COMPOSIÇÃO E GEOTERMOMETRIA DOS FLUIDOS MINERALIZANTES EM DEPÓSITOS DE Zn-Pb DAS COBERTURAS NEOPROTEROZOÍCAS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO: IMPLICAÇÕES METALOGENÉTICAS

CARLOS EDUARDO S. COELHO^{1,2}, AROLD MISI¹, IONÁ DE ABREU CUNHA^{1,3},
ADRIANA S. ROCHA GOMES^{1,4} & VIOLETA DE SOUZA MARTINS^{1,5}

Resumo Estudos de inclusões fluidas primárias e pseudosecundárias em agregados cristalinos de esfalerita de depósitos de Zn-Pb em bacias sedimentares neoproterozóicas do Craton do São Francisco foram realizados visando obter dados de temperatura mínima de formação e salinidade dos fluidos mineralizantes para melhor entendimento do ambiente físico-químico da deposição da concentração mineral. Temperaturas de homogeneização (T_H) e salinidades mostraram valores semelhantes entre os depósitos estudados. Em Morro Agudo, as inclusões apresentam soluções aquosas moderadamente salinas, com salinidade em torno de 14% equiv. em peso de NaCl. A distribuição zonada dos valores de salinidade observadas nos corpos de minério parece estar relacionada à presença de condutos alimentadores dos fluidos, possivelmente representados pela zona da *falha principal* de Morro Agudo. Dados de temperaturas de homogeneização também mostram um padrão de zoneamento: as paleotemperaturas determinadas são relativamente mais altas no Bloco "A", mais próximo da zona da falha: -122° a 283°C, moda em 170°C (corpo JKL). Afastado da *falha principal*, no Bloco C da mina, reduzem para 80° a 168°C com moda em 155°C no mesmo corpo. O corpo N, estratiforme, exibe o mais baixo intervalo de temperatura, entre 120° a 144°C, com moda em 138°C. Em Nova Redenção, registrou-se a presença de soluções aquosas com salinidade moderada a alta, em torno de 24,3% eq. em peso de NaCl. As temperaturas de homogeneização variam entre 140°-190°, com moda em 185°C. Em Irecê, os resultados são semelhantes em número limitado de inclusões primárias: temperaturas entre 140 e 200°C e salinidade variando de 3 a 10%. Juntamente com outros dados (geológicos, petrográficos e geoquímicos), as salinidades e temperaturas de homogeneização obtidas sugerem um modelo metalogenético comum, caracterizando uma época metalogenética no final do Neoproterozóico. Este modelo envolveria circulação focalizada de fluidos hidrotermais ao longo de falhas e fraturas, com lixiviação dos metais a partir do embasamento das coberturas sedimentares e o enxofre originado principalmente da água do mar. Quando comparados os valores de T_H e salinidade, com os dos depósitos do tipo MVT, SEDEX e Irlandês, os dados caem todos no campo dos depósitos tipo Irlandês.

Palavras-chave: composição, geotermometria, fluidos mineralizantes, Zn-Pb, coberturas neoproterozóicas, Cráton do São Francisco

Abstract COMPOSITION AND GEOTHERMOMETRY OF MINERALIZING FLUIDS IN Zn-Pb DEPOSITS OF THE SÃO FRANCISCO CRATON NEOPROTEROZOIC COVERS: METALOGENETIC IMPLICATION Fluid inclusion studies in primary and pseudo-secondary inclusions in sphalerite from sediment-hosted Pb-Zn deposits of the São Francisco Craton Neoproterozoic basins were performed to obtain minimum formation temperatures, and fluid composition. These data could be used to interpret the physico-chemical environment of the ore deposition and for exploration programs. In the Morro Agudo deposit, fluid inclusions in sphalerite indicate moderate saline solutions, around 14%wt eq. NaCl. The wide range of salinity within the orebodies is apparently related to a zonal distribution in relation to the *main fault* zone that controls the mineralization. Total homogenization temperatures (T_H) indicate also a zoned pattern closely related to the *main fault* zone. They are relatively higher in the 'A' Block, closer to the fault zone, varying from 122° to 283°C with a mean of 170°C in the JKL orebody. Away from the *main fault*, to the west, paleotemperatures are gradually lower, ranging from 80° to 168°C with a mean at 155°C, in the 'C' block. The stratiform 'N' orebody, in the upper part of the section exhibits the lowest temperature interval, varying between 120° and 144°C with a mean of 138°C. In the Nova Redenção deposit, fluid inclusions show moderate to high salinity aqueous solutions, with 24.3 wt%. NaCl eq., probably containing Ca, K and Mg salts. The homogenization temperatures range from 140° to 190°C with a mean of 185°C. In the Irecê deposits, limited determinations in primary inclusions of sphalerite show homogenization temperatures (T_H) between 140 and 200°C and salinity between 3 and 10% NaCl equivalent. When compared with T_H and salinities from typical MVT, SEDEX and Irish deposits, the obtained data fall in the field of Irish type.

Keywords: composition, geothermometry, mineralizing fluids, Zn-Pb, neoproterozoic covers, São Francisco Craton

INTRODUÇÃO O estudo de inclusões fluidas é um método de amplo uso no estudo de depósitos minerais e tem sido bastante aplicado em depósitos de Zn-Pb, para caracterizar tipos de soluções mineralizantes, temperaturas de formação e definir áreas com maior potencial exploratório (Roedder 1967, McNaughton & Smith 1986, Samson & Russel 1987, William-Jones *et al.* 1992, Spry & Fuhrmann 1994, Kontak 1995, Banks *et al.* 2002, Heijlen *et al.*, 2003,

Gandria *et al.* 2003). Os dados de temperatura mínima de formação, pressão e composição do fluido são usados para o entendimento do ambiente físico-químico durante a formação da concentração mineral. Trata-se, portanto, de ferramenta essencial para a formulação de modelos metalogenéticos e exploratórios, principalmente quando associada a observações geológicas e petrográficas precisas, e a determinações isotópicas.

1 - Grupo de Metalogênese, Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia e Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Rua Caetano Moura, 123, Federação CEP 40210-340, Salvador, Bahia. misi@ufba.br

2 - Petrobrás-CENPES, Ilha do Fundão, quadra 7, prédio 20, Cidade Universitária, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ. cescoelho@petrobras.com.br

3 - Rio Doce Manganês (RDM), BR-324 km 22, Simões Filho, Bahia

4 - Centro de Federal Educação Técnica da Bahia (CEFET/BA), Rua Emídio dos Santos s/n, Barbalho, Salvador, Bahia.

5 - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), 4ª Avenida, Centro Administrativo da Bahia, Salvador, Bahia.

Três depósitos de sulfetos de Zn-Pb associados às coberturas sedimentares neoproterozóicas do Cráton do São Francisco foram objeto de estudos sistemáticos de inclusões fluidas, paralelamente a outros estudos. Os depósitos de Pb-Zn de Nova Redenção e Irecê, na Bahia, assim como os depósitos de Pb-Zn de Morro Agudo, em Minas Gerais, vêm sendo objeto de estudos pelos autores desde 1997, a maioria dos quais fazendo parte de teses e dissertações de mestrado cujos resultados não foram ainda publicados ou foram apenas parcialmente (Kyle & Misi, 1997; Gomes, 1998; Misi, 1999; Cunha, 1999). Por outro lado, os estudos realizados por Martins (2001) nos depósitos de fluorita da Serra do Ramalho, na Bahia e de Montalvânia, em Minas Gerais, assim como por Monteiro (2002) nos depósitos de Zn de Vazante, Fagundes e Ambrósia, em Minas Gerais, acrescentaram novos dados e interpretações que corroboram a proposta de modelo metalogênico na formação das concentrações de sulfetos durante o final do Neoproterozóico (Misi 1999, Gomes et al. 2000, Cunha et al. 2000, Misi et al. 2000, Misi et al. 2005).

A associação com rochas carbonáticas e o caráter tido como epigenético da maioria dos depósitos, têm sido os dois principais atributos usados para enquadrar os depósitos estudados na classe conhecida como "Mississippi Valley Type" (MVT), sem considerar outras evidências relacionadas ao contexto geotectônico e aos processos geradores das concentrações. Isto tem limitado a construção de modelos exploratórios, uma vez que conduz a simplificações e generalizações que em nada contribuem para a descoberta de novas e importantes reservas minerais. Atributos como *temperatura* e *composição (salinidade)* dos fluidos mineralizantes são relevantes, porque representam variáveis que impõem limites a outros tipos de processos normalmente envolvidos na evolução metalogênica, como a redução bacteriana do enxofre na formação dos sulfetos. Este processo somente é possível a temperaturas inferiores a 110°C (Jorgensen et al. 1992, Elsgaard et al. 1994), mensuráveis com relativa precisão por meio de medidas de temperatura de homogeneização (T_h) das inclusões. Quando esses atributos (temperatura e composição) são relacionados a outros processos e analisados de modo integrado, constituem ferramentas poderosas na definição da evolução metalogênica e, conseqüentemente, no estabelecimento de modelos exploratórios capazes de levar a novas descobertas.

Neste trabalho, são apresentados novos dados que podem contribuir significativamente para a concepção de modelos metalogênicos e exploratórios adequados à descoberta de novas concentrações de sulfetos de chumbo e zinco nas coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco.

MÉTODOS A maioria das determinações foi realizada no Laboratório de Metalogênese do CPGG-UFBA, com platina de aquecimento-resfriamento *Chauxmeca*, acoplada a microscópio *Nikon* equipado com objetivas diversas, inclusive uma *Nikon* 100x de ultralonga distância de trabalho. A calibração da platina foi realizada rotineiramente com inclusões fluidas sintéticas da *Fluid Inc.* A precisão das medidas, a partir de repetidas determinações, foi de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Uma parte das medidas do depósito de Morro Agudo foi realizada no Laboratório de Inclusões Fluidas do Instituto de Geociências da Universidade de Campinas, com platina *Linkam THMS 600*, acoplada a microscópio *Jenapol*, com objetiva *Olympus* 80x. O equipamento também foi calibrado com inclusões sintéticas e a reprodução das medidas foi da ordem de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. O estudo do depósito de Nova Redenção também foi parcialmente realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, com platina

Chauxmeca acoplada a microscópio *Zeiss*, com objetiva 80x *Olympus*. A reprodução das medidas foi de $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Os estudos mais recentes foram realizados no Laboratório de Metalogênese do CPGG/UFBA com nova platina de aquecimento-resfriamento *Linkam THMS 600*, acoplada a microscópio de pesquisa *Olympus BX-60*, equipado com objetivas de ultralonga distância de trabalho (50x e 100x).

GEOLOGIA DOS DEPÓSITOS A Figura 1 mostra a localização dos depósitos estudados e de outros depósitos referidos no trabalho. Morro Agudo e Vazante são os únicos atualmente em exploração pela Votorantim Metais Zinco, com produção de 950.000 t/ano e 900.000 t/ano (ROM), respectivamente. As reservas são de 5.200.000 toneladas (6,23% Zn e 2,95% Pb), em Morro Agudo e 18.800.000 toneladas de minério wilemítico (23,7% Zn) + 794.000 toneladas de minério calamínico (14,6% Zn), em Vazante (Geól. Flávio Tolentino, comunicação verbal).

Os atributos geológicos comuns podem ser assim resumidos, a partir de Misi et al. (2005):

(1) - As rochas encaixantes são dolomitos (principalmente) e calcários, silicificados, com feições típicas de deposição marinha em águas rasas (vd. item 2 abaixo). São capeadas por margas e pelitos, localmente piritosos. Fazem parte de seqüências de bacias sedimentares intracratônicas, formadas em regimes extensionais e crono-correlatas entre si (Grupos Vazante, Bambuí e Una) (Misi et al. 2005).

(2) - A presença de nódulos de quartzo microcristalino tipo *length slow* ou lutecita (Irecê, Corpo N-Morro Agudo, Nova Redenção), gipsita (Irecê), nódulos de sulfetos (Irecê, Corpo N-Morro Agudo) e de sulfetos pseudomorfos sobre gipsita (Irecê, Nova Redenção), assim como de estruturas sedimentares *teepees* (Irecê, Morro Agudo, Nova Redenção), sugere ambiente evaporítico dominante que controlou, pelo menos, uma fase importante da mineralização.

(3) - Os depósitos estudados têm nítido controle estrutural por fraturas e falhas orientadas N40-50W em Nova Redenção e Irecê e falhas normais N15-20W em Morro Agudo. São estruturas profundas que cortam as coberturas sedimentares e o embasamento e que provavelmente tiveram papel importante para a migração dos fluidos durante a mineralização.

(4) - A associação mineral principal compreende sulfetos (pirita, esfalerita e galena). Em Morro Agudo e Irecê, predominam esfalerita e pirita e em Nova Redenção galena. Prata está presente em todos os depósitos.

(5) - Os minerais de ganga mais comuns aos depósitos são: calcita, dolomita, quartzo (megacristais de quartzo e quartzo microcristalino) e barita.

(6) - Em todos os depósitos ocorrem mineralizações discordantes (veios, bolsões) e concordantes a sub-concordantes, podendo ser maciças ou disseminadas. Em Morro Agudo foram descritos oito corpos de minério (Romagna & Costa 1988), posteriormente agrupados em quatro: **N** (estratiforme, maciço e disseminado), **M** (veios), **JKL** (maciço, substituindo matriz de dolarenito oolítico) e **GHI** (maciço, substituindo brechas). Esses corpos distribuem-se por cerca de 300 m a oeste da *falha principal* de Morro Agudo, falha normal orientada N15-20W com mergulho de 75° para SW. De acordo com Oliveira (1998), o rejeito vertical da Falha de Morro Agudo (35 m) é parte de um sistema de falhas normais que rebaixa os corpos mineralizados no sentido SW (Fig. 2)

RESULTADOS Os resultados obtidos nos dois principais

depósitos de sulfetos estudados, Morro Agudo e Nova Redenção, serão apresentados e discutidos a seguir. O depósito de Irecê teve um número limitado de análises e está sendo objeto de estudos adicionais. Todos os estudos até aqui concluídos foram realizados a partir de inclusões fluidas em agregados cristalinos de esfalerita (Nova Redenção, Morro Agudo e Irecê) e de fluorita (Serra do Ramalho e Montalvânia).

Morro Agudo Os corpos mineralizados de Morro Agudo estão diretamente associados a falhas normais N15-20W e mergulho de 75° SW. Oito corpos de minério distribuem-se a leste da chamada Falha Principal (Romagna & Costa 1989). Foram coletadas amostras dos oito corpos (G, H, I, J, K, L, M e N) nos blocos A, B e C da mina de Morro Agudo. Devido às características comuns, os corpos G, H e I serão tratados agrupadamente assim como os corpos J, K e L (Fig. 2).

Os agregados cristalinos de esfalerita são, em geral castanho-amarelados e, algumas vezes, avermelhados. O micro-fraturamento é feição marcante, verificada em quase todas as amostras estudadas, exceto as provenientes do corpo N.

As inclusões de todos os corpos de minério são, na tempera-

tura ambiente, bifásicas (L + V), com grau de preenchimento de 0,8 a 0,95. Raramente ocorrem inclusões monofásicas. A Tabela 1 resume as principais características das inclusões dos diferentes corpos de minério. A maioria das inclusões selecionadas para estudo ocorre de forma disseminada (isoladas) e/ou em "planos de inclusões fluidas" (PIFs) intra-granulares, paralelos à clivagem da esfalerita (Fig. 3 A e B) sendo, portanto, classificadas como primárias e pseudo-secundárias, respectivamente (Roedder 1984). Planos de inclusões fluidas trans-granulares (PIFs secundários), relacionados a micro-fissuras que cortam mais de um grão de esfalerita, ocorrem principalmente nos corpos M e GHI. As inclusões são geralmente pequenas, de 5 a 25µm, e possuem formas variadas, desde cristais negativos, octaédricos, pontiagudas a tubulares, além de formas irregulares (Fig. 3 C e D).

MICROTHERMOMETRIA A amostragem para os estudos de microtermometria foi realizada separadamente em cada corpo de minério e nos diferentes blocos da mina para verificar a existência de possível zonação lateral em relação à zona da *falha principal* no sentido oeste, como também a possível zonalidade vertical.

Transições de fase durante o resfriamento Nas amostras dos vários corpos ocorreram dois comportamentos distintos durante o resfriamento: as inclusões bifásicas mudaram de fase, e as monofásicas produziram duas transições. Nas monofásicas notou-se inicialmente nucleação de uma bolha de vapor abaixo de 0°C (1ª transição), seguida pelo desenvolvimento de uma fase sólida entre -60° e -70°C (2ª transição). Nas bifásicas, somente a última mudança de fase foi observada. O desenvolvimento de antartcita, silvita e $MgCl_2 \cdot 12H_2O$ poderia ocorrer, dependendo da composição do fluido, mas o único sólido que pode ser observado é o gelo sendo incerta sua natureza, portanto.

Após o término do re-aquecimento natural, as inclusões monofásicas continham duas fases ao atingirem a temperatura ambiente. Estas inclusões, classificadas inicialmente como monofásicas são, na realidade, bifásicas que não geraram vapor durante a sua formação, devido à metaestabilidade (Roedder 1984). Fenômeno similar parece ocorrer em algumas inclusões do depósito de Nova Redenção.

Algumas inclusões monofásicas que não exibiram mudança de fase durante o resfriamento, foram analisadas por micro-espectrometria *Raman* e nada foi detectado, o que sugere tratar-se de cavidades vazias por vazamento (*leakage*) ou de mistura de voláteis ($CO_2 + CH_4 + N_2$).

No re-aquecimento após resfriamento, as temperaturas de transição de fases das inclusões de amostras dos corpos JKL, bloco A, amplo intervalo de 0° a -36°C, com moda de -10°C (Fig. 4 a). No bloco C, o intervalo é menor, de -4° a -12°C, com moda em -10°C. Os poucos dados obtidos das inclusões de amostras do bloco B apresentam valores dentro da moda dos demais (Fig. 4 a).

As temperaturas de transição de fases obtidas nas inclusões de amostras do corpo M variam entre 0° e -12°C, com moda em -8°C (Fig. 4 b). Nas inclusões das amostras dos corpos GHI, o intervalo é ainda menor, de 0° a -6°C, com moda em -4°C (Fig. 4 b). Os dados das inclusões de amostras do corpo N variam entre -4° e -6°C, com moda em -5°C (Fig. 4 b). A Tabela 2 exhibe os valores das temperaturas de transição de fases e a moda dos diferentes corpos estudados.

Transições de fase durante o aquecimento A homogeneização total em todos os corpos de minério ocorreu sempre para a fase

Figura 1 – Geologia simplificada do Cráton do São Francisco com localização dos depósitos de Pb-Zn das bacias neoproterozóicas referidos no texto.

Figura 2 – Seção oeste-leste da mina de Morro Agudo passando pelos blocos A, B e C da mina (subterrânea). Mostra a distribuição dos diversos corpos de minério em relação à falha principal. Fonte: equipe da Votorantim Metais Zinco, adaptado a partir de Cunha (1999).

Tabela 1 Características das inclusões fluidas nos corpos de minério da mina de Morro Agudo

Corpo N (estratiforme)	Esfalerita extremamente fina, poucas inclusões. A maioria possui dimensões menores que 3µm. Foram analisadas inclusões primárias com dimensões entre 5 e 7µm.
Corpo M	(i) planos de inclusões fluidas (PIF intragranulares) subordinados e paralelos aos planos de clivagem da esfalerita (inclusões pseudo-secundárias) e; (ii) disseminadas (primárias). Muito comum a ocorrência de planos de inclusões secundárias transgranulares cortando os grãos de esfalerita.
Corpo JKL	Inclusões disseminadas ou formando planos de inclusões pseudosecundárias, subordinados ou paralelos às clivagens da esfalerita. Planos de inclusões transgranulares também estão presentes.
Corpo GHI	Geralmente em planos paralelos às clivagens da esfalerita e, por vezes, disseminadas. A distinção entre inclusões primárias e pseudo-secundárias é dificultada pela presença de muitos planos de inclusões secundárias.

líquida.

Os corpos de minério JKL foram os únicos analisados nos três blocos da mina, em virtude de possuírem amostras com inclusões em maior quantidade e de maior tamanho. Os dados micro-termométricos das inclusões primárias e pseudo-secundárias mostram que as temperaturas de homogeneização nas amostras dos corpos do bloco A se distribuem em amplo intervalo, de 122° a 283°C, com moda em 165°C (Fig. 5 a). Nos blocos B e C o intervalo é menor, de 148° a 160°C, com moda em 155°C no bloco B e de 80° a 168°C, com moda em 155°C, no bloco C (Fig. 5 a).

Nas inclusões das amostras do corpo GHI as temperaturas de homogeneização variam de 89° a 209°C, com moda de 135°C (Fig. 5 b). Nas inclusões de esfalerita do corpo M entre 100° e 158°C, com moda de 150°C (Fig. 5 c), e em inclusões primárias do corpo estratiforme N entre 120° e 144°C, com moda em 135°C (Fig. 5 d). A Tabela 3 exhibe os valores obtidos para as temperaturas de homogeneização e moda, dos diferentes corpos estudados.

Nova Redenção Os depósitos de Nova Redenção consistem de bolsões lenticulares de galena e esfalerita em dolarenitos silicosos ou em matriz de brecha sílico-ferruginosa, e estão associados a falhas/fraturas N40W. As inclusões nos agregados cristalinos de esfalerita são pequenas, de 5 a 15µm, e de formas alongadas,

octaédricas, cristais negativos e, mais raramente, pontiagudas. Ocorrem disseminadas ou formam planos intragranulares de inclusões (PIFs) subordinadas, paralelas aos planos de clivagem da esfalerita (Fig. 6 A, B). São consideradas primárias e pseudo-secundárias em relação à formação da esfalerita (Roedder 1984) e, portanto, podem ser utilizadas para definir as características do fluido mineralizante. São raras as inclusões trans-granulares ou secundárias, relacionadas a micro-fissuras tardias que cortam mais de um agregado de esfalerita. Na temperatura ambiente, as inclusões estudadas podem ser classificadas em bifásicas (L + V), com grau de preenchimento entre 0,8 - 0,9, e monofásicas (L ou V).

MICROTERMOMETRIA *Transições de fases durante o resfriamento* O estudo micro-termométrico realizado nas inclusões monofásicas permitiu a caracterização de dois tipos de inclusões, durante o resfriamento: (i) inclusões que mostraram a nucleação de uma bolha. Estas se congelam em torno de -60°C e tornam-se bifásicas sob temperatura ambiente, sendo por isso denominadas de inclusões monofásicas meta-estáveis, isto é, a bolha de vapor não teria sido gerada durante a sua formação devido à meta-estabilidade, como definido por Roedder (1984); e (ii) inclusões que não mostraram mudança de fase até -180°C (limite do equipamento utilizado). As análises realizadas em micro-

Figura 3 - Inclusões fluidas em esfalerita de Morro Agudo: A) Inclusões primárias, bifásicas, disseminadas; B) Planos de inclusões pseudo-secundárias, paralelos à clivagem esfalerita. Entre os planos de inclusões são observados: inclusões primárias, cristal negativo; C) Planos de inclusões pseudo-secundárias paralelos à clivagem da esfalerita. Essas inclusões são bifásicas tubulares e na forma de cristal negativo, geralmente escuro nas bordas; D) Inclusões fluidas pseudo-secundárias orientadas segundo dois planos paralelos às clivagens da esfalerita, com inclusões fluidas primárias localizadas entre os planos. Fotomicrografias em luz transmitida, Cunha (1999).

Figura 4 - Diagramas de distribuição de freqüência de temperaturas de fusão do gelo em inclusões dos corpos (a) JKL blocos A, B e C e (b) GHI, M e N, mina de Morro Agudo.

espectrometria *Raman* não confirmaram a presença de voláteis nessas inclusões, tratando-se assim de cavidades vazias.

Nas inclusões bifásicas, aquosas, observou-se apenas congelamento, em torno de -60°C .

Durante o re-aquecimento subsequente ao resfriamento das inclusões monofásicas metaestáveis e bifásicas, registrou-se várias temperaturas no intervalo de -60°C a -5°C , que poderiam representar transições de fases. A partir da fusão dos sólidos, cerca de 53% das inclusões mostrou apenas uma mudança de fase, enquanto o restante exibiu duas e, possivelmente, até três transições. Nas primeiras, cerca de 90% das medidas situa-se acima de -28°C , com moda em torno de -17°C , e o restante ficou abaixo dessa temperatura (Fig. 7 A). Nas inclusões que mostraram duas ou três

mudanças de fases durante o re-aquecimento, observa-se quatro grandes concentrações de temperaturas de transição (Fig. 7 A). Na figura verifica-se a existência de um grupo com temperaturas em torno de -18°C , outro de -26°C , um terceiro de -42°C e um quarto entre -50°C e -60°C . Tratando-se de temperaturas eutéticas, essas transições indicariam a presença de sais de Ca e Mg.

Transição de fase durante o aquecimento Durante o aquecimento, a homogeneização total ocorreu sempre na fase líquida. A Fig. 7 B mostra que as temperaturas de homogeneização variam de 80°C a 210°C , com a maioria dos dados situada entre 140°C e 190°C , com moda em 185°C .

Tabela 2 Temperatura de fusão do gelo dos diversos corpos de minério da mina de Morro Agudo.

Corpo	Bloco	Temperatura de Fusão do Gelo	Moda (°C)	Nº de Medidas
N	C	-4 a -6	-5	9
M	B	0 a -14	8	37
	A	0 a -36	-9	160
JKL	B	-8 a -10	-9	27
	C	-4 a -12	-9	49
GHI	B	0 a -6	-4	27

Tabela 3 Temperaturas de homogeneização para os diversos corpos de minério da mina de Morro Agudo.

Corpo	Bloco	Temperatura de Homogeneização (°C)	Moda (°C)	Nº de Medidas
N	C	120 – 144	138	16
M	A	100 – 158	138	74
	A	122–283	170	153
JKL	B	148 – 160	154	15
	C	80 – 168	155	65
GHI	B	88 – 209	150	28

Figura 5 Diagramas de distribuição de freqüência de temperaturas de homogeneização total (T_h) de inclusões fluidas em esfalerita dos diferentes corpos de minério da mina de Morro Agudo. (a) JKL blocos A, B e C (b) GHI bloco B (c) M bloco A (d) N bloco C. Fonte: Cunha, 1999, modificado.

Figura 6 - Inclusões fluidas em esfalerita de Nova Redenção, fotomicrografias em luz transmitida A) Planos de inclusões primárias, com forma de cristal negativo, disseminados em esfalerita; B) Planos de inclusões primárias disseminadas em esfalerita. Fonte: Gomes (1998).

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS Nova Redenção e Morro Agudo **COMPOSIÇÃO DOS FLUIDOS** O principal objetivo do resfriamento no estudo de inclusões fluidas é a determinação da composição do fluido. Entretanto, a maioria dos fluidos em rochas sedimentares são tão complexos e as inclusões fluidas são tão pequenas que, em geral, não é possível observar todas as transições de fases que ocorrem durante o re-aquecimento e identificar os sólidos que, ao se fundirem, marcam essas mudanças de fase. Assim, na determinação da salinidade de uma inclusão, deve-se primeiramente escolher um modelo a ser adotado nos

cálculos do valor da salinidade. O modelo pode ser determinado por meio das temperaturas iniciais de fusão estável (temperatura eutética – T_e) conhecida para cada sistema durante o re-aquecimento de inclusões previamente congeladas (Tabela 4). A figura 8 mostra as possíveis transições de fases observadas em inclusões salinas de vários sistemas e as temperaturas eutéticas correspondentes.

A determinação da temperatura eutética (T_e) é difícil porque, durante o re-aquecimento as fases formadas podem se fundir a temperaturas inferiores à T_e do sistema (fusão metaestável - Tabe-

Figura 7 – Histogramas de medidas de temperatura em inclusões primárias e pseudo secundárias de esfalerita de Nova Redenção. A) Frequência das temperaturas de fusão do gelo durante o re-aquecimento. B) Diagrama de distribuição de frequência de temperaturas de homogeneização total (T_H). Fonte: Gomes 1998 (modificado).

la 4). Bodnar (1998) e Burrus (1997 e 1998) alertam para o fato de que algumas mudanças de transição podem ser, na realidade, mudanças do estado físico do sólido (recristalizações, devitrificações e outras) que somente os equipamentos com câmeras de vídeos e objetivas de alta magnificação são capazes de detectar. Outro fator complicador na determinação das temperaturas eutéticas é a reduzida dimensão das inclusões que, em geral, têm contornos escuros, o que dificulta a observação da textura dos cristais no interior das inclusões fluidas, conhecida como textura “casca de laranja” (Goldstein & Reynolds 1994), que indicaria que a fusão eutética da hidrohalita estaria ocorrendo ou muito próxima de ocorrer. O desaparecimento repentino dessa textura, indicada pela limpidez da inclusão, poderia significar que a fusão eutética da hidrohalita já teria ocorrido. A presença de cristais com contornos arredondados indicaria, também, que a fusão do gelo estaria próxima de ocorrer (Goldstein & Reynolds 1994).

A não definição do último cristal a ser fundido pode acarretar graves erros na definição da salinidade. O diagrama de fases do sistema H_2O -NaCl, (Fig. 8) de inclusões fluidas não saturadas em NaCl, mostra algumas características importantes:

- (i) - Abaixo de $-21,2^\circ C$ coexiste gelo + hidrohalita + vapor; (B_1 , B_2 e B_3);
- (ii) - em composições $> 23,2\%$ em peso de NaCl (ponto eutético - T_e) e temperaturas superiores a $-21,2^\circ C$, a hidrohalita se funde

Figura 8 Diagrama T-X das porções de baixas temperaturas e salinidades do sistema NaCl. Cada ponto no diagrama está em equilíbrio com a pressão de vapor. Fonte: Goldstein & Reynolds 1994.

Tabela 4 Temperaturas eutéticas estáveis, metaestáveis e mais comumente observadas em vários sistemas aquosos (adaptado de Goldstein & Reynolds 1994)

Sistema	Fusão Inicial – T_e (em $^\circ C$)	FASES SÓLIDAS
NaCl- H_2O	estável: $-21,2$	NaCl. $2H_2O$ – Hidrohalita
	metaestável: -28	
	observada: $(-21,1 \text{ a } -21,2) (-28 \text{ a } -35)$	gelo - gelo
KCl- H_2O	estável: $-10,7$	KCl – Silvita
CaCl $_2$ - H_2O	Estável: $-49,8$	CaCl $_2$. $6H_2O$ – antartacita
		gelo-gelo
MgCl $_2$ - H_2O	estável: $-33,6$	MgCl $_2$. $12H_2O$ – sem nome
NaCl-KCl- H_2O	estável: $-22,9$	
	metaestável: -28	
	observada: $(-23 \text{ a } -23,4)$	
NaCl-CaCl $_2$ - H_2O	estável: -52	
	metaestável: -70	
	observada: $(-47 \text{ a } -53) (-70 \text{ a } -85) -90$	
NaCl-MgCl $_2$ - H_2O	estável: -35	
	metaestável: $(-37 \text{ a } -55) -80$	
	observada: $(-33 \text{ a } -40)(-45 \text{ a } -50) (-70 \text{ a } -80)$	
NaCl-CaCl $_2$ -MgCl $_2$ - H_2O	Estável: -57	

(C₁), deixando gelo, líquido e vapor (D₁);

(iii) - em composições >23,3 % em peso de NaCl e temperaturas superiores a -21,2 °C, o gelo se funde (C₂) e a fase sólida que coexiste com líquido e vapor é hidrohalita (D₂). Sob temperatura ambiente, em torno de 20 °C, as inclusões normalmente são consideradas não saturadas em a NaCl (sob temperatura ambiente a saturação é da ordem de 26% eq. NaCl) e estão no campo líquido + vapor (A₁, A₂ e A₃).

Sob dada temperatura de fusão dos sólidos (em torno de -15°C, por exemplo), a fusão do gelo indicaria uma salinidade em torno de 17% eq. em peso de NaCl, enquanto que na fusão da hidrohalita a salinidade seria próximo a 25% eq. em peso de NaCl.

Em Morro Agudo e Nova Redenção foram determinadas temperaturas muito baixas que podem representar transições eutéticas estáveis, metaestáveis e/ou perturbações devido a problemas de recristalização e devitrificação sob baixas temperaturas. As inclusões fluidas de Nova Redenção mostraram apenas uma mudança de fase (Fig. 7 A). Cerca de 72% das mudanças ocorreram acima da temperatura eutética (Te) do sistema H₂O-NaCl (-21,2°C) e cerca de 28% ficou abaixo. Cerca de 16% ficou entre -21,2°C e -28°C, dos sistemas NaCl-H₂O e KCl-NaCl-H₂O, e cerca de 3% mudanças de fases entre -38°C e -44°C, que poderiam caracterizar temperaturas metaestáveis do sistema NaCl-MgCl₂-H₂O. Os 6% restantes mostrou transições entre -56°C e -60°C, o que sugere a presença do sistema NaCl-CaCl₂-MgCl₂-H₂O.

Em inclusões que mostraram duas ou mais mudanças de fases durante o re-aquecimento (Fig. 7 A), dois tipos foram observadas, isto é, as que mostraram temperaturas acima e abaixo do eutético do sistema NaCl-H₂O, que representam 54% do universo analisado, e as que mostraram as duas mudanças de fase com temperaturas inferiores a do eutético do sistema NaCl-H₂O.

Foi observado ainda que duas inclusões mostraram três mudanças de fases, e uma mostrou as duas temperaturas de mudanças de fase acima do eutético.

Nas inclusões que com duas ou mais mudanças de fase, os valores de temperaturas ≥ -21,2°C podem estar associadas ao sistema NaCl-H₂O, correspondente à fusão do gelo ou da hidrohalita. As temperaturas menores do que a Te do sistema NaCl-H₂O, tanto do primeiro tipo como do segundo, poderiam ser agrupadas em torno de -26°C, -43°C e -53°C, onde apenas a última temperatura poderia corresponder a valores observados ou de metaestabilidade dos sistemas aquosos NaCl-CaCl₂-H₂O e NaCl-MgCl₂-H₂O (Goldstein & Reynolds 1994). Três inclusões com medidas em torno de -52°C e -21,2°C podem estar indicando a temperatura estável do sistema NaCl-CaCl₂-H₂O.

Quando ambas temperaturas situam-se abaixo da Te do sistema NaCl-H₂O (tipo 2), ocorreram inclusões com temperaturas iniciais de fusão de -56°C/-60°C, correspondentes ao sistema NaCl-CaCl₂-MgCl₂-H₂O, e temperaturas finais em torno de -42°C do sistema NaCl-MgCl₂-H₂O.

Como a maioria das inclusões mostrou apenas uma mudança de fase acima da temperatura eutética (Te) do sistema H₂O-NaCl (-21,2°C) e pouco mais da metade mostrou duas transições de fases com uma das temperaturas maiores do que a -21,2°C, a composição da maioria das inclusões pode associar-se ao sistema NaCl-H₂O, enquanto as que mostraram temperaturas menores do que -21,2°C indicam que parte das inclusões contém fluidos mais complexos, principalmente do sistema NaCl-CaCl₂-H₂O e/ou NaCl-MgCl₂-H₂O.

Em vista disto, a salinidade dos fluidos de Nova Redenção foi calculada utilizando o sistema NaCl-H₂O como modelo de compo-

sição. Contudo, o reduzido tamanho das inclusões impossibilitou a distinção entre os cristais de gelo e de hidrohalita pela fusão durante o re-aquecimento. Assim, a salinidade mostrada na Figura 9 foi calculada separadamente, com base nas equações que utilizam as temperaturas de fusão do gelo e da hidrohalita, respectivamente (Goldstein & Reynolds 1994):

1) Gelo, como último cristal fundido:

$$\text{Salinidade} = 1,78\theta - 0,0442\theta^2 + 0,000557\theta^3 \text{ (Equ. 1)}$$

onde θ = temperatura de fusão do gelo em °C.

2) Hidrohalita, como último cristal fundido:

$$\text{Salinidade} = 26,28708872 + 14,80771966\Psi \text{ (Equ. 2)}$$

onde Ψ = temperatura de fusão da hidrohalita em °C/100

No depósito de Nova Redenção, se o gelo for o último cristal a fundir e a moda da temperatura de fusão sendo -17°C (Fig. 7) a salinidade calculada (Equ. 1) é 20,2% eq. em peso de NaCl. Se for a hidrohalita a salinidade calculada a partir da equação 2 seria 23,8% eq. em peso de NaCl. Assim, a diferença entre as salinidades calculadas no depósito de Nova Redenção, considerando-se gelo ou hidrohalita como último cristal fundido, é de apenas 3,6% eq. em peso de NaCl. Portanto, a não distinção entre gelo e hidroalita durante o reaquecimento das inclusões não representaria um erro significativo no cálculo da salinidade (Fig. 9) e em ambas situações revela-se alta salinidade do fluido mineralizante.

No depósito de Morro Agudo, apesar do amplo intervalo de temperatura de fusão de gelo nos corpos JKL do bloco A, variando (0° a -36°C com moda em -10°C) (Fig. 4 a) comparativamente ao bloco C (-4° a -12°C, com moda em -10°C, Fig. 4 b), a salinidade média calculada de ambos, considerando o gelo como último cristal a fundir, é de 13,94% eq. em peso de NaCl (Equ. 1). Se a hidrohalita for o último cristal a fundir, a salinidade calculada seria de 24,81% eq. em peso de NaCl (Equ. 2). A ampla faixa de salinidade no bloco A (Fig. 10) pode ser devido a maior concentração de sais no fluido, mais próximo à zona de falha.

A salinidade modal no M é de 11,7% eq. em peso de NaCl, enquanto que nos corpos N e GHI, a moda da salinidade é de 7,8% e 4,9% eq. em peso de NaCl, respectivamente (Fig. 10), conside-

Figura 9 – Diagrama de frequência de salinidades no depósito de Nova Redenção calculada com base no sistema NaCl-H₂O, com emprego dos valores de fusão do gelo e da hidroalita., Fonte: Gomes 1998

rando o gelo como último cristal a fundir (Equ. 1). Se hidrohalita por último, as salinidades das inclusões dos corpos M, N e GHI seriam de 25,10, 25,54 e 25,84, respectivamente (Equ. 2).

Assim, em Morro Agudo, a distinção do último cristal a se fundir é de fundamental importância, haja vista a diferença entre as salinidades calculadas pelas equações 1 e 2. Como as dimensões das inclusões são muito reduzidas, o desaparecimento repentino da textura “casca de laranja” dos cristais do interior da inclusão (Goldstein & Reynolds 1994) não pôde ser observado. Contudo, a nitidez dos contornos arredondados dos cristais durante a fusão indica que o último a fundir foi o gelo, e não a hidroalita. Sendo assim, as salinidades a considerar são as calculadas com a Equ. 1 (Fig. 9 e 10).

TEMPERATURAS DE FORMAÇÃO Os dados de temperatura de homogeneização (T_H) obtidos em inclusões de esfalerita da mina Morro Agudo, evidenciam distribuição zonada da temperatura em relação à zona da falha principal (Tabela 3). Estes dados coincidem com os obtidos por meio do fracionamento isotópico de enxofre em pares cogenéticos esfalerita-galena (Cunha 1999), que mostram variação de 204°C no corpo GHI, 157°C no corpo JKL e 125°C no corpo N. A temperatura obtida para o corpo M, pelo mesmo procedimento, indica valores menores, da ordem de 105°C. Deve-se destacar que as amostras utilizadas para cálculos termométricos a partir do fracionamento isotópico, foram as mesmas que forneceram as temperaturas de homogeneização.

Os resultados mostram, portanto, redução de temperatura para oeste, a partir da *falha principal*, assim como da base para o topo

da seção. Isto sugere que a zona da *falha principal* pode ter sido a alimentadora dos fluidos mineralizantes.

Depósito de Irecê Kyle & Misi (1997) relatam que as inclusões fluidas de esfalerita do depósito de Irecê (Faz. Rufino) não são abundantes, mesmo nos minerais dos estágios mais tardios da diagênese dos carbonatos encaixantes, que tendem a ocorrer com agregados cristalinos maiores. As inclusões das amostras estudadas são muito pequenas (2 a 4 μm) e a tonalidade escura da esfalerita dificulta a observação das mudanças de fases.

As inclusões primárias são do tipo L+V, e apresentam temperaturas de homogeneização de 140 a 200 °C. As temperaturas de fusão de gelo (-1,8 a -6,7°C), indicam salinidade relativamente baixa dos fluidos, com 3 a 10% NaCl equiv. A baixa salinidade e a associação da esfalerita com calcita diagênética meteórica (Misi & Kyle 1994) pode ser indício de que a mineralização teria se formado por mistura de salmouras bacinais com águas meteóricas.

Dados de temperatura de homogeneização obtidos a partir de inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias em esfalerita de Morro Agudo, Nova Redenção e Irecê, mostraram valores semelhantes entre si (Tabela 5). Comparados com temperaturas obtidas nas mesmas amostras, a partir de geotermômetros baseados no fracionamento isotópico do enxofre ($\delta^{34}\text{S}$) em pares co-genéticos galena-esfalerita, mostram coerência de valores (Tabela 6).

Comparação com outros depósitos da Bacia do São Francisco Monteiro (2002) realizou um criterioso estudo em inclusões primárias e pseudo-secundárias de esfalerita e willemita do depósito de

Figura 10 - Diagrama de frequência da salinidade, calculada com base no sistema NaCl-H₂O, usando a temperatura de fusão do gelo nos corpos de minério de Morro Agudo: (a) JKL blocos A, B, C (b) M, bloco A (c) GHI Bloco B (d) N Bloco C

Vazante, e de esfalerita dos depósitos de Ambrósia e Fagundes, na faixa Vazante-Paracatú-Unaf (Fig. 1). Em todos os depósitos as inclusões são bifásicas (L+V), mais raramente monofásicas (possivelmente derivadas de *necking down* ou devido a metaestabilidade). Em Vazante, a temperatura de homogeneização (T_H) das inclusões em esfalerita varia de 201°C a 232°C, com moda em 210°C e a salinidade entre 15,3 e 23 % equiv. em peso NaCl. No depósito de Ambrósia, T_H varia entre 167°C e 281,6°C, moda em 260°C, e a salinidade entre 14,6 % e 20,2 %. Em Fagundes, T_H e salinidade variam de 127°C a 265°C (com moda em 190°C) e de 5,2 a 11,8%, NaCl equiv, respectivamente. Os resultados mostram valores relativamente altos de T_H bem e salinidade média a alta, a maioria situada na mesma faixa dos dados obtidos nos depósitos estudados neste trabalho.

Martins (2001) estudou os depósitos de fluorita da Serra do Ramalho (BA) e Montalvânia (MG), situados na borda leste da Bacia do São Francisco (Fig. 1). Associados, ocorrem também pequenas concentrações de sulfetos de chumbo e zinco. Fluorita é sub-produto importante em alguns depósitos de Pb-Zn conhecidos na literatura como tipo "Vale do Mississippi" (MVT). Nesses depósitos, as inclusões fluidas em cristais de fluorita mostram em geral variações de T_H e de salinidade nas mesmas faixas obtidas em esfaleritas de depósitos MVT (Leach & Sangster 1993).

As inclusões fluidas de fluorita estudadas são primárias, bifásicas, pseudo-secundárias e secundárias e, mais raramente,

trifásicas (sólidos aprisionados). Em geral, possuem 0,03 mm e formas retangulares, irregulares, semi-irregulares, circulares e pontiagudas. As inclusões primárias e pseudo-secundárias têm distribuição aleatória, disseminadas, em grupos isolados, ou dispostas paralelamente a clivagem da fluorita. As inclusões pseudo-secundárias, mais numerosas, são do tipo L+V e L+V+S com grau de preenchimento (GP) mais uniforme do que os das inclusões primárias, variando de 0,7 a 0,9. Observa-se nesses planos, também, inclusões monofásicas (L ou V) muito escuras e que não mostram qualquer alteração de fase até -180°C.

Os resultados de temperatura de homogeneização (T_H) e salinidade obtidas em cinco depósitos estudados (Tabela 7) mostram, em geral, marcante uniformidade, com moda de T_H entre 205°C e 225°C, exceto no depósito de Morro Preto, cuja moda é menor (155°C). A salinidade varia de 9,8% a 12,3% NaCl equiv..

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES Os resultados obtidos mostram considerável semelhança ou uniformidade de composição e temperatura dos fluidos mineralizantes, responsáveis pela formação de diversos depósitos de Pb-Zn das coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. Mais de 70% dos dados de temperatura de homogeneização (T_H) e de salinidade obtidos a partir de inclusões primárias e pseudo-secundárias de esfalerita e fluorita, incluindo aqueles determinados por Monteiro (2002) em múltiplas fases minerais, situa-se na faixa de 127 a 280 °C

Tabela 5 - Dados de temperatura de homogeneização obtidos a partir dos estudos de inclusões fluidas dos depósitos de Morro Agudo (diferentes corpos de minério), Nova Redenção e Irecê, assim como na Serra do Ramalho (fluorita).

Tipo de Depósito	Nome do Depósito	Corpo	Bloco	Temperatura de Homogeneização (°C)	Moda (°C)	Nº de Medidas
Pb-Zn	Morro Agudo	N	C	120 – 144	138	16
		M	A	100 – 158	138	74
			A	122 – 283	170	153
		JKL	B	148 – 160	154	15
			C	80 – 168	155	65
		GHI	B	88 – 209	150	28
	Nova Redenção			140-190	185	165
F	Irecê			140-200	-	-
	Serra do Ramalho			115-220	197,5	107

Tabela 6 - Dados geotermométricos calculados a partir de fracionamento de $\delta^{34}S$ em pares co-genéticos galena-esfalerita usando a equação de Ohmoto & Rye (1979), comparados com temperatura de homogeneização (T_H) medida em inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias de esfalerita nas mesmas amostras.

AMOSTRA	TEMPERATURA (°C) ($?^{34}S_{sph.-gal} = 0,73 \times 10^6 / T^2$)	TEMPERATURA (°C) (T_H : moda e intervalo)
NR AG 2b	154	160 (140-190)
NR AG 3b	187	-
MA JK 1	113	175 (117-278)
MA IC 9	105	136 (133-141)
MA IC 11	-	139 (138-139)
MA GHI 11	256	136 (90-209)
MA IC 13	197	154 (148-156)
MA IC 14	144	158 (137-167)
MA N 4	125	138 (137-167)

e de 5 a 20% NaCl equivalente em peso, respectivamente. As modas de temperatura (T_H) de 10 populações de dados dos diversos depósitos do Grupo Vazante, do Grupo Bambuí e do Grupo Una, variam entre 130°C e 210°C. Isto pode corroborar a hipótese de um processo metalogênico comum, possivelmente relacionado a uma época do final do Neoproterozóico, conforme proposto por Misi *et al.* (2005).

Por outro lado, quando analisados em conjunto, todos os dados de T_H e salinidade coincidem com os dos depósitos do tipo IRISH (ou *Irlandês*), inclusive os de fluorita de Serra do Ramalho e de Montalvânia (Fig. 11). As temperaturas relativamente altas, com mais de 80% dos dados acima de 150°C, assim como as baixas salinidades (mais de 80% abaixo de 15% NaCl equiv.), dificultam a classificar os depósitos de Pb-Zn do Cráton do São Francisco como do tipo Vale do Mississippi (MVT).

Embora não seja intenção dos autores deste trabalho fazer uso indiscriminado de modelos pré-estabelecidos, é preciso admitir que ambos os modelos referidos (MVT e IRISH) possuem caracte-

rísticas geotectônicas, isotópicas e de fluidos mineralizantes contrastantes, dentre outras, que refletem diferentes processos metalogenéticos. O modelo MVT clássico pressupõe a existência de ampla circulação de soluções hidrotermais nas encaixantes carbonáticas, geradas a partir de processos orogenéticos adjacentes à bacia. As soluções podem migrar por centenas ou milhares de quilômetros através das rochas regionais, extraíndo os metais e depositando-os em ambientes físico-químicos favoráveis da bacia. Daí a grande distribuição espacial e a sua característica principalmente epigenética, T_H abaixo de 150° , e salinidade alta (acima de 20% NaCl equiv.), dentre outros atributos (Leach & Sangster 1993). Já o modelo IRISH desenvolvido por Banks et al. (2002), apesar de ainda contabilizar muitas controvérsias (ex. Hitzman & Beaty 1996), pressupõe a existência de um ambiente distensivo antes e durante o processo mineralizador, assim como a circulação focalizada das soluções até o sítio de deposição ao longo de falhas e fraturas. Os autores acima defendem e procuram demonstrar que os grandes volumes de fluidos salinos requeridos para formar as mineralizações do tipo IRISH foram gerados por evaporação da água do mar em extensa plataforma, antes de sua penetração na crosta por meio de *falhas extensionais*.

Os dados de inclusões fluidas dos depósitos estudados, assim como os dados geológicos, além de revelar um processo comum possivelmente relacionado a uma mesma época

metalogenética, indicam que a concentração dos metais resultaria de circulação focalizada de soluções hidrotermais, ao longo de falhas e fraturas. Os metais lixiviados de rochas do embasamento próximo e/ou dos próprios sedimentos e transportados em soluções salinas seriam capazes de formar concentrações de sulfetos onde houvesse estoque de enxofre e condições físico-químicas adequadas. Estas e outras constatações com relação aos depósitos estudados (ver Misi et al 2004, 2005) são importantes na construção de modelos metalogenéticos e exploratórios cientificamente fundamentados e, assim, aptos a gerar novas descobertas.

Agradecimentos À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/PADCT III, Contrato 64.99.0264.00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos financeiros de diversos convênios. À Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), Votorantim Metais Zinco (Unidades Morro Agudo e Vazante), Geologia e Sondagens Ltda. (GEOSOL) e ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelo apoio financeiro e de campo. Ao Prof. Roberto Perez Xavier pelo uso do Laboratório de Inclusões do Instituto de Geociências da UNICAMP. Aos relatores da RBG pelos comentários e sugestões. A pesquisa integra o projeto IGCP 450 – *Sediment-Hosted Base Metal Deposits of Western Gondwana*, apoiado pela UNESCO e pela International Union of Geological Sciences (IUGS).

Tabela 7 – Dados de T_H e salinidade dos depósitos de Serra do Ramalho e Montalvânia

Depósito	T_H total (°C)	Moda (°C)	Nº de Medidas	Salinidade (% eq. NaCl)	Nº de Medidas
Santo Antônio	100 - 260	215	21	12,3	24
Campo Alegre	110 - 210	205	12	12,3	37
Morro Preto	100 - 300	155	27	9,8	27
Morro dos Porcos	110 - 310	215	36	12,3	61
Montalvânia	120 - 310	225	25	9,8	29

Referências

- Banks D.A., Boyce A.J., Samson I.M. 2002. Constraints on the origins of fluids forming Irish Zn-Pb-Ba deposits: Evidences from the composition of fluid inclusions. *Econ. Geol.*, **97**:471-480.
- Bodnar R.J. 1998. Additional discussion of apparent low temperature observations that was held in February 1998. <http://www.geology.wisc.edu/~pbrown/fi/disc/loweutec2.html>.
- Burrus R.C. 1997. Short discussion of apparent low eutectic temperature observations that was held during June 1997. <http://www.geology.wisc.edu/~pbrown/fi/disc/loweutec.html>.
- Burrus R.C., 1998. Additional discussion of apparent low temperature observations that was held in February 1998. <http://www.geology.wisc.edu/~pbrown/fi/disc/loweutec2.html>.
- Cunha I.A. 1999. *Estudo Petrográfico e de Inclusões Fluidas das Fácies Mineralizadas em Sulfetos de Morro Agudo, MG*. Dissertação de Mestrado, IG/UFBA, 126p.
- Cunha I.A., Coelho C.E.S., Misi A. 2000. Fluid Inclusion Study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:318-321.
- Elsgaard L., Isaksen M.F., Jorgensen B.B., Alayse A.M., Jannasch H.W. 1994. Microbial sulfate reduction in deep sea sediments at the Guaymas basin hydrothermal vent area: Influence of temperature and substrates. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **58**:3335-3343.

Figura 11 – Temperatura de homogeneização e salinidade em inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias de esfalerita e de fluorita de diversos depósitos e comparação com dados de depósitos clássicos de Zn-Pb. 1 – Mississippi Valley Type, MVT (Goodfellow et al. 1993). 2 – IRISH ou Irlandês (Hitzman 1995). 3 – Sedimentar-exalativo, SEDEX (Goodfellow et al. 1993). Dados de Vazante, Ambrósia e Fagundes obtidos por Monteiro (2002). Dados de Irecê a partir de Kyle & Misi (1997), e dados de fluorita (Serra do Ramalho e Montalvânia) de Martins (2001).

Gandria F., Cardelach E., Canals A., Banks D.A. 2003. Geochemistry of the fluids related to epigenetic carbonate-hosted Zn-Pb deposits in the Maestrat Basin, Eastern Spain: Fluid inclusion and isotope (CI,

- C, O, S, Sr) evidence. *Econ. Geol.*, **98**:933-954.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J., 1994. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals. SEPM Short Course 31, 199p.
- Gomes A.S.R. 1998. *Estudo das mineralizações sulfetadas de Pb-Zn (Ag) da região de Nova Redenção -BA*. Dissertação de Mestrado, IG/UFBA, 92p.
- Gomes A.S.R., Coelho C.E.S., Misi, A. 2000. Fluid Inclusion investigation of the Neoproterozoic Pb-Zn sulfide deposit of Nova Redenção, Bahia, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:315-317.
- Goodfellow W.D., Lydon J.W., Turner, R.J.W., 1993. Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulfide deposits. In: R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, J.M. Duke (eds.), *Mineral Deposits Modelling*. Geological Association of Canada, Special Paper, 40 pp. 201-251.
- Heijlen W., Muchez P., Banks D.A., Schneider H.K., Keppens E. 2003. Carbonate-hosted Zn-Pb deposits in Upper Silesia, Poland: Origin and evolution of mineralizing fluids and constraints on genetic models. *Econ. Geol.*, **98**:911-932.
- Hitzman M.W. 1995. Mineralization in the Irish Zn-Pb-(Ba-Ag) orefield. In: K.E. Anderson, J. Ashton, G. Earls, M. Hitzman, S. Tear (eds.), *Irish Carbonate-Hosted Zn-Pb Deposits*, Society of Economic Geology Guidebook Series, Irish Association of Economic Geology, Fort Collins, CO (USA), 21 pp. 25-61.
- Hitzman M.W. & Beaty D.W. 1996. The Irish Zn-Pb-(Ba) orefield. In: D.F. Sangster (ed.), *Carbonate-Hosted Lead-Zinc Deposits*, Economic Geology, 75th Ann. Vol., Special Publication, 4, pp. 112-143.
- Jorgensen B.B., Isaksen M.F., Jannasch H.V., 1992. Bacterial sulfate reduction above 100°C in deep sea hydrothermal vent sediments. *Science*, **258**:1756-1757.
- Kyle J.R. & Misi A. 1997. Origin of Zn-Pb-Ag sulfide deposits within Upper Proterozoic phosphate-rich carbonate strata, Irecê basin, Bahia, Brazil. *Intern. Geol. Rev.* **39**:383-399.
- Kontak D. 1995. A study of fluid inclusions in sulfide and nonsulfide mineral phases from a carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Gays River, Nova Scotia, Canada. *Econ. Geol.*, **93**:793-817.
- Leach D.L. & Sangster D.F. 1993. Mississippi Valley-type Lead-Zinc deposits. In: Kirkham, R.V.; Sinclair, W.D.; Thorpe, R.I. & Duke, J.M. (eds.), *Mineral Deposits Modeling*, Geol. Ass. Canadá, Special Paper, 40 pp. 289-314.
- Martins V.S. 2001. *Estudos de Inclusões Fluidas e de Isótopos de Estrôncio dos Depósitos de Fluorita da Serra do Ramalho (Bahia) e Montalvânia (Minas Gerais)*. Dissertação de Mestrado, IG/UFBA, 84p.
- McNaughton K. & Smith T.E. 1986. A fluid inclusion study of sphalerite and dolomite from the Nanisivik lead-zinc deposit, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Econ. Geol.*, **81**:713-720.
- Misi A. 1999. *Um modelo de evolução metalogénica para os depósitos de zinco e chumbo hospedados em sedimentos proterozóicos de cobertura do Cráton do São Francisco (Bahia e Minas Gerais)*. Tese Professor Titular, IG/UFBA, 151 p.
- Misi A. & Kyle J. R. 1994. Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil: *Jour. Sed. Research*, **A 64**:299-310.
- Misi A., Iyer S.S., Coelho C.E.S., Tassinari C.G.C., Franca-Rocha, W.J.S., Gomes A.S.R., Cunha I. A., Teophilous T., Sanches A.L. 2000. A Metallogenic Evolution Model for the Lead-Zinc Deposits of the Meso and Neoproterozoic Sedimentary Basins of the São Francisco Craton, Bahia and Minas Gerais, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:302-305.
- Misi A., Iyer S.S., Tassinari C.G.C., Franca-Rocha W.J.S., Coelho C.E.S., Cunha I. A., Gomes A.S.R. 2004. Dados isotópicos de chumbo em sulfetos e a evolução metalogénica dos depósitos de zinco e chumbo das coberturas neoproterozóicas do Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. de Geoc.*, **34**:263-274.
- Misi A., Iyer S.S., Coelho C. E. S., Tassinari, C. C. G., Franca-Rocha W.J.S., Cunha I.A., Gomes A.S.R., Oliveira T.F., Teixeira, J.B.G., Conceição-Filho, V.M. 2005. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and Correlative Sequences, São Francisco Craton, Brazil: A Review and a Possible Metallogenic Evolution Model. *Ore Geol. Rev.*, **26**:263-304.
- Monteiro L.V.S. 2002. *Modelamento Metalogénico dos depósitos de Zn de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, IG/USP, 319p.
- Ohmoto H. & Rye R.O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: H.L. Barnes (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley & Sons, New York, pp. 509 – 567.
- Oliveira T.F. 1998. As minas de Vazante e de Morro Agudo, Minas Gerais. In: CAPES-PADCT/ADIMB/SBG-BA/SE/UFBA, Workshop Depósitos Minerais Brasileiros de Metais Base, Salvador, Anais, p. 48-57.
- Roedder E. 1967. Environment of deposition of stratiform (Mississippi Valley-type) ore deposits, from studies of fluid inclusion. In: Brown, J.S. (ed.), *Genesis of Stratiform Lead-Zinc-Baryte-Fluorite Deposits in Carbonate Rocks*. Soc. Econ. Geologists Monograph 3, pp. 349-362.
- Roedder E. 1984. *Fluid Inclusions*. Mineral. Soc. Am. Review Mineralogy 12, 646 pp.
- Romagna G. & Costa R.R. 1988. Jazida de Zinco e Chumbo de Morro Agudo, Paracatu, Minas Gerais. In: C. Schobbenhaus & C.E.S. Coelho (eds.), *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, DNPM/CVRD, 3 pp. 11-121.
- Romagna G. & Costa R.R. 1989. The Morro Agudo zinc and lead ore deposit, Paracatu, Minas Gerais. Excursion Guide: Intern. Geoch. Congr., SBGq, Brasília, pp. 149-163.
- Samson I.M. & Russel M.J. 1987. Genesis of the Silvermines zinc-lead-barite deposit, Ireland: Fluid inclusion and stable isotope evidence. *Econ. Geol.*, **82**:371-394.
- Spry P.G. & Fuhrmann G.D. 1994. Additional fluid inclusion data for the Illinois-Kentucky fluorspar district: Evidence for the lack of a regional trend. *Econ. Geol.*, **89**:288 - 306.
- William-Jones A.E., Schrijver K., Dig, R., Sangaster, D.F. 1992. A model for epigenetic Ba-Pb-Zn mineralization in the Appalachian belt, Quebec. Evidence from fluid inclusions and isotopes. *Econ. Geol.*, **87**:154 – 174.

Manuscrito A-1565

Recebido em 28 de dezembro de 2004

Revisão dos autores em 15 de novembro de 2005

Revisão aceita em 20 de dezembro de 2005