

# GÊNESE E EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS ENVOLVIDOS NA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E NA MINERALIZAÇÃO DE ESTANHO EM GRANITOS DO RIO GRANDE DO SUL

JOSÉ CARLOS FRANTZ\*, CARLOS EDUARDO COELHO\*\* & NILSON FRANCISQUINI BOTELHO\*\*\*

**ABSTRACT** *GÊNESE AND EVOLUTION OF FLUIDS INVOLVED IN THE HYDROTHERMAL ALTERATION AND TIN MINERALIZATION IN GRANITES OF RIO GRANDE DO SUL* The tin mineralization in the eastern region of the Sul-rio-grandense shield is associated to two types of granitic rocks whose emplacement and hydrothermal alteration were controlled by transcurrent shear zones. Two-mica leucogranites of the Cordilheira Intrusive Suite are syn- to late-kinematic and present pervasive hydrothermal alteration, as at Cerro Branco Mine. Biotite granitoids of the Campinas Intrusive Suite are late- to post-kinematic and their hydrothermal alteration is limited to the apical zones, as at Campinas Mine. Intermediate situations occur at the Tabuleiro Mine. Cassiterite mineralization is hosted in greisen and quartz veins. Fluid inclusion data were obtained in quartz from mineralized veins. The textural relationship between aqueous-carbonic, aqueous and carbonic inclusions indicates a in verse relation between the Cerro Branco and Campinas mines. The inclusions in core zones of quartz at the Cerro Branco Mine are aqueous with médium salinity, while later inclusions in recrystallized margins and fractures are carbonic to low salinity aqueous-carbonic. On the other hand, at the Campinas Mine early inclusions are aqueous-carbonic to carbonic whereas late fluids are aqueous. This relationship suggests that the earliest fluids trapped during hydrothermal alteration were aqueous and associated to the granites of the Cordilheira Intrusive Suite. The salinity is 7-8wt% NaCl<sub>eq</sub> and might indicate the interaction between orthomagmatic fluids and aqueous fluids from the mylonitic wall rocks. The second input in the hydrothermal system was of carbonic to aqueous-carbonic fluids of metamorphic origin, with variable proportions of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>, originated by the thermal influx of the Campinas-type granitoids upon the country carbonaceous schists. A mixture process between these fluids could be represented by the aqueous-carbonic inclusions. The influx of CO<sub>2</sub> vapour in the hydrothermal system may enhance silica precipitation, caused by a decreasing in water activity, to produce quartz veins. Coevally, mixed fluids were trapped as inclusions of the Lwc-type. The total homogenization temperatures of the aqueous-carbonic inclusions are 200, 360 and 330°C for the Cerro Branco, Campinas and Tabuleiro mines, respectively. Estimated trapping conditions for the fluids are between 1.5 and 3Kb. At the Cerro Branco Mine, values between 2 and 7Kb could be the result of transpressive deformation coeval with the circulation of hydrothermal fluids related to the granites of the Cordilheira Intrusive Suite.

*Keywords:* hydrothermal fluids, mineralization, granites

**RESUMO** A mineralização de estanho na região leste do Escudo Sul-rio-grandense está associada a dois tipos de rochas graníticas cujo posicionamento e alteração hidrotermal foram controlados por zonas de cisalhamento transcorrente. Leucogranitos a duas micas da Suíte Intrusiva Cordilheira são sin a tardi-cinemáticos e têm alteração hidrotermal pervasiva, como na Mina Cerro Branco. Biotita granitóides da Suíte Intrusiva Campinas são tardi a pós-cinemáticos e têm alteração hidrotermal limitada a zonas de cúpula, como na Mina Campinas. Situações intermediárias podem ocorrer, como no caso da Mina Tabuleiro. A mineralização é constituída por cassiterita em greisen e veios de quartzo associados, onde foram obtidos os dados de inclusões fluidas. A relação textural de inclusões aquo-carbônicas, aquosas e carbônicas indica uma relação inversa entre as minas Cerro Branco e Campinas. Na Cerro Branco as inclusões em zonas de núcleo de grãos são aquosas com salinidade moderada e em margem recrystalizada e fraturas são carbônicas e aquo-carbônicas de salinidade baixa. Na Mina Campinas o caráter precoce é das inclusões aquo-carbônicas e carbônicas, com as aquosas sendo tardias. A relação implica em que os primeiros fluidos aprisionados ao longo de zonas de alteração hidrotermal estavam associados aos granitóides da Suíte Intrusiva Cordilheira e foram essencialmente aquosos. A salinidade equivalente entre 7 e 8% em peso de NaCl pode indicar uma origem que resultou da interação de fluidos ortomagmáticos com fluidos aquosos da encaixante milonítica. O segundo aporte ao sistema hidrotermal ocorreu com a entrada de fluidos carbônicos e aquo-carbônicos metamórficos contendo proporções variadas de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub> e gerados a partir de xistos carbonosos encaixantes por ação térmica dos corpos da Suíte Intrusiva Campinas. A indicação de um processo de mistura para as inclusões aquo-carbônicas pode representar uma interação entre os dois tipos anteriores de fluidos. O influxo de CO<sub>2</sub> vapor ao sistema hidrotermal pode ter auxiliado na formação de veios de quartzo, pela precipitação de sílica causada por um decréscimo da atividade da água em solução. De forma simultânea, ocorreu o aprisionamento de porções de fluidos misturados, como inclusões do tipo Lwc. As temperaturas de homogeneização total das inclusões aquo-carbônicas, consideradas como mínimas de aprisionamento das inclusões, são de 200,360 e 330°C, respectivamente, para as minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro. O aprisionamento das soluções pode ter ocorrido entre 1,5 e 3Kb. Na Mina Cerro Branco, os valores entre 2 e 7Kb podem decorrer da atuação da deformação transpressiva concomitante à circulação dos fluidos hidrotermais associados aos granitos da Suíte Intrusiva Cordilheira.

*Palavras-chave:* fluidos hidrotermis, mineralização, granitos

**INTRODUÇÃO** A mineralização de estanho presente na região leste do Escudo Sul-rio-grandense, no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul, está associada a dois tipos de rochas graníticas cujo posicionamento e alteração hidrotermal foram controlados ao longo de zonas de cisalhamento transcorrente (Frantz 1997, Frantz & Botelho 1997). O primeiro tipo é representado por leucogranitos a duas micas sin a tardi-cinemáticos da Suíte Intrusiva Cordilheira e tem alteração hidrotermal micácea e turmalínica pervasiva, cujo exemplo mais significativo ocorre na Mina Cerro Branco. O segundo é representado por biotita granitóides tardi a pós-cinemáticos da Suíte Intrusiva Campinas e tem alteração hidrotermal micácea limitada a zonas de cúpula, com o melhor exemplo sendo a Mina Campinas. A Mina Tabuleiro tem uma situação geológica ímpar pelo fato de a principal zona mineralizada estar associada a um *roof pendant* do Granito Figueiras, da Suíte Intrusiva Cordilheira, enquanto uma zona secundária está associada à cúpula do Granito Tabuleiro, da Suíte Intrusiva Campinas. O posicionamento sin a pós-cinemático de corpos graníticos ao longo de zonas de deformação milonítica definiu a sucessão e os tipos de fluidos associados aos episódios de alteração hidrotermal e de mineralização estanífera do distrito.

A mineralização estanífera da região está integralmente contida em corpos de greisen e em veios de quartzo associados, onde os primeiros representam lentes irregulares distribuídas no interior ou na margem dos veios. A mineralização é constituída por cassiterita disseminada nos corpos de greisen e nos veios de quartzo, onde ocorre interescada com quartzo. Nesta condição textural, e diante da impossibilidade de

uma amostragem sistemática da cassiterita, a análise de inclusões foi desenvolvida exclusivamente sobre o quartzo dos veios. A análise de inclusões fluidas teve como base a relação espacial das inclusões nos grãos de quartzo, a origem das inclusões e o conteúdo fluido à temperatura ambiente. Com base nestes dados, foi estabelecida uma comparação entre as minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro.

Os dados de inclusões fluidas foram obtidos em platinas de aquecimento-resfriamento Chaixmecca, calibradas por inclusões sintéticas, com objetiva Leitz de 50x, no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília e no da Universidade Federal da Bahia. A aquisição dos dados de microtermometria foi feita mediante resfriamento inicial a -130°C e aquecimento a uma taxa de 0,5°C/min. Os dados de avaliação para CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> nas inclusões fluidas foram obtidos no Instituto de Geociências da Universidade de Campinas, em microsonda Raman Jobin Yvon T64000 multicanal, equipada com laser a argônio ionizado. Os espectros foram registrados com a utilização de uma radiação de excitação de 514,5 nm, com potência de 600mW e tempo de integração de 300s. Um fator instrumental de 0,75 foi considerado para a variação do espectro do CO<sub>2</sub> (picos  $2\nu_2 + \nu_1$ ), como característico do equipamento utilizado. Os valores, em percentagem molar, para os três voláteis foram obtidos mediante a integração de área dos picos 1285 e 1388 para o CO<sub>2</sub>, 2331 para o N<sub>2</sub> e 2917 para o CH<sub>4</sub>.

**CLASSIFICAÇÃO E PETROGRAFIA DAS INCLUSÕES FLUIDAS** As inclusões fluidas analisadas no presente estudo

\* Instituto de Geociências, UFRGS - E-mail: frantz@if.ufrgs.br

\*\* Instituto de Geociências, UFBA - E-mail: ccoelho@pppp.ufba.br

\*\*\* Instituto de Geociências, UnB - E-mail: nilsonfb@unb.br

podem ser agrupadas em três tipos segundo sua disposição espacial. O primeiro está representado por inclusões contidas no interior de grãos de quartzo, em zonas de núcleo, zonas intermediárias e de margem, e permite classificar as inclusões como intragranulares. O segundo é caracterizado por inclusões situadas ao longo das zonas de contato entre grãos, o que permite classificá-las como inclusões intergranulares. O terceiro tipo, compreendendo inclusões situadas ao longo de microfissuras que cortam mais de um grão de quartzo, pode ser classificado como o das inclusões transgranulares.

As inclusões fluidas presentes nos veios mineralizados variam em tamanho de <5 a 25 $\mu$ m, com uma moda em torno de 10 $\mu$ m, sendo que as dimensões maiores ocorrem sempre associadas a inclusões monofásicas ou bifásicas de zonas de núcleo e intermediária dos grãos de quartzo, enquanto as inclusões situadas em zonas de borda de grãos, em zonas de contatos intergranulares e ao longo de zonas de fraturas transgranulares são as que apresentam as menores dimensões e sempre com elevado grau de preenchimento.

A origem das inclusões fluidas, considerando a relação espacial identificada, pode ser determinada com base nos critérios de Roedder (1972) através dos quais as inclusões intragranulares seriam interpretadas como primárias e/ou pseudo-secundárias enquanto as intergranulares e transgranulares como secundárias.

O conteúdo fluido à temperatura ambiente define dois tipos de inclusões nas zonas mineralizadas. O primeiro é representado por inclusões monofásicas (L ou V) e o segundo por inclusões bifásicas (L+V e/ou L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>). As inclusões bifásicas podem ser, ainda, ricas em fase líquida ou ricas em fase vapor, com o grau de preenchimento aumentando do núcleo para borda dos grãos de quartzo, no caso das inclusões intragranulares, primárias e/ou pseudo-secundárias.

As inclusões intragranulares concentradas nas zonas de núcleo e intermediária dos grãos são, de forma dominante, do tipo bifásica ricas em fase vapor, e indicam um grau de preenchimento da ordem de 0,2 a 0,6 para núcleo e de 0,3 a 0,8 nas zonas intermediárias. Nas zonas de borda de grãos, as inclusões intragranulares tendem a um grau de preenchimento mais alto, da ordem de 0,8 a 0,95 e podem ser acompanhadas de inclusões monofásicas a partir das zonas intermediárias dos cristais de quartzo e concentradas nas zonas de borda. As inclusões intergranulares e transgranulares são, de forma dominante, bifásicas ricas em fase líquido, com grau de preenchimento da ordem de 0,9 a 0,95.

A análise microtermométrica das inclusões permitiu definir que as inclusões bifásicas com menor grau de preenchimento são compostas por dois líquidos imiscíveis (L<sub>1</sub>+L<sub>2</sub>+V). Isto devido a nucleação de uma fase de vapor no interior de uma das fases durante o resfriamento, representando inclusões aquo-carbônicas (Lwc). As inclusões bifásicas com alto grau de preenchimento são, em sua essência, aquosas (Lw). As inclusões monofásicas, por sua vez, mostram a formação de uma fase de vapor durante o resfriamento e, portanto, tratam-se de inclusões de CO<sub>2</sub> líquido à temperatura ambiente (Lc).

Na Mina Cerro Branco o quartzo dos veios apresenta indícios de recristalização em zonas de borda e mesmo em zonas intermediárias de grão, com as zonas de núcleo em geral preservadas. A recristalização é marcada por redução incipiente de grão e pode estar associada à deformação tardia que atuou durante o posicionamento dos corpos graníticos tardi-transcorrência da Suíte Intrusiva Cordilheira. Um aumento no grau de fraturamento, junto a zonas de contato intergranulares, pode estar associado a reativações contemporâneas ao posicionamento dos granitóides da Suíte Intrusiva Campinas. Nestas zonas, recristalizadas ou fraturadas, há o predomínio de inclusões tipo Lwc e Lc, enquanto no núcleo de grãos de quartzo, mais preservados, ocorrem com exclusividade inclusões Lw.

Na Mina Campinas o quartzo dos veios associados a *greisen*, e que contém cassiterita, é, em geral, límpido e sem indícios de recristalização, mesmo que em zonas de contatos intergranulares e em zonas intermediárias de grão ocorram fraturas. Nestas zonas de fraturas as inclusões são exclusivamente do tipo Lw com alto grau de preenchimento. Nas zonas de núcleo e intermediária dos grãos de quartzo, portanto com distribuição intragranular, para inclusões classificadas como primárias ou pseudo-secundárias, em ordem decrescente de abundância ocorrem os tipos Lwc, Lc e Lw. As inclusões Lw destas zonas têm menor grau de preenchimento que as Lw das zonas fraturadas.

Na Mina Tabuleiro ocorre uma situação intermediária entre as duas anteriores, tanto para os veios da zona de *rooipendant* quanto da zona de cúpula. O quartzo da maior parte dos veios, em zonas de núcleo e intermediária de grãos, é límpido apesar de indicar a existência de tensionamento pela presença de extinção ondulante. Em zonas de

borda dos cristais ocorre redução de grão, em geral com a presença de um intenso fraturamento tardio superposto. As inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias que ocorrem nas zonas de núcleo e intermediária de grãos de quartzo são, de forma predominante, Lw com grau de preenchimento pequeno a médio, secundadas por inclusões do tipo Lwc e Lc. Nas zonas de borda dos cristais, em zonas de contatos intergranulares associadas tanto a zonas de redução de grão quanto a fraturamento tardio, também predominam as inclusões Lw, mas aqui com elevado grau de preenchimento. Nestas zonas podem ocorrer inclusões do tipo Lwc de forma subordinada.

**CARACTERIZAÇÃO DAS INCLUSÕES FLUIDAS Mina Cerro Branco INCLUSÕES MONOFÁSICAS CARBÔNICAS (Lc)** As inclusões do tipo Lc, durante a etapa de congelamento, apresentam modificações de fase que envolvem a nucleação de uma fase vapor e a cristalização de uma fase sólida em torno de -100°C. As temperaturas de fusão do CO<sub>2</sub> estão concentradas entre -57,8 e -57,2°C e as temperaturas de homogeneização para o estado vapor indicam valores sempre situados entre 14 e 15°C.

**INCLUSÕES BIFÁSICAS AQUO-CARBÔNICAS (Lwc)** As inclusões do tipo Lwc, que podem ser ricas em fase vapor ou em fase líquida, apresentam o mesmo comportamento para a fase carbônica durante o resfriamento e o aquecimento. Os valores das temperaturas de fusão do CO<sub>2</sub> estão agrupados entre -58,4 e -57,2°C enquanto os valores de homogeneização, sempre para o estado vapor, indicam uma moda entre 12 e 13°C.

As temperaturas de fusão de clatrato estão concentradas entre 7 e 9°C, com o pico mais importante situado entre 8 e 8,5°C. Estas temperaturas, abaixo da temperatura de homogeneização do CO<sub>2</sub> e portanto em equilíbrio com o CO<sub>2</sub> líquido, CO<sub>2</sub> vapor e H<sub>2</sub>O, podem ser utilizadas para o cálculo da salinidade do sistema.

A homogeneização total das inclusões Lwc ocorre somente para o estado vapor com a moda situada entre 200 e 220°C.

**INCLUSÕES AQUOSAS (Lw)** As inclusões do tipo Lw apresentam uma temperatura de fusão do gelo situada entre -5,5 e -3,5°C, com a maior parte das medidas estando concentradas entre -5 e -4°C. As temperaturas de homogeneização total, para o estado líquido, apresentam múltiplos picos entre 120 e 280°C, com destaque para os picos entre 200 e 220°C e entre 240 e 260°C.

**Mina Campinas INCLUSÕES MONOFÁSICAS CARBÔNICAS (Lc)** As inclusões do tipo Lc apresentam, durante o congelamento, mudanças de fases que envolvem nucleação de uma fase vapor e cristalização de uma fase sólida em torno de -100°C. Ao longo do reaquecimento controlado, a fusão do CO<sub>2</sub> sólido (TfCO<sub>2</sub>) ocorre entre -60 e -58,4°C, seguida da homogeneização da bolha de vapor, sempre na fase líquida, entre 14 e 25°C, com o pico mais acentuado situando-se entre 16 e 17°C.

**INCLUSÕES BIFÁSICAS AQUO-CARBÔNICAS (Lwc)** As inclusões do tipo Lwc apresentam um número maior de mudanças de fase durante o congelamento devido a participação de uma fase aquosa. Estas mudanças envolvem a nucleação de uma fase carbônica vapor, formação de clatrato, de gelo e solidificação da fase carbônica líquida. A formação de clatrato é de difícil observação. Ao longo do reaquecimento controlado foram observadas mudanças de fase relacionadas à fusão do CO<sub>2</sub> sólido, com valores de temperatura agrupados entre -59 e -58,4°C, seguida da fusão do gelo e, por fim, do clatrato entre 7 e 8,5°C, para a maior concentração entre 7,5 e 8°C. A homogeneização da fase CO<sub>2</sub> vapor ocorre sempre para a fase líquida, em múltiplos picos de temperatura, situados entre 19 e 26°C.

A homogeneização total das inclusões Lwc na Mina Campinas ocorre tanto para o estado líquido quanto vapor, com a temperatura oscilando entre 260 e 440°C. As inclusões com homogeneização para a fase líquida têm os valores de temperatura (TH<sub>L</sub>) centrados entre 340 e 360°C, enquanto as inclusões que homogeneizam para a fase vapor (TH<sub>V</sub>), com menor representação estatística, têm uma concentração de valores entre 360 e 400°C.

**INCLUSÕES AQUOSAS (Lw)** As inclusões do tipo Lw apresentam apenas duas mudanças de fase. A primeira, envolvendo a fusão do gelo formado durante o resfriamento, ocorre entre -5,5 e -3°C e tem a moda entre -5 e -4,5°C. A segunda envolve a homogeneização total para a fase líquida durante o aquecimento, com múltiplos picos de concentração de temperatura entre 120 e 280°C. Dois picos térmicos são destacáveis: um entre 120 e 140°C e outro entre 180 e 200°C.

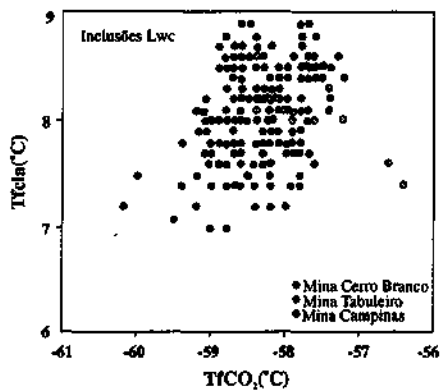


Figura 1 - Relação  $TfCO_2$  versus  $TfCla$  para fluidos aquo-carbônicos das três minas investigadas indicando composições semelhantes para os voláteis.

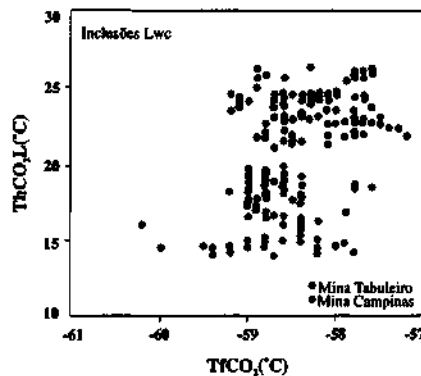


Figura 3 - Relação  $ThCO_{2L}$  versus  $TfCO_2$  indica evoluções diferentes para os fluidos aquo-carbônicos das minas Campinas e Tabuleiro.

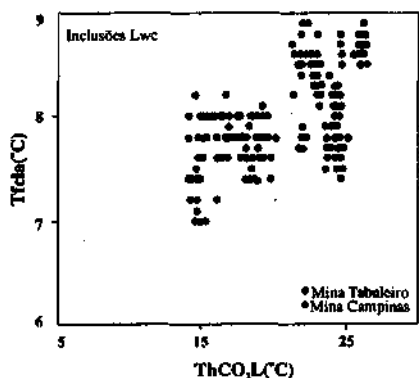


Figura 2 - Relação entre  $TfCla$  e  $TfCO_2$  demonstra que os fluidos aquo-carbônicos das minas Campinas e Tabuleiro evoluíram de forma diferente.

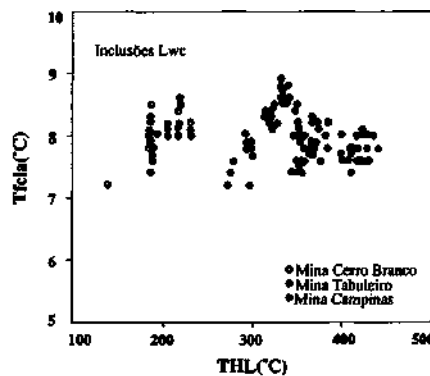


Figura 4 - Relação entre  $TfCla$  e  $TH$  das inclusões aquo-carbônicas para as minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro sugere que eventuais tendências evolutivas comuns são restritas às duas últimas.

**Mina Tabuleiro INCLUSÕES MONOFÁSICAS CARBÔNICAS (Lc)** As inclusões do tipo Lc estão presentes nos veios de quartzo da Mina Tabuleiro em pequeno número, dificultando interpretações estatísticas quanto a este tipo de inclusão. As temperaturas de fusão do  $CO_2$  estão concentradas em um intervalo entre  $-58,4$  e  $-57,8^\circ C$ . Da mesma forma, os poucos dados obtidos para temperaturas de homogeneização do  $CO_2$ , para o estado líquido, estão limitados a um intervalo situado entre  $23$  e  $26^\circ C$ .

**INCLUSÕES BIFÁSICAS AQUO-CARBÔNICAS (Lwc)** As inclusões do tipo Lwc, com dominância de fase vapor ou de fase líquida, apresentam medidas de temperatura de fusão do  $CO_2$  agrupadas em um intervalo de  $-59,6$  a  $-57,2^\circ C$ , com uma tendência de moda entre  $-59$  e  $-58,4^\circ C$ . A homogeneização do  $CO_2$ , sempre para o estado líquido, está concentrada em um intervalo de temperatura situado entre  $16$  e  $22^\circ C$ , com a maior frequência entre  $19$  e  $20^\circ C$ .

As temperaturas de fusão de clatrato estão agrupadas entre  $7,5$  e  $9^\circ C$ , com um intervalo de maior concentração entre  $8,5$  e  $9^\circ C$ . A homogeneização total das inclusões Lwc ocorre tanto para o estado vapor quanto para o líquido, variando em um intervalo de temperatura situado entre  $280$  e  $380^\circ C$ , com a mesma moda para os dois tipos de homogeneização situando-se entre  $320$  e  $340^\circ C$ .

**INCLUSÕES AQUOSAS (Lw)** As inclusões do tipo Lw apresentam temperaturas de fusão do gelo entre  $-5$  e  $-3^\circ C$ , com a maior parte concentrada entre  $-4,5$  e  $-3,5^\circ C$ . As temperaturas de homogeneização total ocorrem em três picos diferentes:  $120$  a  $140^\circ C$ ,  $180$  a  $200^\circ C$  e  $320$  a  $340^\circ C$ , com este último concentrando a maior parte das medidas obtidas.

**DISCUSSÃO DOS DADOS DE INCLUSÕES FLUIDAS** As relações existentes entre os parâmetros de composição química e salinidade, representados por temperaturas de fusão do  $CO_2$  ( $TfCO_2$ ), do clatrato ( $TfCla$ ) e do gelo ( $TfG$ ), e os parâmetros físicos, representados por temperaturas de homogeneização do  $CO_2$  ( $ThCO_2$ ) e de homogeneização total ( $TH$ ), permitem visualizar uma comparação entre os fluidos envolvidos na evolução das três minas analisadas, com base nas populações mais representativas de dados, isto é, aquelas que constituem os principais intervalos de temperatura.

Os fluidos aquo-carbônicos (Lwc) indicam, através da relação entre as temperaturas de fusão do  $CO_2$  e do clatrato (Fig. 1), semelhança quanto à composição, entre as inclusões fluidas analisadas nas três minas.

A comparação entre composições e parâmetros físicos indica, no entanto, que os fluidos das Minas Campinas e Tabuleiro evoluíram de forma diferente, o que fica demonstrado através das relações existentes entre as temperaturas de homogeneização do  $CO_2$  líquido e de fusão do clatrato (Fig. 2) e entre as temperaturas de homogeneização do  $CO_2$  líquido e de fusão do  $CO_2$  (Fig. 3).

A variação nas temperaturas de homogeneização total (Fig. 4) comparada à temperatura de fusão do clatrato indica que ocorreram variações na temperatura de homogeneização para um mesmo intervalo de salinidade dos fluidos. Isto poderia ser interpretado como resultante de um resfriamento progressivo da Mina Campinas para a Tabuleiro e para a Cerro Branco, em um modelo que envolvesse diminuição da temperatura dos fluidos de posições intracúpula para associações de depósitos distais. Poderia representar, ainda, um modelo segundo o qual os fluidos das três minas indicariam a participação de estágios evolutivos comuns, mas sob condições e temperaturas diferentes. Esta última hipótese parece reforçada diante da relação existente entre as temperaturas de homogeneização total e as temperaturas de fusão do  $CO_2$  (Fig. 5), onde os fluidos sugerem temperaturas diferentes, com a forte indicação de que na Mina Campinas, além de serem de mais alta temperatura, tiveram uma composição mais restrita que os fluidos das minas Tabuleiro e Cerro Branco.

As inclusões carbônicas (Lc) indicam, através da relação entre temperaturas de homogeneização do  $CO_2$  para o estado vapor e de fusão do  $CO_2$  (Fig. 6), uma variação bastante restrita para os fluidos de cada uma das três minas. Podem, ainda, ser uma indicação de fontes diferentes para estes fluidos. Certa tendência evolutiva comum pode, no entanto, ser sugerida entre as Minas Campinas e Tabuleiro. Esta diferenciação entre as duas parece ser confirmada através de dados preliminares de microsonda Raman, onde as inclusões fluidas do tipo Lwc da Mina Campinas podem conter até cerca de  $11\%$  molar de  $N_2$  e  $0,6\%$  molar de  $CH_4$ , enquanto para a Mina Tabuleiro estes valores caem, respectivamente para  $4,4$  e  $0,13\%$  molar. Para a Mina Cerro

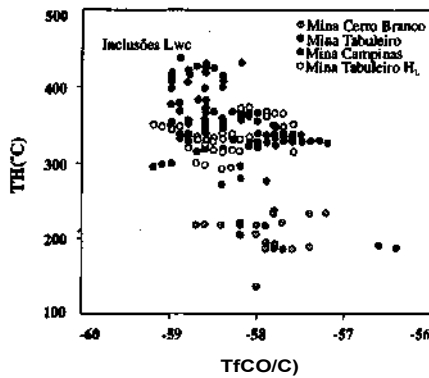


Figura 5 - Relação TH versus  $TfCO_2$  indica mecanismos evolutivos comuns para os fluidos aquo-carbônicos das minas Campinas e Tabuleiro, onde homogeneizam para fase líquida ou vapor.

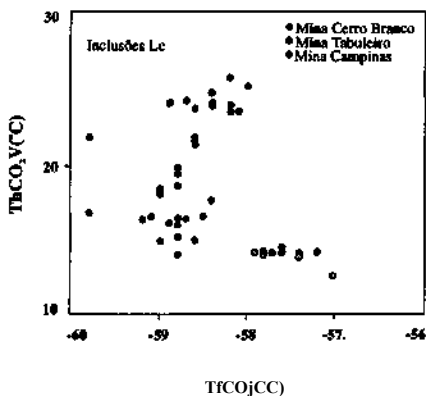


Figura 6 - Relação entre  $ThCO_2$  e  $TfCO_2$  sugere a possibilidade de evolução comum para os fluidos carbônicos das minas Campinas e Tabuleiro, mas a variação bastante restrita observada para os fluidos de cada uma das três minas indica áreas fontes diferentes para estes fluidos.

Branco, no entanto, a indicação é de fluidos gerados a partir de uma fonte diferente.

As inclusões aquosas (Lw) estão distribuídas em quatro grupos distintos (Fig. 7), segundo as temperaturas da fusão do gelo e da homogeneização total ao estado líquido. O primeiro, em torno de 150°C, e o segundo, em torno de 200°C, são compartilhados por inclusões aquosas das três minas envolvendo inclusões de zonas de borda de grãos de quartzo, de contatos intergranulares e de fraturas transgranulares tratando-se, portanto, de fluidos tardios na geração da mineralização. O terceiro e quarto grupos, situados em torno de 250 e 325°C, representam inclusões aquosas primárias e/ou pseudo-secundárias intragranulares que podem estar indicando os fluidos envolvidos na geração da mineralização. O terceiro grupo de inclusões encontra representação em zonas intermediárias e de borda de grãos de quartzo de veios da Mina Campinas e em zonas de núcleo de grãos de quartzo de veios da Mina Cerro Branco. O quarto grupo ocorre associado somente a zonas de núcleo de grãos de quartzo dos veios da Mina Tabuleiro.

Na relação entre as temperaturas de fusão do gelo e de homogeneização total (Fig. 7), os fluidos aquosos das três minas parecem indicar que não resultaram de simples resfriamento, devido a grande variação apresentada na temperatura de homogeneização total, e podem ter sofrido um processo de *necking down*. No entanto, a progressiva diminuição das temperaturas de homogeneização total, com aumento nas temperaturas de fusão do gelo e a conseqüente redução na salinidade, podem representar resfriamento desde os fluidos aquosos aprisionados em zonas de núcleo dos grãos de quartzo até os fluidos que ocorrem em zonas de contato intergranulares e em fraturas transgranulares. Esta possibilidade parece estar ocorrendo nas minas Cerro Branco e Tabuleiro mas não na Mina Campinas.

As inclusões aquo-carbônicas ao apresentarem mudanças na fração molar de  $CO_2$  ( $XCO_2$ ) provocadas por remoção de  $H_2O$  do sistema, quer por *necking down* quer por vazamento, deverão apresentar mudanças na temperatura de homogeneização. No caso das inclusões

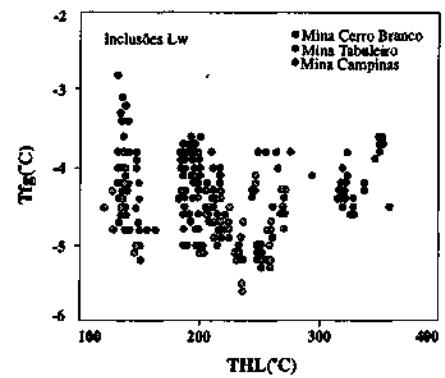


Figura 7 - Relação entre  $Tfg$  e  $TH$  indica que nas três minas estudadas as inclusões aquosas apresentam temperaturas de homogeneização total diferentes para relações texturais diversas.

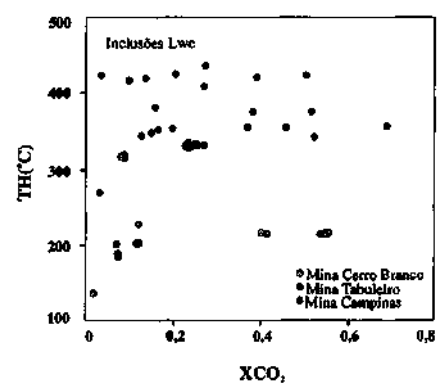


Figura 8-A relação TH versus  $XCO_2$ , indica ausência de modificações posteriores ao aprisionamento nas inclusões aquo-carbônicas.

Lwc das três minas analisadas (Fig. 8), não há correlação entre a fração molar de  $CO_2$  e a temperatura de homogeneização, indicando que as inclusões presentes em veios de quartzo não devem ter sofrido modificações posteriores a sua formação.

As inclusões bifásicas do tipo Lwc, ricas em fase líquida ou em fase vapor, podem apresentar modificações quanto a relação  $CO_2/CH_4$  como decorrência de modificações posteriores à formação das inclusões (Hall *et al.* 1991, Morgan *et al.* 1993). No caso específico das inclusões do tipo Lc, parâmetros como pressão, volume, temperatura e concentração podem não estar coerentes com a paragénesis mineral associada, mas sim com os terrenos deformados, em particular com os deslocamentos inter e intragranulares desenvolvidos sobre grãos de quartzo durante a deformação dúctil (Bakker & Jansen 1990 e 1991, Drury & Urai 1990, Hollister 1991, Johnson & Hollister 1991). Este pode ser o caso da Mina Cerro Branco e, ao menos em parte, da Mina Tabuleiro. No entanto, a relação existente entre a temperatura de fusão do  $CO_2$  e a concentração de  $CH_4$  (Fig. 9) indica que tanto as inclusões aquo-carbônicas, ricas em líquido ou em vapor, quanto as monofásicas carbônicas estabelecem uma correlação linear para as minas analisadas, salvo para as inclusões Lc da Mina Cerro Branco. Desta forma, é bastante improvável que tenham ocorrido mecanismos relacionados a difusão de fases contendo  $H_2O$  e/ou  $H_2$ .

A possível ocorrência de imiscibilidade associada à fase de inclusões aquo-carbônicas pode, em princípio, ser descartado pela ausência de correlação entre as frações molares de  $CH_4$  e os dados de salinidade. Além do fato de a relação existente entre temperatura de homogeneização total e concentração molar de  $CO_2$  (Fig. 8 e Fig. 9) não indicarem a existência de um *sohvus*. No caso das inclusões aquosas do tipo Lw, não foram detectadas inclusões ricas em fase vapor que justifiquem a atuação de um processo de *boiling* o que, parece, afasta a hipótese de ocorrência de imiscibilidade nestas inclusões.

Diante da relação entre volume molar e composição das inclusões pode ser considerada a hipótese que envolve mistura de fluidos (Fig. 10). O fluido resultante deste processo deveria apresentar uma correlação linear (Linnen & Williams-Jones 1995), como visualizado para as inclusões aquo-carbônicas do tipo Lwc, que sugerem uma origem por mistura de fluidos. No caso das inclusões aquosas, a relação do

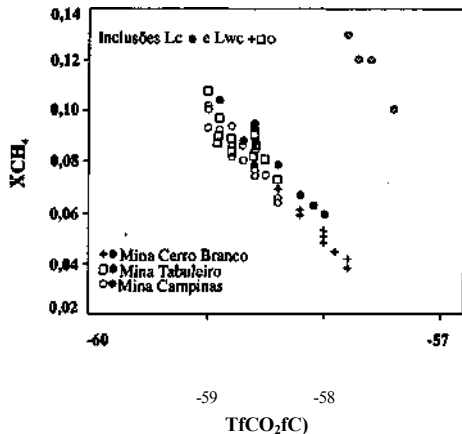


Figura 9 - Relação entre  $XCH_4$  e  $TfCO_2fC$ , para as inclusões carbônicas e aquo-carbônicas, indicando a existência de correlação entre os fluidos das minas Campinas e Tabuleiro e não para os fluidos da Mina Cerro Branco.

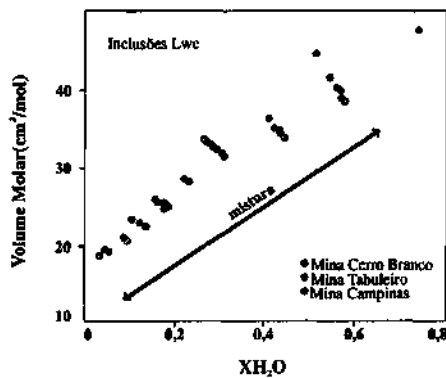


Figura 10 - Relação entre Volume Molar e  $XH_2O$  indicando que as composições e os volumes molares das inclusões aquo-carbônicas das minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro são compatíveis com uma sistema resultante de mistura.

volume molar com a salinidade (Fig. 11) indica um padrão semelhante a das relações já discutidas, com os dados das minas Cerro Branco e Campinas sugerindo um processo de *necking down* ou de simples resfriamento.

Na hipótese de resfriamento simples, os dados que implicam em uma ausência de correlação entre volumes molares e salinidade estariam indicando que os fluidos resultantes não são produto de mistura. Neste caso, as inclusões fluidas da Mina Tabuleiro poderiam representar a composição original dos fluidos, sem a ocorrência de *necking down*, com os fluidos gerados a partir de uma fonte homogênea. Isto não é compatível com a petrografia das inclusões, como também com a relação de atemporalidade entre a alteração hidrotermal gerada durante o posicionamento dos corpos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira e os da Suíte Intrusiva Campinas.

Assim, os dados das inclusões fluidas podem estar indicando a existência de pelo menos três tipos diferentes de fluidos na geração da mineralização do distrito estanífero e na história hidrotermal da área, com ao menos dois deles representando fontes diferentes. O primeiro é representado por fluidos aquosos de salinidade moderada, o segundo por fluidos carbônicos e o terceiro por fluidos aquo-carbônicos de salinidade moderada a baixa.

**CONCLUSÕES** A petrografia das inclusões Lwc, Lw e Lc indica uma relação inversa de ocorrência nas minas Cerro Branco e Campinas. Na Mina Cerro Branco as inclusões precoces, em zonas de núcleo de grãos, são essencialmente aquosas com salinidade moderada, enquanto as inclusões tardias de margem recristalizada de grãos e de fraturas transgranulares são carbônicas e aquo-carbônicas de salinidade moderada a baixa. Na Mina Campinas o caráter precoce é das inclusões aquo-carbônicas e carbônicas em núcleos de grãos. As inclusões aquosas são tardias e ocorrem em zonas de borda e de contato intergranulares dos grãos de quartzo dos veios mineralizados.

Essa relação textural implica em que os primeiros fluidos aprisionados ao longo de zonas de alteração hidrotermal, com geração de veios, estavam associados aos granitoides da Suíte Intrusiva Cor-

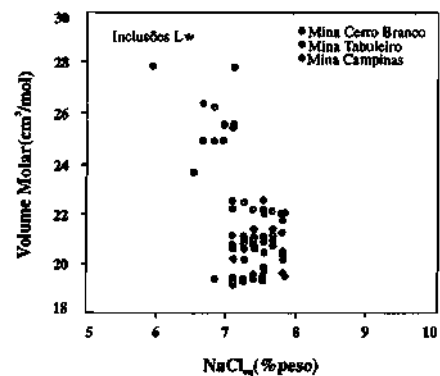


Figura 11 - Relação Volume Molar versus  $NaCl_{eq}$  para inclusões aquosas, através da correlação entre salinidade e volume molar, pode sugerir a existência de um processo de *necking down* no sistema.

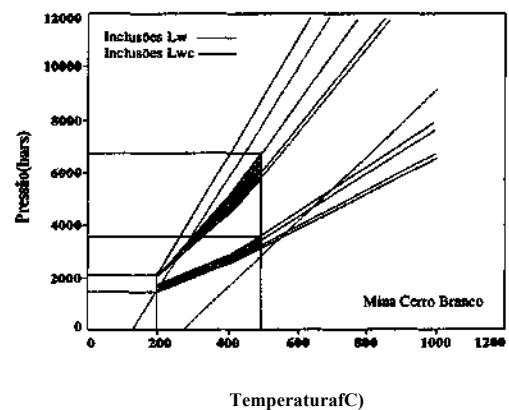


Figura 12 - Isócoras calculadas para as inclusões aquosas e aquo-carbônicas estabelecendo as condições de pressão e de temperatura deformação destas fases de inclusões na Mina Cerro Branco.

dilheira e foram essencialmente aquosos. A salinidade moderada equivalente entre 7 e 8% em peso de NaCl, pode estar indicando que a origem dos fluidos foi em parte resultante da interação de fluidos ortomagmáticos com fluidos aquosos associados a uma encaixante submetida à deformação transpressiva que atuou na área durante o posicionamentos dos corpos desta suíte.

O  $CO_2$  é, em geral, pouco solúvel em fundidos graníticos e as inclusões aquo-carbônicas e carbônicas têm em fluidos metamórficos da encaixante uma fonte importante (Fogel & Rutherford 1990). As inclusões Lc e Lwc, contendo proporções variadas de  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2$ , podem representar fluidos metamórficos gerados na Suíte Metamórfica Porpngos, em particular nos xistos carbonosos do Complexo Cerro da Arvore, incorporados ao sistema hidrotermal através de processos de desgaseificação por ação térmica dos corpos da Suíte Intrusiva Campinas. O calor gerado pela intrusão destes corpos graníticos pode ter provocado a combustão do material carbonoso, ou mesmo a incorporação de  $CO_2$  e  $H_2O$  junto com xenólitos, gerando fluidos ricos em  $CO_2$  vapor. Este seria o segundo aporte de fluidos responsáveis por alteração hidrotermal na área.

A correlação entre volume molar e concentração de  $H_2O$  para as inclusões aquo-carbônicas, indicando um processo de mistura, pode representar a interação entre os dois tipos anteriores de fluidos. Ou seja, a interação entre os fluidos aquosos de salinidade moderada, gerados durante o posicionamento dos corpos graníticos da Suíte Intrusiva Cordilheira, e os fluidos ricos em  $CO_2$ , gerados durante a injeção dos granitoides da Suíte Intrusiva Campinas.

O influxo de  $CO_2$  vapor no sistema hidrotermal, durante a intrusão dos granitoides da Suíte Intrusiva Campinas, pode ter auxiliado na formação de veios de quartzo, pela precipitação de sílica causada por um decréscimo da atividade da água em solução (Walther & Schott 1988). De forma simultânea, ocorreu o aprisionamento de porções de fluidos misturados, como inclusões do tipo Lwc. Inclusões deste tipo com predomínio de fase vapor podem representar influxos maiores de  $CO_2$  vapor (Frantz *et al* 1996a), produzidos pela volatilização da matéria carbonosa do Complexo Cerro da Arvore.

Quanto às condições de pressão e temperatura de formação dessas inclusões, as isócoras calculadas para as inclusões aquosas das três

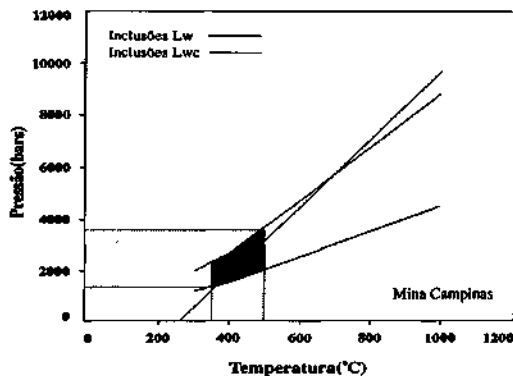


Figura 13 - Isócoras calculadas para as inclusões aquosas e aquo-carbônicas estabelecendo as condições de pressão e de temperatura de formação destas fases de inclusões na Mina Campinas.

minas (Fig. 12, Fig. 13 e Fig. 14) indicam uma sobreposição entre as das minas Cerro Branco e Campinas, ambas com maior declividade do que as da Mina Tabuleiro, o que pode sugerir pressões mais elevadas para as duas primeiras.

As temperaturas de homogeneização total das inclusões aquo-carbônicas, consideradas como as temperaturas mínimas de aprisionamento das inclusões, são de 200, 360 e 330°C, respectivamente, para as minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro. Estas seriam as temperaturas mínimas envolvidas na geração dos veios de quartzo ou da interação destes com fases de remobilização, como pode ser o caso da Mina Cerro Branco. Indicam, ainda, o limite inferior das temperaturas envolvidas na geração da mineralização estanífera. O limite superior, situado entre 450 e 500°C para as três minas, pode ser definido a partir da presença, em todas as associações com greisen, de politipos 3T e 2M, dentre as micas brancas. O primeiro resulta da instabilização de biotita enquanto o segundo é produto da estabilização de micas dioctáedricas de mais alta temperatura (Frantz *et al.* 1996b).

A interseção das isócoras das inclusões aquo-carbônicas e aquosas para as três minas (Figs. 12, 13 e 14) sugere que o aprisionamento das soluções deva ter ocorrido em um intervalo entre 1,5 e 3Kb e entre 330 e 500°C, representado pela média das condições de pressão-temperatura estabelecidas para a Mina Tabuleiro. Os valores mais elevados de pressão para a Mina Cerro Branco, entre 2 e 7 Kb, são indicados pela interseção das isócoras de inclusões aquo-carbônicas de alta densidade com isócoras de inclusões aquosas, em muito superiores aos valores indicados para inclusões Lwc de baixa densidade. Isto pode ser indicativo de *necking down* e pode decorrer da atuação de uma deformação transpressiva concomitante à circulação dos fluidos hidrotermais associados aos granitóides da Suíte Intrusiva Cordilheira ou de reativações tardias e contemporâneas ao posicionamento dos granitóides da Suíte Intrusiva Campinas. Da mesma forma, os limites calculados pela interseção das isócoras das inclusões aquosas com as de inclusões aquo-carbônicas de baixa densidade para a Mina Campinas, além da Mina Cerro Branco, são mais elevados que os da Mina Tabuleiro. No caso da Mina Campinas, associada a um corpo granítico de pequenas dimensões e com posicionamento integral no interior de uma faixa de

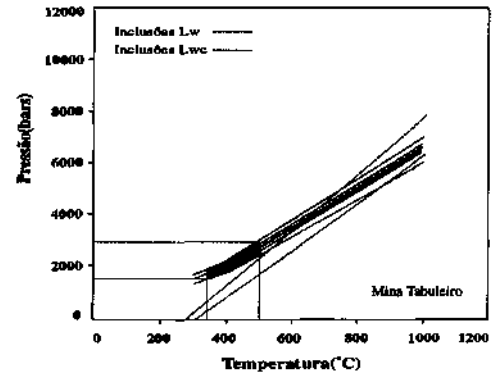


Figura 14 - Isócoras calculadas para as inclusões aquosas e aquo-carbônicas estabelecendo as condições de pressão e de temperatura de formação destas fases de inclusões na Mina Tabuleiro.

milonitos, reativações tardias afetaram de forma mais efetiva este corpo em relação a corpos maiores e, portanto mais refratários à deformação, como é o caso do Granito Tabuleiro. Assim, diante da possibilidade da ação de processos deformacionais que podem ter modificado as relações de estabilidade das fases fluidas nas zonas de alteração hidrotermal das minas Cerro Branco e Campinas, torna-se pouco recomendável a utilização de seus dados para controle termo-barométrico da formação de veios de quartzo.

Os dados de microtermometria, através dos parâmetros físicos e de composição das inclusões fluidas das minas Cerro Branco, Campinas e Tabuleiro, indicam evoluções independentes para as fases fluidas das três minas. A Mina Cerro Branco apresenta fluidos com densidade elevada e composições com salinidade moderada, com fluidos indicativos das temperaturas mais baixas. A Mina Campinas tem fluidos que sugerem composição restrita quanto ao tipo de voláteis, com densidade alta e temperatura elevada. A Mina Tabuleiro apresenta inclusões fluidas indicativas de temperatura e densidade intermediárias e com as composições mais variadas quanto ao tipo de voláteis presentes.

A caracterização das fases fluidas presentes indicam a ausência de fluidos ortomagmáticos puros no processo de formação das zonas de alteração hidrotermal e da mineralização. Ao contrário, os sistemas hidrotermais desenvolvidos parecem representar um processo de mistura de fluidos magmático-metamórficos através da interação de fluidos aquosos de salinidade moderada, que acompanharam o posicionamento dos granitóides da Suíte Intrusiva Cordilheira, com fluidos ricos em CO<sub>2</sub>, possivelmente gerados a partir de xistos carbonosos que sofreram efeitos térmicos durante a injeção dos corpos graníticos da Suíte Intrusiva Campinas.

**Agradecimentos** Aos professores Mareei Dardenne e Aroldo Misi pela liberação dos laboratórios de inclusões fluidas das universidades de Brasília e Federal da Bahia, ao professor Roberto Xavier da Universidade de Campinas pelo acesso a dados de microsonda Raman e discussão dos dados de microtermometria, aos relatores anônimos da RBG pela revisão crítica do manuscrito.

## Referências

- Bakker, R.J. & Jansen, J.B.H. 1990. Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, 345: 58-60.
- Bakker, R. J. & Jansen, J.B.H. 1991. Experimental postentrapment water loss from synthetic C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O inclusions in natural quartz. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 55: 2215-2230.
- Drury, M.R. & Urai, J.L. 1990. Deformation-related recrystallization processes. *Tectonophysics*, 172: 235-253.
- Frantz, J.C. 1997. *Petrologia e Hidrotermalismo dos Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 264p.
- Frantz, J.C. & Botelho, N.F. 1997. Os Granitóides Estaníferos do Rio Grande do Sul, Zonas de Cisalhamento Transcorrente e Geração de Greisen Estruturalmente Controlados. In: SBG/Núcleo Brasília/IG-UnB, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, VI, Pirenópolis, *Anais*, 313-315.
- Frantz, J.C.; Coelho, C.E.; Botelho, N.F. 1996. Mineralização Estanífera Intracúpula do Granito Campinas no Distrito Estanífero de Encruzilhada do Sul - RS: Estudo Preliminar de Inclusões Fluidas. In: SBG, II Simpósio sobre Inclusões Fluidas, Congr. Brás. Geol., XXXIX, Salvador, *Resumos Expandidos*, 7: 457-460.
- Frantz, J.C.; Mexias, A.S.; Botelho, N.F. 1996. Caracterização das Micas Brancas Associadas a Alteração Hidrotermal do Tipo Greisen nos Granitos Tabuleiro e Cerro Branco/RS. In: SBG, Congr. Brás. Geol., XXXIX, Salvador, *Resumos Expandidos*, 3:31-34.
- Fogel, R.A. & Rutherford, M.J. 1990. The solubility of carbon dioxide in rhyolitic melts: A quantitative FTIR study. *Am. Mineral.*, 75:1311-1326.
- Hall, D.L.; Bodnar, R.J.; Craig, J.R. 1991. Evidence for postentrapment diffusion of hydrogen into peak metamorphic fluid inclusions from the massive sulfide deposits at Ducktown, Tennessee. *Am. Mineral.*, 76: 1344-1355.
- Hollister, L. S. 1991. Enrichment of CO<sub>2</sub> in fluid inclusions in quartz by removal of H<sub>2</sub>O during crystal-plastic deformation. *J. Struct. Geol.*, 12: 895-901.
- Johnson, E.L. & Hollister, L.S. 1991. The identification and use of deformation-primary fluid inclusions. *Eur. Cur. Rés. Fluid Inclusions XI, Plinius*, 5: 114-115.
- Linnen, R.L. & Williams-Jones, A.E. 1995. Gênesis of a magmatic metamorphic hydrothermal system: the Sn-W polymet allie deposits at Pílok, Thailand. *Econ. Geol.*, 90: 1148-1166.
- Morgan, G.B.; Chou, I.M.; Pasteris, J.D.; Olsen, S.N. 1993. Re-equilibration of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> fluid inclusions at controlled hydrogen fugacities. *J. Metam. Geol.*, 11: 155-164.
- Roedder, E. 1972. *The composition of fluid inclusions*. U. S. Geological Survey Prof. Paper 440JJ, 164p.
- Walther, J.V. & Schott, J. 1988. The dielectric constant approach to speciation and ion pairing at high temperature and pressure. *Nature*, 332: 635-638.

Manuscrito A-952

Recebido em 23 de dezembro de 1997  
Revisão dos autores em 18 de maio de 1998  
Revisão aceita em 20 de maio de 1998