

# ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS EM VEIOS DE QUARTZO E CARBONATO (± SULFETOS-SULFOSSAIS) DO DEPÓSITO CARVOARIA VELHA, LINEAMENTO AURÍFERO CÓRREGO DO SÍTIO, SANTA BÁRBARA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Yuri Ribeiro<sup>1</sup>, Rosaline C. Figueiredo e Silva<sup>1</sup>, Lydia M. Lobato<sup>1</sup>, Luis Claudio Lima<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brazil - 31270-010.  
*yurigeol@gmail.com; rosalinecris@yahoo.com.br; lobato@netuno.lcc.ufmg.br*

<sup>2</sup>Aurizona Mineração, Rua Cons. Hilton Rodrigues, 5 qd 37 sl 101, Calhau, São Luís – MA, Brasil. *lclima@aurex.com.br*

*Recebido em 19 de dezembro de 2012; aceito em 10 de setembro de 2013*

**RESUMO:** O Lineamento Aurífero Córrego do Sítio corresponde a uma zona de cisalhamento dúctil com um *trend* NE-SW controlando quatorze depósitos de ouro, no qual se inclui o depósito Carvoaria Velha. A mineralização de ouro se hospeda em rochas arqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas, estas correspondem a filitos e xistos finos alterados a quartzo, carbonato e sericita. O estilo de mineralização principal ocorre em veios de quartzo-carbonato-sulfetos (±sulfossais). Os tipos de veios são classificados como: Veios V1 – quartzo-ankerita-sulfetos-berthierita-ouro – são paralelos à principal foliação  $S_n$ , e estão localmente mineralizados em ouro. Veios V2 – quartzo-ankerita-pirita – são veios desenvolvidos no plano de clivagem de crenulação  $S_{n+1}$ , extensionais e raramente mineralizados. Veios V3 – quartzo-ankerita – são veios de preenchimento de fraturas  $S_{n+3}$ , geralmente não contêm sulfetos e sulfossais. Veios V4 – quartzo-calcita – são veios restritos aos diques e *sills* metamáficos, são extensionais e sem orientação preferencial. Os minerais-minério são arsenopirita, pirita, berthierita e pirotita. Microssonda eletrônica revela a presença de fases metálicas ricas em As, Sb e Co (boulangerita, tetraedrita, cobalita e ullmanita), que sobrecrescem aos minerais-minério. Dados de inclusões fluidas caracterizam fluido mineralizador com composição  $H_2O-CO_2\pm CH_4-NaCl$ , com traços de  $N_2$ , podendo conter outros cátions além de  $Na^+$ , como  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Fe^{2+}$ . Estes fluidos teriam pelo menos dois estágio de evolução: i) fluido inicial aprisionado em quartzo fumê, com salinidade moderada (~8.5% em peso de NaCl eq.) e temperatura mínima de  $280\pm17^\circ C$ ; e ii) fluido tardio, representado por fluido aprisionado em quartzo recristalizado, menos salino (~4.6% em peso de NaCl eq.) e temperatura mínima de  $315\pm33^\circ C$ . Os dados obtidos correspondem a valores típicos de fluido metamórfico característico de depósitos tipo *orogenic gold*.

**Palavras-chave:** mineralização aurífera, inclusões fluidas, Quadrilátero Ferrífero, alteração hidrotermal

**Abstract:** FLUID INCLUSION STUDIES IN QUARTZ-CARBONATE(± SULFIDES-SULFO SALTS) VEINS FROM CARVOARIA VELHA DEPOSIT, CÓRREGO DO SÍTIO GOLD LINEAMENT, SANTA BÁRBARA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG. The Córrego do Sítio Lineament is defined as a 16 km long, NE-SW trending ductile shear zone which controls fourteen deposits, one of them is Carvoaria Velha deposit. The mineralization is hosted in Archean rocks of Rio das Velhas greenstone belt, represented for carbonaceous phyllite and schists with carbonate, sericite, sulphide-sulphosalts and silica alteration. The main gold mineralization styles at the Córrego do Sítio lineament are quartz-carbonate-sulphide±sulphosalts veins of varied distribution. They are classified as: V1 veins – quartz-ankerite-pyrite-berthierite-gold – parallel to the main regional foliation  $S_n$ , and usually mineralized in gold; V2 veins – quartz-ankerite-pirite – developed at the crenulation cleavage  $S_{n+1}$ , extensional and rarely gold mineralized; V3 veins – quartz-ankerite – filling  $S_{n+3}$  fractures, usually free of sulphides and sulphosalts; V4 veins – quartz-calcite – of restricted occurrence in metamorphic dykes and sills; they crosscut the metasedimentary sequence, are extensional and display no preferential orientation. The most common sulphides in all vein types are arsenopyrite, pyrite and pyrrhotite. Microprobe studies show the presence of metallic phases rich in Sb, Pb and Co, such as stibnite, ullmanite, tetrahedrite, galena, cobaltite and, commonly overgrowing. Based on the microthermometric data, the hydrothermal fluid is interpreted to reflect at least two evolved stages: i) an early fluid stage, trapped in smoky quartz, of moderate ~8.5 eq. wt% NaCl salinity, and minimal trapping temperature of  $280\pm17^\circ C$ ; and ii) a late-stage fluid trapped in recrystallized quartz with lower ~4.6 eq. wt% NaCl salinity, and a minimal trapping temperature of  $315\pm33^\circ C$ . These values are typical of metamorphic fluid characteristic of orogenic gold deposits.

**Keywords:** gold mineralization, fluid inclusions, Quadrilátero Ferrífero, hydrothermal alteration

## 1. INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma das mais importantes províncias metalogenéticas do mundo, contendo importantes depósitos de ferro, e ouro do tipo *world-class*. Está localizado na borda sul de um dos núcleos cratônicos brasileiros, o Cráton do São Francisco. O *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GBRV) é a unidade basal das supracrustais que compõe o QF, e hospeda seus principais depósitos auríferos. A mineralização hospeda-se principalmente em formações ferríferas bandadas, vulcânicas máficas e veios de quartzo associados ao Grupo Nova Lima, porção inferior do *greenstone belt* Rio das Velhas.

Em função de sua importância científica, econômica e história o QF tem sido alvo de grandes investimentos exploratórios, mapeamentos governamentais e de diversos estudos acadêmicos, como dissertações de mestrado, teses de doutorados, trabalhos de graduação e mapas geológicos; na busca do entendimento dos padrões estruturais e estilos de mineralização aurífera (e. g. Lobato *et al.* 1998, Lobato *et al.* 2001a, b, 2007, Pereira *et al.* 2007, Baltazar e Zucchetti 2007, Junqueira *et al.* 2007, Ribeiro-Rodrigues *et al.* 2007, Vial *et al.* 2007). O avanço do conhecimento dos depósitos orogênicos e a busca de modelos quantitativos exigem novos parâmetros, atualmente

inexistentes ou insuficientes, tais como dados de isótopos estáveis (C, S, O), isótopos radiogênicos, incluindo aqueles com objetivo geocronológico, estudos de inclusões fluidas e determinações de elementos químicos tanto em grãos de minerais-minério como em inclusões fluidas.

O lineamento aurífero Córrego do Sítio localiza-se na porção nordeste do QF, no distrito de Brumal, município de Santa Bárbara-MG. Essa faixa corresponde a um lineamento aurífero de cerca de 16 km de comprimento, que é composto pelo alinhamento de quatorze escavações mineiras e duas anomalias geoquímicas de ouro, ao longo de um trend NE-SW (Lima 2012). Destacam-se nesta região do QF grandes minas de minério de ferro — como Brucutu e Gongo Soco (Vale 2012) — e as minas de ouro de Pilar (Jaguar 2012) e da produção histórica de São Bento (Pereira et al. 2007) (Fig. 1). Em 1981, na busca da continuidade da mineralização da Mina São Bento, esse lineamento foi descoberto, através de mapeamento geológico e análises químicas de solos, de sedimentos de corrente e de rochas, pela equipe de exploração da UNIGEO Ltda. (Porto 2008). Os trabalhos de lavra dos corpos de minério transcorreram no período entre 1990 e 1998, sendo retomados em 2002, pela AngloGold Ashanti Brasil Mineração Ltda. (AGABM, 2011) e persistindo até os dias de hoje, com uma produção acumulada próxima de 11 toneladas de ouro (Lima 2012). O minério tem teor médio de 4,27 g/t, em uma reserva que alcança 3,7 milhões de onças, dentre as quais, 2,1 milhões de onças de recursos lavráveis (minérios sulfetado e oxidado) (AGABM, 2011).

O depósito Carvoaria Velha, um dos depósitos do lineamento Córrego do Sítio, será o alvo desse trabalho. Este trabalho propõe desenvolver estudos petrográficos dos veios de quartzo-carbonato-sulfetos±sulfossais, de química mineral, de inclusões fluidas, e de isótopos de oxigênio e enxofre para entendimento e caracterização do fluido envolvido na mineralização aurífera. Com tais estudos, pretende-se, também, contribuir para o conhecimento geológico do QF, produzindo novos dados sobre um de seus depósitos. Os objetivos específicos do trabalho são:

Classificar as diversas gerações de veios observados nos corpos de minério e rochas encaixantes;

Analizar a composição dos fluidos hidrotermais em cristais de quartzo

Definir condições físico-químicas (P-T-composição) e prováveis fontes de fluidos (metamórficos/magmáticos/água meteórica?) associados aos eventos estruturais e hidrotermais.

## 2. MÉTODOS DE TRABALHO

A metodologia para caracterização do depósito de ouro Carvoaria Velha inclui as seguintes ferramentas:

1) Amostragem dos veios de quartzo-carbonato em amostras coletadas do testemunho de sondagem número FCS 926. A seleção das amostras ocorreu de forma a representar todos os tipos de veios, englobando porções mineralizadas ou não dos testemunhos de sondagem rotativa diamantada;

2) Estudos petrográficos macro e microscópicos, focados nos veios e vénulas de quartzo-carbonato. Definição das características petrográficas/mineralógicas dos minérios.

3) Análises em cristais de carbonato, sulfetos e sulfossais, em microssonda eletrônica JEOL, modelo JXA 8900RL, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (LMA), para quantificação percentual mineralógica de minerais que não foram identificados por microscopia ótica convencional (e.g. classificação dos tipos de carbonatos e sulfossais).

4) Mapeamento petrográfico de detalhe das inclusões fluidas (IFs) em quartzo de veios/brechas mineralizados a ouro, permitindo caracterizar os tipos, os tamanhos, as morfologias e a definição de FIAs (*fluid inclusion assemblages*). Foi utilizado microscópio petrográfico Leica, com oculares de 10x e objetivas de 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x e 63x;

5) Estudos microtermométricos de resfriamento e aquecimento de IFs foram conduzidos utilizando-se uma platina resfriamento (até -180°C) e aquecimento (até ~500°C), automática Linkam THMSG600 com um controlador de temperaturas TMS 93. A platina foi calibrada com inclusões sintéticas de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O fornecidas pela Linkam. A técnica cíclica (Goldstein e Reynolds 1994) foi utilizada para obter melhor precisão nas medidas das temperaturas de transição das fases carbônicas. A precisão das medidas microtermométricas é de ± 0,1°C para resfriamento e de ± 1°C para temperaturas entre de 200-500°C. Salinidades aparentes são reportadas em peso percentual equivalente de NaCl. Os cálculos de salinidade e densidade foram realizados com uso do programa MacFlinCor (Brown e Hagemann 1995).

6) Espectroscopia Raman para avaliar os gases e fluido contido nas IFs. Essa técnica permite uma correlação entre a composição e o comportamento de fase, durante os estudos de resfriamento das inclusões fluidas. Espectrômetro Raman LABRAM-HR 800, Horiba/Jobin Yvon, laser HeNe (632,8nm), 6 mW de potência incide na amostra por um microscópio Olympus BX-41 (objetivas 100x). A luz espalhada recolhida (pelo mesmo microscópio) após

passar por um filtro *notch* (que rejeita a linha do laser) e por uma rede de difração (600g/mm) é detectada por uma CCD (*charge couple device*) resfriada a nitrogênio líquido. O tempo de aquisição variou entre 10 e 30s e para aumentar a razão sinal/ruído o número de aquisições foi de 10 vezes. As medições foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Raman – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG.

### 3. GEOLOGIA REGIONAL

O QF está situado na porção sul de um dos núcleos cratônicos pré-cambrianos brasileiros, o denominado Cráton São Francisco (Almeida 1977; Inda *et al.* 1984; Teixeira e Figueiredo 1994). A geologia do QF é comumente dividida em três conjuntos de rochas principais as quais podem ser definidas pela ocorrência de: 1) Complexos granito-gnáissicos, que correspondem ao embasamento cristalino; 2) *Greenstone belt* arqueano e intrusões paleoproterozóicas, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas e faixas correlatas; 3) Unidades metassedimentares proterozóicas, representadas pelo Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço (Fig.1).

#### 3.1. Estratigrafia

Os complexos granito-gnáissicos têm composição trondjemítica-tonalítica-granodiorítica (TTG), são constituídos por rochas gnáissicas polideformadas e, subordinadamente, por granitos, anfibolitos e intrusões maficas a ultramáficas (Herz 1970, Ladeira *et al.* 1983, Teixeira *et al.* 1996). São representados pelos complexos Bonfim, Caeté, Belo Horizonte, Bação e Santa Bárbara (Fig.1) (Herz 1970). Sobre esses complexos, podem ocorrer intrusões de granitos de variada composição – neoarqueanos e paleoproterozóicos, foliados a não foliados – variando em dimensão de veios a grandes corpos (Noce *et al.* 2007). Análises geocronológicas em amostras de rochas de alguns desses complexos revelaram que a formação ocorreu em intervalos entre 3380 e 2900 Ma (Teixeira *et al.* 1996). A migmatização deu-se entre 2860 ± 14 Ma e 2772 ± 6 Ma, e o metamorfismo transamazônico ocorreu entre 2041 ± 5 Ma (Noce *et al.* 1998, idades U-Pb em zircão, in Baltazar e Zucchetti 2007).

O *Greenstone belt* arqueano Rio das Velhas (GBRV) corresponde a uma sequência de rochas metavulcanossedimentares de idade arqueana (Dorr *et al.* 1957, Schorscher 1976, Almeida 1977). Divide-se em dois grupos: Nova Lima, na base e Maquiné, no topo. O Grupo Nova Lima é formado por três principais conjuntos de rochas: uma unidade basal formada por rochas vulcânicas toleíticas-komatiíticas, associadas a rochas sedimentares químicas; uma unidade intermediária vulcanoclástica, associada a vulcanismo felsico; e uma unidade superior formada por sedimentos clásticos (Baltazar e Zucchetti (2007)). Os maiores depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero são hospedados em rochas da porção basal do GBRV

(Lobato 2001a). O Grupo Maquiné foi dividido nas formações Palmital (O'Rourke 1957), na base, e Casa Forte (Gair 1962), no topo, sendo que a primeira é constituída por quartzito e quartzo filito e a última, por quartzitos e conglomerados. Os contatos da sequência metavulcanossedimentar com terrenos granito-gnáissicos são de natureza intrusiva ou por falhas. Schorscher (1978) descreve lavas komatiíticas na base da sequência, denominando-as Grupo Quebra Ossos.

Trabalhos mais recentes propõem uma subdivisão estratigráfica a partir do agrupamento dos litotipos que constituem os Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné, separando-os em associações de litofácies. As associações de litofácies da base para o topo são: vulcânica máfica-ultramáfica, vulcanossedimentar química, sedimentar clástico-química, vulcanoclástica, resedimentada, costeira (ou litorânea) e não marinha (Baltazar e Pedreira 1998, Baltazar e Zucchetti 1996, Zucchetti e Baltazar 2000, Lobato 2005, e Baltazar e Zucchetti 2007). Essas associações são descritas abaixo e correlacionadas às unidades já existentes.

**1) Máfica-ultramáfica** → Composta de lavas maficas e ultramáficas, com intrusões menores de gabbro, anortosito e peridotito, além de intercalações de formação ferrífera bandada (FFB), chert ferruginoso, pelitos carbonosos, turbiditos e, raramente, rochas vulcanoclásticas felsicas. Corresponde ao grupo Quebra Osso e unidade Ouro Fino do Grupo Nova Lima.

**2) Vulcanossedimentar Química** → Correspondente à unidade Morro Vermelho, é formada por rochas toleíticas intercaladas com formação ferrífera bandada (FFB) e chert ferruginoso e, em menor proporção, rochas sedimentares clásticas com abundantes turbiditos e pelitos carbonosos; pelitos são intercalados com rochas sedimentares químicas.

**3) Metassedimentar Clástico Química** → É caracterizada por alternância de rochas sedimentares clásticas e químicas, de granulometria fina. Pelitos (xistos micáceos e cloríticos) são intercalados com finas camadas de FFB e, subordinadamente, chert e xistos carbonosos. Corresponde à unidade Santa Quitéria (ocorre na área de estudo).

**4) Metavulcanoclástica** → É formada por rochas vulcanoclásticas felsicas e maficas. Corresponde às unidades Ribeirão Vermelho e Mestre Caetano.

**5) Ressedimentada** → É amplamente distribuída no QF e inclui três diferentes sequências de grauvaca-argilito — duas metamorfisadas na fácie xisto verde e uma na fácie anfibolito. Corresponde, nos setores norte e leste, às unidades Mindá e

**Córrego do Sítio** (ocorre na área de estudo); no setor sul, às unidades Catarina Mendes, Fazenda Velha e Córrego da Paina; e à unidade Rio de Pedras da Formação Palmital do Grupo Maquiné.

**6) Costeira (ou litorânea)** → Essa associação é restrita a uma pequena área ao nordeste do complexo Bação, é composta por arenitos com estratificação cruzada de médio a grande porte, com marcas de onda, com estratificação cruzada do tipo espinha de peixe e arenitos-siltitos. Corresponde às unidades Pau D'Óleo e Andaimes.

**7) Não-marinha** → É formada por arenitos-conglomerados e arenitos de granulometria grossa a fina. Correponde às unidades Chica Dona, Jaguára, Córrego do Engenho e Capanema, da Formação Casa Forte do Grupo Maquiné.

As idades por U-Pb em zircão detritico de rochas dos Supergrupos Nova Lima e Maquiné sugerem vulcanismo felsico com idade de 2772 Ma (Noce et al., 2007) e idade mínima de 2,85 Ga (Rosière et al., 2008).

As unidades metassedimentares proterozóicas são compostas pelo Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço. O Supergrupo Minas (SM) (Loczy e Ladeira 1976) é uma sequência metassedimentar interpretado por Chemale et al. (1994) como uma bacia intracratônica. Já Marshak e Alkmim (1989) o interpreta como uma sequência supracrustal de plataforma com substrato sílico. O SM está em discordância tectônica sobre as sequências arqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas (GBRV) e é composto por sedimentos clásticos/químicos em um pacote constituído por quartzitos, metaconglomerados, metapelitos e uma espessa sequência de formações ferríferas predominantemente do tipo Lago Superior, com corpos de minério de alto teor (~64% Fe) (Rosière e

Chemale 2000). O Grupo Itacolomi é representado por sedimentos clásticos imaturos (Dorr 1969), e contém zircão com idade mínima de 2060 Ma (LA-ICPMS Pb-Pb in zircão; Machado et al. 1996). O Supergrupo Espinhaço cobre uma pequena área no QF e está sobreposto ao SM em discordância angular com uma sequência de rift incluindo brechas sedimentares, conglomerados e quartzitos. Seu desenvolvimento deu-se via processos de rifteamento no Estateriano (Brito-Neves et al. 1995), que levaram à deposição de sedimentos clásticos continentais e marinhas, entre 1840 a 1714 Ma (U-Pb; Machado et al. 1989).

### 3.2. Geologia Estrutural

O QF tem geometria delineada por megadobras siniformes e antiformes que, na sua parte oriental, são truncadas por cinturões de falhas de empurrão de direções norte-sul (Baltazar 2005). Os sinclinais estabelecem os limites do QF a norte, a sul, a oeste e a leste, representados, respectivamente, pelo homoclinal da serra do Curral, pelo sinclinal Dom Bosco, pelo sinclinal Moeda (Fig.1) e pelo sinclinal Santa Rita. Alkmim e Marshak (1998) descreve o QF como uma província do tipo domos e quilhas, onde embasamento ocorre em domos (e.g. Bação, Bonfim, Santa Barbará etc) envolvidos por quilhas que contém o GBRV e SM. Descreve ainda que zonas de cisalhamento ocorrem no contato entre as supracrustais e o embasamento em todos os domos.

Diversas são as interpretações e modelos de evolução tectono-estruturais do QF. No entanto, todos os autores compartilham a opinião de que ocorreu mais de um evento de deformação e metamorfismo para obtenção do padrão das estruturas regionais observado no QF. A tabela 1 apresenta um resumo de alguns dos trabalhos sobre a evolução tectono-estrutural do QF.

Tabela 1 - Síntese da evolução tectono-estrutural do Quadrilátero Ferrífero segundo diversos autores (modificado de Ribeiro e Shinzato 2010).

Dorr (1969)	Relata três importantes períodos de deformação. A primeira, deformação mais antiga, traduz-se em um dobramento das rochas do GBRV antes da deposição dos sedimentos da SM. A segunda deformação, que seria pós-Minas, teria provocado apenas o arqueamento e soerguimento do SM antes da sedimentação do Grupo Itacolomi. A terceira e mais tardia deformação, orogenia principal da região, mais intensa na sua porção leste, resulta num sistema de dobras-falhas de empurrão com compressão a partir de E-SE.
Corrêa Neto e Baltazar (1995)	Descreve três eventos deformacionais para o Supergrupo Rio das Velhas. O mais antigo é compressional e do Arqueano; o segundo, extensional, relacionado à ascensão de core-complexes; e o mais jovem, compressional.
Alkmim e Marshak (1998)	Sugere um evento contracional seguido por um colapso orogênico, consistindo de empurrões com vergências para NW e o desenvolvimento posterior de estruturas em domos-e-bacias.
Projeto Rio das Velhas (DNPM/CPRM) (Zucchetti e Baltazar 1998)	Descreve três eventos deformacionais a partir da análise dos dados estruturais levantados no GBRV: D <sub>1</sub> , compressional, com transporte tectônico de norte para sul, de idade arqueana, gerando falhas de empurrão e dobras com vergências para S e SW; D <sub>2</sub> , extensional, responsável pela colocação de granitos intrusivos, como o Complexo Bação; D <sub>3</sub> , compressional, com transporte tectônico de E para W, responsável pelo cinturão de dobras-falhas de direção geral N-S.

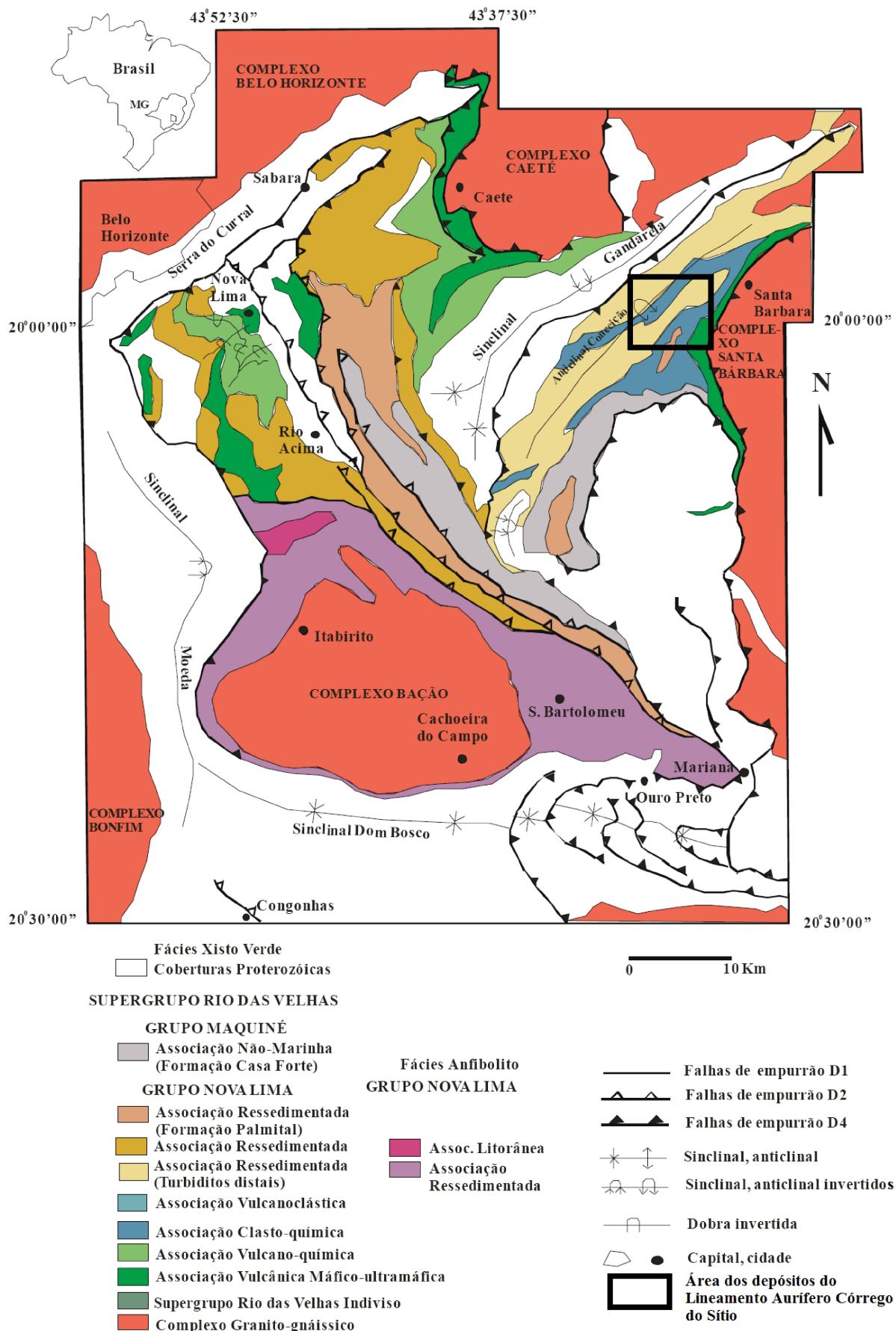


Figura 1 - Mapa geológico com subdivisão do Supergrupo Rio das Velhas em associação de litofácies (modificado de Baltazar et al. 2005), com área do depósito destacada e detalhada na figura 2.

### 3.3. Metamorfismo

No QF pode ser observado um gradiente metamórfico e deformacional que aumenta de oeste para leste (Hoefs *et al.* 1982). Ribeiro-Rodrigues e Lobato (1999) descrevem que o grau metamórfico varia também dentro de diferentes unidades litológicas. Os Terrenos Granito-Gnáissicos (Fig. 1) apresentam uma evolução metamórfica complexa com metamorfismo progressivo de fácies anfibolito à granulito, também mostrando retrometamorfismo de fácies xisto verde (Cordani *et al.* 1980, Herz 1978). As sequências supracrustais (Supergrupos Rio das Velhas, Minas e Espinhaço e Grupos Sabará e Itacolomi) exibem metamorfismo variando de fácies xisto-verde a anfibolito médio. Localmente, os tipos rochosos apresentam paragêneses indicativas de metamorfismo incipiente. Também há registro de paragêneses típicas de metamorfismo de contato próximo a corpos graníticos intrusivos (Chemale Jr. *et al.* 1994, Herz 1978, Hoefs *et al.* 1982, Jordt-Evangelista 1984, Marshak e Alkmim 1989, Marshak *et al.* 1992).

## 4. GEOLOGIA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

O lineamento Córrego do Sítio está inserido no setor nordeste do QF (Figs. 1 e 2). Segundo Baltazar e Zucchetti (2007), as unidades litoestratigráficas da região NE do Quadrilátero Ferrífero estão agrupadas na associação de litofácies Clástico Química e na Ressedimentada, respectivamente, nas unidades Santa Quitéria e Córrego do Sítio – no sentido de Zucchetti *et al.* (1998) –, posicionadas no topo do

Grupo Nova Lima, que mergulha para leste, sob as rochas da associação Máfica-ultramáfica (unidade Quebra Ossos). Ainda ocorrem unidades do Grupo Maquiné, nas proximidades da Serra do Caraça; e o complexo Santa Barbará, caracterizado por gnaisses tonalíticos-trondjemíticos, com migmatização, e granitos, com metassomatismo que gerou leucogranitos (Malouf e Raposo, 1996).

Nessa porção nordeste do QF, o GBRV e o SM são estruturalmente controlados pelas megaestruturas denominadas Sinclinal Gandarela e Anticlinal Conceição (Fig. 1) e são cortados pelos sistemas de falha do Fundão e da Água Quente (Baltazar e Silva, 1996).

A mineralização no Lineamento Córrego do Sítio hospeda-se, principalmente, na associação de litofácies Ressedimentada (unidades Córrego do Sítio e Mindá). Na área, essas unidades correspondem a uma alternância entre metapelitos e metapsamitos (com acamamento gradacional e estratificações plano-paralelas e cruzadas); e, em menor proporção, apresentam níveis delgados de xistos carbonosos e FFB. Essa unidade é interpretada por Zucchetti *et al.* (1998) como resultantes de deposição de correntes de turbidez. A mineralogia predominante é clorita, muscovita, carbonato e quartzo. Como minerais acessórios, ocorrem opacos, rutilo e zircão. Essas rochas são classificadas como quartzo-carbonato-mica-clorita xistos, com variações percentuais entre esses componentes. São produtos do metamorfismo em fácies xisto verde de grauvacas, arenitos e pelitos.

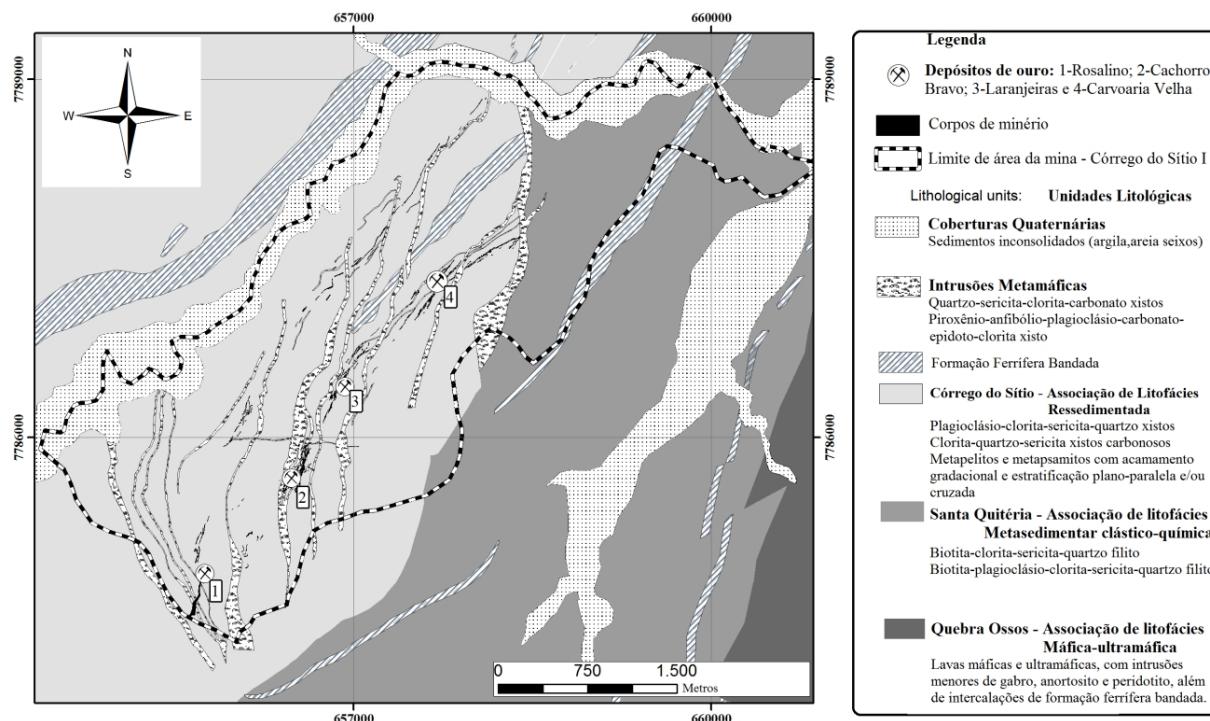


Figura 2 – Mapa litológico da porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, com localização dos depósitos do Lineamento aurífero de Córrego do Sítio (modificado de Lima 2012 e Zucchetti *et al.* 1998).

Ainda ocorre um enxame de diques metamáficos de idade incerta, que possuem orientações diversas, predominando a direção NE-SW (Fig.2) com mergulho para SE, em geral, subparalelos à sequência metassedimentar. Esses diques são corpos tabulares de espessura métrica a decamétrica e de continuidade quilométrica, compostos por metagabros em diferentes estágios de alteração a carbonato, clorita e sericita (Lima 2012). Ocorrem quatro tipos de diques, que são localmente denominados como DB1, DB2, DB3 e DB4, sendo eles: DB1) Metabásica com alteração intermediária por cloritização e subordinada carbonatação; DB2 / DB3) Metabásica com alteração avançada com carbonatação e muscovitização; DB4) Metabásica com alteração incipiente com cloritização, preservando relictos de piroxênio. E, por fim, na porção noroeste da área, as rochas estão sobre uma espessa cobertura laterítica recente.

#### 4.1. Mineralização do Lineamento Córrego do Sítio

A mineralização de ouro orogênico no lineamento Córrego do Sítio é estruturalmente controlada e associada à alteração hidrotermal que resultou em formação de clorita, carbonato, sericita, sulfetos-sulfossais, e grande quantidade de alteração a sílica. Devido à natureza das rochas metassedimentares, o contraste entre sequências inalteradas e alteradas é geralmente sutil, e encontra-se detalhado por Porto (2008) e Lima (2012). De forma geral, o minério aurífero ocorre em duas formas no lineamento Córrego do Sítio: 1) minério disseminado paralelamente a foliação principal; 2) minério em veios quartzo-carbonático de distribuição variada.

O minério disseminado nas rochas metassedimentares é composto de sulfetos de granulação fina ( $<100 \mu\text{m}$ ), essencialmente arsenopirita, pirrotita e pirita, cristalizados em estágios diferentes e alguns durante os processos de deformação da rocha (David 2006). Os sulfetos formam microlentes anastomosadas encaixadas em laminações de quartzo-sericita xistos carbonosos, ou metagrauvacas, da unidade Córrego do Sítio (Lima 2012).

O minério em veios de quartzo e carbonatos apresenta além dos sulfetos reconhecidos no minério disseminado como pirita e pirrotita, os sulfossais tetraedrita-tenantita, berthierita, ullmanita, gersdorfta e ouro livre em quartzo. Os veios podem formar uma densa trama, sendo que nos *lodes* mineralizados são estreitos e alongados, lenticulares, boudinados e, localmente, rompidos.

Lima (2012) identificou através de estudo de composição mineralógica, textura mineral que o ouro ocorre em cinco associações: 1) Ouro livre e electrum disseminado em veio de quartzo-

carbonato; 2) Ouro inclusão em arsenopirita que ocorre disseminada, em geral, paralela à foliação principal ( $S_n$ ) e associada a porções micáceas (clorita, sericita ou muscovita) da rocha; 3) Ouro inclusão em berthierita; 4) Ouro inclusão em pirita ou pirrotita que ocorrem disseminados paralelamente à foliação principal nas porções micáceas da rocha; 5) Ouro inclusão em silicatos (quartzo ou micas).

No presente trabalho, as amostras mineralizadas, cujos teores atingem até cerca de 26 g/ton (Fig. 3), correspondem a minérios do tipo em veios quartzo-carbonato que contém os minerais-minério arsenopirita, berthierita, pirita e pirrotita.

#### 4.2. Geologia Estrutural

As rochas mineralizadas do Lineamento Córrego do Sítio estão associadas a zonas de cisalhamento dúctil NE-SW de movimento destral. A conformação estrutural é caracterizada por uma complexa história tectono-evolutiva em pelo menos três eventos deformacionais (Canale 1999, David 2006, Porto 2008 e Lima 2012). Lima (2012) define, a partir de análise estatística aplicada às medidas estruturais nos depósitos Bocaina, Cachorro Bravo, Carvoaria, Crista e Laranjeiras, que a evolução estrutural na área ocorreu em quatro fases de deformação (D). Será abordado o tema em acordo com as proposições desse autor, resumidas na tabela 2.

Na área pesquisada, após a deposição das rochas metassedimentares, o primeiro evento ( $D_n$ ) reconhecido é a produção de dobras fechadas assimétricas e desarmônicas, do tipo Kink, as quais produzem uma foliação ( $S_n$ ) plano axial com *strike* NNE e de mergulho moderado a acentuado para ESE (tab. 2). Essa foliação  $S_n$ , principal foliação regional, possui direção e ângulo de cimento subparalelo ao do acamamento, o que dificulta a distinção entre eles. Ainda ocorrem faixas com uma foliação milonítica ( $S_n$  milonítica) subparalela a  $S_n$  e que são interpretadas como contemporâneas e cogenéticas a  $S_n$ , sendo reflexo de um forte componente de cisalhamento e pertencentes a um único evento progressivo. O segundo evento ( $D_{n+1}$ ) é representado por uma clivagem de crenulação ( $S_{n+1}$ ), tem direção NNE e mergulha moderadamente para noroeste, cortando  $S_n$  em alto ângulo (70-80°). Lima (2012) a interpreta como uma clivagem de crenulação extensional ou como um cisalhamento de Riedel, podendo representar um estágio tardio da fase  $D_n$ . O terceiro evento ( $D_{n+2}$ ) compõe-se de dobras suaves que arqueiam o acamamento, a foliação  $S_n$  e a clivagem de crenulação  $S_{n+1}$ , mantendo o alto ângulo entre as duas últimas e não desenvolve uma foliação bem marcada. A fase  $D_{n+2}$  é um evento que possui maior expressão próximo à superfície e que diminui de intensidade em cotas inferiores. O quarto evento ( $D_{n+3}$ ) está associado à formação de estruturas num ambiente transicional entre dúctil e rúptil. Há predomínio de fraturas paralelizadas, em conjuntos

espaçados de centímetros a metros, além de dobras abertas ou kink folds subordinadas. As dobras abertas têm plano axial de alto ângulo e de direção grosseiramente para NW.

Os veios e vênulas mineralizados estão achatados no plano da foliação  $S_n$ , com direção ortogonal ao plunge das dobras de  $D_n$ - $D_{n+1}$  milonítico. São veios de cisalhamento, apresentam formas de *boudin*, que se estrangulam tanto ao longo do *strike* quanto do *dip*, desenvolvendo uma geometria *pinch-and-swell*, com espaçamento e tamanho variável. As clivagens de crenulação ( $S_{n+1}$ ) e a de fratura ( $S_{n+3}$ ) deslocam os estratos e os veios mineralizados, orientados segundo a foliação  $S_n$ , com um rejeito milimétrico, mas que, localmente, podem alcançar dimensões métricas e interferir na geometria do minério. Nos estudos realizados no presente trabalho, foi possível observar que os veios mineralizados ocorrem em todas as litologias, exceto diques metabásicos, o que sugere a ausência de um controle litológico. Uma tentativa de classificação das diversas famílias de veios é proposta no próximo tópico a partir do entendimento dos aspectos estruturais proposto por Lima (2012).

Tabela 2 - Principais eventos estruturais e as feições relacionadas a eles no Lineamento Córrego do Sítio (modificado de Lima 2012).

EVENTO	ELEMENTOS	OBSERVAÇÕES
<b>Sedimentação e diagênese -</b> Acamamento ( $S_0$ )	-Acamamento em escala milimétrica a métrica; -gradacional; - Estratificação cruzada acanalada de pequeno porte.	-Atitude do acamamento bastante variável devido a dobramentos por fases de deformação superimpostas
<b><math>D_n</math> – Dúctil-dúctil</b>	-Dobras $F_{n+1}$ ; -Dobras assimétricas, apertadas a isoclinais.	$F_n = 45/43$ Az $S_n = 60/116$ Az $L_n$ variável
<b><math>D_n</math> milonítico -</b> Dúctil-rúptil	-Transposição segundo o plano axial de dobras $F_n$ ; -Foliação anastomosada e milonítica com planos S-C-C' - R' - P; -Boudins rotacionados; -Tension gashes sigmoidais e en echelon.	-As zonas de cisalhamento são subparalelas com os contatos litológicos e com as atitudes do acamamento e da foliação principal ( $F_n$ ).
<b><math>D_{n+1}</math> – Dúctil-rúptil</b>	-Clivagem de crenulação -Clivagem de crenulação Espaçada.	$S_{n+1} = 35/285$ Az $L_{n+1} = 4/225$ Az.
<b><math>D_{n+2}</math> – Dúctil-rúptil</b>	-Dobras suaves do acamamento e da foliação principal.	-Não desenvolve foliação ou lineação axial.
<b><math>D_{n+3}</math> – Rúptil-dúctil</b>	-Dobras abertas com plano axial de vertical a alto ângulo em leque; - Clivagem de fratura.	$S_{n+3} = 89/214$ Az.

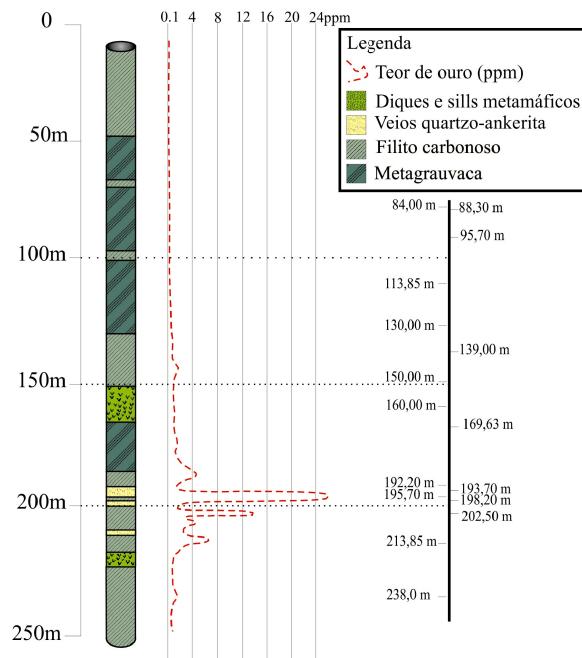


Figura 3 - Figura com perfil do testemunho de sondagem FCS 296 com a distribuição dos teores em ouro (em ppm), e as profundidades em que os veios foram amostrados. (Fonte dos dados de teores: Córrego do Sítio Mineração - Anglogold Ashanti Brasil).

## 5. SISTEMA DE VEIOS DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍITO

Em todos os litotipos do depósito são observadas venulações milimétricas a métricas compostas, principalmente, por quartzo e carbonato e podem, ou não, conter minerais-minério, como sulfetos e sulfossais. A presença desses minerais-minério não está diretamente relacionada a teores econômicos de ouro. Para melhor entendimento da mineralização e da complexa distribuição das venulações, fez-se um estudo detalhado de classificação e de definição dos diferentes tipos de veios para o estudo de inclusões fluidas, e também para o entendimento da evolução estrutural e alteração hidrotermal. Foram selecionadas amostras do testemunho FCS 926 do depósito Carvoaria (Fig. 4; Tabela 3), bem como das galerias dos depósitos Laranjeira no nível 696 e Cachorro Bravo nível 643.

### 5.1. Petrografia dos veios

Os veios estudados estão presentes nos metassedimentos e nos diques e sills metamáficos, podendo ser classificados em termos de estruturação e de mineralogia em quatro famílias: V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> e V<sub>4</sub>, conforme ilustrado na Figura 4.

O veio V<sub>1</sub> – quartzo-ankerita-pirita-berthierita-ouro (<6 m) – tem geometria variada, podendo corresponder a lentes irregulares, dobradas, *pinch and swell* ou boudinadas (Fig. 4), geralmente descontínuas, paralelas à principal foliação regional  $S_n$ . São veios de cisalhamento e podem estar

mineralizados em ouro. Veio V2 – quartzo-ankerita-pirita (<2 m) – são veios desenvolvidos em planos de clivagem de crenulação  $S_{n+1}$ , são extensionais e não mineralizados em ouro. Veio V3 – quartzo-ankerita (<50 cm) – forma lentes contínuas, preenchendo as fraturas  $S_{n+3}$  e, localmente, pode ter aspecto brechado. Tem ausência de sulfetos e sulfossais além de apresentar textura sacaroidal. Veio V4 – quartzo-calcita (<15 cm) – são veios de ocorrência restrita aos diques básicos (diques DB1) e têm geometria brechada a lenticular, sem orientação preferencial.

Microscopicamente, quartzo (65-80% do volume total) e carbonatos (5-20% do volume total) são os minerais mais abundantes e formadores desses veios, apresentam granulação de fina a média (0,2-4,0 mm), forma euédrica a anédrica e contatos poligonizados a irregulares. É possível definir dois grupos entre os cristais de quartzo: um grupo formado por cristais mais grossos de quartzo fumê (Qtz I), que têm evidências de deformação como formação de sub-grão e extinção ondulante; e outro grupo de cristais de quartzo mais finos (Qtz II), com extinção reta, ora ondulante, produto da recristalização do quartzo fumê deformado (Fig.5A).

Carbonatos também formam dois grupos: cristais mais grossos (Carb I), manchados e maclados; outros cristais (Carb II) são mais límpidos, e ocorrem em agregados de cristais mais finos (Fig.5B). Essas duas gerações de carbonato são observadas nos veios V1, V2 e V3.

Os sulfetos e sulfossais estão disseminados pelo veio, formam agregados com granulação fina a média e, quando abundantes, perfazem até 8% do volume total do veio. Os sulfetos e sulfossais mais abundantes são pirita, calcopirita, arsenopirita, pirrotita e berthierita. De ocorrência mais rara e restrita aos veios tipo 1, pode-se observar ainda estibnita, galena, boulangerita, ullmanita, tetraedrita, argentopetlandita e cobaltita, os quais sobrecrescem aos sulfetos e aos sulfossais mais abundantes. Essas raras fases minerais só puderam ser identificadas através da análise em microssonda.

Dentre os minerais opacos citados presentes nos tipos de veios V1, V2 e V3, a pirita (Py) é o mais comum. São cristais disseminados no veio com granulação de fina a média (<4,0 mm). Apresenta-se como: Py(I) cristais anédricos e porosos; Py(II) cristais subédricos poligonais.

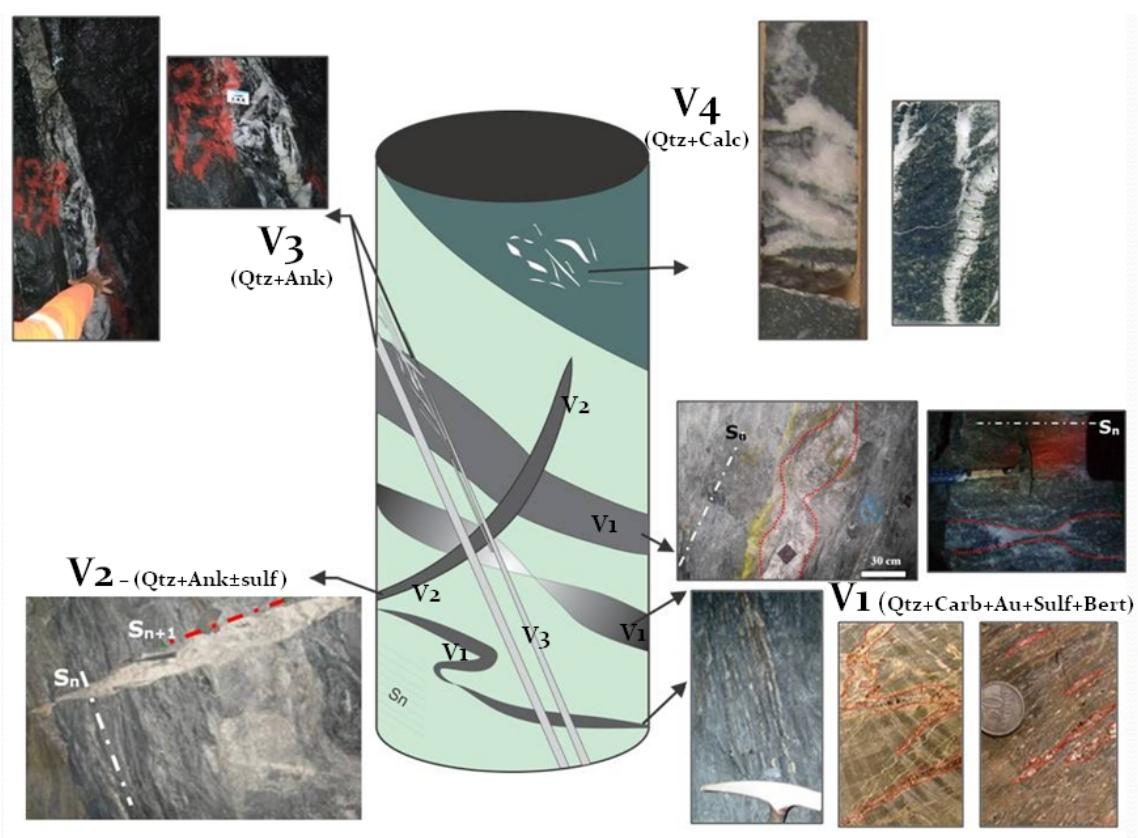
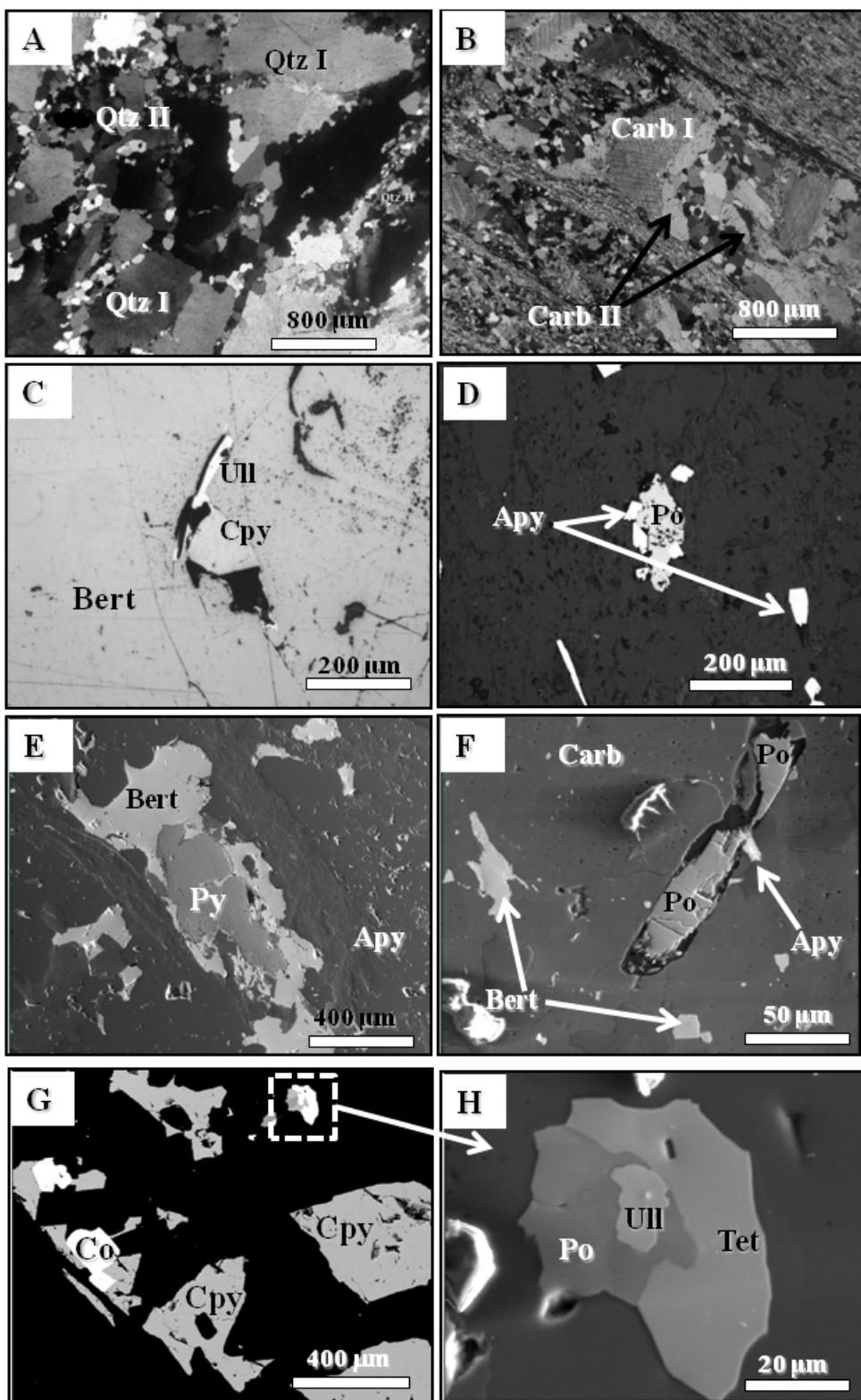


Figura 4—Desenho esquemático com as famílias de veios que ocorrem no Lineamento Córrego do Sítio. Também apresenta fotografias de amostras de mão e de testemunho de sondagem do depósito Carvoaria. Os tipos de veios nos metassedimentos são: V1 – quartzo-ankerita-sulfetos-sulfossais-ouro, desenvolvidos em planos de clivagem de crenulação  $S_n$ , podem estar dobrados e boudinados; V2 – quartzo-ankerita-pirita, ao longo da clivagem de crenulação  $S_{n+1}$ ; V3 – quartzo-ankerita, lentes tabulares preenchendo fraturas  $S_{n+3}$ , localmente brechados; e veios restritos ao dique metamáfico DB1 são tipo V4 – quartzo-calcita, com geometria brechada a lenticular.



**Figura 5 - Fotomicrografias em luz transmitida:** A) Diferentes tipos de quartzo em veio tipo 1, (luz transmitida, nícol cruzado 25X); B) Diferentes tipos de carbonato em veio tipo 1 (luz transmitida, nícol cruzado 25X). Fotomicrografias em luz refletida: C) Inclusão de calcopirita com borda de ullmanita em cristal de berthierita, (luz refletida, 100X); D) Formação de cristais de arsenopirita a partir de pirrotita, (luz refletida, 100X). Imagens de backscattered scanning electron microprobe-BSE: E) Berthierita sobrecrecida em pirita porosa (Pyl); F) Finais cristais de berthierita e pirrotita, com arsenopirita sobrecrecida em borda de pirrotita em meio carbonato; G) Cobaltita sobrecrecida em cristais de calcopirita em meio a quartzo; H) Detalhe de cristal de pirrotita com sobrecrecimento de tetrahedrita e ullmannita. Abreviações: Apy – arsenopirita; Bert – berthierita; Carb – carbonato; Co – cobaltita; Cpy – calcopirita; Po – pirrotita; Py – pirita; Qtz – quartzo; Tet – tetrahedrita and Ull – ullmannita.

Tabela 3 - Síntese das características dos veios do depósito Carvoaria Velha.

Tipo		Mineralogia	Espessura	Rocha encaixante	Geometria	Orientação	Distribuição e natureza
Veios tardios a mineralização	V <sub>1</sub>	Quartzo-ankerita – sulfetos/ sulfossais – ouro veios	1 cm a 6 m	Metagrauvaca, xisto e filitos	• Milimétricos a centimétricos dobrados, lenticulares • Pinch and swell	118 / 70	• Paralela à xistosidade S <sub>n</sub> • Dobrado com a foliação plano axial • São veios de cisalhamento
	V <sub>2</sub>	Quartzo – ankerite veins	2 cm a 3 m	Metagrauvaca, xisto e filitos	• Veios tabulares centimétricos a métricos	286 / 33	• Paralelo à xistosidade S <sub>n+1</sub> • São veios extensionais
	V <sub>3</sub>	Quartz – ankerite veins	1-3 cm	Metagrauvaca, xisto e filitos	• Lenticulares	054 / 84	• Paralelo à xistosidade S <sub>n+3</sub> • São veios de fratura
	V <sub>4</sub>	Quartzo – calcita veins	1-20 cm	Metamáfica	• Irregular a stockwork	*	• Irregular • São veios extencionais

Arsenopirita (Apy) ocorre na borda dos veios V1 ou em finas lascas de rocha em meio a esse veio, disposta em arranjos subparalelos à foliação principal, disseminada, preferencialmente, nas bandas micáceas dos metapelitos. Os cristais têm granulação fina (0,4 mm). Apresentam-se como: Apy(I) massas anédricas associadas a pirrotita; Apy(II) cristais finos e euédricos, com superfície límpida e hábito losangular (*diamond shape*), formados a partir de cristais de pirita ou pirrotita (Fig.5D).

Berthierita (Bert) está restrita aos veios tipo 1, e apresenta-se dispersa por todo o veio, com cristais anédricos de finos a grossos (< 8,0 mm). Localmente, parece crescer a custa de carbonato e de pirita (Fig.5E). Contém inclusões de pirrotita, calcopirita, ullmanita (Fig.5G) e de pirita.

Calcopirita (Cpy) (<0,4 mm) ocorre em agregados em meio ao veio. Apresenta sobrecrecimento de outras fases minerais como cobaltita (Fig.5G), pirrotita e argentopelandita.

Pirrotita (Po) forma raros cristais com granulação

fina (<0,1 mm), anédricos e alongados segundo a principal foliação. Ocorre, ainda, como inclusões irregulares em cristais maiores de pirita. Apresenta borda com arsenopirita (Fig. 5F) e sobrecrecimento de ullmanita e tetraedrita (Fig. 5H).

## 6. QUÍMICA MINERAL

Após a descrição microscópica dos quatro tipos de veios do depósito Carvoaria, fez-se análise dos carbonatos e das principais fases minerais dos sulfossais e dos sulfetos em microsonda eletrônica, para obtenção da composição química dos mesmos, identificação das fases que não puderam ser definidas por microscopia ótica, e cálculo do geotermômetro da arsenopirita. Foram identificadas e analisadas as seguintes fases minerais: arsenopirita (FeAsS), berthierita (FeS<sub>2</sub>S<sub>4</sub>), ullmanita (NiSbS), tetrahedrita ((Cu,Fe)<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>), estibnita (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), cobaltita (CoAsS), pirita (FeS<sub>2</sub>), pirrotita (FeS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), argentopelandita (Ag(Fe,Ni)<sub>8</sub>S<sub>8</sub>), ankerita (Ca(Fe,Mg,Mn)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) e calcita (CaCO<sub>3</sub>). Os dados de composição desses minerais estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Dados de composição mineral de análises de microsonda de amostras do depósito Carvoaria em % peso dos elementos. (Bert= berthierita, Py= pirita, Po=pirrotita, Cpy=calcopirita, Ull=ullmanita, Tet=tetraedrita, Ga=galena, Co=cobaltita e Arg=argentopelandita.)

	Bert					Py					Po					Cpy					Ull		Tet					Ga		Co		Arg	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23											
S	30,07	30,13	30,07	30,30	29,01	52,80	40,21	53,60	53,64	39,11	39,83	38,92	35,42	34,89	16,34	25,33	25,51	29,22	12,92	20,35	21,13	31,78											
Fe	12,89	12,42	12,89	13,60	12,27	45,54	60,72	48,91	47,81	56,18	57,91	60,84	31,14	29,96	1,33	5,94	4,61	0,31	0,18	5,22	3,44	37,14											
Co	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,95	0,01	0,02	0,01	0,00	25,19	27,77	0,00											
Ni	0,00	0,00	0,00	0,04	0,12	0,02	0,00	0,00	0,35	0,04	0,71	0,34	0,00	0,06	23,26	0,03	0,01	0,05	0,05	5,75	6,01	19,15											
Cu	0,00	0,00	0,01	0,04	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01	3,10	0,01	0,00	34,95	33,99	0,00	35,96	37,96	0,00	0,02	0,08	0,42												
As	1,14	1,08	1,25	1,21	1,22	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	0,00	0,79	1,52	0,00	43,53	42,88	0,00											
Sb	56,45	56,25	56,69	56,57	55,07	2,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	57,04	29,87	29,11	72,40	0,00	0,11	0,00	0,00											
Pb	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	84,32	0,00	0,00	0,00											
Au	0,10	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,05	0,12	0,00	0,10	0,07	0,00	0,03	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00												
Zn	0,00	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,00	0,01	0,10	0,04	0,00	0,07	0,05	0,06	0,07	2,11	2,74	0,00	0,00	0,00	0,03	0,09											
Ag	0,00	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,42											
Total	100,7	100,0	101,0	101,9	97,8	100,7	101,0	102,8	102,0	98,6	98,8	100,3	101,6	99,0	100,7	99,3	100,8	103,5	97,5	100,2	101,3	101,0											

*Tabela 5 - Dados de composição de cristais de arsenopirita em porções mineralizadas obtidos através de análises de microssonda eletrônica.*

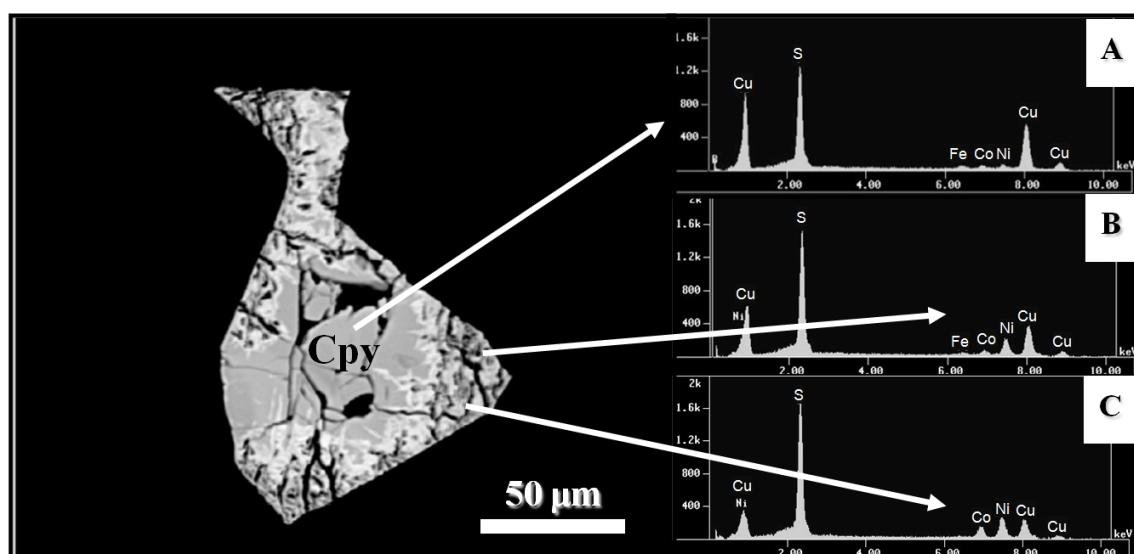
Elementos	%wt													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Média
S	21,31	21,60	22,93	20,99	21,43	21,48	22,53	20,95	22,70	19,40	21,60	20,31	19,82	21,31
Fe	35,55	36,23	35,65	35,59	35,28	35,31	32,94	32,77	32,98	39,40	32,16	40,22	38,11	35,55
Co	0,00	0,00	0,00	0,54	0,63	0,00	0,30	0,15	0,29	0,16	0,09	0,10	0,10	0,18
Ni	0,00	0,00	0,03	0,10	0,13	0,02	0,35	0,38	0,23	0,15	0,07	0,14	0,21	0,14
As	42,92	41,76	41,69	43,12	43,47	43,48	43,79	46,09	43,71	39,99	45,40	39,11	41,17	42,75
Zn	0,00	0,27	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53	0,63	0,13	0,56	0,18
Total	99,78	99,86	100,62	100,38	100,94	100,29	99,91	100,34	99,91	99,63	99,95	100,01	99,97	100,12

% at														
S	0,36	0,36	0,37	0,35	0,36	0,36	0,36	0,38	0,33	0,38	0,38	0,34	0,34	0,36
Fe	0,34	0,34	0,33	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,31	0,38	0,31	0,37	0,37	0,34
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,30	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,30	0,31	0,31	0,29	0,31	0,29	0,29	0,30
Zn	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Em cristais de pirita e pirrotita, as principais impurezas detectadas são Ni (<0,34% peso) e Zn (<0,10% peso). O espectro da Fig. 6A mostra composição padrão de cristal de calcopirita, com borda empobrecida em Fe e Cu, o que resulta em aumento nos elementos Ni e Co (Fig. 6B e C). Cristais de arsenopirita podem estar zonados, com núcleos ora mais claros ricos em As, e núcleos ora mais escuros, pobres em As. Os sulfossais de antimônio (tetraedrita e ullmanita), além de cobaltita, estibinita e galena, formam a partir da alteração de pirrotita e de calcopirita (Figs. 5G e H, e Tabela 4).

Cristais de carbonato foram identificados em todos os tipos de veios. As composições dos cristais analisados nos veios V1, V2 e V3 são semelhantes, sendo caracterizados como ankerita, com variações nas concentrações dos óxidos de manganês, de ferro e de magnésio (Tabela 6). Análises realizadas nos dois grupos de carbonato (Carb I e Carb II) mostraram que esses têm a mesma composição ankerítica, apresentando diferença apenas na textura na superfície do cristal, sendo um mais poroso e manchado (Carb I) e outro mais límpido (Carb II) (Fig.7). Nos veios hospedados no dique DB1 (veios V4), os carbonatos têm composição calcítica.



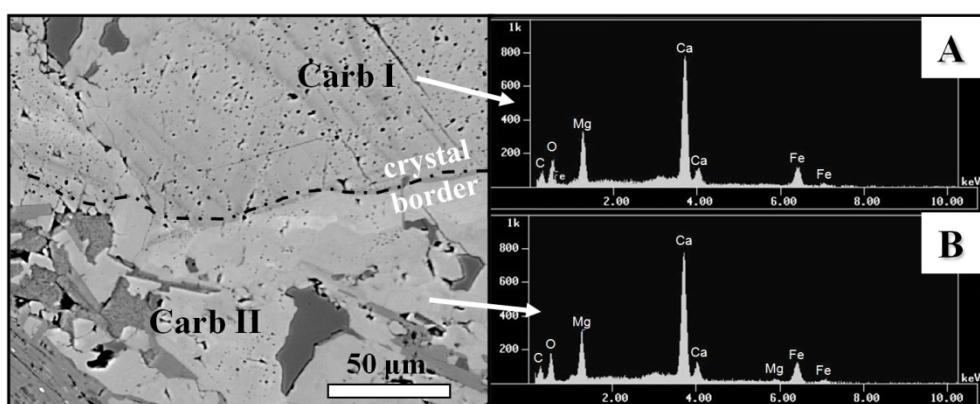
*Figura 6 – Substituição de fases minerais ricas em níquel e em cobalto na borda do cristal de calcopirita. Espectros de EDS-energy dispersive spectrometer A) a C) mostrando a evolução da perda de Cu e de Fe e enriquecimento de Ni e de Co.*

*Tabela 6 - Principais características microscópicas, forma de ocorrência e composição média de carbonatos analisados em microssonda eletrônica.*

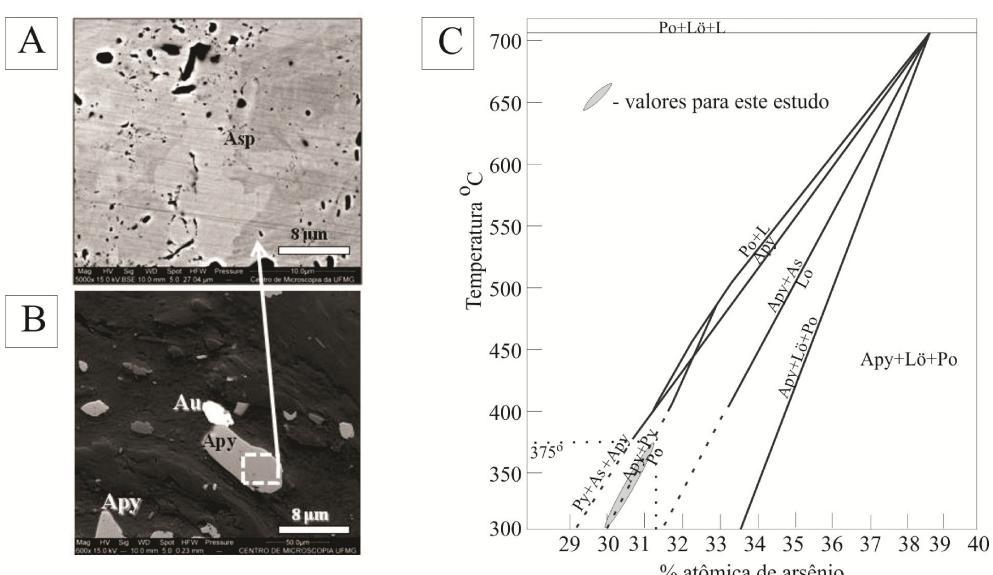
Veio	Tipo carbonato	Características micro	Ocorrência	Composição média			
				MgO	FeO	MnO	CaO
V1	Ankerita	anédrico a euédrico, granulação fina a grossa (<5,0 mm), com inclusões de pirrotita, pirita e bertiaria.	Veios de cisalhamento	15,8	13,2	0,8	24,0
V2	Ankerita	anédrico, granulação fina a grossa (<4,0 mm).	Veios extensionais	14,1	11,3	1,1	27,3
V3	Ankerita	anédrico, granulação fina a grossa (0,4 mm) mais limpidos e com contatos poligonizados a irregulares.	Veios de fratura	13,1	11,3	1,3	27,3
V4	Calcita	anédrico a euédrico, granulação fina a grossa (<4,5 mm), limpidos e com contatos poligonizado.	Veios extensionais	0,0	0,8	0,8	54,6

**Geotermômetro da arsenopirita:** Kretschmar e Scott (1976) propuseram diagrama “Temperatura x Concentração atômica de arsênio” como geotermômetro para avaliar a temperatura de formação de arsenopirita, considerando as seguintes premissas: a) arsenopirita deve estar em equilíbrio com as outras associações sulfetadas (e.g. Py+Apy), e b) a concentração dos elementos traços como Co, Sb e Ni, em arsenopirita, deve ser inferior a 1 wt%.

As porcentagens atômicas (% at.) de arsênio em cristais de arsenopirita de porções mineralizadas, em equilíbrio com partícula de ouro (Fig. 8B), variam entre 29,2 e 30,9% at. de As com base em dados de microssonda eletrônica, e com base no diagrama da Fig. 8C. Estes valores indicam uma temperatura de formação de 300 a 375°C para a mineralização de ouro no depósito Carvoaria.



*Figura 7 – Imagem de backscattered scanning electron probe, mostrando dois tipos de carbonato. A) Espectro EDS no carbonato rugoso; B) Espectro EDS no carbonato limpo*



*Figura 8 - A) Imagem de elétron retroespelhado de cristal de arsenopirita mostrando zonamento. B) Imagem de elétron retroespelhado mostrando cristal de ouro na borda de arsenopirita. C) Diagrama de Kretschmar e Scott (1976) mostrando % atômica de arsênio versus temperatura aplicada para geotermômetro da arsenopirita. Abreviações: Apy – arsenopirita; Po – pirrotita; Py – pirita; Lö – loellingita.*

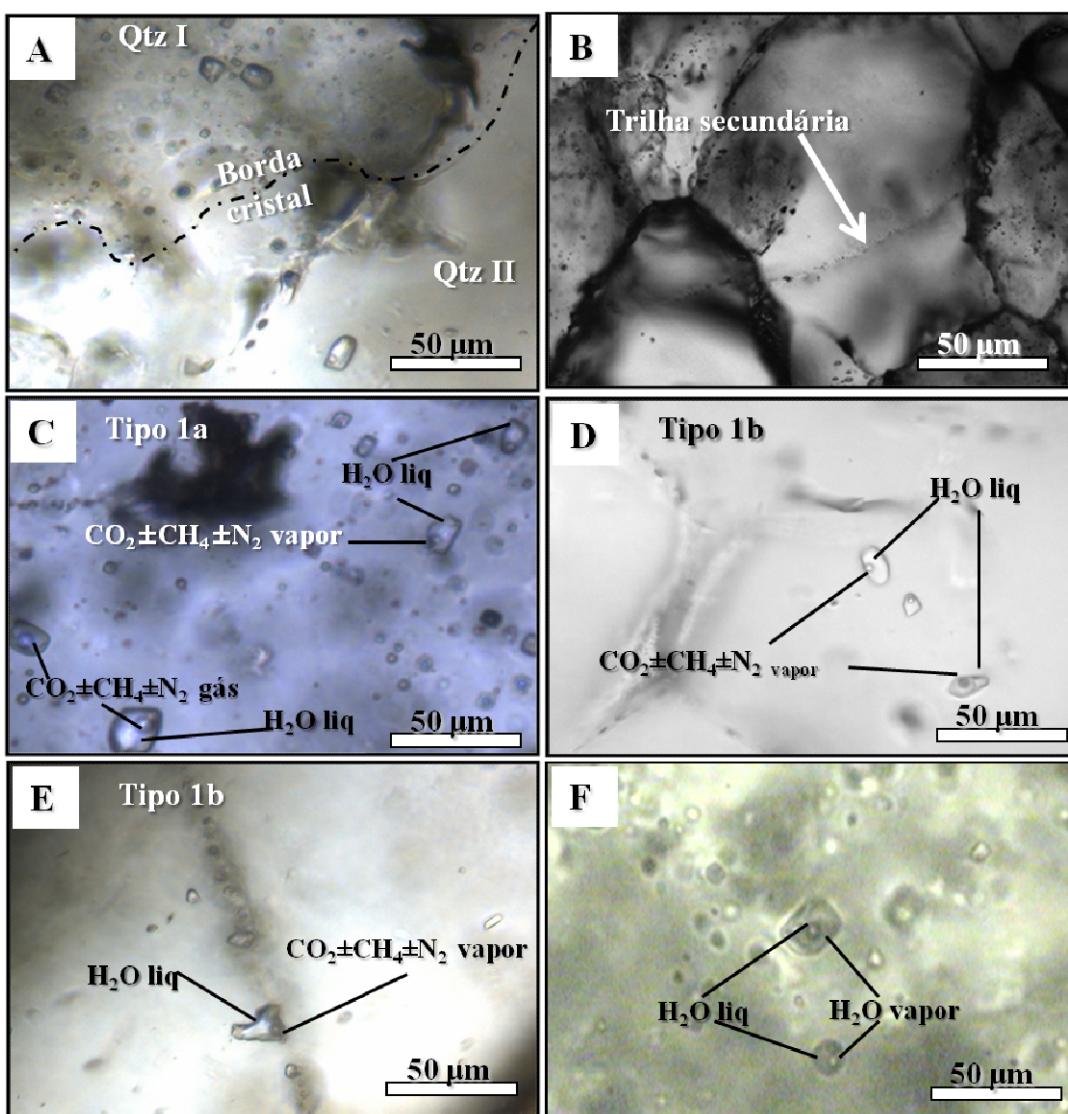
## 7. INCLUSÕES FLUIDAS

### 7.1. Petrografia das inclusões fluidas

Um total de nove seções delgadas bipolidas de amostras, representativas das famílias de veios V1, V2 e V4 que ocorrem no depósito Carvoaria, foram estudadas petrograficamente para a análise de microtermometria e de espectroscopia Raman, em inclusões fluidas (IF) associadas ao sistema hidrotermal. As inclusões fluidas analisadas estão aprisionadas em cristais de quartzo, os quais exibem duas gerações: i) Qtz I: cristais são anédricos, têm contatos irregulares a lobados e apresentam forte extinção ondulante e desenvolvimento de subgrãos, os cristais têm granulação grossa (até 4,0 mm) de aspecto fumê, como resultado do elevado número de inclusões fluidas (Fig. 9A) que possuem e de

provável contribuição de matéria carbonosa; e ii) Qtz II: cristais mais finos (até 1,0 mm) com contatos poligonizados a irregulares, extinção reta. Ocorrem em agregados intersticiais ao quartzo Qtz I (Fig. 5A).

Os estudos petrográficos mostram a ocorrência de inclusões fluidas pseudo-secundárias e secundárias, assim classificadas de acordo com a sua origem em relação aos limites dos cristais. As inclusões fluidas, isoladas ou em grupos, encontram-se distribuídas de forma aleatória em um único cristal e, localmente, em trilhas descontínuas e suaves, sem ultrapassar os limites do mesmo, e essas são classificadas como pseudo-secundárias. Linhas de crescimento não são observadas dado ao caráter deformado e/ou recristalizado dos cristais de quartzo.



*Figura 9 – A) Quartzo fumê (Qtz I) e recristalizado (Qtz II) mostrando a orientação aleatória de IFs pseudo-secundárias e a diferença em quantidade de ocorrência de inclusões entre QtzI e QtzII; B) Trilhas secundárias de IFs atravessando borda do cristal; C) IFs tipo 1a pseudo-secundária com forma quadrada, retangular ou oval restritas ao quartzo fumê (Qtz I); D) IFs pseudo-secundária tipo 1 restritas o quartzo recristalizado (Qtz II); E) Detalhe da trilha de IF tipo 1b em Qtz II; F) IFs tipo 2 pseudo-secundárias aprisionadas em quartzo do veio V4.*

*Fotomicrografias tiradas sobre seção bipolida, luz transmitida, nicol paralelo (500 X).*

A maioria das inclusões pseudo-secundárias são bifásicas, ricas em líquido (aquosas), com razão volumétrica líquido/vapor (L/V) comumente constante, entre 9:1 (Fig. 9A). A grande maioria das inclusões apresenta formas poligonizadas (retangulares, quadradas e hexagonais), podendo aparecer também em formas arredondadas (ovaladas, alongadas e irregulares). O tamanho médio das inclusões é de 5-12  $\mu\text{m}$  na mais longa dimensão, entretanto algumas inclusões podem atingir até 30  $\mu\text{m}$  de comprimento. As inclusões fluidas secundárias apresentam-se em trilhas contínuas que ultrapassam os limites do cristal (Fig. 9B.). São inclusões bifásicas, que mostram relação líquido/vapor (L/V) variável entre 9:1 a 8:2 e têm formas ovais a irregulares. Localmente, são maiores que as inclusões pseudo-secundárias, com tamanho de até 40  $\mu\text{m}$  de comprimento (Fig. 9E).

## 7.2. Tipos de Inclusões Fluidas

Dois tipos principais de inclusões fluidas (IF) são identificados com base em distribuição, em química, em tamanho, em forma, em fases presentes na temperatura ambiente, em dados microtermométricos e em dados de espectroscopia Raman: (i) tipo 1 – aquo-carbônicas -  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4-\text{NaCl}$  e (ii) tipo 2 – aquosas –  $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$ . A separação dos sistemas salinos é baseada nas temperaturas do ponto eutético correspondentes, apresentados por Goldstein e Reynolds (1994). As IFs tipo 1 ocorrem em quartzo de veios mineralizados em ouro e estéreis dos metassedimentos (Fig. 9). Já as IFs tipo 2 são restritas aos veios hospedados no dique.

**Tipo 1** – aquocarbônicas – são inclusões bifásicas, pseudo-secundárias em grupos de forma aleatória e, subordinadamente, em trilhas descontínuas; ainda podem ser observadas inclusões secundárias. As inclusões tipo 1 aparecem em cristais de quartzo dos veios tipo V1 e V2. Com base na definição de *Fluid Inclusion Assemblages*-FIAs de Goldstein e Reynolds (1994), uma única FIA representa “a mais detalhada discriminação de IFs aprisionada em um mesmo evento, que pode ser identificada com base na petrografia”. Esta definição implica em que as IFs, de uma mesma FIA, aprisionaram um fluido de mesma composição “no mesmo tempo” e, a uma mesma temperatura e pressão (Bodnar, 2003). Assim é possível identificar três FIAs: duas subdivisões do tipo 1 (aquaocarbônicas) 1a e 1b (Figs. 9C-E); e tipo 2 (aquosas; Fig. 9F). Vale ressaltar que estudos de catodoluminescência poderiam confirmar a classificação aqui adotada.

**Tipo 1a** (Fig. 9C) trata-se de inclusões com formas prismáticas (quadradas, retangulares e hexagonais) a arredondadas e ovais. Têm tamanho entre 5 e 20  $\mu\text{m}$  e razão volumétrica de líquido:gás constante próximo a 9:1. Essas inclusões são

pseudo-secundárias e restritas ao quartzo fumê. É possível observar dentro desse conjunto algumas inclusões trifásicas em que a terceira fase é representada por diminutos cristais irregulares e anisotrópicos. No entanto, não foram observadas mudanças durante a microtermometria nessa fase sólida, não podendo caracterizá-la como *daughter minerals*.

**Tipo 1b** (Figs. 9D, E) são inclusões com formas arredondadas a irregulares. Apresentam tamanho entre 5 e 40  $\mu\text{m}$ , são inclusões bifásicas a temperatura ambiente, e tem razão volumétrica líquido:gás pouco variável, entre 7:3 e 9:1. São menos frequentes e restritas ao quartzo recristalizado, com ocorrência aleatória em meio ao cristal ou formando trilhas com continuidade além das bordas dos cristais, portanto secundárias. É possível, ainda, observar inclusões com *necking down* e deformação comum ao quartzo recristalizado, como inclusões alongadas e formação de subgrão. A Espectroscopia Raman revelou que a fase carbônica das inclusões tipo 1 é composta por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e traços de  $\text{N}_2$ ; já  $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outros hidrocarbonetos são ausentes.

**Tipo 2** (Fig. 9F) – aquosas – são inclusões que contêm duas fases à temperatura ambiente: uma líquida e outra vapor, com relação volumétrica líquido:vapor de 9:1, pouco variável. São interpretadas como inclusões pseudo-secundárias e ocorrem em grupos no centro do cristal, apresentando tamanho de até 20  $\mu\text{m}$ . A Espectroscopia Raman revelou que a fase vapor das inclusões tipo 2 é composta apenas por  $\text{H}_2\text{O}$ .

## 7.3. Resultados de Microtermometria

Os dados obtidos são apresentados na Figura 10 e incluem medidas de temperatura para a fusão e homogeneização de  $\text{CO}_2$  ( $T_{\text{mCO}_2}$  e  $\text{T}_{\text{h CO}_2}$ , respectivamente), a fusão do clatrato e a fusão inicial e a final do gelo ( $T_{\text{mC}}$ ,  $T_{\text{m ice}}$  e  $T_e$ , respectivamente) e a temperatura de homogeneização total ou crepitação ( $\text{T}_{\text{h tot}}$  e  $T_d$ , respectivamente). As principais transições de fases observadas para as inclusões dos tipos 1 e 2 durante a microtermometria e a informação fornecida por essas transições estão sumarizadas na tabela 7.

*Tabela 7 - Principais transições de fases observadas para cada tipo de inclusão fluida e a informação correspondente.*

Tipo IF	Tipo de transição de fases	Informação
1	Fusão do $\text{CO}_2$	Composição da fase carbônica
1	Homogeneização do $\text{CO}_2$	Densidade da fase carbônica
1	Fusão do Clatrato ( $T_{\text{cl}}$ )	Salinidade da fase aquosa
1* e 2	Temperatura de homogeneização ( $\text{T}_{\text{h tot}}$ ) ou crepitação ( $T_d$ )*	Temperatura mínima de formação
2	Fusão final do gelo ( $T_{\text{m ice}}$ )	Salinidade da fase aquosa

\*=a maior parte das inclusões do tipo 1 crepitam antes da homogeneização total.

**Criometria** - As inclusões do tipo 1 mostram baixas temperaturas de fusão inicial ( $T_e$ ) entre -48 a -

36°C (Fig. 10), com média -43°C, indicando a presença de outros complexos de cátions no fluido, como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ; adicionais ao  $\text{Na}^+$  (Borisenko 1977 in Goldstein e Reynolds 1994). Valores de temperatura de fusão do clatrato variam entre 2,0 e 9,0°C, com média 4,6°C para o tipo 1a e média 6,3°C para o tipo 1b. Valores observados de temperatura de fusão do  $\text{CO}_2$  variam entre temperaturas de -65,3°C e -57°C, o que sugere presença de outras espécies voláteis além de  $\text{CO}_2$ , como indicado pela microscopia Raman. As inclusões do tipo 2 têm intervalo de temperatura de fusão inicial ( $T_e$ ) de -55,0 a -45,0°C (Fig. 10), sugerindo a presença de outros complexos de cátions no fluido, como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ; adicionais ao  $\text{Na}^+$ . As temperaturas de fusão final do gelo ( $T_{m\ ice}$ ) são inferiores às do tipo 1, variando em um intervalo de -17,0 a -7,8°C.

**Aquecimento** - Todas as inclusões do tipo 1 mostram uma expansão da fase carbônica a temperaturas acima de 250,0°C, mas quase todas crepitam antes da homogeneização total com valores de temperatura de crepitação ( $T_d$ ) entre 260,0 e 340,0°C, sendo que a média de valores para as inclusões do tipo 1a é 283°C e para tipo 1b 315°C

(Fig 11). Apenas algumas inclusões do tipo 1b (n=6) apresentam temperatura de homogeneização total de líquido/vapor para vapor ( $\text{Th}_{\text{tot L-V}}$ ), com intervalo entre 420,0 a 460,0°C. As inclusões do tipo 2 se homogeneizam para líquido ( $L + V \rightarrow L$ ) a temperaturas entre 174,0 e 215,0°C (Fig. 11). Inclusões do tipo 1a apresentam  $\text{Th}_{\text{CO}_2}$  entre -11,5 e 1, inclusões do tipo 1b apresentam  $\text{Th}_{\text{CO}_2}$  entre -15 e 2.

#### 7.4. Dados quantitativos de composição das inclusões fluidas

Dados de salinidade, composição, densidade das fases aquosas e carbônicas foram calculados usando o programa MacFlinCor (Brown e Hageman 1995). Equações de estado por Jacobs e Kerrick (1981) foram aplicadas para as inclusões fluidas (IFs) do tipo 1 (sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2\pm\text{CH}_4-\text{NaCl}$ ), e equações por Bodnar e Vityk (1994) para IFs do tipo 2 (sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl-KCl}$ ). Um resumo dos dados é apresentado na tabela 9. As proporções relativas de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  foram estimadas usando o método gráfico de Thiéry *et al.* (1994). Dados de salinidade foram obtidos apenas em inclusões fluidas tipo 1 com baixo conteúdo de  $\text{CH}_4$ .

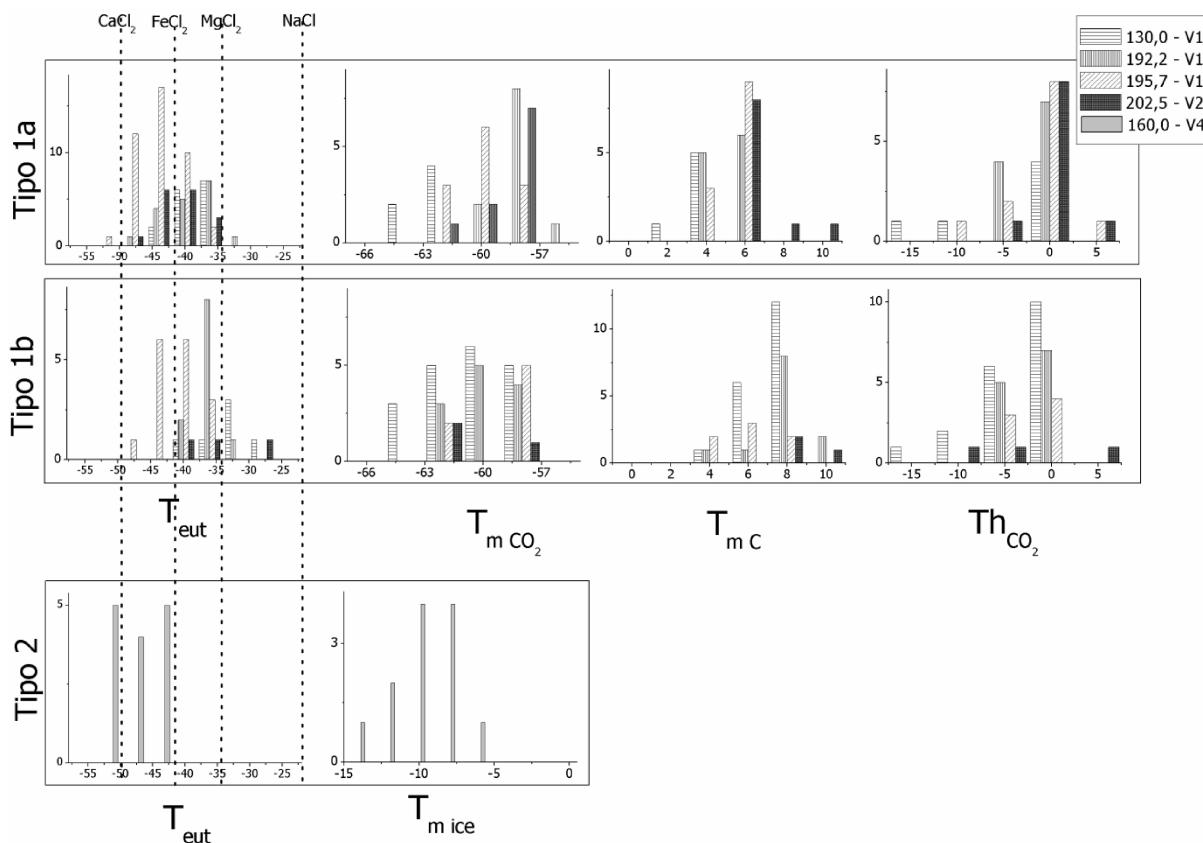


Figura 10 – Histogramas representativos das características microtermométricas das inclusões fluidas contidas nos veios de quartzo estudados no depósito Carvoaria. Microtermometria inclui temperaturas de fusão inicial e final do gelo ( $T_e$  e  $T_{m\ ice}$ , respectivamente), temperatura de fusão e homogeneização do  $\text{CO}_2$  ( $T_{m\ CO_2}$  e  $\text{Th}_{\text{CO}_2}$ ), respectivamente), e fusão do clatrato ( $T_m C$ ).

Tabela 8 Compilação dos dados de microtermometria para os veios.

Amostra Área	Veio	Fl	N	Eq. Wt% NaCl	$T_{m\text{CO}_2}$	$T_e$	$T_d$	$T_{h\text{CO}_2}$	$T_{m\text{ice}}$	$T_{cl}$
130,00 – area A	V1	1b	5	7.1 to 11.7 9.2±1.9	-63.0 to -57.0 -60.3±3.1	-29.5 to -44.0 -36.5±6.44	300 to 380 356±32	-1.0 to 2.0 - 0.3±1.5	-3.0 to -0.3 - 1.2±1.0	3.0 to 6.0 4.7±1.5
130,00 – area A	V1	1b	3	1.3 to 9.4 6.4±2.8	-61.0 to -59.0 -60.0±1.0	-43.0 to -38.0 -41.5±3.1	350 to 460 386.7±63.5	-7.0 to -3.0 - 5.0±2.0	-3.2 to -7.0 - 6.1±2.5	4.0 to 5.5 4.5±0.7
130 - Area B	V1	1b	10	2.2 to 7.6 4.8±1.8	-59.0 to -63.0 -61.0±1.8	-44.0 to 33.0 - 38.40±3.4	259 to 355 307.7±34.1	-6.0 to -1.0 - 3.7±2.5	-7.0 to -2.5 - 4.52±1.5	5.0 to 8.5 6.6±1.0
130,00 – area B5	V1	1b	4	0.4 to 3.4 1.6±1.6	-59.0 to -61.5 -60.0±1.3	-46.5 to -40.0 -43.3±2.7	350 to 355 351.7±2.4	-6.0 to -3.0 - 4.3±1.5	-6.0 to -3.0 - 4.7±1.3	7.0 to 8.0 7.5±0.5
130,00 – area C1	V1	1a	8	6.7 to 13.2 10.5±2.2	-68.0 to -63.5 -64.6±2.1	-43.0 to -38.5 -40.2±1.9	261 to 341 290.0±27.13	-11.5 to 0.5 - 6.7±7.8	-7.0 to -0.1 - 1.6±2.43	2.0 to 4.0 3.08±1.08
130,00 – area C1	V1	1b	4	8.3 to 12.1 10.6±1.7	-65.0 to -63.0 -64.0±1.0	-42.0 to -33.0 -27.37.8±4.4	220 to 297 276.1±37.6	-1.0 to 2.0 - 0.0±1.7	-8.0 to -3.0 - 5.9±2.1	3.0 to 4.0 3.3±0.6
130,00 – area C2	V1	1b	8	0.1 to 3.4 1.0±1.2	-65.3 to - 64.9.0 - 65.1±0.28	-47.5 to -41.0 -44.0±2.63	285 to 300 291.3±5.5	-15.0 to -3.0 - 9.3±6.0	-7.0 to -3.5 - 4.94±1.09	6.5 to 8.5 7.3±0.7
192,20 – area A	V1	1b	4	1.3 to 9.4 6.4±2.8	-62.0 to -58.0 -60.0±2.8	-48.0 to -34.0 -39.2±6.4	300 to 458 391.5±78.6	-8.0 to -3.9 - 5.9±2.9	-8.0 to -3.0 - 4.9±2.1	4.0 to 10.0 7.3±3.1
192,20 – area B1	V1	1a	6	7.7 to 9.6 8.6±0.8	-59.0 to -57.0 -58.2±0.9	-38.0 to -34.0 -36.4±1.7	261 to 274 265.0±11.8	-6.0 to -0.5 - 3.4±2.6	-2.8 to -1.0 - 2.1±0.7	3.8 to 5.0 4.4±0.5
192,20 – area B1	V1	1b	6	0.8 to 6.0 2.4±2.1	-60.0 to -57.0 -58.7±1.5	-50.0 to -34.0 -43.0±2.5	252 to 287 270.0±11.8	-10.0 to -6.0 - 8.0±2.8	-4.0 to 0.0 - 2.4±1.7	5.0 to 8.7 7.0±1.4
192,20 – area C1	V1	1b	6	0.1 to 0.2 0.1±0.1	-61.0 to -58.0 -59.5±2.1	-44.0 to -33.0 -37.0±4.2	290 to 327 305.0±17.0	-10.0 to -4.0 - 7.6±2.6	-2.5 to 0.0 - 1.0±1.0	7.9 to 9.0 8.5±0.8
192,20 – area C1	V1	1b	5	0.1 to 1.3 0.7±0.7	-62.0 to -58 - 60.0±2.0	-46.0 to -33.0 -40.8±6.0	290 to 350 312.5±26.3	-5.0 to -3.0 - 4.3±1.1	-2.0 to -0.4 - 1.2±0.7	7.5 to 8.5 8.0±0.4
192,20 – area C2	V1	1b	5	1.0 to 4.2 2.7±1.4	-62.0 to -59.0 -60.0±1.2	-47.7 to -38.5 -43.6±3.4	283 to 459 330±73.8	-5.7 to -2.5 - 4.02±1.2	-2.8 to -0.3 - 1.4±1.1	6.5 to 8.5 7.5±0.9
192,20 – area D	V1	1a	10	6.1 to 10.7 8.7±1.4	-60.0 to -58.5 -59.1±0.5	-46.0 to -38.0 -42.0±2.6	268 to 298 284±10.2	-6.0 to -2.0 - 4.3±1.7	-6.0 to -2.0 - 4.3±1.7	3.5 to 6.0 4.5±0.9
195,70 – area A	V1	1a	8	7.9 to 10.0 8.9±0.9	-62.0 to -58 - 60.0±1.4	-52 to -44 - 46.7±2.9	277 to 310 283.8±12.1	-3.0 to -2.0 - 2.5±0.5	-3.0 to -0.5 - 1.6±0.8	3.5 to 5.0 4.3±0.6
195,70 – area A	V1	1b	7	0.8 to 9.6 5.3±3.6	-59.0 to -58.0 -58.5±0.7	-48.0 to -35.5 -40.4±5.5	260 to 352 299.2±38	-3.0 to -2.0 - 2.5±0.5	-5.0 to -0.8 - 1.7±1.6	5.0 to 8.0 6.5±2.1

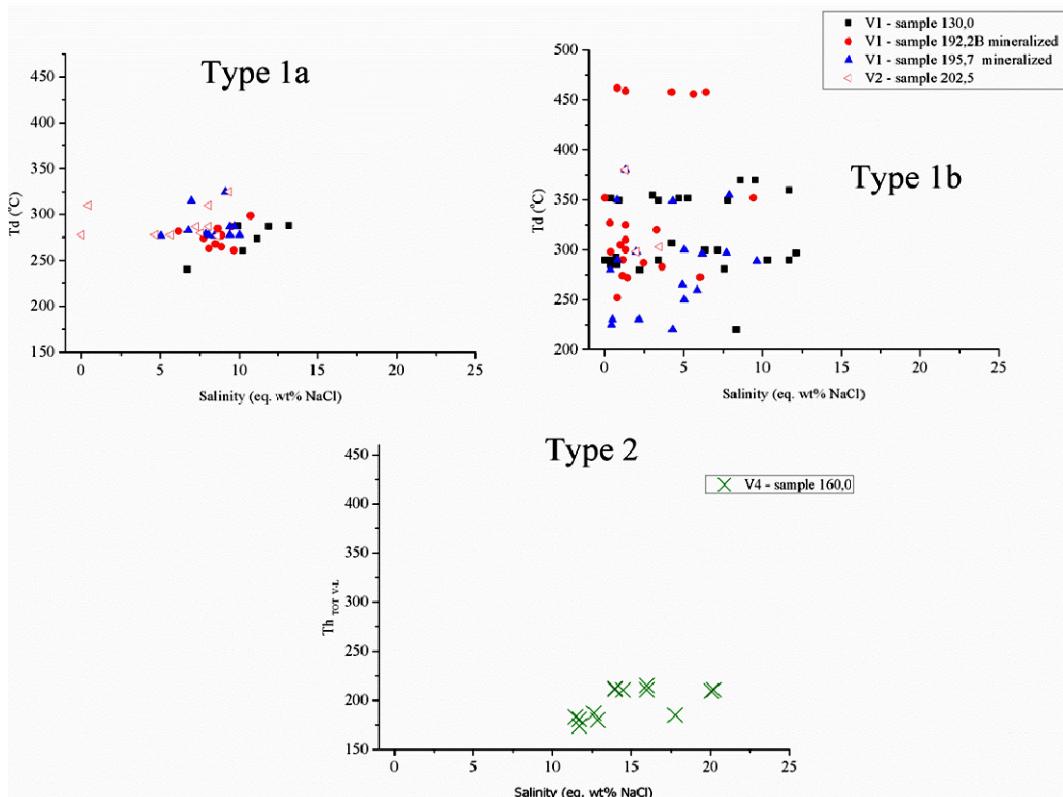


Figura 11 - Diagramas binários salinidade x temperatura de crepitação ( $T_d$ ) para as FIAs A) tipo 1a; B) tipo 1b; e C) Salinidade x temperatura de homogeneização total  $Th_{tot\ L-V}$  para as FIAs tipo 2.

*Tabela 9 - Dados microtermométricos das inclusões aquocarbônicas (tipo 1a e 1b) e inclusões aquosas (tipo 2), para o depósito carvoaria.*

Amostra Área	Veio	Fl	N	Densidade Total	X H <sub>2</sub> O	X CO <sub>2</sub>	X CH <sub>4</sub>	X NaCl
130.00 – area A	V1	1b	5	1.00 to 1.05 1.03±0.03	0.90 a 0.94	0.03 a 0.06	<0.01	0.02 a 0.04
130.00 – area A	V1	1b	3	1.03 to 1.06 1.04±0.01	0.94 a 0.95	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.03
130 - Área B	V1	1b	10	0.97 to 1.02 1.00±0.02	0.93 a 0.95	0.02 a 0.06	<0.02	0.01 a 0.02
130.00 – area B5	V1	1b	4	0.98 to 0.99 0.99±0.01	0.91 a 0.96	0.03 a 0.07	0.01 a 0.03	0.00 a 0.01
130.00 – area C1	V1	1a	8	0.98 to 1.07 1.02±0.03	0.91 a 0.95	0.31 a 0.50	0.01 a 0.02	0.02 a 0.04
130.00 – area C1	V1	1b	4	0.95 to 1.06 1.02±0.05	0.90 a 0.94	0.01 a 0.05	0.01 a 0.02	0.03 a 0.04
130.00 – area C2	V1	1b	8	0.92 to 0.98 0.96±0.03	0.91 a 0.97	0.02 a 0.06	0.01 a 0.03	0.00 a 0.01
192.20 – area A	V1	1b	4	0.99 to 1.06 0.99±0.03	0.92 a 0.98	0.01a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
192.20 – area B1	V1	1a	6	1.05 to 1.07 1.06±0.01	0.93 a 0.96	0.01 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.03
192.20 – area B1	V1	1b	6	0.97 to 1.03 1.01±0.02	0.94 a 0.98	0.02 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.02
192.20 – area C1	V1	1b	6	0.97 to 1.03 0.99±0.01	0.94 a 0.98	0.02 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.00
192.20 – area C1	V1	1b	5	0.98 to 1.00 0.99±0.01	0.98 a 0.98	0.01 a 0.02	<0.01	0.00 a 0.00
192.20 – area C2	V1	1b	5	0.97 to 1.02 1.00±0.03	0.93 a 0.97	0.02 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.01
192.20 – area D	V1	1a	10	1.04 to 1.08 1.06±0.01	0.93 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.04
195.70 – area A	V1	1a	8	1.02 to 1.06 1.05±0.01	0.89 a 0.96	0.01 a 0.97	<0.01	0.02 a 0.03
195.70 – area A	V1	1b	7	0.99 to 1.05 1.02±0.02	0.91 a 0.94	0.04 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
195.70 – area B	V1	1a	12	1.03 to 1.06 1.05±0.02	0.93 a 0.97	0.01 a 0.97	<0.01	0.02 a 0.03
195.70 – area B	V1	1b	6	1.02 to 1.05 1.03±0.02	0.94 a 0.96	0.01 a 0.04	<0.01	0.01 a 0.03
195.70 – area B	V1	1b	14	0.95 to 1.03 1.00±0.03	0.92 a 0.98	0.01 a 0.06	<0.02	0.00 a 0.02
202.50 – area A	V2	1a	4	0.94 to 1.05 0.99±0.06	0.93 a 0.96	0.03 a 0.06	<0.01	0.00 a 0.03
202.50 – area B	V2	1a	8	1.03 to 1.05 1.04±0.02	0.93 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.02 a 0.03
202.50 – area C	V2	1a	3	1.02 to 1.05 1.04±0.02	0.94 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.01 a 0.03
202.50 – area C	V2	1b	3	0.99 to 1.00 0.99±0.01	0.96 a 0.96	0.02 a 0.04	<0.01	0.00 a 0.01
160.00 – area A	V4	2	6	0.96 to 1.00 0.98±0.02	–	–	–	–
160.00 – area B	V4	2	5	0.97 to 1.00 0.99±0.02	–	–	–	–
160.00 – area C	V4	2	3	0.97 to 0.98 0.97±0.01	–	–	–	–

As IFs tipo 1 apresentam valores variáveis de salinidade com médias de 8,2% em peso de NaCl eq. para tipo 1a, e 4,1% em peso de NaCl eq. para tipos 1b. As inclusões do tipo 2 são as mais salinas, com média de 14,9% em peso de NaCl eq. As IFs tipo 1 são ricas em água contendo entre 89 a 98 mol% de H<sub>2</sub>O. A fase carbônica apresenta proporções variáveis de composição para os tipos 1a e 1b, sendo que CO<sub>2</sub> é o gás mais abundante, mas apresenta valores médios semelhantes (3,1 mol%) para os dois tipos, podendo atingir máximos de 6,0 mol% para 1a e 7,4 mol% para 1b. As concentrações de CH<sub>4</sub> são

mais variáveis com inclusões do tipo 1b (<3,2 mol%) com maior enriquecimento relativo de metano em relação ao CO<sub>2</sub> do que as inclusões do tipo 1a (<1,8 mol%).

A densidade total para os tipos 1 e 2 variam de 0,95 a 1,07 g/cm<sup>3</sup> e 0,96 a 1,01 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, as inclusões do tipo 1a são mais densas com média de 1,04 g/cm<sup>3</sup> e as do tipo 1b têm média 1,01 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 9).

## 8. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lineamento aurífero Córrego do Sítio corresponde a uma zona de cisalhamento dúctil com um *trend* NE-SW, controlando 16 depósitos de ouro de pequeno a médio portes, ao longo do qual se inclui o depósito Carvoaria Velha. A mineralização de ouro se hospeda em rochas metavulcanossedimentares arqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas, nas porções de topo do Supergrupo Nova Lima, as rochas correspondem a filitos e xistos finos hidrotermalmente alterados a quartzo, carbonato e sericita, além de sulfetos e sulfossais subordinados. A mineralização aurífera se apresenta disseminada em metapelitos e principalmente em veios de quartzo+carbonato+sulfetos±sulfossais de distribuição variada.

O presente estudo busca caracterizar os fluidos mineralizadores do depósito Carvoaria Velha, através de estudos de inclusões fluidas, espectroscopia Ramam e isótopos de oxigênio e enxofre em veios-brechas, sendo os principais resultados itemizados a seguir.

Os estudos de inclusões fluidas focaram os cristais de quartzo, que ocorrem em dois tipos principais: (i) quartzo fumê Qtz I, com granulação média a grossa, bordas lobadas, e extinção ondulante e; (ii) quartzo recristalizado de menor granulação e contatos poligonizados.

### 8.1. Classificação dos Veios

A partir de estudos petrográficos de detalhe e de inclusões fluidas, são classificadas quatro famílias principais de veios em Carvoaria Velha (Fig. 4). Veios V1 – quartzo-ankerita-sulfetos-sulfossais-ouro – paralelos à foliação principal regional S<sub>n</sub>, comumente mineralizados em ouro. Veios V2 – quartzo-ankerita-sulfetos – desenvolvidos no plano de clivagem de crenulação S<sub>n+1</sub>, extensionais e não mineralizados em ouro. Veios V3 – quartzo-ankerita – preenchem fraturas S<sub>n+3</sub>, geralmente sem sulfetos e sulfossais. Veios V4 – quartzo-calcita – de ocorrência restrita aos diques e *sills* metamáficos DB1 que cortam a sequência metassedimentar, sendo extensionais e sem orientação preferencial.

Essa classificação é cronológica, com base na relação encontrada em campo, sendo que o tipo V1

corresponde à família de veios mais antigos, relacionados ao evento de mineralização, e que contêm o minério. Os veios V4 são restritos ao dique máfico DB1, que não registra deformação, sendo provavelmente veios tardios em relação a V1, V2 e V3, e evoluídos em relação ao fluido responsável pelo evento hidrotermal mineralizador.

### **8.2. Composição Química dos Sulfetos/Sulfossais e Evolução do Fluido Mineralizador**

Os sulfetos mais comuns nos veios são arsenopirita, pirita, calcopirita e pirrotita, apresentando diferentes texturas, e mais de uma geração (ex. Pyl e Pyll, Apyl e Apyll) como indicado no item de Petrografia dos Veios deste artigo. Estudos em microssonda eletrônica mostraram a presença de fases metálicas (sulfetos e sulfossais), como estibinita, ullmanita, tetraedrita, galena, cobaltita e argentopetlandita, comumente sobrecrecendo os principais sulfetos. Com base nas relações de substituição e sobrecrecimento entre sulfetos e sulfossais, é possível propor uma evolução para o fluido hidrotermal mineralizador. Fases ricas em As e Sb sugerem incorporação desses elementos a partir da interação do fluido hidrotermal com as unidades metassedimentares clásticas Córrego do Sítio e Santa Quitéria. Já elementos como Ni e Co podem ter sido incorporados nos sedimentos a partir de rochas de afinidade máfica. Baseado em elementos terras raras, Baltazar e Zucchetti (2007) interpretam que as rochas metassedimentares da associação Ressedimentada, nesta porção leste do QF, são derivadas de uma fonte mista entre rochas máficas e félsicas potássicas. A presença de Co e Ni sugere ainda a passagem do fluido hidrotermal em sequências basais do Grupo Nova Lima, como a unidade máfica-ultramáfica Quebra Ossos, que tem sua maior expressão em área na região de estudo, quando comparado ao QF como um todo.

### **8.3. Geotermômetro da Arsenopirita**

Cristais de arsenopirita podem estar zonados, com porções claras irregulares, no núcleo e/ou borda do cristal, sendo as porções mais claras enriquecidas em As e empobrecidas em Fe e S (Fig. 8). Segundo Kretschmar e Scott (1976), este padrão de zoneamento evidencia um ambiente submetido a variações na fugacidade de S, durante o crescimento do mineral. A variação composicional do As em cristais de arsenopirita, em equilíbrio com pirita, pirrotita e ouro foi utilizada como geotermômetro (Kretschmar e Scott, 1976), revelando um intervalo de temperatura de formação entre 300 e 375°C. Este intervalo é interpretado como a temperatura aproximada para a formação da mineralização no depósito Carvoaria Velha.

### **8.4. Tipos de Inclusões Fluidas e Evolução Hidrotermal**

Dois tipos principais de inclusões fluidas (IFs) puderam ser estabelecidos (tipos 1 e 2), como descrito no item Tipos de Inclusões Fluidas do presente trabalho. O Tipo 1 corresponde a IFs bifásicas aquocarbônicas e com composição  $H_2O-CO_2\pm CH_4-NaCl$ , com traços de N<sub>2</sub>, podendo conter KCl, MgCl<sub>2</sub> e FeCl<sub>2</sub>. São predominantemente aquosas e contêm porção gasosa que ocupa 5 a 15% do volume da cavidade da IF, indicando que o fluido provavelmente homogêneo (não imiscível) no momento do aprisionamento. O Tipo 2 são IFs bifásicas aquosas, presentes apenas nos veios V4 do dique metamáfico DB1. Sugere-se que as IFs tipo 1 representem o fluido mineralizador e são registradas em quartzo do veio V1 relacionados com o primeiro evento deformacional (evento D<sub>n</sub>), uma vez que estes são veios controlados pelo plano da foliação S<sub>n</sub>.

Com base em dados de microtermometria (Tabelas 8 e 9), sugere-se pelo menos dois estágios de evolução do fluido: i) cedo-hidrotermal, com IFs tipo 1a pseudo-secundárias, aprisionadas em quartzo fumê Qtz I, com salinidade moderada (~8.5% em peso de NaCl eq.); razão média CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> de 5,4; média da temperatura mínima de homogeneização 280±17°C; e ii) tardi-hidrotermal, representado por IFs pseudo-secundárias e secundárias tipo 1b, aprisionado em quartzo recristalizado Qtz II (Fig. 9), menos salino (~4.6% em peso de NaCl eq.), com pequena diminuição na razão média CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub> para 4,9, com média da temperatura mínima de homogeneização de 315±33°C, apresentando algumas IFs tipo 1b (n=5) atingindo ~450°C. Vale ressaltar que considerando valores aproximados de pressão de cerca de 3 kbars para depósitos semelhantes de ouro orogênico (Groves et al. 2003; Ridley e Diamond 2000), uma correção nas temperaturas de Th/Td elevaria esses valores em cerca de 50°C, resultando em uma temperatura mínima de aprisionamento de 330±17°C para tipo 1a e 365±33°C para 1b. Esses valores são compatíveis com intervalo obtido através do geotermômetro da arsenopirita.

Apesar da associação de Au-Sb em depósitos de ouro orogênico estar relacionada na literatura a níveis crustais epizonais (Groves 1993, Groves et al. 1998, 2003 e Goldfarb et al. 2001), os dados de inclusões fluidas apresentados neste estudo (P e T) posicionam o depósito Carvoaria em um ambiente crustal mesozonal.

Os depósitos de ouro orogênicos e *intrusion-related* comumente apresentam processos de imiscibilidade ou mistura de fluido como processos

que influenciam na precipitação do ouro (Groves *et al.* 2003). No depósito Carvoaria Velha não foram encontradas evidências destes processos, podendo sugerir que flutuação da pressão e/ou interação fluido rocha teriam levado à desestabilização dos complexos de ouro-enxofre, conforme sugerido por Loucks e Mavrogenes (1999) *in Groves et al.* (2003). Além disso, nenhum dos três critérios básicos de evidência de imiscibilidade de fluido de Ramboz *et al.* (1982) foram observados. No entanto, mais estudos de detalhe devem ser conduzidos para melhor entendimento dos processos que teriam influenciado a mineralização no depósito Carvoaria Velha.

### 8.5. CH<sub>4</sub> nas Inclusões Fluidas

A presença de CH<sub>4</sub> nas IFs dos veios V1 e V2 reflete a interação de fluido com rochas encaixantes metapelíticas ricas em matéria carbonosas, como já sugerido por Ho *et al.* (1987), sendo no caso do presente estudo as unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria. A interação fluido-rocha pode contribuir com CH<sub>4</sub>, ou outro hidrocarboneto, e/ou N<sub>2</sub> (Cox 1995). A hidrólise da matéria carbonosa (2C+2H<sub>2</sub>O=CO<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> ou C+2H<sub>2</sub>O=CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>) pode ter fornecido carbonato para a alteração hidrotermal e/ou enriquecendo o fluido mineralizador em CH<sub>4</sub>±N<sub>2</sub>, similar ao que ocorre com outros depósitos hospedados no Grupo Nova Lima na região do QF como discutido por Lobato *et al.* (2001a).

Os resultados de IFs sugerem que o depósito Carvoaria Velha formou-se a partir de um fluido mineralizador aquocarbônico, de baixa a média salinidade (<8,5% eq. peso de NaCl), e uma temperatura mínima de deposição para o ouro de 330±17°C, que são valores típicos de fluido metamórfico característico de depósitos tipo *orogenic gold* (Groves *et al.* 1998).

### 9. AGRADECIMENTOS

À FUNDEP, FAPEMIG, ANGLOGOLD pela oportunidade e pelos recursos financeiros e logísticos para a realização deste trabalho. Aos geólogos Luiz Claudio Lima, Marco Aurélio Sequetto Pereira, Carlos Alberto Rosiere, Kazuo Fuzikawa, James Vieira, Philip E. Brown e Steffen G. Hagemann pelas discussões e sugestões em várias etapas do projeto. À física Maria Silvia Dantas pela colaboração nas medições realizadas no laboratório de Espectroscopia Raman – Departamento de Metalurgia e Engenharia de Materiais (UFMG). Ao SETEM/CDTN/CNEN e ao geólogo Dr. Francisco Javier Rios pela realização das primeiras análises no laboratório de Inclusões Fluidas. Este trabalho contém resultados da dissertação de mestrado do primeiro autor. Alguns equipamentos do laboratório de Metalogenia e Inclusões Fluidas-IGC/UFMG, além

de parte das análises, foram custeados pelo Edital MCT/CT- Mineral/VALE/CNPq No 12/2009, e Edital FAPEMIG 01/2010 - DEMANDA UNIVERSAL. E finalmente aos revisores e editores da revista Geonomos.

### 10. REFERÊNCIAS

- AGABM, AngloGold Ashanti Brasil Mineração. Annual Integrated Report 2011. Disponível em: <http://www.agareports.com/11/> acessado em 20/12/2012
- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, 90:29-58.
- Almeida F.F.M. 1977. O cráton do São Francisco. Rev. Bras. de Geoc., 7:349-364.
- Baltazar O.F. & Silva S.L. 1996. Projeto Rio das Velhas: Mapa Geológico Integrado do Supergrupo Rio das Velhas. Belo Horizonte, Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM-Serviço Geológico do Brasil, escala 1:100.000
- Baltazar O.F. & Pedreira A.J. 1998. Associações litofaciológicas. In: M. Zucchetti e O.F. Baltazar (Eds.), Projeto Rio das Velhas–Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. 2º edição. Belo Horizonte, Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, 43–47 p.
- Baltazar O.F. & Zucchetti M. 2000. Rio das Velhas greenstone belt structural evolution, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: 31th International Geological Congress. Rio de Janeiro, Brazil.
- Baltazar O.F., Baars F.J., Lobato L.M., Reis L.B., Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. CODEMIG, 65 p.
- Baltazar O.F. & Zucchetti M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Ore Geology Reviews 32:471-499.
- Brito-Neves B.B., Sá J.M., Nilson A.A., Botelho N.F. 1995. A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. Geonomos 3 (2):1-21.
- Bodnar R.J. 2003. Introduction to fluid inclusions. In I. Samson, A. Anderson, and D.Marshall, (Eds.), Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada Short Course, 32, p.: 1-8.
- Bodnar R. J. & Vityk M. O. 1994, Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo, B. and Frezzotti, M. L., (Eds.) Fluid inclusions in minerals, Methods and applications. Virginia Tech, Blacksburg, p.: 117-130.
- Brown P.E. & Hagemann S.G. 1995. MacFlinCor and its application to fluids in Archaean lode-gold deposits. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59:3943-3952.
- Canale A.L. 1999. Geologia do Depósito Córrego do Sítio e Caracterização Mineralógica do Minério Sulfetado, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 142 p.

- Chemale Jr.F., Rosière, C.A., Endo I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 25-54.
- Cordani U.G., Kawashita K., Mueller G., Quade H., Reimer V., Roeser H.P. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento do bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 52:785-799.
- Cox S.F., Sun S.S., Etheridge M.A., Wall V.J., Potter T.F. 1995. Structural and Geochemical Controls on the Development of Turbidite-Hosted Gold Quartz Vein Deposits, Wattle Gully Mine, Central Victoria, Australia. *Economic Geology*, 90:1722-1746.
- David M.E.V. 2006. Composição Isotópica de Pb – Sr e Nd da Mineralização de Ouro do Depósito Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero (M.G.): implicações na modelagem conceitual. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 76 p.
- Dorr II J.V., Gair, J.E., Pomerene J.B., Rynearson G.A. 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, Avulso vol. 81. 31 p.
- Dorr II J.V. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 614-A, 110 p.
- Gair J.E. 1962. Geology and ore deposit of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 341-A. 67 p.
- Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18:1-75.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals, SEPM Short Course 31. Society for Sedimentary Geology, p. 199.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* 13:7-27.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Robert F., Hart C.J.R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Economic Geology* 98:1-20.
- Herz N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 648-B, 58 p.
- Herz N. 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero ferrífero , Minas Gerais, Brazil. Geological Survey Professional paper 641-C, 81 p.
- Ho S.E. 1987. Fluid inclusions: their potential as an exploration tool for Archean gold deposits. *Geol. Dept. Univ. Ext., Univ. Western Australia Publ.* 11:239-263.
- Hoefs J., Muller G., Schuster A.K. 1982. Polymetamorphic relations in iron ores .Int. Symp. on Archean and Early Proterozoic. Geol. Evol. and Metallogenesis (ISAP), Salvador. Excursion Annex, 44 p.
- Inda H.V., Schorscher H.D., Dardenne M.A., Shobbenhaus C., Haraly N.L.E., Branco C.A., Ramalho R. 1984. O cráton do São Francisco e a Faixa de Dobramento Araçuaí. In : Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Derze, G. R. & Asmus, H. E. (eds). *Geologia do Brasil – Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e área oceânica adjacente, MME /DNPM, Brasília. p.: 193-248.*
- Jacobs G.K. & Kerrick D.M. 1981. Methane: an equation of state with application to the ternary system H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45:607–614.
- Jaguar Mining INC. 2012. Disponível em:<http://www.jaguarmining.com/s/home.asp>, acessado em 20/12/2012
- Jordt-Evangelista H. 1984. Petrologische Untersuchungen im Gebiete zwischen Mariana und Ponte Nova. Minas Gerais, Brasilien. Ph.D. Thesis. TU Clausthal. 183 p.
- Junqueira P.A., Lobato L.M., Ladeira E.A., Simões E.J.M. 2007. Structural control and hydrothermal alteration at the BIF-hosted Raposos lode-gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32:629–650.
- Ladeira E.A., Roeser H.M.P., Tobesch H.J. 1983. Evolução petrogenética do Cinturão de Rochas Verdes, Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SBG, 2º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 149–165 p.
- Lima L.C., 2012. Depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metaturbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 306 p.
- Lobato L.M., Vieira F.W.R., Ribeiro-Rodrigues L.C., Pereira L.M.M., Menezes M.G., Junqueira P.A., Martins-Pereira S.L. 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima group of the QF: part I, Description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(3):339-354.
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Zucchetti M., Noce C.M., Baltazar O.F., Silva L.C., Pinto C.P. 2001a. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, 36:228-248.
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Vieira F.W.R., 2001b. Brazil's premier gold province: Part II. Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, 36:249-277.
- Lobato L.M., Baltazar O.F., Reis L.B., Achtschin A.B., Baars F.J., Timbó M.A., Berni G.V., Mendonça B.R.V. de, Ferreira D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM
- LOBATO L.M., Santos J.O.S., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. Noce C.M. 2007. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32:674-680.
- Loczy L. & Ladeira E.A. 1976. Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica. Edgar Blücher, São Paulo, 528 p.
- Machado N., Schrank A., Abreu F.R., Knauer L.G., Almeida-Abreu P.A., 1989. Resultados preliminares da geocronologia U-Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: SBG, 15º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 171–174.
- Machado N., Schrank A., Noce C.M., Gauthier G., 1996. Ages of detrital zircon from Archean–Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 141:259–276.
- Malouf R.F. & Raposo F.O. 1996. Carta Geológica Catas Altas SF 23-X-B-I-1-NO. Minas Gerais, Projeto Rio das Velhas – Convênio DNPM/CPRM . Escala 1:25.000.

- Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8:555–571.
- Marshak S., Alkmim F.F., Evangelista H.J. 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an Archean granite-greenstone terrane. *Nature*, 357:491-493.
- Noce C.M., Machado N., Teixeira W., 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, 28:95–102.
- Noce C.M., Tassinari C.G., Lobato L.M. 2007. Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archean greenstone belts. *Ore Geology Reviews*, 32:500–510.
- O'Rourke J.E. 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *Teses de Doutorado*, University of Winscosin, 106 pp.
- Pereira S.L.M., Lobato L.M., Ferreira J.E., Jardim E.C. 2007. Nature and origin of the BIF-hosted São Bento gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil, with special emphasis on structural controls. *Ore Geology Reviews*, 32:571–595.
- Porto G.N. 2008. A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o exame de diques metamórficos no corpo Cachorro Bravo, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Dissertação de Mestrado*, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 117 p.
- Ramboz C., Pichavant M., Weisbrod A., 1982. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. *Chem. Geol.*, 37:1–48.
- Ribeiro Y. & Shinzato S.A. 2010, Mapeamento Geológico da Região de Rancho Novo, entre os Municípios de Conselheiro Lafaiete e Ouro Branco, MG. Trabalho de graduação, Instituto de Geociências, Universidade de Minas Gerais, 132 p.
- Ribeiro-Rodrigues L.C. & Lobato L.M. 1999. Classificação dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista de Ciências (Fundação Educacional de Caratinga)*, 1(2): 35-50.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., Oliveira C.G., Gunther F. 2007. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32:543–570.
- Ridley, J.R., and Diamond, L.W., 2000, Fluid chemistry of orogenic lode-gold deposits and implications for genetic models. In: *Reviews in Economic Geology*, v. 13:141-162.
- Rosière C. A., Spier C. A., Rios F. J., Suckau V. E, 2008. The Itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and Related High-Grade Iron Ore Deposits: An Overview. *Society of Economic Geologists*, 15:223-254.
- Rosière C. A., Chemale Jr., 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero - uma visão geral e discussão. *Geonomos*, Belo Horizonte, 8(2):27-42.
- Schorscher H.D., 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, Minas Gerais. In: SBG, 29º Congresso Brasileiro de Geologia. Ouro Preto, 194-195 p.
- Schorscher H.D. 1978. Komatiitos na estrutura "Greenstone Belt" Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, p. 292–293.
- Teixeira W., Figueiredo M.C.H. 1994. An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research* 53:1-22.
- Teixeira W., Carneiro M.A., Noce C.M., Machado N., Sato K., Taylor P.N. 1996. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic-granitoid complexes in the southern São Francisco craton, Brazil. *Precambrian Research* 78:151–164.
- Thierry R., Van der Kerkhof A.F., Dubessy F. 1994. vX properties of CH<sub>4</sub> –CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> –N<sub>2</sub> fluid inclusions: modeling for T-318 C and P-400 bar. *Eur. J. Mineral*, 6:753–771.
- Vale 2012. Relatório de produção. Disponível em: [http://www.vale.com/PT/investors/Quarterly-results-reports/Quarterly-results/ResultadosTrimestrais/PREPORT1T12\\_p.pdf](http://www.vale.com/PT/investors/Quarterly-results-reports/Quarterly-results/ResultadosTrimestrais/PREPORT1T12_p.pdf), acessado em 20/12/2012.
- Vial D.S., Abreu G.C., Schubert G., Ribeiro-Rodrigues L.C. 2007. Smaller gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32(23):651-673.
- Zucchetti M., Baltazar O.F., Raposo F.O. 1998. Estratigrafia. In: Zucchetti M. & Baltazar O.F. (Eds.) Projeto rio das Velhas – Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, p. 13–42.
- Zucchetti M. & Baltazar O.F. (eds) 1998. Projeto Rio das Velhas- Texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000, DNPM/CPRM 2ª ed. Belo Horizonte, 121 p.
- Zucchetti, M.; Lobato, L. M., Baltazar, O.F. 2000. Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environment, Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, MG. Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, 30:388-392.