

## Metadolomitos Talcificados do Grupo Itaiacoca, Paraná: Regime de Fluidos e Implicações Genéticas

### *Talc-bearing Metadolomites of the Itaiacoca Group, Paraná (Southern Brazil): Fluid Regime and Genetic Implications*

Danilo Marques Saunite (dsaunite@gmail.com), Rosa Maria da Silveira Bello (rosabell@usp.br),  
Fábio Ramos Dias de Andrade (dias@usp.br), Gergely Andrés Julio Szabó (gajszabo@usp.br)  
Departamento de Mineralogia e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP  
R. do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR

Recebido em 18 de maio de 2010; aceito em 11 de fevereiro de 2011

#### RESUMO

As maiores reservas de talco no Brasil estão localizadas em metadolomitos proterozoicos de baixo grau do Grupo Itaiacoca. Foram analisadas inclusões fluidas em três contextos diferentes de formação de talco. Ao longo de zonas de cisalhamento transcorrente ocorrem jazidas de talco xistos, em cujos veios de quartzo as inclusões fluidas são aquosas de baixa salinidade (< 5% em peso de NaCl equivalente) e desprovidas de CO<sub>2</sub>, indicando elevada razão água:rocha e prolongada percolação de soluções hidrotermais. A variação de *Thtot* nas inclusões primárias, principalmente de 110 a 230°C, é consequência de diversos episódios de percolação de fluidos durante a evolução das zonas de cisalhamento. Na periferia das zonas de cisalhamento, os veios em metadolomitos fraturados e incipientemente talcificados contêm inclusões ricas em CO<sub>2</sub> (*XCO<sub>2</sub>* de 0,17 a 0,81), indicando circulação mais restrita de fluidos, e *Thtot*, situada principalmente entre 250 e 300°C. As relações entre densidade e salinidade sugerem mistura *supersolvus* em proporções variáveis entre fluidos aquosos e carbônicos. No contato dos metadolomitos com o Complexo Granítico Cunhaporanga, as inclusões são carbônicas e aquocarbônicas, indicando circulação restrita de fluidos aquosos; apresentam um amplo intervalo de variação em salinidade (0 a 20% em peso de NaCl equivalente), *dCO<sub>2</sub>* (0,13 a 1,0 g/cm<sup>3</sup>), *dtot* (0,2 a 1,0 g/cm<sup>3</sup>), com *Thtot* entre 130 e 574°C. Nesse ambiente houve formação restrita de talco por retrometamorfismo de silicatos magnesianos de alta temperatura, tendo o sistema preservado situações de desequilíbrio, com reações retrometamórficas incompletas. Os resultados não permitiram a determinação precisa das condições de talcificação, pois as inclusões contêm fluidos posteriores ao pico térmico dos sistemas de mineralização. No entanto, no caso dos veios em metadolomito fraturado as *Thtot* indicam as condições mais próximas às de talcificação, porém num estágio mais tardio, sob regime rúptil.

**Palavras-chave:** Inclusões fluidas; Talco; Metadolomito; Grupo Itaiacoca; Sul do Brasil.

#### ABSTRACT

Brazil's largest talc deposits occur in the Itaiacoca Group, which is a low-grade metasedimentary belt composed mainly of dolomitic rocks. Fluid inclusions from three geological settings in which talc was formed differently were analysed. Talc schist ore occur along transcurrent shear zones. These talc schists are host to quartz veins, which indicates prolonged circulation of hydrothermal fluids at high water:rock ratios. The fluid inclusions in the quartz veins contain predominantly low-salinity (< 5 wt % NaCl equiv.) and CO<sub>2</sub>-free aqueous inclusions. The wide range of *Thtot* values in the primary fluid inclusions in the veins, mainly from 110 to 230°C, is related to several episodes of fluid percolation during the shear zone evolution. As a contrast, outward of the shear zones, fractured metadolomites with lower concentrations of talc contain quartz veins with CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions (*X<sub>CO<sub>2</sub></sub>* from 0.17 to 0.81) and *Thtot* ranging mainly from 250 to 300°C, which indicates restricted fluid circulation during the trapping of these inclusions, shortly after the peak of talcification, in a later brittle stage. Density-salinity relationships for these inclusions suggest *supersolvus* mixing in variable proportions of aqueous-carbonic fluids. In the contact aureole between the metadolomites and the Cunhaporanga granite complex, where talc was formed in minor amounts by retrometamorphism of high

temperature magnesium silicates, fluid inclusions are mainly carbonic to aqueous-carbonic, suggesting restricted fluid circulation. Fluid inclusions in this setting show a wide range of measured and calculated parameters, such as salinity (0 to 20 wt % NaCl equiv.),  $dCO_2$  (0.13 to 1.0 g/cm<sup>3</sup>),  $dtot$  (0.2 to 1.0 g/cm<sup>3</sup>), and  $T_{tot}$  (between 130 and 574°C). Results obtained in this study did not allow precise determination of the talc-ore forming conditions, considering that the inclusions contain fluids which were trapped after the peak of talcification. Conditions similar to those of talcification are suggested by the  $T_{tot}$  values obtained for the inclusions in quartz-veins from fractured metadolomites, although from a later, brittle stage.

**Keywords:** Fluid inclusions; Talc; Metadolomite; Itaiacoca Group; Southern Brazil.

## INTRODUÇÃO

O Grupo Itaiacoca constitui um pacote metassedimentar de baixo grau com predomínio de rochas dolomíticas, cuja história metamórfica complexa envolveu metamorfismo regional em fácies xisto verde, metamorfismo associado a zonas de cisalhamento regionais, metamorfismo de contato com o Complexo Granítico Cunhaporanga e com os diques de diabásio do Arco de Ponta Grossa. O Grupo Itaiacoca contém as maiores reservas de talco do Brasil (DNPM, 2008), gerado pela interação entre os metadolomitos e fluidos aquosos ricos em sílica, formando talco xistos em zonas de cisalhamento, além de talco em fraturas na periferia dessas zonas (Szabó et al., 2006). Ocorrências não-econômicas de talco foram geradas por retrometamorfismo na auréola de contato entre o metadolomito e o granito.

Este artigo apresenta uma comparação entre inclusões fluidas em veios de quartzo e calcita em zonas de cisalhamento (afloramentos *PTI02* e *PTI22*), em metadolomitos fraturados (afloramento *PTI55*) e no contato entre metadolomito e granito (afloramentos *PTI05* e *PTI43*). A localização desses afloramentos encontra-se na Figura 1. A integração dos dados com informações petrográficas e geológicas de campo permitiu a proposição de um modelo evolutivo de fluidos, no âmbito dos processos metamórficos e tectônicos identificados na região.

## MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi feita a análise petrográfica de inclusões fluidas em 6 seções bipolidas, selecionadas a partir de um conjunto de 30 seções. Foram feitas mais de 1.200 medidas microtermométricas em cerca de 460 inclusões em quartzo e calcita, com ênfase nas inclusões primárias. Foram adotados os critérios petrográficos de Roedder (1984) de classificação de inclusões primárias, secundárias e pseudossecundárias. As análises foram feitas no Laboratório de Inclusões Fluidas do Departamento de Mineralogia e Geotectônica da Universidade de São Paulo, em equipamento LINKAM MDS 600 ca-

librado com padrões *SYN FLINC* (*Synthetic Fluid Inclusions*). Parte das inclusões foi analisada em equipamento Chaixmeca MTM85 calibrado com padrões MERCK Signotherm (baixa temperatura) e MERCK MSP (alta temperatura). Para restringir os efeitos de metaestabilidade, as análises foram feitas sob taxas lentas de aquecimento, de 1 a 5°C/min, nos intervalos de temperatura próximos às transições de fase. As propriedades físicas e químicas dos fluidos foram calculadas com os programas FLUIDS e CHLATTRATES de Bakker (1997, 2003) e o cálculo das isócoras foi feito com o programa ISOC de Bakker (2003).

## GEOLOGIA REGIONAL

A área estudada (Figura 1) localiza-se numa região onde afloram rochas meso- a neoproterozoicas da Faixa Ribeira (e.g., Hasui, Carneiro, Coimbra, 1975), rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná e diques de diabásio do Arco de Ponta Grossa, relacionados à abertura do Oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo (e.g., Turner et al., 1994; Piccirillo e Melfi, 1998).

O Grupo Itaiacoca é uma faixa alongada na direção geral N40E composta por rochas metassedimentares e metavulcânicas de baixo grau metamórfico, que se estende desde a região de Itaiacoca (PR) até Itapeva (SP). Está situado entre os Complexos Graníticos Cunhaporanga e Três Córregos, com relações de contato distintas: o contato do Complexo Granítico Cunhaporanga com a borda NW do Grupo Itaiacoca é intrusivo com metamorfismo termal; enquanto que o contato com o Complexo Granítico Três Córregos é tectônico, marcado pela Zona de Cisalhamento Itapirapuã, de direção predominantemente N40E (CPRM, 1977). Segundo Prazeres Filho et al. (2003), os Complexos Graníticos Cunhaporanga e Três Córregos são compostos por fácies com idades entre 630 e 560 Ma. A sudeste da Zona de Cisalhamento Itapirapuã afloram rochas supracrustais metamorfisadas em grau baixo a médio da Formação Água Clara (e.g., Weber et al., 2004).

Siga Junior et al. (2003, 2009) atribuem ao Grupo Itaiacoca idade neoproterozoica com base em datação

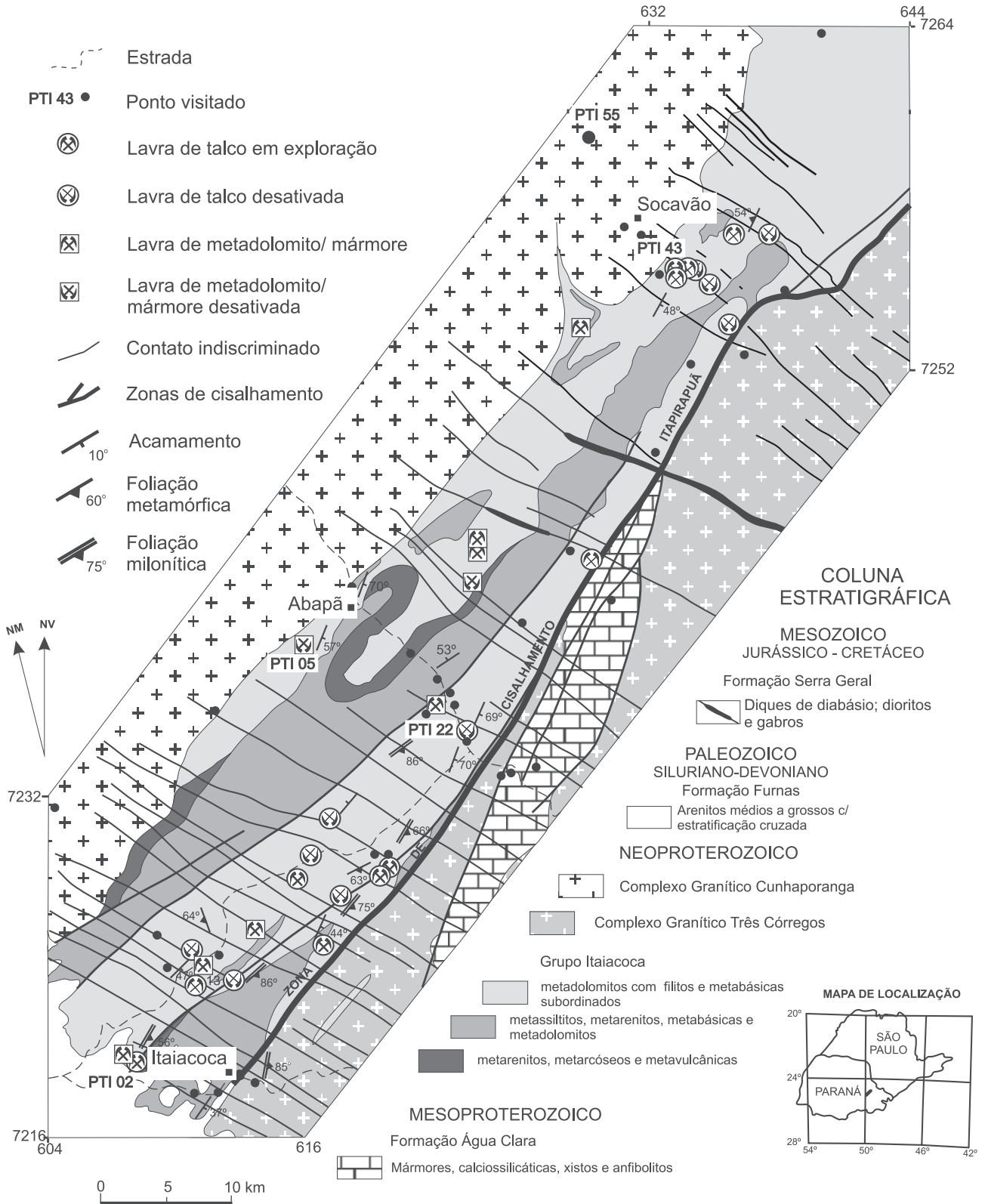


Figura 1. Mapa geológico do Grupo Itaiacoca entre Itaiacoca e Socavão, PR (modificado de CPRM, 1977), com a localização das principais jazidas e dos afloramentos estudados.

U-Pb (628 e 636 Ma) em cristais de zircão de rochas metavulcânicas, interpretada como idade de cristalização. Outra população de cristais de zircão forneceu idades de 2480 e 1990 Ma, interpretadas como idade do material detrítico de fontes paleoproterozoicas. Essas idades divergem das obtidas por Reis Neto (1994), que propõe o intervalo entre 1250 e 1080 Ma para deposição do Grupo Itaiacoca.

Apesar de não haver consenso sobre a divisão estratigráfica do Grupo Itaiacoca, que é motivo de debate desde a década de 1930, diversos autores consideram a existência de três associações litológicas principais: **a.** metadolomitos e mármore dolomíticos com intercalações de metabasitos, filitos e rochas metacarbonáticas com contribuição pelítica e psamítica; **b.** metapelitos com intercalações de quartzitos; **c.** meta-arenitos e meta-arcóseos, com intercalações de metavulcânicas e metavulcanoclásticas.

O Grupo Itaiacoca foi afetado por quatro episódios metamórficos:

**1. metamorfismo regional** (Ciclo Brasileiro, Neoproterozoico): atingiu a fácies xisto verde, zona da clorita, localmente zona da biotita, formando metadolomitos, filitos e anfibolitos, cujas estruturas primárias sedimentares e vulcânicas encontram-se em parte preservadas (Reis Neto, 1994; Siga Junior et al., 2003; Szabó et al., 2006);

**2. metamorfismo dinâmico e hidrotermal** (Ciclo Brasileiro, Neoproterozoico): este episódio transformou os metadolomitos em talco xistos ao longo da Zona de Cisalhamento de Itapirapuã e suas ramificações (Szabó et al., 2006), que definem o contato tectônico do Grupo Itaiacoca com o Complexo Granítico Três Córregos (630 Ma, Prazeres Filho et al., 2003) e com a Formação Água Clara (1.500 Ma, Weber et al., 2004). Segundo Szabó et al. (2006), a intensa percolação de fluidos com sílica nas zonas de cisalhamento transcorrente foi responsável pela formação das principais jazidas de talco na porção meridional do Grupo Itaiacoca;

**3. metamorfismo termal I** (Ciclo Brasileiro, Neoproterozoico): ocorreu no contato intrusivo do Complexo Granítico Cunhaporanga na borda NW do Grupo Itaiacoca, formando mármore brancos com bolsões concêntricos contendo paragêneses de mais alto grau no núcleo e retro-metamórficas nas bordas - tremolita ± diopsídio ± forsterita com talco, quartzo e calcita; também ocorrem metapelitos com granada ± sillimanita ± andalusita. A auréola de contato intrusivo com o Complexo Granítico Cunhaporanga é pouco desenvolvida no Grupo Itaiacoca;

**4. metamorfismo termal II** (ruptura de Gondwana, Cretáceo): ocorreu no contato com diques de diabásio com efeitos restritos à espessura de poucos centímetros, formando mármore brancos (brucita ± serpentina ± calcita).

## RESULTADOS

### Relações petrográficas e de campo

Os metadolomitos do Grupo Itaiacoca constituem pacotes espessos e homogêneos de cor cinza e granulação fina, com acamamento sedimentar ( $S_0$ ) marcado pela alternância de tons claros e escuros e por camadas localmente mais ricas em quartzo detrítico ou calcita, além de estromatólitos. Os metadolomitos, compostos exclusivamente por carbonatos e quartzo, não contêm paragêneses referentes ao metamorfismo regional, apenas incipiente deformação e recristalização.

A Zona de Cisalhamento de Itapirapuã marca o contato tectônico entre o Grupo Itaiacoca e o Complexo Granítico Três Córregos. O aporte de fluidos hidrotermais com sílica através desta zona de cisalhamento é indicado por abundantes veios de quartzo concordantes, discordantes e deformados em grau variável. Associada a este processo de deformação ocorreu intensa talcificação, formando faixas de talco xisto com dezenas de metros de espessura e centenas de metros de extensão na direção da foliação. A foliação anastomosada definida por talco envolvendo porfiroblastos de calcita, veios lenticularizados de quartzo e fragmentos lenticulares de metadolomito é visível em campo e em lâminas petrográficas. Os talco xistos em zonas de cisalhamento têm textura lepidoblástica, granulação fina e são compostos predominantemente por talco, com porfiroblastos de calcita idiomórfica e fragmentos de metadolomito na forma de lentes concordantes com a foliação. O talco tem cor predominantemente cinza clara a localmente rosada, esverdeada ou mesmo preta, sendo esbranquiçado onde afetado por intemperismo. É rara a ocorrência de clorita, serpentina e tremolita, que se associam ao talco xisto particularmente nas extremidades dos veios de quartzo.

Na periferia das zonas de cisalhamento principais, os planos de cisalhamento e talcificação são progressivamente mais espaçados e o teor de talco decresce com o distanciamento dessas zonas principais. Nesse contexto, ocorrem metadolomitos fraturados com talco em redes irregulares de fraturas, planos de estratificação e clivagens plano-axiais espaçadas. Esse estilo de talcificação é visto nas porções residuais de minas de talco abandonadas, tratando-se possivelmente de um material marginal aos minérios de alto teor das zonas de cisalhamento.

O contato intrusivo do Complexo Granítico Cunhaporanga nos metadolomitos e metapelitos do Grupo Itaiacoca é marcado por mármore granoblásticos brancos, com veios e bolsões descontínuos de tremolita (± diopsídio ± forsterita), quartzo, calcita e talco, com minerais de alta temperatura nos núcleos, envoltos por minerais retrometa-

mórficos. A percolação dos fluidos foi não pervasiva, canalizada na intersecção de fraturas e em planos de acamamento. A tremolita ocorre também em porfiroblastos aciculares milimétricos isolados, alinhados ao longo de fraturas, localmente acompanhada de calcita metamórfica ou em parte substituída por talco. Os metapelitos na auréola de contato contêm andalusita quiasfolítica, granada e sillimanita (fibrolita) paralela à foliação local.

O metamorfismo termal relacionado ao enxame de diques de diabásio do Arco de Ponta Grossa gerou nos metadolomitos bandas irregulares de granulação muito fina, de cor preta, castanha e verde, contendo serpentina. Megaxenólitos de metadolomito em diques espessos contêm crisotila, em parte pseudomorfa sobre olivina, e veios de brucita. Não foi observado talco formado nas auréolas metamórficas destes diques, que truncam faixas de talco xisto. A espessura dessas auréolas é tipicamente da ordem de milímetros a centímetros, indicando percolação limitada de fluidos. Entretanto, na proximidade de diques mais possantes, o metadolomito se recristalizou a distâncias de até vários metros do contato, na forma de mármore dolomítico e calcítico branco.

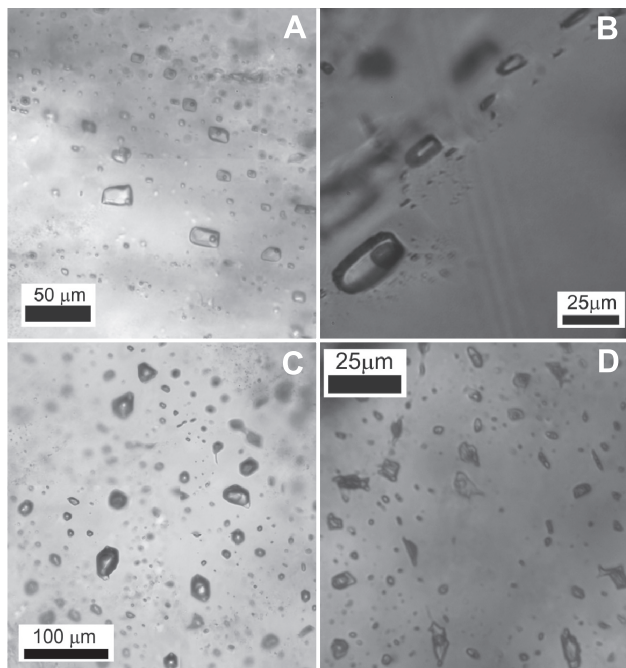
Uma descrição das características litológicas, petrográficas e de campo com ênfase no metamorfismo e nos estilos de talcificação é apresentada por Szabó et al. (2006).

### Inclusões fluidas

A estatística descritiva dos dados microtermométricos e os respectivos parâmetros calculados das inclusões fluidas, divididas por contexto geológico, são apresentadas na Tabela 1. A Figura 2 apresenta fotomicrografias de inclusões fluidas estudadas. Os dados microtermométricos referem-se às temperaturas eutética ( $T_e$ ), de fusão do  $\text{CO}_2$  ( $T_{f\text{CO}_2}$ ), de fusão do gelo ( $T_{fg}$ ), de fusão de clatratos ( $T_{clat}$ ), de homogeneização do  $\text{CO}_2$  ( $T_{h\text{CO}_2}$ ) e de homogeneização total ( $T_{htot}$ ), sendo estas abreviaturas usadas a seguir no texto, na tabela e nas figuras. A partir das temperaturas de transição das fases e das relações volumétricas em inclusões aquosas ( $V_{vapor}/V_{tot}$ ) ou aquocarbônicas ( $V_{\text{CO}_2}/V_{tot}$ ) foram calculados os parâmetros densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), fração molar de  $\text{CO}_2$  ( $X_{\text{CO}_2}$ ) e salinidade (% em peso de NaCl equivalente). Cada amostra foi dividida em fragmentos para facilitar seu manuseio. Os dados de cada amostra são trata-

**Tabela 1.** intervalo de variação dos dados medidos e parâmetros calculados das amostras analisadas nos três contextos geológicos considerados. *Legenda:* **g** = homogeneização para o estado gasoso (expansão da bolha de vapor); **L** = homogeneização para o estado líquido (desaparecimento da bolha de vapor); \* homogeneização total pela expansão da fase carbônica; \*\* inclusões metaestáveis.

Contexto Geológico	Zonas de cisalhamento		Metadolomito fraturado	Contato com Granito
	(inclusões primárias)	(inclusões secundárias)		
$T_{f\text{CO}_2}$ (°C)	-	-	-58,2 a -56,8	-60,4 a -57,1
$T_{clat}$ (°C)	-	-	7,7 a 10,0	-12,1 a 9,9
$T_e$ (°C)	-54,1 a -11,9	-49,6 a -39,2	-	-53,4 a -38,5
$T_{fg}$ (°C)	-11,1 a 0,1**	-3,5 a 4,1**	-	-12,0 a -2,4
$T_{h\text{CO}_2}$ (°C)	-	-	-3,2 a 15,7 (g); 28,7 a 31,0 (L)	9,5 a 31,0 (g); -21,0 a 30,9 (L)
$T_{htot}$ (°C)	84,8 a 266,2	87,5 a 225,5	197,8 a 425,4*	130 a 574,1
$V_{\text{CO}_2}/V_{total}$	-	-	0,6 a 0,95	0 a 1
$V_{vapor}/V_{total}$	0,04 a 0,20	0,03 a 0,20	-	0 a 1
salinidade (% peso NaCl equivalente)	~0,0 a 14,6	~0,0 a 5,79	0 a 4,2	~0 a 29,0
$X_{\text{H}_2\text{O}}$	0,953 a 1,0	0,964 a 1,0	0,18 a 0,82	0 a 0,95
$X_{\text{CO}_2}$	0	0	0,17 a 0,81	0 a 1
$d_{total}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,71 a 1,04	0,81 a 0,97	0,13 a 0,75	0,2 a 1,0
$d_{\text{CO}_2}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	-	-	0,11 a 0,62	0,13 a 1,0



**Figura 2.** Fotomicrografias de inclusões fluidas das amostras analisadas: **A.** Zonas de cisalhamento (inclusões primárias); **B.** Zonas de cisalhamento (inclusões secundárias); **C.** Metadolomito fraturado na periferia das zonas de cisalhamento; **D.** Auréola de contato com o Complexo Granítico Cunhaporanga.

dos em conjunto, pois, na maioria dos casos, as diferenças observadas entre os fragmentos de uma mesma amostra são pequenas. Os casos onde as diferenças são expressivas são comentados individualmente.

#### Inclusões em veios nas zonas de cisalhamento

Foram estudadas inclusões fluidas em quartzo e calcita de três amostras de veios provenientes de duas jazidas de talco xisto em zonas de cisalhamento transcorrente (*Mina Grande*, afloramento PTI22 e *Mina Paranaense*, afloramento PTI02 - Figura 1).

Os cristais de quartzo e calcita desses veios englobam inclusões primárias e secundárias, com morfologias variáveis, desde irregulares até de cristais negativos, e dimensões situadas normalmente entre 4 e 80 µm, sendo essencialmente aquosas com pequenas variações em  $V_{vapor}/V_{tot}$  (Figuras 2a e 2b). Não foram encontrados indícios de  $CO_2$  nas inclusões dessas amostras. Os histogramas de  $T_e$ ,  $T_{fg}$  e  $T_{tot}$  dessas inclusões encontram-se na Figura 3.

Os valores de  $T_e$ , tanto nas inclusões primárias como nas secundárias, variaram, de modo geral, entre -50 e

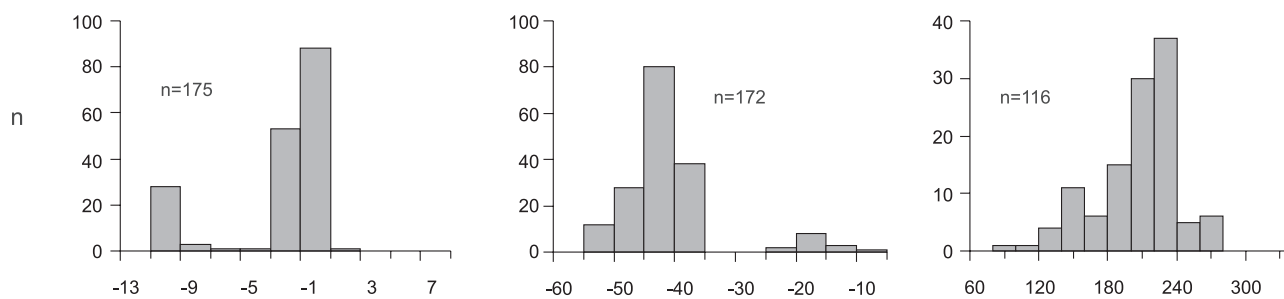
-39°C, indicando similaridade em relação aos íons presentes nas soluções. Possivelmente trata-se de um sistema composto por  $H_2O-NaCl$  ( $T_e = -21,2^\circ C$ ; Davis, Lownestein, Spencer, 1990) com presença de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , pois nos sistemas  $H_2O+NaCl+CaCl_2$  e  $H_2O+NaCl+MgCl_2$ , as  $T_e$  são de  $-52^\circ C$  e  $-35^\circ C$ , respectivamente (Davis, Lownestein, Spencer, 1990). Localmente, os valores de  $T_e$  são mais elevados, geralmente acima de  $-21^\circ C$  (sistema  $H_2O+NaCl$ ), sugerindo variações composicionais. Em alguns casos houve o desaparecimento das bolhas de vapor durante o congelamento, o que é sugestivo de fenômenos de metaestabilidade (Roedder, 1984; Goldstein e Reynolds, 1994) e, portanto, as  $T_e$  registradas podem ser distintas das reais. As  $T_{fg}$  foram apenas registradas nos casos em que essa mudança de fase ocorreu após a nucleação da bolha, fornecendo, desse modo, valores que refletem condições de equilíbrio de fases. Nas inclusões primárias,  $T_{fg}$  variou de  $-11$  a  $0^\circ C$  indicando salinidade baixa a moderada (0 a 14,6% em peso de NaCl equivalente). Nas inclusões secundárias, as  $T_{fg}$  situam-se principalmente entre  $-3$  e  $0^\circ C$ , com maior quantidade de medidas ao redor de  $-1,5^\circ C$ , embora haja casos de valores de  $T_{fg} > 0^\circ C$ , indicativos de metaestabilidade. A salinidade das inclusões secundárias varia principalmente de 0 a 3% em peso de NaCl equivalente, com predominância dos valores ao redor de 2,5% em peso de NaCl equivalente, sendo ligeiramente inferior em relação às primárias. Nas inclusões primárias, as  $T_{tot}$  situam-se principalmente entre 105 e  $230^\circ C$ , com maior quantidade de medidas entre 190 e  $220^\circ C$ , embora existam valores ao redor de  $130^\circ C$ , que coincide com o pico referente às secundárias.

#### Inclusões em veios no metadolomito fraturado

No metadolomito fraturado e incipientemente talcificado foram estudadas inclusões em um núcleo de quartzo (*Afloramento PTI55* - Figura 1) associado ao talco.

As inclusões possuem formas desde irregulares até de cristais negativos, com dimensões entre 20 e 50 µm. São aquocarbônicas, geralmente trifásicas ( $H_2O_{(liq.)} + CO_{2(liq.)} + CO_{2(vapor)}$ ) à temperatura ambiente e apresentam proporções variáveis de  $CO_2$  ( $V_{CO_2}/V_{tot}$  entre 0,6 e 0,95 - Figura 2c). Os histogramas de  $T_{clat}$ ,  $T_{fCO_2}$ ,  $T_{hCO_2}$  e  $T_{tot}$  se encontram na Figura 4. A  $T_{clat}$  varia de 7,6 a  $10,0^\circ C$ , indicando salinidade entre 0 e 4,2% em peso de NaCl equivalente. Os valores de  $T_{fCO_2}$  variam de  $-58,2$  a  $-56,6^\circ C$ , o que indica fase volátil constituída predominantemente por  $CO_2$ , com pequena quantidade de outros componentes. Essas inclusões apresentam um intervalo restrito de variação em  $T_{hCO_2}$  ( $29,1$  a  $30,9^\circ C$ ) com homogeneização quase sempre para o estado líquido, à exceção de um grupo subordinado onde ocorreu para o estado gasoso num amplo

## Inclusões primárias



## Inclusões secundárias

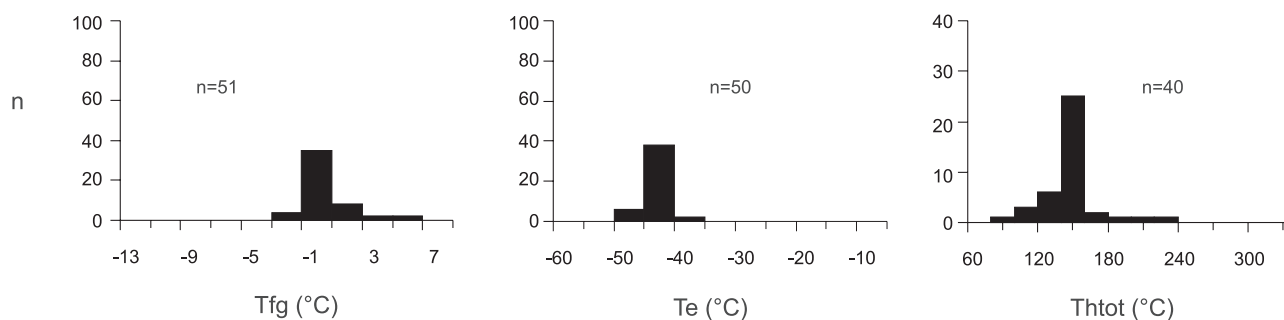


Figura 3. Histogramas de frequência de  $T_e$ ,  $T_{fg}$  e  $Th_{tot}$  de inclusões em veios nas zonas de cisalhamento ( $n$  = número de medidas).

intervalo de temperatura, entre  $-3,2$  e  $30,9^\circ\text{C}$ , implicando menor densidade desse componente. Os valores de  $Th_{tot}$  variam de  $198$  a  $425^\circ\text{C}$ , tendo a homogeneização ocorrido sempre pela expansão da fase carbônica.

#### Inclusões em veios em metadolomito no contato com granito

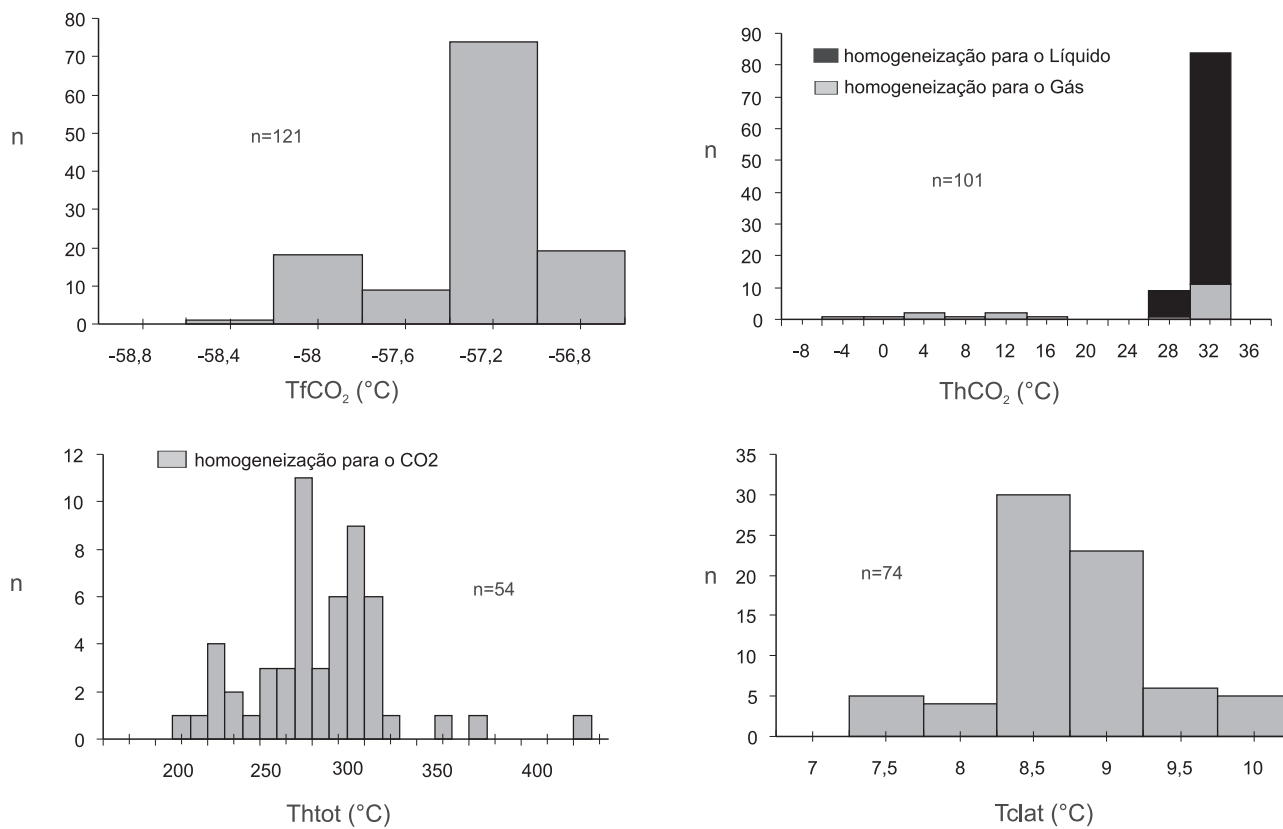
Foram analisadas duas amostras em veios de quartzo em metadolomito na auréola de contato com o Complexo Granítico Cunhaporanga (afloramentos *PTI05* e *PTI43*, Figura 1). As inclusões são na sua maioria carbônicas, ocorrendo subordinadamente inclusões aquosas e aquocarbônicas, com proporções variáveis entre as fases (Figura 2d). Os histogramas de  $T_e$ ,  $T_{fCO_2}$ ,  $Th_{CO_2}$  e  $Th_{tot}$  dessas inclusões encontram-se na Figura 5. O intervalo de variação dos dados de inclusões em minerais coexistentes é maior que no contexto das zonas de cisalhamento. Os valores de  $T_e$  da fase aquosa variam de  $-53,4$  a  $-40,6^\circ\text{C}$ , indicando um sistema composto por  $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$ , com  $\text{Ca}^{2+}$  e/ou  $\text{Mg}^{2+}$ . As  $T_{fCO_2}$  são algo inferiores às do ponto de fusão do  $\text{CO}_2$  puro, com valores situados entre  $-60,4$  e  $-57,1^\circ\text{C}$ , indicando variações locais na composição da fase volátil. Os valores de  $T_{clat}$  variam entre  $-12,1$  e  $9,9^\circ\text{C}$ , sem moda defi-

nida, refletindo grande variação na salinidade (Tabela 1). O intervalo de  $Th_{CO_2}$  situa-se entre  $-21,0$  e  $31,1^\circ\text{C}$ , tendo ocorrido os três tipos de homogeneização (gás, líquido e crítico), implicando em grande variação na densidade do  $\text{CO}_2$ . Os valores de  $Th_{tot}$  estão entre  $130$  e  $574^\circ\text{C}$ , com predominância em temperaturas ao redor de  $400^\circ\text{C}$ , referentes a inclusões aquocarbônicas que homogeneizam pela expansão da fase  $\text{CO}_2$ . Apesar da homogeneização total ter ocorrido ora pela contração da fase volátil, ora pela sua expansão, houve um grande espalhamento nas  $Th_{tot}$  independentemente de  $V_{CO_2}/V_{tot}$ , contrariando um dos critérios de Ramboz, Pichavant e Weisbrod (1982) para a caracterização de fluidos imiscíveis.

## DISCUSSÃO

### Fluidos em zonas de cisalhamento

As inclusões fluidas em quartzo e calcita nos talco xistos das zonas de cisalhamento do Grupo Itaiacoca são aquosas de baixa salinidade e praticamente desprovidas de  $\text{CO}_2$ . As inclusões primárias de amostras do afloramento *PTI02* apresentam  $Th_{tot}$  ( $80$  e  $270^\circ\text{C}$ , com maior frequência entre  $190$  e  $220^\circ\text{C}$ ) e salinidades ( $< 3,5\%$  peso de  $\text{NaCl}$



**Figura 4.** Histogramas de frequência de  $TfCO_2$ ,  $ThCO_2$ ,  $Tclat$  e  $Thtot$  de inclusões em veios no metadolomito fraturado ( $n$  = número de medidas).

equivalente) mais elevadas que inclusões secundárias co-existent ( $\sim 130^\circ\text{C}$ ;  $< 2,5\%$  peso de NaCl equivalente), indicando o arrefecimento do sistema e a progressiva diluição da concentração dos solutos. Dentro da faixa de variação de  $Thtot$  nas inclusões primárias, os valores mais altos representam as condições mais próximas daquelas da talcificação. No histograma de frequência de  $Thtot$ , a assimetria em direção a valores mais baixos ( $\sim 130^\circ\text{C}$  - Figura 3), que é a  $Thtot$  predominante das inclusões secundárias, sugere diluição por fluidos posteriores mais frios, de menor salinidade, semelhantes aos registrados nas inclusões secundárias. Essa diluição é reforçada pelo diagrama  $Thtot$  x salinidade (Figura 6).

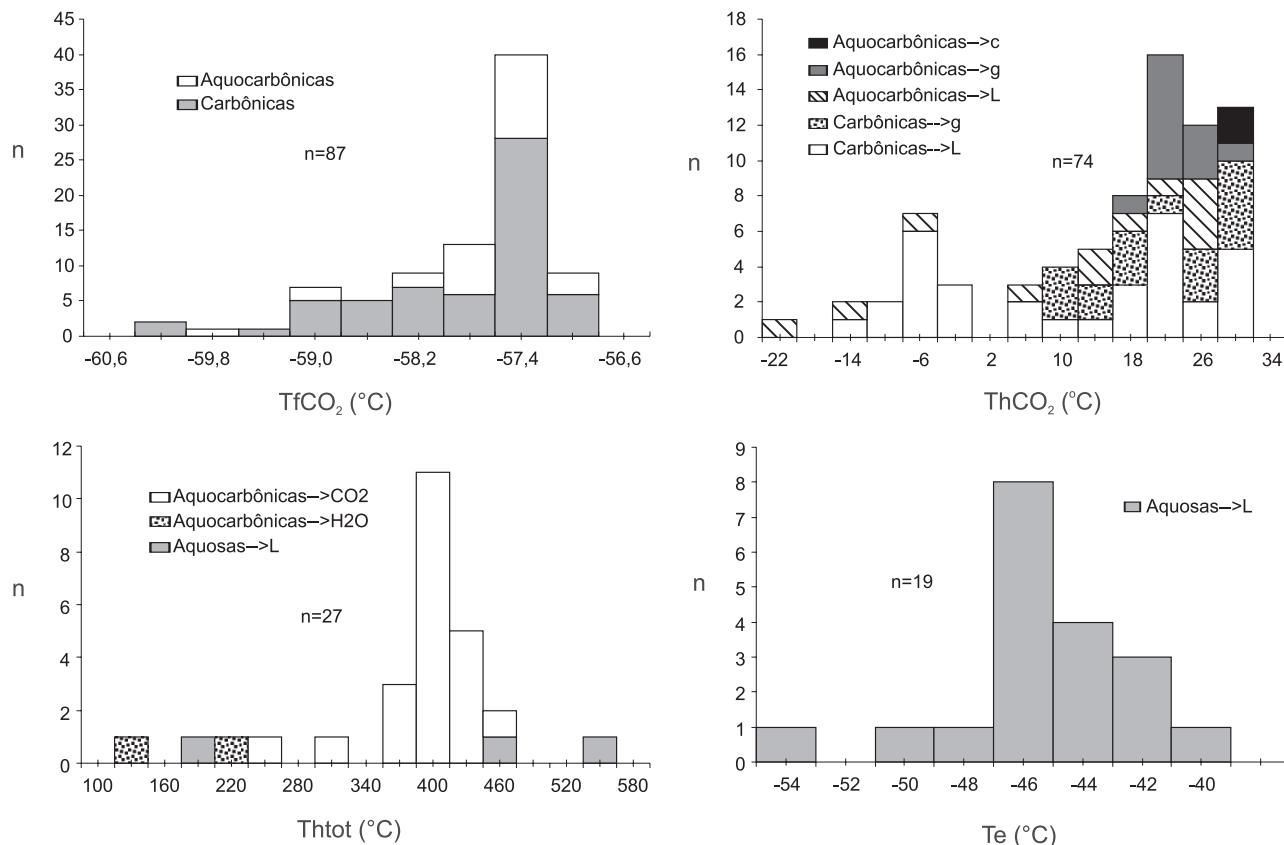
Apesar do possível efeito dos fluidos tardios sobre as inclusões primárias, estas não apresentam evidência de abertura e significativa perda de fluidos, conforme indica a ausência de correlação positiva entre salinidade e  $V_{vapor}/V_{tot}$  (Figura 7). Em caso de abertura de inclusões e escape de fluidos, ocorre a perda preferencial da fase aquosa líquida, acarretando uma expansão volumétrica

da fase vapor (Bakker e Jansen, 1990). Segundo Hollister (1990) a perda de água das inclusões devido a processos de deformação conduz ao enriquecimento em outros componentes, entre eles, o NaCl e o CaCl<sub>2</sub>, e, conseqüentemente, ao aumento de salinidade das soluções. Desse modo, um diagrama relacionando a salinidade e  $V_{vapor}/V_{tot}$  deveria mostrar uma correlação positiva, o que não ocorreu no caso estudado.

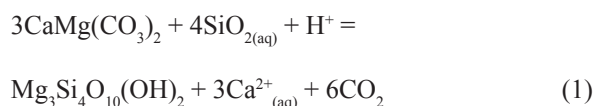
A  $Te$  das inclusões primárias abaixo de  $-40^\circ\text{C}$  indica a presença de cátions bivalentes no fluido (Roedder, 1984; Goldstein e Reynolds, 1994), como reflexo da mobilidade de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  durante a talcificação do metadolomito.

A ausência de CO<sub>2</sub> nas inclusões primárias sugere que o CO<sub>2</sub> liberado pela descarbonatação da dolomita para a formação de talco foi totalmente diluído no enorme volume de água que percolou as zonas de cisalhamento durante e após o pico da talcificação. Estimativas da razão água:rocha podem ser feitas com base na solubilidade da sílica em água e na proporção estequiométrica de sílica necessária para a formação do talco segundo a reação:





**Figura 5.** Histogramas de frequência de  $TfCO_2$ ,  $ThCO_2$ ,  $Te$  e  $Thtot$  de inclusões em veios no contato entre granito e metadolomito ( $n$  = número de medidas). *Legenda:* **c** = homogeneização para o estado crítico; **g** = homogeneização para o estado gasoso; **L** = homogeneização para o estado líquido; **CO<sub>2</sub>** = homogeneização pela expansão da fase carbônica; **H<sub>2</sub>O** = homogeneização pela contração da fase carbônica.



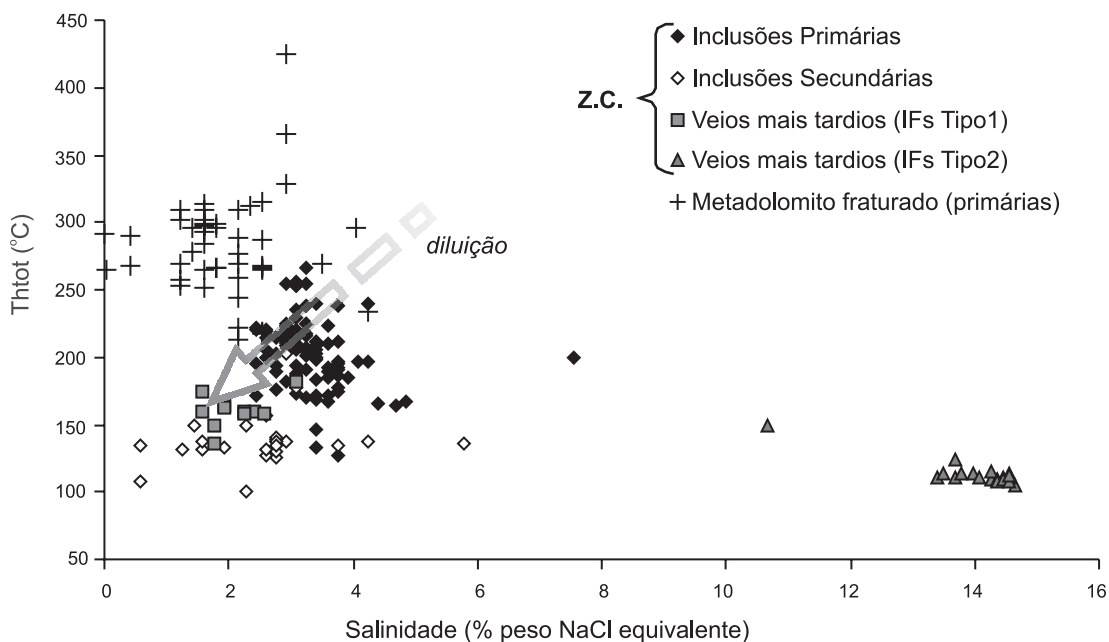
Dois cenários foram considerados nessas estimativas: **a.** condição de pressão relativamente alta, estimada para colocação do Complexo Granítico Cunhaporanga (entre 2 e 4 kbars, Guimarães, Ulbrich, Janasi, 2000); e **b.** baixa pressão, ao longo da curva de saturação água-vapor, simulando uma talcificação a baixa profundidade. Em ambos os casos, foi considerada uma temperatura de talcificação de 400°C baseada em geotermometria de carbonatos ( $X_{Mg}$  em calcita, Andrade, Szabó, Guimarães, 2005). Sob pressão de 2 kbars e com a concentração máxima de  $SiO_2$  em água pura (0,040551 moles/kg; Walther e Orville, 1983), seriam necessários 178.317 kg de água para converter 1.000 kg de dolomita em talco, ou seja, uma razão fluido:rocha em massa igual a 178:1, correspondendo em volume a uma relação de 508:1. Sob baixa pressão, a solubilidade de

quartzo em água é de 1.380 ppm (Verma, 2000) e a razão fluido:rocha seria 315:1 em massa ou 897:1 em volume. Esses valores são compatíveis com estimativas da razão fluido:rocha apresentadas por Anderson, Mock e Childs (1990) em relação a um mármore calcítico dolomitizado e posteriormente talcificado. Esses autores estimaram em > 600:1 a razão em volume fluido:rocha com base na solubilidade da calcita a 400°C e 2 kbars.

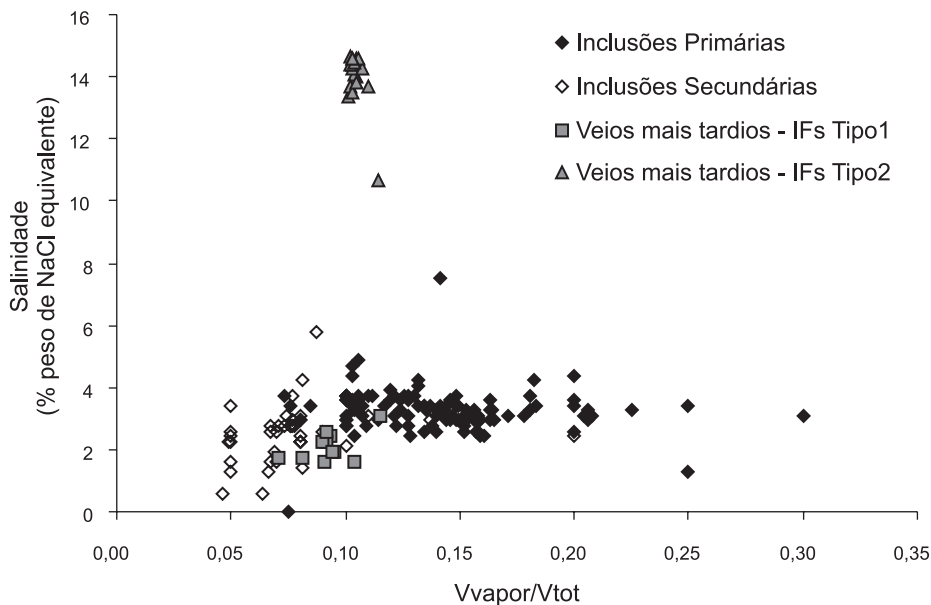
A elevada proporção água:rocha faz com que a presença de  $CO_2$  nas inclusões fluidas seja ausente ou imperceptível, mesmo em se tratando de um ambiente de descarbonatação.

Em diferentes amostras do afloramento PTI22 foram observados dois tipos de inclusões fluidas de composição e salinidade distintas (Figuras 6 e 7). Em algumas partes dessas amostras ocorrem placas de talco inclusas no quartzo, mostrando sua formação posterior à mineralização, o que também é comprovado pelas  $Thtot$  mais baixas (Figura 6).

O primeiro tipo (Tipo 1) é constituído por inclusões compostas por  $H_2O + NaCl$ , pouco salinas (1,5 a 3,0% peso



**Figura 6.** Diagrama de correlação entre  $T_{htot}$  e salinidade em inclusões fluidas de veios em zonas de cisalhamento e no metadolomito fraturado. Para a zona de cisalhamento, a seta representa uma tendência de diluição por fluidos posteriores mais frios e de menor salinidade. Observa-se ainda dois tipos de inclusões fluidas nos veios mais tardios nas zonas de cisalhamento. As  $T_{htot}$  ao redor de 250 a 300°C nas inclusões em veios no metadolomito fraturado representam as condições mais próximas às de talcificação.



**Figura 7.** Diagrama de correlação entre salinidade e  $V_{vapor}/V_{tot}$  em inclusões fluidas de veios em zonas de cisalhamento. Destaca-se a presença de dois tipos de inclusões de salinidades distintas em cristais de quartzo dos veios mais tardios.

de NaCl equivalente), com  $Th_{tot}$  situadas entre 120 e 180°C, com moda ao redor de 160°C. Os cristais de quartzo hospedeiros dessas inclusões possuem tamanho muito reduzido, sendo cortados por várias trilhas de inclusões secundárias, sugerindo diversas gerações de cicatrização de fraturas, as quais não ocorrem uniformemente nos veios do afloramento. Esses fluidos posteriores podem ter causado a modificação e diluição das soluções originais, levando a um sistema aquoso contendo essencialmente NaCl, de baixa salinidade.

O segundo tipo (Tipo 2) compreende inclusões compostas essencialmente por soluções aquosas com NaCl e  $CaCl_2$ , bem mais salinas (10,6 a 14,6% em peso de NaCl equivalente). Encontram-se englobadas em cristais de quartzo maiores, sendo menos frequentes as trilhas de inclusões secundárias, sugerindo tratar-se de veios mais tardios, submetidos a uma menor circulação de fluidos, o que, associado à maior solubilidade de carbonatos a baixas temperaturas ( $Th_{tot} \sim 110^\circ\text{C}$ ), facilitou a permanência do  $Ca^{2+}$ , tornando as soluções mais salinas.

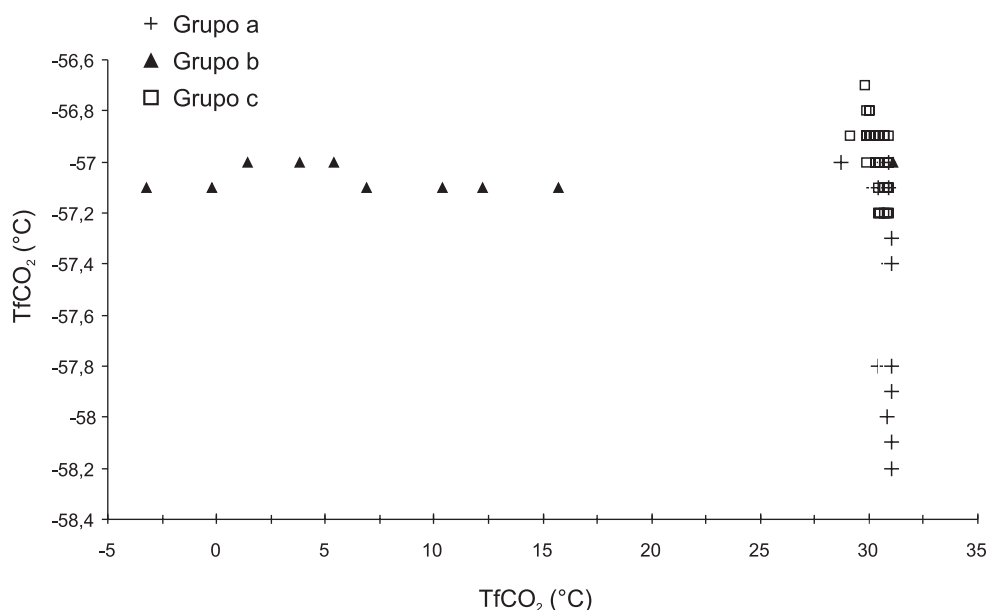
Adicionalmente, a presença de talco nas zonas de cisalhamento facilita os movimentos tectônicos (Moore e Lockner, 2008; Colletini et al., 2009), que por sua vez permitem uma percolação prolongada de fluidos e sob diversas condições de temperatura e pressão. A entrada de vários pulsos de fluidos de características distintas explicaria de modo satisfatório os tipos de inclusões fluidas observadas e episódios de reequilíbrio.

## Fluidos em veios no metadolomito fraturado

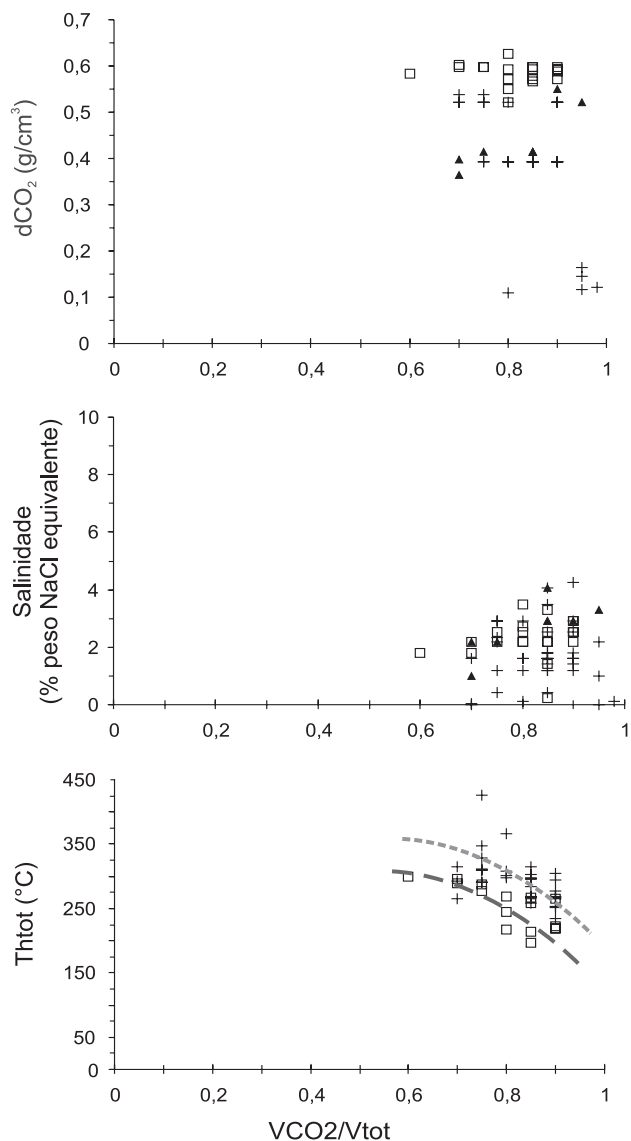
O metadolomito fraturado e incipientemente talcificado, observado na periferia das zonas de cisalhamento, apresenta inclusões fluidas aquocarbônicas e essencialmente carbônicas, com valores de  $X_{CO_2}$  elevados que sugerem uma percolação mais restrita de fluidos aquosos durante a descarbonatação e a talcificação do sistema em comparação com o caso das zonas de cisalhamento discutido anteriormente. Essas inclusões podem ser divididas em três grupos (a, b, c) de acordo com as características distintas de vários parâmetros, tais como  $TfCO_2$ ,  $ThCO_2$ ,  $dCO_2$  e salinidade. Desse modo, nos diagramas referentes a essas inclusões (Figuras 8 e 9) os três grupos são apresentados separadamente, pois essas diferenças internas podem ser correlacionadas a processos geológicos.

As variações de  $ThCO_2$  com valores de  $TfCO_2$  praticamente constantes (Figura 8) sugerem flutuações na pressão de fluidos (Dugdale e Hagemann, 2001). Essas relações, em conjunto com as variações em  $VCO_2/V_{tot}$  e em  $ThCO_2$ , podem ser explicadas *a priori* pelos seguintes processos:

1. modificação das inclusões fluidas após seu aprisionamento, por escape de fluidos e reequilíbrio em condições distintas de pressão e temperatura (Crawford e Hollister, 1986; Hollister, 1990);



**Figura 8.** Relação entre  $TfCO_2$  e  $ThCO_2$  em inclusões fluidas em veios de quartzo no metadolomito fraturado.



**Figura 9.** Relação entre parâmetros medidos e calculados para inclusões fluidas em veios de quartzo no metadolomito fraturado: **a.** relação entre a  $dCO_2$  e  $VCO_2/V_{tot}$ ; **b.** relação entre a salinidade e  $VCO_2/V_{tot}$ ; **c.** relação entre  $T_{htot}$  e  $VCO_2/V_{tot}$ .

2. aprisionamento de fluidos imiscíveis abaixo do *solvus* do sistema  $H_2O + CO_2 +$  sais. Esse processo pode ser causado por flutuações de pressão (Ramboz, Pichavant, Weisbrod, 1982; Bowers e Helgeson, 1983; Roedder, 1984);

3. mistura de fluidos de origens distintas em proporções diversas (Ramboz, Pichavant, Weisbrod, 1982; Roedder, 1984; Anderson, Rankin, Spiro, 1992; Wilkinson, 2001).

O escape seletivo da fase aquosa de inclusões aquocarbônicas originalmente homogêneas provoca o aumento do volume do  $CO_2$ , com correspondente decréscimo de sua densidade (Crawford e Hollister, 1986) e causa aumento da salinidade das soluções aquosas residuais (Hollister, 1990). Os dados obtidos não favorecem o modelo de escape de água, pois não foi observada a correlação negativa entre  $dCO_2$  e  $VCO_2/V_{tot}$  para esta situação (Figura 9a), nem correlação positiva significativa entre salinidade e  $VCO_2/V_{tot}$  (Figura 9b).

O aprisionamento de fluidos originalmente imiscíveis compostos por  $H_2O$  e  $CO_2$  acarreta a formação de dois tipos de inclusões correspondentes às duas fases imiscíveis, ou seja: umas ricas em  $H_2O$  e outras ricas em  $CO_2$ . Esse processo pode ser testado por critérios fornecidos por Ramboz, Pichavant e Weisbrod (1982), que são: **1.** as inclusões ricas em  $CO_2$  e as ricas em  $H_2O$  devem ocorrer na mesma região de uma amostra, com evidência de aprisionamento contemporâneo; **2.** a homogeneização dos dois tipos de inclusões deve ocorrer dentro de um intervalo restrito de temperatura e o modo de homogeneização dependerá das razões volumétricas - nas inclusões ricas em água a homogeneização ocorre pela contração da fase  $CO_2$ , enquanto que nas ricas em  $CO_2$ , pela expansão desta fase; **3.** em inclusões de forma e tamanhos similares, se um dos tipos crepitar antes da homogeneização, o outro tipo terá comportamento semelhante.

Embora  $VCO_2/V_{tot}$  sejam variáveis (0,6 a 0,95) de uma forma geral, populações individuais de inclusões aquocarbônicas não revelam a coexistência daquelas ricas em  $CO_2$  (alta razão  $VCO_2/V_{tot}$ ) com outras ricas em  $H_2O$  (baixa razão  $VCO_2/V_{tot}$ ), não satisfazendo, portanto, o critério (1). Também não foi possível verificar o critério (2), pois a homogeneização dessas inclusões ocorreu apenas pela expansão da fase carbônica. Finalmente, o critério (3) não pôde ser verificado, pois não ocorreu crepitação durante o aquecimento. A ausência de correlação negativa entre a salinidade e  $VCO_2/V_{tot}$  (Figura 9b) confirma a hipótese de que não houve aprisionamento de fluidos compostos por  $H_2O$  e  $CO_2$  originalmente imiscíveis (Bowers e Helgeson, 1983).

Após a eliminação destes modelos, a hipótese melhor sustentada pelos dados obtidos e com o contexto geológico é a de mistura entre soluções aquosas e o  $CO_2$  gerado pela quebra da dolomita. A água teria percolado em volume mais restrito na rede de fraturas do metadolomito em comparação com as zonas de cisalhamento, conforme indica a presença de  $CO_2$  nas inclusões e a incipiente formação de talco. A mistura de fluidos explicaria de modo satisfatório as variações de salinidade, densidade total do fluido (0,13 a 0,75g/cm<sup>3</sup>),  $XCO_2$  (0,17 a 0,81),  $VCO_2/V_{tot}$  (0,6 a 0,95) e também de  $dCO_2$  (0,11 a 0,62g/cm<sup>3</sup>) e, consequen-

temente, de  $ThCO_2$ . Também justificaria a ausência de correlação positiva na Figura 8, o que seria esperado pelo fato de haver variações composicionais dadas pelas  $TfCO_2$  variáveis em dois grupos distintos de inclusões (Grupos *a* e *c*). Nesses casos, as  $ThCO_2$  deveriam ser inferiores aos valores encontrados, para que fosse estabelecida a correlação positiva esperada. As modificações em  $ThCO_2$  e, conseqüentemente, em  $dCO_2$ , podem ser, portanto, decorrentes do aprisionamento de misturas de soluções aquosas com fluidos contendo diferentes quantidades desse componente, devido à heterogeneidade do processo de talcificação e liberação do  $CO_2$ . Desse modo, o aprisionamento de proporções distintas de  $CO_2$  teria mascarado a correlação positiva que deveria ocorrer na Figura 8, devido à presença de outros componentes associados ao  $CO_2$ .

Concomitante à mistura de fluidos, pode ter havido processos de flutuações de pressão durante a cristalização do quartzo hospedeiro, o que já se encontra indicado na Figura 8, pois os pontos relativos às inclusões de cada grupo sugerem o traçado de diferentes curvas *solvus* no diagrama  $Th_{tot} \times VCO_2/V_{tot}$  (Figura 9c). O aprisionamento ocorreu possivelmente acima da curva *solvus*, já que, como discutido anteriormente, não há indicativos de imiscibilidade de fluidos. A temperatura mínima de aprisionamento das inclusões, ou seja, da cristalização do quartzo hospedeiro, é da ordem de 250 a 300°C, como pode ser observado pela maior concentração de medidas de  $Th_{tot}$  na Figura 6, representando as condições mais próximas às da formação do talco. Esses processos são ainda reforçados pelas tendências das densidades do  $CO_2$  que delimitam três campos na Figura 9a. Fluidos aprisionados em diferentes condições de pressão possuem densidades distintas, as quais estão condicionadas às  $dCO_2$  variáveis. Além disso, as diferenças em  $dCO_2$  também podem refletir o aprisionamento de proporções distintas de  $CO_2$  junto às soluções aquosas. Assim, as três tendências apresentadas pelas  $dCO_2$  na Figura 9a, para os diferentes grupos de inclusões, seriam consequência de processos de flutuações de pressão, enquanto que as variações de densidade em cada grupo refletiriam a mistura de fluidos aquosos com proporções variáveis de  $CO_2$ .

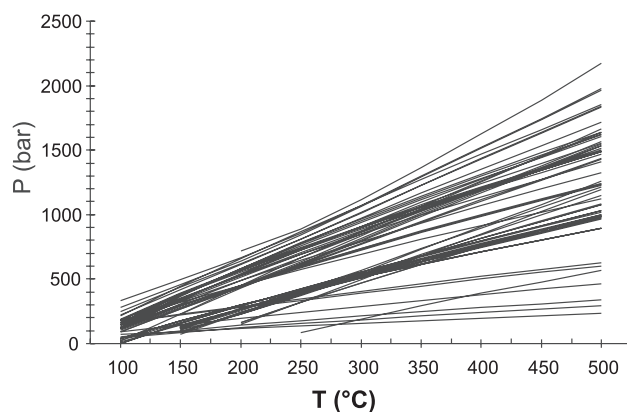
O espalhamento das isócoras (Figura 10) reforça os dois processos, uma vez que a densidade total está relacionada tanto com a pressão como com a densidade do  $CO_2$ . Esta última é variável devido às diferentes condições de pressão e do aprisionamento do  $CO_2$  em proporções distintas, o que faz com que  $X_{CO_2}$  seja diferente em cada inclusão, e quanto maior a  $X_{CO_2}$ , menor a densidade total da inclusão. Desse modo, esse diagrama ilustra as extremas variações nas densidades dos fluidos causadas pelas diferentes quantidades de  $CO_2$  aprisionado junto às soluções aquosas e também pelos processos de flutuação de pressão.

Oscilações de pressão similares foram inferidas por Faleiros et al. (2007) em inclusões fluidas de veios hidrotermais na zona de cisalhamento Ribeira, nas proximidades da área deste estudo no cinturão de dobramentos homônimo. Essas oscilações refletem o papel da pressão de fluidos sobre o comportamento sísmico das rochas, tendo sido originalmente descritas como bombeamento sísmico ou sistema falha-válvula (Sibson et al., 1975, 1988; *apud* Faleiros et al., 2007).

Processos de reequilíbrio decorrentes de flutuação de pressão podem causar o espalhamento das isócoras. Segundo Vityk e Bodnar (1995), as variações de pressão podem provocar fraturamentos, estiramentos, contração ou dissolução das paredes das inclusões, ou ainda a remoção de fluidos. O espalhamento das isócoras poderia, portanto, também indicar reequilíbrios posteriores ao pico térmico do sistema.

### Fluidos na auréola de contato metadolomito-granito

As inclusões fluidas em veios de quartzo na auréola de contato do metadolomito com o Complexo Granítico Cunhaporanga são predominantemente carbônicas e aquo-carbônicas, com raras inclusões aquosas. Neste contexto, os valores de  $Th_{tot}$  (370 a 570°C) são mais elevados que nas zonas de cisalhamento, mas com amplo espalhamento e praticamente sem a definição de uma moda. Esse espalhamento é observado também em  $T_{clat}$  e  $ThCO_2$ , implicando grandes variações na salinidade (0 a 29% em peso de NaCl equivalente) e densidade do  $CO_2$  (0,13 a 1,0 g/cm<sup>3</sup>). Os valores de  $TfCO_2$  situam-se em um intervalo estreito, entre -60,4 e -57°C, e sugerem a possível exis-



**Figura 10.** Diagrama P x T com as isócoras calculadas para as inclusões fluidas em veios no metadolomito fraturado (Isócoras: curvas de igual densidade).

tência de outra fase volátil nessas inclusões, como  $\text{CH}_4$ . Em muitos casos, os valores de  $Tf\text{CO}_2$  apresentam relação direta com  $Th\text{CO}_2$ , mostrando que as variações neste parâmetro estão condicionadas às diferentes composições da fase volátil (Figura 11).

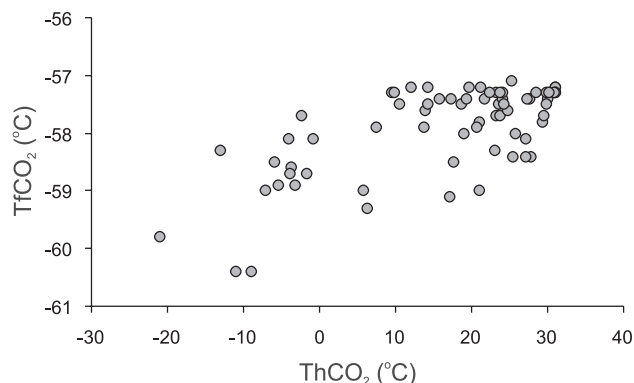
A composição essencialmente carbônica destas inclusões contrasta com as inclusões aquosas em veios de quartzo e calcita em talco xistos das zonas de cisalhamento. Isto indica que a circulação de soluções foi mais restrita, consequentemente com menor diluição do  $\text{CO}_2$  gerado na descarbonatação durante a formação dos silicatos magnesianos.

### Evolução dos fluidos hidrotermais e talcificação

Jazidas de talco formadas a partir de metassomatismo em rochas carbonáticas afetadas por zonas de cisalhamento regionais são comuns tanto em rochas dolomíticas, como em rochas originalmente calcíticas que foram dolomitizadas antes da talcificação (e.g., Moine et al., 1989; Prochaska, 1989; Anderson, Mock, Childs, 1990; Prochaska, Mogessie, Raith, 1992; Schärer et al., 1999; Tornos e Spiro, 2000). Estudos de inclusões fluidas em depósito deste tipo são raros na literatura e, em geral, se baseiam em pequeno número de dados, que levam a interpretações inconclusivas. Como tendência geral, as inclusões fluidas ligadas à talcificação apresentam  $Th_{tot} < 500^\circ\text{C}$ ,  $X_{\text{CO}_2}$  baixa e grande variação de salinidade.

Moine et al. (1989) apresentam dados de  $Th_{tot}$  entre 110 e  $305^\circ\text{C}$ ,  $Te$  entre  $-57$  e  $-52^\circ\text{C}$ , salinidade com ampla faixa de variação (25 a 42% peso de NaCl equivalente) em depósitos dos Alpes. Tornos e Spiro (2000) analisaram inclusões primárias em dolomita em jazida de talco na Espanha, obtendo  $Th_{tot}$  entre 282 e  $314^\circ\text{C}$  e salinidade entre 9,5 e 10,3% peso de NaCl equivalente; entretanto sua base de dados abrange apenas nove inclusões fluidas analisadas. Prochaska, Mogessie e Raith (1992) obtiveram  $Th_{tot}$  entre 170 e  $310^\circ\text{C}$  e valores de salinidade relativamente elevados (30 a 38% peso de NaCl equivalente) em inclusões em depósito de talco em Ruanda e consideram que o fluido mineralizante foi proveniente de intrusões graníticas adjacentes. Shin e Lee (2002, 2006) descrevem a formação de talco por retrometamorfismo a partir de tremolita, num contexto de metamorfismo de contato de granitos sobre rochas carbonáticas na Coreia do Sul. Os valores de  $Th_{tot}$  situam-se entre 260 e  $390^\circ\text{C}$  e os valores de salinidade e fração molar de  $\text{CO}_2$  são muito variados.

A interpretação de dados de inclusões fluidas deve levar em consideração o fato de que nem sempre o fluido aprisionado é uma amostra direta daquele responsável pelas mineralizações ou alterações hidrotermais, mas sim um indicador das condições mínimas do processo. Neste es-



**Figura 11.** Relação entre  $Tf\text{CO}_2$  e  $Th\text{CO}_2$  para inclusões fluidas no contato do metadolomito com o Complexo Granítico Cunhaporanga.

tudo, os dados microtermométricos e parâmetros calculados das inclusões fluidas não representam as condições de formação do talco, pois contêm fluidos posteriores ao pico térmico dos sistemas de mineralização. O quartzo, um dos minerais hospedeiros das inclusões analisadas, foi cristalizado após o talco, como indicam as relações petrográficas. Neste caso, o quartzo representa o excesso de sílica após o consumo de dolomita para formação do talco (reação 1) ou a impossibilidade de reação entre sílica e dolomita devido ao arrefecimento do sistema.

Outro mineral hospedeiro das inclusões fluidas analisadas é a calcita, formada pelo cálcio liberado na decomposição da dolomita (reação 1). Sua alta mobilidade química em sistemas hidrotermais, dada pela facilidade com que é solubilizada e reprecipitada, faz com que a calcita liberada em uma dada porção do sistema não seja depositada *in situ*, mas sim em local a jusante do fluxo hidrotermal. Considerando que esse fluxo envolveu grande volume de soluções hidrotermais, como indicam as estimativas de razão água:rocha comentadas anteriormente, é de se esperar que a calcita não tenha se depositado simultaneamente com o talco. Nos talco xistos é rara a ocorrência de calcita, indicando que a lixiviação do cálcio foi total.

Nas regiões do sistema onde houve formação de talco em larga escala, formou-se um corpo de minério de talco praticamente inerte em relação às soluções hidrotermais percolantes, que removeram todos os componentes voláteis e solúveis. Isso se reflete na ausência de  $\text{CO}_2$  nas inclusões fluidas, apesar da talcificação ser uma reação de descarbonatação. Os sistemas hidrotermais de talcificação podem se manter ativos por longos períodos. Datações de xenotima apresentadas por Schärer et al. (1999), indicam que um sistema similar se manteve ativo por 15 Ma. Supondo que os batólitos graníticos vizinhos ao Grupo Itaiacoca foram as

possíveis fontes de calor que mantiveram as células de convecção de fluidos hidrotermais em funcionamento durante e após a talcificação, este processo poderia ter se estendido por dezenas de milhões de anos, o que permitiria a mencionada perda do CO<sub>2</sub> liberado na descarbonatação.

Nas zonas de cisalhamento não restou CO<sub>2</sub> remanescente da talcificação, mas sim nas fraturas periféricas ao sistema, pois a percolação de soluções aquosas foi restrita. Dessa forma, as porções incipientemente talcificadas (metadolomito fraturado) são mais representativas dos fluidos originais do processo de talcificação, com presença do CO<sub>2</sub> da descarbonatação da dolomita e com *Thot* mais elevada, entre 250 e 300°C, como mostra a relação salinidade x *Thot* (Figura 6), para os dois casos acima.

Na auréola de metamorfismo de contato do metadolomito com o granito houve formação restrita de talco como mineral retrometamórfico em canais de percolação de fluidos. Também nestes, o ambiente confinado permitiu a preservação do CO<sub>2</sub> liberado na quebra da dolomita. Sob um fluxo restrito de soluções hidrotermais, o sistema de metamorfismo de contato não evoluiu longamente na direção do equilíbrio da paragênese, tendo preservado situações de desequilíbrio, com reações minerais retrometamórficas incompletas.

## CONCLUSÕES

As ramificações da zona de cisalhamento transcorrente de Itaipapuã foram canais eficientes de percolação de fluidos aquosos com sílica em solução que promoveram a talcificação dos metadolomitos do Grupo Itaiacoca. Os veios de quartzo e de calcita que cortam esses metadolomitos e talco xistos contêm inclusões fluidas primárias que representam as condições mínimas de talcificação. As inclusões de mais alta temperatura contêm fluidos capturados em condições mais próximas às do pico da talcificação; outras inclusões registram episódios de diluição por mistura dos fluidos anteriores com outros menos salinos e mais frios, semelhantes aos observados em trilhas de inclusões secundárias. A presença do talco nos planos de cisalhamento facilita as movimentações tectônicas e favorece a circulação de fluidos. A ausência de CO<sub>2</sub> nas inclusões em zonas de cisalhamento se deve à alta razão água:rocha necessária para a geração de talco em larga escala.

Na periferia dessas zonas de cisalhamento, houve percolação de fluidos em fraturas e descontinuidades estruturais no metadolomito, onde o talco se formou em pequenas quantidades. As inclusões primárias nos veios em metadolomitos fraturados apresentam *Thot* mais elevada e maior fração molar de CO<sub>2</sub>, em comparação com as inclusões em veios nas zonas de cisalhamento, indicando que não houve uma prolongada circulação de água após o arrefecimento

do sistema. A circulação mais restrita dos fluidos hidrotermais permitiu a identificação de misturas *supersolvus* do fluido hidrotermal com o CO<sub>2</sub> gerado na quebra da dolomita e formação do talco. Dessa forma, as inclusões em veios no metadolomito fraturado preservam fluidos mais próximos àqueles responsáveis pela talcificação. As inclusões em veios no metadolomito fraturado apresentam evidências de flutuações de pressão durante seu aprisionamento, fenômeno possivelmente relacionado ao acúmulo e alívio de pressão em sistemas de cisalhamento em que a pressão de fluidos exerce controle sobre a atividade sísmica.

Na auréola de contato dos metadolomitos com o Complexo Granítico Cunhaporanga o talco se formou em pequena quantidade, como produto do retrometamorfismo de silicatos magnesianos de alta temperatura. Nesse contexto, a percolação de fluidos foi restrita a canais instalados na interseção de fraturas e em outras descontinuidades estruturais. As inclusões na auréola de contato são majoritariamente carbônicas e aquocarbônicas e apresentam ampla variação de parâmetros medidos e calculados. A temperatura de homogeneização total das inclusões atinge os 574°C, que são os valores mais elevados dentre as inclusões analisadas e que estão de acordo com o contexto metamórfico anteriormente descrito.

## AGRADECIMENTOS

O autor D. M. Saunite agradece à FAPESP (bolsa IC 2007/50531-1) e à Vale S.A. (bolsa de trabalho de graduação, 2009). Os pesquisadores Dr. B. Buehn (UnB) e D. Silva (Unicamp) prestaram valioso auxílio na instalação e calibração do equipamento de análises microtermométrica. Os autores agradecem ao Dr. F. M. Faleiros (CPRM) pelos comentários e a F. C. de Oliveira pela obtenção de parte dos dados microtermométricos. A pesquisa foi feita com apoio da FAPESP (processos nº 2000/03115-3 e 2005/55551-5).

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. L.; MOCK, D. W.; CHILDS, J. F. Petrogenesis and timing of talc formation in the Ruby Range, Southwest Montana. *Econ Geol* v. 85, n. 3, p. 585-600, 1990.
- ANDERSON, M. R.; RANKIN, A. H.; SPIRO, B. Fluid mixing in the generation of mesothermal gold mineralization in the Transvaal Sequence, Transvaal, South Africa. *European Journal Mineralogy*, v. 4, p. 933-948, 1992.
- ANDRADE, F. R. D.; SZABÓ, G. A. J.; GUIMARÃES, G. B. A talcificação de metadolomitos do Grupo Itaiacoca: dados

- preliminares de isótopos estáveis (C,O) e geotermometria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1., 2005, Gramado. *Anais...* Gramado: SBG, 2005. 1 CD-ROM.
- BAKKER, R. J. Clathrates: computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. *Computers and Geosciences*, v. 23, p. 1-18, 1997.
- BAKKER, R. J. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, v. 194, 3-23, 2003.
- BAKKER, R. J.; JANSEN, B. H. Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, v. 345, p. 58-60, 1990.
- BOWERS, T. J.; HELGESON, H. C. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl on phase relations in geologic systems: equation of state H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 47, p. 1247-1275, 1983.
- COLLETTINI, C.; VITI, C.; SMITH, S. A. F.; HOLDSWORTH, R. E. Development of interconnected talc networks and weakening of continental low-angle normal faults. *Geology*, v. 37, n. 6, p. 567-570, 2009.
- CRAWFORD, M. L.; HOLLISTER, L. S. Metamorphic fluids: the evidence from fluid inclusions. In: WALTHER, J. V. ; WOOD, B. J. (Ed.). *Fluid rock interaction during metamorphism*. New York : Springer, 1986. v. 5, p. 1-35. (Advances in Physical Geochemistry).
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). *Projeto Leste do Paraná*. Folha Pirai do Sul, 1:100.000. São Paulo: DNPM-CPRM-BADEP, 1977. v. 1, 119 p. Relatório Final.
- DAVIS, D. W.; LOWNESTEIN, T. K.; SPENCER, R. J. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, and NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, p. 591-601, 1990.
- DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral). Sumário Mineral Brasileiro. Disponível em: <[www.dnpm.gov.br](http://www.dnpm.gov.br)>. Acesso em: 08 jul. 2009.
- DUGDALE, A. L.; HAGEMANN, S. G. The Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia: *P-T-X* evidence for fluid immiscibility caused by cyclic decompression in gold-bearing quartz-veins. *Chemical Geology*, v. 173, n. 1, p. 59-90, 2001.
- FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; BELLO, R. M. S.; FUZIKAWA, K. Fault-valve action and vein development during strike-slip faulting: An example from the Ribeira Shear Zone, Southeastern Brazil. *Tectonophysics*, v. 438, p. 1-32, 2007.
- GUIMARÃES, G. B.; ULBRICH, H. H. G. J.; JANASI, V. A. Geothermobarometry of granitoid rocks: a case study from the Neoproterozoic Cunhaporanga Granitic Complex, southern Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro; CPRM. 2000. 1 CD-ROM.
- GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Tulsa, Okla: SEPM, 1994. 199 p. ( SEPM short course 31 ).
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; COIMBRA, A. M. The Ribeira folded belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 5, n. 4, p. 257-266, 1975.
- HOLLISTER, L. S. Enrichment of CO<sub>2</sub> in fluid inclusions in quartz by removal of H<sub>2</sub>O during crystal-plastic deformation. *Journal of Structural Geology*, v.12, p. 895-901, 1990.
- MOINE, B.; FORTUNE, J. P.; MOREAU, P.; VIGUIER, F. Comparative mineralogy, geochemistry and conditions of formation of two metasomatic talc and chlorite deposits: Trimmouns (Pyrenees, France) and Rabenwald (Eastern alps, Austria). *Economic Geology*, v. 84, p. 398-1416, 1989.
- MOORE, D. E.; LOCKNER, D. A. Talc friction in the temperature range 25°-400°C: Relevance for Fault-Zone Weakening. *Tectonophysics*, v. 449, n. 1-4, p. 120-132, 2008.
- PICCIRILLO, E. M.; MELFI, A. J. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin. São Paulo: IAG-USP, 1998. 600 p.
- PRAZERES FILHO, H. J.; HARARA, O. M.; BASEI, M. A. S.; PASSARELLI, C. R.; SIGA JUNIOR, O. Litoquímica, geocronologia U-Pb e geologia isotópica (Sr-Nd-Pb) das rochas graníticas dos Batólitos Cunhaporanga e Três Córregos na porção sul do Cinturão Ribeira, Estado do Paraná. *Geologia-USP*. Série Científica, v. 3, n. 1, p. 51-70, 2003.
- PROCHASKA, W. Geochemistry and genesis of Austrian talc deposits. *Applied Geochemistry*, v. 4, p. 511-525, 1989.



- PROCHASKA, W.; MOGESSIE, A.; RAITH, J. G. Formation of the talc deposit of Kibanda (Rwanda) and its relation to the regional metamorphic evolution. *Journal of African Earth Sciences*, v. 14, p. 499-50, 1992.
- RAMBOZ, C.; PICHAVANT, M.; WEISBROD, A. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. *Chemical Geology*, v. 37, p. 29-48, 1982.
- REIS NETO, J. M. *Faixa Itaiacoca*: registro de uma colisão entre dois blocos continentais no Neoproterozóico. 1994. , 255 f. Tese (Doutorado) - São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- ROEDDER, E. *Fluid inclusions*. Washington, D. C.: Mineralogical Society of America, 1984. 646 p. (Reviews in Mineralogy 12).
- SCHÄRER, U.; DE PARSEVAL, P.; POLVÉ, M.; SAINT-BLANQUAT, M. Formation of the Trimouns talc-chlorite deposit (Pyrenees) from persistent hydrothermal activity between 112 and 97 Ma. *Terra Nova*, v. 11, n. 1, p. 30-37, 1999.
- SHIN, D.; LEE, I. Carbonate-hosted talc deposits in the contact aureole of an igneous intrusion (Hwanggangri mineralized zone, South Korea): geochemistry, phase relationships, and stable isotope studies. *Ore Geology Reviews*, v. 22, p. 17-39, 2002.
- SHIN, D.; LEE, I. Fluid inclusions and their stable isotope geochemistry of the carbonate-hosted talc deposits near the Cretaceous Muamsa Granite, South Korea. *Geochemical Journal*, v. 40, p. 69-85, 2006.
- SIBSON, R. H.; MOORE, J.; RANKIN, A. H. Seismic pumping - a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society*, v. 131, p. 653-659, 1975.
- SIGA JUNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; SATO, K.; PRAZERES FILHO, H. J.; CURY, L. F.; WEBER, W.; PASSARELLI, C. R.; HARARA, O. M.; REIS NETO, J. M. U-Pb (zircon) ages of metavolcanic rocks from the Itaiacoca Group: tectonic implications. *Geologia USP. Série Científica*, v. 3, p. 39-49, 2003.
- SIGA JUNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; PASSARELLI, K.; SATO, K.; CURY, L. F., MCREATH, I. Lower and Upper Neoproterozoic magmatic records in Itaiacoca Belt (Paraná-Brazil): Zircon ages and lithostratigraphy studies. *Gondwana Research*, v. 15, p. 197-208, 2009.
- SZABÓ, G. A. J.; ANDRADE, F. R. D.; GUIMARÃES, G. B.; CARVALHO, F. M. S.; MOYA, F. A. As jazidas de talco no contexto da história metamórfica dos metadolomitos do Grupo Itaiacoca, PR. *Geologia USP. Série Científica*, v. 5, n. 2, p. 13-31, 2006.
- TORNOS, F.; SPIRO, B. F. The geology and isotope geochemistry of the talc deposits of Puebla de Lillo (Cantabrian Zone, Northern Spain). *Economic Geology*, v. 95, p.1277-1296, 2000.
- TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. A. M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology. *Earth Planetary Science Letters*, v. 121, p. 333-348, 1994.
- VERMA, M. H. Revised quartz solubility temperature dependence equation along the water-vapour saturation curve. In: n Proc. World Getherm. Congr 2000, Japão, p. 1927-1932, 2000.
- VITYK, M. O.; BODNAR, R. J. Textural evolution of synthetic fluid inclusions in quartz during reequilibration, with applications to tectonic reconstruction. *Contributions to Mineralogical and Petrology*, v. 121, p. 309-323, 1995.
- WALTHER, J. V.; ORVILLE, P. M. The extraction-quench technique for determination of the thermodynamic properties of solute complexes: application to quartz solubility in fluid mixtures. *American Mineralogical*, v. 68, p. 731-741, 1983.
- WEBER, W.; SIGA JUNIOR, O.; SATO, K.; REIS NETO, J. M.; BASEI, M. A. S.; NUTMAN, A. P. A Formação Água Clara na região de Araçuaia - SP: registro U-Pb de uma bacia mesoproterozóica. *Geologia USP: Série Científica*, v. 4, p. 101-110, 2004.
- WILKINSON, J. J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, v. 55, n. 1-4, p. 229-272, 2001.

