



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**FÍSICO-QUÍMICA DO FLUIDO HIDROTHERMAL NOS VEIOS
AURÍFEROS DO CORPO CABEÇA DE PEDRA, DEPÓSITO
LAMEGO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG, BRASIL**

AUTOR: Milton Julián Morales Peña

ORIENTADORA: Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Lydia Maria Lobato (UFMG)

BELO HORIZONTE

DATA (11/05/2015)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**FÍSICO-QUÍMICA DO FLUIDO HIDROTHERMAL NOS VEIOS
AURÍFEROS DO CORPO CABEÇA DE PEDRA, DEPÓSITO
LAMEGO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG, BRASIL**

Por

Milton Julián Morales Peña

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Colegiado de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientadora: Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

Co-orientadora: Profa. Dra. Lydia Maria Lobato

Belo Horizonte

2015



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO MILTON JULIAN MORALES PENA

Realizou-se, no dia 11 de maio de 2015, às 09:00 horas, Auditorio IGC, UFMG, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *FÍSICO-QUÍMICA DO FLUIDO HIDROTHERMAL NOS VEIOS AURÍFEROS DO CORPO CABEÇA DE PEDRA, DEPÓSITO LAMEGO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG, BRASIL*, apresentada por MILTON JULIAN MORALES PENA, número de registro 2013666777, graduado no curso de GEOLOGIA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Rosaline Cristina Figueiredo e Silva - Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Francisco Javier Rios (CDTN/CNEN), Prof(a). Luís Antônio Rosa Seixas (UFOP).

A Comissão considerou a dissertação:

() Aprovada

(X) Aprovada condicionalmente, sujeita a alterações, conforme folha de modificações, anexa.

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 11 de maio de 2015.

Prof(a). Rosaline Cristina Figueiredo e Silva (Doutora)

Prof(a). Francisco Javier Rios (Doutor)

Prof(a). Luís Antônio Rosa Seixas (Doutor)

se xeb

Agradecimentos

O autor expressa sua gratidão às seguintes pessoas por contribuir com a realização deste trabalho:

À professora Rosaline Cristina Figueiredo e Silva, quem me apoiou e incentivou na pesquisa, sempre com a melhor disposição. Muito obrigado pela oportunidade.

À minha co-orientadora Lydia Maria Lobato, por me brindar a oportunidade de ser parte da sua equipe de trabalho, pela confiança e compartilhar comigo parte da sua extensa experiência.

À AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A, pelo apoio logístico, disponibilização de mapas e dados fornecidos. À equipe de geólogos técnicos, Lucas Lemos, Fernando Villanova e Caio Gomes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da Bolsa de estudos de Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e em parceria com a VALE e AGA consideram suporte financeiro no projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. David Banks da School of Earth and Environmental, University of Leeds (Inglaterra), e ao geólogo geólogos Sylvio Gomes pela colaboração e auxílio durante a realização das análises LA-ICP-MS em inclusões fluidas.

Ao geólogo Luís Garcia do Laboratório de Microanálises da UFMG.

Ao colega Breno Martins, pelas discussões, sugestões e apoio durante as diferentes fases da pesquisa.

Ao capítulo estudantil da SEG que foi um apoio constante nesta minha tarefa de entender um pouco mais os depósitos minerais.

A todos os funcionários do instituto de Geociências da UFMG e do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa – CPMTTC, que propiciaram um ambiente de qualidade para o desenvolvimento dos trabalhos.

À Maria Sylvia Dantas, pela grande ajuda na análise da espectroscopia Raman, laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

À minha família pelo apoio, que sempre foi essencial a pesar da distância, vocês foram a minha motivação. À Maria Cristina, pelo carinho, paciência e compreensão durante este processo.

À UFMG, Minas Gerais e ao Brasil por me oferecer a oportunidade de crescer como pessoa e como profissional. A todos vocês, Muito obrigado.

Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Objetivos e justificativa	3
1.2. Apresentação da dissertação	4
1.3. Localização e vias de acesso	5
1.4. Métodos de trabalho.....	6
Capítulo 2 – Amostragem.....	10
Capítulo 3 - Geologia Regional	14
3.1. Estratigrafia	14
3.2. Geologia estrutural.....	17
3.3. Metamorfismo.....	18
Capitulo 4 - Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted Lamego gold mineralization: microthermometric and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil	20
1. Introduction.....	22
2. Regional Geology.....	24
3. Geology of Lamego deposit.....	28
3.1. Lithostratigraphy	28
3.2. Structural geology and hydrothermal alteration at the Lamego deposit	31
4. Materials and methods	33
5. Veins associated with the Cabeça de Pedra orebody	37
6. Fluid inclusions	41
6.1. FI Petrography	41
6.2. Raman Spectroscopy	42
6.3. Microthermometry results	44
6.3.1. Freezing	44
6.3.2. Heating	44
6.3.3. Quantitative estimation of fluid inclusions composition	45
7. LA-ICP-MS fluid inclusion analyses.....	50
7.1. Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit.....	50
7.2. Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament	52
8. Arsenopyrite geothermometer and pressure estimation for the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit.....	56
9. Discussion.....	60

9.1. Nature of veins in the Cabeça de Pedra orebody.....	60
9.2. Hydrothermal fluid evolution	60
9.3. Gold precipitation mechanisms.....	62
9.4. LA-ICP-MS in fluid inclusions of the Cabeça de Pedra orebody	63
9.5. LA-ICP-MS in fluid inclusions of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament	65
10. Conclusions.....	68
Capítulo 5 - Considerações finais	71
Referências.....	74
ANEXO I Fichas Petrográficas (CD)	75

Lista de Figuras

- Fig. 1.1.** Localização da Mina Lamego. Fonte: Google Maps, (2014).6
- Fig. 1.2.** Organograma dos métodos usados neste estudo9
- Fig. 2.** Furos de sondagem selecionados para amostragem no corpo Cabeça de Pedra. Informação proporcionada por AGA (2013).....13
- Fig. 3.** Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti, 2007).16
- Fig. 1.** Simplified geological and structural map of the Quadrilátero Ferrífero region. The main lithofacies associations of the Nova Lima Group, Rio das Velhas greenstone belt (Baltazar and Zucchetti, 2007), and some of the gold deposits are shown (from Lobato et al., 2001). Gold deposits: 1 – Cuiabá; 2 – Raposos; 3 – Morro Velho; 4 – Bela Fama; 5 – Bicalho; 6 – Esperança; 7 – Paciência; 8 – Juca Vieira; 9 – São Bento; 10 -Córrego do Sítio; 11 – Brumal; 12 – Lamego; 13 – Santana; 14 – Engenho d’Água. Studied area is highlighted in a green square, and detailed in Figure 2. Also highlighted in red is the Córrego do Sítio area.27
- Fig. 2.** Geological map of the Lamego deposit. Modified after Villanova, 2011.30
- Fig. 3.** Cross-section of the Cabeça de Pedra orebody showing the schematic logging sampled LCPD009 and LCPD011 drill cores, with gold grades (in ppm) and depths from where quartz veins were collected. Data source of gold grades from AGA (2008).36
- Fig. 4.** Schematic diagram illustrating the different quartz vein systems at the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. Also shown are photographs of examples from core and hand samples. Veins types hosted in the metavolcano-sedimentary rocks are: V1 – smoky Qtz-Cb extensional veins that crosscut S_0 in BIF; V2a – smoky Qtz-Cb veins, along main S_{1-2} foliation in metabasalt, which may be folded and boudinaged; V2b – smoky Qtz-Cb veins, developed along bedding S_0 in BIF; V2c – smoky Qtz-Cb veins, along main S_{1-2} foliation in carbonaceous phyllite with boudins and pinch-and-swell structures and silicification zones along the contact between BIF and carbonaceous phyllite; V2d – smoky Qtz-Cb veins controlled by S_{1-2} foliation in micaceous phyllite; V3 – milky Qtz-Cb veins in smoky quartz associated with shear zones and faults, with en echelon vein arrays and stockwork structures.39
- Fig. 5.** Photomicrographs showing: A) Different types of quartz in V2 vein types. Qtz I is only present as smoky quartz, and Qtz II as polygonal crystals associated with Qtz I borders (transmitted light, crossed nicols, 5x). B) Tips of quartz in V2 and V3 veins: polygonal Qtz II (incipient recrystallization) associated with Qtz I as smoky quartz, and granoblastic Qtz II (advanced recrystallization) as milky quartz (transmitted light, crossed nicols, 2.5x). C) Gold associated with proximal hydrothermal alteration minerals in BIF. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; Au – gold; Qtz – quartz; Cb – carbonate.40
- Fig. 6.** A) Schematic map showing the distribution (at room temperature) of the main fluid inclusion types in mineralized and barren quartz veins at the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. Photomicrographs showing: B) Pseudosecondary type IA inclusions (square, rectangular or oval in shape) restricted to smoky quartz (Qtz I); C)

Pseudosecondary type IB inclusions restricted to recrystallized quartz (Qtz II); D) Pseudosecondary trails of type II inclusions in Qtz I and Qtz II. E) Representative Raman spectra of all types of fluid inclusion with more abundant components in the vapor phase. F) Raman spectrum of a type IA fluid inclusion with graphite fragments.

-43
- Fig. 7.** Histograms showing microthermometric characteristics of fluid inclusions trapped in quartz veins from the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. Microthermometry data includes CO₂ melting (T_{mCO_2}), final fusion ice (T_e), clatrate melting (T_{mCl}), and CO₂ homogenization (T_{hCO_2}) temperatures.46
- Fig. 8.** Diagram showing salinity versus decrepitation (T_{dec}) temperature for inclusions: A) type IA; B) type IB; C) type II with a few data of total homogenization ($T_{htot L-V}$). ...48
- Fig. 9.** Diagrams showing metal concentrations obtained from LA-ICP-MS microanalyses of fluid inclusion assemblages and individual fluid inclusions in the Cabeça de Pedra orebody. The box plot represents the average value for a fluid inclusion type, with the respective standard deviations shown by the error bars in different veins types.51
- Fig. 10.** Diagrams showing metal concentrations obtained from LA-ICP-MS microanalyses of fluid inclusion assemblages and individual fluid inclusions at the Carvoaria Velha gold deposit (Riberio et al., 2015), Córrego do Sítio lineament. These results are meant to be compared with data obtained for the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit.55
- Fig. 11.** A) Backscattered scanning image of As-rich pyrite (Py) and arsenopyrite (Apy) crystals showing alteration rims (red lines) with associated gold particles. B) Diagram of Kretschmar and Scott (1976) shows arsenic % atomic concentration versus temperature applied for arsenopyrite geothermometer. Values for this study are represented as a red area. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; Lö –loellingite. C) Pressure estimates of representative fluid inclusions, calculated from the intersection of arsenopyrite geothermometer with the isochores.....58
- Fig. 12.** Schematic hydrothermal fluid model for the gold mineralization at the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. A) Metamorphic fluid (green arrows) carries cations during metamorphic devolatilization of carbonaceous phyllites. B) Fluid-rock interaction and leaching of cations of carbonaceous phyllites. C) Replacement-style of gold precipitation in BIF.67

Lista de Tabelas

Tabela 1 Lista de amostras, com respectivas profundidades, selecionadas nos testemunhos de sondagem LCPD009 e LCPD011 do corpo Cabeça de Pedra.....	11
Table 1 Synthesis of vein characteristics in the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit	40
Table 2 Microthermometry data for V1, V2 and V3 veins of the Cabeça de Pedra Orebody, Lamego deposit. Mean and standard deviation (1σ) values are shown for $N > 3$ in the second line of each sample.....	47
Table 3 Microthermometric data of aqueous-carbonic inclusions (types IA, IB and II)..	49
Table 4 Summary of LA-ICP-MS analyses of FI in the Cabeça de Pedra orebody. Individual element concentrations are in ppm, calculated using the salinity of the fluid inclusions.....	52
Table 5 Synthesis of vein characteristics in the Carvoaria Velha deposit. From Ribeiro et al. (2015)	54
Table 6 Summary of LA-ICP-MS analyses of FI in the Carvoaria Velha, Córrego do Sitio deposit. Individual element concentrations are in ppm, calculated using the salinity of the fluid inclusions	54
Table 7 Composition data of arsenopyrite crystals from mineralized samples of the Cabeça de Pedra orebody, obtained from electron microprobe analysis	59

Resumo

O depósito aurífero Lamego encontra-se hospedado em rochas metavulcanossedimentares neoarqueanas do *greenstone belt* Rio das Velhas, estando a mineralização associada principalmente a *metachert*-formação ferrífera bandada (FFB) e filitos carbonosos numa dobra reclinada, dobra Lamego, na qual o corpo de minério Cabeça de Pedra representa a zona de charneira. A mineralização de ouro ocorre tanto em veios e massas de quartzo, como também em sulfetos, produto da substituição da FFB durante a atividade hidrotermal, principalmente sulfetação. A alteração hidrotermal varia de acordo com a rocha hospedeira, com abundante sulfeto-carbonato na FFB, e sericita-clorita no filito carbonoso. Veios de quartzo são classificados em três sistemas principais, tendo como critério a estrutura na qual estão associados e a rocha hospedeira. O sistema V1, composto principalmente por quartzo fumê e pirita, tem caráter extensional, e corta o bandamento da FFB em direção paralela ao eixo de dobramento. O sistema V2, de mesma composição, está representado por veios em direção paralela à foliação S_{1-2} e o bandamento S_0 no caso da FFB, além de massas de quartzo no contato FFB-filito carbonoso; as mesmas têm sua expressão máxima na zona de charneira das dobras. O sistema V3 tem veios de quartzo leitoso, que resulta da recristalização do quartzo fumê, localizado principalmente nas zonas de falha e de cisalhamento, formando estruturas *en echelon* e *vein arrays*. Os minerais-minério mais comuns são pirita e arsenopirita principalmente na FFB. Estudos de microtermometria em inclusões fluidas-IFs permitem afirmar que as IFs aprisionadas em todos os tipos de veios apresentam composição no sistema $H_2O-CO_2 \pm CH_4-NaCl$. A evolução do fluido pode ser interpretada em duas etapas: i) fluido aquo-carbônico de salinidade baixa (~ 2 eq. wt% NaCl), aprisionado em quartzo fumê (Qtz I), sugerindo origem metamórfica, e uma temperatura de decrepitação no intervalo de 200 a 300°C; e ii) fluido aquo-carbônico, com salinidade moderada (~ 9% eq. wt% NaCl), hospedado em quartzo leitoso (Qtz II), com temperaturas de decrepitação no intervalo de 200 a 300°C.

A temperatura de formação do depósito é calculada por meio do geotermômetro da arsenopirita em 300 a 375°C e, pela interseção vertical das isócoras, se calcula uma pressão de 2 a 3,5 kbar. A composição das IFs individuais do corpo Cabeça de Pedra, obtida através de análises LA-ICP-MS, comparadas com resultados obtidos em IFs do depósito Carvoaria Velha, do lineamento Córrego do Sítio, destaca uma composição padrão de elementos maiores típica de fluidos metamórficos com $Na > K > Ca > Mg$, que aumentam ou diminuem em concentração em função da salinidade em ambos os depósitos. Os elementos menores variam de acordo com as reações fluido-rocha, e são diretamente relacionados à composição das rochas hospedeiras. Ao se comparar o conjuntos dos dados dos dois depósitos, nota-se que, no caso das IFs do corpo de minério Cabeça de Pedra, depósito Lamego, há maior enriquecimento em Zn, enquanto que Cu, As e Sb são mais ricos em Carvoaria Velha, sugerindo influência da geoquímica das rochas hospedeiras. Os mecanismos de precipitação do ouro sugeridos são: i) hidrólise da matéria carbonosa do filito e da FFB alterando levemente a fO_2 no fluido, ii) substituição do carbonatos de ferro da FFB por sulfetos, e iii) as contínuas mudanças da pressão que levam à precipitação de sílica junto com ouro livre.

Abstract

The Lamego gold deposit is hosted in Neoproterozoic metavolcano-sedimentary rocks of the Rio das Velhas greenstone belt. Mineralization is associated mainly with metachert-banded iron formation (BIF) and carbonaceous phyllites in a reclined fold, the Lamego fold, in which the Cabeça de Pedra orebody represents the hinge zone. Gold mineralization is concentrated both in quartz veins and in silicification zones, as well as sulfide minerals, product of replacement of BIF during hydrothermal activity, particularly sulfides. This alteration varies according to host rock, with abundant sulfide-carbonate in the BIF, and sericite-chlorite in carbonaceous phyllite. Quartz veins are classified into three main systems, according to their structural relationships and host rock. The V1 system, mainly composed of smoky quartz and pyrite, is extensional and crosscuts the banding of BIF, and is parallel to the fold axis. The V2 system, of same composition, is represented by veins that are parallel to the S_{1-2} foliation and S_0 bedding of BIF. This system is also characterized by silicification zones in the BIF-carbonaceous phyllite contact that has its maximum expression in the hinge zone of folds. The V3 system has milky quartz veins, which result from recrystallization of smoky quartz, located mainly in shear failure zones and forming structures en echelon and vein arrays. The most common ore minerals are pyrite and arsenopyrite mainly in BIF. Fluid inclusion-FI microthermometric studies demonstrate that FIs trapped in all vein types present composition in the $H_2O-CO_2 \pm CH_4-NaCl$ system. Fluid evolution can be interpreted in two stages: i) aqueous-carbonic fluid of low salinity (~ 2% equiv. wt% NaCl) trapped in smoky quartz (Qtz I), suggests a metamorphic origin, and a decrepitation temperature in the range of 200 to 300°C; and ii) carbonic-aqueous fluid, with moderate salinity (average 9 % equiv. wt% NaCl) hosted in milky quartz (Qtz II), with decrepitation temperatures in the range of 200 to 300°C.

The deposit formation temperature is calculated using the arsenopyrite geothermometer at 300 to 375°C. The vertical intersection of the isochors allows the calculation of the pressure between 2 to 3.5 kbar. The composition of individual FIs of the Cabeça de Pedra orebody, obtained by LA-ICP-MS analyses, compared with results obtained in inclusions of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament, highlights a standard composition typical of metamorphic fluids with $Na > K > Ca > Mg$, which increase or decrease in concentration as a function of salinity in both deposits. Smaller elements vary according to the fluid-rock reactions, and are directly related to the composition of differences in host rock. To compare the data sets of the two deposits, it is clear that the Cabeça de Pedra FIs has a higher enrichment in Zn, while Cu, As and Sb are richer in Carvoaria Velha, suggesting influence of the host rock geochemistry. The suggested mechanisms for gold precipitation are: i) hydrolysis of the carbonaceous matter of phyllite and BIF, slightly changing the fO_2 in the fluid, ii) replacement of BIF iron carbonates by sulfides, and iii) the continuous pressure changes that lead to silica precipitation and free gold.

Capítulo 1 – Introdução

O *greenstone belt* Rio das Velhas, de idade neoarqueana, representa uma sequência supracrustal que teve sua maior atividade tectono-metamórfica e magmática no intervalo de 2780 a 2700 Ma (Noce et al., 2007). Esta unidade é caracterizada por hospedar depósitos de ouro orogênico (Groves et al., 1998) de classe mundial, e historicamente foi pesquisada com fins exploratórios desde a colonização portuguesa do Brasil nos séculos XVII e XVIII, na época conhecida como ciclo do ouro (Russell-Wood, 1984).

Localizado geograficamente na parte centro-sul do estado de Minas Gerais, no SE do Brasil, a região do Quadrilátero Ferrífero (QF) é um distrito mineral no extremo sul do Cráton São Francisco (Almeida, 1967; Almeida and Hasui, 1984). Compreende três unidades principais: terrenos granito-gnáissicos, *greenstone belt* Rio das Velhas e sequências metassedimentares proterozoicas (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969). O Supergrupo Rio das Velhas hospeda a maior quantidade de depósitos auríferos do QF (Lobato et al., 2001a, b), e está dividido em 1) Grupo Nova Lima, composto de uma sequência metavulcanossedimentar, e 2) Grupo Maquiné, composto de sequências clásticas continentais (Baltazar e Zucchetti, 2007).

Os diferentes depósitos de ouro na região foram formados durante a deformação arqueana que afetou o supergrupo Rio das Velhas, associado com grandes volumes de fluidos hidrotermais (e.g. Ribeiro-Rodrigues et al., 2007, Vial et al., 2007), o qual está relacionado em idade e ambiente de formação com outros depósitos presentes em diferentes cratons do mundo (Goldfarb et al., 2001). Depósitos de classe mundial como Morro Velho (> 500 t) e Cuiabá (> 100 t), e menores como Raposos, Juca Vieira, São Bento, Córrego do Sítio e Lamego, encontram-se hospedados em diferentes níveis do Grupo Nova Lima e apresentam estilos de mineralização variados (Lobato et al., 1998, a, b; Lobato et al., 2001b).

O depósito Lamego está situado na cidade de Sabará, onde é explorado em mina subterrânea pela AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A (AGA) desde 2009. Encontra-se hospedado na parte intermediária da sequência *greenstone belt* Rio das Velhas. Sales (1998) foi o primeiro a reconhecer a litoestratigrafia local. Da base ao topo, ocorrem metabasalto (clorita-carbonato-sericita-quartzo xistos), *chert* bandado intercalado com formação ferrífera bandada (FFB), que podem ser carbonosos e/ou ferruginosos, e filitos carbonosos e micáceos, com paragêneses minerais compatíveis com a da fácies xisto verde. Zonas de silicificação contendo quartzo fumê são abundantes e amplamente distribuídas, em associação com veios de quartzo que contêm os mais altos teores de ouro. A alteração hidrotermal por substituição da FFB (*replacement-style*), hospeda a mineralização restante, onde domina pirita substituindo o carbonato original siderita. Lamego tem reportado 440,742 Oz de ouro em reservas medidas e 2,4 milhões t em recursos medidos, com um teor de 5.71 Au g/t e um *cut-off* de 2.15 g/t Au (AGA comunicação verbal, 2014). O depósito é controlado estruturalmente e os veios encontram-se dispostos em zonas de cisalhamento e, dependendo da competência da rocha, de forma concordante ou discordante com a foliação. Algumas zonas apresentam texturas de brecha com fragmentos da rocha hospedeira. Os veios de quartzo fumê são atribuídos aos primeiros estágios da mineralização. No entanto, o quartzo leitoso é atribuído à recristalização do fumê ou a estágios finais do processo hidrotermal (Martins, 2011).

A estrutura de Lamego é dominada por uma dobra isoclinal reclinada, segundo a classificação de Ramsay (1968), chamada de dobra Lamego (Martins et al., 2011). Esta possui quatro corpos de minério, os quais são Queimada, Carruagem, Arco da Velha e Cabeça de Pedra, sendo este último objeto deste estudo.

1.1. Objetivos e justificativa

O objetivo dessa dissertação é contribuir para o entendimento da origem, características físicas e químicas dos fluidos mineralizadores e sua influência na formação do depósito Lamego. Inicialmente, é enfocada a classificação dos diferentes sistemas de veios, mineralizados ou não, no corpo Cabeça de Pedra, detalhando suas características petrográficas. Isto é complementado com a microtermometria de inclusões fluidas-IFs, geotermômetro da arsenopirita e microanálises LA-ICP-MS de IFs. Esse conjunto de informações é finalmente usado para propor um modelo da evolução hidrotermal para a jazida aurífera Lamego.

Através das diferentes técnicas usadas neste trabalho, pretende-se responder às seguintes questões:

- Entender a relação e disposição dos veios de quartzo no corpo Cabeça de Pedra, tentando estabelecer as características mineralógicas e estruturais de cada um deles fazendo uma classificação dos mesmos;
- Estabelecer as características de temperatura e pressão de formação dos veios no depósito.
- Definir a composição química do fluido e estabelecer a sua interação com as rochas hospedeiras.
- Definir os possíveis mecanismos de precipitação do ouro na jazida.

Poucos estudos sobre IFs já foram realizados em depósitos do Arqueano do QF (Godoy, 1994; Alves, 1995; Xavier et al., 2000; Ribeiro et al; 2015), e não existem dados de microanálises LA-ICP-MS em IFs reportados para os mesmos. Esses dados, inéditos, permitem contribuir para o modelo sobre a história evolutiva do depósito Lamego, contribuir também para o conhecimento das mineralizações auríferas no Arqueano do QF,

pelo qual se faz uma comparação com dados obtidos tanto do depósito Lamego, quanto do depósito Carvoaria Velha, Lineamento Córrego do Sitio.

1.2. Apresentação da dissertação

Essa dissertação de mestrado é apresentada em formato de artigo científico, em idioma inglês, o qual é detalhado no capítulo 4.

O artigo intitulado “Fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted, Lamego orogenic gold deposit: microthermometric and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Minas Gerais, Brazil”, foi submetido ao periódico *Ore Geology Reviews*, e foca o estudo no corpo Cabeça de Pedra do depósito Lamego. Inicialmente foram classificados três sistemas de veios. Posteriormente passamos aos estudos das IFs em quartzo, usando técnicas como microtermometria, espectroscopia Raman, *in situ laser ablation* acoplado ao ICP-MS. Determinações quantitativas por microsonda eletrônica em cristais de arsenopirita ainda permitiram o cálculo da temperatura utilizando o geotermômetro da arsenopirita (Kretschmar e Scott, 1976). Informações complementares encontram-se nos capítulos 2, 3 e 5 e no anexo I.

Este estudo foi feito no programa de Pós-graduação em Geologia Econômica e Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, em colaboração com a empresa mineradora AGA; estando inserido no e financiado pelo projeto de pesquisa CNPq-Vale intitulado “**Características e influência da alteração hidrotermal nas mineralizações auríferas e ferríferas na Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, do Arqueano ao Paleoproterozoico: implicações para exploração geológica**”, e co-financiado pela AGA.

1.3. Localização e vias de acesso

O depósito Lamego encontra-se localizado no município de Sabará, 30 km aproximadamente da cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. Para chegar à mina Lamego, é preciso ir até o município de Sabará (17 km de Belo Horizonte) pela rodovia BR-262 sentido Vitória, até chegar na primeira rotatória, 5 km depois desse município, para virar à direita e tomar a estrada vicinal por mais 7,5 km. O depósito se encontra em produção em mina subterrânea a cargo da empresa AGA (Fig. 1.1)

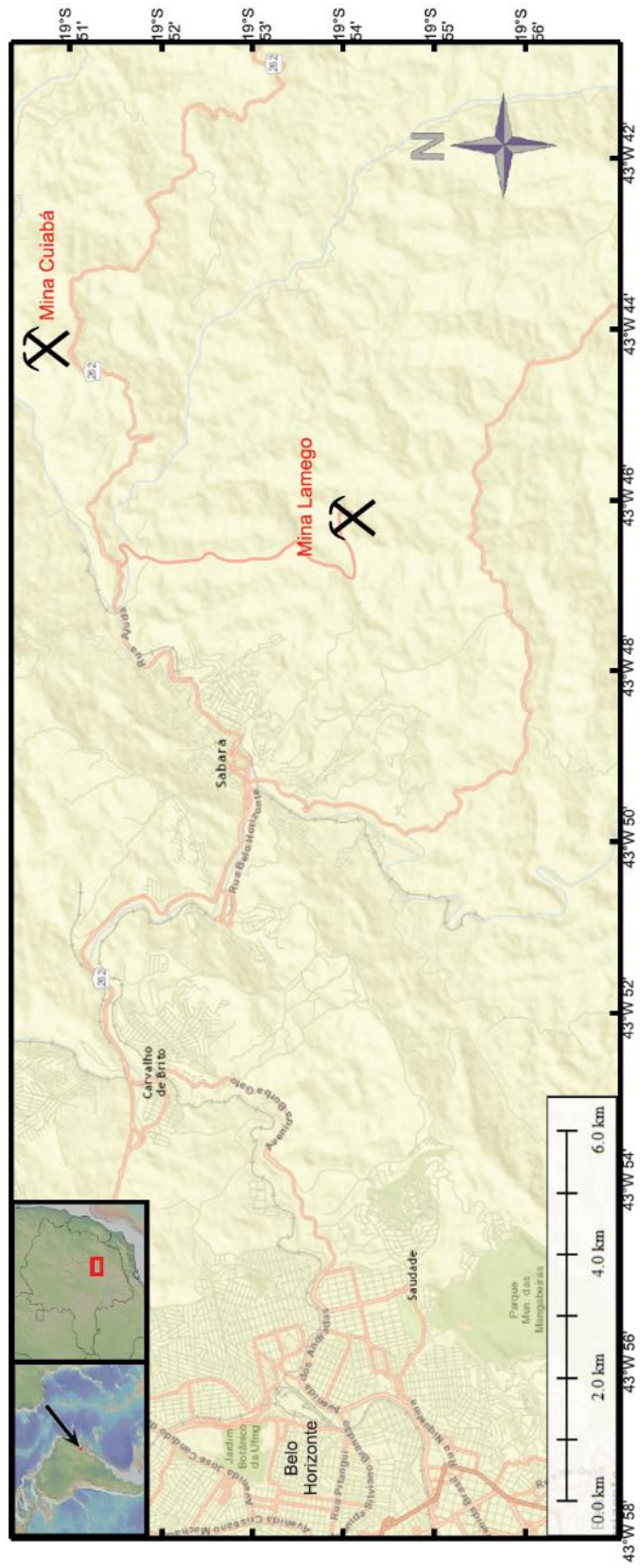


Fig. 1.1. Localização da Mina Lamego. Fonte: Google Maps, (2014).

1.4. Métodos de trabalho

A continuação são descritos os diferentes métodos usados neste estudo, sintetizados na fig. 1.2:

- Dois furos de sondagem (LCPD0011 e LCPD0009) foram amostrados no corpo Cabeça de Pedra, os quais atravessam a estrutura em diferentes profundidades, litologias e teor, tendo como prioridade as zonas silicificadas. A partir deles foram confeccionadas 13 lâminas delgadas polidas de veios de quartzo para estudos petrográficos e 7 lâminas bipolidas (~ 130 μ de espessura) para análise de IFs.
- A petrografia mineral e de IFs foi feita em microscópio Leica convencional com objetivas 2.5x, 5x, 10x, 20x, 50x e 100x, detalhando as diferentes FIA's (*fluid inclusion assemblages*), usando como critério discriminativo a morfologia, tamanho, fases presentes e sua relação ao mineral hospedeiro.
- A análise microtermométrica de IFs foi feita no CPMTIC-IGC da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG usando a platina de aquecimento – resfriamento Linkam THMSG600, com uma variação de temperatura entre -190 a 600 $^{\circ}\text{C}$ acoplada a um controlador de temperatura T95, calibrado com o padrão Linkam de inclusões sintéticas do sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$. As IFs foram inicialmente resfriadas até uma temperatura de -150 $^{\circ}\text{C}$ e, em seguida, aquecidas numa taxa de 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, incrementando a velocidade a 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no intervalo de 30 $^{\circ}\text{C}$ até 200 $^{\circ}\text{C}$, e subsequentemente reduzida a 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ de 200 até 350 $^{\circ}\text{C}$, até atingir a temperatura de decrepitação ou de homogeneização total. A partir deste procedimento, registraram-se sete temperaturas de transição de fases durante a etapa de aquecimento: fusão de CO_2 (T_{MCO_2}), ponto eutético (T_e), fusão final do gelo (T_{mice}), fusão de clatratos (T_{clath}), homogeneização de CO_2 (T_{hCO_2}), decrepitação (T_{dec}) e homogeneização total (T_{htot}). A precisão das medições na fase de

resfriamento foi de $\pm 0,1$ °C, e de ± 1 °C entre 200 e 400 °C. Os cálculos de densidade e salinidade foram fornecidos usando o programa Macflincor 0.93 (Brown e Hagemann, 1995).

- A composição das IFs foi obtida usando um espectrômetro Jobin Yvon/Horiba LABRAM-HR 800 equipado com um *laser* He-Ne (632.8 nm) e acoplado a um microscópio BX-41 Olympus usando objetivas de 10x, 50x e 100x. O tempo para obtenção dos dados foi de 20 até 60 s com um poder de 0,06 to 6 mW e um *spot* de 3 μ . Esta análise foi feita no laboratório de espectroscopia Raman no Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia da UFMG.
- A composição de cristais de arsenopirita foi obtida na microsonda eletrônica JEOL JXA 8900RL no Laboratório de Microanálise do consórcio Física-Geologia-Química da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG.
- Nas análises *in situ* em IFs por *laser ablation* (LA) acoplado ao *inductively-coupled plasma mass-spectrometry* (ICP-MS), as seções bipolidas foram introduzidas na câmara de amostras do ArF 193-nm Geolas Q Plus *excimer laser*. Antes do fechamento da câmara, todo o ar é expulso através de um fluxo de He. Dentro desta câmara, as amostras foram analisadas por um tempo de 300 s, durante o qual diversas inclusões são abertas pelo processo de ablação ao *laser*. Todo o conteúdo extraído das inclusões é transportado para o ICP-MS na forma de aerossol junto com gás He. As amostras foram então analisadas no ICP-MS Agilent 7500c quadrupolo, equipado com um *octopole reaction cell*. As análises foram calibradas utilizando o padrão NIST SRM 610.

Os dados obtidos no LA-ICP-MS foram processados através do *software* SIILS (Guillong et al., 2008), para a calibração, correção de *background* e flutuação e integração do sinal. Durante este procedimento, para garantir que os sinais das IFs estavam sendo processados sem a interferência do cristal hospedeiro, somente os espectros contendo sinais coincidentes de Na e outros cátions foram processados. Esta análise foi feita no laboratório de Laser Ablation ICP-MS da School of Earth of Environment, Universidade de Leeds, Inglaterra.

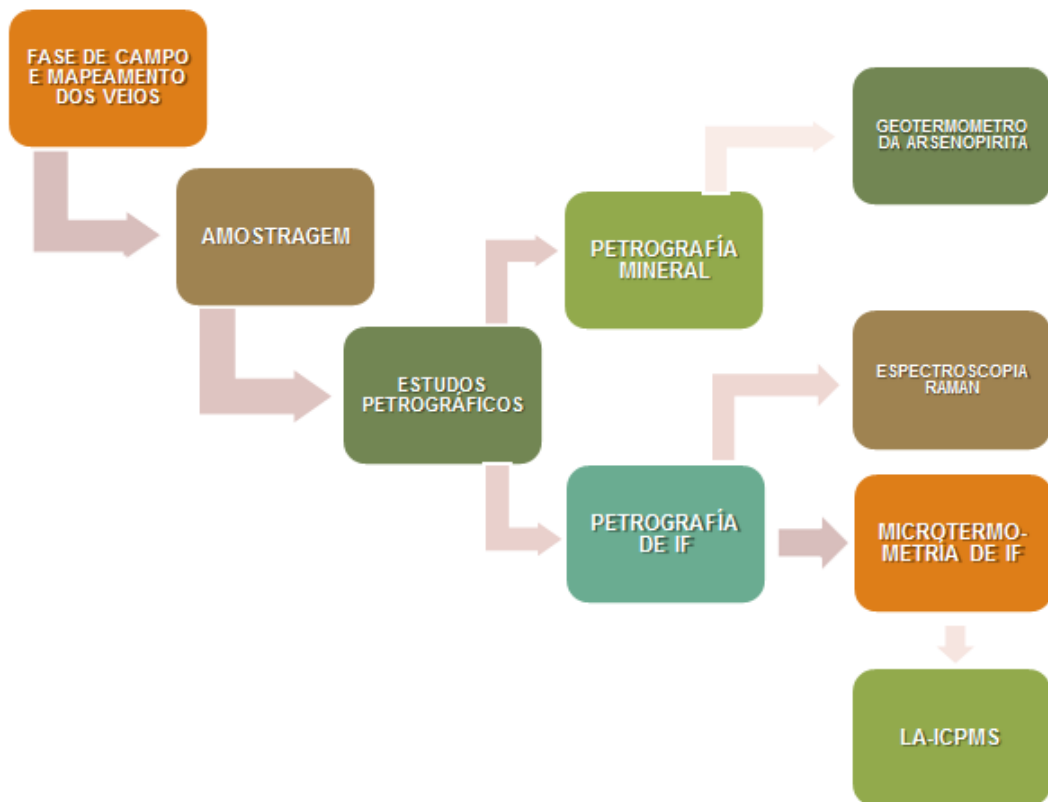


Fig. 1.2. Organograma dos métodos usados neste estudo

Capítulo 2 – Amostragem

A amostragem foi definida a partir de diferentes etapas de reconhecimento de campo, em galeria e na cava do corpo Cabeça de Pedra. A primeira etapa foi alvo do reconhecimento da geologia local e regional. Posteriormente, se realizou uma visita na cava do corpo para realizar o mapeamento dos veios e as zonas de silicificação, para sua posterior classificação. Uma vez classificados os veios, se realizou uma visita para selecionar os furos de sondagem, de acordo com o seu posicionamento na estrutura do corpo Cabeça de Pedra, onde foram escolhidos os furos LCPD011 e LCPD009. Estes furos de sondagem foram amostrados estritamente nos veios em diferentes litologias (Fig. 2), e a partir destas amostras foram confeccionadas 12 lâminas delgadas polidas para estudos petrográficos e de microsonda; e 7 lâminas bipolidas para estudo de inclusões fluidas e LA-ICP-MS.







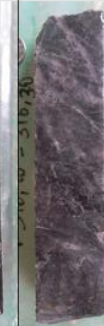
A Tabela 1 relaciona as amostras que foram objeto de estudo com as análises que foram feitas em cada uma. As fichas de descrições petrográficas das lâminas delgadas polidas estão no Anexo I.

Tabela 1
 Lista de amostras, com respectivas profundidades, selecionadas nos testemunhos de sondagem LCPD009 e LCPD011 do corpo Cabeça de Pedra.

F. de sondagem	Amostra	Prof.	Rocha Hospedeira	Tipo	Testemunho	Mineralogia	Petrografia	Microsonda (Cristais Apy)	Inclusões fluidas	Espectroscopia Raman	LA-ICP-MS
LCPD009	LCPD009-1	209,5 m	Fillito micáceo	V2		Qtz, Cb	X	-	-	-	-
	LCPD009-3	217,7 m	Fillito carbonoso	V2		Qtz	-	-	-	-	-
	LCPD009-4	237,25 m	Fillito carbonoso	V2		Qtz, Cb, Py	X	-	-	-	-
	LCPD009-5	243,04 m	Fillito carbonoso	V2		Qtz, Cb, Py	-	-	-	-	-
	LCPD009-6	248,15 m	Fillito carbonoso	V3 em V2		Qtz, Py, Cb	X	-	X	X	-
	LCPD009-7	262,95 m	Fillito carbonoso	V3 em V2		Qtz, Cb	X	-	X	X	X
	LCPD009-8	269,09 m	FFB	V1		Qtz, Cb, Py, Apy, Au	X	-	X	X	X

Lista de abreviações: Qtz=quartzo, Cb= carbonato, Py=pirita, Apy=arsenopirita, Au=ouro

Tabela 1 cont.

F. de sondagem	Amostra	Prof.	Rocha Hospedeira	Tipo	Testemunho	Mineralogia	Petrografia	Microsonda (Cristais Apy)	Inclusões fluidas	Espectroscopia Raman	LA-ICP-MS
LCPD011	LCPD011-1	253,66 m	Filito carbonoso	V2		Qtz, Cb, Py	X	--	--	--	--
	LCPD011-2	258,70 m	Filito carbonoso	V3 em V2		Qtz, Cb	X	--	X	X	X
	LCPD011-3	263,75 m	FFB	V2		Qtz, Cb, Py, Apy, Au	X	X	X	X	X
	LCPD011-4	273,12 m	FFB	V3 em V2		Qtz, Cb, Py, Apy	X	X	--	--	--
	LCPD011-5	283,32 m	Metabasalto	V3		Qtz, Cb, Py, Apy, Au	X	X	X	X	X
	LCPD011-6	304,92 m	Filito carbonoso	V2		Qtz, Cb, Py	X	--	--	--	--
	LCPD011-7	316,10 m	Filito carbonoso	V2		Qtz, Cb	X	--	X	X	X

Lista de abreviações: Qtz=quartzo, Cb= carbonato, Py=pirita, Apy=arsenopirita, Au=ouro

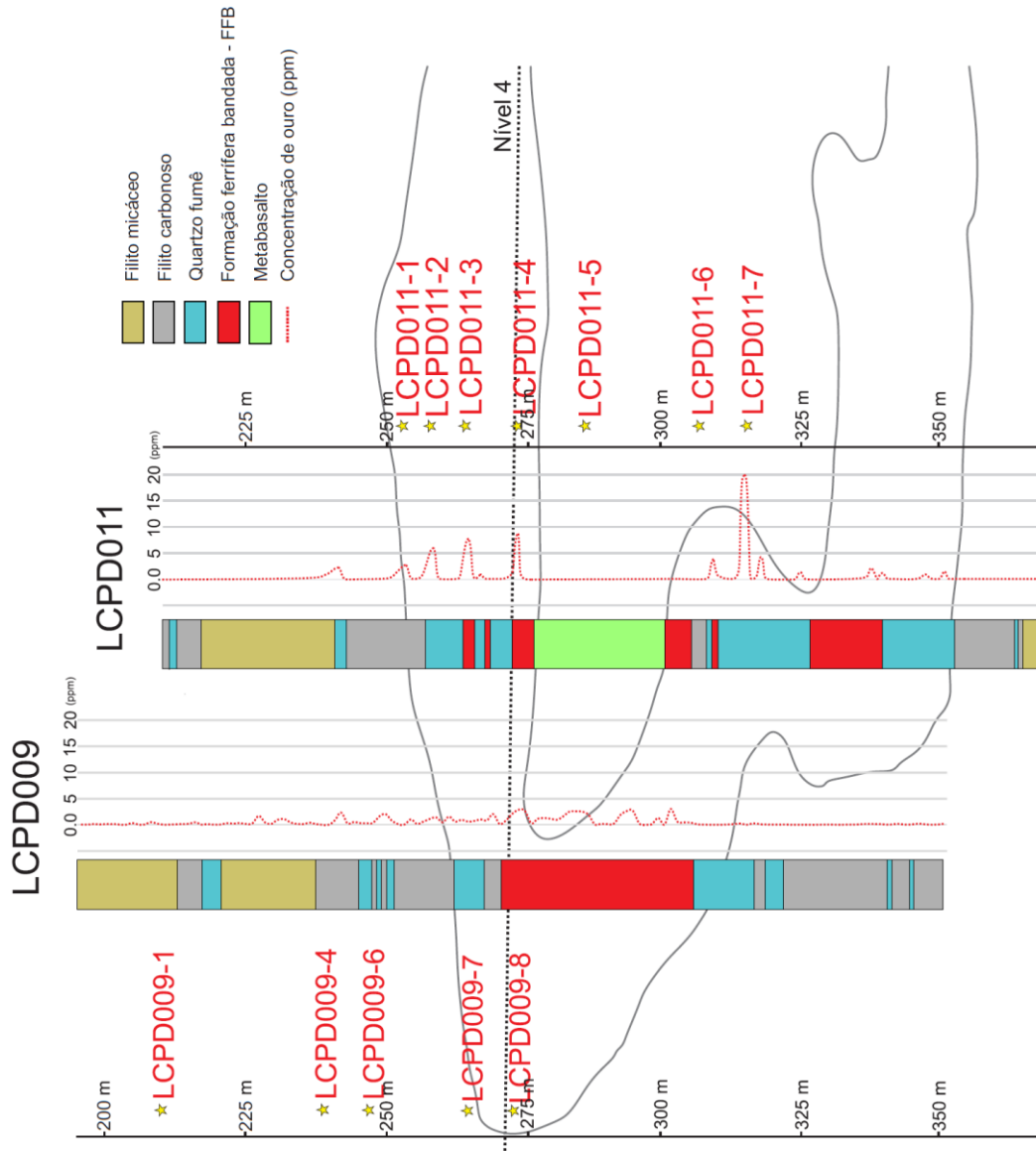


Fig. 2. Furos de sondagem selecionados para amostragem no corpo Cabeça de Pedra. Informação proporcionada por AGA (2013).

Capítulo 3 - Geologia Regional

3.1. Estratigrafia

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) representa um terreno granito-gnáissico sobreposto por uma sequência de tipo *greenstone belt*, de idade arqueana, e sequências supracrustais proterozoicas (Dorr, 1957; Fig. 3).

Os terrenos granito-gnáissicos são compostos por gnaisses trondhjemiticos-tonalíticos-granodioríticos ou TTG e representam o embasamento do QF, cujas unidades mais representativas são os complexos Belo Horizonte, Bação, Caeté e Santa Barbara. Essas rochas são de idade Paleoarqueana a Mesoarqueana, datados no intervalo de 3380 a 2900 Ma. (Teixeira et al., 1996) e têm sido submetidos a processos de metamorfismo e migmatização, de idade 2920 a 2834 Ma, e sendo também afetados pela orogenia Paleoproterozoica Riacciana (previamente chamada de Transamazônica, de 2,22 a 2,05 Ga; Brito Neves, 2011), em 2041 ± 5 Ma (Noce et al., 1998). A unidade encontra-se intrudida por metatonalitos, metandesitos, metagranitos neoarqueanos e diques máficos paleoproterozoicos (Carneiro, 1994; Carneiro et al., 1994; Noce, 1995), e representa a fonte de detritos das unidades sedimentares superiores (Schrank e Machado, 1996; Schrank et al., 2002).

O *greenstone belt* Rio das Velhas, datado no intervalo 2800 a 2740 Ma (Machado e Carneiro, 1992; Machado et al., 1989b; Noce et al., 2002), compreende uma sequência vulcanossedimentar de idade neoarqueana formalmente proposta como Supergrupo Rio das Velhas por Loczy e Ladeira (1976), que compreende duas unidades estratigráficas, os grupos Nova Lima e Maquiné. O Grupo Nova Lima é composto da base ao topo por uma unidade vulcânica komatiítica-tholeiítica basal, com abundantes rochas sedimentares

químicas associadas, sobreposta por uma unidade vulcanoclástica com vulcanismo félsico associado e uma unidade superior clástica (Baltazar e Zucchetti, 2007).

O Grupo Nova Lima foi dividido em sete associações de litofácies sedimentares (Baltazar e Pedreira 1996, 1998; Baltazar e Zucchetti, 2007; Pedreira e Silva, 1996; Zucchetti e Baltazar, 2000): Associações máfica – ultramáfica, vulcanossedimentar química, sedimentar química – clástica, vulcanoclástica (onde o depósito Lamego está localizado), ressedimentada, costeira (ou litorânea) e não-marinha.

O Grupo Maquiné está dividido nas formações Palmital (O'Rourke, 1957), composta de quartzitos e filitos quartzosos, e Casa Forte (Gair, 1962), com quartzitos e conglomerados.

As sequências proterozoicas são principalmente os Supergrupo Minas, Grupo Itacolomi e Supergrupo Espinhaço. O Supergrupo Minas (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969) encontra-se em discordância angular e erosiva sobre as rochas do *greenstone belt* Rio das Velhas e sua distribuição define a forma geométrica do QF. É uma unidade metassedimentar de idade paleoproterozoica, composta por sedimentos clásticos e químicos em um pacote constituído por quartzitos, metaconglomerados, metapelitos e uma espessa sequência de Formações ferríferas bandadas - FFB do tipo Lago Superior (Klein e Ladeira, 2000) com uma idade entre 2580 e 2050 Ma (Renger et al., 1994). O Grupo Itacolomi aflora na parte NE do QF e é composto de sequências sedimentares clásticas. O Supergrupo Espinhaço está composto de conglomerados, arenitos e rochas máficas e cobre uma pequena parte do QF. Foi depositado no intervalo 1840 a 1715 Ma (Machado et al., 1989).

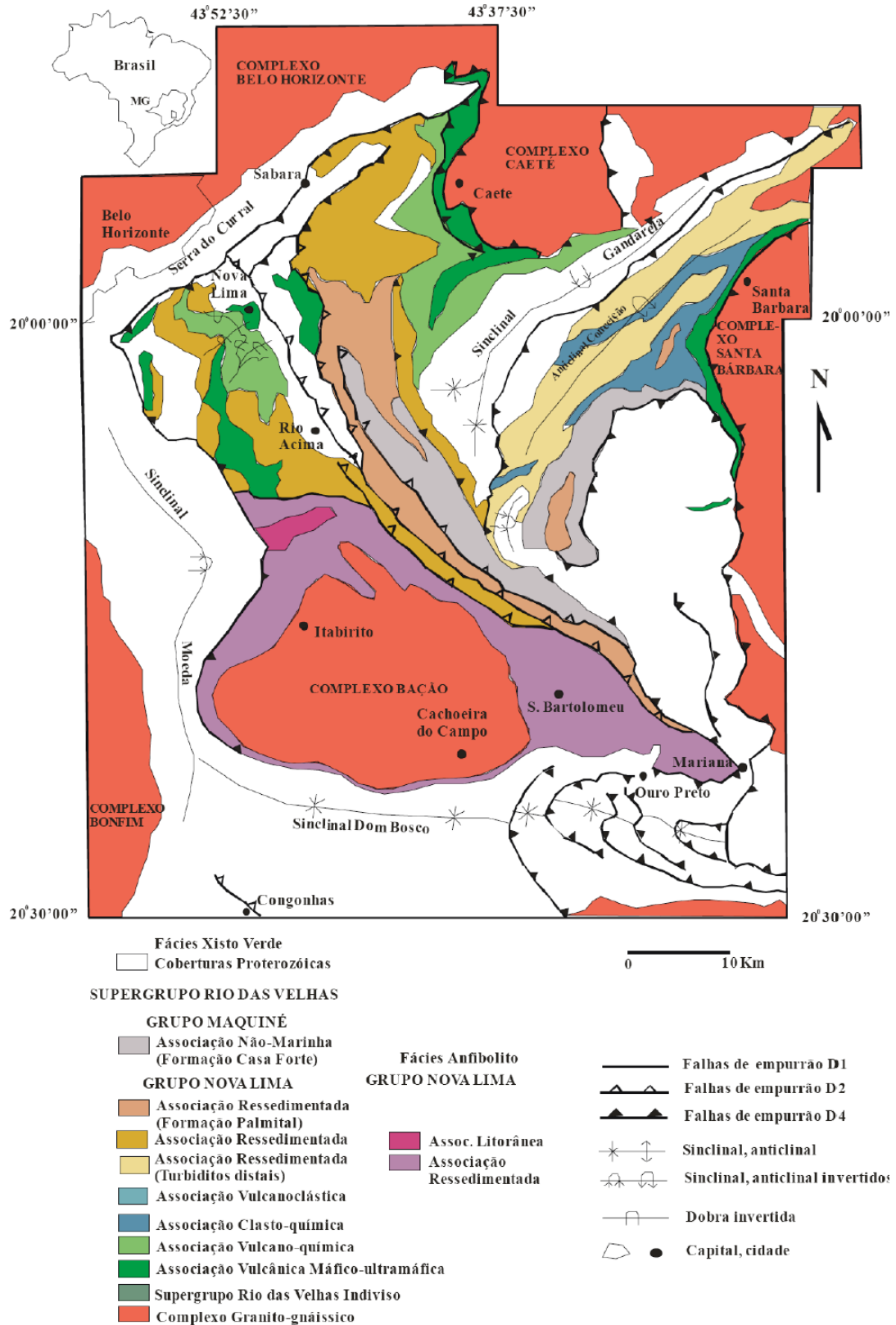


Fig. 3. Mapa geológico simplificado do QF com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti, 2007). No círculo Vermelho, encontra-se localizado o depósito Lamego.

3.2. *Geologia estrutural*

A complexidade estrutural do QF é devida aos diferentes eventos deformacionais que deram lugar na sua história geológica, que ainda é controversa, destacando-se os trabalhos de Belo de Oliveira e Vieira (1987), Dorr (1969), Guimarães (1931), Ladeira e Viveiros (1984), Marshak e Alkmim (1989), Oliveira et al. (1983), Vieira e Oliveira (1988), Zucchetti e Baltazar (1998). Baltazar e Zucchetti (2007) propõem quatro gerações estruturais associadas a tres eventos de deformação do Supergrupo Rio das Velhas. A primeira geração D1 é associada ao evento Arqueano, de regime compressivo e cisalhamento simples, com transporte tectônico do N para S. É caracterizado por falhas de empurrão, com vergência para S e direção E. As estruturas principais são dobras abertas, isoclinais a apertadas com vergência para S com eixos mergulhando para ENE e dobras flexurais. O plano axial da foliação S1 é subparalela ao S0 dobrado (355/65). A lineação mineral e lineação de estiramento Down-dip, lineação de interseção dos S0 e S1 são paralelos aos eixos das dobras.

O evento D2, também de idade arqueana, com regime compressivo com cisalhamento simples, mas o transporte tectônico do NE para SW. As falhas de empurrão tem direção NW (030–050/40–60), dobras isoclinais e apertadas com vergência para SW e direção NW. A lineação de estiramento e lineação mineral tem uma direção (060–070/20–30). A mineralização de ouro no Supergrupo Rio das Velhas está atribuída a este evento de deformação.

A geração D3 está associada ao Riáciano (2100–1900 Ma), de caráter distensional e transporte tectônico do WNW para ESSE. Caracterizado pela nucleação de sinclinais regionais e início da deposição do Supergrupo Minas e pelo surgimento do embassamento granito-gnaissico como complexos de núcleos metamórficos e falhas normais ao redor deles.

O D4 faz parte do ciclo orogênico Brasileiro (650-500 Ma), com regime compressivo e cisalhamento simples e vergência do E para W. As falhas têm uma vergência ao W e direção NS, dobras isoclinais a apertadas e abertas com vergência para W e dobras normais. A lineação de estiramento e lineação mineral mergulham para ESE.

3.3. *Metamorfismo*

O QF foi submetido até pelo menos tres diferentes eventos tectono-metamórficos durante sua história geológica. O primeiro, que afetou o embasamento granito-gnáissico, atingindo alto grau metamórfico e migmatização, antes da formação do Supergrupo Rio das Velhas com uma idade de $2860^{+14/-10}$ Ma e 2772 ± 6 Ma (Noce et al., 1998). Herz (1970, 1978) reporta o metamorfismo do Supergrupo Rio das Velhas, com pico metamórfico em fácies xisto verde aumentando para o leste a anfíbolito baixo e uma idade de 2700 Ma. No terceiro, o Supergrupo Minas e o Supergrupo Rio das Velhas foram submetidos também ao evento metamórfico no Riachão, de fácies xisto verde e uma idade de 2000 Ma (Ladeira et al., 1983). Além dos eventos metamórficos anteriormente mencionados, a orogênese Brasileira é reportada com uma idade de 400-600 Ma (Marshak e Alkmim, 1989).

3.4. *Estilos de mineralização no greenstone belt Rio das Velhas*

As mineralizações auríferas do tipo orogênico (Groves et al., 1998) presentes no Supergrupo Rio das Velhas são estruturalmente controladas e seus estilos estão configurados e classificados de acordo às características da sua rocha hospedeira refletindo processos deformacionais que influenciam a permeabilidade da rocha (Lobato et al., 2001b). Regionalmente, os depósitos estão configurados de acordo com estruturas e lineamentos, e seus estilos de mineralização basicamente são classificados em: 1. Depósitos associados a processos de substituição da rocha hospedeira (*stratabound*) 2.

Depósitos disseminados (rico em sulfeto com quartzo- albita ao longo de zonas de cisalhamento e 3. Veios quartzo- carbonáticos-sulfetados em zonas de cisalhamento (Lobato e Vieira, 1998b, Lobato et al., 2001b).

**Capítulo 4 - Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted
Lamego gold mineralization: microthermometric and LA-ICP-MS analysis of fluid
inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil**

Neste capítulo é apresentado o artigo produto do trabalho do mestrado no qual foram usadas diferentes técnicas analíticas com o objetivo de caracterizar o fluido hidrotermal que deu origem à jazida.

Petrografia mineral nos veios amostrados, microsonda eletrônica em cristais de arsenopirita, análises de inclusões fluidas (microtermometria e espectroscopia Raman) e *Laser ablation* acoplado a ICP-MS em inclusões fluidas, foram as técnicas usadas para determinar as características físicas e químicas do fluido.

Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted Lamego gold mineralization: microthermometric and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil

Milton J. Morales Peña^{a*}, Rosaline C. Figueiredo e Silva^a, Lydia M. Lobato^a, Sylvio D. Gomes^a, Caio C. C. O. Gomes^b, David A. Banks^c.

^a Universidade Federal de Minas Gerais, CPMTC-Instituto de Geociências, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brazil.

^b AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A, Lamego mine, Rua Mestre Caetano, Sabará – MG, Brazil

^c School of Earth and Environment, University of Leeds, Woodhouse Lane, Leeds LS2 9JT, United Kingdom

*corresponding author: mjulianmoralesp@gmail.com

Keywords: Quadrilátero Ferrífero, fluid inclusions, LA-ICP-MS, hydrothermal alteration, quartz veins, metamorphic fluids

1. Introduction

The Neoproterozoic Rio das Velhas greenstone belt represents a supracrustal sequence, which had its tectonomagmatic activity peak between 2780-2700 Ma (Noce et al., 2007). It hosts world-class orogenic (Groves et al., 1998) gold deposits, and has historically been studied with exploration purposes since the Portuguese colonization of Brazil in the seventeenth and eighteenth centuries, the so-called gold cycle (Russell-Wood, 1984).

Geographically located in the central-south part of the state of Minas Gerais, southeast of Brazil, the Quadrilátero Ferrífero (QF) mineral district is part of the extreme south of the Craton São Francisco (Almeida, 1967; Almeida and Hasui, 1984), comprising three main units: granite-gneiss terrains; the Rio das Velhas greenstone belt; and Proterozoic metasedimentary sequences (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969). The Rio das Velhas Supergroup, host to the largest number of gold deposits in the QF (Lobato et al., 2001a, 2001b), is divided into the 1) Nova Lima Group, composed of a metavolcano-sedimentary sequence, and 2) Group Maquiné, composed of continental clastic sequences (Baltazar and Zucchetti, 2007).

The different gold deposits in the region were formed during the Archean deformation that affected the Rio das Velhas Supergroup, associated with large volumes of hydrothermal fluids (e.g. Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Vial et al., 2007a, 2007b), which are correlated in age and background characteristics with other deposits present in different cratons of the world (Goldfarb et al., 2001, 2005). World-class deposits as Morro Velho (> 500 ton) and Cuiabá (> 100 ton), and smaller ones as Raposos, Juca Vieira, São Bento, Córrego do Sítio and Lamego are hosted in different rocks of the Nova Lima Group, and present varying mineralization styles (Lobato et al., 1998a, 1998b, 2001b).

The Lamego gold deposit is situated in the town of Sabará (Fig. 1), some 5 km from the world-class Cuiabá deposit. It is exploited underground by AngloGold Ashanti

Córrego do Sítio Mineração S/A (AGA) since 2009. The deposit is hosted by the intermediate portion of the Rio das Velhas greenstone belt sequence. Sales (1998) was the first to recognize the local lithostratigraphy at the mine site. From bottom to top it is composed of metabasalt (chlorite-carbonate-sericite-quartz schists), banded chert layers with banded iron formation (BIF) that are both carbonaceous and/or ferruginous, carbonaceous and micaceous phyllites, with mineral paragenesis compatible with the greenschist facies mineralogy (Herz, 1970, 1978). Smoky quartz in silicification zones is abundant and widespread, in association with quartz veining, and these contain the highest gold grades. Replacement-style hydrothermal alteration of BIF is host to the remaining gold resources.

The deposit is structurally controlled, with veins arranged with shear zones, and in accordance rock competence, in a concordant or discordant arrangement with the foliation. Some areas have breccia textures with fragments of the host rocks. The smoky quartz veins are assigned to the first stages of mineralization, whereas milky quartz is assigned to the recrystallization of smoky quartz and-or to the final stages of the hydrothermal processes (Martins, 2011). The structure at Lamego is dominated by a rootless, reclined, isoclinal fold in the sense of Ramsay (1968), called the Lamego fold (Martins et al., 2011). There are four orebodies, and these are Queimada, Carruagem, Arco da Velha and Cabeça de Pedra, the latter being the object of the present study.

The aim of this study is to contribute to the understanding of the origin, physical and chemical characteristics of the fluids and their influence on the formation of this gold deposit. At the onset we approach this objective by classifying the different vein systems of the Cabeça de Pedra orebody and detailing their petrographic characteristics. These are complemented by fluid inclusion microthermometry, arsenopyrite geothermometer and in situ LA-ICP-MS microanalyses of the fluid inclusions. Few other fluid inclusion

studies have been undertaken for these deposits (e.g., Alves, 1995; Godoy, 1994; Ribeiro et al; 2015; Xavier et al., 2000), and no LA-ICP-MS microanalyses of the inclusions have even been reported. The LA-ICP-MS results from Lamego were undertaken to demonstrate the role of the host rocks, especially carbonaceous phyllites, their influence on the source of metals and the hydrothermal fluid evolution, and were compared with results of FIs for the Carvoaria Velha gold deposit, Córrego do Sítio lineament.

2. Regional Geology

The Quadrilátero Ferrífero (Fig. 1) represents a granite-gneiss terrain overlain by a greenstone-belt type sequence of Archean age, and Proterozoic supracrustal sequences.

The granite-gneiss terrains are composed of trondhjemitic-tonalitic-granodioritic gneiss, or TTG, and represent the basement of the QF, whose most representative units are the Belo Horizonte, Barão, Caeté and Santa Barbara complexes (Fig. 1). These rocks are Paleo to Mesoarchean, dated in the range 3380 to 2900 Ma (Teixeira et al., 1996), and have been subjected to metamorphism and migmatization dated between 2920-2834 Ma, and is also affected by Rhyacian (formerly Transamazonian; 2.22 - 2.05 Ga; Brito Neves, 2011) at 2041 ± 5 Ma (Noce et al., 1998). The unit is intruded by Neoproterozoic metatonalites, metandesites, metagranites and Paleoproterozoic mafic dikes (Carneiro, 1994; Noce, 1995), and is the source of debris for the upper greenstone sedimentary units (Schrank and Machado, 1996; Schrank et al., 2002).

The Rio das Velhas greenstone belt (Fig. 1), dated in the range 2800-2740 Ma (Machado and Carneiro, 1992; Machado et al., 1989b; Noce et al., 2002), comprises a Neoproterozoic volcano-sedimentary sequence formally proposed as Rio das Velhas Supergroup by Loczy and Ladeira (1976), which comprises two stratigraphic units, the Nova Lima and Maquiné Groups. From the base to the top, the Nova Lima Group is composed a volcanic komatiitic-tholeiitic unit with chemical sedimentary rocks

associated, superimposed by a felsic volcanoclastic unit with associated volcanism and an upper clastic unit (Baltazar and Zucchetti, 2007) all in greenschist facies metamorphism (Herz, 1970, 1978).

The Nova Lima Group was divided into seven sedimentary lithofacies associations (Baltazar and Pedreira 1996, 1998; Baltazar and Zucchetti, 2007; Pedreira and Silva, 1996; Zucchetti and Baltazar, 2000): mafic-ultramafic, chemical volcano-sedimentary, chemical-clastic sedimentary, volcanoclastic (where the Lamego deposit is located), resedimented, and coastal (or coastal and non-marine) associations (Fig. 1).

The Maquiné Group is divided into the Palmital (O'Rourke, 1957) and Casa Forte (Gair, 1962) formations. The former is composed of quartz phyllites and the latter of quartzites and conglomerates.

The Proterozoic sequences are the Minas Supergroup, Itacolomi Group and Espinhaço Supergroup. The Minas Supergroup (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969) is in angular and erosive discordance on the Rio das Velhas greenstone belt rocks and its distribution defines the geometric shape of the QF. It is a metasedimentary unit of Paleoproterozoic age, composed of clastic and chemical sediments hosted in a package of quartzites, metaconglomerates, metapelites and a thick sequence of iron formations of Lake Superior-type (Klein and Ladeira, 2000), which age of sedimentation had been calculated between 2580 and 2050 Ma (Renger et al., 1994).

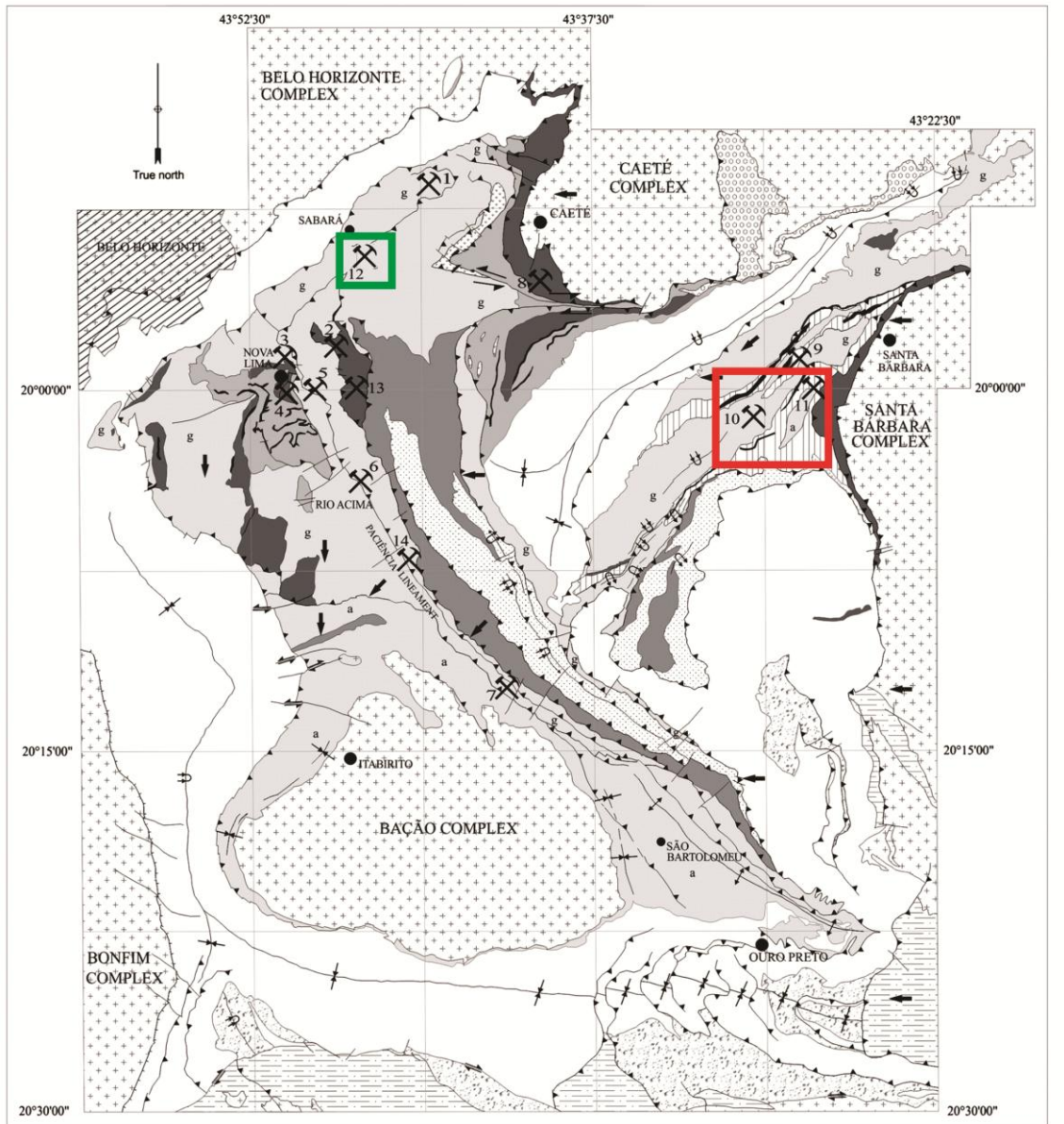
The Itacolomi Group outcrops in the NE part of the QF and is composed of clastic sedimentary sequences. The Espinhaço Supergroup is composed by conglomerates, sandstones and mafic rocks and covers a small part of the QF that was deposited in the range between 1840-1715 Ma (Machado et al., 1989a, 1989b).

The structural complexity of the QF is due to the different deformational events that took place in its geological history, which is still controversial, emphasizing the work of Belo de Oliveira and Vieira (1987), Dorr (1969), Guimarães (1931), Ladeira and Viveiros (1984), Marshak and Alkmim (1989), Oliveira et al. (1983), Vieira and Oliveira (1988), Zucchetti and Baltazar (1998). Baltazar and Zucchetti (2007) propose four structural generations associated with three deformation events of Rio das Velhas Supergroup.

The first generation D1 is associated with the Archean event, in a compressive regime, with a tectonic transport from N to S. E-striking and N-dipping thrust faults, and open, sub-horizontal flexural normal folds to S-verging and ENE-plunging tight to isoclinal folds.

The D2 event, also of Archean age, represents a compressive regime with tectonic transport of NE to SW. The orientation of the thrust faults are NW (030-050 /40-60), isoclinal and tight folds with convergence to SW and NW direction. The stretching and mineral lineations have a (060-070 / 20-30) orientation. Gold mineralization in the Rio das Velhas Supergroup is assigned to this deformation event.

The D3 generation is associated with the Rhyancian event (2100-1900 Ma), of extensional character and tectonic transport from WNW to ESSE. Its characterized by the nucleation of regional synclines and the onset of the Minas Supergroup deposition. The D4 deformation is part of the Brasiliano (650-500 Ma) tectonic cycle with compressive regime and simple shear, and convergence of E to W.



LEGEND

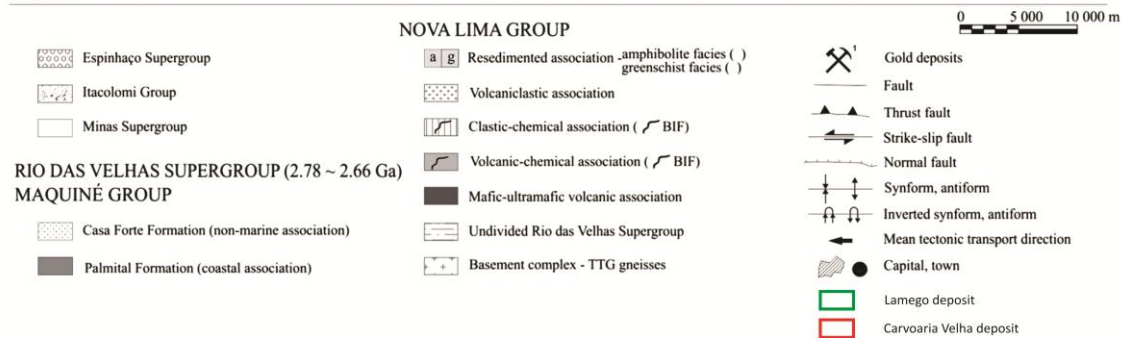


Fig. 1. Simplified geological and structural map of the Quadrilátero Ferrífero region. The main lithofacies associations of the Nova Lima Group, Rio das Velhas greenstone belt (Baltazar and Zuchetti, 2007), and some of the gold deposits are shown (from Lobato et al., 2001). Gold deposits: 1 – Cuiabá; 2 – Raposos; 3 – Morro Velho; 4 – Bela Fama; 5 – Bicalho; 6 – Esperança; 7 – Paciência; 8 – Juca Vieira; 9 – São Bento; 10 -Córrego do Sítio; 11 – Brumal; 12 – Lamego; 13 – Santana; 14 – Engenho d’Água. Studied area is highlighted in a green square, and detailed in Figure 2. Also highlighted in red is the Córrego do Sítio area.

3. Geology of Lamego deposit

The Lamego deposit (Fig. 2) has four orebodies, Queimada, in the inverted limb of the fold, Arco da Velha in the normal limb, Carruagem, where the inverted and normal limbs intercept, and Cabeça de Pedra, located in the hinge zone of the fold, and the object of study in this article.

3.1. Lithostratigraphy

The Lamego deposit is in the intermediate part of the Nova Lima Group, of the volcanoclastic association of Baltazar and Zucchetti (2007). The structure at Lamego is dominated by a rootless, reclined, type-2, isoclinal fold in the sense of Ramsay (1968), called the Lamego fold (Lobato et al., 2013; Martins et al. 2011.), with a 4.8 km outcropping perimeter and an axis oriented NE-SW (Martins, 2011).

It is a BIF-hosted, orogenic-type gold deposit, which stratigraphy was initially described by Sales (1998), and re-evaluated by Martins (2011). From bottom to top, the sequence is formed by the following rocks (Fig. 2):

Metabasalt. It forms the core of the fold, and is represented by chlorite-, carbonate-, quartz-rich metabasalts. Where strongly hydrothermalized and deformed, these are chlorite-carbonate-sericite-quartz schists, that are locally sulfidized (mainly pyrite), in association with quartz veins and boudins that also contain carbonate (mainly ankerite) and sulfide minerals. The contact with the upper units can be concordant or not (Martins, 2011).

Chert and banded iron formation (BIF). This unit is formed by metamorphosed Algoma-type (Gross, 1980) BIF, and ferruginous or carbonaceous metachert. It is characterized by metachert bands associated with some very fine-grained carbonates

(ankerite and siderite) and sulfides bands, composed by hydrothermal pyrite, (\pm magnetite) and chlorite. This banding is interpreted as sedimentary (Martins, 2011).

Carbonaceous phyllite. It occurs in the lower contact, normal or discordant with the BIF. It is composed mainly of carbonaceous matter, quartz, chlorite and carbonate (Martins, 2011).

Micaceous phyllite. This unit occurs on the top of the sequence, formed by quartz, carbonate, sericite-muscovite, pyrite (\pm chalcopyrite and sphalerite). The lower contact with the carbonaceous phyllite is normal and discordant (Martins, 2011).

Dolerite dikes and sills. Dolerite dikes and sills are exposed mainly in the Carruagem orebody level 1, and in the Cabeça de Pedra open pit. They may be parallel to or crosscut both carbonaceous and micaceous pelites, and BIF. They are foliated only near the contacts with wall rocks, and contain hornblende, actinolite-tremolite, epidote, chlorite, carbonate, plagioclase, sericite and quartz (Villanova, 2011).

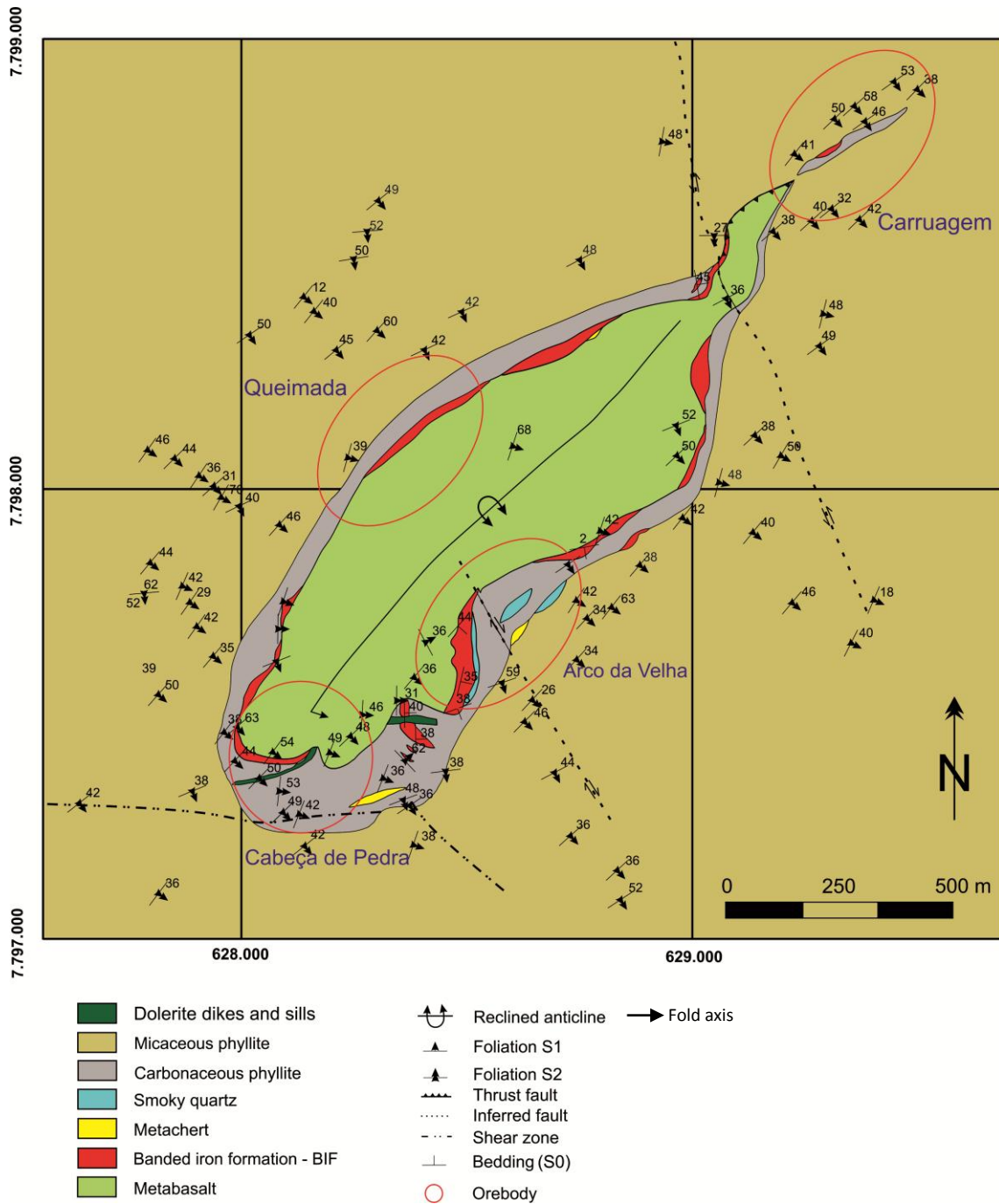


Fig. 2. Geological map of the Lamego deposit. Modified after Villanova, 2011.

3.2. Structural geology and hydrothermal alteration at the Lamego deposit

The structural evolution at Lamego has been the object of detailed investigation by Lobato et al. (2013), Martins (2011) and Martins et al. (2011). The text that follows is a summary of their work.

The primary planar structures (S_0) are the compositional and gradational bedding that dip mainly to the SE. At levels 1 of the Queimada, Arco da Velha and Cabeça de Pedra orebodies, S_0 has an axis oriented at 117/38. The S_{1-2} foliation is the most conspicuous planar structure in the Lamego deposit, and it is mostly parallel or sub-parallel to S_0 .

A L_{1-2} lineation is described on the S_{1-2} foliation planes, and characterized by the intersection of this surface's planes with S_0 . For orebodies Queimada level 1 and Cabeça de Pedra levels 1 and 2, S_{1-2} and L_{1-2} are strongly concentrated in the SE, on average trending 124/35. Together with the bedding plane S_0 , S_{1-2} foliation defines folds that are always associated with meta-sedimentary and metavolcanic rocks. The attitude of these folds is concentrated in the SE, with a plunge close to 25°, and is parallel to sub-parallel to the mineral lineation L_{1-2} .

The S_3 crenulation cleavage, or spaced cleavage plane, is developed mainly in metapelitic rocks. The L_3 is made up by the intersection of the S_{1-2} with S_3 foliation planes. The F_3 open folds have amplitudes up to 3 m, and are best identified in the carbonaceous phyllite. The L_3 is distributed along N-S, trends 097/85, and coincides with the S_3 foliation planes (Martins et al., 2011).

Shear zones are mapped in all schistose layers and lithological contacts on centimeter to meter scale, with the development of S-C structures that indicate shearing

towards the NW. Faults are restricted to the carbonaceous phyllite and dip 30° to 90°, with a consistent NW sense of reverse slip.

The structural evolution at Lamego is associated with the progressive ductile D₁-D₂ deformation events, and D₃ that characterizes structures in a ductile-brittle environment. The orebodies have plunges varying from 95/22, in the Carruagem, to 120/25 in the Cabeça de Pedra orebodies, respectively. The structural nature of the small orebodies that jointly comprise the four larger orebodies suggests their development in a pinch-and-swell and boudin system with two orthogonal stretching directions. A chocolate-tablet structural array is thus defined during mineralization.

Hydrothermal alteration in BIF-hosted gold deposits of the Nova Lima Group are discussed by Lobato et al. (1998a, 1998b; 2001a), Junqueira et al. (2007), Martins Pereira et al. (2007), Ribeiro-Rodrigues (1998), Ribeiro-Rodrigues et al. (2007), Vial et al. (2007a, 2007b), and Vieira (1991). For the specific case of Lamego, Sales (1998) detailed the hydrothermal alteration of the mafic rocks. Lobato et al. (2013), Martins (2011), Martins et al. (2011), described significant silicification in the proximal alteration zones of ore-hosting rocks.

There are three main types of hydrothermal alteration that dominate and affect all rock types. They are represented by quartz, carbonate and sulfide minerals, and developed parallel to the S₁₋₂ foliation. These alteration minerals are best exposed in BIF and carbonaceous pelites, but less well developed in the footwall metabasalt and micaceous pelites. Metabasalt is particularly altered to chlorite, sericite, carbonate, quartz, and pyrite. Widespread zones of silicification dominate, with abundant smoky and milky (recrystallization product of smoky crystals) quartz veins, and minor carbonates, sericite, pyrite and carbonaceous matter. These zones locally form breccias and boudins, with width ranging between 1 to 35 m.

The sulfides are mostly represented by pyrite, As-rich pyrite, arsenopyrite, less chalcopyrite and sphalerite, and also minor pyrrhotite and galena.

4. Materials and methods

The procedures for sampling and the methods of analyses were the following:

- 1) Two drill cores (LCPD011 and LCPD009) were sampled in the Cabeça de Pedra orebody, which crosses the structure at different depths, lithologies and grades, giving priority to silicified zones (Fig. 3). Twelve polished thin sections of quartz veins were prepared for petrographic studies, and seven double polished sections (~ 130 μm thick) were prepared for fluid inclusions analysis.
- 2) Macro- and microscopic petrographic studies focused on quartz veins and veinlets, with definition of petrographic characteristics;
- 3) Detailed petrographic mapping of fluid inclusions (FIs) in quartz crystals from gold mineralized and barren veins was undertaken to discriminate inclusion types, sizes, morphologies and definition of fluid inclusion assemblages (FIA). A Leica petrographic microscope was used, with 10 \times oculars and objective lenses of 2.5x 5x, 10x, 20x, 50x and 100x;
- 4) Fluid inclusion microthermometric studies were conducted using a fully automated Linkam THMSG600 heating and freezing stage with a TMS 93 temperature controller. The stage was calibrated between – 56.6 $^{\circ}\text{C}$ and 374.1 $^{\circ}\text{C}$ with synthetic fluid inclusion Linkam standards (pure H_2O and mixed $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$). The cyclic technique (Goldstein and Reynolds, 1994) was used to acquire better precision in measurements of transition of temperature between carbonic phases.

The accuracy of the freezing measurement runs is about ± 0.1 °C and for heating runs ± 1 °C between 200 and 500 °C. Apparent salinity has been reported in equivalent percentage weight of NaCl. Calculations of salinity and density were made using the MacFlinCor program (Brown and Hagemann, 1995);

5) Raman spectroscopy was used to assess gases and fluids contained within the FIs. This technique allows a correlation between the composition and phase behavior, during the studies of cooling of FIs. Raman spectra were obtained on a Jobin Yvon/Horiba LABRAM-HR 800 spectrographer equipped with a He-Ne laser (632.8 nm). The Raman signal was collected by a BX-41 Olympus microscope using 10 \times , 50 \times and 100 \times objectives. The acquisition time ranges from 10 to 120 s, depending on sample background fluorescence, and the laser power from 0.06 to 6 mW. Spectra were acquired 10-30 times to reduce signal/noise ratio. Collected Raman spectra were analyzed and optimized with Labspec 4.18 and Origin 8.0. Background was corrected and when necessary normalized and peak deconvoluted. Measurements were performed at the Raman Laboratory of Spectroscopy in the Department of Metallurgic and Materials Engineering at UFMG;

6) Individual inclusions were analysed by laser-ablation inductively-coupled mass-spectrometry (LA-ICP-MS). The sections were introduced into the sample chamber of the ArF 193-nm excimer laser Geolas Q Plus. Before the chamber was closed, all air is expelled through a He flow. Inside the chamber, the samples were analyzed for 300 s, during which several inclusions were opened by the laser ablation process. The entire content of inclusions extracted is transported as an aerosol together with He gas. The samples were then analyzed by ICP-MS Agilent 7500c quadrupole, equipped with an octopole reaction cell. The analyses

were calibrated using the NIST SRM 610 standard. The data collected from the ICP-MS were processed by the SILLS software (Guillong et al., 2008), for calibration, background correction and floating of the integration signal. During this procedure, to ensure that the fluid inclusions signals were being processed without the interference of the host crystal, only spectra containing signals coincident with Na and other cations were processed. This analysis was done in the Laser Ablation ICP-MS laboratory at the University of Leeds, England;

7) Electron microprobe analyses were performed on arsenopyrite crystals using the JEOL model JXA 8900RL, at the Electronic Microscopy and Microanalytical (LMA) Laboratory at the Physics, Geology and Chemistry-CDTN-CNEN Consortium Laboratory, at the Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Brazil.

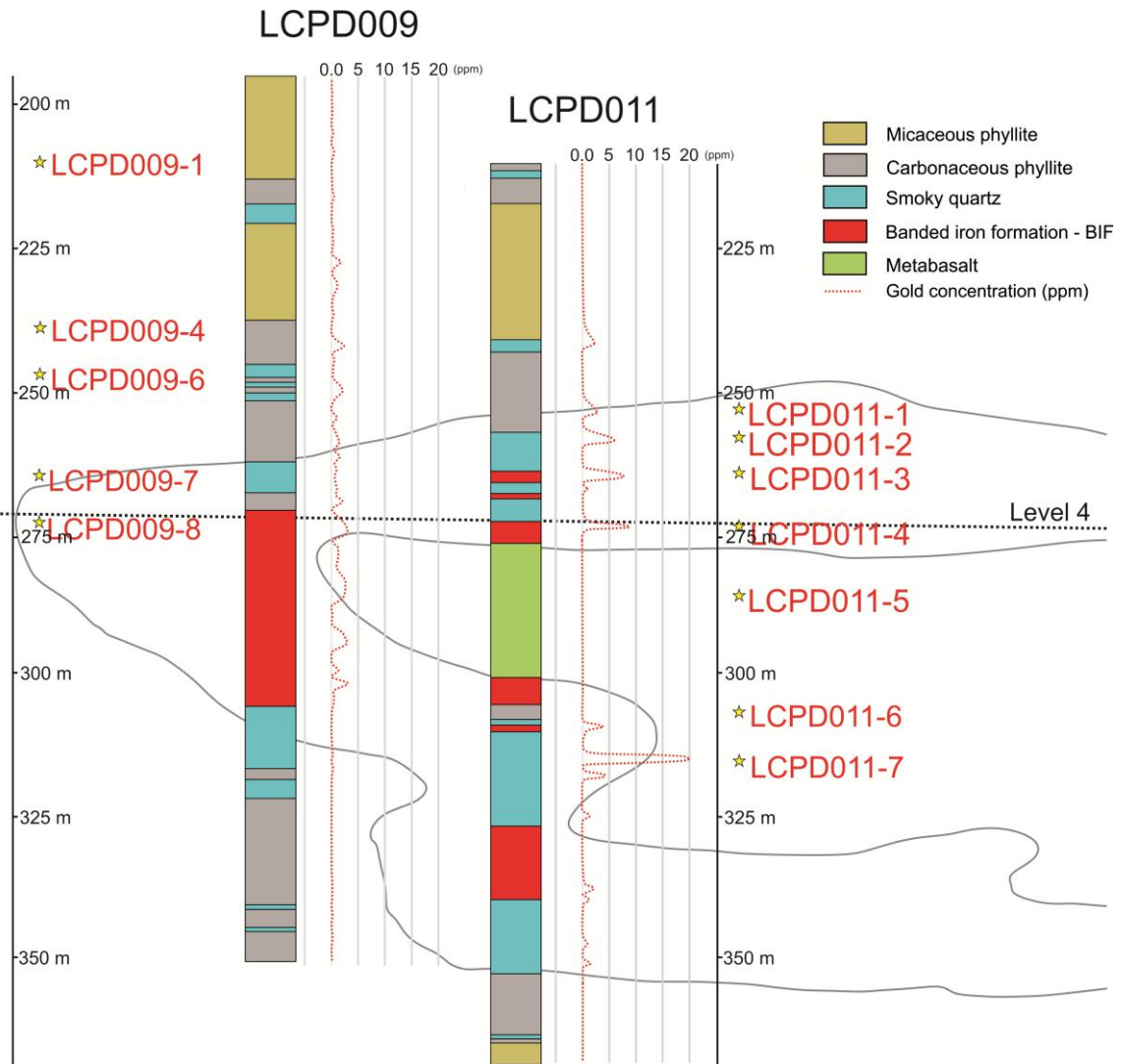


Fig. 3. Cross-section of the Cabeça de Pedra orebody showing the schematic logging sampled LCPD009 and LCPD011 drill cores, with gold grades (in ppm) and depths from where quartz veins were collected. Data source of gold grades from AGA (2008).

5. Veins associated with the Cabeça de Pedra orebody

The quartz veins in the Cabeça de Pedra orebody are constrained by different structures, and are closely associated with the formation of the Lamego fold, which lithotypes controlling the morphology of each vein system (Table 1). Three vein systems are classified in order to study the fluid inclusions, using as criterion the associated structures (Fig. 4). Usually, they are associated with boudins and pinch-and-swell structures, although in the more competent BIF, veins of planar features dominate. One of these systems was subsequently subdivided into four families according to host rock (Table 1).

The V1 veins are hinge-zone associated (Martins, 2011), crosscut all structures, and originated during the extensional phase of the Cabeça de Pedra orebody folding, with vein widths that diminish in relation to the axial fold plane. The mineralogy of V1 consists mainly of quartz, carbonate and sulfides.

As depicted in Figure 4, where V1 veins crosscut BIF along hinge zones, the associated V1 minerals may migrate along lateral bands to form V2 veins and impose a pseudo-stratification (Fig. 4); this typically forms replacement-style sulfide mineralization. The V2 veins are usually folded and controlled by the S_{1-2} foliation or S_0 bedding plane. These veins are especially well developed in association with silicification zones along the contact between BIF and carbonaceous phyllite. Where associated with foliated rocks, schists and phyllites, V2 is subdivided into V2a, V2c and V2d veins, whereas where hosted in BIF only V2b veins are defined (Fig. 4).

The V2 mineralogy is generally simple, comprising 70-80% of smoky quartz, 10-25% carbonate and 10% sulfides, in which the most common are pyrite, As-pyrite and arsenopyrite, and locally chalcopyrite and sphalerite. Arsenopyrite is especially associated with V2 veins hosted in carbonaceous phyllites (V2c). The hydrothermal

alteration associated with these veins varies according to their host rock, but it is common to find chlorite and carbonates in metabasalt, carbonate and sericite in carbonaceous and micaceous phyllites, and abundant sulfides in BIF. In the silicification zones, sulfide minerals are less abundant (<5%; Martins, 2011).

The V3 veins (Table 1; Fig 4) are classified as an independent system, once it exhibits another morphological style. It is more typical of shear zones and faults, with structures like en echelon, vein arrays and stockwork, and basically consists of milky quartz veins. Comb-textured quartz crystals are also observed.

In all vein systems, quartz can be classified into two types: Qtz I - smoky, subhedral and anhedral (Fig. 5a), with medium to large sizes (0.5 - 5 mm). It is extremely deformed, with wavy extinction, irregular and displaying recrystallized borders. In addition, it presents a great quantity of fluid inclusions and fine fragments of carbonaceous matter. According to the mine geologists, this quartz is directly associated with gold precipitation since it carries the highest gold grades. The Qtz II is milky, granoblastic, which size ranges from very fine (~ 0.05 mm) to coarse (4 mm), with the latter related to a higher degree of recrystallization (Fig. 5b). The content of carbonaceous matter decreases dramatically giving its characteristic color. This quartz is barren and interpreted as a late-stage phase.

The sulfides in all mineralized veins have a paragenetic sequence pyrrhotite, pyrite, arsenical pyrite, arsenopyrite, with pyrrhotite usually as rare relics in the nuclei of pyrite crystals. Pyrite constitutes a primary generation formed as subhedral and porous crystals, evolving to an arsenical pyrite with alteration rims (Morey et al., 2008), and finally to euhedral arsenopyrite. Gold commonly fills the porosity of arsenical pyrite (Fig. 5C).

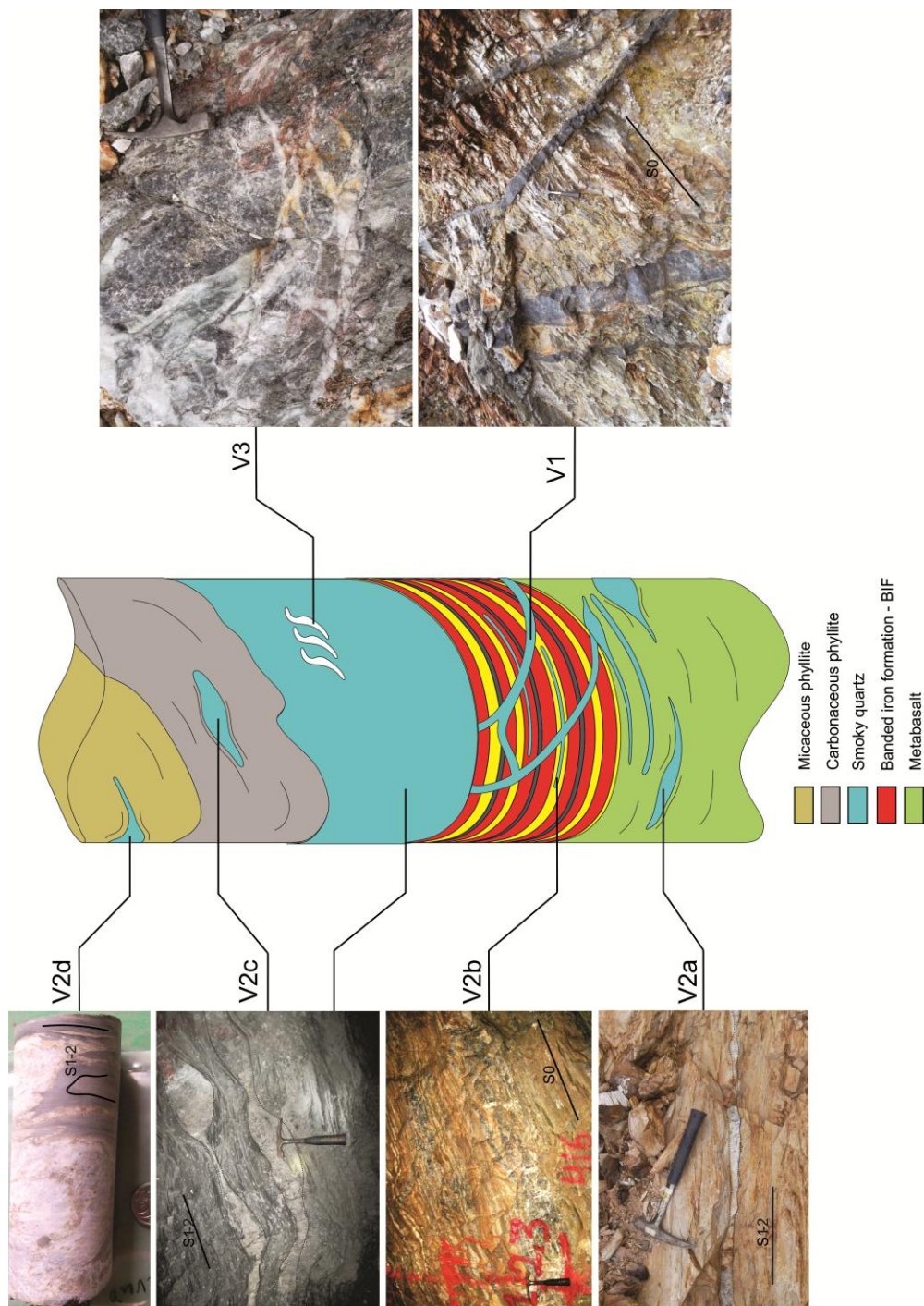


Fig. 4. Schematic diagram illustrating the different quartz vein systems at the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. Also shown are photographs of examples from core and hand samples. Vein types hosted in the metavolcano-sedimentary rocks are: V1 – smoky Qtz-Cb extensional veins that crosscut S_0 in BIF; V2a – smoky Qtz-Cb veins, along main S_{1-2} foliation in metabasalt, which may be folded and boudinaged; V2b – smoky Qtz-Cb veins, developed along bedding S_0 in BIF; V2c – smoky Qtz-Cb veins, along main S_{1-2} foliation in carbonaceous phyllite with boudins and pinch-and-swell structures and silicification zones along the contact between BIF and carbonaceous phyllite; V2d – smoky Qtz-Cb veins controlled by S_{1-2} foliation in micaceous phyllite; V3 – milky Qtz-Cb veins in smoky quartz associated with shear zones and faults, with an echelon vein arrays and stockwork structures.

Table 1
Synthesis of vein characteristics in the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit

	System	Family	Host structure	Mineralogy	Host rock	Orientation	Morphology
Mineralization grade	V1		Parallel to axial plane / hinge zone	Smoky Qtz, Py, Apy, Au	BIF	15/60	Massive/extensional veins
		V2a	S1-2	Smoky Qtz, Cb, Py, Apy, Ccp	Metabasalt	130/35	Pinch and swell, boudins
	V2	V2b	S0	Smoky Qtz, Py, Apy, Au	BIF	130/35	Massive/extensional veins
		V2c	S1-2	Smoky Qtz, Cb, Py, Ccp	Carbonaceous phyllite along BIF contact	130/35	Pinch and swell, boudins
		V2d	S1-2	Smoky Qtz, Cb, py	Micaceous phyllite	130/35	Pinch and swell, boudins
V3	--	--	Milky quartz veins in smoky quartz	Smoky quartz	No preferential orientation	Comb, vein arrays, tension gashes	

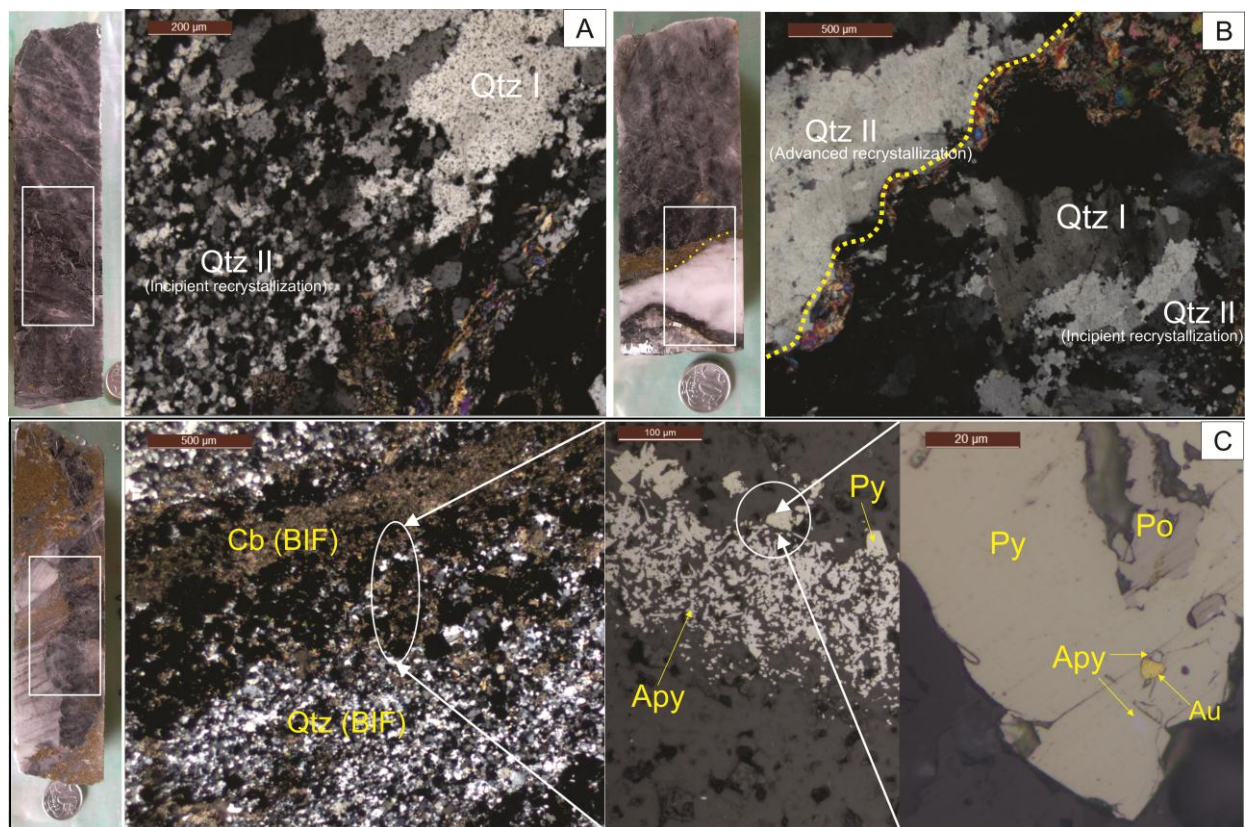


Fig. 5. Photomicrographs showing: A) Different types of quartz in V2 vein types. Qtz I is only present as smoky quartz, and Qtz II as polygonal crystals associated with Qtz I borders (transmitted light, crossed nicols, 5x). B) Tips of quartz in V2 and V3 veins: polygonal Qtz II (incipient recrystallization) associated with Qtz I as smoky quartz, and granoblastic Qtz II (advanced recrystallization) as milky quartz (transmitted light, crossed nicols, 2.5x). C) image sequence of gold associated with proximal hydrothermal alteration minerals in BIF. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; Au – gold; Qtz – quartz; Cb – carbonate.

6. Fluid inclusions

6.1. FI Petrography

The fluid inclusions (FI) were detailed according to their host minerals, mineralized (Qtz I) or barren (Qtz II), taking into account FI size, phase relations and chronological order in relation to the crystal.

Chronologically, the FI located in the center of Qtz I crystals, isolated or forming clusters, could in principal be considered as primary. However, due to the intense deformation experienced by the Lamego rocks, we adopt them as pseudosecondary and linked to gold precipitation at the early stage of hydrothermal alteration.

The FIs were grouped according to frequency, shape, relative age, size and chemical composition (acquired with Raman spectroscopy), classifying these into 5 groups (Fig. 6A):

Type IA: isolated clusters of pseudosecondary two-phase inclusions, at room temperature, restricted to the Qtz I, commonly with negative crystal shapes and rounded. The size ranges of $<15\ \mu\text{m}$ to $5\ \mu\text{m}$, and the ratio of liquid and vapor is 9:1 (Fig. 6B).

Type IB: isolated clusters of pseudosecondary two-phase inclusions, restricted to the center of the Qtz II (advanced recrystallization) crystals. The shape can be of negative crystals, and some irregular curved shapes. The registered size is $<20\ \mu\text{m}$ to $5\ \mu\text{m}$, and the ratio of liquid and vapor is 9:1 (Fig. 6C).

Type II: Trails of pseudosecondary two-phase inclusions, present in Qtz I and Qtz II, with rounded and elongated shapes. They present partially necking down. The size is $<5\ \mu\text{m}$ up to $15\ \mu\text{m}$ and the ratio of liquid to vapor is 9:1. The FI are intragranular (Fig. 6D).

Type III: They form linear pseudosecondary trails aligned parallel to crystal boundaries of the Qtz II (exclusively inside polygonal granoblastic, recrystallized quartz). They are enriched in liquid (<5% vol. gas). The shapes are rounded and have sizes <5 μm , which limited its analysis with Raman spectroscopy.

Type IV: Secondary inclusions crossing crystal boundaries of Qtz I and Qtz II (transgranular trails), developed late in the hydrothermal process, and strongly affected by necking down. Two-phase FIs, present in the two types of quartz, have irregular and amoeboid shapes. The size ranges from <5 to 40 μm , with a liquid to vapor ratio of 9:1.

6.2. Raman Spectroscopy

The chemical composition of FIAs was determined by this technique, which the acquired spectra showing the composition without appreciable variations in the fluid evolution. All FI types are composed by $\text{H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2$, some of them with very small proportions of CH_4 and N_2 (Fig. 6E). The particularity of the type IA inclusions is the great amount of fine particles composed by carbonaceous matter (Figure 6F), which are represented with the spectra of graphite (Frezzotti et al., 2012).

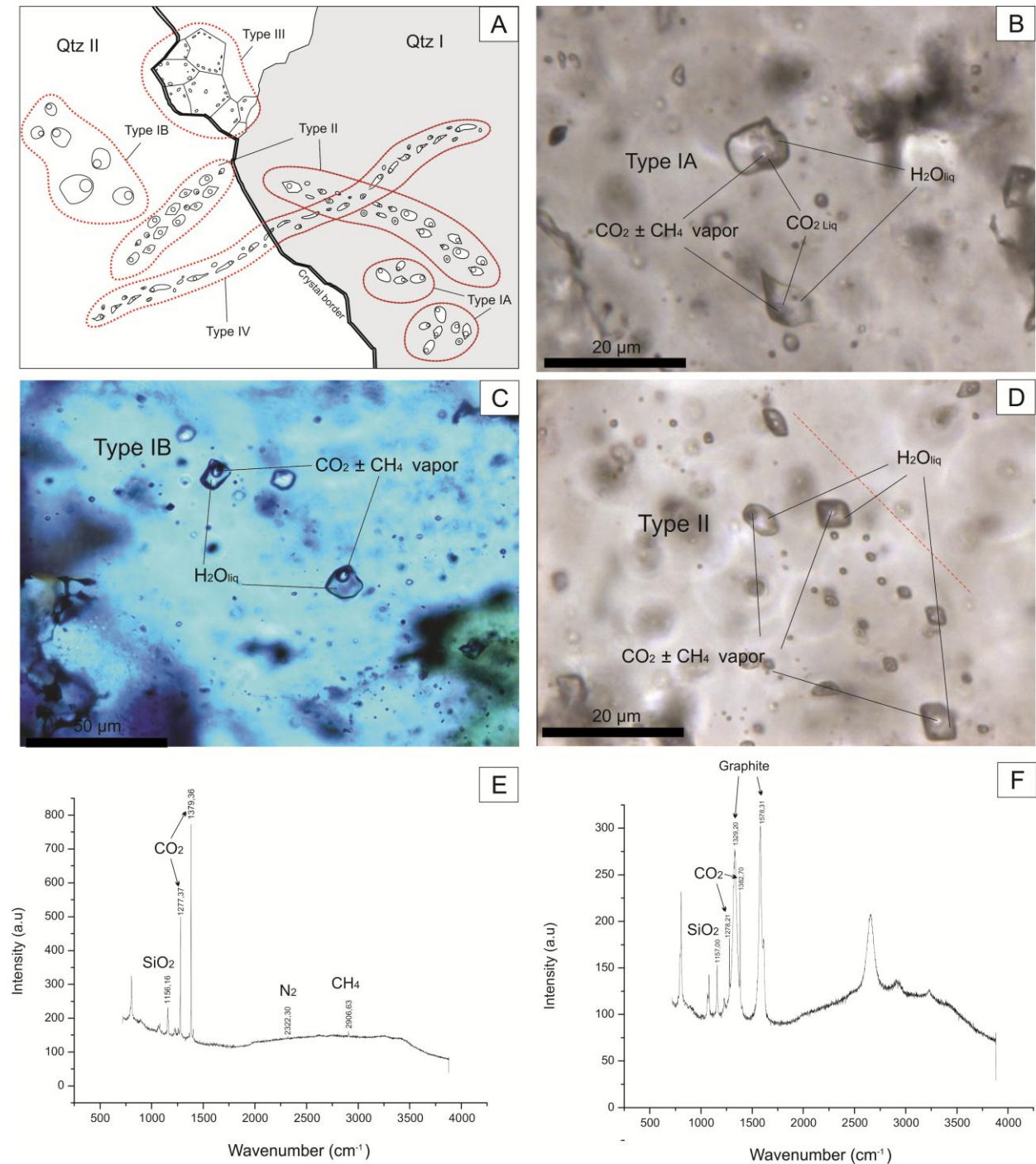


Fig. 6. A) Schematic map showing the distribution (at room temperature) of the main fluid inclusion types in mineralized and barren quartz veins at the Cabeça de Pedra orebody, Lamago deposit. Photomicrographs showing: B) Pseudosecondary type IA inclusions (square, rectangular or oval in shape) restricted to smoky quartz (Qtz I); C) Pseudosecondary type IB inclusions restricted to recrystallized quartz (Qtz II); D) Pseudosecondary trails of type II inclusions in Qtz I and Qtz II. E) Representative Raman spectra of all types of fluid inclusion with more abundant components in the vapor phase. F) Raman spectrum of a type IA fluid inclusion with graphite fragments.

6.3. Microthermometry results

Some 100 FIs that were measured include types IA, IB and II. The FIs types III and IV were not measured, not only because of their average size of $<5 \mu\text{m}$, but also because they were strongly affected by necking down (Roedder, 1984). Results are summarized in Table 2 and Figure 7.

6.3.1. Freezing

In the Figure 7 and Table 2, types IA, IB and II inclusions have CO_2 melting temperatures of (T_{mCO_2}) ranging from -61.2 to -56.6°C , indicating an abundant presence of volatile CO_2 and CH_4 ratio (Shepherd, 1985). These phases were confirmed by Raman spectroscopy (Fig. 6E). In relation to the temperature of the first melting ice (T_e), types IA and II inclusions range from -38.4 to -26.9°C , whereas type IB inclusions from -35.1 to -29.6°C , indicating the presence of complex cations, such as Fe^{2+} and Mg^{2+} , besides Na^+ in the fluid (Borisenko, 1977). The clathrate melting temperature (T_{Clath}) has a wide range of temperatures in type IA, with two trends between 1.9 and 5.3°C , and between 6.3 to 12.0°C (Fig. 7). Types IB and II show a range of 1.6 to 9.5°C (Fig. 7).

6.3.2. Heating

All types of FIs registered decrepitation temperature (T_{dec}) prior to homogenization, with rare exceptions. The decrepitation temperature variations are between 199.5 and 365.9°C in FIA IA, 220.8°C and 383.3°C for FIA IB, and 228.6°C and 383.3°C for FIA II (Fig. 8 and Table 2). Few inclusions recorded total homogenization temperature (T_{tot}) to liquid within a wide range, from 185.4 to a maximum of 373.4°C for all types of inclusions.

6.3.3. *Quantitative estimation of fluid inclusions composition*

Salinity, density and proportions of volatile estimates of aqueous and carbonic phases were calculated using the MacFlinCor software (Brown and Hagemann, 1995). Equations of state by Jacobs and Kerrick (1981) using the chemical system H₂O-CO₂-CH₄-NaCl and Bowers and Helgeson (1983) for H₂O-CO₂-NaCl were applied for all FI types. Fluid inclusions containing CH₄ ratios of the volatile phase were calculated using the graphical method by Thiéry et al. (1994). The salinity values and density vary widely, 0.02 to 13.32 eq. wt% NaCl and 0.94 to 1.07 g/cm³ for type IA, 6.3 to 11.88 eq. wt% NaCl and 0.98 to 1.06 g/cm³ for type IB and 4.97 to 13.69 eq. wt% NaCl and 0.95 to 1.07 in g/cm³ type II (Table 3). In relation to the carbonic phase, all FIs contain values from 1 to 8 mol% CO₂, and a maximum of 1.7 mol% CH₄ (Table 3).

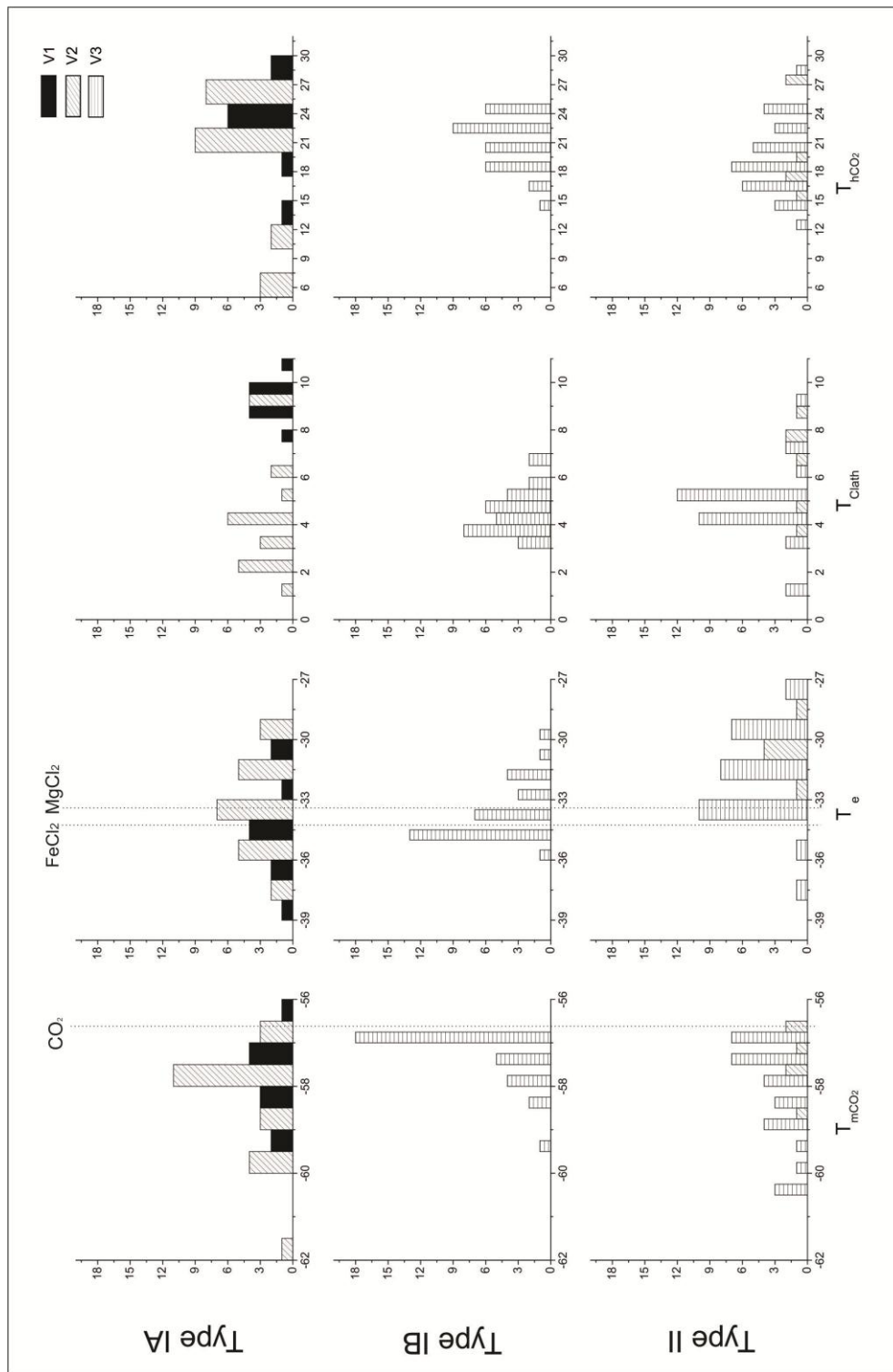


Fig. 7. Histograms showing microthermometric characteristics of fluid inclusions trapped in quartz veins from the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. Microthermometry data includes CO₂ melting (T_{mCO₂}), final fusion ice (T_e), clathrate melting (T_{mCl}), and CO₂ homogenization (T_{hCO₂}) temperatures.

Table 2

Microthermometry data for V1, V2 and V3 veins of the Cabeça de Pedra Orebody, Lamego deposit. Mean and standard deviation (1σ) values are shown for $N > 3$ in the second line of each sample.

Sample	Vein Type	FI Type	N	T_{mCO_2}	T_e	$T_{m\ ice}$	T_{Clath}	T_{hCO_2}	$T_{hot\ L-V}$	T_{Dec}
11-3	V2	IA	6	-59,9 to -56,6 -58 ±1,41	-35,8 to -31,2 -33,725 ± 1,92	-9,8 to -8,2 -9,05 ± 0,60	6,3 to 9,7 8,38 ± 1,52	22,4 to 28 25,05 ± 2,35	--	211,8 to 259,2 240,93 ±17,75
11-3	V2	II	6	-58,8 to -56,8 -57,65 ± 0,75	-32,3 to -28,3 -30,78 ± 1,41	-9,9 to -9 -9,5 ± 0,33	3,1 to 8,6 6,22 ± 1,97	15,5 to 27,7 20,42 ± 5,39	366,5	253,8 to 297,4 278,27 ± 21,71
9-7	V2	IA	4	-58,1 to -56,6 -57,4 ± 0,61	-35,5 to -30,4 -32,97 ± 2,69	-9,8 to -9,6 -9,725 ± 0,09	1,9 to 2,8 2,4 ± 0,42	23,8 to 28,8 25,525 ± 2,20	--	230,7 to 234,1 232,77 ± 1,64
11-2	V2	IA	9	-59,2 to -57,1 -57,9 ± 0,80	-36,7 to -29,5 -32,51 ± 2,23	-9,9 to -7,6 -9,46 ± 0,72	2,4 to 5,3 3,9 ± 0,90	21,8 to 29,3 25,14 ± 2,36	--	174,8 to 296,4 243,85 ± 43,45
11-7	V2	IA	3	-61,2 to -57,9 -59,2 ± 1,72	-36,2 to -29,8 -32,7 ± 3,24	-9,2 to -8,6 -8,93 ± 0,30	3,1 to 4,9 4,16 ± 0,94	5,5 to 9,3 7,83 ± 2,04	--	283 to 290,5 286,75 ± 5,30
9-8	V1	IA	10	-59,8 to -57,0 -58,2 ± 0,97	-38,4 to -31,6 -34,93 ± 2,27	-9,8 to -8,1 -8,77 ± 0,63	7,8 to 10 9,07 ± 0,71	14,4 to 29 22,36 ± 4,12	272,65	199,5 to 365,9 272,63 ± 44,79
9-7	V3	IB	7	-57,2 to -56,6 -56,82 ± 0,24	-34,7 to -29,6 -32,54 ± 2,01	-9,8 to -9,2 -9,48571 ± 0,24	3,4 to 4,8 3,92 ± 0,54	17,1 to 24,5 21,31 ± 2,39	185,4	242,1 to 300 266,58 ± 19,19
11-2	V3	IB	12	-59,4 to -56,6 -57,48 ± 0,82	-35,1 to -31,3 -33,82 ± 1,25	-9,9 to -9,2 -9,63 ± 0,22	3,6 to 5,1 4,44 ± 0,51	19,9 to 25,8 23,46 ± 2,09	232,8	234,5 to 260,3 243,94 ± 7,39
11-5	V3	IB	2	-58,1 to -59,6	-32,5 to -31,4	-8,2 to -7,6	6,5 to 6,6	18,2 to 23,4	--	284,6 to 293,7
9-6	V3	IB	9	-57,9 to -56,6 -57,02 ± 0,40	-34,6 to -31,9 -33,7 ± 0,99	-9,9 to -8,9 -9,53 ± 0,31	3 to 5,8 4,5 ± 1,01	15,4 to 23,1 20,04 ± 2,54	223,9 to 319,6 259,53 ± 52,31	220,8 to 383,3 291,02 ± 56,94
9-7	V3	II	9	-60,2 to -57,2 -58,53 ± 1,06	-36,6 to -26,9 -31,32 ± 3,52	-9,8 to -9,2 -9,54 ± 0,21	4,3 to 5,7 4,86 ± 0,44	13,6 to 21,9 17,25 ± 2,59	314,4	264,7 to 295,5 278,11 ± 11,34
11-2	V3	II	8	-58,9 to -56,6 -57,32 ± 0,84	-33,2 to -29,8 -31,55 ± 1,21	-9,9 to -9,2 -9,62 ± 0,25	1,6 to 5,3 4,23 ± 1,57	14,2 to 25,8 20,91 ± 4,00	319,9	248,9 to 269,3 258,34 ± 8,11
11-5	V3	II	4	-58,1 to -56,6 -57,32 ± 0,78	-33,3 to -28,2 -30,5 ± 2,58	-9,2 to -8,3 -8,67 ± 0,41	6,8 to 9,5 7,77 ± 1,18	18,3 to 28,8 23,37 ± 4,35	373,4	228,6 to 274,9 246,4 ± 24,93
9-6	V3	II	9	-60,2 to -56,8 -57,98 ± 1,05	-33,5 to -29,7 -31,41 ± 1,33	-10,1 to -9,4 -9,77 ± 0,19	3,6 to 5,8 4,755 ± 0,79	17,8 to 25,2 20,02 ± 2,41	318,9	233,4 to 331,2 264,73 ± 29,88

Abbreviations: T_{mCO_2} –melting temperature of CO_2 , T_{Clath} – clathrate melting temperature, T_{hCO_2} – CO_2 homogenization temperature with transition from liquid to gas, $T_{hot\ L-V}$ – total homogenization temperature from liquid to vapour phase, T_{Dec} – decrepitation temperature, T_e – eutectic temperature, T_{mice} – ice final melting temperature. N – measurement value. ... Not registered.

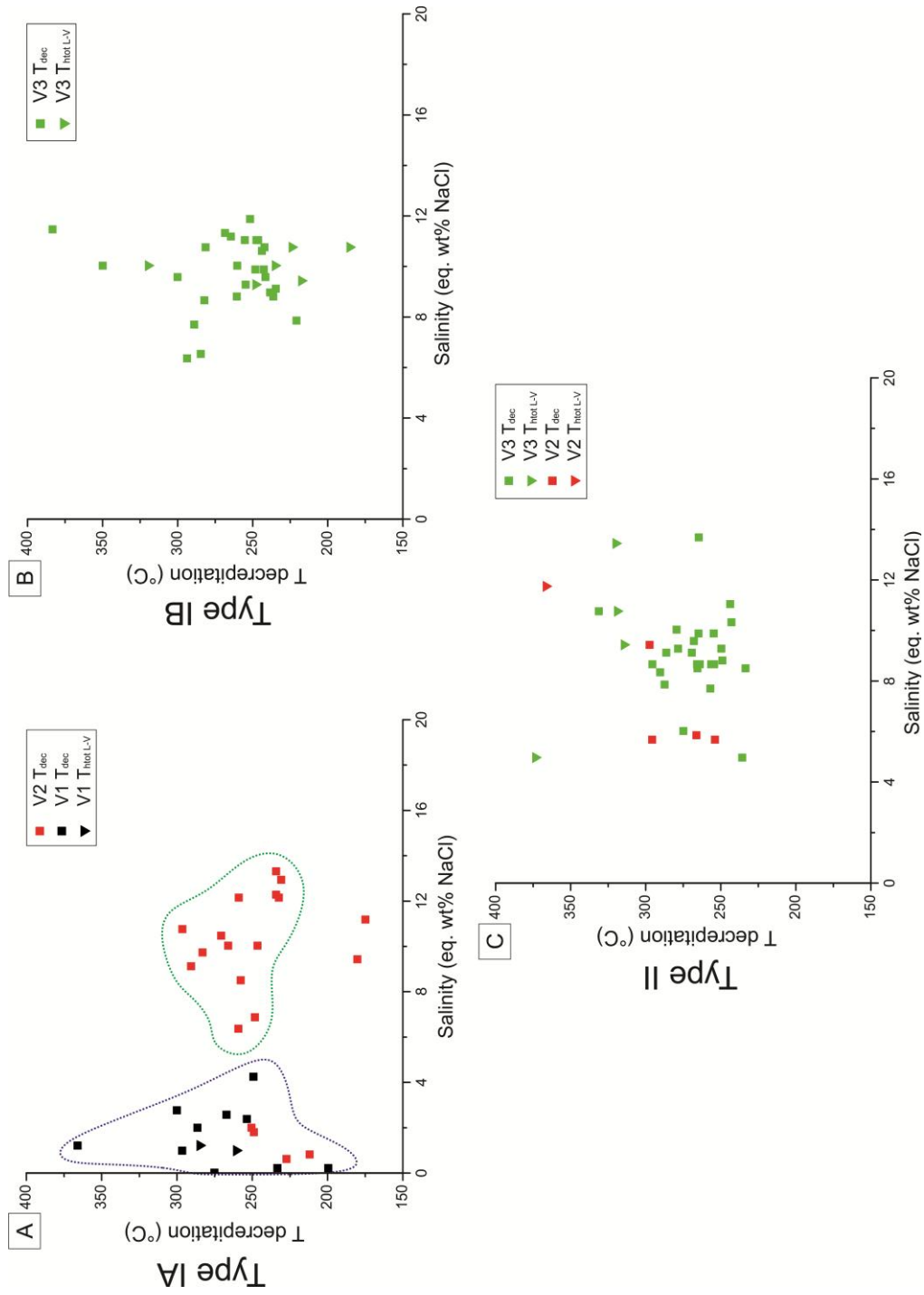


Fig. 8. Diagram showing salinity versus deprecation (T_{dec}) temperature for inclusions: A) type IA; B) type IB; C) type II with a few data of total homogenization ($T_{hot-L-V}$).

Table 3

Microthermometric data of aqueous-carbonic inclusions (types IA, IB and II).

Sample	Vein Type	FI Type	N	Eq. Wt% NaCl	Bulk XH ₂ O	Bulk XCO ₂	Bulk XNaCl	Bulk XCH ₄	Bulk density	Bulk molar volume
11-3	V2	IA	6	0,63 to 6,87 3,08 ± 2,79	0,94 to 0,97 0,95 ± 0,01	0,02 to 0,033 0,09 ± 0,003	0,002 to 0,021 0,01 ± 0,01	0 to 0,003 0,001 ± 0,001	0,966 to 1,01 0,98 ± 0,01	19,50 to 19,62 19,55 ± 0,04
11-3	V2	II	6	2,76 to 11,75 6,86 ± 3,19	0,81 to 0,96 0,91 ± 0,05	0,02 to 0,17 0,07 ± 0,05 0,029 to 0,03 0,031 ± 0,002	0,008 to 0,039 0,02 ± 0,01	0 to 0,06 0,003 ± 0,002	0,93 to 1,07 0,98 ± 0,05	18,70 to 24,85 21,07 ± 2,10
9-7	V2	IA	4	12,15 to 13,32 12,67 ± 0,55	0,92 to 0,93 0,92 ± 0,002	0,02 to 0,07 0,03 ± 0,016	0,02 to 0,04 0,033 ± 0,004	0 to 0,02 0,001 ± 0,001	1,04 to 1,06 1,05 ± 0,006	19,31 to 19,52 19,45 ± 0,09
11-2	V2	IA	9	8,50 to 12,68 10,53 ± 1,31	0,89 to 0,94 0,93 ± 0,01	0,02 to 0,07 0,03 ± 0,016	0,02 to 0,04 0,033 ± 0,004	0 to 0,002 0,001 ± 0,001	0,98 to 1,36 1,02 ± 0,02	19,45 to 21,18 19,88 ± 0,71
11-7	V2	IA	3	9,12 to 11,74 10,20 ± 1,37	0,89 to 0,93 0,91 ± 0,02	0,033 to 0,075 0,05 ± 0,02	0,03 to 0,04 0,032 ± 0,005	0,003 to 0,01 0,006 ± 0,003	1,022 to 1,047 1,03 ± 0,014	19,29 to 20,85 20,29 ± 0,87
9-8	V1	IA	10	0,02 to 4,25 1,84 ± 1,39	0,92 to 0,98 0,95 ± 0,019	0,013 to 0,066 0,032 ± 0,017	0 to 0,013 0,006 ± 0,004	0 to 0,007 0,003 ± 0,003	0,91 to 1,005 0,97 ± 0,029	18,81 to 21,45 19,86 ± 1,05
9-7	V3	IB	7	9,28 to 11,33 10,56 ± 0,81	0,89 to 0,95 0,93 ± 0,02	0,015 to 0,074 0,036 ± 0,018	0,03 to 0,04 0,03 ± 0,003	0 to 0,001 0,0003 ± 0,0005	1,01 to 1,06 1,041 ± 0,015	18,75 to 20,92 19,55 ± 0,66
11-2	V3	IB	12	8,82 to 11,05 9,81 ± 0,76	0,93 to 0,96 0,94 ± 0,009	0,012 to 0,034 0,019 ± 0,008	0,028 to 0,036 0,031 ± 0,003	0 to 0,001 0,0002 ± 0,0004	1,03 to 1,059 1,04 ± 0,006	18,73 to 19,46 18,93 ± 0,29
11-5	V3	IB	2	6,37 to 6,54	0,94 to 0,95	0,025 to 0,034	0,02 to 0,021	0	0,998 to 1,016	19,39 to 19,58
9-6	V3	IB	9	7,70 to 11,88 9,69 ± 1,51	0,90 to 0,95 0,935 ± 0,014	0,015 to 0,072 0,03 ± 0,02	0,023 to 0,039 0,031 ± 0,005	0 to 0,009 0,003 ± 0,003	0,91 to 1,06 1,038 ± 0,018	18,73 to 20,91 19,43 ± 0,62
9-7	V3	II	9	7,86 to 10,03 9,17 ± 0,68	0,90 to 0,95 0,93 ± 0,021	0,014 to 0,06 0,03 ± 0,020	0,025 to 0,033 0,029 ± 0,0025	0 to 0,009 0,003 ± 0,003	0,97 to 1,05 1,021 ± 0,029	18,67 to 21,22 19,75 ± 1,07
11-2	V3	II	8	8,50 to 13,69 10,02 ± 2,20	0,79 to 0,95 0,91 ± 0,05	0,023 to 0,18 0,053 ± 0,054	0,023 to 0,045 0,032 ± 0,008	0 to 0,002 0,001 ± 0,001	0,96 to 1,07 1,022 ± 0,33	19,40 to 24,51 20,31 ± 1,79
11-5	V3	II	4	1,02 to 6,03 4,25 ± 2,21	0,93 to 0,96 0,94 ± 0,016	0,028 to 0,053 0,045 ± 0,012	0,003 to 0,018 0,013 ± 0,007	0 to 0,004 0,006 ± 0,002	0,92 to 0,10 0,97 ± 0,037	20,19 to 21,42 20,35 ± 0,77
9-6	V3	II	9	7,70 to 11,05 9,32 ± 1,20	0,89 to 0,96 0,93 ± 0,02	0,013 to 0,075 0,032 ± 0,024	0,024 to 0,035 0,029 ± 0,004	0 to 0,004 0,001 ± 0,001	1,008 to 1,057 1,03 ± 0,18	18,72 to 20,95 19,47 ± 0,88

7. LA-ICP-MS fluid inclusion analyses

7.1. Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit

Individual measurements of the elements K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr, Ag, Ba, La, Pb, Li, As, Sb and Au were made using LA-ICP-MS at least in 230 FIs of types (Fig. 9 and Table 4): (i) IA in samples 9-8 (V1 vein hosted in BIF), 11-3 (V2 vein hosted in BIF) and 11-7 (V2 vein hosted in carbonaceous phyllites); and (ii) IB in samples 9-7 and 11-2 (V3 vein hosted in in carbonaceous phyllites). Lanthanum was discarded as concentrations represent interference of host mineral (matrix); concentrations of Li are below detection (LOD) in all analyses, as well as the majority of Au and Ag measurements. In the case of Au and As, they were measured separately or were not measured for every inclusion assemblage, as is the case of sample 11-7.

Figure 9 and Table 4 shows that the concentration of the cations Na, K, Ca and Mg increases proportionately to salinity in all vein types, and all analyzed inclusions are Na rich. Manganese is found at low levels and Fe concentration is maintained without a significant change in all types of veins (Fig. 9). The base metals Cu, Zn and Pb increase in their concentration in quartz veins hosted in carbonaceous phyllites, as well as Sr, in comparison to veins hosted in BIF (Fig. 9), where the concentrations of these elements is considerably lower. The metals Ag, Sb, As and Au have low concentrations in the measured fluid inclusions in all vein types, with some increase in content, especially Sb and As, in veins hosted in carbonaceous phyllites (Fig. 9).

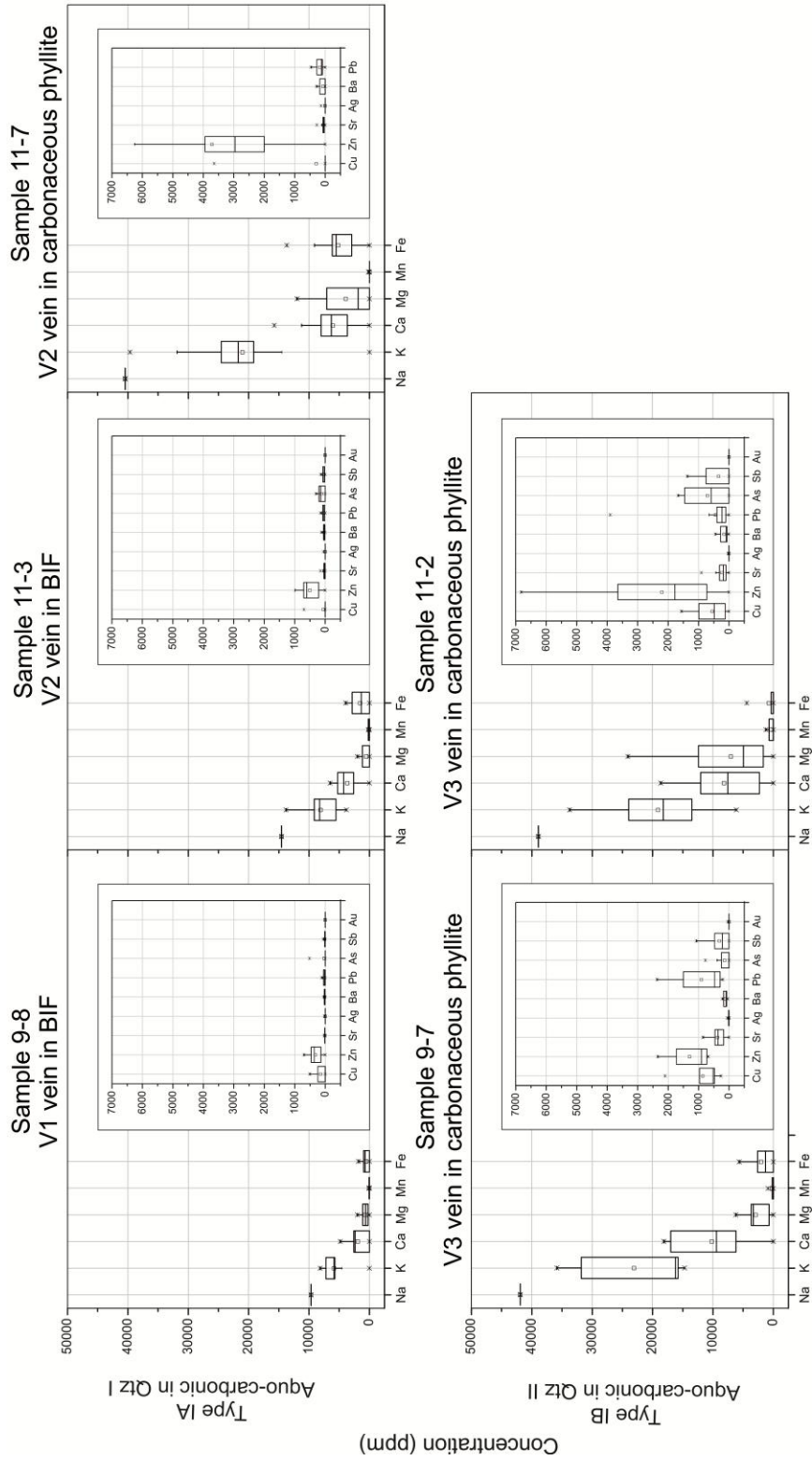


Fig. 9. Diagrams showing metal concentrations obtained from LA-ICP-MS microanalyses of fluid inclusion assemblages and individual fluid inclusions in the Cabeça de Pedra orebody. The box plot represents the average value for a fluid inclusion type, with the respective standard deviations shown by the error bars in different veins types.

Table 4

Summary of LA-ICP-MS analyses of FI in the Cabeça de Pedra orebody. Individual element concentrations are in ppm, calculated using the salinity of the fluid inclusions.

Sample	FI Type	N FI	Salinity (wt.%)	Na	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Ag	Ba	Pb	Li	N FI	As	Ag	Sb	Au
9-8	IA	10	2,43	9656	5656	1984	598	32	845	151	321	17	3	9	40	-	13	37	1	12	-
	IA	9	2,43	9656	6741	1573	520	-	416	40	302	13	2	20	29	-	14	46	-	22	3
	IA	8	2,43	9656	6143	1673	820	8	443	201	304	12	4	22	25	-	-	-	-	-	-
11-3	IA	6	3,67	14571	10249	1917	432	55	1178	174	359	46	2	74	86	-	10	183	1	43	-
	IA	7	3,67	14571	7078	4324	434	135	1934	-	575	31	1	15	45	-	12	133	1	43	2
	IA	5	3,67	14571	6201	5426	995	-	1211	-	612	22	8	47	49	-	11	65	8	58	-
11-7	IA	6	10,2	40465	21164	4621	5359	-	5385	-	3783	42	-	53	59	-	-	-	-	-	-
	IA	9	10,2	40465	21811	5718	4457	-	4888	-	3252	65	-	95	179	-	-	-	-	-	-
	IA	11	10,2	40465	22923	5730	4018	-	3212	818	3482	47	20	36	179	-	-	-	-	-	-
	IA	7	10,2	40465	23114	8019	431	-	5940	433	2179	53	-	29	267	-	-	-	-	-	-
9-7	IA	6	10,2	40465	25006	3818	3862	36	4953	-	2490	44	-	120	135	-	-	-	-	-	-
	IB	7	10,56	41907	19363	13211	4875	-	2567	368	793	232	4	111	384	-	13	39	12	244	-
	IB	9	10,56	41907	31796	6189	716	-	1294	527	726	363	50	44	202	-	15	229	12	378	41
11-2	IB	5	10,56	41907	22600	9502	2330	351	1891	1293	1819	478	-	159	1482	-	-	-	-	-	-
	IB	7	9,81	38914	20541	8262	4682	207	1026	446	2433	336	5	191	785	-	13	975	-	372	-
	IB	8	9,81	38914	15735	4802	12994	534	920	796	2597	103	4	195	236	-	7	-	-	254	-
	IB	6	9,81	38914	21734	12729	1916	230	74	350	1316	246	2	60	257	-	-	-	-	-	-

Note: - = below detection limit or not measured.

7.2. Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament

The Carvoaria Velha orogenic gold deposit, located in the northeast of Quadrilátero Ferrífero, 120 km from Belo Horizonte, and 120 km from the Lamego mine, is hosted in metagraywackes and carbonaceous phyllites of the Nova Lima Supergroup, where these rocks are intruded by mafic dikes and sills (Roncato et al., 2015). According to Ribeiro et al. (2015), quartz veins associated with mineralization are V1 system (see table 5), composed mainly of quartz and carbonate, and containing FIs classified as types 1A and 1B. Type 1A inclusions are pseudosecondary trapped in smoky quartz (Qtz I) with a composition of $H_2O + CO_2 \pm CH_4$, salinity in the range of 4.7 to 13.2 eq. wt% NaCl, and a density of 0.94 to 1.06 g/cm³. Type 1B inclusions are pseudosecondary, restricted to recrystallized quartz (Qtz II), $H_2O + CO_2 \pm CH_4$ composition and density of 0.92 to 1.04 g/cm³. The V4 veins are hosted in mafic dikes (DB1), and contain pseudosecondary aqueous fluid inclusions classified as type 2, which average salinity of 15 eq. wt% NaCl, and density between 0.97 and 0.99 g/cm³.

In the present work, about 125 individual FIs of types 1A, 1B and 2 of Ribeiro et al. (2015) were measured for comparison, using in situ LA-ICP-MS. They correspond to samples 192.2 and 195.7, which include V1 veins hosted in carbonaceous phyllite; 130.0 where a V1 vein is hosted in metagraywacke, and 160.0 with a V4 vein hosted in mafic dike - DB1, dominated by chlorite and carbonate alteration, with subordinate pyrite and quartz.

The results (see Table 6 and Fig. 10) indicate higher contents of cations $\text{Na} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$ in V1 veins hosted in carbonaceous phyllite and metagraywacke, increasing their concentration as a function of salinity. In the case of V4 veins, the concentration of these elements is higher due to their significantly greater salinity, but also the Ca and Mg concentration increases in comparison to K. There is a noticeable difference in the contents of base metals, which have a higher concentration in V4 veins hosted in mafic dikes, mainly Cu and Zn, and also Sr and Ba. In V1 veins hosted in both carbonaceous phyllite and metagraywacke, there is a positive $\text{Zn} > \text{Cu}$ ratio (Fig. 10). The ratio $\text{Cu} > \text{Zn}$ is positive in V4 veins for mafic rocks (Fig. 10). Another important observation is the high concentration of Sb in the V1 veins hosted in carbonaceous phyllite, with a moderate concentration of As, in contrast with V1 vein hosted in metagraywacke, which is more depleted in both metals. For the case of Au and Ag, these are usually below the detection limit in all veins. Lithium is also below the detection limits.

Table 5

Synthesis of vein characteristics in the Carvoaria Velha deposit. From Ribeiro et al. (2015)

Type	Mineralogy	Thick-ness	Host rock	Geometry	Orientation	Distribution and nature
Related to mineralization V1	Quartz – ankerite – sulphides/sulphosalt – gold veins	1–600 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	<ul style="list-style-type: none"> ● Lenticular in schistosity ● Milimetric to centimetric foldeds veinlets ● Pinch-and-swell 	118 / 70	<ul style="list-style-type: none"> ● Parallel to schistosity to Sn * ● Folded with axial plane foliation ● Shear veins
Late to mineralized veins V2	Quartz – ankerite-pyrite veins	2–300 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	● Lenticular centimetric a metric veins	286 / 33	<ul style="list-style-type: none"> ● Parallel to schistosity Sn + 1 * ● Extensional veins
V3	Quartz – ankerite veins	1–20 cm	Metagraywacke, schist and phyllite	● Planar to fracture arrays, brecciated	054 / 84	<ul style="list-style-type: none"> ● Parallel to schistosity Sn + 3 * ● Fracture veins
V4	Quartz – calcite veins	1–15 cm	Metamafic dykes and sills	● Irregular to stockwork		<ul style="list-style-type: none"> Irregular ● Extensional veins

Table 6

Summary of LA-ICP-MS analyses of FI in the Carvoaria Velha, Córrego do Sitio deposit. Individual element concentrations are in ppm, calculated using the salinity of the fluid inclusions.

Sample	FI Type	N FI	Salinity (wt.%)	Na	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Ag	Ba	Pb	Li
192.2	IA	10	8,6	34099	20626	4974	1665	1027	4312	583	435	30	11	157	280	-
195.7	IA	4	5,8	22997	15460	3169	330	-	1859	1311	376	55	38	186	213	-
130.0	IB	8	4,5	17843	12153	1990	954	20	1866	230	390	79	8	49	103	-
	IB	5	4,5	17843	11300	3588	892	26	1362	314	214	59	9	35	44	-
	IB	8	4,5	17843	12681	1609	795	71	1628	465	449	38	1	28	78	-
195.7	IB	8	8,5	33703	23195	3753	1473	1105	1763	795	804	191	57	319	247	-
	IB	9	8,5	33703	19866	1756	4709	167	5180	502	782	180	45	241	275	-
160.0	II	6	15	59475	24271	20736	7504	2620	2249	3421	430	545	17	404	98	-
	II	7	15	59475	43444	-	10018	4519	-	2344	299	306	79	368	108	-

Sample	FI Type	N FI	Salinity (wt.%)	As	Ag	Sb	Au
192.2	IA	10	8,6	141,6	5,1	1851,1	0,4
	IA	8	8,6	36,1	6,5	975,4	1,0
	IA	5	8,6	-	6,0	6888,1	-
	IA	2	8,6	575,7	18,3	12407,9	7,5
	IA	8	8,6	790,0	23,3	7311,5	4,3
130.0	IB	7	4,5	45,2	10,9	82,9	-
	IB	6	4,5	162,8	8,4	3172,7	-
	IB	6	4,5	67,3	15,1	102,8	-
195.7	IB	4	8,5	1057,4	50,3	3292,8	85,8
	IB	4	8,5	2474,0	38,9	2866,0	47,4

Note: - = below detection limit or not measured.

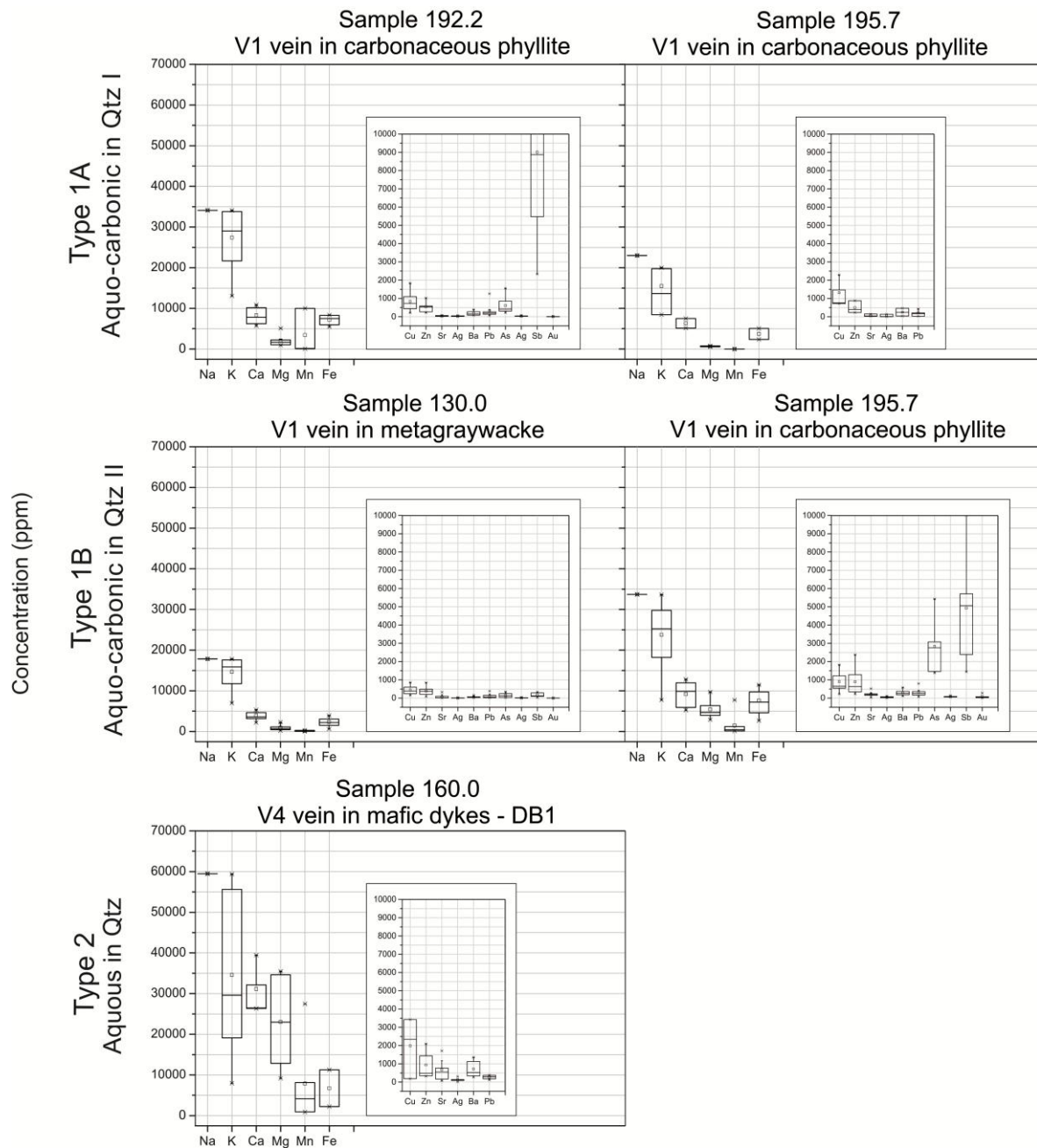


Fig. 10. Diagrams showing metal concentrations obtained from LA-ICP-MS microanalyses of fluid inclusion assemblages and individual fluid inclusions at the Carvoaria Velha gold deposit (Riberio et al., 2015), Córrego do Sítio lineament. These results are meant to be compared with data obtained for the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit.

8. Arsenopyrite geothermometer and pressure estimation for the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit

Arsenopyrite may be used as geothermometer when the variation of the arsenic content in the ore is equivalent to the temperature of formation, by using the phase diagram of Fe-As-S system (Kretschmar and Scott, 1976). According to the authors, some criteria must be considered, and these include mineral paragenesis in the Fe-As-S system; application to ore systems where arsenopyrite formed at temperatures $>300^{\circ}\text{C}$; and concentration of elements as Ni, Co and Sb less than 1 wt%.

For the case of the Cabeça de Pedra orebody, chemical composition of arsenopyrite crystals was measured in samples 11-3a, 11-3b, 11-4 and 11-5, where crystals are in equilibrium with gold particles, and with parageneses matching the Apy-Py stability field (Fig. 11B). Arsenopyrite crystals are commonly associated with the alteration rims of As-rich pyrite, where some crystal areas are more enriched in arsenic than others (Fig. 11A), the former being associated with gold precipitation (Morey et al., 2008). The results of the microprobe analyses are shown in table 7, the atomic percentage of As being between 28.17 and 30.61% at., with an average of 29.83% at. Using the diagram proposed by Kretschmar and Scott (1976), temperatures of formation equivalent to atomic percentages of As are in the range of 300 to 375°C , and an average of 337.5°C (Fig. 11B).

The pressure estimates for the Cabeça de Pedra orebody were calculated intercepting the average temperature of the arsenopyrite geothermometer. This is designed vertically with the isochore of each inclusion, assuming that the inclusions were not affected by any other processes after imprisonment (Brown and Hagemann, 1995; Hagemann, 1993). The results indicate that the orebody was formed at a minimum average pressure of 2500 bar and a maximum of 3500 bar (Fig. 11C). Higher pressures

(>4000 bar) indicates processes after imprisonment and they are not compatible with the metamorphic facies mineralogy in this rocks.

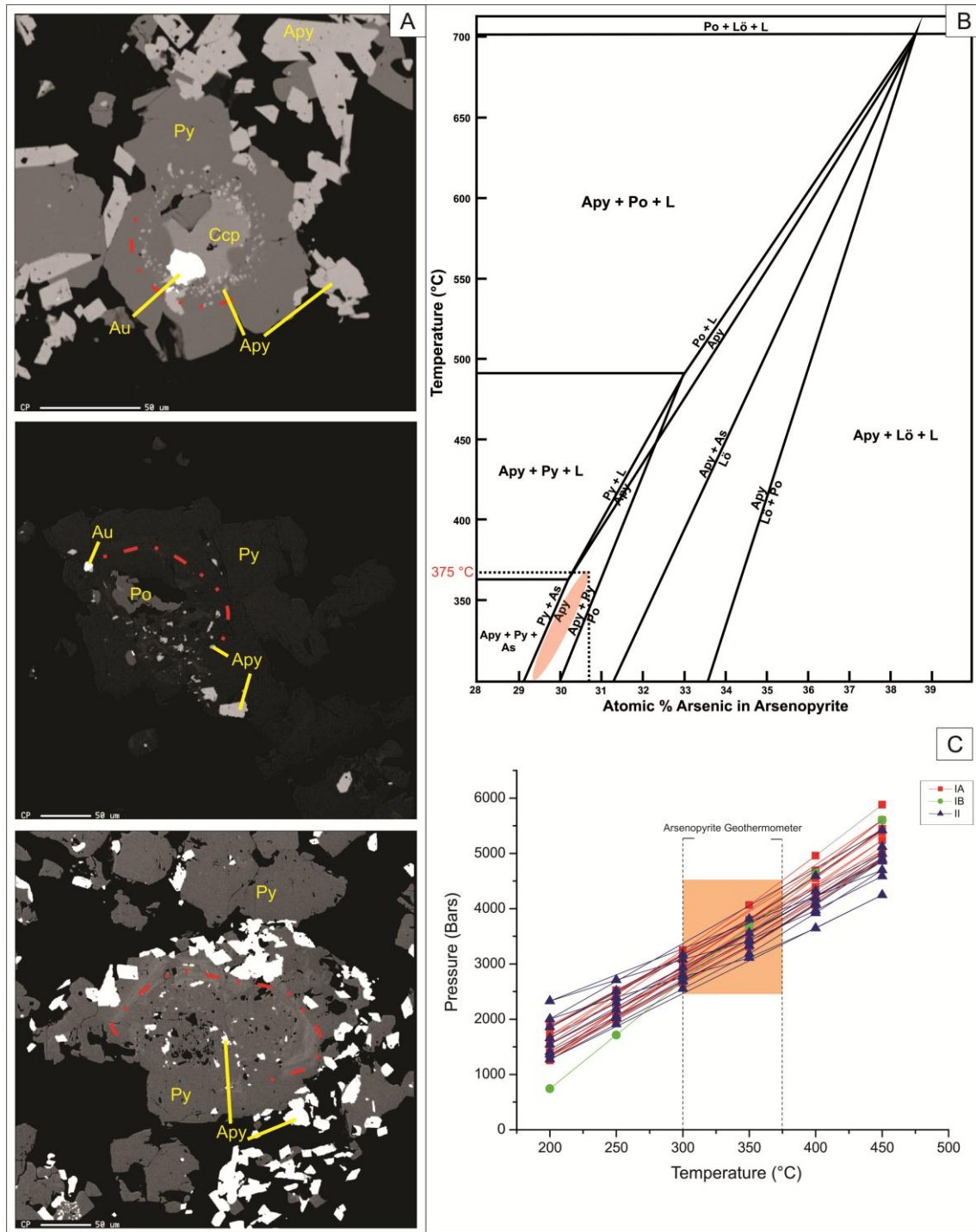


Fig. 11. A) Backscattered scanning image of As-rich pyrite (Py) and arsenopyrite (Apy) crystals showing alteration rims (red lines) with associated gold particles. B) Diagram of Kretschmar and Scott (1976) shows arsenic % atomic concentration versus temperature applied for arsenopyrite geothermometer. Values for this study are represented as a red area. The abbreviations correspond to: Apy – arsenopyrite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite; L6 –loellingite. C) Pressure estimates of representative fluid inclusions, calculated from the intersection of arsenopyrite geothermometer with the isochores.

Table 7

Composition data of arsenopyrite crystals from mineralized samples of the Cabeça de Pedra orebody, obtained from electron microprobe analysis.

% wt											Average
As	43,11	42,95	43,25	43,15	43,88	43,35	41,33	42,92	41,72	40,22	42,59
Fe	35,19	35,19	35,04	34,72	35,59	35,49	35,81	35,37	35,71	35,34	35,34
S	22,42	22,53	22,33	21,95	22,10	22,42	22,91	22,11	23,04	23,55	22,54
Total	100,72	100,67	100,62	99,82	101,57	101,26	100,05	100,40	100,46	99,11	100,47
% at											
As	30,20	30,05	30,34	30,58	30,61	30,22	28,90	30,20	29,07	28,17	29,83
Fe	33,06	33,05	33,00	33,02	33,32	33,21	33,61	33,40	33,38	33,22	33,23
S	36,74	36,90	36,67	36,40	36,07	36,58	37,49	36,41	37,55	38,60	36,94
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

9. Discussion

9.1. Nature of veins in the Cabeça de Pedra orebody

Quartz veins are classified according to their structural characteristics, mineralogy and field crosscutting relationships, in order to establish the chronological sequence presented in Figure 4. The V1 vein system is hinge-zone associated, crosscut all structures, and originated during the extensional phase of the Cabeça de Pedra orebody folding. During folding, competent rocks, such as BIF, fractured parallel to the axis near the hinge zone, allowing fluid to infiltrate via faults and shear zones (Martins et al., 2011) that acted as channels and created the V1 vein system, dominated by smoky quartz (Qtz I). This is represented by fault-fill and extensional quartz veins according to the criteria of Robert and Poulsen (2001). Where the V1 vein system uses the S_{1-2} and S_0 structures as infiltration channels, they are denominated V2 veins (Fig. 4). As these silicification fronts could not move beyond the impermeable carbonaceous phyllite barrier, which prevented further fluid infiltration, massive quartz zones (V1 and V2 veins) concentrated in the hinge zones of folds, and locally brecciated rock portions (Martins et al., 2011) were developed along the BIF-carbonaceous phyllite contact, indicating an increase in P_f relatively to P_L (Fig. 4; Fig 11C). The progressive deformation recrystallized the Qtz I of existing veins, forming milky quartz (Qtz II), which can be observed from the early to the advanced stages of recrystallization, represented by the V3 vein system (Fig. 4; Fig. 5B).

9.2. Hydrothermal fluid evolution

The fluid associated with gold mineralization in the Cabeça de Pedra orebody has a composition in the $H_2O-CO_2-NaCl \pm CH_4$ aqueous-carbonic system. The salinity is low to moderate, averaging ~ 9 eq wt% NaCl for V2 and V3, and ~ 2 eq wt% NaCl for the V1 vein systems, respectively (Fig. 8A). The volume percentage of the volatile phase in all

FIs is about 10 to 15%, indicating that the fluid was homogeneous with no evidence of boiling (Roedder, 1984).

The diagram T_{dec} vs salinity (Fig. 8A) shows that in V1 and V2 vein systems the salinity varies in the same temperature range. The data are grouped in two families, with variations of 0 to 4 eq. wt% NaCl for V1, and from 7 to 13 eq. wt % NaCl for V2. For the case of the V3 vein system (Fig. 8B, C), data are grouped with an average salinity of 9 eq. wt % NaCl. The range of salinity for all three V1, V2 and V3 indicates an increase in salinity with recrystallization of quartz advances. Recrystallization took place during the D₁-D₂ progressive deformation (Lobato et al., 2013; Martins et al., 2011), which may have caused grain boundaries migration, while the quartz crystal structure accommodated the crystalline dislocations (Urai et al., 1986). This process can be observed at different recrystallization stages, starting with fine polygonal crystals in an incipient stage (Fig. 5B), being formed along the edges of smoky quartz crystals, to a more advanced stage during which veins of milky quartz are developed (Fig. 5B; Fig. 4).

The color of the smoky quartz is due mainly to the large amount of FIs, most of which contain very fine particles of carbonaceous matter (Fig. 6F), particularly present in type IA FIs, indicated by the Raman spectra. The change in color (smoky quartz to milky quartz), takes place once quartz is recrystallized, and results from the migration of carbonaceous matter to the edges of the crystals (Schmatz and Urai, 2011). The water loss in FI during recrystallization (Drury and Urai, 1990; Schmatz and Urai, 2011), resulting from aqueous FIs accumulating along crystal edges (type III, Fig. 6A), may have caused the salinity increase in FIs trapped in recrystallized quartz (Qtz II) leading to higher salinity values observed in V3 veins (Fig. 8B). This also may have been the case for relatively higher salinity values in V2 veins (similar to V3; Fig. 8A), possibly due to a partial recrystallization of Qtz I (Fig. 5B).

Taking into account the vein classification and their FI studies, the fluid evolution for the Cabeça de Pedra orebody of the Lamego deposit is interpreted in two stages, characterizing what is interpreted to have a metamorphic origin:

Stage 1: aqueous-carbonic fluid of low salinity (average 2 eq. wt% NaCl) with a decrepitation temperature in the range of 200 to 300°C, represented by type IA FIs trapped in smoky quartz (Qtz I);

Stage 2: carbonic-aqueous fluid, with moderate salinity (average 9% eq. wt% NaCl) with the same range of decrepitation temperature, represented by type IB FIs trapped in recrystallized, milky quartz (Qtz II).

Considering that the microthermometric data are not accurate to estimate the minimum entrapment temperature, since the majority of FIs decrepitated before homogenizing, the arsenopyrite geothermometer was applied, and temperature values are calculated between 300 to 375°C (Fig. 11B). Based on these temperatures, pressure was estimated within 2.5 to 3.5 kbar (Fig. 11C), indicating that the hydrothermal fluid was subjected to continuous pressure changes (Sibson et al., 1988) that must have favored silica precipitation with gold.

Regarding the CH₄ content, FI studies in different deposits hosted in Archean rocks of the QF region report high proportions of this gas (e.g., Godoy, 1994; Alves, 1995; Xavier et al, 2000; Lobato et al., 2001b, Ribeiro et al., 2015), due to the hydrolysis reaction of carbonaceous matter ($2C + 2H_2O = CO_2 + CH_4$ or $C + 2H_2 = CH_4 + O_2$) present in the host rock. In the case of the Cabeça de Pedra orebody, the maximum ratio CO₂:CH₄ is 4:1 (Table 3), with a maximum CH₄ concentration of 22.6 mol% in the carbonic phase.

9.3. Gold precipitation mechanisms

The processes for gold precipitation in the Cabeça de Pedra orebody are:

1. Hydrolysis of carbonaceous matter of both phyllite and BIF, incorporating CH₄ to the fluid and decreasing fO_2 , causing destabilization of the gold-sulfur complexes;
2. The decrease of the total sulfur concentration in solution and reduced sulfur in the fluid during BIF sulfidation, possibly following reactions: i) $FeCO_{3\text{siderite}} + 2H_2S + 1/2O_2 = FeS_{2\text{pyrite}} + CO_2 + 2H_2O$ (Phillips, 1986); ii) $Fe_3O_{4\text{magnetite}} + 6H_2S = 3FeS_{2\text{pyrite}} + 4H_2O + 2H_2$ (Phillips and Powell, 2010). Gold precipitates in pyrite, associated with the overgrowth of arsenopyrite, where arsenic precipitation is strongly favored by fluid reduction (Heinrich and Eadington, 1986), and hence As has an association with gold and carbonaceous shales (Phillips and Powell, 2010);
3. The continuous variations in pressure, associated with the formation of faulting and folding, allowed the infiltration of large amounts of fluids, mainly in the hinge zones of BIF (V1 vein system), evolving to breccia-textured massive quartz with free gold. This is particularly well observed along the contact between carbonaceous phyllite and BIF (V2 vein system).

9.4. LA-ICP-MS in fluid inclusions of the Cabeça de Pedra orebody

The high concentration of major elements, such as Na, K, Ca and Mg, in FIs hosted in carbonaceous phyllites and BIF, is similar to that of metamorphic fluids in orogenic gold systems (Ridley and Diamond, 2000). This is a consequence from the salinity increase in FIs in all types of analyzed veins with the order of abundance Na > K > Ca > Mg. The cations K, Ca and Mg are responsible for the lower eutectic temperature (-35°C) when compared to fluids containing only Na (Borisenko, 1977). Particularly, the enrichment in K and Mg in the fluid reflects the formation of hydrothermal alteration

minerals, such as sericite and chlorite, which are typical of proximal alteration zones of metamafic rocks (Ridley and Diamond, 2000), as described by Martins et al. (2011).

As shown in Table 4 and Figure 9, Zn has the highest concentration in veins hosted in carbonaceous phyllites, V2 vein (sample 11-7), and V3 veins (up to 3783 ppm) when compared to veins hosted in BIF (up to 612 ppm). Yamaguchi (2002) reports values between 100 and 200 ppm of Zn in black shales from different Archean cratons world while, and suggests hydrothermal activity for these concentrations. Coveney (2003) suggests that the source for Zn enrichment, together with other metals (Ni, Mo, As, Pt, Pd and Au), in the cambrian black shales of south China is hydrothermal fumaroles. On the other hand, Lehmann et al. (2003) interpret that the same black shales are not associated with volcanic activity, and the authors postulate that metals enrichment is due to direct precipitation of sea water via reduction of the black shales. This may indicate that during hydrothermal fluid interaction to form the Cabeça de Pedra orebody at Lamego, Zn was leached from the carbonaceous phyllite and concentrated in fluid. Copper is more concentrated in veins hosted in carbonaceous phyllite (up to 1293 ppm; Table 4), than in those in BIF (up to 201 ppm; Table 4 and Figs. 9 and 11A). This indicates as well as Zn, the carbonaceous phyllite is the source of Cu (Large et al., 2011).

The content of As (Table 4) in veins hosted in carbonaceous phyllite (229-975 ppm) is higher than in veins hosted in BIF (37-183 ppm). According to Large et al. (2011), black shales have the capacity of adsorb As and Au cations in both organic matter particles and diagenetic pyrite, suggesting carbonaceous phyllite as a possible source for these metals in Lamego. Concentration of Au (up to 41 ppm) and Ag (up to 50 ppm) is below the detection limit (Table 4) in the majority of the analyzed veins, indicating that these metals were precipitated and the fluid was metal depleted. Rauchenstein-Martinek et al. (2014) also found extremely low Au (max 0.33 ppm) and Ag (max 2 ppm) results,

and the authors concluded that metamorphic fluids are commonly unsaturated in gold. A pre-enrichment of gold in the fluid source is essential to generate orogenic deposits, and also that carbonaceous phyllite and mafic rocks are the most favorable rock types for this process (Large et al., 2011). In the case of the Cabeça de Pedra orebody, gold must have been therefore incorporated in solution during the metamorphic devolatilization (Phillips and Powell, 2010; Pitcairn et al., 2006, 2014) of carbonaceous phyllites similarly to what is suggested by Tomkins (2010, 2013a, 2013b) and Large et al. (2011). However, the metabasalt may also have been a source of gold, but probably not for As and Sb (Pitcairn et al., 2015).

9.5. LA-ICP-MS in fluid inclusions of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament

Fluid inclusions in quartz veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio lineament (Ribeiro et al., 2013) show a similar concentration of the elements Na, K, Ca and Mg (Fig. 10) typical of metamorphic fluids (Ridley and Diamond, 2000). The Cu and Sr contents are noticeably higher in veins hosted in mafic dikes (Table 6), with Cu values up to 3420 ppm and up to 545 ppm for Sr, when compared to a maximum of 1300 ppm Cu, and 180 ppm Sr in veins hosted in carbonaceous phyllite. These values indicate an important mafic contribution for these metals, but do not exclude carbonaceous phyllite as possible source.

Antimony-rich (variation from 5000 to 9000 ppm) inclusions of veins hosted in carbonaceous phyllite at Carvoaria Velha (Table 6 and Fig. 10) suggest leaching of Sb from carbonaceous-dominated host rocks. However, this contrasts with the abundant prevalence of berthierite (FeSb_2S_4) therein. The presence of both Sb phases, berthierite and stibnite (Ribeiro et al., 2013), and Sb in the fluid must result from the pronounced availability of this metal in the whole rock package at the Córrego do Sítio lineament,

which is characterized only by the presence of clastic metasedimentary rocks (Roncato et al., 2015). One must also take into account the high efficiency of Sb solubility in fluids interacting with carbonaceous phyllites (Obolensky et al., 2007). Fan et al. (2004) report an enrichment in Sb (50 to 90 ppm) in black shales from the antimony Xikouangshan deposit, China, suggesting these rocks as the source of metals. Comparing the Xikouangshan concentrations with those obtained in veins from the Carvoaria Velha deposit, there is a clear increase of 100 to 200 times in the Sb concentration, assuming that the original carbonaceous shale was Sb rich.

In relation to As, its behavior is similar to Sb, since it is also in solution (up to 2500 ppm; Table 6), with arsenopyrite being by far the predominant sulfide at Carvoaria Velha (Ribeiro et al., 2013). Fluid As-S-Fe buffering via arsenopyrite + pyrite development Heinrich and Eadington (1986), in a similar temperature range as that of Carvoaria Velha (300 to 375°C, Ribeiro et al, 2015), was such that both As and Fe (Fig. 11) were still retained in the fluid phase (Table 6).

Gold and silver are depleted in all veins (Table 6) suggesting that these were precipitated, similar to veins associated with the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit.

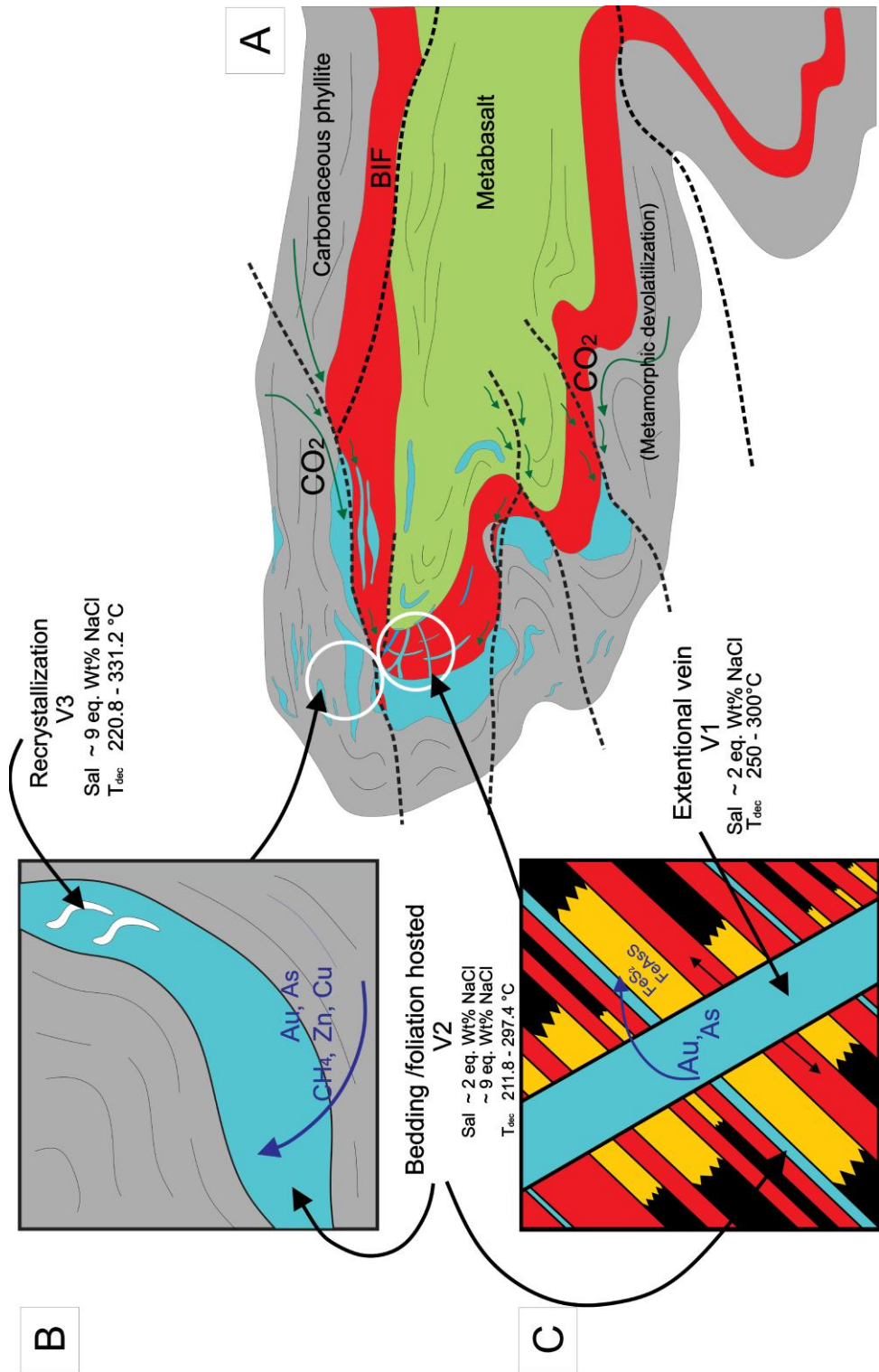


Fig. 12. Schematic hydrothermal fluid model for the gold mineralization at the Cabeça de Pedra orebody, Lamego deposit. A) Metamorphic fluid (green arrows) carries cations during metamorphic devolatilization of carbonaceous phyllites. B) Fluid-rock interaction and leaching of cations of carbonaceous phyllites. C) Replacement-style of gold precipitation in BIF.

10. Conclusions

Fluid inclusion microthermometric studies combined with LA-ICP-MS in FIs and arsenopyrite geothermometer of different vein systems of the Cabeça de Pedra orebody, at the Lamego orogenic gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, allow the following conclusions:

1. Three vein systems are identified, V1, V2 and V3, where the early-stage smoky quartz is referred to as Qtz I, and its recrystallized product is Qtz II. The latter constitutes milky, granoblastic crystals.

2. The Cabeça de Pedra orebody was formed from the interaction of low salinity (~ 2 eq. wt% NaCl), aqueous-carbonic metamorphic fluids, at temperatures between 200 and 370°C, and a variable pressure of 2.5 to 3.5 kbar, obtained in Qtz I smoky quartz. The FIs of recrystallized, milky quartz (Qtz II) contain moderate salinities of ~ 9 eq. wt% NaCl (Fig. 12A,B). This salinity increase is interpreted as a result of water loss in the FIs during quartz recrystallization Qtz I to Qtz II, when aqueous FIs accumulate along the crystal edges.

3. According to the characteristics of the fluid, T and P conditions, and mineralization styles, it is concluded that the orebody was formed in similar conditions described for orogenic gold deposits elsewhere (Groves et al., 1998; Hagemann e Cassidy, 2000), and resembles the proposed models for other gold deposits of the Archean rocks of the QF (Lobato et al., 2001b).

4. Fluid infiltration in host rocks must have taken place in several stages, which were closely linked to the formation of the Lamego fold. Competent rocks, such as BIF, fractured parallel to the axis near the hinge zone, allowing fluid to flow via faults and shear zones (Martins et al., 2011) that acted as channels

and created the V1 vein system (Fig. 4). As V1 veins evolved and penetrated along the S_{1-2} foliation and bedding S_0 planes, the V2 veins developed. Silicification was constrained to the BIF-carbonaceous phyllite contacts, since it could not move beyond the impermeable carbonaceous phyllite barrier. Further fluid infiltration was prevented and massive quartz zones were concentrated in the hinge zones of folds, locally forming brecciated portions (Martins et al., 2011) along the BIF-phyllite contact, indicating an increase in P_f relatively to P_L (Fig. 12A). Pressure played a very important role in mineralization, since the large silicification zones that contain the highest gold grades that must have been produced due to fluctuations in fluid pressure during infiltration (e.g., Sibson et al., 1988).

5. Gold precipitation was related predominantly to the (i) sulfidation of BIF (Fig. 12C), generating mainly pyrite in association with gold, especially during As enrichment; and (ii) hydrolysis of carbonaceous matter in phyllite, which affected fO_2 , destabilized the sulfur complexes, and resulted in free gold particles.

6. The interaction of the hydrothermal fluid with the host rocks has determined the incorporation and depletion of certain elements in the remaining fluid, detected by the LA-ICP-MS technique in FIs. The compositional fluid differences of the Cabeça de Pedra orebody (Lamego) and the Carvoaria Velha deposit (Córrego do Sitio lineament) are closely related to compositional variations of the host metasedimentary units. Carbonaceous phyllites from Lamego provided base metals (i.e., Zn) to the hydrothermal fluid, whereas quartz veins associated with the same rock type at the Carvoaria Velha have significant Sb. Not only were the original black shales enriched in both Zn and Sb, but they seem to have been sourced differently.

7. For both the Cabeça de Pedra and Carvoaria Velha deposits, the source of Au and As was possibly the pre-enriched carbonaceous phyllite. These elements were probably leached during the metamorphic devolatilization (Large et al., 2011), indicating a local metal and fluid source during gold mineralization.

8. The role of carbonaceous phyllites for fluid entrapment and gold concentration has been indicated in the case of some Rio das Velhas greenstone-belt-hosted deposits (e.g., Lobato et al., 2001b; Xavier et al., 2000). They also pointed out the importance of the hydrolysis of carbonaceous matter affecting fO_2 , destabilizing sulfur complexes and enhancing gold precipitation. The present contribution highlights, for the first time in the Rio das Velhas greenstone belt gold deposits, that carbonaceous phyllites also acted as the source of metals, most importantly gold, similarly to what is postulated for example by Gaboury (2013), Large et al. (2011), and Tomkins (20013b), supplied by the black shales of the original Archean stratigraphy. This has enormous exploration implication in this vast region, where chemical and clastic sedimentary rocks dominate the greenstone belt sequence (Baltazar and Zucchetti, 2007).

Capítulo 5 - Considerações finais

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que:

1. O Corpo Cabeça de Pedra da mina Lamego foi formado a partir de fluidos metamórficos, aquo-carbônicos de baixa salinidade (~2 eq. wt% NaCl), com temperaturas entre 200 e 375°C, e pressão variável de 2.5 - 3.5 kbar. Se consideram as salinidades moderadas (~9 eq. wt% NaCl), como resultado do avanço da recristalização.
2. De acordo com as características do fluido, condições de T e P, e estilos de mineralização, se conclui que este corpo foi formado na mesozona (Groves et al., 1998), e se correlaciona aos modelos propostos para outros depósitos auríferos do QF (Lobato et al., 2001b).
3. O fluido foi infiltrado através da rocha hospedeira durante várias etapas, as quais estão estreitamente ligadas à formação da dobra Lamego, onde as rochas mais competentes, como a FFB, são fraturadas em direção paralela ao eixo da dobra e na zona de charneira, usando falhas e zonas de cisalhamento como canais de infiltração (Martins et al., 2011) formando assim o sistema V1. Quando este sistema penetra na foliação (S_{1-2}) e/ou bandamento (S_0), forma o sistema V2. Devido a que o fluido encontra no filito carbonoso uma barreira impermeável, diminuindo a infiltração, as zonas de quartzo maciço são concentradas nas zonas de charneira e localmente em porções brechadas (Martins et al., 2011), ao longo do contato FFB-filito carbonoso. Isto devido às contínuas mudanças da pressão do fluido. A pressão exerceu um papel muito importante na mineralização do corpo de minério, já que grandes massas de silicificação que contém os maiores teores foram produzidas devido a flutuações na pressão do fluido durante a infiltração do mesmo.

4. A mineralização foi influenciada de acordo com diferentes processos relacionados principalmente à interação do fluido com a rocha hospedeira, a qual determinou mecanismo de precipitação em cada litotipo, predominando a substituição na FFB, gerando sulfetos de Fe que posteriormente foram mineralizados com ouro durante o enriquecimento em As; enquanto a hidrólise da matéria carbonosa no filito alterou a $f(\text{O}_2)$, desestabilizando os complexantes de enxofre e propiciando a precipitação de partículas de ouro livre.
5. A interação do fluido com a rocha hospedeira determinou a incorporação e empobrecimento de determinados elementos neste, que foram detectados mediante a técnica LA-ICP-MS em inclusões fluidas. As diferenças composicionais do fluido do corpo Cabeça de Pedra (Lamego) e do depósito Carvoaria Velha (Lineamento Córrego do Sitio) estão estritamente ligadas às variações composicionais das unidades metassedimentares hospedeiras: os filitos carbonosos de Lamego aportam ao fluido metais básicos como Zn, em comparação com os veios de quartzo de Carvoaria Velha, cujo aumento significativo em Sb pode indicar uma alta concentração deste metal na rocha hospedeira. A influência da interação entre o fluido e rocha máfica representado por diques é mais acentuada em Carvoaria Velha, onde tem um aumento em cátions como Cu e Sr no fluido.
6. Para ambos depósitos, Lamego e Carvoaria Velha, a fonte do Au e As possivelmente foram os filitos carbonosos pre-enriquecidos, os quais foram extraídos durante as fases de devolatilização metamórfica (Large et al., 2011), o que indica uma fonte local de fluido e metais durante o processo de mineralização.

7. Assim se conclui que os depósitos auríferos do Quadrilátero Ferrífero tiveram condições e processos similares de formação, mas a composição das rochas hospedeiras foi o fator determinante na e evolução dos fluidos hidrotermais mineralizantes nesta região.

Referências

Almeida, F.F.M., 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Departamento Nacional da Produção Mineral. Divisão Geologia Mineral, Boletim, vol. 241. Rio de Janeiro, Brasil, 36 pp.

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., 1984. O Pré-Cambriano do Brasil. Edgar Blücher, São Paulo. 378 pp.

Alves, J.V., 1995. Estudo das inclusões fluidas em veios de quartzo da mina de ouro de Sao Bento, Santa Bárbara, MG. MSc Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Brazil.

Baltazar, O.F., da Silva, S.L., 1996. Projeto Rio das Velhas - Mapa geológico integrado, escala 1:100,000. Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, Belo Horizonte, Brazil.

Baltazar, O.F., Pedreira, A.J., 1996. Associações de litofácies. In: CPRM–Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 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. 43–48.

Baltazar, O.F., Pedreira, A.J., 1998. Associações litofaciológicas. In: M. Zucchetti and O.F. Baltazar (Eds.), Projeto Rio das Velhas– Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. 2nd edition, Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 43–47.

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 regional setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 471–499.

Belo de Oliveira, O.A., Vieira, M.B.H., 1987. Aspectos da deformação dúctil e progressiva no Quadrilátero Ferrífero. 4th. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, Brazil, pp. 237–253.

Borisenko, A.S., 1977. Study of the salt composition of solutions of gas–liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Geol. Geofiz* 18 (8), 16–27.

Bowers, T.S., Helgeson, H.C., 1983. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geological systems: equation of state for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47, 1247–1275.

Brito Neves, B.B., 2011. The Paleoproterozoic in the South-American continent: Diversity in the geologic time. *Journal of South American Earth Sciences* 32, 270-286.

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.

Carneiro, M.A., 1994. Geocronologia e Geoquímica do Complexo Bonfim. Unpublished Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, 350 pp.

Carneiro, M.A., Teixeira, W., Machado, N., 1994. Geological evolution of a sialic fragment from the Quadrilátero Ferrífero in eastern-central Brazil based on U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr and K–Ar isotopic constraints. 14. *Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium, Tübingen. Terra Nostra*, vol. 2, pp. 12–13.

Coveney R.M. 2003. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geological significance – A discussion. *Economic Geology* 98, 661– 662.

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 pp.

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 pp.

Drury, M.R., Urai, J.L., 1990. Deformation-related recrystallization processes. *Tectonophysics* 172, 235-253.

Fan, D., Zhang, T., Ye, J., 2004. The Xikuangshan Sb deposit hosted by the Upper Devonian black shale series, Hunan, China. *Ore Geology Reviews* 24, 121–133.

Frezzotti, M.L., Tecce, F., Casagli, A., 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 112, 1–20.

Gaboury, D., 2013. Does gold in orogenic deposits come from pyrite in deeply buried carbon-rich sediments? : Insight from volatiles in fluid inclusions. *Geology* 41, 1207–1210.

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 pp.

Godoy, M.L.S., 1994. Evolução tectono-metamórfica da mineralização aurífera de Raposos (MG). MSc Thesis, Universidade Estadual Paulista, Instituto Geociências Ciências Exactas, Rio Claro, Brazil.

Goldfarb, R.J., Groves, D.I., Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews* 18, 1–75.

Goldfarb, R.J., Baker, T., Dube, B., Groves, D.I., Hart, C.J.R., and Gosselin, P., 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *in* Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., and Richards, J. P., eds., *Economic Geology*. 100th Anniversary Volume 1905–2005: Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, p. 407–450.

Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. SEPM Short Course 31. The Mineralogical Association of Canada, Tulsa 199 pp.

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 Geology Reviews* 13, 7–27.

Gross, G.A., 1980. A classification of iron formations based on depositional environments. *Canadian Mineralogist* 18, 215-222.

Guillong, M., Meier, D.L., Allan, M.M, Heinrich, C.A., and Yardley, B.W.D., 2008, Appendix 6: Sills: A Matlab-based program for the reduction of laser ablation ICM-MS data of homogeneous materials and inclusions: Vancouver, B.C., Mineralogical Association of Canada Short Course 40, p.

Guimarães, D., 1931. Contribuição à geologia do Estado de Minas Gerais. Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, Brazil, *Boletim*, vol. 55, pp. 1–36.

Hagemann, S.G., 1993. The Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: A case study of a high level Archaean Lode-gold system. Ph.D. thesis. Univ. Western Australia.

Hagemann, S.G., Cassidy, K.F., 2000. Archean orogenic lode gold deposits. *In*: Hagemann, S.G., Brown, P.E. (eds) *Gold in 2000 (Reviews in Economic Geology 13)*, Society of Economic Geologists, 9–68.

Heinrich, C. & Eadington, P.J., 1986. Thermodynamic predictions of the hydrothermal chemistry of arsenic, and their significance for the paragenetic sequence of some cassiterite-arsenopyrite-base metal sulphide deposits. *Economic Geology*, 81, 511–529.

Herz, N., 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 641-B. 58 pp.

Herz, N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 641-C. 81 pp.

Jacobs, G.K., Kerrick, D.M., 1981. Methane: an equation of state with application to the ternary system H₂O-CO₂-CH₄. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45, 607–614.

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.

Klein, C., Ladeira, E.A., 2000. Petrology and geochemistry of some proterozoic banded iron-formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology* 95, 405-428.

Kretschmar, U., Scott, S.D., 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *Canadian Mineralogist* 14, 364–386.

Ladeira, E.A., Viveiros, J.M.F., 1984. Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. Sociedade Brasileira Geologia, Núcleo de Minas Gerais, Boletim, vol. 4. 24 pp.

Large, R.R., Bull, S.W., Maslennikov, V.V.A., 2011. Carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*. 106, 331–358.

Lehmann B., Mao J., Shengrong L., Zhang G., Zeng M. 2003. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geological significance – A reply. *Economic Geology* 98, 663 – 665.

Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Pereira, L.M.M., Menezes, M.G., Junqueira, P.A., Pereira, S.L.M., 1998a. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: part I, description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências* 28, 339–354.

Lobato, L.M., Vieira, F.W., 1998b. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: part II, the Archean mesothermal gold-bearing system. *Revista Brasileira de Geociências* 28, 355–366.

Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Zucchetti, M., Noce, C.M., Baltazar, O.F., da Silva, L.C., Pinto, C.P., 2001a. Brazil's premier gold province. Part I: the tectonic, magmatic and structural setting of the Archaean 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 Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 249–277.

Lobato, L.M., Martins, B.S., Rosière, C.A., Figueiredo e Silva, R.C., Lemos, L.H.A., Villanova, F.L.S.P., Amaral, LFS. 2013. Depth variation characteristics at the Carruagem orebody, Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Paper presented at the 12th SGA Biennial Meeting - Mineral Deposit Research for a High-Tech World, Uppsala, Sweden, 12-15 August.

Loczy, L., Ladeira, E.A., 1976. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. Edgar Blücher, São Paulo. 528 pp.

Machado, N., Carneiro, M.A., 1992. U–Pb evidence of late Archaean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences* 29, 2341–2346.

Machado, N., Noce, C.M., De Oliveira, O.A.B., Ladeira, E.A., 1989a. Evolução Geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior com base em geocronologia U/Pb. 5. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1989, Sociedade Brasileira de Geologia, núcleo Minas Gerais, Extended Abstract Volume, pp. 1–5.

Machado, N., Schrank, A., Abreu, F.R., Knauer, L.G., Almeida-Abreu, P.A., 1989b. Resultados preliminares da geocronologia U–Pb na Serra do Espinhaço Meridional. 15th Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, pp. 171–174.

Marshak, S., Alkmim, F.F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics* 8, 171–174.

Martins, B.S. 2011. Controle da mineralização aurífera de Lamego, Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG. M.Sc. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 250 pp.

Martins B.S., Rosière C.A., Lobato L.M., Figueiredo e Silva R.C., Baars F.J., Tschiedel M.W., Oliveira H., Penha U.C., 2011. Mineralization control of the Lamego Gold Deposit, Sabará, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In: Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA) Biennial Meeting, 11th, Proceedings, Antofagasta, Chile.

Martins Pereira, S.L, 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.

Morey, A.A; Tomkins, A.G; Bierlein, F.P; Weinberg, R.F; Davidson, G., 2008. Bimodal Distribution of Gold in Pyrite and Arsenopyrite: Examples from the Archean Boorara and Bardoc Shear Systems, Yilgarn Craton, Western Australia. *Economic Geology* 103, 599-614.

Noce, C.M., 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Unpublished Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, Brazil, 128 pp.

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., Dantas, E.L., Lobato, L.M., Zucchetti, M., Baltazar, O.F., 2002. Múltiplos eventos de vulcanismo no greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero (MG): novos dados U–Pb, implicações geotectônicas e metalogenéticas. 41th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, João Pessoa, p. 522.

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.

Obolensky, A.A., Gushchina, L.V., Borisenko, A.S., Borovikov, A.A., Pavlova, G.G., 2007. Antimony in hydrothermal processes: solubility, conditions of transfer, and metal-bearing capacity of solutions. *Russian Geology and Geophysics* 48, 992–1001.

Oliveira, G.A.I., Caiafa, P.L., Vial, D.S., 1983. Excursão à mina de ouro de Morro Velho, Sociedade Brasileira de Geologia. Núcleo de Minas Gerais Boletim, vol. 3, pp. 497–505.

O'Rourke, J.E., 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. PhD thesis, University of Wiscosin. Wiscosin, 106 pp.

Pedreira, A.J., Silva, S.L., 1996. Sistemas deposicionais do greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 39th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, pp. 138–140.

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.

Phillips, G.N., 1986. Geology and Alteration in the Golden Mile, Kalgoorlie. *Economic Geology* 81, 779–808.

Phillips, G.N., Powell, R., 2010. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 689–718.

Pitcairn, I.K., Teagle, D.A.H., Craw, D., Olivo, G.R., Kerrich, R., Brewer, T.S., 2006. Sources of Metals and Fluids in Orogenic Gold Deposits: Insights from the Otago and Alpine Schists, New Zealand. *Economic Geology* 101, 1525–1546.

Pitcairn, I.K., Craw, D., Teagle, D.A.H., 2014. The gold conveyor belt: Large-scale gold mobility in an active orogeny. *Ore Geology Reviews* 62, 129–142.

Pitcairn, I.K., Craw, D., Teagle, D.A.H., 2015. Metabasalts as sources of metals in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita* 50, 373–390.

Ramsay, J. G., 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. New York: McGraw-Hill.

Rauchenstein-Martinek, K., Wagner, T., Wälle, M., Heinrich, C.A., 2014. Gold concentrations in metamorphic fluids: A LA-ICPMS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt. *Chemical Geology* 385, 70–83.

Renger, F.S., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N., 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos* 2, 1–11.

Ribeiro-Rodrigues, L.C., 1998. Gold in Archaean banded ironformation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine. Ph.D. Thesis, Aachen University of Technology. Augustinus Verlag, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 27, 264 pp.

Ribeiro-Rodrigues, L.C., Oliveira, C.G., Friedrich, G., 2007 The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* 32, 543–570.

Ribeiro, Y., Figueiredo e Silva, R.C., Lobato, L.M., Lima, L.C., Rios, F.J., Hagemann, S.G., Cliff, J., 2015. Fluid inclusion and sulfur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulfide veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* 67, 11–33.

Ridley, J.R., Diamond, L.W., 2000. Chapter 4 – Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *SEG Rev.* 13, 141–162.

Robert, F., Poulsen, K.H., 2001. Vein Formation and Deformation in Greenstone Gold Deposits. *In* Structural controls on ore genesis, (ed) J.P. Richards and R.M. Tosdal; *Reviews in economic geology*, 14 p. 111-156.

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. : *Rev. Mineral.*, 12. Mineralogical Society of America, p. 646.

Roncato Jr., J.G., Lobato, L.M., Lima, L.C., Porto, C.G., Figueiredo e Silva, R.C., 2015. Metaturbidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio Lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 45: 5-2

Russell-Wood, A. J., 1984, Colonial Brazil: the gold cycle, c. 1690-1750, in *The Cambridge History of Latin America*, vol. II, Cambridge, pp. 547-600.

Sales, M., 1998. The geological setting of the Lamego iron-formation-hosted gold deposit, Quadrilátero Ferrífero district, Minas Gerais, Brazil. Unpublished M.Sc. thesis, Queens University, Hamilton, Canada, 182 pp.

Schmatz, J., Urai, J.L., 2011. The interaction of migrating grain boundaries and fluid inclusions in naturally deformed quartz: A case study of a folded and partly recrystallized quartz vein from the Hunsrück Slate, Germany. *Journal of Structural Geology* 33, 468-480.

Schrank, A., Machado, N., 1996. Idades U–Pb em monazitas e zircões do distrito aurífero de Caeté, da mina de Cuiabá e do depósito de Carrapato–Quadrilátero Ferrífero (MG). 39th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, pp. 473–475.

Schrank, A., Machado, N., Stern, R., 2002. Eventos no Arqueano com base em idades U/Pb–SHRIMP de zircões detríticos em metassedimentos da mina de Morro Velho–Quadrilátero Ferrífero– Minas Gerais. 41th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, João Pessoa, p. 527.

Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie and Son, Glasgow, 239 pp.

Sibson, R.H., Robert, F.K., Poulsen, H., 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology* 16, 551–555.

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.

Thiéry, R., van der Kerkhof, A.F., Dubessy, F., 1994. vX properties of CH₄–CO₂ and CO₂–N₂ fluid inclusions: modeling for T-318C and P-400 bar. *Eur. J. Mineral.* 6, 753–771.

Tomkins, A.G. 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 3246–3259.

Tomkins, A.G., 2013a. A biogeochemical influence on the secular distribution of orogenic gold. *Economic Geology* 108, 193–197.

Tomkins, A.G., 2013b. On the source of orogenic gold. *Geology* 41, 1255–1256.

Urai, J. L., Means, W. D., and Lister, G. S., 1986, Dynamic recrystallization of minerals, *in* Hobbs, B. E., and Heard, H. C. (eds.), *Mineral and rock deformation: laboratory studies; the Paterson volume*. *Geophysical Monograph*, v. 36, p. 161-199.

Vial D.S., Abreu G.C., Schubert G., Ribeiro-Rodrigues L.C. 2007a. Smaller gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews* 32, 651–673.

Vial, D.S., De Witt, E., Lobato, L.M., Thorman, C.H. 2007b. The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews* 32, 511–542.

Vieira, F.W.R., Oliveira, G.A.I., 1988. Geologia do distrito aurífero de Nova Lima, Minas Gerais. In: Schobenhau-Filho, C., Coelho, C.E.S. (Eds.), *Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio. Principais Depósitos Minerais do Brasil*, vol. 3. Departamento Nacional da Produção Mineral/Companhia Vale do Rio Doce, Brasília, Brazil, pp. 377–391.

Vieira, F.W.R. 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. Paper presented at the Brazil Gold'91, Belo Horizonte.

Villanova F.L.S.P., 2011. Mapeamento Geológico em escala 1:5.000 da superfície e região circunvizinha da Mina Lamego, Sabará, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais.

Xavier, R.P., Toledo, C.L.B., Taylor, B.E., Schrank, A., 2000. Fluid evolution and gold deposition at the Cuiabá mine, SE Brazil: fluid inclusions and stable isotope geochemistry of carbonates. *Rev. Bras. Geosci.* 30 (2), 337–341.

Yamaguchi, K., 2002. Geochemistry of Archean–Paleoproterozoic black shales: the early evolution of the atmosphere, oceans, and biosphere. PhD. thesis. The Pennsylvania State University.

Zucchetti, M., Baltazar, O.F., 1998. Projeto Rio das Velhas—Texto Explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000, 2nd ed. Belo Horizonte: Departamento Nacional da Produção Mineral—Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 121 pp.

Zucchetti, M., Baltazar, O.F., 2000. Rio das Velhas Greenstone Belt lithofacies associations, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, CD-ROM.

ANEXO I

FICHAS PETROGRÁFICAS

(CD)

No. DE LÂMINA	LCPD09-1			ROCHA HOSPEDEIRA:	
No. AMOSTRA	LCPD09-1			FILITO MICÁCEO	
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra			FURO	LCPD009
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE		209,5 m
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de quartzo e carbonato encaixado em metapelite acompanhando a foliação principal da rocha

TEXTURA GERAL: quartzo e carbonato com textura granoblastica

TEXTURAS ESPECIFICAS: quartzo em pente, texturas de deformação dos cristais de quartzo e carbonato

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	10	100 μ	Euedrica	Qtz

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	70	<300 e 600 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	10	2000 μ	euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Cb	<2	<50 μ	Euedrica	Se, Chl
Se	<2	<50 μ	Subedrica	Cb, Chl
Chl	4	<50 μ	Subedrica	Cb, Se

MINERAIS ACESORIOS: Sph , Como cristais espalhados dentro do veio e a zona de contato na rocha hospedeira, de tamanho de 50 μ

Descrição

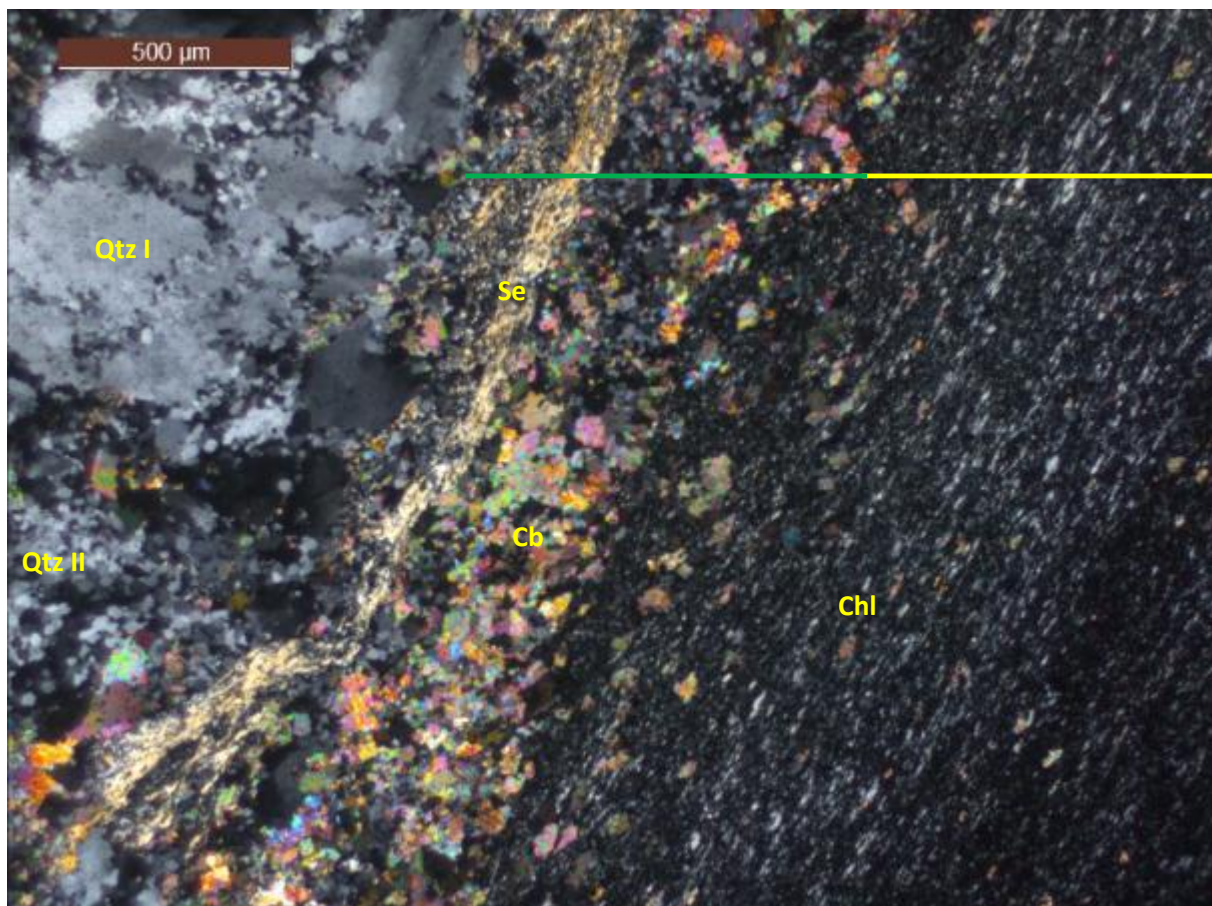
O veio de 3 cm de espessura encontrasse encaixado em filito micáceo, acompanha a foliação principal e está dobrado. A mineralogia basicamente constituída por quartzo (Qtz) e Carbonato (Cb) apresentam estiramento mineral. A pirita (Py), único opaco presente encontrasse de forma errática dentro do veio.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas, em alguns casos os cristais apresentam estiramento mineral. O quartzo (II) de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais com extinção reta muitas vezes alinhados numa direção preferencial de deformação. Fotomicrografia 1.

Carbonato (Cb): Ocorre em dois tipos: (I) carbonato dentro do veio associado ao Qtz I, de granulação grossa (~ 2000 μ) localizado de forma errática dentro do veio. Apresenta estiramento mineral. No entanto, o carbonato (II) ocorre como alteração hidrotermal da rocha hospedeira, sendo restrito ao contato próximo entre o veio e o metapelito com tamanho de grão < 50 μ .

Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos disseminados dentro do veio, de tamanho fino (~ 100 μ).

Sericita (Se) e Clorita (Chl): Sericita é apresentada como finas faixas localizadas no contato veio-hospedeira. A clorita encontrasse na zona distal de alteração hidrotermal.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD009-1**, 209,5 m- Detalhe do contato do veio quartzo-carbonático com a rocha hospedeira. Pode-se observar a textura granoblastica do Qtz I, os finos cristais do Qtz II, além das diferente zonas de alteração hidrotermal: Sericita-carbonato (linha verde) e clorita (linha amarela). Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA	LCPD09-4		ROCHA HOSPEDEIRA: _____		
No. AMOSTRA	LCPD09-4		FILITO CARBONOSO		
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD009	
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE	237,25 m	
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de Qtz hospedado em filito carbonoso (FC)

TEXTURA GERAL: Quartzo recristalizado com textura granoblástica

TEXTURAS ESPECIFICAS: Qtz com textura em pente

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	20	100 μ e > 500 μ	Euedrica	Qtz

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	65	60 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	14	250 μ	euedrica	Py, Qtz
Se	<2	<50 μ	subedrica	Qtz, Cb

MINERAIS ACESORIOS: Sph, Ccp e Ms ocorrem em pequenos cristais como inclusões dentro da Py

Descrição

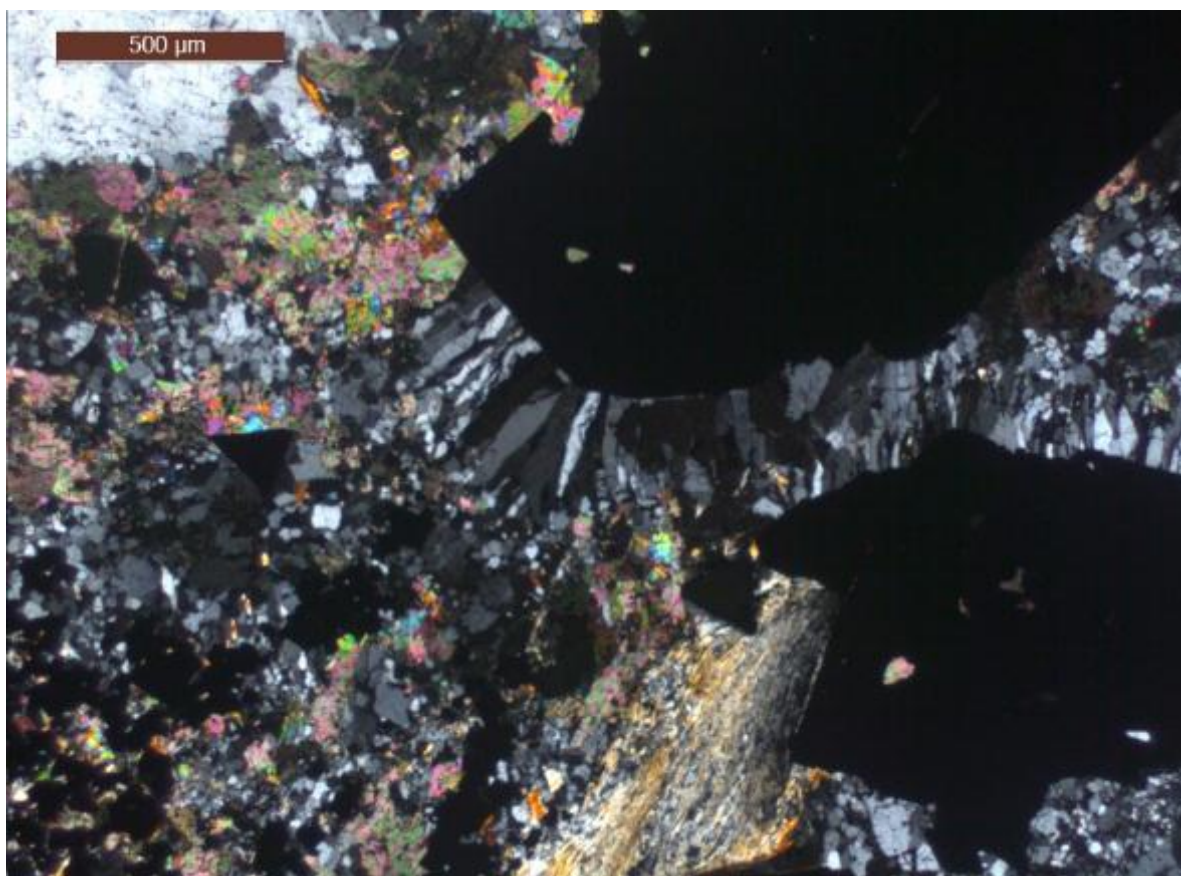
O veio de 15 cm de espessura encontrasse encaixado em filito carbonoso, acompanhando a foliação principal. O quartzo é o mineral mais abundante, acompanhado por uma porcentagem menor de carbonato. A pirita é o mineral opaco mais abundante.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas, em alguns casos os cristais apresentam estiramento mineral e com abundantes fragmentos finos de carbonosa. O quartzo (II) de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais com extinção reta associados às bordas dos cristais do Qtz I e com textura em pente nas bordas da pirita. Fotomicrografia 1 e 3.

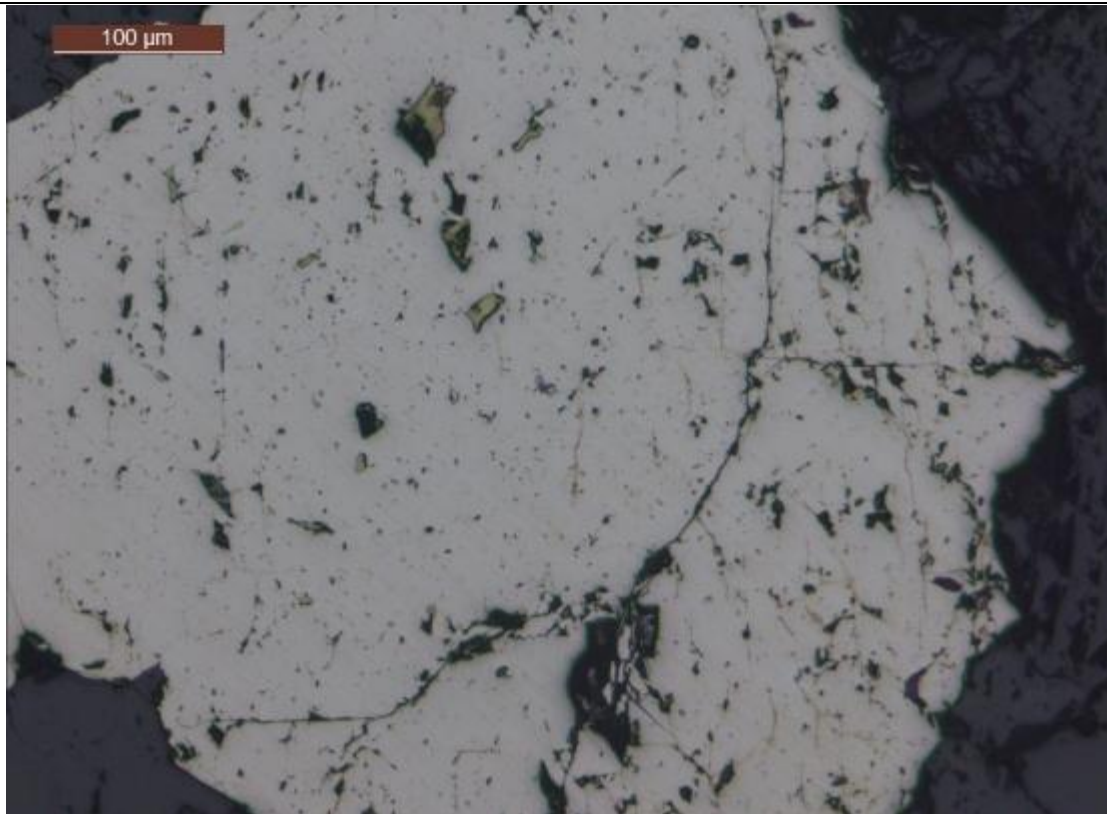
Carbonato (Cb): Ocorre de forma errática dentro do veio formando agregados de cristais euedricos de tamanho variável com um máximo de 250 μ .

Pirita (Py): Duas gerações de Py. A primeira euedrica com inclusões de Ccp e Sp e tamanhos superiores a 500 μ (Fotomicrografia 2). A segunda euedrica a subedrica, de tamanhos inferiores a 80 μ associados a faixas de sericita.

Sericita (Se): é apresentada como finas faixas associados à pirita de grão fino.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD09-4**, 237,25 m- Quartzo com textura em pente associado às bordas da Py grossa. Py fina associada a faixas de sericita. Carbonato em agregados de cristais de tamanho variável. Luz transmitida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD09-4**, 237,25 m- Py grossa porosa com inclusões de Ccp. Luz refletida, aumento de 10x.



Fotomicrografia 3 – Amostra **LCPD09-4**, 237,25 m- Qtz I (granulação grossa) com quartzo II (granulação fina) associado às bordas dos cristais. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA	LCPD09-6		ROCHA HOSPEDEIRA: _____		
No. AMOSTRA	LCPD09-6		FILITO CARBONOSO		
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD009	
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE	248,15 m	
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de Qtz leitoso dentro de veio de quartzo fumê

TEXTURA GERAL: Quartzo recristalizado em fase incipiente e avançado

TEXTURAS ESPECIFICAS: Qtz com textura em pente

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	15	200 μ	Euedrica	Qtz e Cb

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	80	500 μ e > 1000 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	4	300 μ	Euedrica	Py, Qtz
Se	1	<50 μ	Subedrica	Cb

MINERAIS ACESORIOS: Ccp como cristais finos inclusos na Py porosa.

Descrição

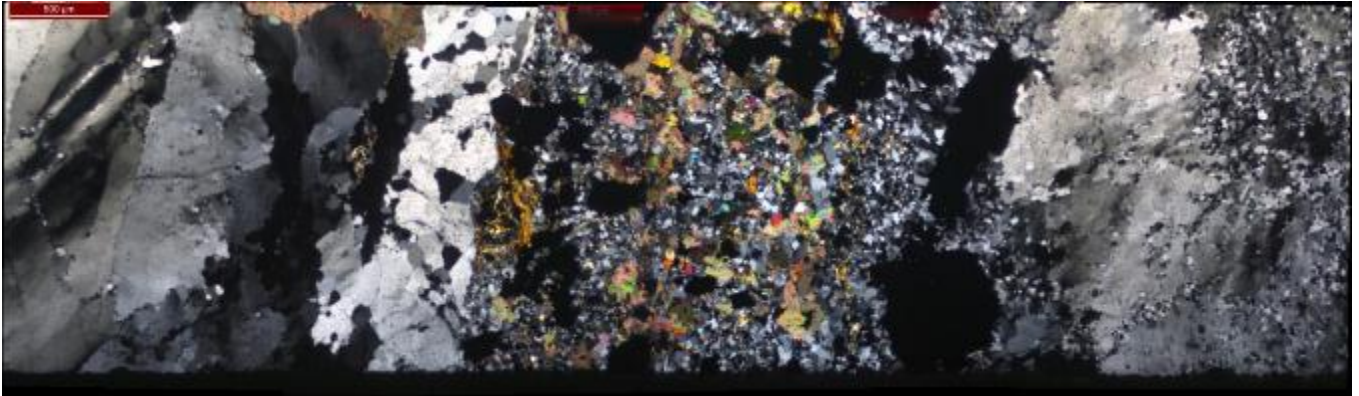
Veio de quartzo leitoso de 3 cm de espessura encontrasse no médio de veio de quartzo fumê

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa ($\sim 300 \mu - >1000 \mu$) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas, em alguns casos os cristais apresentam estiramento mineral. O quartzo (II) apresenta dois estilos, o primeiro está conformado por cristais finos poligonais localizados ao longo das bordas dos cristais do Qtz I e o segundo são cristais de granulação grossa $>1000 \mu$ conformando o veio de quartzo leitoso.

Carbonato (Cb): Ocorre de forma aleatória dentro dos dois tipos de veios com cristais de tamanho 300μ mas predomina no quartzo fumê.

Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos, porosos disseminados dentro do veio de Qtz fumê, de tamanho grosso ($\sim 2000 \mu$).

Sericita (Se): Sericita é apresentada como finas faixas aleatórias dentro do Qtz fumê ou como alteração de faixas reliquiares da rocha hospedeira.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD09-6**, 248,15 m: Quartzo fumê (Qtz I) deformado apresentando recristalização nas bordas passando a quartzo de tamanho fino, poligonal (Qtz II). Observe-se a faixa central, onde predomina Qtz II associado a carbonato e sericita. No extremo esquerdo da imagem, cristais grossos de Qtz II que conformam o veio de quartzo leitoso. Nas bordas dos sulfetos o Qtz II apresenta textura em pente. Luz transmitida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD09-6**, 248,15 m: Qtz I apresentando recristalização seguindo direções preferenciais de deformação. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA	LCPD09-7		ROCHA HOSPEDEIRA: _____		
No. AMOSTRA	LCPD09-7		FILITO CARBONOSO		
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD009	
X:		Y:	Z:	PROFUNDIDADE	262,95 m
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de Qtz fumê cortado por veio de Qtz leitoso

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblástica recristalizado a quartzo leitoso

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
-	-	-	-	-

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	90	< 300 μ e > 500 μ	Subédrica	Cb
Cb	10	600 μ	eudrica	Qtz

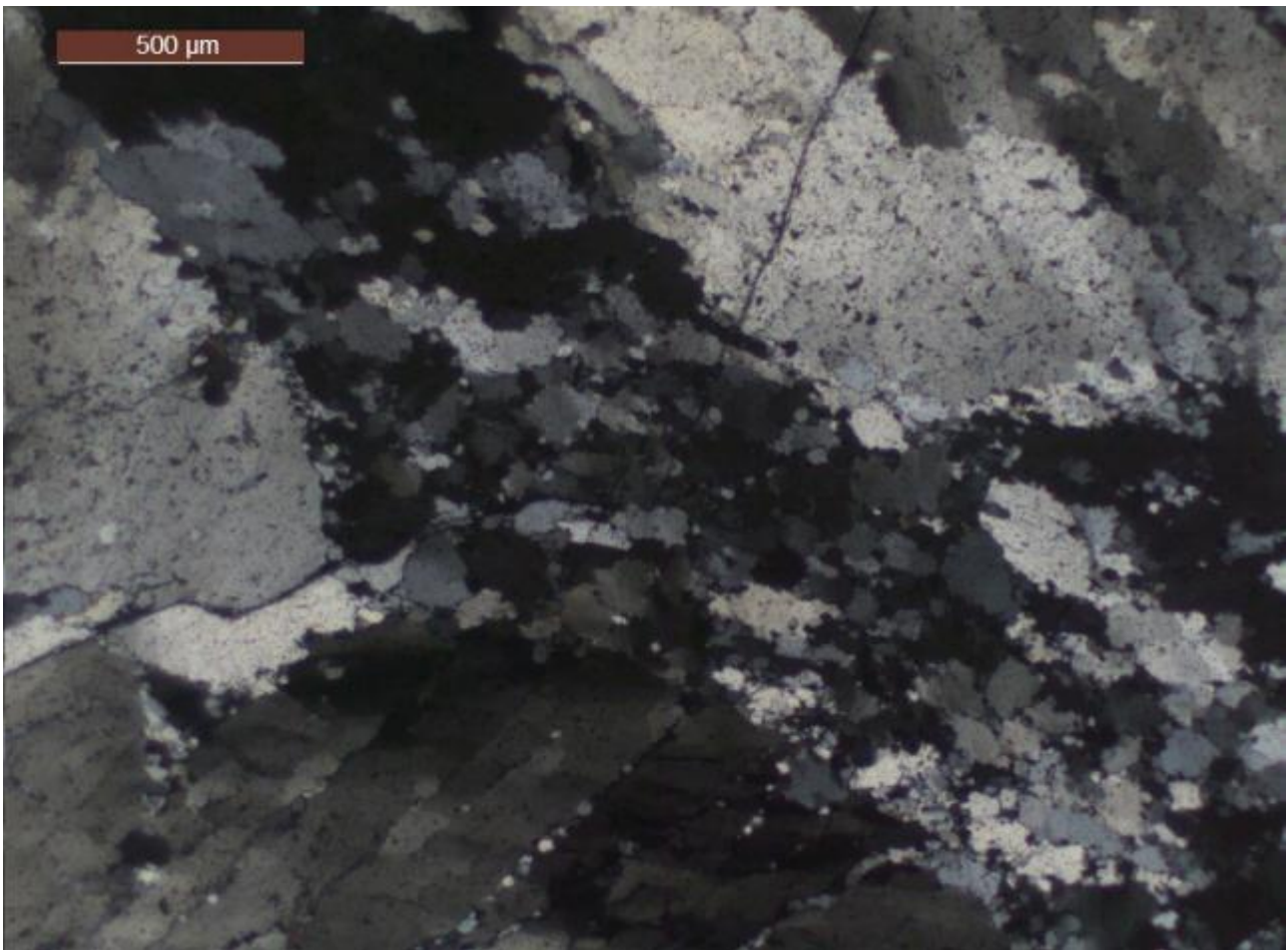
MINERAIS ACESORIOS: --

Descrição

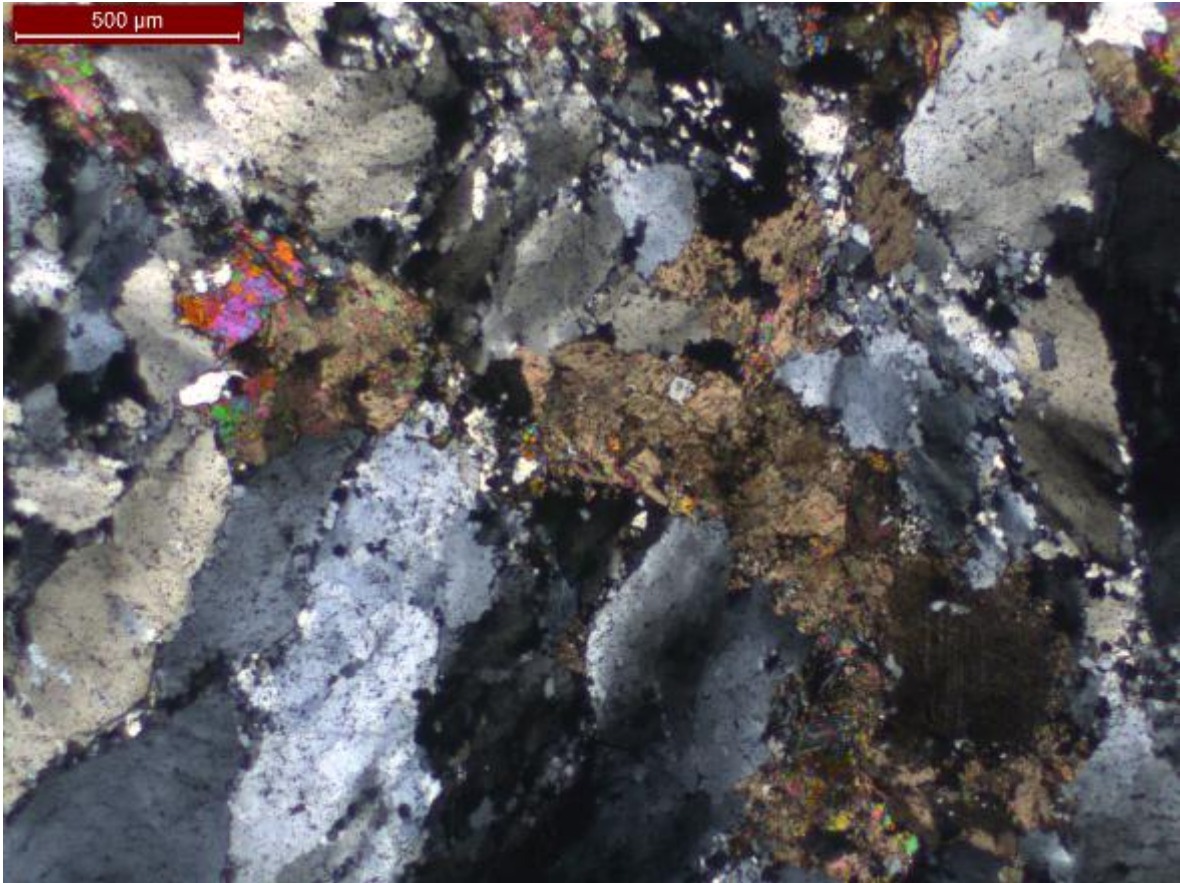
Veio de 15 cm de espessura de quartzo fumê, atravessado por um veio de quartzo leitoso de 2 cm de espessura.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas, em alguns casos os cristais apresentam estiramento mineral. O quartzo (II) é apresentado em dois estilos: um de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais com extinção reta muitas vezes alinhados numa direção preferencial de deformação associados às bordas do Qtz I, e o segundo são cristais de granulação grossa >1000 μ conformando o veio de quartzo leitoso.

Carbonato (Cb): Ocorre de forma aleatória dentro dos dois tipos de veios com cristais de tamanho 600 μ .

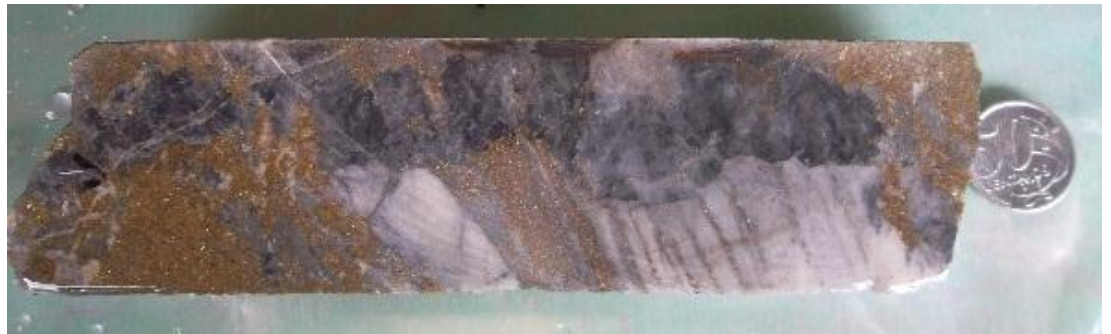


Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD09-7**, 262,95 m – Qtz I de textura granoblastica pertencente ao veio de quartzo fumê cortado por cristais poligonais de Qtz II do veio de quartzo leitoso. Luz transmitida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD09-7**, 262,95 m – Cristais de carbonato associado a cristais de Qtz I com bordas lobadas e recristalizado a Qtz II. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA	LCPD09-8			ROCHA HOSPEDEIRA:	
No. AMOSTRA	LCPD09-8			FORMAÇÃO FERRIFERA BANDADA - FFB	
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD009	
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE	269,09 m	
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de Qtz fumê cortando o bandamento da formação ferrífera bandada - FFB

TEXTURA GERAL: Quartzo com textura granoblástica apresentando recristalização.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	20	100 μ	Euedrica	Qtz, Apy
Apy	--	80 μ	Euedrica	Py
Au	--	< 10 μ	Euedrica	Apy

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	70	60 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	5	300 μ	Euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMAÑO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Cb	5	< 50 μ	Subedrica	Py

MINERAIS ACESORIOS: ---

Descrição

O veio de 4 cm de espessura encontrasse encaixado em formação ferrífera bandada – FFB, cortando o bandamento. A rocha apresenta intensa sulfetação.

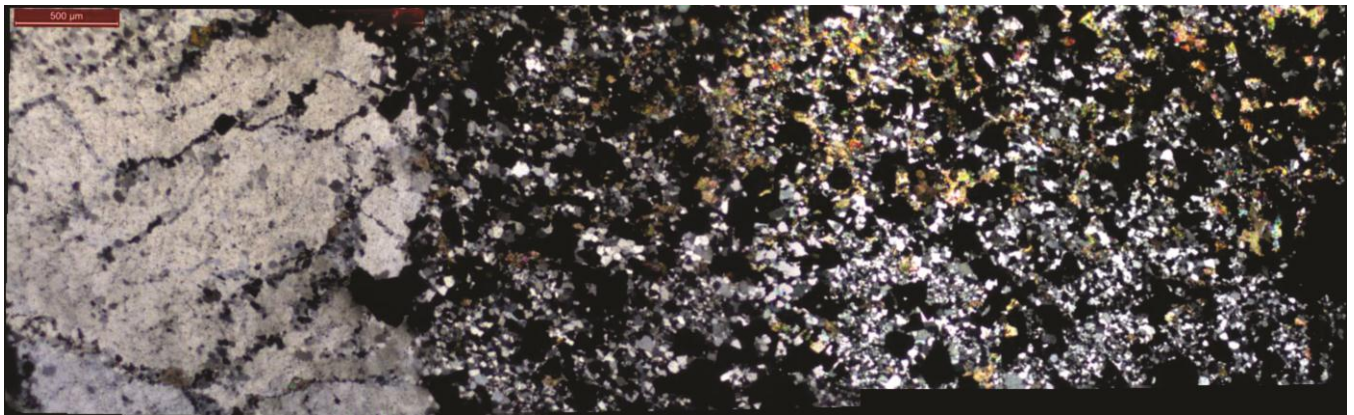
Quartzo (Qtz): O veio esta composto de quartzo com textura granoblastica, com bordas lobadas e deformado (Qtz I) recristalizado nas bordas a cristais poligonais de granulação fina (Qtz II). A rocha hospedeira apresenta quartzo original da formação ferrífera bandada.

Carbonato (Cb): Ocorre em dois tipos: (I) carbonato dentro do veio associado ao Qtz I, de granulação fina (~ 300 μ) localizado de forma errática dentro do veio. O carbonato II ocorre como alteração hidrotermal da rocha hospedeira, conformando bandas na formação ferrífera com tamanho de grão < 50 μ , associados a Py.

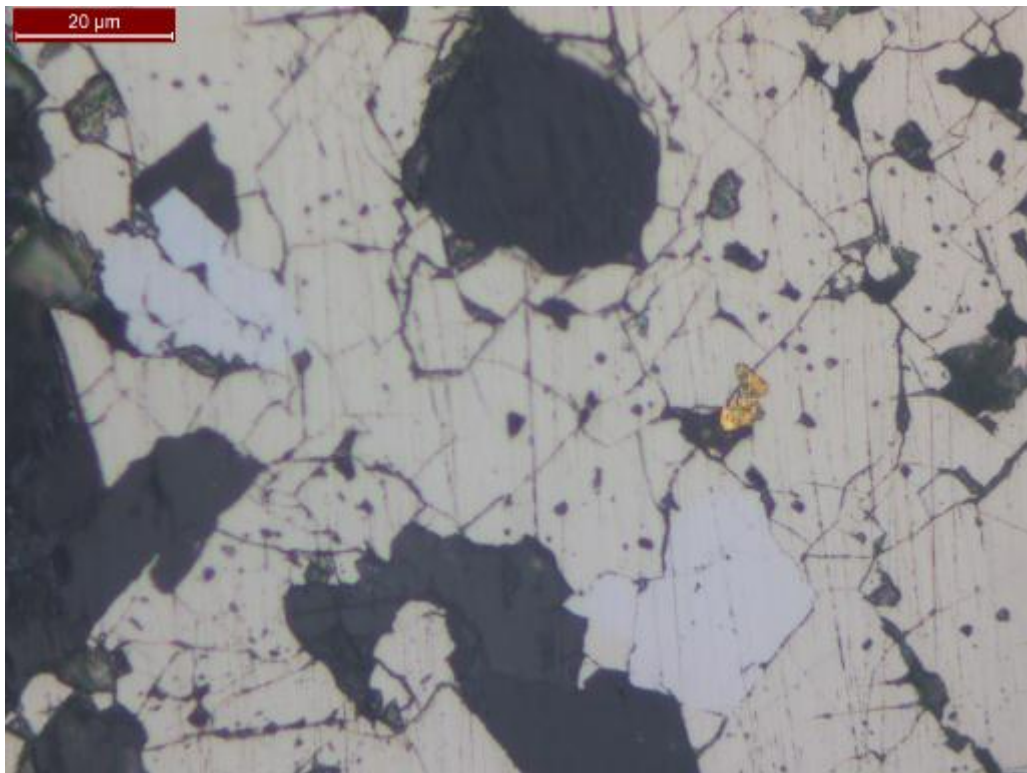
Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos disseminados dentro do veio, de tamanho fino (~ 100 μ) mas principalmente como alteração dentro da formação ferrífera bandada. A pirita é arsenical, associada a arsenopirita, com inclusões de partículas finas de ouro.

Arsenopirita (Apy): cristais finos euedricos associados à pirita arsenical, com tamanho inferior a 80 μ .

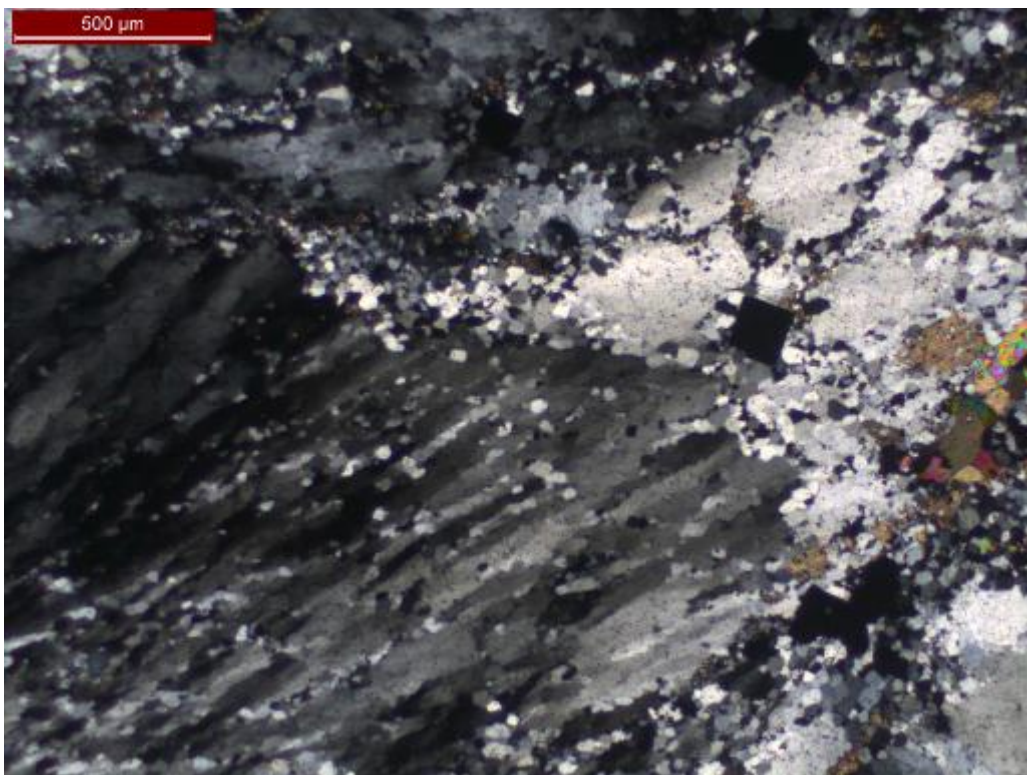
Ouro (Au): partículas muito finas inclusas na pirita arsenical ou nas bordas dos cristais da mesma.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD09-8**, 269,09 m – Contato do veio com a formação ferrífera bandada. Observe-se o Qtz I, com textura granoblástica parcialmente recristalizado. Na formação ferrífera, pirita e carbonato são os minerais mais comuns junto ao quartzo original da rocha hospedeira. Luz transmitida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD09-8**, 269,09 m – Detalhe da pirita arsenical, associada a arsenopirita e uma partícula de ouro. Luz refletida, aumento de 50x.



Fotomicrografia 3 – Amostra **LCPD09-8**, 269,09 m – Qtz I do veio parcialmente recristalizado nas bordas a Qtz II. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-1		ROCHA HOSPEDEIRA: _____	
No. AMOSTRA		LCPD011-1		FILITO CARBONOSO	
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	253,66 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veios finos de quartzo e carbonato encaixado em filito carbonoso

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblastica

TEXTURAS ESPECIFICAS: Quartzo com textura em pente

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	10	100 - 2000 μ	Subedrica	Qtz, Cb
Ccp	--	< 300 μ	Anedrica	Py
Sp	--	< 100 μ	Anedrica	Py

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	70	60 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	20	250 μ	euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMAÑO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Cb	--	<50 μ	Euedrica	Se
Se/ Ms	--	<50 μ	Subedrica	Cb

MINERAIS ACESORIOS: --

Descrição

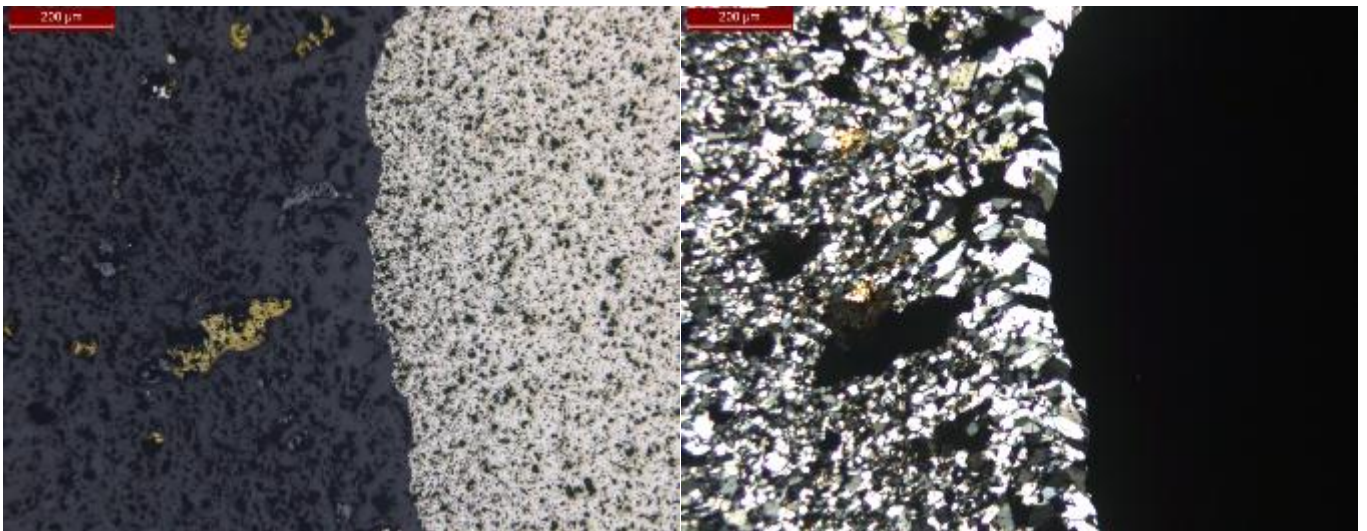
Veios finos de 4 mm de espessura compostos de quartzo e carbonato que acompanham a foliação do filito carbonoso.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação média a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais, localmente com textura em pente localizado nas bordas da pirita grossa.

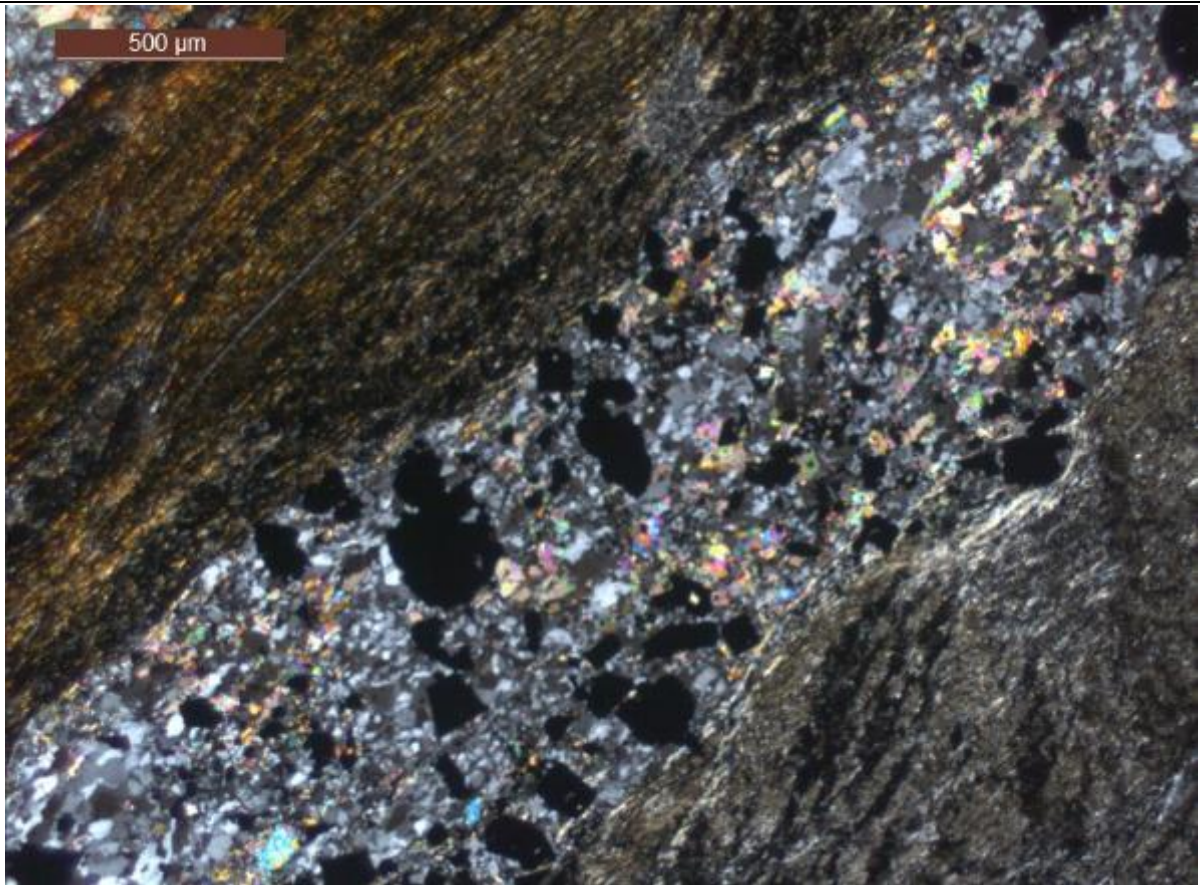
Carbonato (Cb): Ocorre em dois tipos: (I) carbonato dentro do veio associado ao Qtz I, com tamanho de 250 μ localizado de forma errática dentro do veio. O carbonato II ocorre como alteração hidrotermal da rocha hospedeira, sendo restrito ao contato próximo entre o veio e o filito carbonoso com tamanho de grão < 50 μ , associado a sericita/muscovita.

Pirita (Py): encontrasse em duas gerações. A primeira como cristais subédricos, porosos, disseminados dentro do veio, de tamanho até 2000 μ , com alguns cristais rotacionados e associado a calcopirita e esfalerita. O segundo tipo são cristais finos de tamanho menor a 100 μ que se encontram espalhados na rocha hospedeira.

Sericita (Se) / Muscovita (Ms): Se/Ms é apresentada como finas faixas localizadas no contato veio-rocha hospedeira associados a carbonato.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-1**, 253,66 m – À esquerda, Py porosa associada a cristais de Ccp e Sph; à direita textura em pente de Qtz II associado às bordas da pirita. Luz refletida e transmitida, aumento de 5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD011-1**, 253,66 m – Veio acompanhando a foliação do filito carbonoso. Os cristais de pirita e carbonato se encontram disseminados dentro do veio. O quartzo se encontra em estado avançado de recristalização. A rocha hospedeira contem Se/Ms e Cb como minerais de alteração. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-2		ROCHA HOSPEDEIRA: _____ FILITO CARBONOSO	
No. AMOSTRA		LCPD011-2			
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	258,70 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de quartzo fumê atravessado por diferentes veios de quartzo leitoso.

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblastica com recristalização.

TEXTURAS ESPECIFICAS: Carbonato com textura esqueletal.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
--	--	--	--	--

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	95	<100 μ e >600 μ	Subedrica	-
Cb	5	300 μ	euedrica	Qtz

MINERAIS ACESORIOS: Se/Ms

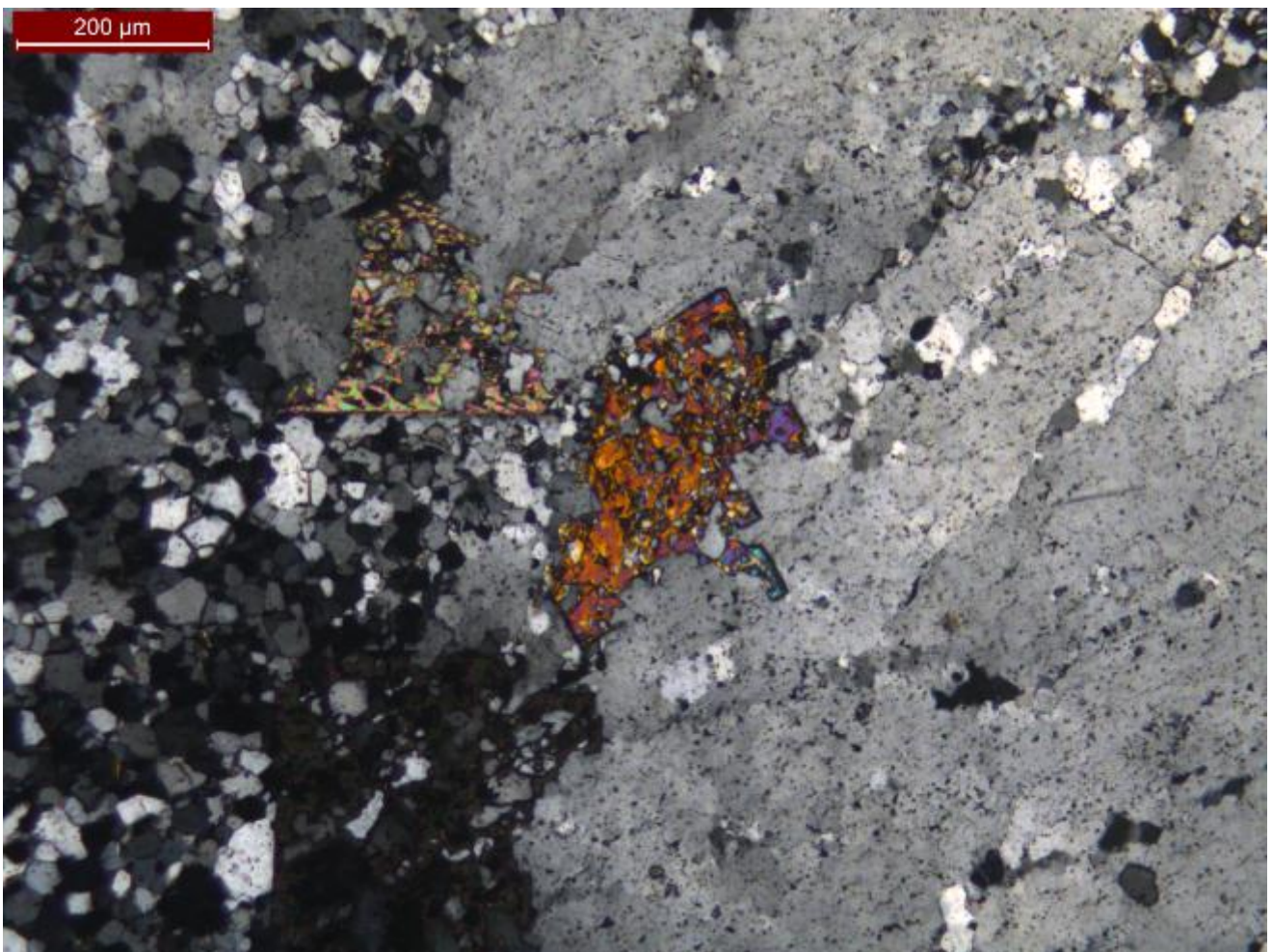
Descrição

Veio de 15 cm de espessura atravessado por diferentes veios de 2 cm de espessura de quartzo leitoso.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa ($>600 \mu$) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) é apresentado em dois estilos: um de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho $< 300 \mu$, sendo estes poligonais com extinção reta muitas vezes alinhados numa direção preferencial de deformação associados às bordas do Qtz I, e o segundo são cristais de granulação grossa $>1000 \mu$ conformando o veio de quartzo leitoso.

Carbonato (Cb): Ocorre como cristais de tamanho de 300μ . No Qtz II, o Cb tem textura esquelética.

Sericita (Se) / Muscovita (Ms): Se/Ms é apresentada como faixas muito finas dentro do veio de quartzo fumê.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-2**, 258,70 m – Qtz I granoblástico, com recristalização a quartzo poligonal (Qtz II). No centro, Cb com textura esquelética produto da recristalização do quartzo. Luz transmitida, aumento de 5x.

No. DE LÂMINA	LCPD011-3		ROCHA HOSPEDEIRA:		
No. AMOSTRA	LCPD011-3A		FORMAÇÃO FERRIFERA BANDADA - FFB		
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011	
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE	263,75 m	
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de Qtz fumê acompanhando e cortando o bandamento da formação ferrifera bandada - FFB

TEXTURA GERAL: Quartzo com textura granoblástica apresentando recristalização.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	10	<100 μ e > 500 μ	Euedrica	Qtz, Apy
Apy	5	80 μ	Euedrica	Py
Au	--	< 10 μ	Euedrica	Apy

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	70	60 μ e 500 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	15	300 μ	euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Cb	--	80 μ	Subedrica	Py

MINERAIS ACESORIOS: ---

Descrição

O veio de 2 cm de espessura encontrasse encaixado em formação ferrífera bandada – FFB, acompanhando e cortando o bandamento. A rocha apresenta intensa sulfetação.

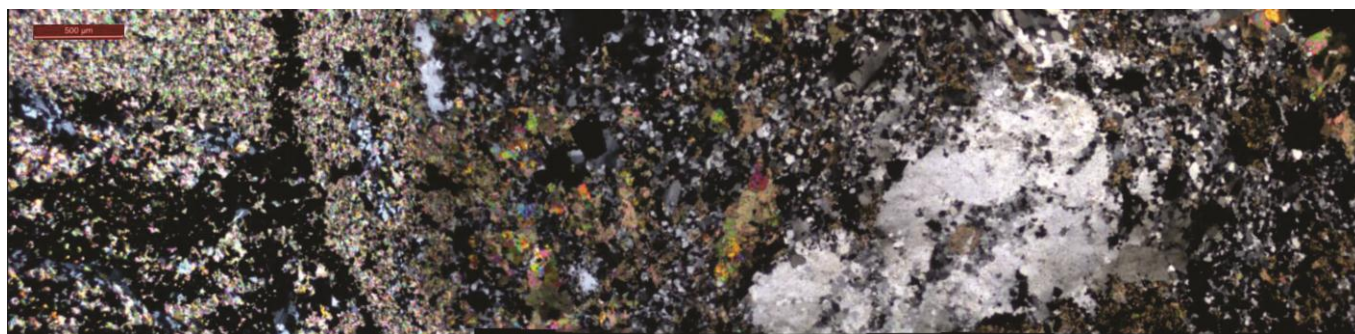
Quartzo (Qtz): O veio esta composto de quartzo com textura granoblastica, com bordas lobadas e deformado (Qtz I) recristalizado nas bordas a cristais poligonais de granulação fina (Qtz II). A rocha hospedeira apresenta quartzo original da formação ferrífera bandada.

Carbonato (Cb): Ocorre em dois tipos: (I) carbonato dentro do veio associado ao Qtz I, de granulação fina (~ 300 μ) localizado de forma errática dentro do veio. O carbonato II ocorre como alteração hidrotermal da rocha hospedeira, conformando bandas na formação ferrífera com tamanho de grão de 80 μ , associados a Py. Além disso, tem um tipo de carbonato original da FFB com tamanho menor a 50 μ .

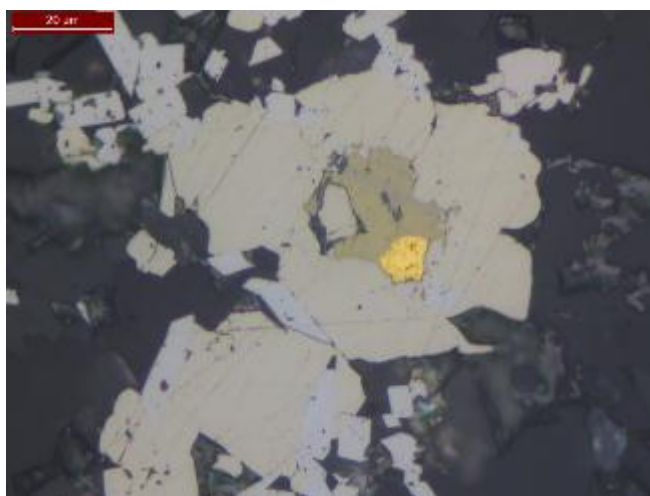
Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos disseminados dentro do veio, de tamanho médio a grosso (~ 500 μ) e como cristais finos menores a 100 μ dentro da formação ferrífera bandada. A pirita é arsenical, associada a arsenopirita, com inclusões de partículas finas de ouro.

Arsenopirita (Apy): cristais finos euedricos associados à pirita arsenical, com tamanho inferior a 80 μ conformando bandas finas na formação ferrífera.

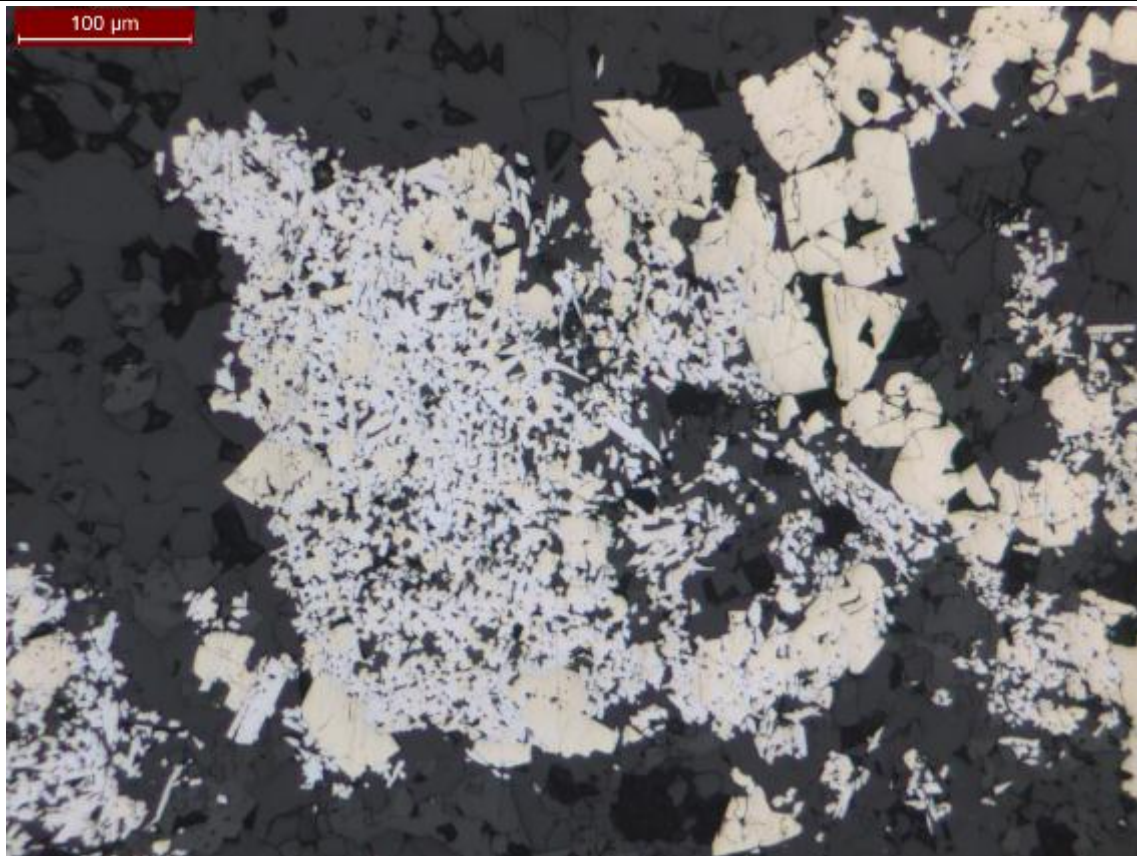
Ouro (Au): partículas muito finas inclusas na pirita arsenical ou nas bordas dos cristais da mesma.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-3A**, 263,75 m – Contato do veio com a formação ferrífera bandada. À esquerda, bandas de carbonato e pirita da formação ferrífera, contrastam com o veio de quartzo fumê recristalizado à direita. Luz transmitida, aumento de 2.5x.

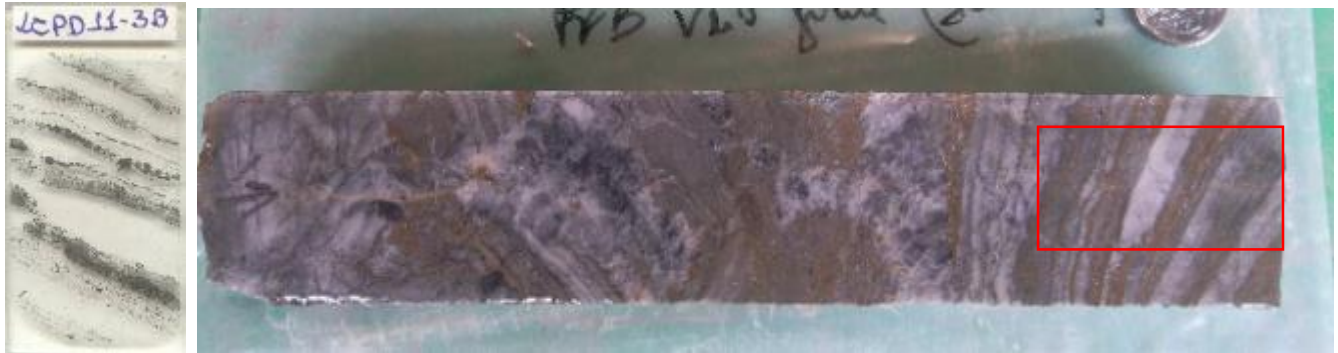


Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD011-3A**, 263,75 m – Detalhe de uma partícula de ouro em Py arsenical, associada a cristais de Apy. Luz refletida, aumento de 50x.



Fotomicrografia 3 – Amostra **LCPD011-3A**, 263,75 m – Sobre crescimento de cristais de Apy em Py arsenical. Luz refletida, aumento de 10x.

No. DE LÂMINA	LCPD011-3		ROCHA HOSPEDEIRA:		
No. AMOSTRA	LCPD011-3B		FORMAÇÃO FERRIFERA BANDADA - FFB		
TIPO DE AMOSTRA	Rocha- Furo				
LOCAÇÃO	Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011	
X:	Y:	Z:	PROFUNDIDADE	263,75 m	
COLETADA POR:	MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU:	Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Formação ferrífera bandada – FFB sulfetada

TEXTURA GERAL: Bandamento com minerais de alteração hidrotermal.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	25	<100 μ	Euedrica	Apy
Apy	10	80 μ	Euedrica	Py
Au	--	< 10 μ	Euedrica	Apy

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	50	60 μ	Euedrica	--
Cb	15	80 μ	euedrica	Py

MINERAIS ACESORIOS: Po

Descrição

Formação ferrífera bandada sulfetada, com partículas de ouro e abundante arsenopirita.

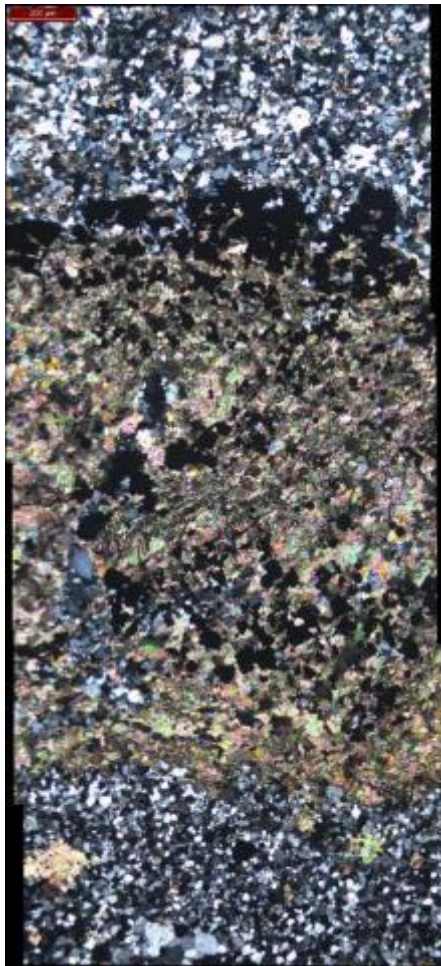
Quartzo (Qtz): O quartzo é apresentado como cristais de 60 μ , poligonais que são mineral original da formação ferrífera bandada.

Carbonato (Cb): Ocorre como cristais de 50 μ formando bandas associadas com as zonas sulfetadas.

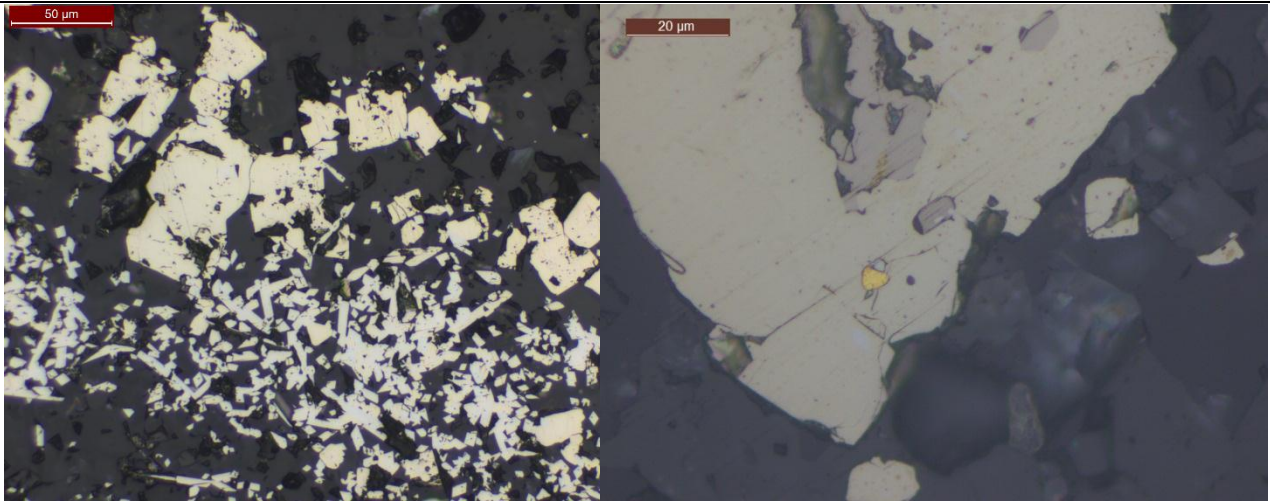
Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos de tamanho fino menor a 100 μ que constituem bandas na formação ferrífera. A pirita é arsenical, associada a arsenopirita, com inclusões de partículas finas de ouro.

Arsenopirita (Apy): cristais finos euedricos associados à pirita arsenical, com tamanho inferior a 80 μ conformando bandas muito finas.

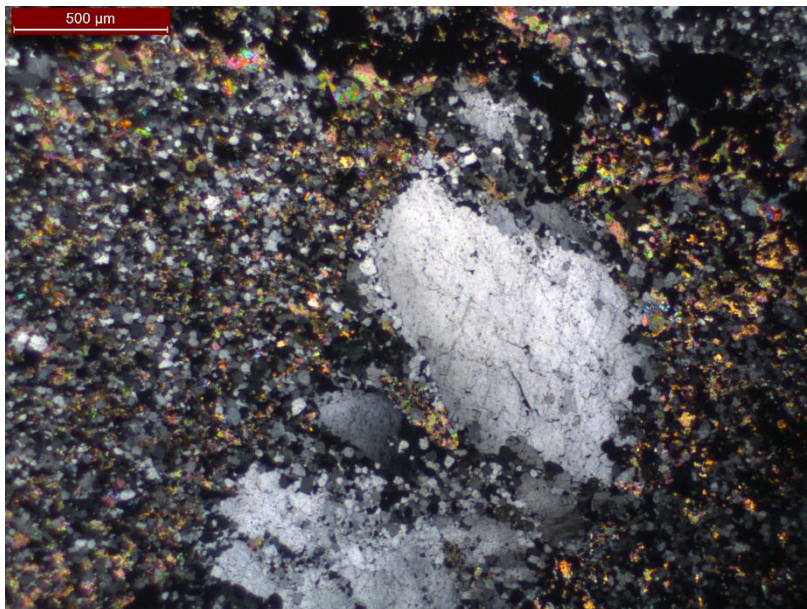
Ouro (Au): partículas muito finas inclusas na pirita arsenical ou nas bordas dos cristais da mesma.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-3B**, 263,75 m – À esquerda, bandas de quartzo e carbonato com abundante sulfetacao; à direita pirita arsenical e arsenipirita . Luz refletida e transmitida, aumento de 5x.

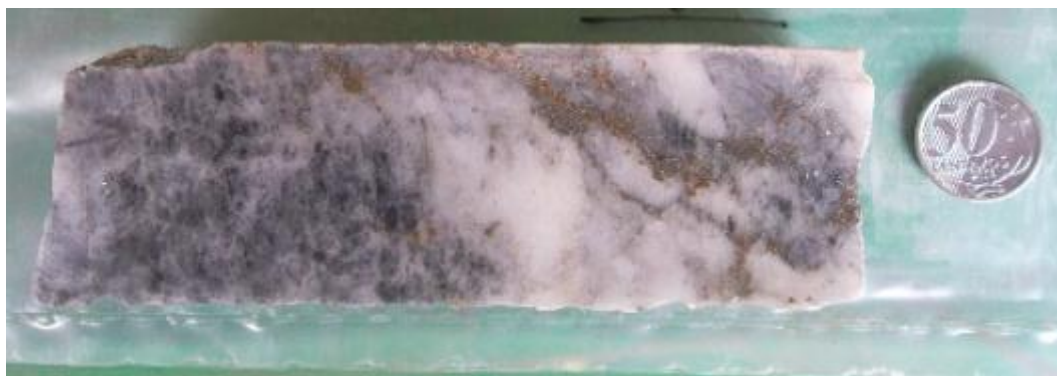


Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD011-3B**, 263,75 m – À esquerda, bandas de pirita arsenical e arsenopirita. Luz refletida, aumento de 20x.; à direita partícula de ouro inclusa na pirita arsenical associada a arsenopirita. Luz refletida, aumento de 50x



Fotomicrografia 3 – Amostra **LCPD011-3B**, 263,75 m – veio de 1000 µ de espessura cortando a formação ferrífera bandada. Luz refletida e transmitida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-4		ROCHA HOSPEDEIRA:	
No. AMOSTRA		LCPD011-4		FORMAÇÃO FERRIFERA BANDADA - FFB	
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	273,12 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de quartzo fumê recristalizado a quartzo leitoso

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblástica com recristalização.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	10	600 μ	Euedrica	Apy
Apy	5	600 μ	Euedrica	Py

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	70	<300 μ e >1000 μ	Euedrica	Cb
Cb	15	80 μ	Euedrica	Qtz

MINERAIS ACESORIOS: Ccp, Po

Descrição

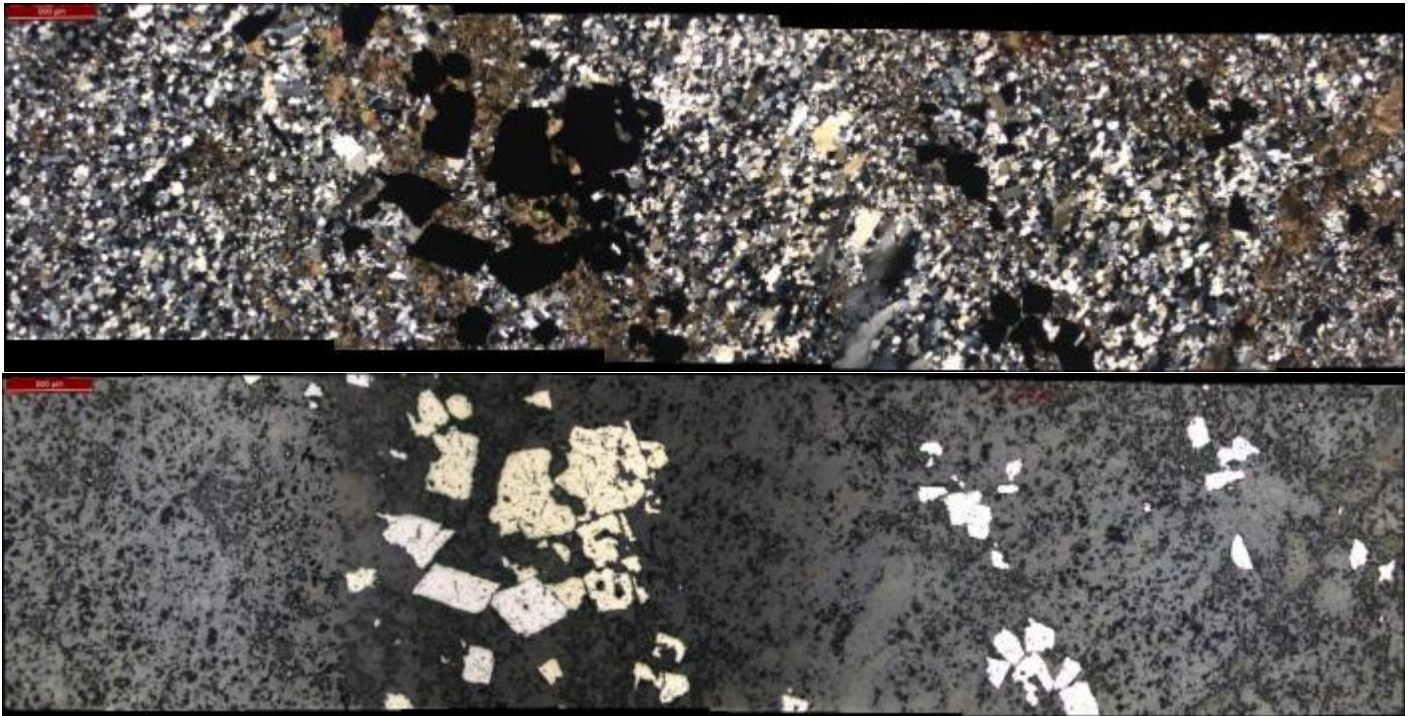
Veio de quartzo fumê apresentando intensa recristalização atravessado por uma faixa de Py arsenical-Apy.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação média a grossa ($\sim 300 \mu$ - $>1000 \mu$) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) é apresentado em dois estilos: um de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho $< 300 \mu$, sendo estes poligonais com extinção reta muitas vezes alinhados numa direção preferencial de deformação associados às bordas do Qtz I, e o segundo são cristais de granulação grossa $>1000 \mu$ conformando os veios de quartzo leitoso.

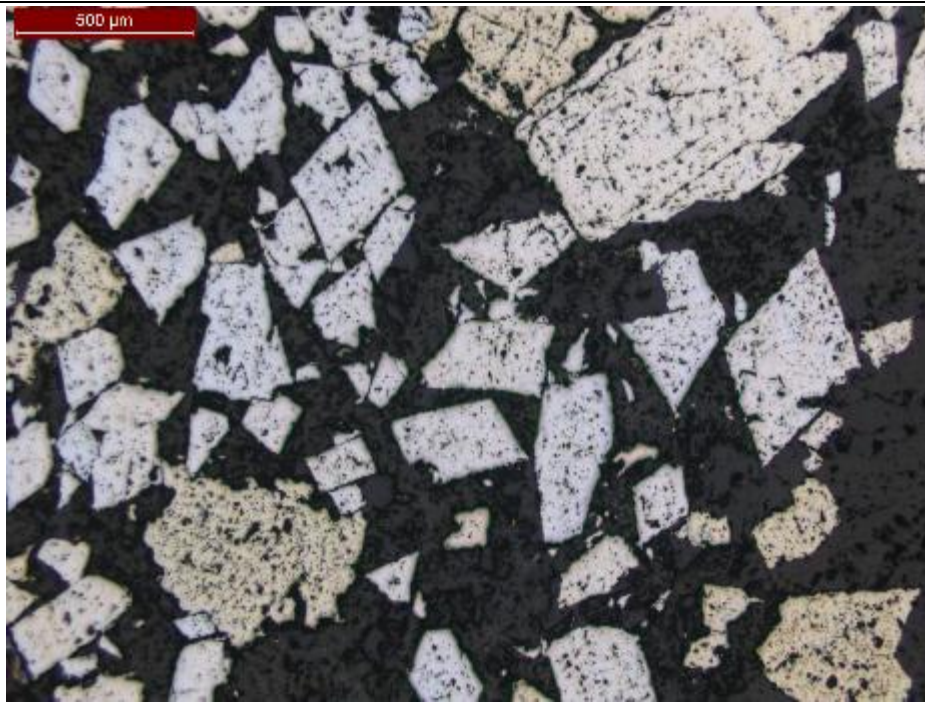
Carbonato (Cb): Ocorre como cristais de 80μ associados principalmente com a faixa de sulfetos, e também espalhados dentro do veio.

Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos de tamanho médio de 600μ que conformam uma faixa no meio do veio em associação com cristais de arsenopirita. A pirita é arsenical.

Arsenopirita (Apy): cristais euedricos de tamanho médio a grosso de 600μ , associados à pirita arsenical.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-4**, 273,12 m – Veio de quartzo fumê recristalizado com uma faixa central de Py-Apy. Luz transmitida e refletida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD011-4**, 273,12 m – Associação de cristais de pirita arsenical e arsenopirita. Alguns cristais de Py podem conter inclusões de Po. Luz refletida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-5		ROCHA HOSPEDEIRA: _____ METABASALTO	
No. AMOSTRA		LCPD011-5			
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	283,32 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de quartzo leitoso, encaixado em metabasalto cloritizado

TEXTURA GERAL: Quartzo com textura granoblastica

TEXTURAS ESPECIFICAS: Qtz em pente

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	10	>500 μ	Euedrica	Qtz, Cb
Apy	5	>500 μ	Euedrica	Py
Au	--	<20 μ	Euedrica	Apy

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	60	<300 μ >500 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	25	>500 μ	Euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Se/ Ms	--	<50 μ	Subedrica	Chl
Chl	--	<50 μ	Subedrica	Se/ Ms

MINERAIS ACESORIOS: Ccp

Descrição

Veio de quartzo leitoso de 3 cm de espessura encaixado em metabasalto cloritizado com finas faixas de Py e Apy.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação média a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais, localmente com textura em pente localizado nas bordas da pirita.

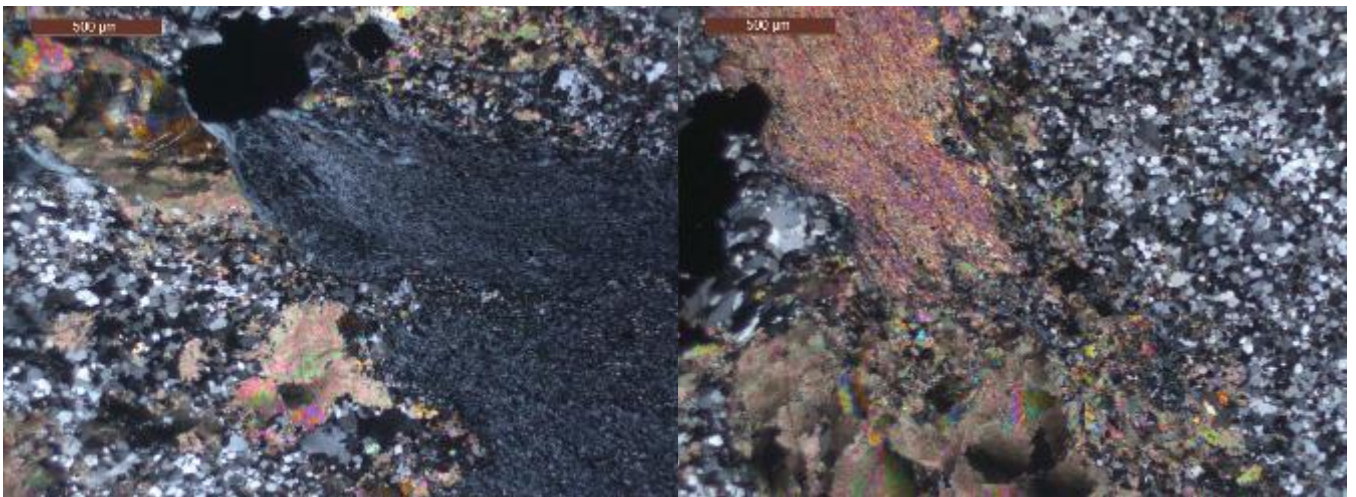
Carbonato (Cb): Ocorre como cristais grossos dentro do veio e como finas faixas no contato com a rocha hospedeira.

Pirita (Py): encontrasse como cristais euedricos dispersos dentro do veio de quartzo. Esta pirita arsenical está associada a arsenopirita e apresenta localmente inclusões de pirrotita.

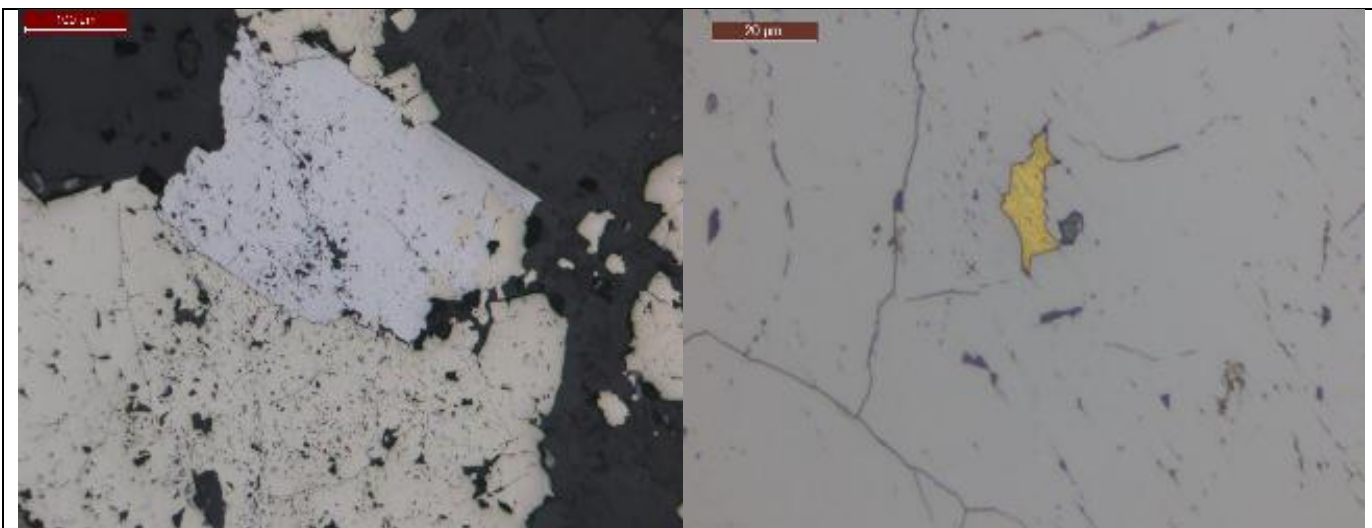
Arsenopirita: Cristais euedricos sobrecrecendo a pirita arsenical. Contem inclusões de ouro.

Ouro (Au): partículas muito finas dentro da arsenopirita.

Sericita (Se) / Muscovita (Ms) e clorita (Chl): Se/Ms é apresentada como finas faixas localizadas no contato veio-rocha hospedeira associados a carbonato. Chl ocorre como mineral de alteração hidrotermal do metabasalto.

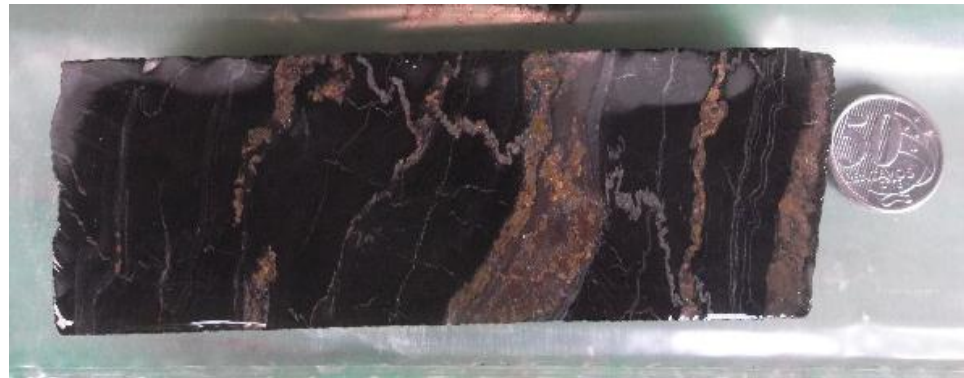


Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-5**, 283,32 m – À esquerda, contato de veio com a rocha hospedeira cloritizada. À direita, faixa de Se/Ms dentro do veio associada a carbonato. Luz transmitida, aumento de 2.5x.



Fotomicrografia 2 – Amostra **LCPD011-5**, 283,32 m – À esquerda, detalhe do sobrecrecimento de Apy em Py arsenical, luz refletida, aumento de 10x. À direita, partícula de ouro inclusa em arsenopirita. Luz refletida, aumento de 50x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-6		ROCHA HOSPEDEIRA:	
No. AMOSTRA		LCPD011-6		FILITO CARBONOSO	
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	304,92 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veios finos de quartzo e carbonato encaixado em filito carbonoso

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblastica

TEXTURAS ESPECIFICAS: Quartzo com textura em pente

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Py	30	100 - 1000 μ	Subedrica	Qtz, Cb

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	60	60 μ	Subedrica	Py, Cb
Cb	10	250 μ	Euedrica	Py, Qtz

MINERAIS DE ALTERAÇÃO

MINERAL	%	TAMAÑO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Cb	--	<50 μ	Euedrica	Se
Se/ Ms	--	<50 μ	Subedrica	Cb

MINERAIS ACESORIOS: Ccp, Sph

Descrição

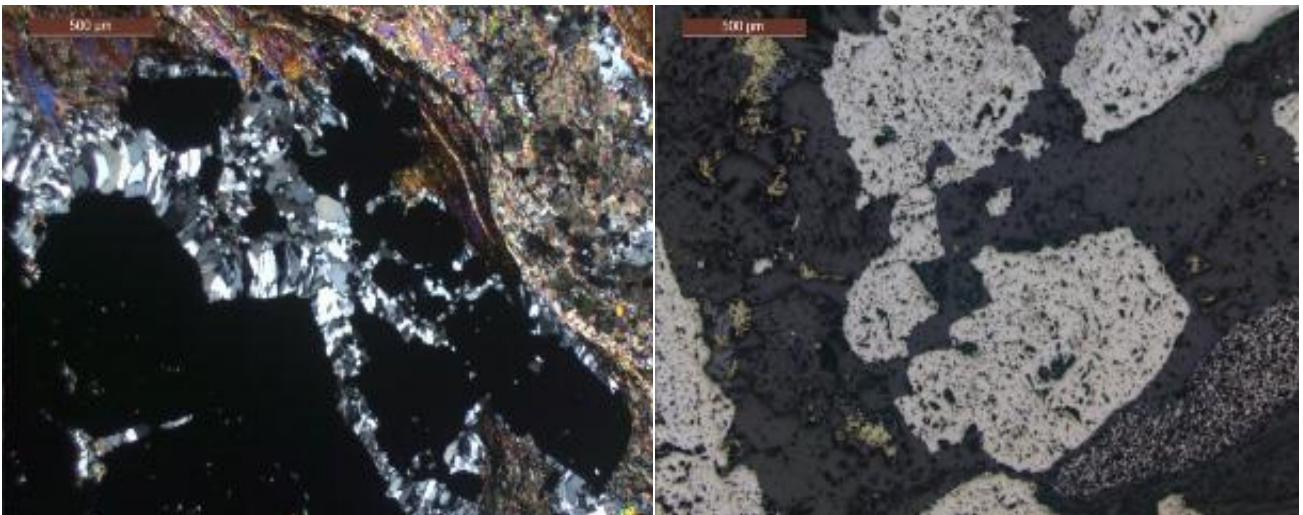
Veio finos de 1 cm de espessura composto de quartzo e carbonato que acompanham a foliação do filito carbonoso.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa (~300 μ - >1000 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) de granulação mais fina ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais, localmente com textura em pente localizado nas bordas da pirita grossa.

Carbonato (Cb): Ocorre em dois tipos: (I) carbonato dentro do veio associado ao Qtz I, com tamanho de 250 μ localizado de forma errática dentro do veio. O carbonato II ocorre como alteração hidrotermal da rocha hospedeira, sendo restrito ao contato próximo entre o veio e o filito carbonoso com tamanho de grão < 50 μ , associado a sericita/muscovita.

Pirita (Py): encontrasse em duas gerações. A primeira como cristais subedricos, porosos, disseminados dentro do veio, de tamanho até 1000 μ e associado a calcopirita e esfalerita. O segundo tipo são cristais finos de tamanho menor a 100 μ que se encontram espalhados na rocha hospedeira.

Sericita (Se) / Muscovita (Ms): Se/Ms é apresentada como finas faixas localizadas no contato veio-rocha hospedeira associados a carbonato.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-6**, 304,92 m – À esquerda, textura em pente de Qtz II associado às bordas da pirita. À direita, Py porosa associada a cristais de Ccp e Sph, e pirita fina associado a faixas reliquiares da rocha hospedeira. Luz transmitida e refletida, aumento de 2.5x.

No. DE LÂMINA		LCPD011-7		ROCHA HOSPEDEIRA: _____ FILITO CARBONOSO	
No. AMOSTRA		LCPD011-7			
TIPO DE AMOSTRA		Rocha- Furo			
LOCAÇÃO		Corpo Cabeça de Pedra		FURO	LCPD011
X:		Y:		Z:	
				PROFUNDIDADE	316,10 m
COLETADA POR:		MILTON MORALES	ANALISOU:	MILTON MORALES	SUPERVISOU: Dra. ROSALINE SILVA



I. DESCRIÇÃO GERAL

TIPO DE MATERIAL: Veio de quartzo fumê.

TEXTURA GERAL: Quartzo fumê com textura granoblastica com recristalização.

II. MINERAIS

MINERALIZAÇÃO (MINERIO)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
--	--	--	--	--

MINERALIZAÇÃO (GANGA)

MINERAL	%	TAMANHO DOS CRISTAIS	FORMA	MINERAIS ASSOCIADOS
Qtz	95	<100 μ e >600 μ	Subedrica	-
Cb	5	300 μ	euedrica	Qtz

MINERAIS ACESORIOS: Se/Ms

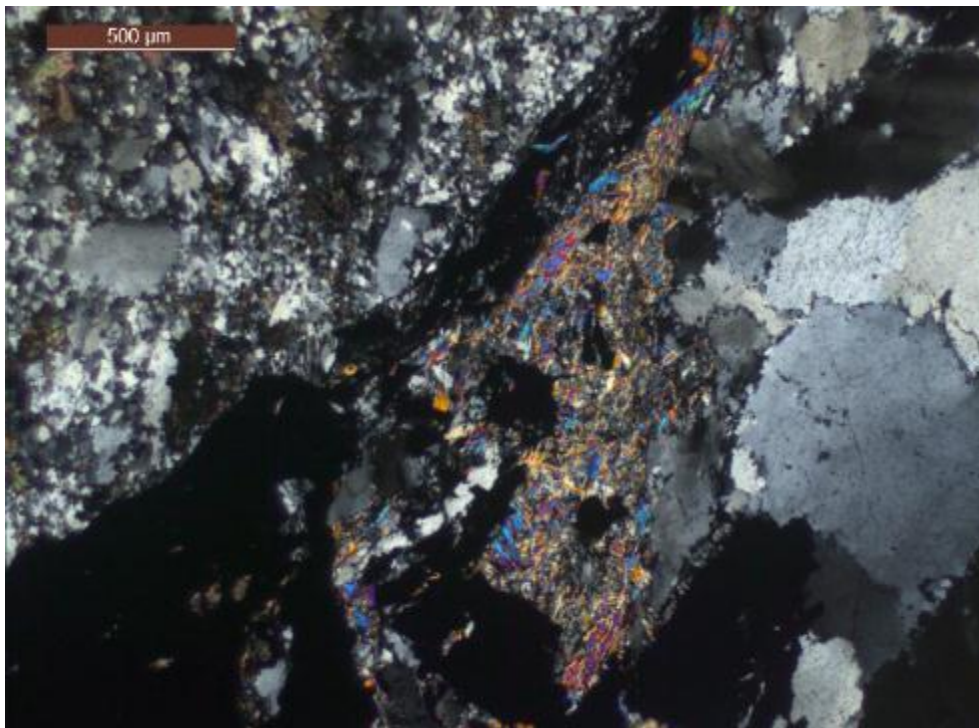
Descrição

Veio de 30 cm de quartzo fumê.

Quartzo (Qtz): é apresentado em dois tipos (I) cristais de granulação media a grossa (>600 μ) com extinção ondulante e bordas irregulares e lobadas. O quartzo (II) ocorre em cristais de tamanho < 300 μ , sendo estes poligonais com extinção reta muitas vezes alinhados numa direção preferencial de deformação associados às bordas do Qtz I

Carbonato (Cb): Ocorre como cristais de tamanho de 300 μ , dentro do veio ou associados a faixas reliquiares da rocha hospedeira.

Sericita (Se) / Muscovita (Ms): Se/Ms é apresentada como faixas muito finas dentro do veio de quartzo fumê ou associados a faixas reliquiares da rocha hospedeira.



Fotomicrografia 1 – Amostra **LCPD011-7**, 316,10 m – Qtz I granoblástico, com recristalização a quartzo poligonal (Qtz II). No centro, faixa reliquiares da rocha hospedeira associada a Se/Ms. Luz transmitida, aumento de 2.5x.