinas, e em trilhas transcristalinas. Contudo, as inclusões isoladas e em agrupamentos podem pertencer à mesma geração de inclusões.

Após o aprisionamento, durante o retrometamorfismo, por exemplo, as inclusões podem sofrer mudanças físicas e químicas nas suas características originais. Dentre os vários processos causadores dessas modificações, destacam-se:

- “necking down” - envolve a divisão de uma inclusão originariamente maior em várias inclusões menores;

- aporte e escape de fluidos na inclusão (“leakage in or out”) - quando existem gradientes de pressão entre a inclusão e o ambiente externo, pode ocorrer, durante a deformação, a abertura de uma inclusão e preenchimento por aporte de novos fluidos, ou ainda escape de fluidos, e

- *crepitação* - ocorre quando a pressão interna do fluido se torna suficientemente maior do que a pressão confinante externa, devido ao soerguimento, causando fraturamento do mineral encaixante como forma de alívio de pressão, resultando em inclusões vazias.

Esses fenômenos alteram as características iniciais de aprisionamento de uma inclusão e causam variação nas temperaturas de mudanças de fase medidas em laboratório.

MÉTODOS ANALÍTICOS Foram medidas as temperaturas de fusão e homogeneização de CO₂ (Tf_{CO2} e Th_{CO2}) de cerca de 1400 inclusões fluidas.

A determinação da isócora foi feita com o programa FLINCOR (Brown 1989), usando-se dados de temperaturas de transição de fases, volume molar e fração molar de CH₄, obtidos a partir dos gráficos desenvolvidos por Swanenberg (1979), Kerkhof (1990), Brown & Lamb (1989) e Heyen *et al.* (1982).

AMOSTRAGEM E PETROGRAFIA DAS INCLUSÕES FLUIDAS

Os estudos de inclusões fluidas (IF) foram realizados em ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora e em granulitos considerados como enclaves tectônicos dessas porções nos metassedimentos. Além disto, foram estudadas também IF desses metassedimentos, aprisionadas em condições de fácies granulito. O estudo teve como objetivo a análise das IF aprisionadas em etapas próximas aos picos metamórficos granulíticos, tanto nas rochas do embasamento como nas rochas supracrustais. As amostras foram selecionadas com o intuito de comparar as condições de pressão parcial de fluidos de granulitos do embasamento com aquelas dos metassedimentos e gerar subsídios para uma análise



dos diferentes caminhos retrometamórficos percorridos em cada um dos eventos tectônicos correspondentes, respectivamente os Ets Transamazônico e Brasileiro.

Para os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora, optou-se por fazer o estudo de IF em três amostras contendo ortopiroxênio. Foi utilizada uma amostra típica do embasamento e duas amostras de enclaves tectônicos de granulito nos metassedimentos, com características semelhantes aos seus correspondentes do embasamento. As temperaturas foram determinadas em cristais de quartzo, plagioclásio e K-feldspato, e os resultados analisados a partir de histogramas de frequência separados por amostras e tipos de inclusão (isoladas, agrupamentos e trilhas intracristalinas).

Das duas amostras coletadas em enclaves nos metassedimentos, uma é de região milonítica que marca o contato com o embasamento, e a outra foi coletada na região central da faixa principal de metassedimentos, localizando-se, porém, próximo a uma faixa de rochas ultramiloníticas. Essa última amostra mereceu uma análise diferenciada, onde foram estudadas separadamente bandas félsicas e máficas. A porção máfica apresenta intercrescimento entre granada e clinopiroxênio e possui textura granoblástica, enquanto que a porção félsica mostra feldspatos fraturados e algumas texturas indicativas de forte deformação. Nessa amostra, as análises de IF foram feitas principalmente em quartzo e subordinadamente em feldspatos.

Para a sequência metassedimentar do Complexo Juiz de Fora foram realizadas a petrografia e os estudos microtermométricos das IF hospedadas em cinco amostras. O objetivo deste estudo, em rochas correlacionáveis ao Grupo Andrelândia, é analisar IF de pico metamórfico granulítico aprisionadas durante o Evento Brasileiro. A Tabela 1 mostra a classificação das amostras que puderam ser estudadas e sua relação com a deformação brasileira, obtida por meio de análise estrutural detalhada (Nogueira 1999, Nogueira *et al.* 2003).

Nº da Amostra	Litologia	Fase de Deformação
JRN-107b	Granada-biotita gnaiss	D ₂
JRN-223	Granada-biotita charno-enderbito	D ₂
JRN-127b	Sillimanita-gr-bi gnaiss	D ₃
JRN-186	Biotita leucogranito	D ₄
JRN-214	Biotita gnaiss ultramilonítico	D (?)

Tabela 1. Relação entre os litotipos analisados e a deformação brasileira

Foram utilizados cristais de quartzo, plagioclásio, K-feldspato e granada para a obtenção das temperaturas de mudança de fase em IF dispostas em trilhas intracristalinas, agrupamentos e isoladas.

MICROTHERMOMETRIA Assim como nos ortognaisses, as IF encontradas nos metassedimentos do DTJF são predominantemente constituídas por CO₂. Devido ao fato de as temperaturas de fusão obtidas para os metassedimentos possuírem valores muito próximos da temperatura de fusão do CO₂ puro (-56,6°C), as isócoras foram calculadas considerando-se o fluido como constituído essencialmente por CO₂, seguindo proposição de Roeder (1981), que afirma que para efeito de cálculo de isócoras, IF com temperaturas de fusão com até -2,0°C abaixo de -56,6°C podem ser consideradas como inclusões puras em CO₂.

Foi escolhido o sistema binário CO₂-CH₄ para a determinação das isócoras. Estimativas feitas com o sistema CO₂-N₂ mostraram um aumento aproximado de 0,4 kb nas pressões obtidas, em relação ao sistema CO₂-CH₄, nas inclusões que apresentaram um maior grau de contaminação (19%). Pela análise dos diagramas de fases dos sistemas CO₂-CH₄, CO₂-N₂ e CO₂-CH₄-N₂ (Kerkhof 1990), o baixo grau de contaminação das inclusões estudadas possibilita a utilização de um desses dois sistemas binários na obtenção das isócoras, sem haver necessidade do uso de espectroscopia, gerando resultados com uma margem de erro aceitável.

As temperaturas de fusão final de CO₂ quando confrontadas com as temperaturas de homogeneização em uma determinada amostra, algumas vezes evidenciam um comportamento onde para a mesma temperatura de fusão (mesma composição) ocorrem diferentes temperaturas de homogeneização. Isto mostra que os valores de temperaturas de homogeneização (densidade) nem sempre variam em função da composição, sendo essa variação, provavelmente devido a processos posteriores ao pico metamórfico granulítico. Não necessariamente, as inclusões com menores temperaturas de homogeneização (maiores densidades) são de pico metamórfico, mas provavelmente representam inclusões formadas mais próximas do pico.

As inclusões estudadas se mostraram típicas de fácies granulito, possuindo, para as rochas do embasamento (CJF), de 81 a 93 mol% de CO₂, com densidades moderadas, variando entre 0,79 e 0,94 g/cm³, e para a porção metassedimentar do DTJF correlacionável ao Grupo Andrelândia, de 92 a 100 mol% de CO₂, e densidades moderadas a altas,

oscilando entre 0,92 e 1,07 g/cm³. Exceção deve ser feita à amostra de ultramilonito que apresenta mineralogia compatível com metamorfismo de fácies xisto-verde a anfibolito e gerou inclusões de baixa densidade possivelmente devido a reativações tardias, em condições de temperatura em torno de 450°C. Portanto, ao contrário do que poderia se esperar, a geração de textura ultramilonítica se deu em regiões mais rasas do orógeno, possivelmente devido a um processo de rápido soerguimento (vide Fig. 1).

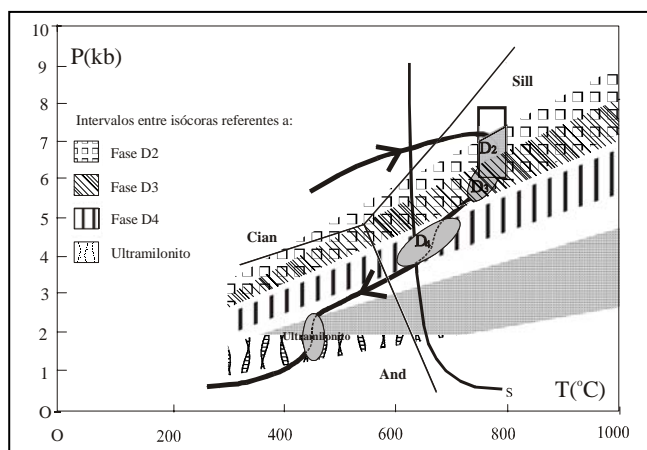


Figura 1. Diagrama P-T mostrando os intervalos entre isócoras de inclusões fluidas aprisionadas durante o Evento Brasileiro. A seta orientada indica a provável trajetória P-T-t e os campos em cinza as condições metamórficas de cada fase de deformação brasileira e de geração do biotita ultramilonito. Notar a queda de pressão associada a esse último estágio e à fase D4, relacionada às zonas de cisalhamento dúcteis distensivas. Cian, And e Sill representam os campos de estabilidade de cianita, andalusita e sillimanita respectivamente. S indica a posição da curva solidus para líquido granítico no sistema quartzo-albita-ortoclásio em presença de água, segundo Winkler (1967)

Os fluidos associados às rochas do embasamento, nas porções ortognáissicas do DTJF, revelaram, com base na cronologia relativa das inclusões estudadas, que as últimas inclusões formadas (em trilhas intracristalinas) apresentam sistematicamente densidades maiores do que as primeiras inclusões a serem aprisionadas (isoladas), sinalizando para um caminho retrometamórfico durante o Evento Transamazônico de sentido anti-horário, com resfriamento aproximadamente isobárico, representado pela seta do diagrama P-T da Fig. 2.

A seta plotada no gráfico da figura supracitada representa uma estimativa provável da direção do caminho retrometamórfico sofrido. Harley (1989), por meio de compilação do caminho retrógrado de vários terrenos granulíticos do mundo, estipulou os caminhos P-T mais comuns para as rochas granulíticas. Dentre os dois caminhos retrógrados obtidos com essa compilação, o caminho de sentido anti-horário, ou seja, com resfriamento aproximadamente isobárico, é o que parece ser aplicável às inclusões estudadas neste trabalho.

A Fig. 2 apresenta a configuração padrão das isócoras de inclusões em ortogranulitos, correspondentes às menores e maiores densidades, intersectando o retângulo que representa o provável pico metamórfico para as rochas do embasamento. Os intervalos de valores de pressão e temperatura estão respectivamente entre 4 a 6 kb e 750 e 850°C, para granulitos do embasamento.

A seta plotada no gráfico da Figura 2 representa um segmento do caminho retrometamórfico sofrido. Essa determinação foi feita com base na cronologia das inclusões estudadas, onde as últimas inclusões formadas (trilhas) apresentam sistematicamente densidades maiores.

De um modo geral, os estudos de IF em rochas do Grupo Andrelândia, demonstraram densidades mais elevadas e composições químicas mais ricas em CO₂, em comparação com os granulitos ortoderivados do DTJF.

O estudo de IF em rochas supracrustais do Grupo Andrelândia, metamorfisadas em fácies granulito, mostraram que inclusões aprisionadas durante a fase D₂, correspondente ao pico metamórfico brasileiro, possuem densidades mais elevadas do que aquelas geradas durante a fase D₃, que por sua vez possuem densidades maiores do que a das inclusões formadas durante a fase D₄. A Figura 1 mostra que somente as IF associadas às fases D₂ e D₃ cortam o campo de pico metamórfico brasileiro, estabelecido entre 6 e 8 kb e 750 e 800°C (Nogueira 1999).

A curva orientada da Figura 1 representa o provável caminho P-T-t sofrido, e foi definida com base no padrão de diminuição progressiva das densidades das inclusões (indo desde as amostras associadas à fase D₂ até a fase D₄), aliado ao fato de inclusões em aglomerados apresentarem densidades maiores do que aquelas em trilhas. Esses fatos apontam para uma diminuição de pressão mais significativa do que a diminuição de temperatura após o pico metamórfico, configurando uma situação de descompressão aproximadamente isotérmica, com um caminho P-T-t horário.

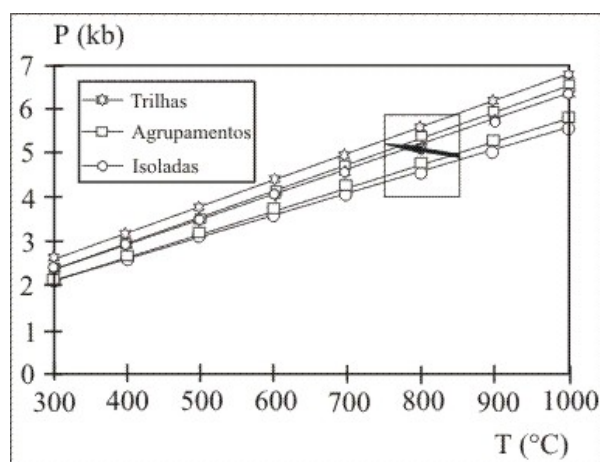


Figura 2. Isócoras para inclusões fluidas em quartzo e feldspatos de amostra de ortogranulito do embasamento

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES Os dados geológicos existentes (Nogueira & Choudhuri 2000, Nogueira 1999, Duarte 1998) e de inclusões fluidas apresentados e gravados nos domínios estruturais onde predominam rochas do embasamento, indicam a existência de uma complexa evolução dos processos geológicos ocorridos previamente ao Evento Brasileiro e o metamorfismo de fácies granulito pode estar relacionadas a um evento tectônico extensional Transamazônico, com a formação de “intra” e “underplating” magmático, provendo fluidos ricos em CO₂ e excesso de calor necessário ao metamorfismo granulítico mais antigo.

Nesse processo contínuo, a intrusão de consideráveis volumes de magmas básicos na base e dentro da crosta inferior causaria um forte aumento no fluxo térmico, propiciando o início de fusão

parcial de rochas da crosta inferior, possivelmente de composição mais básica, e gerando uma grande quantidade de magmas de composição provável tonalítica a granítica. Processos de fusão parcial e diferenciação nessas condições retirariam grande quantidade de H₂O do sistema e, aliado a entrada de fluidos ricos em CO₂ provenientes das rochas máficas, causaria metamorfismo granulítico extensivo nos ortognaisses do embasamento.

Durante o Evento Brasileiro, o processo colisional, gerou zonas de cisalhamento e empurrões que colocaram em um mesmo nível crustal as rochas supracrustais do Grupo Andrelândia e o embasamento granulítico (Complexo Juiz de Fora). Essa colisão se iniciou com vergência de SE para NW, em direção ao Cráton do São Francisco, gerando nos estágios sin-colisionais estruturas anastomosadas ou em amêndoas, relacionadas à fase direcional da deformação. Nesse período, intensos processos anatéticos geraram nos metassedimentos uma grande quantidade de migmatitos e rochas graníticas e charnockíticas. Esses processos de fusão parcial possivelmente retiraram grandes quantidades de H₂O do sistema, fazendo com que os metassedimentos atingissem a fácies granulito, resultando no metamorfismo granulítico Brasileiro, com temperaturas máximas de 800°C e pressões entre 6 e 7 kb.

Agradecimentos Os autores agradecem as valiosas contribuições e críticas feitas pelos revisores e também ao CNPq, FAPESP e FAPERJ pelo apoio concedido durante a realização das pesquisas.

Referências

- BROWN P.E. 1989. FLINCOR: A fluid inclusion data reduction and explotation program (abstract). Second Biennial Pan-American Conf. of Research on Fluid inclusions *Progr. with abstract*, 14.
- BROWN P.E. & LAMB W.M. 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**.
- DUARTE B.P. 1998. *Evolução Tectônica dos Ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na Região de Juiz de Fora: Geologia, Petrologia e Geoquímica*. Tese de Doutorado, IG/USP. 268p.
- HEYEN G., RAMBOZ C. & DUBESSY J. 1982. Simulation des equilibres de phases dans le systeme CO₂-CH₄, en dessous de 50 C et de 100 bar. Application aux inclusios fluides. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **294**(II):203-206.
- KERKHOF VAN DEN A.M. 1990. Isochoric phase diagrams in the systems CO₂-CH₄ and CO₂-N₂: Application to fluid inclusions. *Geoch. & Cosmoch. Acta*, **54**:621-629.
- MACHADO N., VALLADARES C.S., HEILBRON M., VALERIANO C. 1996. U-Pb geochronology of the central Ribeira belt (Brazil) and implications for the evolution of the Brazilian Orogeny. *Precambrian Research*, **79**(3-4):347-362.
- NOGUEIRA J.R., ALMEIDA J.C.H. & TOLEDO C.L.B. 2003. Structural Evolution of the Ribeira Belt at Juiz de Fora Region, southeastern Brazil. III International Symposium on Tectonics, Búzios-RJ, Brazil, SBG/Núcleo RJ-ES, *Proceedings*, v.1, p.163-165.
- NOGUEIRA J.R. & CHOUDHURI A. 2000. Geotectonic models and geologic evolution of the high-grade gneiss terranes of Juiz de Fora (MG),



- Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(1):169-173.
- NOGUEIRA J.R. 1999. *Evolução geológica dos terrenos de alto grau metamórfico da Faixa Ribeira na região de Juiz de Fora, Minas Gerais*. Tese de Doutorado. IG/UNICAMP, 190p.
- RIBEIRO A., TROUW R.A.J., ANDREIS R., PACIULLO F.P. & VALENÇA J.G. 1995. Evolução das bacias proterozóicas e o termo-tectonismo brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. Geosc.*, **25**(4):235-248.
- ROEDDER E. 1981. Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping. L.S. Hollister & M.L. McCrawford Eds.; Fluid Inclusion: Applications to petrology; Mineralogical Society of Canada, *Short Course Handbook*; vol.6, cap.5, p. 101-128.
- SHEPHERD T.J., RANKIN A.H. & ALDERTON P.H.M. 1985. *A practical guide to fluid inclusion studies*, Ed. Blackie, 239p.
- SWANENBERG H.E.C. 1979. Phase equilibria in carbonic systems, and their application to freezing studies of fluid inclusions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**:303-306.
- WINKLER H.G.F. 1967. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag. New York Inc.