



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



## VINÍCIUS NOGUEIRA DUARTE

**Geoquímica das FFB, *chert* ferruginosos e rochas vulcânicas do depósito aurífero Arqueano de Lamego: modelo deposicional e implicações para metalogênese e contexto geotectônico do *greenstone belt* Rio das Velhas**

AUTOR: Vinícius Nogueira Duarte

ORIENTAÇÃO: Profa. Dra. Lydia Maria Lobato

COORIENTAÇÃO: Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

Prof. Dr. Breno de Souza Martins

N° 219

Belo Horizonte

Data: 10/09/2020



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



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Geoquímica das FFB, *chert* ferruginosos e rochas vulcânicas do depósito aurífero Arqueano de Lamego: modelo deposicional e implicações para metalogênese e contexto geotectônico do *greenstone belt* Rio das Velhas**

VINÍCIUS NOGUEIRA DUARTE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia

**Área de concentração:** Geologia Econômica e Aplicada

**Orientação:** Profa. Dra. Lydia Maria Lobato

**Co-orientação:** Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

Prof. Dr. Breno Souza Martins

**Belo Horizonte**

**2020**

D812g Duarte, Vinícius Nogueira.  
2020 Geoquímica das FFB, chert ferruginosos e rochas vulcânicas do depósito aurífero Arqueano de Lamego [manuscrito] : modelo deposicional e implicações para metalogênese e contexto geotectônico do greenstone belt Rio das Velhas/ Vinícius Nogueira Duarte. – 2020.  
xv,175 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Lydia Maria Lobato.

Coorientadora: Rosaline Cristina Figueiredo e Silva.

Coorientador: Breno Souza Martins.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 99-110.

Inclui anexos.

1. Geologia econômica – Minas Gerais – Teses. 2. Geologia estrutural – Minas Gerais – Teses. 3. Petrologia – Teses. 4. Geoquímica – Teses. 5. Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Lobato, Lydia Maria. II. Figueiredo e Silva, Rosaline Cristina. III. Martins, Breno Souza. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. V. Título.

CDU: 553(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Geoquímica das FFB, chert ferruginosos e rochas vulcânicas do depósito aurífero Arqueano de Lamego: modelo deposicional e implicações para metalogênese e contexto geotectônico do greenstone belt Rio das Velhas**

### **VINÍCIUS NOGUEIRA DUARTE**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 10 de setembro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Lydia Maria Lobato - Orientadora  
UFMG

Profa. Simone Cerqueira Pereira Cruz  
UFBA

Prof. Alexandre Uhlein  
UFMG

Belo Horizonte, 10 de setembro de 2020.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram de algum modo para o chegar aonde chegamos.

À minha orientadora Lydia, o meu sincero agradecimento por todas as discussões, revisões e ideias que fizeram o trabalho possível. Com certeza irei levar todo o crescimento pessoal e profissional por todo o caminho que tenho a percorrer.

À professora Rosa, por toda sua disposição e atenção em ajudar. Muito obrigado por todas as dicas e discussões.

Ao meu amigo Noreto Sena, que me acompanhou desde o início, tanto pelas discussões, troca de materiais que contribuíram muito para o trabalho, mas principalmente por toda a parceria.

À AngloGold Ashanti pelo financiamento, apoio técnico e logístico e a todos aquele que participaram e colaboraram com o projeto, em especial ao Raphael Fernandes, Pedro Barroso, Rafael Chaves, Evandro Coelho, Carlinhos, Geraldo, Felipe, Robinho e Matheus.

Um agradecimento especial à CAPES pelo apoio financeiro na concessão da bolsa de mestrado durante o primeiro ano de desenvolvimento do trabalho.

E o muito obrigado a todas aqueles que se fazem essenciais, e mesmo que não diretamente, têm total importância em tudo o que construímos:

À minha família, por todo o amor.

À Raísa, pelo apoio, carinho e companheirismo.

Aos meus amigos/amigas por todos os momentos compartilhados.

## RESUMO

Formações ferríferas bandadas e *chert* ferruginosos metamorfizados hospedam a mineralização aurífera no depósito de ouro orogênico de Lamego, o qual está inserido no contexto do *greenstone belt* Neoarqueano Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Esses sedimentos químicos são classificados como FFB do tipo Algoma e ocorrem em uma associação típica de rochas de fundo marinho: vulcânicas máficas a intermediárias, FFB e pelito carbonoso. Com um teor médio de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  relativamente baixo, essas rochas estão próximas ao limite de 15% que distingue FFB e *chert* ferruginosos. O mineral de ferro dominante é a siderita de granulação fina, a qual é considerada a fase primária, geralmente manchada com inclusões de matéria carbonosa. Ankerita é subordinada, tanto primária quanto hidrotermal, enquanto magnetita e stilplomelano ocorrem localmente e são secundárias. Ambos FFB e *chert* não apresentam variações geoquímicas e mineralógicas que poderiam influenciar de maneira direta na mineralização aurífera, por exemplo facilitando a precipitação de sulfetos durante a passagem do fluido hidrotermal. A geoquímica e os padrões de elementos terras-raras (ETR) indicam sedimentação em um ambiente marinho com contribuições hidrógena, de fluido hidrotermal vulcanogênico de alta temperatura e detrítica. Entre as principais características dos padrões normalizados ao PAAS estão: anomalias positivas de La, Eu e Ce; enriquecimento relativo dos ETR pesados em relação aos leves e intermediários; valores condriticos a supercondriticos para a razão Y/Ho. As rochas vulcânicas da base da sequência estratigráfica de Lamego variam de basaltos a basaltos andesíticos/andesitos, com uma assinatura cálcio-alcalina definida pela razão  $\text{La}/\text{Sm} > 3$ . Essa composição é similar às das rochas vulcânicas basais do depósito *world-class* Cuiabá, localizado a 5km a NE, onde essas rochas são hospedeiras para veios mineralizados em zonas de cisalhamento. As anomalias negativas de Nb e Ta identificadas no diagrama multielementar normalizado ao manto primitivo indicam que elas estão associadas a basaltos de arco continental. Os resultados geoquímicos sugerem que as rochas de Lamego estão associadas a um ambiente marinho sob a influência do arco continental, provavelmente relacionado ao evento Rio das Velhas II (2800 – 2760 Ma). Alternativamente, alguns autores sugerem a deposição das FFB em bacias restritas. No caso de Lamego, essa hipótese é sustentada pela existência de amostras com razões Y/Ho abaixo de valores condriticos. Os resultados apresentados expandem ainda o horizonte exploratório do *greenstone belt* Rio das Velhas, uma vez que corrobora o caráter fortemente epigenético do evento hidrotermal responsável pela mineralização aurífera, o qual se sobrepôs a praticamente toda a sequência volcanossedimentar do *greenstone*.

## ABSTRACT

The paper focuses on metamorphosed banded iron formation and ferruginous chert host gold mineralization in the Lamego orogenic gold deposit, which is inserted in the context of the Neoproterozoic Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. These chemical sedimentary rocks are classified as Algoma-type BIF and occur in a typical association of deep oceanic rocks: intermediate to mafic volcanic, BIF, and carbonaceous pelite. With a relatively low Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> average content, these rocks are close to the 15% limit that distinguishes BIF and ferruginous chert from one another. Their dominant iron mineral is fine-grained siderite, which is considered the primary phase, darkened by the presence of carbonaceous matter. Ankerite is subordinate, both hydrothermal and primary, whereas magnetite and stilpnomelane occur locally and are secondary. Both the BIF and chert have no significant mineralogical and geochemical variations that could have directly influenced gold mineralization, such as facilitating sulfide precipitation. Their geochemistry and rare-earth elements (REE) patterns indicate sedimentation in a deep marine environment with hydrogenous, high temperature hydrothermal fluids and detrital contributions. Among the main characteristics of the PAAS normalized patterns are: positive La, Eu and Ce anomalies; heavy REE enrichment, relative to the light and intermediate REE; chondritic to superchondritic values for Y/Ho ratios. The volcanic rock from the base of the Lamego stratigraphic sequence varies from basalts to andesitic basalts, with a calcium-alkaline signature defined by the ratio La/Sm > 3. This composition is similar to that of the basal volcanic rocks at the nearby, world-class Cuiabá deposit, where these constitute the hosts to mineralized, shear-related quartz veins. The Nb and Ta negative anomalies identified in the multielement spidergram normalized to the primitive mantle indicate that they are closely associated with continental arc basalts. The geochemical results suggest that the Lamego rocks are associated with a marine environment, under the influence of a continental arc, probably related to the Rio das Velhas II event (2800 - 2760 Ma). Alternatively, some authors argue in favor of BIF deposition in restricted basins. In the case of Lamego, the latter hypothesis is supported by the existence of samples with Y/Ho ratios below chondritic values. In addition, these results extend the gold exploration horizon in the Rio das Velhas greenstone, since they further supports the strong epigenetic character of the hydrothermal mineralizing event, which apparently overlapped the entire volcano-sedimentary rock package.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1 – Mapa de localização e acesso à mina Lamego. .... 20

### CAPÍTULO 2

Figura 2 – Localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) considerando a posição geotectônica do Cráton São Francisco e a disposição das unidades: embasamento Arqueano-Paleoproterozoico; sequências Paleo- Mesoproterozóicas; e coberturas e faixas orogênicas Neoproterozóicas (Modificado de Alkmim e Martins-Neto, 2012). .... 21

Figura 3 – Mapa geológico simplificado do QF retirado de Farina et al. (2015) após Alkmim e Marshak (1998). Destaque para as quatro unidades principais: Complexos metamórficos de idade Arqueana; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; e Grupo Itacolomi. .... 22

Figura 4 – Coluna estratigráfica do QF com as idades referenciadas a cada unidade. Retirada de Farina et al. (2016) após Dorr II (1969) e Alkmim e Marshak (1998). .... 24

Figura 5 – Mapa geológico do QF (Lobato et al., 2005) com destaque para a subdivisão de associações de litofácies para o Supergrupo Rio das Velhas. .... 27

Figura 6 – Domínios litoestruturais do greenstone belt Rio das Velhas segundo Baltazar e Zucchetti (2007). .... 30

Figura 7 – Mapa geológico folha Belo Horizonte, 1:50.000, com detalhe da dobra Lamego associada à unidade Mestre Caetano. Rochas encaixantes pertencentes às unidades Córrego do Sítio e Mindá. Fonte: Lobato et al. (2005). .... 32

Figura 8 – Mapa geológico de Lamego com destaque para os quatro corpos de minério: Carraugem, Cabeça de Pedra, Queimada e Arco da Velha. Modificado de Villanova (2011). .... 33

### CAPÍTULO 3

Figura 9 – A) Localização das amostras coletadas nos corpos Carraugem, Queimada, Cabeça de Pedra e Arco da Velha. FFB: vermelho; Chert ferruginoso: azul claro; FFB alterada a carbonato: rosa; FFB alterada a magnetita: preta; Rochas vulcânicas: verde; Minério: laranja; Pelito carbonoso: cinza; B)

Identificação das amostras nos corpos Cabeça de Pedra (esquerda), Arco da Velha (centro) e Queimada (direita) – visão em perspectiva; C) Identificação das amostras no corpo Carruagem – vista de planta.40

Figura 10 – Padrões de ETR + Y normalizados ao PAAS (McLennan, 1989) para fluido hidrotermal (Bau e Dulski, 1999) e água marinha (Alibo e Nozaki, 1999). ..... 45

Figura 11 – Diagramas para estimativa da contribuição relativa entre componentes hidrogeno (água marinha) e hidrotermal vulcanogênico de alta temperatura propostos por Alexander et al. (2008). A) Eu/Sm x Sm/Yb; B) Eu/Sm x Y/Ho; C) Sm/Yb x Y/Ho. .... 47

Figura 12 – Diagrama para estimativa entre contribuição relativa hidrotermal vulcanogênica de alta T versus contribuição hidrógena (água marinha) proposto por Gourcerol et al. (2016). Linha de mistura calculada a partir de amostras de água marinha (Alibo e Nozaki, 1999) e amostra de fluido hidrotermal de alta temperatura (Thurston et al., 2012). ..... 48

#### **CAPÍTULO 4**

Figura 13 – Afloramentos e amostras de mão de FFB e chert ferruginosos: A) Afloramento em galeria do nível 4 do corpo Queimada; B) Amostra 17QN04; C) Afloramento em galeria do nível 2 do corpo Arco da Velha; D) Amostra 06AVN2LE; E) Amostra 04CRN6.1B; F) Amostra 10CRN8.1asc ..... 52

Figura 14 – Amostras de FFB e chert ferruginosos coletadas em testemunhos de sondagem: A) Amostra 20CP0036; B) Amostra 24CR2803; C) Amostra 14CP0039; D) Amostra 33QM1184. .... 52

Figura 15 – Fotomicrografias das amostras de FFB e chert ferruginosos: A) Bandamento composicional na amostra 01QN03LE (LT/NP) definido pela intercalação sucessiva entre bandas carbonáticas e quartzosas; B) LT/NC; C) Siderita e ankerita com ocorrência de matéria carbonosa como lâminas delgadas e opacas na banda carbonática. Amostra 01QN03LE (LT/NP); D) LT/NC; E) Bandamento composicional submilimétrico típico, com predomínio de quartzo, amostra 02CR2737 (LT/NP); F) LT/NC..... 53

Figura 16 - Fotomicrografias das amostras de FFB e chert ferruginosos: A) Detalhe de banda quartzosa na amostra 12AVN01. Aspecto granoblástico e contatos poligonais (LT/NC); B) Detalhe de banda carbonática de composição siderítica com quartzo subordinado, amostra 02QN03LE (LT/NC); C) Bandamento milimétrico, com bandas carbonáticas ricas em matéria carbonosa; amostra 20CP0036 (LT/NP); D) Cristal de sericita fino e isolado em matriz quartzosa; amostra 20CP0036 (LT/NC); E)

Cristal de clorita em matriz carbonática fina, concordante à foliação; amostra 12AVN01 (LT/NC); F) LT/NP. ....	54
Figura 17 – Fotomicrografias de FFB e chert ferruginosos com destaque para feições de alteração hidrotermal: A) Bandas magnéticas sobrecrescidas às bandas carbonáticas na amostra 01CR2726 (LT/NC); B) Banda magnética sobrecrescida à matriz carbonática associadas a massas disformes de pirrotita (LR/NC); C) Vênula carbonática composta por ankerita/calcita sobreposta à banda siderítica (LT/NC); D) Cristal euédrico de pirita sobrecrescido à siderita em matriz quartzo-carbonática (LT/NC); E) Vênula quartzosa seccionando obliquamente a banda siderítica (LT/NC); F) Cristal ripiforme de pirrotia em matriz siderítica (LR/NC).....	55
Figura 18 – Imagens de MEV (elétrons retroespalhados) da amostra 01QN03LE: A) Identificação do bandamento composicional de acordo com a escala de tons de cinza – bandas quartzosas de coloração escura; bandas sideríticas de coloração clara; e ankerita em tons intermediários. Aumento de 70x; B) Detalhe da imagem A). Aumento de 200x; C) Espectro de emissões obtido com sensor EDS. Pico de emissão associado à banda siderítica, distinguido pelo elemento Fe.....	56
Figura 19 - Mapa composicional da amostra 01QN03LE evidenciando a intercalação entre domínios ricos em Ca (ankerita - porções alaranjadas), e domínios ricos em Fe (siderita – porções azuladas). Aumento de 65x. ....	57
Figura 20 – Amostras de minério com bandamento reliquiar da FFB preservado e bandas carbonáticas substituídas por sulfetos: A) Amostra 05CR2760; B) Amostra 46QM1234; C) Amostra 47QM1235; D) Amostra 06CR2765. Fotomicrografias das amostras de minério: E) Pirita/pirita arsenical em contato com cristais de pirrotita em matriz carbonática (LR/NC); F) LT/NC.....	65
Figura 21 – Fotomicrografias das amostras de minério: A) Pirita/pirita arsenical em contato transicional com arsenopirita, sobrecrescidos à matriz carbonática; amostra 46QM1234 (LR/NP); B) LT/NC: Sombras de pressão de quartzo associadas aos sulfetos; C) Cristais euédricos de arsenopirita, aciculares, e pirita, cúbicos, em matriz carbonática; amostra 47QM1235 (LR/NP); D) Cristal euédrico de pirita/pirita arsenical com granulação grossa na amostra 05CR2760 (LR/NP); E) Cristais euédricos a subédricos de pirita no contato entre banda carbonática e banda quartzosa (LT/NC).....	66
Figura 22 – Amostras de rochas vulcânicas coletadas em testemunhos de sondagem: textura fanerítica, cor verde e foliação incipiente. A) Amostra 27CP0042; B) Amostra 30QM1127; C) Fotomicrografia mostrando aspecto geral da matriz da amostra 27CP0042: plagioclásio e actinolita de granulação fina	

(LT/NC); D) LT/NP; E) Fotomicrografia mostrando aspecto geral da amostra 30QM1127. Matriz de granulação fina composta essencialmente por clorita, plagioclásio e carbonato (LT/NC); F) Detalhe da matriz fina composta por plagioclásio e clorita, com porfiroclasto de clinzoisita; amostra 30QM1127 (LT/NC). ..... 68

Figura 23 – Fotomicrografias das rochas vulcânicas: A) Plagioclásio euédrico tabular com geminação da albita em matriz composta por plagioclásio e epidoto; amostra 27CP0042 (LT/NC); B) Porfiroclasto de actinolita em matriz composta por feldspato, clinzoisita e clorita. Feldspato comumente substituído por clinzoisita; amostra 15CR2788 (LT/NC); C) Matriz fina composta por plagioclásio com porfiroclastos de epidoto; amostra 27CP0042 (LT/NC); D) Cristais subédricos e textura porfiroclástica de epidoto e clinzoisita; amostra 27CP0042 (LT/NC). ..... 69

Figura 24 – Pelito carbonoso: A) Amostra de pelito carbonoso 19CR2793 coletada em testemunho de sondagem;; B) Fotomicrografia da amostra 19CR2793 mostrando matriz composta por matéria carbonosa e lentse quartzo-carbonáticas concordantes à foliação (LT/NC); C) LT/NP. .... 70

## CAPÍTULO 5

Figure 1 - Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero highlighting the Rio das Velhas greenstone belt and the lithofacies associations defined by Baltazar and Zucchetti (2007). Modified from Lobato et al. (2005). ..... 76

Figure 2 - Stratigraphic column of the Lamego gold deposit as proposed by Sales (1998) and Martins et al. (2016). ..... 77

Figure 3 - Geological map of the Lamego gold deposit showing the main orebodies: Queimada, Carruagem, Arco da Velha e Cabeça de Pedra. Modified from Villanova (2011). ..... 78

Figure 4 – BIF (red), ferruginous chert (light-blue), volcanics (green), carbonaceous pelite (light gray), altered magnetite BIF (black), altered carbonate BIF (ligh pink) and ore (orange) samples collected in the four orebodies (E-W view) of the Lamego gold deposit: Carruagem, Queimada, Arco da Velha and Cabeça de Pedra. .... 81

Figure 5 - REE + Y of hydrothermal fluid (Bau and Dulski, 1999) and seawater (Alibo and Nozaki, 1999) (McLennan, 1989) PAAS-normalized patterns. .... 82

Figure 6 - BIF and ferruginous chert: A) BIF outcrop in the Carruagem orebody – sublevel 4.1; B) Compositional banding in the drill core sample 24CR2803; C) Photomicrographs of BIF:

Compositional banding, quartz and siderite, sample 01QN03LE – Plane polarized light, 2.5x; D) Carbonaceous levels in agreement with the banding (carbonate bands) – Sample 01QN03LE - Plane polarized light, 5x; E) BSE image showing compositional banding according to gray scale: quartz bands – darkest gray; sideritic bands – lightest gray; ankerite - intermediate gray; 35x; F) Compositional map showing the intercalation between Ca-rich carbonate, ankerite (orange), and Fe-rich carbonate, siderite (blue); 65x. .... 86

Figure 7 – Hydrothermally altered BIF and ferruginous chert: A) Drill core sample 01CR2726. Magnetite BIF with quartz-carbonate veins; B) Subhedral to euhedral fine to medium grained magnetite crystals overgrown to the siderite bands – Cross-polarized light, 2.5x; C) Magnetite band with pyrite masses overgrown to the siderite crystals in the magnetite BIF sample 01CR2726 – Reflected light, 2.5x; D) Quartz-carbonate venules cross-cutting the sideritic band, sample 08CRN8.1 - Cross-polarized light, 2.5x; E) Ankerite/sideritic bands cross-cut by carbonate venules, sample 02QN03LE - Cross-polarized light, 2.5x. .... 87

Figure 8 – Volcanic rocks: A) Drill core sample 27CP0042. Phaneritic texture, green color and incipient foliation; B) Photomicrograph of sample 27CP0042 showing tabular plagioclase with albite twinning. Cross polarized light, 20x; C) Photomicrograph of sample 15CR2788 showing actinolite porphyroclast in a matrix composed of feldspar and clinozoisite. Feldspar is commonly replaced by clinozoisite and chlorite. Cross polarized light, 20x; D) Fine-grained plagioclase matrix with epidote and clinozoisite porphyroclasts. Sample 27CP0042. Cross polarized light, 20x; E) Subhedral epidote and clinozoisite porphyroclasts in a fine-grained plagioclase matrix. Sample 27CP0042. Cross polarized light, 20x. .... 88

Figure 9 - PAAS-normalized patterns from the Lamego gold deposit samples: A) REE + Y patterns for BIF, ferruginous chert and carbonaceous pelite. For each sample, the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> percentage is shown towards the end of the element distribution line, showing that the REE concentration of chert samples is consistently lower than that of BIF; B) REE + Y patterns for hydrothermally altered BIF, including magnetite and carbonate BIF, as well as ore samples. Notable BIF/IF samples are plotted on both diagrams: Witwatersrand (Viehmann, 2015), Isua (Frei, 2007), Kurumam (Bau and Dulski, 1996), North Craton of China – NCC (Moon et al., 2017) and Meadowbank (Gourcerol et al., 2016). .... 96

Figure 10 - Classification diagrams for basalts: A) Zr / Ti x Nb / Y diagram (Pearce, 1996); B) Zr x Y diagram for magmatic affinities (after Ross and Bédard, 2009). The mean value for Cuiabá deposit volcanic rock samples are from Silva (2006). .... 98

Figure 11 - A) Multielementary spidergram for basalt samples normalized to the primitive mantle (Palme and O'Neill, 2014); B) REE spidergram for basalt samples normalized to the chondrite (Sun and McDonough, 1989). Basalts/Andesites from the North Atlantic Craton (light beige shade) are from Szilas (2018); average basalt value of Vanuatu continental-arc (red line) from Peate et al. (1997). ..... 98

Figure 12 - Eu/Sm x Sm/Yb diagram proposed by Gourcerol et. al (2016) to estimate the hydrothermal contribution during BIF and chert deposition. Mixing line calculated from the Alibo and Nozaki (1999) seawater sample and high-T volcanogenic hydrothermal fluid sample – 06PCT001M (Thurston et al., 2012). ..... 104

Figure 13 - Alexander et al. (2008) diagrams for hydrothermal contribution estimation for BIF deposition at the Lamego gold deposit: A) Eu/Sm x Sm/Yb; B) Eu/Sm x Y/Ho; C) Sm/Yb x Y/Ho.. 105

Figure 14 - Basaltic composition rock discrimination diagrams for geotectonic environments: A) La/Yb x Nb/La diagram proposed by Hollocher et al. (2012); B) Nb/Yb x Th/Yb diagram proposed by Pearce (2008). ..... 109

Figure 15 - Schematic block diagram showing the tectonic evolution context of the Rio das Velhas greenstone belt (RVII and Mamona events) as proposed by Lana et al. (2013) and Farina et al. (2015). Detailing of Lamego rocks deposition setting and tectonic context associated with the RVII block diagram - ocean floor environment with significant lateral distance to the hydrothermal exhalation source and relatively close to the continental-arc. Evolution sketch modified from Farina et al. (2015). Gp: Group; RV: Rio das Velhas. .... 111

## CAPÍTULO 6

Figura 25 – Diagrama binário (Y/Ho x Pr/Nd<sub>PAAS</sub>) proposto por Gourcerol et al. (2016) para estimativa terrígena na deposição das FFB e chert. Linha de mistura calculada a partir de amostra de MUQ (Kamber et al., 2005) e amostra de água do mar de Alibo e Nozaki (1999). ..... 114

Figura 26 – Diagrama Eu/Sm x Sm/Yb proposto por Gourcerol et al. (2016) para estimativa da contribuição hidrotermal vulcanogênica durante a deposição da FFB e chert. Linha de mistura calculada a partir de amostras de água marinha de Alibo e Nozaki (1999) e amostra de fluido hidrotermal vulcanogênico de alta T de Thurston et al. (2012). ..... 115

Figura 27 – Diagramas propostos por Alexander et al. (2008) para estimativa da contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta T para deposição de FFB aplicados para as amostras de FFB/chert

ferruginoso hidrotermalmente alteradas e amostras de minério: A) Eu/Sm x Sm/Yb; B) Eu/Sm x Y/Ho; C) Sm/Yb x Y/Ho. ....	116
--	-----

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3

Tabela 1 – Amostras de FFB e chert ferruginoso coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica. ....	37
Tabela 2 - Amostras de FFB e chert ferruginoso hidrotermalmente alteradas coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.....	38
Tabela 3 - Amostras de rochas vulcânicas coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica. ....	38
Tabela 4 - Amostras de pelito carbonoso coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica. ....	38
Tabela 5 – Amostras destinadas à microscopia óptica e eletrônica. ....	39

### CAPÍTULO 5

Table 1 – BIF, ferruginous chert, hydrothermally altered BIF, ore, mafic volcanic and carbonaceous pelite samples collected in the four orebodies (Carruagem, Cabeça de Pedra, Arco da Velha e Queimada).....	80
Table 2 – Geochemical data for samples of BIF, ferruginous chert, altered BIF, ore and carbonaceous pelite.....	90
Table 3 – Geochemical data for basalt/andesite samples from the Lamego gold deposit. ....	99

### CAPÍTULO 6

Tabela 6 – Ranking de amostras considerando a razão Eu/Sm como parâmetro para determinação da contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta T relativa entre amostras de FFB/chert ferruginoso alteradas e não alteradas.....	117
--	-----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Considerações iniciais .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2. Estrutura da dissertação.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. Natureza do problema (motivações ao estudo).....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Localização e acesso .....</b>	<b>19</b>
<b>1.5. Objetivos .....</b>	<b>19</b>
<b>2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Geologia Regional.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Geologia Local: Depósito aurífero de Lamego .....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Aspectos gerais:.....	29
2.2.2 Contexto estratigráfico:.....	30
2.2.3 Geologia estrutural: .....	33
2.3.4 Alteração hidrotermal e mineralização.....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Amostragem.....</b>	<b>35</b>
3.1.1 FFB e chert ferruginoso .....	35
3.1.2 FFB e chert hidrotermalmente alterados .....	36
3.1.3 Rochas vulcânicas .....	36
3.1.4 Pelito carbonoso.....	36
<b>3.2. Estudos petrográficos.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3. Métodos analíticos .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4. Normalização e padronização das amostras.....</b>	<b>41</b>
3.4.1 Amostras de FFB/chert, FFB hidrotermalmente alteradas e pelito carbonoso.....	41
3.4.2 Amostras de rochas vulcânicas .....	42
<b>3.5. Breve revisão sobre geoquímica de FFB .....</b>	<b>42</b>
3.5.1 Aspectos gerais .....	42
3.5.2 Geoquímica e implicações para modelos deposicionais.....	43
<b>4. ESTUDOS PETROGRÁFICOS.....</b>	<b>48</b>
<b>4.1. Petrografia .....</b>	<b>48</b>
4.1.1. FFB e chert ferruginoso .....	49
4.1.2. Amostras de minério.....	57
4.1.3. Rochas vulcânicas .....	67
4.1.4. Pelito carbonoso.....	69
<b>5. ARTIGO .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1. Introduction .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2. Geological context .....</b>	<b>73</b>
5.2.1 Regional geology .....	73
5.2.2 Geological context of the Lamego gold deposit .....	75
5.2.3 Gold mineralization and hydrothermal alteration .....	77

<b>5.3. MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>79</b>
5.3.1 <i>Sampling</i> .....	79
5.3.1.1 <i>BIF and ferruginous chert</i> .....	79
5.3.1.2 <i>Hydrothermally altered BIF and ferruginous chert</i> .....	79
5.3.1.3 <i>Volcanic rocks</i> .....	79
5.3.1.4 <i>Carbonaceous pelite</i> .....	79
5.3.2 <i>Petrographic analysis</i> .....	80
5.3.3 <i>Geochemical analyses</i> .....	81
5.3.4 <i>Data comparison, normalization and calculation of anomalies</i> .....	81
5.3.4.1 <i>BIF/ferruginous chert, hydrothermally altered BIF, ore and carbonaceous pelite samples</i> .....	81
3.4.2 <i>Volcanic rock samples</i> .....	83
<b>5.4. RESULTS.....</b>	<b>83</b>
5.4.1 <i>Petrography</i> .....	83
5.4.1.1 <i>BIF and ferruginous chert</i> .....	83
5.4.1.2 <i>Volcanic rocks</i> .....	84
5.4.2 <i>Geochemistry</i> .....	85
5.4.2.1 <i>BIF and ferruginous chert</i> .....	85
5.4.2.2 <i>Hydrothermally altered BIF/chert and ore samples</i> .....	89
5.4.2.3 <i>Carbonaceous pelite samples</i> .....	90
5.4.2.2 <i>Volcanic rocks</i> .....	96
<b>5.5. DISCUSSION .....</b>	<b>101</b>
5.1.1 <i>BIF and ferruginous chert</i> .....	101
5.1.1.1 <i>Primary features</i> .....	101
5.5.1.2 <i>REE + Y systematics and high T volcanogenic hydrothermal influence</i> .....	101
5.5.1.3 <i>Geochemistry of hydrothermally altered BIF and ore samples</i> .....	106
5.5.2 <i>Volcanic rocks</i> .....	107
5.5.3 <i>Geotectonic context</i> .....	108
5.5.4 <i>Metallogenic implications</i> .....	110
<b>5.6. CONCLUSIONS.....</b>	<b>112</b>
<b>6. DISCUSSÕES ADICIONAIS.....</b>	<b>113</b>
6.1. <b>Estimativa contribuição terrígena</b> .....	<b>113</b>
6.2. <b>Estimativa contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta temperatura para amostras de FFB alteradas e minério</b> .....	<b>114</b>
6.3. <b>Ranking de amostras para contribuição vulcanogênica de alta temperatura segundo a razão Eu/Sm</b> .....	<b>117</b>
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>118</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>132</b>
<b>I - FICHAS DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA</b> .....	<b>133</b>
<b>II – COLLAR DOS FUROS AMOSTRADOS</b> .....	<b>195</b>
<b>III – COORDENADAS AMOSTRAS COLETADAS</b> .....	<b>196</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

O presente texto é resultado do trabalho de dissertação de mestrado elaborado por Vinícius Duarte, aluno do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) sob orientação da professora Dra. Lydia Maria Lobato.

A fonte financiadora do projeto foi a empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A (AGA) por meio do termo de cooperação técnico-científico UFMG-FUNDEP-AGA, convênio 18489. O estudante ainda recebeu bolsa de mestrado da Agência

### 1.2. Estrutura da dissertação

A dissertação é dividida em 8 capítulos, sendo eles:

1. **Introdução:** Apresentação inicial do projeto, motivações ao estudo, localização e acesso, e objetivos.
2. **Contexto geológico:** Contextualização da geologia regional, Quadrilátero Ferrífero, e local, jazida de Lamego.
3. **Materiais e métodos:** Detalhamento da amostragem, estudos petrográficos, métodos analíticos, apresentação dos padrões de normalização e cálculos de anomalias, e revisão sobre geoquímica de formações ferríferas bandadas.
4. **Estudos Petrográficos:** Apresentação da petrografia das formações ferríferas bandadas/*chert* ferruginosos não alterados e alterados, incluindo amostras de minério, amostras de rochas vulcânicas e pelito carbonoso.
5. **Artigo científico** submetido ao periódico Precambrian Research.
6. **Discussões adicionais:** Apresentação de discussões complementares não incluídas no artigo.
7. Conclusões.
8. Referências bibliográficas.

### 1.3. Natureza do problema (motivações ao estudo)

Formações ferríferas bandadas (FFB) constituem um grupo de rochas peculiar no registro geológico pelo fato de terem sua formação associada a intervalos físicos, químicos e biológicos específicos, definidos por uma série de fatores como disponibilidade de oxigênio, mobilidade dos elementos em seus diversos estados de oxidação, concentrações de Fe e Si e atividade de microrganismos (Klein, 2005; Beukes and Gutzmer, 2008; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017). Como consequência, essas rochas são uma das fontes primordiais para estudos com foco paleoambiental, pois permitem criar correlações entre diversos aspectos da evolução terrestre.

Estudos no âmbito da caracterização dos diferentes fácies e tipos de FFB têm sido realizados utilizando principalmente elementos traços, elementos terras-raras (ETR) e isótopos estáveis como objetos de análise. Esses estudos visam a qualificação e quantificação dos diversos componentes que se interagem e têm influência na precipitação dessas rochas, por exemplo fluidos hidrotermais, hidrôgenos e materiais terrígenos (Alexander, 2008; Heimann et al., 2010; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

Ao longo das últimas décadas, grande parte dos esforços se concentraram nos estudos das FFB conhecidas como do tipo Lago Superior, principalmente devido às grandes áreas que elas recobrem dentro das plataformas continentais e também por serem a principal fonte de minério de ferro (Konhauser et al., 2017). Nos últimos anos, porém, uma quantidade significativa de trabalhos (Barrett et al., 1987; Sugitani et al., 1998; Bolhar et al., 2005; Alexander, 2008; Thurston et al., 2012; Viehmann et al., 2015; Gourcerol et al., 2016; Araújo e Lobato, 2019) têm dado atenção aos sedimentos Arqueanos e FFB do tipo Algoma (Gross, 1980), o que vem gerando novas perspectivas sobre questões como as características da composição dos paleoceanos, das bacias Arqueanas e das implicações para as mineralizações auríferas nessas rochas.

No *greenstone belt* Rio das Velhas (GBRV), sequência metavulcanossedimentar basal do Quadrilátero Ferrífero (QF) de idade neoarqueana Noce et al. (2005), assim como em outros terrenos granito-*greenstone* ao redor do mundo, como nos crátons Slave e Província Superior no Canadá, e no cráton Yilgarn na Austrália (Padgham and Fyson, 1992; Robert et al., 2005), as FFB do tipo Algoma se destacam por serem a rocha hospedeira de mineralizações auríferas, principalmente em depósitos do tipo ouro orogênico. A maioria dos trabalhos até então publicados sobre esses depósitos se concentram na caracterização da mineralização em si, das zonas de alteração hidrotermal e

aspectos estruturais e mineralógicos como controles exploratórios. Recentemente, Gourcerol et al. (2016) e Araújo e Lobato (2019) apresentaram abordagens relacionadas às FFB e suas características primárias como fatores para se entender os ambientes deposicionais das mesmas e as possíveis implicações para a mineralização aurífera.

Muitas ocorrências de FFB são descritas no GBRV nas suas diversas unidades sendo que algumas dessas são mineralizadas em ouro e formam depósitos, como as minas Lamego, Cuiabá, Raposos, São Bento e Pilar (Lobato et al., 2001a; Lobato et al., 2001b; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Junqueira et al., 2007; Martins et al., 2016; Kresse et al., 2018). Araújo (2018) e Araújo e Lobato (2019) abordaram as FFB em escala de distrito mineral, fazendo uma compilação de amostras de FFB e *chert* ferruginosos de diversos depósitos auríferos dentro do QF para gerar uma modelo deposicional para a bacia Rio das Velhas e entender como as características da FFB e o ambiente a ela associado poderiam afetar as mineralizações. Busca-se realizar um trabalho semelhante, porém em escala de depósito.

Para tanto, foi escolhido o depósito Lamego, no qual a mineralização está hospedada em FFB e *chert* ferruginosos e carbonosos. A escolha dessa jazida atende alguns critérios que se tornam interessantes para o desenvolvimento do estudo, dentre os quais se destacam:

- (i) O depósito Lamego está estruturado em uma dobra isoclinal e reclinada definida pela FFB que é capeada por uma camada de pelito carbonoso por todo o seu perímetro;
- (ii) O depósito é explotado em uma mina subterrânea;
- (iii) A geometria do depósito é bastante desafiadora e instigante ao desenvolvimento do estudo pois a estrutura dobrada pode ser a representação da bacia Arqueana como um todo ou de parte dela que contém a FFB/*chert*, o que contribui para o trabalho de reconstituição paleoambiental e a identificação das variações dentro bacia;
- (iv) As galerias da mina, bem como os furos de sondagem, permitem a coleta de amostras em diversas profundidades e por praticamente todo o perímetro da estrutura, o que é bastante significativo para se tentar entender as variações da FFB tridimensionalmente na bacia.

Entendendo as variações faciológicas das FFB (carbonática, magnetítica, carbonosa, *chert*-dominada), bem como padrões nos elementos traços, terras-raras, busca-se o aprofundamento do

conhecimento sobre o ambiente deposicional dessas rochas dentro da bacia Rio das Velhas e as possíveis implicações para a mineralização aurífera.

O estudo da FFB/*chert* dentro de um contexto estratigráfico (da base para o topo, rocha vulcânica máfica, FFB, pelito carbonoso e pelitos turbidíticos) é outro fator relevante que pode contribuir para a melhor compreensão do paleoambiente da bacia Rio das Velhas. Dessa maneira, o estudo estende-se também a outras rochas do pacote estratigráfico de Lamego com o intuito de gerar um modelo baseado em mais de uma fonte de evidências.

As rochas vulcânicas de Lamego já representam por si só outro grande desafio para o entendimento do contexto geotectônico da área de estudo. Elas foram objeto de poucos trabalhos (Sales, 1998 e Martins et al., 2016), geralmente focados na alteração hidrotermal e mineralização aurífera, e necessita de um estudo petrográfico e geoquímico mais aprofundado para determinação de suas características primárias e ambiente geotectônico.

#### **1.4. Localização e acesso**

O depósito Lamego está localizado próximo à divisa entre os municípios de Sabará e Caeté, aproximadamente 40 km da região central de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil (*Figura 1*).

A partir do anel rodoviário de Belo Horizonte, segue-se pela rodovia MG-262 por aproximadamente 30 km, passando pelo perímetro urbano de Sabará, até a rotatória de encontro entre as ruas Presidente Juscelino Kubitschek e Gaia (*Figura 1*). Na rotatória pega-se a primeira saída a direita que dá acesso à Rua do Gaia. Seguindo por essa rua, por aproximadamente 8 km em estrada de terra, chega-se à portaria da mina Lamego, propriedade da empresa AngloGold-Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A (AGA).

#### **1.5. Objetivos**

O escopo do trabalho se concentra no estudo das FFB, *chert* ferruginosos e rochas vulcânicas da jazida Lamego, podendo-se destacar seis frentes principais:

- (i) Caracterização petrográfica dos seguintes litotipos: FFB, *chert* ferruginoso e rochas vulcânicas;

- (ii) Caracterização geoquímica das FFB e *chert* ferruginosos e definição das contribuições relativas entre água marinha, fluido hidrotermal de alta temperatura e material clástico na deposição dessas rochas;
- (iii) Avaliação das características primárias das FFB/*chert* ferruginosos como fator relevante para a mineralização aurífera;
- (iv) Comparação entre a geoquímica de ETR para as amostras de FFB/*chert* ferruginosos não alteradas e amostras de minério e FFB/*chert* alteradas pelo fluido hidrotermal mineralizante;
- (v) Caracterização geoquímica das rochas vulcânicas da base estratigráfica de Lamego;
- (vi) Apresentação de discussão e proposta de modelo de ambiente geotectônico e deposicional para as rochas da jazida Lamego.

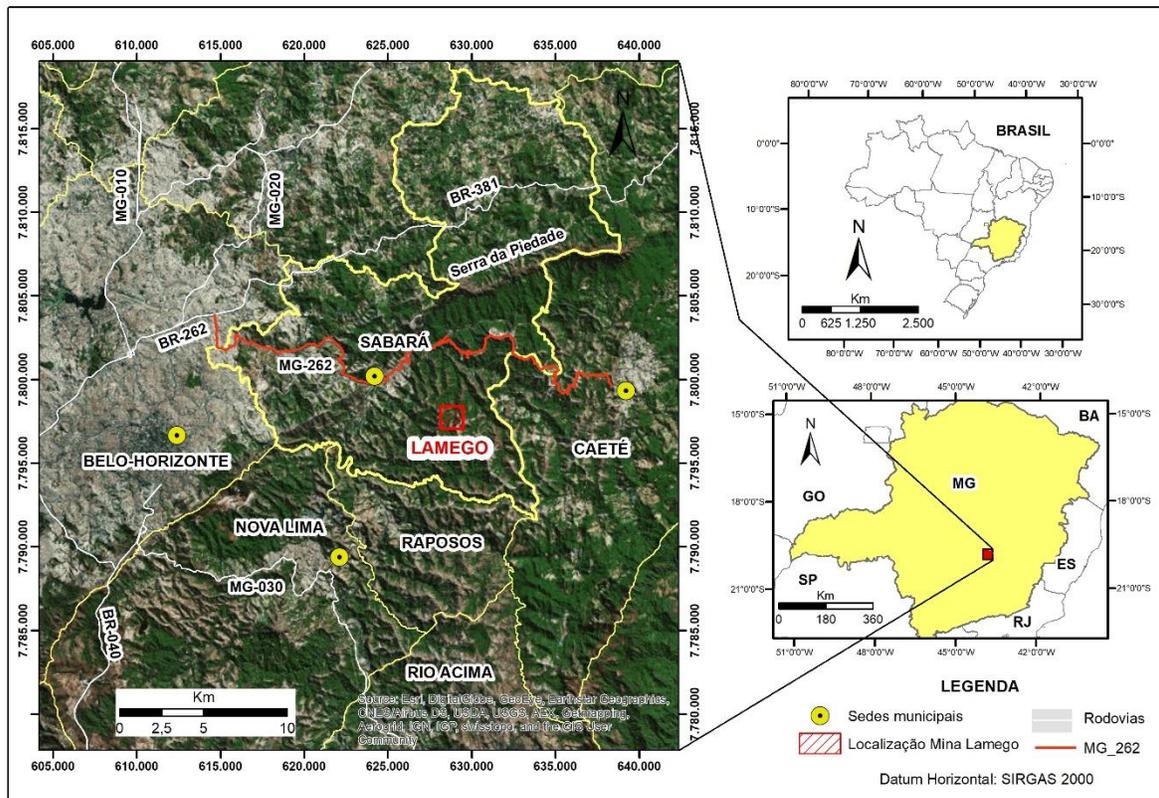


Figura 1 – Mapa de localização e acesso à mina Lamego. Imagem de satélite: Google Earth; Shapes: IBGE.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1. Geologia Regional

O Quadrilátero Ferrífero (QF) (Dorr II, 1969) é uma importante província metalogenética brasileira que recobre região de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> e está localizada na porção meridional do Cráton São Francisco (Almeida, 1977), sendo seccionado em sua porção central pelo orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares et al., 2007) (*Figura 2*). É limitado a sul pelo Cinturão Mineiro (Teixeira et al., 2015), e a norte e oeste pelo embasamento do Cráton e coberturas Neoproterozóicas (*Figura 2*).

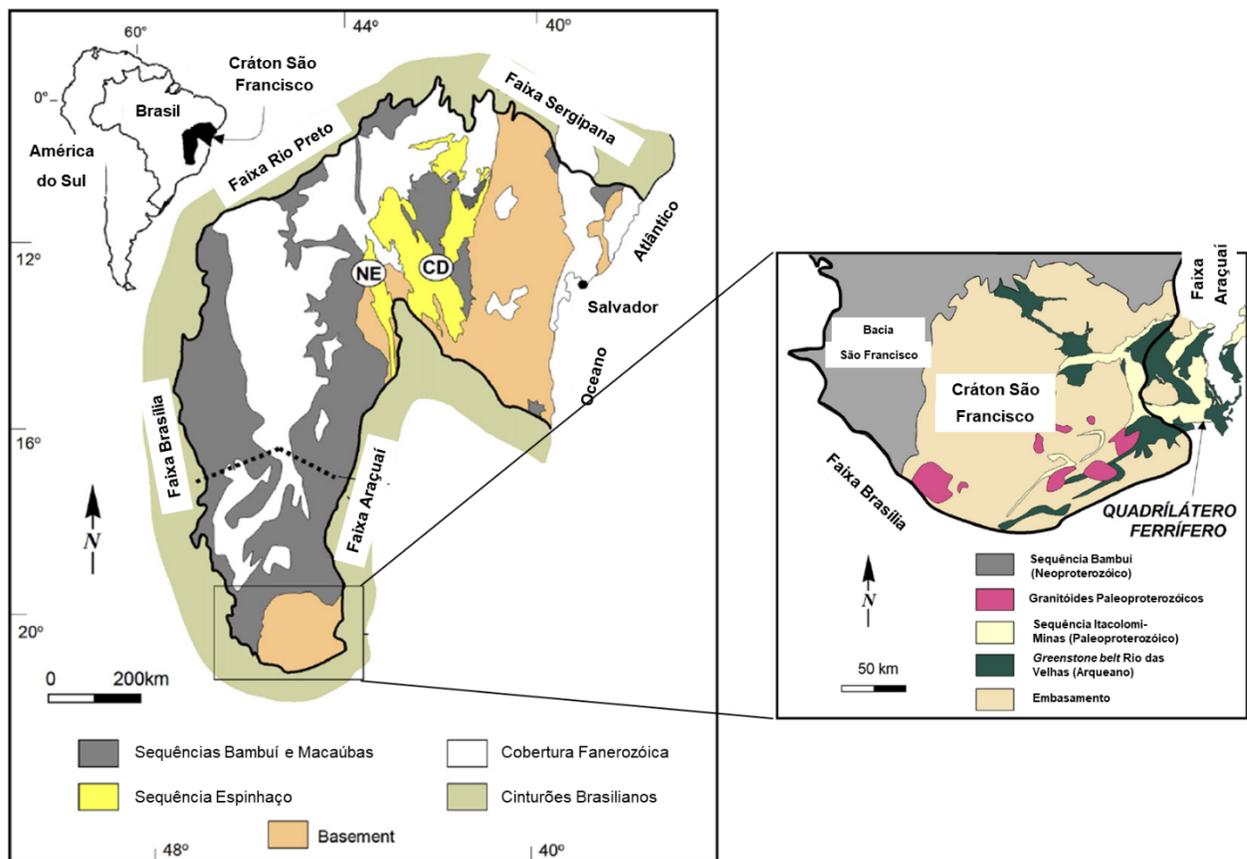


Figura 2 – Localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) considerando a posição geotectônica do Cráton São Francisco e a disposição das unidades: embasamento Arqueano-Paleoproterozóico; seqüências Paleo- Mesoproterozóicas; e coberturas e faixas orogênicas Neoproterozóicas (Modificado de Alkmim e Martins-Neto, 2012).

Consiste em uma associação de rochas supracrustais preservadas em quilhas, de idade entre o Neoarqueano e o paleoproterozóico, circundadas por domos granito-gnáissicos que compõe o

embasamento. Em escala regional apresenta formato retangular, resultado dos ciclos polifásicos de deformação (Chemale Jr. et al., 1994) (*Figura 3*).

Da base para o topo, a estratigrafia do QF pode ser dividida em quatro unidades principais que representam processos que envolvem a formação de crosta Arqueana e ciclos de abertura e fechamento de bacias (*Figura 4*):

- (i) Complexos metamórficos de idade Arqueana;
- (ii) Supergrupo Rio das Velhas;
- (iii) Supergrupo Minas;
- (iv) Grupo Itacolomi.

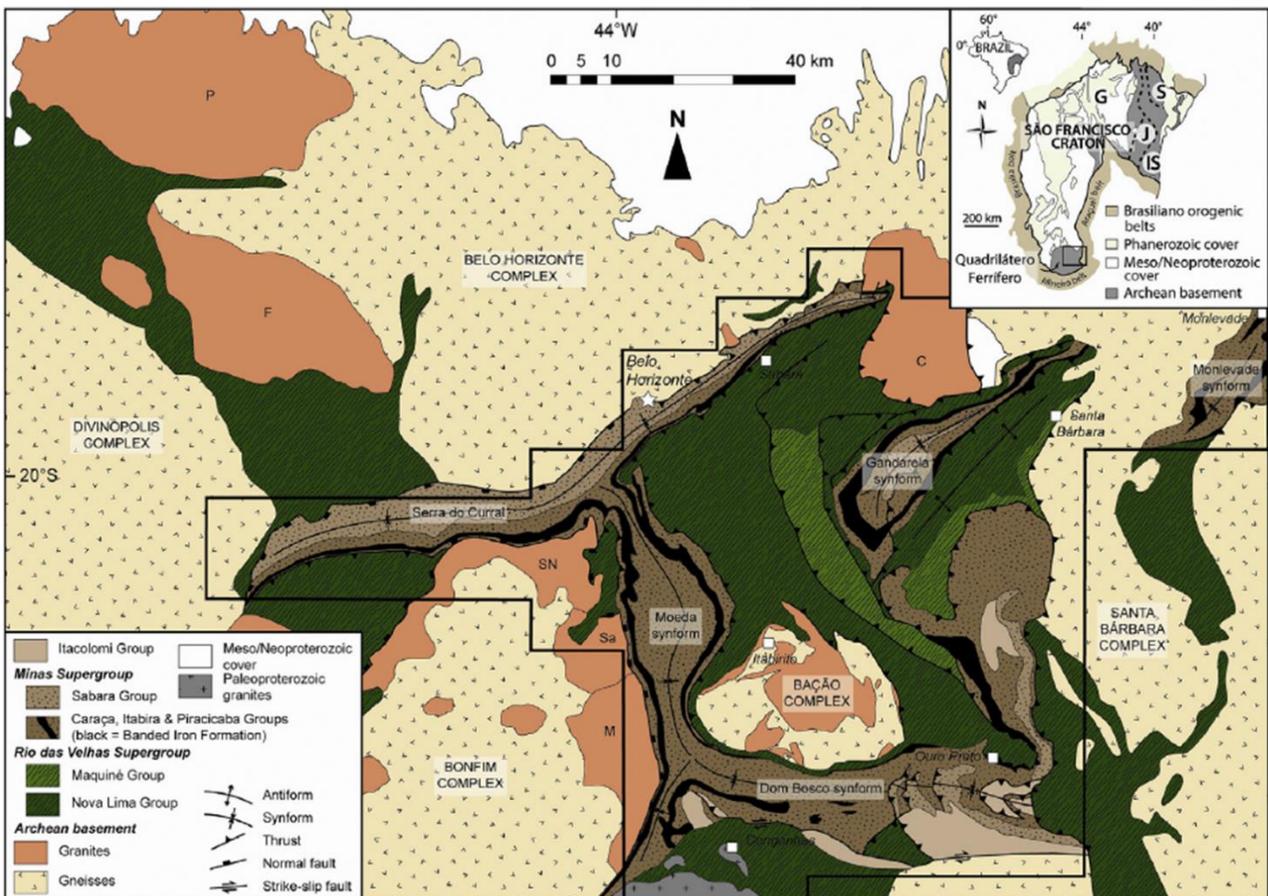


Figura 3 – Mapa geológico simplificado do QF retirado de Farina et al. (2015) após Alkmim e Marshak (1998). Destaque para as quatro unidades principais: Complexos metamórficos de idade Arqueana; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; e Grupo Itacolomi.

Os complexos metamórficos Arqueanos são compostos essencialmente por gnaisses, migmatitos e granitoides do tipo TTG (trondhjemito-tonalito-granodiorito) (Noce et al., 1997), e ocorrem como domos bordejando as sequências supracrustais em contatos tectônicos (Alkmim e Marshak, 1998) (*Figura 5*). De acordo com Lana et al. (2013) existem muitas evidências de que a formação do embasamento do *greenstone belt* Rio das Velhas envolveu o amalgamento de blocos tectônicos com diferentes histórias e características geológicas.

Estão incluídos os complexos Belo Horizonte, Bonfim, Bação, Campo Belo, Caeté, Santa Bárbara e Santa Rita, e representam o resultado de eventos magmáticos-metamórficos denominados por Lana et al. (2013) e Farina et al. (2016) como: Santa Bárbara (SB - 3220 a 3200 Ma), Rio das Velhas I (RVI - 2930 a 2850 Ma), Rio das Velhas II (RVII - 2800 a 2760 Ma) e Mamona (2750 a 2680 Ma). Tais eventos e idades correlacionadas foram definidas por Lana et al. (2013) e Farina et al. (2016) a partir de uma compilação de dados de idades U-Pb em rochas do embasamento coletadas em diversos trabalhos como Machado e Carneiro (1992), Machado et al. (1992), Noce et al. (1997), Noce et al. (2005), Romano et al. (2013) e Lana et al. (2013) (*Figura 3, Figura 4 e Figura 5*).

O evento Santa Bárbara é a representação do primeiro pulso magmático e a única crosta Paleoarqueana datada. O número de idades obtidas próximas a 3200 Ma é muito pequeno, provavelmente devido ao retrabalhamento intenso dessa crosta, preservada no complexo Santa Bárbara (Farina et al., 2016). Os eventos Rio das Velhas I e Rio das Velhas II marcam períodos de orogenia e migmatização dos complexos, com formação de grande parte dos TTG's presentes no QF, concomitantemente à deposição dos sedimentos e derrames vulcânicos do Supergrupo Rio das Velhas (Lana et al., 2013). O evento Mamona está associado à intrusão de grande volume de granitos potássicos, representados por batólitos fracamente a não foliados, diques e pequenos veios de leucogranitos (Farina et al., 2016).

O Supergrupo Rio das Velhas (Dorr II *et al.*, 1957; Loczy & Ladeira, 1976), também denominado *greenstone belt* Rio das Velhas (GBRV), é composto por rochas metavulcanossedimentares de idade Arqueana, típicas de sequências do tipo *greenstone belt* (*Figura 3, Figura 4 e Figura 5*). Apresenta como característica marcante um predomínio de rochas clásticas em relação às rochas vulcânicas, como já proposto por Baars (1997).

Essas rochas estão metamorizadas predominantemente na fácies xisto verde, localmente alcançando fácies anfibolito, e não raramente apresentam-se afetadas por alteração hidrotermal (Zucchetti *et al.*, 2000b).

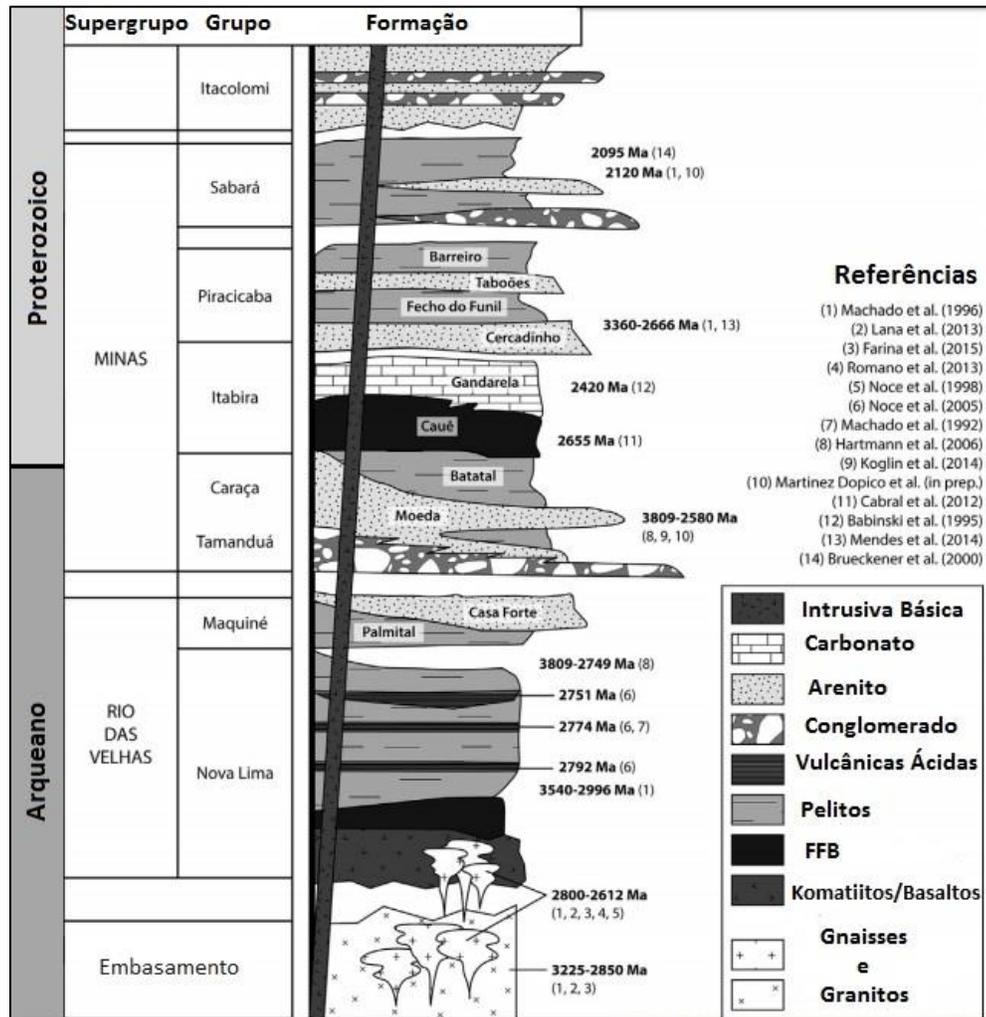


Figura 4 – Coluna estratigráfica do QF com as idades referenciadas a cada unidade. Retirada de Farina et al. (2016) após Dorr II (1969) e Alkmim e Marshak (1998).

Essa unidade hospeda um grande número de depósitos auríferos (Lobato *et al.*, 2001a, 2001b) como é o caso das jazidas Lamego e Cuiabá (Martins et al., 2016, Ribeiro-Rodrigues et al., 2007).

Dorr II (1969) dividiu o Supergrupo Rio das Velhas nos grupos Nova Lima e Maquiné, da base para o topo (Figura 4). Posteriormente, Schorscher (1978) descreveu fluxos komatiíticos na base da sequência e estabeleceu o Grupo Quebra Osso como unidade basal (Schorscher, 1979). Trabalhos

realizados pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) incluem novamente o Grupo Quebra Osso como unidade do Grupo Nova Lima (Zucchetti et al., 1998, 2000b).

Segundo Zucchetti *et al.* (1998), o Grupo Nova Lima é composto por três unidades: unidade basal vulcânica máfica-ultramáfica, formada por derrames basálticos maciços e almofadados, e derrames komatiíticos com texturas *spinifex* e cumuláticas. Associados ao vulcanismo ocorrem depósitos químicos-exalativos com FFB e *chert*. Delgados níveis de metapelito carbonoso são intercalados com rochas pelíticas clásticas. A unidade intermediária vulcanoclástica, associada a vulcanismo félsico, é composta por tufos e aglomerados dacíticos e ocasionalmente lavas cálcio-alcálicas. As rochas vulcanoclásticas constituem metagrauvasas feldspáticas e quartzosas, normalmente com estruturas sedimentares turbidíticas. Associam-se a xistos carbonosos e FFB. A unidade de topo, com rochas clásticas, apresenta fontes mistas e engloba metapelitos, metapsamitos, metagrauvasas e quartzo xisto. Associam-se filitos carbonosos, rochas cálcio-silicáticas, metamargas e, raramente, paraconglomerados.

Datações U-Pb (SHRIMP e ID-TIMS) efetuadas por Noce et al. (2005) para as rochas vulcanoclásticas das regiões de Rio Acima, Caeté e Morro Vermelho forneceram idades precisas entre  $2792 \pm 11$ ,  $2773 \pm 7$  e  $2751 \pm 9$  Ma, respectivamente, sem conseguir definir, porém, se representam um único longo episódio ou múltiplos episódios de vulcanismo. Tais idades são concordantes à idade de  $2772 \pm 6$  Ma de evento vulcânico félsico Neoarqueano obtida por  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e reportada por Machado et al. (1992) em dacito intercalado com rochas máficas do GBRV. Hartmann et al. (2006) apresentam dados para zircões detríticos de arenitos do topo do Grupo Nova Lima, com idade máxima de deposição  $2749 \pm 7$  Ma.

O Grupo Maquiné ocorre em discordância erosiva sobre o Nova Lima e compreende sedimentos clásticos de fontes mistas, continentais e vulcanogênicas (Zucchetti *et al.*, 1998). É dividido em duas formações: Palmital (O'Rourke, 1957) e Casa Forte (Gair, 1962). A primeira compreende arenitos proximais de ambiente marinho e pelitos turbidíticos quartzosos, enquanto a última exhibe arenitos intercalados a conglomerados depositados em bacia tipo *foreland* (Baltazar e Zucchetti, 2007). Moreira et al. (2016), a partir de análises estatísticas dos 35 zircões mais jovens encontrados do Grupo Maquiné, propõe idade U-Pb de  $2730 \pm 18$  Ma, correspondente à idade máxima de sedimentação dessa unidade.

O conceito das associações de litofácies, que agrupa sequências de rochas em pacotes com relações genéticas, é tratado no trabalho de Eriksson et al. (1994) com abordagem para terrenos arqueanos e utilizado por Baltazar e Zucchetti (2007) com a finalidade de definir quatro ciclos de sedimentação relacionados à deposição de sete associações de litofácies no GBRV (*Figura 5*):

Ciclo 1: deposição das associações vulcânica máfica-ultramáfica e vulcânica-sedimentar-química em ambiente de mar profundo, com a abertura de uma bacia e gradativa diminuição de derrames acompanhada de aumento na deposição química.

Ciclo 2: deposição das associações clástica-sedimentar-química, ressedimentada e costeira, em ambiente plataformal e costeiro, de águas mais rasas e até subaéreo, distante dos centros vulcânicos. Ocorrem estruturas sedimentares que denotam turbiditos, correntes de planície de maré e dunas eólicas.

Ciclo 3: deposição das associações vulcanoclástica e ressedimentada, em ambiente colisional com formação de arcos de ilha. Ocorrem turbiditos proximais e distais, leques aluviais e depósitos fluviais.

Ciclo 4: deposição da associação não-marinha em bacia antepaís. Ocorrem leques aluviais e depósitos fluviais característicos de rios entrelaçados jovens.

O Supergrupo Minas (Dorr II *et al.*, 1957; Dorr II, 1969; Loczy e Ladeira, 1976) é composto por rochas metassedimentares de idade Neoarqueana a Paleoproterozoica (Babinski et al., 1995; Koglin et al., 2014), que representam uma gradação de ambiente continental a plataformal de margem passiva com aproximadamente 6.000 m de espessura. Ocorre em discordância erosiva ou angular sobre o Supergrupo Rio das Velhas (Alkmim e Marshak, 1998).

Dorr II (1969) dividiu o Supergrupo Minas da seguinte maneira (*Figura 4*):

- (i) Grupo Tamanduá: Formação Cambotas;
- (ii) Grupo Caraça: Formações Moeda e Batatal;
- (iii) Grupo Itabira: Formações Cauê e Gandarela; e
- (iv) Grupo Piracicaba: Formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiro e Sabará.

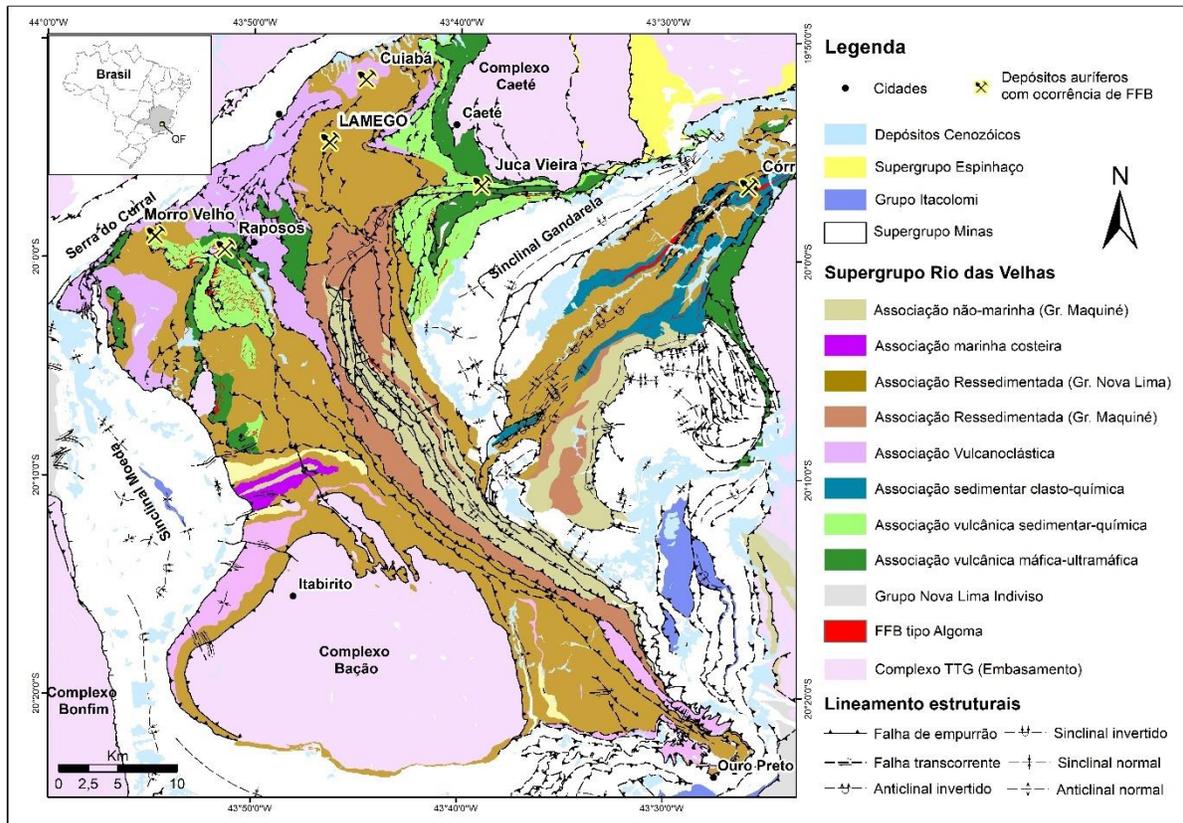


Figura 5 – Mapa geológico do QF (Lobato et al., 2005) com destaque para a subdivisão de associações de litofácies para o Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar e Zucchetti, 2007).

Os grupos Tamanduá e Caraça representam o início da fase *rift* e desenvolvimento para depósitos aluvionares meandrantés, deltáicos a depósitos de praia e subordinadamente sedimentos marinhos transgressivos. São caracterizados pela ocorrência de conglomerados piritíferos, arenitos e pelitos carbonosos (Dorr II, 1969). O Grupo Itabira marca a expansão da bacia e a extensa sedimentação em plataforma continental associada às formações ferríferas do tipo Lago Superior (Cauê) e carbonatos (Rosière et al., 2008). O Grupo Piracicaba é composto essencialmente por arenitos que gradam em direção ao topo para sedimentos finos, descritos como sedimentos de ambiente marinho raso a deltáico (Dorr II, 1969; Alkmim e Marshak, 1998)

Alkmim e Marshak (1998) individualizam o Grupo Sabará como unidade representativa de sedimentos de leques submarinos, colocando-a no topo da sequência separada por discordância regional (Figura 4).

O espectro de idade de sedimentação para o Supergrupo Minas é definido a partir da idade concordante mais nova obtida em zircão detrítico em amostra de quartzito do Grupo Tamanduá, 2676 +/- 23 Ma (Koglin et al., 2014), e idade máxima de deposição obtida em rochas do Grupo Sabará, confirmada pelo método U-Pb ID-TIMS com idades de 2125 +/- 4 Ma (Machado et al., 1992) e 2131 +/- 5 Ma (Machado et al., 1996). A idade de deposição do Grupo Itabira foi definida por Babinski et al. (1995) que datou carbonatos estromatolíticos da Formação Gandarela por Pb-Pb em 2420 +/- 19 Ma.

O Grupo Itacolomi (Barbosa, 1968; Dorr II, 1969; Alkmim e Marshak, 1998) ocorre em discordância angular regional sobre o Supergrupo Minas e tem ocorrência restrita ao sul do QF (Alkmin e Noce, 2006) (Figura 4 e Figura 5). É interpretada como depósito molássico da Orogênese Riacciana – orogenia acrescionária Minas (Alkmin e Noce, 2006; Teixeira et al., 2015).

O QF apresenta um acervo tectônico-estrutural complexo, resultado dos diversos eventos tectônicos aos quais foi submetido durante sua evolução geológica (Alkmim e Marshak, 1998; Baltazar e Zucchetti, 2007; Teixeira et al., 2015). A arquitetura estrutural regional dominante é o padrão domos e quilhas, com os domos de embasamento arqueanos circundados por quilhas arranjadas em sinclinais de grande escala dominadas por rochas do Supergrupo Minas (Chemale Jr. et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998) (Figura 3 e Figura 5).

Baltazar e Zucchetti (2007) reconhecem quatro fases (D1 a D4) de geração de estruturas no GBRV, relacionadas a três eventos deformacionais.

As duas primeiras gerações representam uma deformação progressiva de idade arqueana. A geração D1 representa uma compressão sub-horizontal na direção N-S, em regime dúctil e não-coaxial, caracterizada por dobras e falhas de empurrão com vergência para S. A geração D2 corresponde a falhas de empurrão de direção NW em associação com dobras isoclinais com eixo NW-SE e vergência para SW. As zonas de cisalhamento relacionadas aos empurrões dessa fase estão associadas aos depósitos auríferos, mostrando alteração hidrotermal característica. A idade desse evento pode ser estimada em torno de 2,672 Ga - idade de mineralização de ouro relacionada às estruturas dessa geração (Lobato et al., 2007). Lineações minerais são orientadas N60°E/20°.

A geração D3 está relacionada a um evento extensivo regional, em regime dúctil a dúctil-rúptil, levando ao soerguimento de complexos de núcleos metamórficos do embasamento granito-gnáissico e consequente subsidência das rochas supracrustais, gerando grandes sinclinais. É relacionado à idade

do colapso do orógeno Transamazônico, em torno de 2,095 Ga (Alkmim e Marshak, 1998). A quarta geração sugere deformação em regime compressivo, dúctil-rúptil, não-coaxial. As estruturas, em sua maioria dobras e falhas de empurrão, têm vergência para W. A idade desse evento é Neoproterozoica, relacionada ao Ciclo Orogênico Brasileiro (Chemale Jr. et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998).

Alkmim e Marshak (1998) propõem três eventos deformacionais posteriores à deposição do Supergrupo Minas. O primeiro teria sido colisional, há cerca de 2125 Ga, relacionado à Orogenia Transamazônica, denominada orogenia acrescionária Minas por Teixeira et al. (2015). Resultou na edificação de um orógeno, com frentes de empurrão e dobramentos de deformação epidérmica, todos com vergência para NNW. São observadas, além das dobras, zonas de cisalhamento mergulhando para SE.

O segundo evento ocorreu há cerca de 2095 Ga, quando o regime tectônico se tornou extensional e levou ao colapso do Cinturão Mineiro (Teixeira et al., 2015). Neste contexto, as rochas supracrustais, mais densas, teriam afundado em *grabens*, enquanto as rochas graníticas do embasamento, menos densas e mais quentes, teriam soerguido em *horsts*, criando padrão de domos e quilhas. São observadas zonas de cisalhamento de alto mergulho nas rochas supracrustais ao redor dos domos, cujos indicadores cinemáticos revelam movimento lateral descendente.

Um terceiro evento, de idade Neoproterozoica, ocorreu entre 0,7 e 0,45 Ga relacionado à Orogenia Brasileira (Hasui, 2010). Em novo regime compressivo, estruturas antigas teriam sido reativadas e gerado frentes de empurrão e dobramentos com vergência para W. Tais estruturas mais jovens modificaram e/ou obliteraram as mais antigas. São observadas foliação penetrativa com mergulhos para E e SE, além de lineações de crenulação com direção N-S. Uma descrição detalhada das estruturas relacionadas a cada evento é encontrada em (Alkmim e Marshak, 1998).

## **2.2. Geologia Local: Depósito aurífero de Lamego**

### **2.2.1 Aspectos gerais:**

O depósito aurífero Lamego (Figura 7 e Figura 8), propriedade da empresa AngloGold-Ashanti Corrégo do Sítio Mineração S/A (AGA), é uma das várias jazidas de ouro orogênico encontradas no GBRV (Lobato et al., 2001a), como os depósitos de classe mundial Cuiabá e Morro Velho, e outros de menor expressão como Raposos, São Bento, Córrego do Sítio, Juca Vieira e Roça Grande

(Ladeira, 1988; Junqueira, 1997; Lobato et al., 2001a; Lobato et al., 2001b; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Martins et al., 2016; Kresse et al., 2018).

Está localizado na divisa dos municípios Sabará e Caeté, Minas Gerais, 20 km a leste de Belo Horizonte e a 5 km do depósito de classe mundial Cuiabá, também propriedade da AGA. Atualmente apresenta recursos minerais estimados de 12,13 milhões de toneladas, com um teor médio de ouro de 3,06 g/t (comunicação pessoal - AGA, 2019).

O depósito é explorado pela AGA no subterrâneo desde 2009, apresentando 4 corpos principais de minério: Cabeça de Pedra, Carruagem, Arco da Velha e Queimada. Atualmente a mina alcançou o nível 9 no corpo Carruagem, onde estão concentrados grande parte dos esforços operacionais, e os níveis 4 e 3 nos corpos Queimada e Arco da Velha, respectivamente. O corpo Cabeça de Pedra, aberto até o nível 2, não se encontra em operação atualmente.

### 2.2.2 Contexto estrutural:

Em um contexto regional o depósito Lamego está inserido no bloco Nova Lima - Caeté (Baltazar e Zucchetti, 2007) (Figura 6), que compõe a porção centro-nordeste do QF, o qual é separado do bloco São Bartolomeu, ao sul, pela falha de empurrão “Bem Te Vi” e pela zona de cisalhamento São Vicente – Raposos; e do bloco Santa Barbára, a leste, pela falha do “Fundão”.

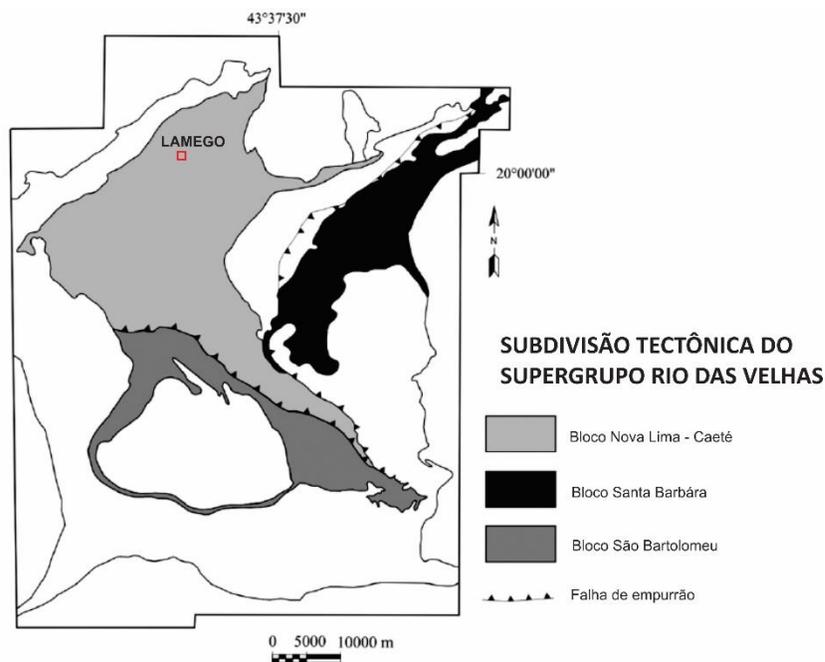


Figura 6 – Domínios litoestruturais do greenstone belt Rio das Velhas segundo Baltazar e Zucchetti (2007)

No trabalho realizado por Lobato et al. (2005), a região do depósito Lamego está localizada na folha Belo Horizonte em escala 1:50.000 (*Figura 7*). Em escala regional é possível reconhecer a dobra, denominada dobra “Lamego”, a qual hospeda a mineralização e é mapeada como parte da Unidade Mestre Caetano. As unidades adjacentes à dobra são da base para o topo Unidade Córrego do Sítio e Unidade Mindá (*Figura 7*).

Segundo Zucchetti et al. (1998) as unidades acima citadas são caracterizadas por:

- (i) Unidade Mestre Caetano: predomínio de metagrauvas vulcanogênicas, com intercalações subordinadas de metatufos, metapelitos e raras ocorrências de formação ferrífera quartzosa, xisto carbonático vulcanogênico (Lapa Seca), metaconglomerado e metandesito.
- (ii) Unidade Córrego do Sítio: composta essencialmente por metapelitos bandados com lentes subordinadas de metapsamitos, além de delgados níveis de xisto carbonoso e formação ferrífera bandada (FFB).
- (iii) Unidade Mindá: caracteriza-se pela intercalação de metapsamitos e metapelitos, com predomínio dos primeiros. Subordinadamente, associam-se delgados níveis de xisto carbonoso e FFB.

Sales (1998) apresenta a configuração geológica do depósito Lamego em uma primeira abordagem em relação à litoestratigrafia local. Posteriormente, Villanova (2011), Martins (2011) e Martins et al. (2016) realizaram trabalhos de detalhe que envolveram petrografia e mapeamento de superfície e subsuperfície que ajudaram a definir a sequência estratigráfica encontrada em Lamego e as principais estruturas associadas (*Figura 8*).

Segundo Sales (1998) e Martins et al. (2016) a estratigrafia do depósito Lamego é definida, da base para o topo, pelo seguinte pacote de rochas (*Figure 2*):

Basalto com possível variação para andesito, representado por xistos a clorita, carbonato, quartzo, sericita e plagioclásio, com espessura variando entre 150 a 200 m. Sales (1998) classifica as rochas vulcânicas da base da sequência como basaltos toleíticos do tipo TH2 (progressivamente mais abundantes em direção aos níveis estratigráficos mais elevados dos *greenstone belts*), seguindo classificação de Condie (1976, 1981). Segundo Sales (1998), os prováveis protólitos para a unidade vulcânica representam rochas transicionais entre basaltos e andesitos com alguma afinidade cálcio-alcalina, assim como basaltos modernos.

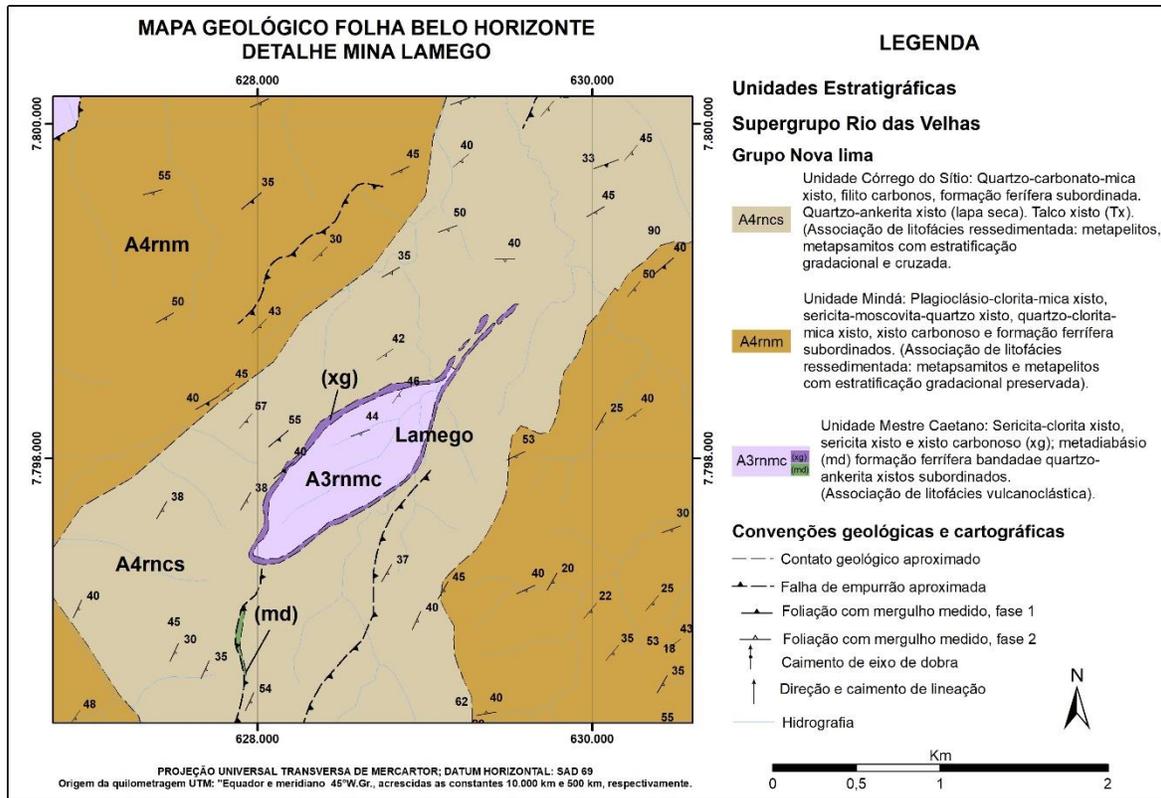


Figura 7 – Geologia da dobra Lamego e seu entorno, modificado a partir do mapa geológico da folha Belo Horizonte, 1:50.000. Depósito Lamego associado a unidade Mestre Caetano. Rochas encaixantes pertencentes às unidades Córrego do Sítio e Mindá. Fonte: Lobato et al. (2005).

Sobreposto à vulcânica e em contato brusco encontra-se a FFB e *chert* ferruginoso a carbonoso, com espessura que varia entre 1 a 8 m, localmente chegando a 15 m. A FFB varia tanto lateralmente quanto verticalmente para *chert*. Essas rochas apresentam bandamento composicional característico, de espessura submilimétrica a centimétrica, que define uma laminação. As bandas claras são dominadas por quartzo, com carbonato subordinado, enquanto as bandas escuras são ricas em carbonato, geralmente siderita, pobres em quartzo e com ocorrência de lâminas de matéria carbonosa. Localmente há ocorrência de FFB a magnetita.

Sobreposto e concordante à FFB e/ou *chert* está o pelito carbonoso, representado por filito/xisto de coloração escura, composto essencialmente por quartzo, sericita e matéria carbonosa. Tem entre 1 a 5 m, podendo chegar até a espessura máxima de 10 m.

No topo e concordante ao pelito carbonoso, ocorre pelito com estrutura turbidítica, com contribuição epiclástica e vulcanoclástica, composto por sericita, quartzo, carbonato, clorita e matéria carbonosa.

Zonas de intensa silicificação ocorrem na forma de veios e massas de quartzo fumê e subordinamente quartzo leitoso, geralmente associadas às FFB, *chert*, pelito carbonoso e ao contato entre essas litologias.

Intrusões de diabásio ocorrem como diques e *sills*, com granulação fina a média e foliação associada às porções próximas às encaixantes. São compostas por hornblenda, actinolita-tremolita, epidoto, clorita, carbonato, plagioclásio, sericita e quartzo.

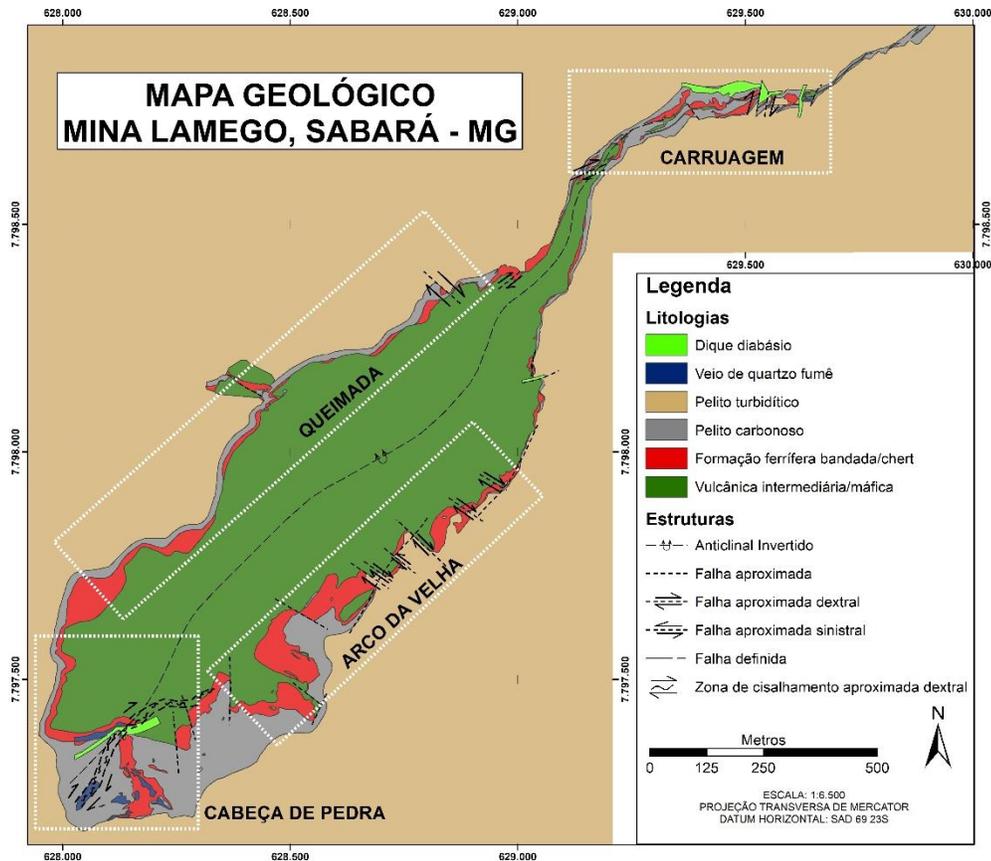


Figura 8 – Mapa geológico de Lamego com destaque para os quatro corpos de minério: Carruagem, Cabeça de Pedra, Queimada e Arco da Velha. Modificado de Villanova (2011).

### 2.2.3 Geologia estrutural:

A estrutura do depósito apresenta perímetro, em superfície, de aproximadamente 4,8 km e uma espessura que chega a 450 m (Figura 8). É uma dobra reclinada, isoclinal, cilíndrica e sem raiz, com o traço axial apresentando direção NW-SE e caimento entre 20° e 30° (Martins et al., 2016). A dobra é bem delimitada pela associação de FFB/*chert* ferruginoso capeada por camada de pelito carbonoso menos espessa. Em relação à disposição dos corpos de minério na estrutura, os corpos Queimada e

Arco da Velha encontram-se nos flancos invertido e normal, respectivamente. O corpo Cabeça de Pedra está localizado na zona de charneira na porção SW da dobra, enquanto o corpo Carruagem está localizado no extremo NE (*Figura 8*). Trabalhos recentes como Martins et al. (2016) e Morales et al. (2016) entendem o corpo Carruagem como a região de saída e junção dos flancos. Recentemente, porém, com a abertura de novos níveis e exposições, ventila-se a possibilidade de o corpo Carruagem ser também região de charneira de dobra em uma estrutura redobrada, como já proposto por Fernandes et al. (2016) para a dobra Cuiabá, o que implicaria em uma outra região de abertura da dobra ainda desconhecida.

Sales (1998), Martins (2011) e Martins et al. (2016) descrevem o acervo estrutural no depósito Lamego e separam conjuntos de estruturas associadas a eventos deformacionais que se sobrepõe e geram um contexto estrutural complexo e polifásico. Sales (1998) define dois conjuntos principais de estruturas, referentes a estruturas planares e lineares, denominadas respectivamente S1-L1 e S2-L2, sendo as estruturas do tipo 2 as mais recorrentes dentro do depósito. Martins (2011) e Martins et al. (2016) definem duas gerações de estruturas G1 e G2 nomeadas por Martins et al. (2016). Estruturas relacionadas à G1 se desenvolveram em uma deformação progressiva de caráter predominantemente dúctil-rúptil e englobam estruturas com orientação NE-SW e mergulho para SE. Dentro dessa geração de estruturas destacam-se a dobra Lamego, a foliação S1-2 (estrutura planar de maior representatividade), e a lineação de estiramento mineral L1-2 que é subparalela ao eixo da dobra Lamego. Estruturas G2 são essencialmente rúpteis, orientadas N-S, preferencialmente mergulhando para W. Destacam-se clivagem de crenulação S3, dobras abertas e falhas.

#### ***2.3.4 Alteração hidrotermal e mineralização***

Sales (1998) identificou 5 paragênese hidrotermais, I (menos alterada) a V (mais alterada), relacionadas à unidade vulcânica. Variam proporções entre actinolita, epidoto, albita, quartzo, carbonatos, sericita e localmente sulfetos. A alteração hidrotermal, porém, varia de acordo com a rocha hospedeira e é representada pelos tipos principais: clorita, carbonato, sericita, quartzo, e sulfeto, geralmente desenvolvida paralelamente à foliação S1-2 (Martins et al., 2016).

A mineralização é estruturalmente controlada e ocorre essencialmente de duas maneiras: (i) ouro incluso em sulfetos, relacionada a processos de substituição das bandas ricas em ferro nas FFB e *chert* por sulfetos, principalmente pirita, pirita arsenical, pirrotita e arsenopirita; (ii) ouro livre presente em veios de quartzo, predominantemente fumês, associados a zonas de intensa silificação

na FFB, *chert*, pelitos carbonosos e nos contatos entre essas litologias. Datação realizada em grãos de monazita pelo método U-Pb SHRIMP em rocha máfica mineralizada indica que a idade de mineralização do depósito Lamego é 2730 +/- 42 Ma (Martins et al., 2016).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Amostragem

Buscando a melhor cobertura e representatividade das rochas da jazida Lamego foram amostrados os seguintes litotipos: FFB e *chert* ferruginoso considerados sem ou com pouca alteração hidrotermal, FFB/*chert* hidrotermalmente alterados (englobando amostras de minério), rochas vulcânicas e pelito carbonoso.

##### 3.1.1 FFB e *chert* ferruginoso

Um total de vinte e quatro amostras de FFB e *chert* ferruginoso da jazida Lamego foram coletadas em furos de sondagem (09 amostras) e afloramentos de galerias subterrâneas (15 amostras) (*Tabela I*).

Com o intuito de selecionar amostras que melhor registrem as características primárias, a amostragem procurou atender requisitos básicos no que se diz respeito às características macroscópicas das FFB e *chert* que denotam condições de mínima alteração hidrotermal. Dessa forma, a amostragem pautou-se nos seguintes aspectos:

- (i) Bandamento/laminação característicos das FFB e *chert* preservados;
- (ii) Amostras com ocorrência mínima ou com ausência de sulfetos;
- (iii) Amostras com ocorrência mínima de venulações;
- (iv) Amostras com ocorrência mínima de feições indicativas de alteração hidrotermal (e.g.: alteração a carbonato).

Visando a melhor cobertura e representatividade espacial dessas rochas ao longo de toda a dobra Lamego, foram amostrados os quatro corpos de minério (Cabeça de Pedra, Arco da velha, Carruagem e Queimada) e em todos os níveis abertos e com acesso disponível (*Figura 9A, 9B e 9C*).

### ***3.1.2 FFB e chert hidrotermalmente alterados***

Onze amostras de FFB hidrotermalmente alteradas, a magnetita e/ou carbonato, além de amostras de minério (quartzo/sulfetos dominadas) foram coletadas nos corpos Carruagem e Queimada, todas em testemunhos de sondagem (*Tabela 2 - Amostras de FFB e chert ferruginoso hidrotermalmente alteradas coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.*) (*Figura 9A, 9B e 9C*).

### ***3.1.3 Rochas vulcânicas***

Procurou-se amostrar as porções que guardam evidências das características primárias das rochas. Foram coletadas nove amostras, todas em testemunhos de sondagem, sendo três amostras de cada um dos seguintes corpos: Cabeça de Pedra, Carruagem e Queimada (*Tabela 3*) (*Figura 9A, 9B e 9C*).

Integraram-se ao trabalho cinco amostras de rocha máfica retiradas do trabalho de Araújo (2018), sendo três amostras do corpo Queimada e duas amostras do corpo Carruagem (*Tabela 3*).

### ***3.1.4 Pelito carbonoso***

Três amostras de pelito carbonoso, duas do corpo Cabeça de Pedra e uma do Carruagem, todas em testemunhos de sondagem (*Tabela 4*) (*Figura 9A, 9B e 9C*).

Para controle espacial das amostras coletadas ao longo das galerias e furos de sondagem utilizou-se o *software Leapfrog Geo 5.0.4* (*Figura 9A, 9B e 9C*).

Tabela 1 – Amostras de FFB e *chert* ferruginoso coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.

Amostra	Litotipo	Corpo de minério	Nível
01QN03LE	FFB	Queimada	3
02QN03LE	FFB	Queimada	3
17QN0400	FFB	Queimada	4
17QN0401*	<i>Chert</i>	Queimada	4
17QN0402*	FFB	Queimada	4
06AVN2LE	FFB	Arco da Velha	2
12AVN01	FFB	Arco da Velha	1
13AVN0200	FFB	Arco da Velha	2
13AVN0201*	FFB	Arco da Velha	2
02CR2737	FFB	Carruagem	4/5
03CR2741	<i>Chert</i> ferruginoso	Carruagem	4/5
04CRN6.1B	FFB	Carruagem	6
07CRN6.1C	FFB	Carruagem	6
08CRN8.1	FFB	Carruagem	8
09CRN4.1Sub	FFB	Carruagem	4
10CRN8.1Asc	<i>Chert</i> ferruginoso	Carruagem	8
11CRN7.1	<i>Chert</i> ferruginoso	Carruagem	7
24CR2803	FFB	Carruagem	8/9
10CP0039	<i>Chert</i> ferruginoso	Cabeça de Pedra	6
14CP0039	<i>Chert</i> ferruginoso	Cabeça de Pedra	6
20CP0036	FFB	Cabeça de Pedra	6
45QM1234**	<i>Chert</i> ferruginoso	Queimada	5/6
21QN0401	<i>Chert</i> ferruginoso	Queimada	4
44QM1234**	FFB	Queimada	5/6
LAM01CR***	FFB	Carruagem	-
LAM02CR***	FFB	Carruagem	-
LAM18CR***	FFB	Carruagem	-
LAM03QM***	<i>Chert</i> ferruginoso	Queimada	-
LAM05QM***	<i>Chert</i> ferruginoso	Queimada	-
*Banda de carbonato/ <i>chert</i>			
**Sem descrição de lâmina delgada			
*** Amostras retiradas de Araújo (2018)			

Para complementação dos dados foram adicionadas cinco amostras de FFB/*chert* ferruginoso, três do corpo Carruagem e duas do corpo Queimada, retiradas do trabalho de Araújo (2018), onde foram adotados critérios de amostragem similares aos aqui descritos.

Tabela 2 - Amostras de FFB e chert ferruginoso hidrotermalmente alteradas coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.

Amostra	Litotipo	Corpo	Nível
01CR2726	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	8
05CR2760	Minério	Carruagem	8/9
06CR2765	Minério	Carruagem	8/9
07CR2767	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	8/9
33QM1184	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	4/5
41QM1228	Minério	Queimada	4/5
46QM1234	Minério	Queimada	4/5
47QM1235	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	5
48CR0160	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	9
49CR0168	Minério	Carruagem	9
50QM1227	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	5

Tabela 3 - Amostras de rochas vulcânicas coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.

Amostra	Litotipo	Corpo	Nível
11CP0038	Vulcânica máfica	Cabeça de Pedra	6
15CR2788	Vulcânica máfica	Carruagem	8/9
17CR2790	Vulcânica máfica	Carruagem	8/9
18CR2787	Vulcânica máfica	Carruagem	8/9
27CP0042	Vulcânica máfica	Cabeça de Pedra	5/6
30QM1179	Vulcânica máfica	Queimada	4/5
37QM1173	Vulcânica máfica	Queimada	4/5
08CP0039	Vulcânica máfica	Cabeça de Pedra	6
31QM1179	Vulcânica máfica	Queimada	4/5
CRN1Mafica002*	Vulcânica máfica	Carruagem	2
CRN1MaficaA001*	Vulcânica máfica	Carruagem	1
QUN1Mafica001*	Vulcânica máfica	Queimada	1
QUN1Mafica002*	Vulcânica máfica	Queimada	2
QUN2Mafica001*	Vulcânica máfica	Queimada	1

\*Amostras retiradas de Araújo (2018)

Tabela 4 - Amostras de pelito carbonoso coletadas e utilizadas para petrografia e geoquímica.

Amostra	Litotipo	Corpo	Nível
19CR2793	Pelito Carbonoso	Carruagem	8/9
29CP0040	Pelito Carbonoso	Cabeça de Pedra	5/6
36CP0049	Pelito Carbonoso	Cabeça de Pedra	5/6

### 3.2. Estudos petrográficos

Para todas as amostras coletadas foi realizada a petrografia macroscópica visando filtrar aquelas consideradas com melhor grau de preservação das estruturas e feições primárias para a realização da petrografia microscópica.

Foram confeccionadas trinta e uma lâminas delgadas polidas, sendo que desse total dezoito são de FFB/*chert* ferruginoso, quatro de rocha vulcânica, duas de pelito carbonoso e sete de FFB alterada/minério (*Tabela 5*). Foi utilizado microscópio óptico de luz refletida e transmitida modelo DM2500P da marca Leica.

Duas lâminas foram selecionadas para análise por MEV (microscópio eletrônico de varredura) do Centro de Microscopia da UFMG com sensor EDS (energy-dispersive detector) acoplado (*Tabela 5*). Essas amostras foram metalizadas com lâmina delgada de grafita de modo a torná-las condutoras, adequando-as a análise ao MEV. O MEV utilizado foi um Quanta 200 FEI, equipado com sistema de microanálise por espectrometria de raios X (EDS) Bruker Nano.

As análises foram executadas com tensão de aceleração de elétron entre 15kV e 30kV, e analisadas no MEV através de imagens formadas pelo detector de elétrons retroespalhados (BSE – *backscattering electron*).

Tabela 5 – Amostras destinadas à microscopia óptica e eletrônica.

-	Número de amostras				
	Lâmina	FFB/ <i>chert</i>	Vulcânica	FFB alterada	Pelito carbonoso
Lâminas delgadas polidas	18	4	7	2	31
Lâminas delgadas metalizadas	2	-	-	-	2

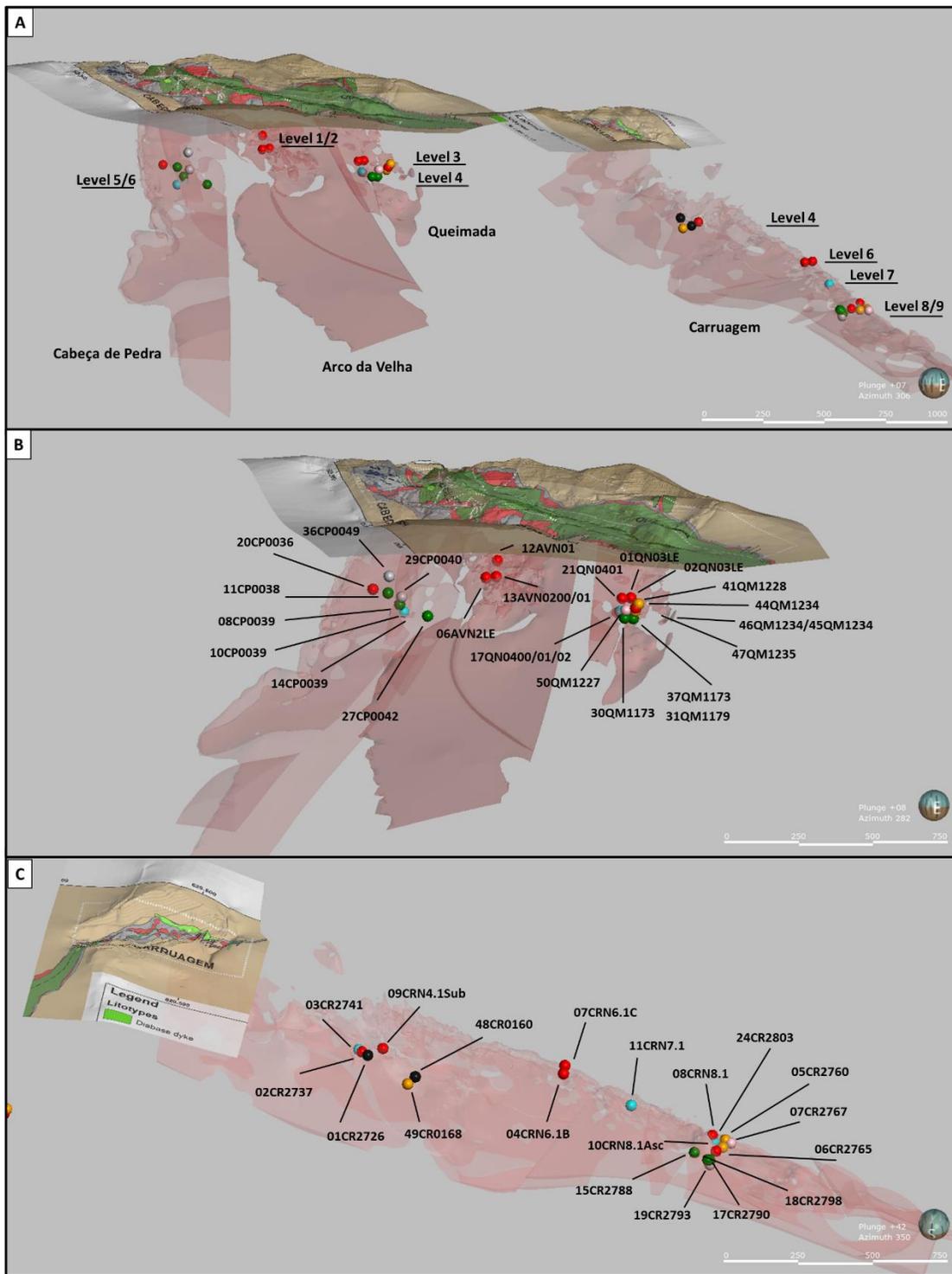


Figura 9 – A) Localização das amostras coletadas nos corpos Carruagem, Queimada, Cabeça de Pedra e Arco da Velha. FFB: vermelho; Chert ferruginoso: azul claro; FFB alterada a carbonato: rosa; FFB alterada a magnetita: preta; Rochas vulcânicas: verde; Minério: laranja; Pelito carbonoso: cinza; B) Identificação das amostras nos corpos Cabeça de Pedra (esquerda), Arco da Velha (centro) e Queimada (direita) – visão em perspectiva; C) Identificação das amostras no corpo Carruagem – vista de planta.

### 3.3. Métodos analíticos

As análises geoquímicas de rocha total foram realizadas no laboratório da Bureau Veritas Minerals, no Canadá. Do total de quarenta e sete amostras, foram analisadas vinte e quatro de FFB e *chert* ferruginoso, nove de rocha vulcânica, três de pelito carbonoso e onze de FFB alterada e minério. O estudo engloba elementos maiores, menores e traços, incluindo os ETR: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ba, Ni, Sc, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, C, S, Mo, Cu, Pb, Zn, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Tl e Se. Para cinco amostras de FFB e *chert* ferruginoso foram feitas análises para distinção entre carbono orgânico e inorgânico.

Para a quantificação dos elementos maiores e alguns elementos menores é feita a dissolução agressiva das amostras pela ação do borato de lítio e análise por ICP-ES/MS. Para a maioria dos elementos menores e os elementos traços, incluindo os ETR, a análise de concentração é feita por ICP-MS após dissolução por borato de lítio e/ou água-régia. As concentrações de C e S foram determinadas pelo método analítico Leco.

Os resultados obtidos foram tratados no Excel e no *software* ioGAS<sup>TM</sup>.

### 3.4. Normalização e padronização das amostras

#### 3.4.1 Amostras de FFB/*chert*, FFB hidrotermalmente alteradas e pelito carbonoso

A normalização geoquímica dos ETR + Y foi realizada pelo folheio PAAS (McLennan, 1989) baseando-se na literatura com o intuito de destacar as anomalias que representam a gênese das FFB e *chert* ferruginosos.

Segundo Lawrence e Kamber (2006) os padrões marinhos de ETR + Y são reconhecidos pelo seu distanciamento da curva suave normalizada pelo folhelho. A concentração esperada de um determinado ETR + Y pode ser aproximada pela interpolação dos valores dos ETR vizinhos. Porém, nas situações em que um determinado ETR comporta-se de forma anômala, o mesmo não é incluído no cálculo. Lawrence e Kamber (2006) definem anomalias marinhas como:

$L_n/L_n^*$ , onde  $L_n$  = concentração do lantanídeo normalizado pelo folhelho e  $L_n^*$  = concentração normalizada esperada e calculada a partir das seguintes equações:

$$- La_n^* = Pr_n^*(Pr_n / Nd_n)^2 \qquad - Ce_n^* = Pr_n^*(Pr_n / Nd_n)$$

$$- \text{Eu}_n^* = (\text{Sm}_n^2 * \text{Tb}_n)^{1/3}$$

$$- \text{Gd}_n^* = (\text{Tb}_n^2 * \text{Sm}_n)^{1/3}$$

$$- \text{Y}_n^* = \text{Y}_n / (0,5\text{Er}_n * 0,5\text{Ho}_n)$$

### 3.4.2 Amostras de rochas vulcânicas

A normalização foi feita segundo o condrito de Sun e McDonough (1989) para o diagrama de ETR, e segundo o manto primitivo de Palme e O'Neill (2014) para o diagrama multielementar (elementos maiores e traços).

A escolha desses padrões se deu a partir das principais literaturas que apresentam estudos para rochas vulcânicas máficas e foram utilizadas para o presente trabalho: Peate et al. (1997), Zucchetti (1998), Hollocher et al. (2012), Martins et al. (2017) e Szilas (2018).

## 3.5. Breve revisão sobre geoquímica de FFB

### 3.5.1 Aspectos gerais

Formações ferríferas bandadas (FFB) são rochas sedimentares químicas bandadas e/ou laminadas que contém 15% ou mais de Fe total em sua composição. O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas ricas em minerais de ferro (carbonatos, silicatos, óxidos) e bandas pobres em ferro, dominadas por chert, quartzo e carbonato (James, 1954; Klein, 2005; Bekker et al., 2010). James (1954) definiu em um conceito mais amplo as Formações Ferríferas (do inglês *iron formations* – IF), não necessariamente bandadas, em 4 fácies: óxido, silicato, carbonato e sulfeto. Fácies óxido é dominada por magnetita e hematita, enquanto a fácies carbonato é composta essencialmente por siderita e ankerita. A fácies silicato pode apresentar uma mineralogia mais complexa, podendo conter grunerita, cummingtonita, greenalita, stilpnomelano, entre outros. Atualmente é sugerido que a fácies sulfeto definida por James (1954) seja relacionada aos folhelhos carbonosos piríticos e assim não pertenceriam a uma variedade de formação ferrífera *sensu strictu* (Bekker et al., 2010).

Formações ferríferas precipitaram ao longo de todo o Pré-Cambriano, mas sua grande maioria se formou entre 2,8 e 1,85Ga, do Neoproterozoico ao Paleoproterozoico (Konhauser et al., 2017). Essas rochas são geralmente classificadas em dois tipos de acordo com o ambiente de deposição, que representam, na verdade, extremos de um espectro de variedades intermediárias. Essa classificação distingue as formações ferríferas do tipo Lago Superior e do tipo Algoma (Gross, 1980).

As formações ferríferas do tipo Lago Superior são geralmente associadas a ambientes dominados por sedimentos como plataformas continentais extensas e evoluídas em margens passivas, apresentando carência de correlações diretas com rochas vulcânicas na sequência estratigráfica (Klein, 2005; Beukes and Gutzmer, 2008; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017). Devido à grande extensão e espessura significativa desses depósitos, eles são responsáveis pela maior parte do suprimento de minério de ferro global (Konhauser et al., 2017). Exemplos clássicos incluem: Supergrupo Transvaal na África do Sul, Supergrupo Minas no Brasil, Supergrupo Krivoy Rog na Ucrânia, Bacia Hamersley na Austrália.

As formações ferríferas do tipo Algoma são geneticamente associadas a rochas vulcânicas máficas/ultramáficas a intermediárias e em menor escala rochas félsicas, e também folhelhos carbonosos, grauvacas e sedimentos de ambiente marinho profundo (Beukes and Gutzmer, 2008; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017). Por estarem associadas ao ambiente de fundo oceânico, a formação e deposição dessas rochas está intimamente ligada a processos hidrotermais exalativos relacionados a vulcanismo submarino (Gross, 1980; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016). Essas rochas são preservadas principalmente em terrenos do tipo *greenstone belt* e são encontradas em diversos crátons ao redor do mundo, sendo hospedeiras de diversas mineralizações auríferas (Condie, 1981; Bekker et al., 2010).

A revisão sobre geoquímica e implicações para ambiente deposicional apresentada a seguir tem enfoque nas formações ferríferas do tipo Algoma, objeto de estudo do presente trabalho.

### ***3.5.2 Geoquímica e implicações para modelos deposicionais***

Elementos traços ETR + Y, bem como valores isotópicos de precipitados marinhos, incluindo as FFB, fornecem uma gama de dados que remetem à composição da água do mar e sua evolução ao longo do tempo geológico (Bau and Dulski, 1996; Bolhar et al., 2004; Bolhar et al., 2005; Planavsky et al., 2010; Konhauser et al., 2017). A partir disso, muito pode-se inferir do ambiente deposicional e fontes dos componentes de formação das FFB: componentes hidrotermal, hidrogeno (marinho) e clástico (Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

Ao se analisar os valores de ETR + Y normalizados em relação a folhelhos, como PAAS (Post-Archean Australian Shale, McLennan, 1989) e MUQ (Queensland alluvial shale composite, Kamber et al., 2005), diversos autores conseguiram criar uma correlação bem definida entre os padrões encontrados nas FFB e nas águas dos oceanos modernos, com variações principalmente relacionadas

à influência da contribuição hidrotermal (*Figura 10*) (Bau e Dulski, 1996; Bolhar et al., 2004; Bolhar et al., 2005; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

Bolhar et al. (2004) e Bolhar et al. (2005), com a premissa de que a compreensão da geoquímica dos ETR + Y dos oceanos passados é baseada no entendimento do comportamento dos ETR + Y nos oceanos modernos, apresentam as principais características geoquímicas das águas marinhas atuais normalizadas em relação a folhelhos (*Figura 10*):

- (i) Anomalias negativas de Ce, relacionadas a oxidação do Ce trivalente para o Ce tetravalente, menos solúvel e mais facilmente carregado;
- (ii) Anomalias positivas de La, Y e Gd associadas à estabilidade desses elementos em solução devido a configuração dos elétrons mais internos da camada 4f;
- (iii) Razões supercondríticas Y/Ho;
- (iv) Empobrecimento relativo dos ETR leves e intermediários em relação aos ETR pesados associado à maior estabilidade e afinidade dos pesados (o raio iônico decresce dos leves para os pesados) nas ligações com íons carbonato, por exemplo, aumentando a retenção desses elementos em solução.

A razão Y/Ho é baseada na similaridade entre as propriedades geoquímicas existente entre esses dois elementos (Bau e Dulski, 1996). Valores condríticos, próximos a 27, são geralmente associados a sedimentos clásticos e fluidos de alta temperatura (Bau e Dulski, 1996, 1999). Valores supercondríticos ( $Y/Ho > 27$ ) são relacionados a água marinha dada a maior susceptibilidade do Ho às reações e carregamento por partículas e compostos marinho solúveis (Bau et al., 1997; Bolhar et al., 2004)

A partir de comparações com águas dos oceanos modernos e baseada em diversos trabalhos com foco em geoquímica de FFB e sedimentos Arqueanos, Gourcerol et al. (2016) e Thurston et al. (2012) propõem que o padrão de ETR + Y normalizado pelo folhelho das águas marinhas Arqueanas seria caracterizado por:

- (i) Ausência de anomalias negativas significativas de Ce, sugerindo formação das FFB em ambiente predominantemente anóxico ou com pouca disponibilidade de oxigênio;

- (ii) Leve anomalia positiva de La, geralmente associada à maior estabilidade desse elemento em relação aos ETR vizinhos;
- (iii) Razão Y/Ho supercondrítica ( $Y/Ho > 27$ );
- (iv) Empobrecimento relativo dos ETR leves em relação aos ETR pesados;
- (v) Anomalias positivas bem desenvolvidas de Eu, interpretadas como resultado da influência de fluidos hidrotermais de alta temperatura ( $> 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) devido à redução do Eu trivalente (*Figura 10*).

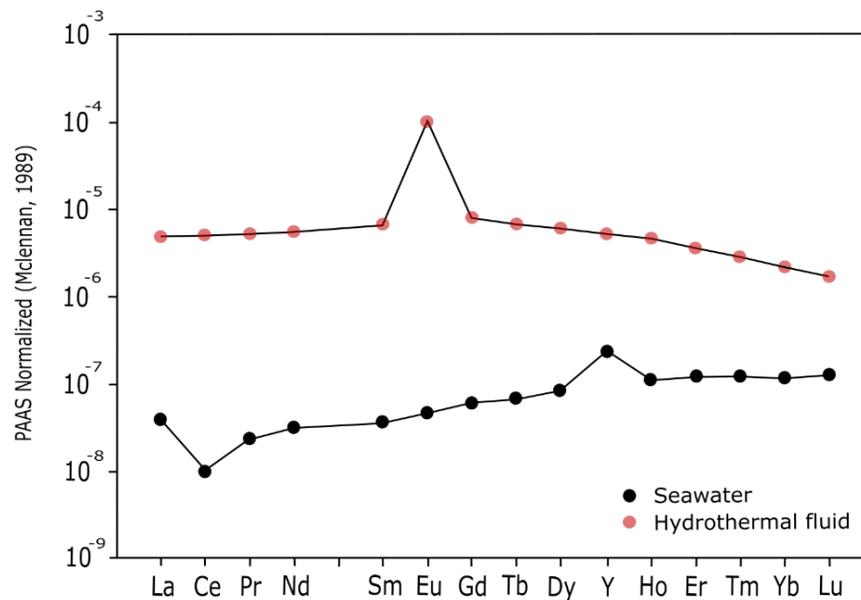


Figura 10 – Padrões de ETR + Y normalizados ao PAAS (McLennan, 1989) para fluido hidrotermal (Bau e Dulski, 1999) e fluido hidrotermal vulcanogênico (Alibo e Nozaki, 1999).

Partindo-se do princípio explicitado anteriormente de que a geoquímica das FFB reflete as componentes envolvidas durante seu processo de formação/precipitação, espera-se que a química das FFB arqueanas seja semelhante à química dos oceanos de sua época (*Figura 10*). Com o intuito de quantificar a relação entre os componentes de formação dessas rochas, trabalhos como os de Gourcerol et al. (2016) e Alexander et al. (2008) apresentam uma estimativa da contribuição hidrotermal *versus* a contribuição hidrógena (*Figura 11 e Figura 12*).

Alexander et al. (2008) propõem curvas de mistura entre a água marinha (Alibo e Nozaki, 1999) e fluidos hidrotermais de alta temperatura (Bau & Dulski, 1999) para as seguintes razões:  $Eu/Sm \times Y/Ho$ ,  $Sm/Yb \times Y/Ho$  e  $Eu/Sm \times Sm/Yb$  (*Figura 11A, 11B e 11C*). Essas curvas permitem estimar a

porcentagem de contribuição de fluido hidrotermal na precipitação das FFB, variando de 0,1 a 5%, a depender das razões de mistura entre os componentes.

Gourcerol et al. (2016) apresentam as razões  $Eu/Sm \times Sm/Yb$  e propõem uma nova curva calculada de mistura na qual os extremos são também a água marinha (Alibo e Nozaki, 1999) e um fluido hidrotermal de alta temperatura (Thurston et al., 2012) (*Figura 12*). Como utilização prática dessa estimativa, tenta-se prever a posição de precipitação da FFB dentro da bacia, sendo quanto maior a anomalia de Eu, maior a contribuição hidrotermal e conseqüentemente maior a proximidade com as fontes exalativas hidrotermais.

Muitos trabalhos têm mostrado anomalias e padrões de ETR + Y semelhantes para as FFB Arqueanas, sendo demonstrado que processos pós deposicionais, como diagênese, metamorfismo e alteração hidrotermal têm efeitos negligenciáveis nos resultados obtidos (Bau, 1991; Bau, 1993; Bau e Dulski, 1996; Bolhar et al., 2005; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

De maneira geral, o conteúdo de ETR nos fluidos hidrotermais pós deposicionais é extremamente baixo e não gera modificações significativas nos padrões de ETR da rocha hospedeira, a não ser em casos extremos onde a razão da interação fluido/rocha ultrapassa valores entre  $10^2 - 10^3$  (Bau, 1991). Nesses casos, assim como em processos intempéricos, pode haver impacto significativo na distribuição dos ETR, produzindo efeitos variados nas razões  $Sm/Yb$  e  $Eu/Sm$  a depender de fatores como razão fluido/rocha, tipo de fluido, formação e decomposição de minerais (Bau, 1993).

Processos atuantes durante a deposição e precipitação podem, porém, causar modificações mais profundas. Contaminação detrítica pode afetar significativamente os padrões de ETR + Y, produzindo geralmente padrões normalizados mais planos e valores condríticos para a razão  $Y/Ho$  (Gourcerol et al., 2016). Além disso, carreamento dos ETR + Y durante a precipitação de oxihidróxidos de Fe pode gerar o fracionamento desses elementos e conseqüentemente uma alteração nos padrões esperados, por exemplo com anomalias negativas de La e Y (Bau, 1999; Gourcerol et al., 2016).

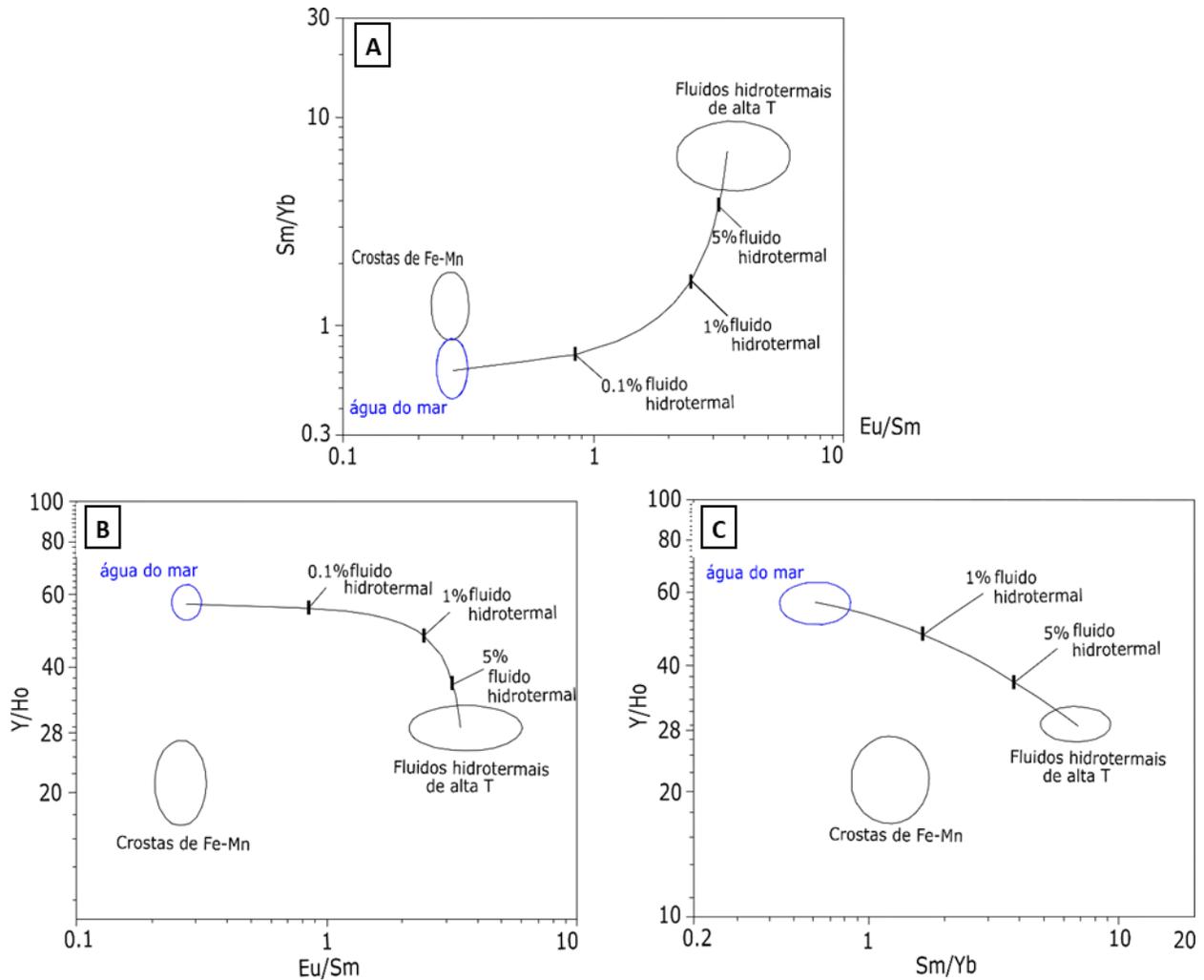


Figura 11 – Diagramas para estimativa da contribuição relativa entre componentes hidrogeno (água marinha) e hidrotermal vulcanogênico de alta temperatura propostos por Alexander et al. (2008). A)  $Eu/Sm$  x  $Sm/Yb$ ; B)  $Eu/Sm$  x  $Y/Ho$ ; C)  $Sm/Yb$  x  $Y/Ho$ .

Em relação à contaminação detrítica as FFB apresentam, geralmente, baixo aporte terrígeno, representado por baixas concentrações de  $Al_2O_3$  (<1 wt%) e elementos traços típicos de rochas crustais (Ti, Zr, Th, Hf, e Sc < 20 ppm) (Konhauser et al., 2017). Trabalhos como os de Gourcerol et al. (2016) e Araújo (2018) fazem uma quantificação e qualificação dessa contaminação clástica nas FFB. Utilizam gráficos como os propostos por Boström (1970), que propõe a razão  $Al/(Al + Fe + Mn)$  vs.  $Fe/Ti$  para acessar a contaminação detrítica, e por Bhatia and Crook (1986) (diagrama ternário La-Th-Sc) e McLennan et al. (1993) (gráfico binário  $Y/Ni$  x  $Cr/V$ ) para distinção das fontes, por exemplo, entre ultramáfica, máfica e félsica.

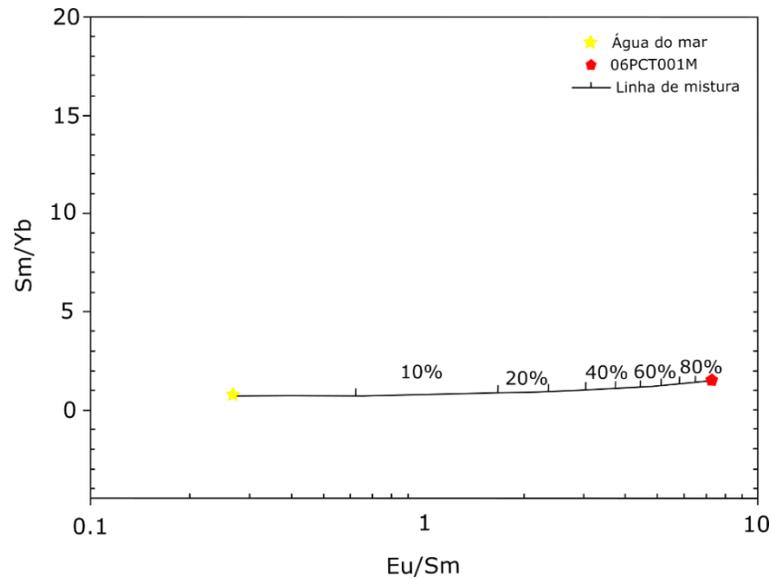


Figura 12 – Diagrama para estimativa entre contribuição relativa hidrotermal vulcanogênica de alta T versus contribuição hidrógena (água marinha) proposto por Gourcerol et al. (2016). Linha de mistura calculada a partir de amostras de água marinha (Alibo e Nozaki, 1999) e amostra de fluido hidrotermal de alta temperatura (Thurston et al., 2012).

Oxihidróxidos de Fe, por exemplo a Ferrihidrita, com associação com fases silicosas, são considerados como a fase mineral primária de precipitação (Konhauser et al., 2017). O desenvolvimento para outras fases minerais, como óxidos e carbonatos de ferro, pode estar associado a processos pós deposicionais como metamorfismo e redução dissimilatória do ferro (do inglês DIR – *Dissimilatory Iron Reduction*), esse último pela ação de microrganismos que durante o processo de respiração anaeróbica utilizam o Fe (III) e o reduzem para Fe (II), formando fases minerais como magnetita e siderita. A associação da redução do Fe (III) e da oxidação da matéria orgânica explica tanto o baixo conteúdo de matéria orgânica encontrada nas FFB, quanto os valores altamente negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  para os carbonatos diagenéticos (Heimann et al., 2010; Konhauser et al., 2017).

## 4. ESTUDOS PETROGRÁFICOS

### 4.1. Petrografia

As rochas estudadas são todas metamórficas, fácies xisto-verde, porém, durante a descrição, foram privilegiadas as nomenclaturas sedimentares visando o objetivo do trabalho de discutir o modelo deposicional das rochas de Lamego.

Critérios descritivos relacionados a granulação e texturas foram utilizados segundo Winter (2010).

#### **4.1.1. FFB e chert ferruginoso**

As rochas hospedeiras da mineralização em Lamego variam entre FFB e *chert* ferruginoso, raramente descritos como *chert* carbonoso, quando a matéria carbonosa é dominante em relação ao carbonato. O mineral rico em ferro mais comum é a siderita. Ankerita também ocorre em quantidades significativas, enquanto magnetita ocorre de maneira restrita. As FFB *sensu strictu*, com 15% ou mais de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em peso total, apresentam geralmente valores de Fe bem próximos a esse limite, o que gera uma variação entre esses litotipos por todo o depósito.

Macroscopicamente caracterizam-se pela intercalação de bandas bege claras a brancas e bandas cinza escuras a pretas, que variam em espessura de milimétricas (microbandas) a centimétricas (mesobandas) (*Figura 13A, 13B, 13C, 13D, 13E, 13F, Figura 14A, 14B, 14C e 14D*). Microscopicamente esse bandamento pode ser ainda mais fino, submilimétrico, definindo uma laminação. As bandas claras são compostas essencialmente por quartzo, com carbonato, siderita e ankerita (subordinados), enquanto as bandas escuras são compostas por siderita e ankerita, localmente com grãos de quartzo dispersos pela matriz. De maneira geral, há predomínio das bandas quartzosas, com uma relação modal média de 65% de quartzo e 35% de carbonatos (*Figura 15A, 15B, 15C, 15D, 15E e 15F*).

O quartzo tem granulação fina, comumente com contatos poligonais e lobados, localmente com extinção ondulante (*Figura 16A*). Nas bandas quartzosas o carbonato ocorre disperso na matriz, fino, subédrico a anédrico, de aspecto sujo; também há carbonatos de granulação pouco mais grossa, aspecto limpo, geralmente euédricos (*Figura 15C, 15D e Figura 16A*).

Nas bandas carbonáticas há amplo domínio de siderita. Tem granulação fina, semelhante à do quartzo, variando de anédrica a subédrica, com coloração variegada (marrom, bege a preto), geralmente com aspecto sujo na superfície dos grãos dado por pequenas manchas e inclusões de cor escura (*Figura 15A, 15B, 15C, 15D, 15E, 15F, Figura 16B e 16C*). Ankerita ocorre em menores proporções, com granulação pouco mais grossa, e superfície mais clara e lisa do que a siderita (*Figura 16C e 16D*). Sericita, clorita e stilpnomelano (*Figura 16D, 16E e 16F*) ocorrem como minerais acessórios em algumas amostras, geralmente como pequenos grãos entremeados à matriz quartzo/carbonática.

Matéria carbonosa está presente em grande parte das amostras, normalmente em quantidades que variam de 1% a 5%. São lâminas pretas, delgadas, descontínuas, concordantes ao bandamento composicional, o que confere um aspecto sujo em nicóis paralelos, enquanto em nicóis cruzados formam filmes que se distinguem nas bandas carbonáticas (*Figura 15C, 15D e Figura 16C*).

Formação ferrífera bandada a magnetita apresenta cristais de magnetita com granulação fina a média, euedrais a subedrais, sobrecrecidos às bandas carbonáticas (*Figura 17A*). A magnetita é geralmente dominante em relação aos carbonatos nas bandas ricas em ferro, e está comumente associada à pirita e pirrotita (*Figura 17B*). Nas bandas quartzosas a magnetita pode estar presente como cristais isolados sobrecrecidos à matriz.

Feições hidrotermais, mesmo que localmente, são descritas em todas as amostras e são principalmente evidenciadas por: (i) venulações quartzo-carbonáticas, discordantes ou concordantes ao bandamento, onde geralmente esses minerais são de granulação mais grossa do que a da rocha (*Figura 17C e 17E*); (ii) ankerita de granulação mais grossa do que a da siderita, subédrica a euédrica, sobrecrecida à matriz (*Figura 17C*) ou como passagem gradacional nas bandas carbonáticas; (iii) presença de sulfetos, como pirita, pirrotita e pirita-arsenical, sobrecrecidos, comumente associados às bandas carbonáticas (*Figura 17B, 17D e 17F*).

- MEV (Microscópio eletrônico de varredura)

A identificação de dois carbonatos distintos ao microscópio óptico, um de granulação fina e aspecto sujo, e outro de granulação pouco mais grossa e geralmente com aspecto limpo e liso, e cristais subédricos, foi confirmada por meio do MEV com sensor EDS acoplado, indicando tratar-se de siderita e ankerita (*Figura 18A, 18B e 18C*).

Foram geradas imagens de elétrons retroespalhados da amostra 01QN03LE que demonstram tais distinções a partir da escala de tons de cinza. A *figura Figura 18A* mostra as bandas quartzosas de coloração mais escura (menor peso atômico); bandas sideríticas de coloração clara (maior peso atômico); ankerita disseminada em tons intermediários. A *Figura 18B* apresenta em maior detalhe o campo destacado em vermelho na figura *Figura 18A*, onde foi realizado por meio do sensor EDS a análise de um *spot* na siderita. O resultado semi-quantitativo é apresentado no espectro de emissões de elétrons da *figura Figura 18C*, com pico de emissão para o elemento Fe.

Foi gerado ainda um mapa composicional de Fe e Ca para destacar a ocorrência dos dois carbonatos (*Figura 19*). Na imagem em questão, as fases ricas em Ca, correlacionadas a ankerita, estão em tons alaranjados, enquanto as fases ricas em Fe, tons azulados, são correlacionadas a siderita.

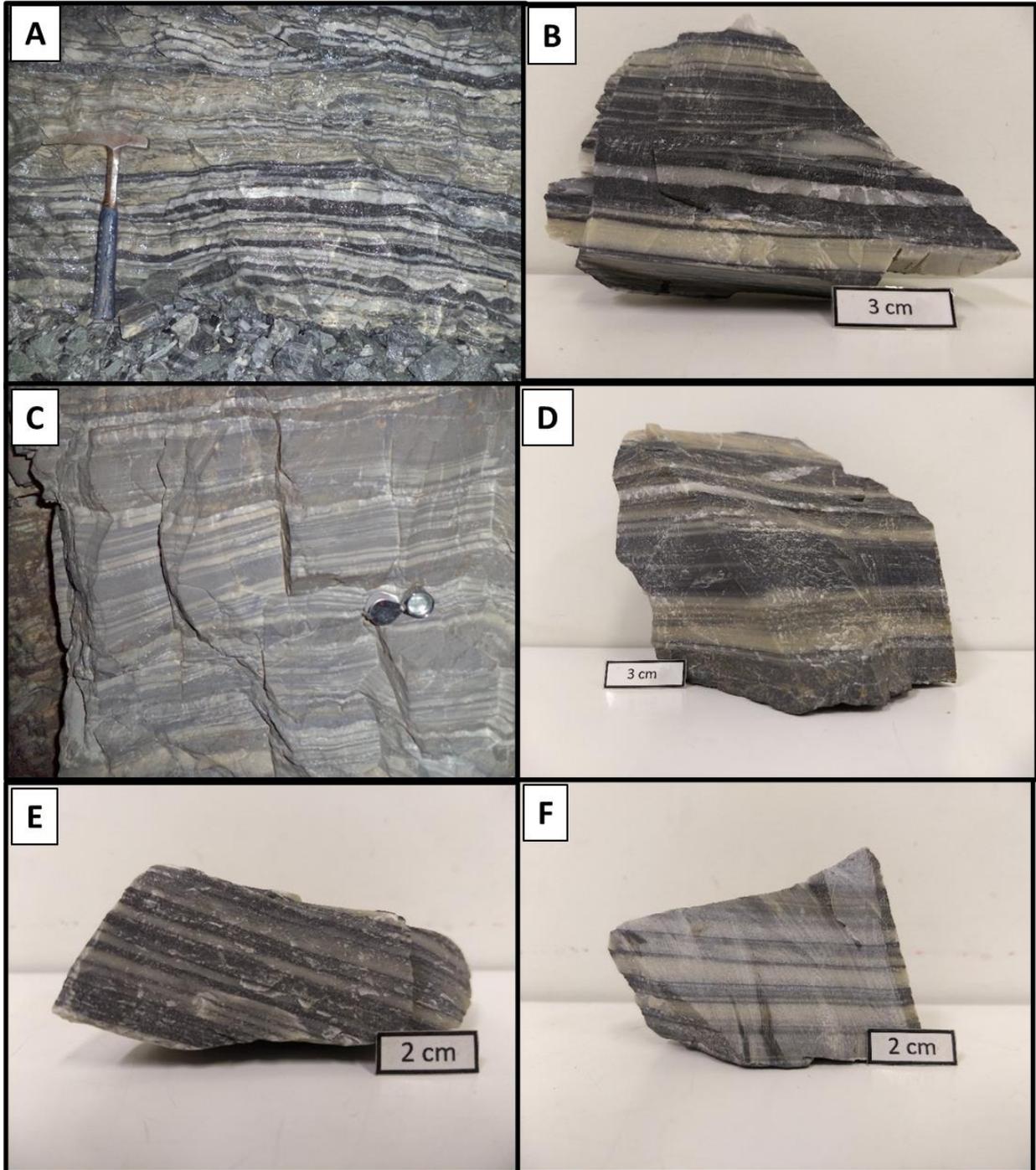


Figura 13 – Afloramentos e amostras de mão de FFB e chert ferruginosos: A) Afloramento em galeria do nível 4 do corpo Queimada; B) Amostra 17QN04 (FFB); C) Afloramento em galeria do nível 2 do corpo Arco da Velha; D) Amostra 06AVN2LE (FFB); E) Amostra 04CRN6.1B (FFB); F) Amostra 10CRN8.1asc (chert).

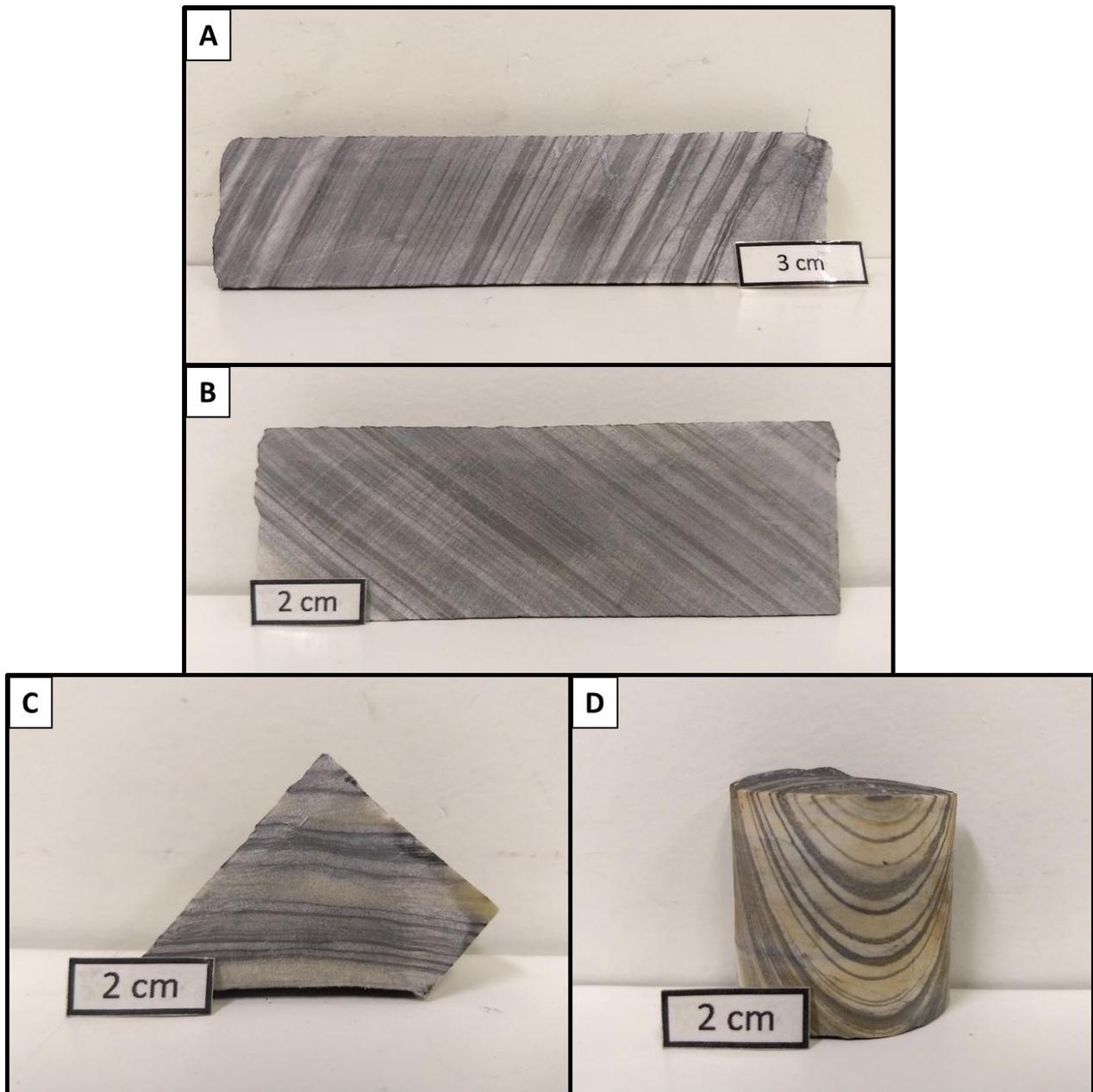


Figura 14 – Amostras de FFB e chert ferruginosos coletadas em testemunhos de sondagem: A) Amostra 20CP0036 (chert); B) Amostra 24CR2803 (FFB); C) Amostra 14CP0039 (chert); D) Amostra 33QM1184 (FFB).

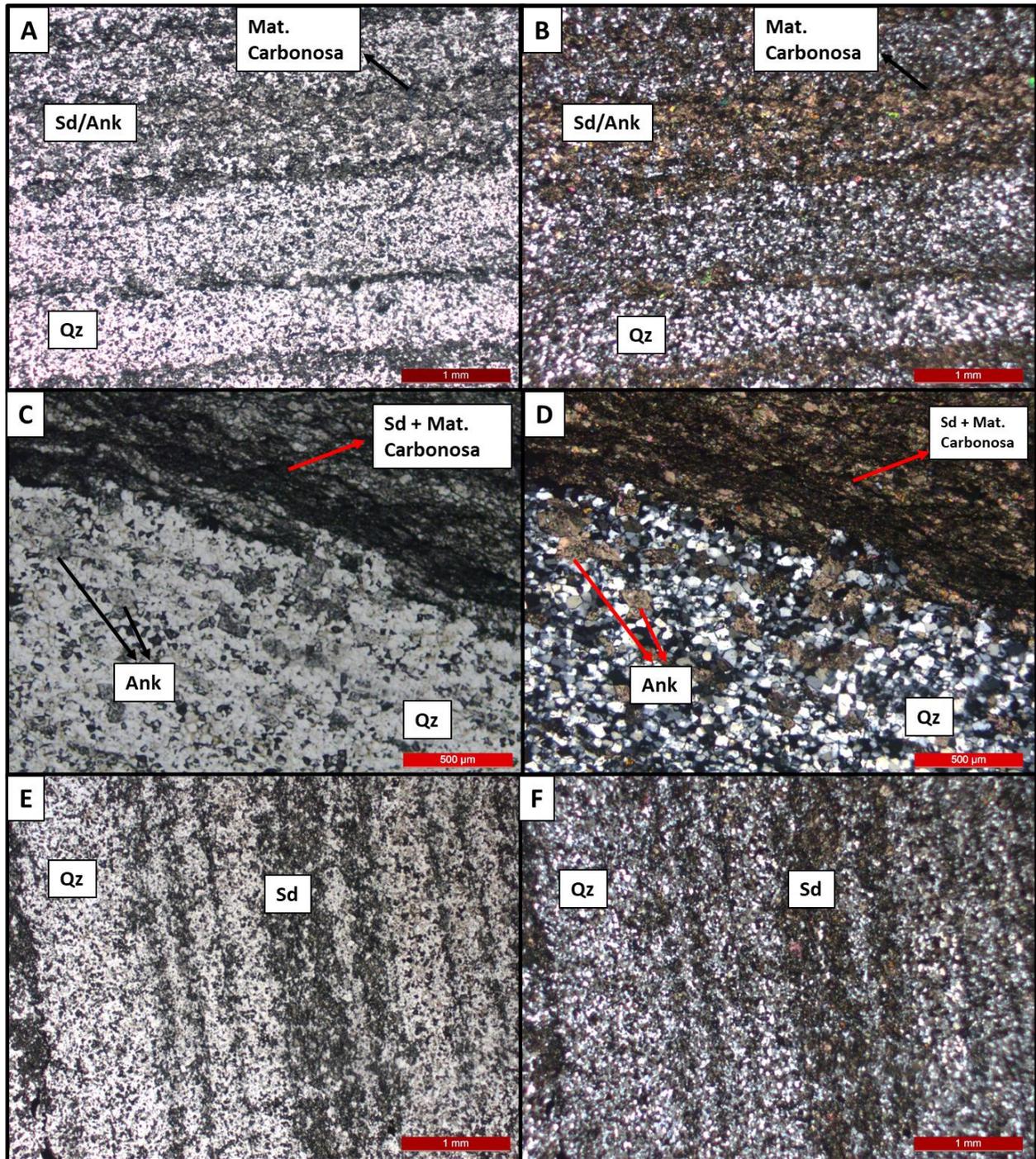


Figura 15 – Fotomicrografias das amostras de FFB e chert ferruginosas: A) Bandamento composicional na amostra de FFB 01QN03LE (LT/NP – Luz transmitida/Nicol paralelo) definido pela intercalação sucessiva entre bandas carbonáticas e quartzosas; B) Mesma imagem em LT/NC (Luz transmitida/Nicol cruzado); C) Detalhe do contato entre

nível rico em siderita associado a lâminas delgadas e opacas de matéria carbonosa e nível rico em quartzo com ankerita subordinada. Amostra de FFB 01QN03LE (LT/NP); D) Mesma imagem em LT/NC; E) Bandamento composicional submilimétrico típico, com predomínio de quartzo, amostra de FFB 02CR2737 (LT/NP); F) Mesma imagem em LT/NC.

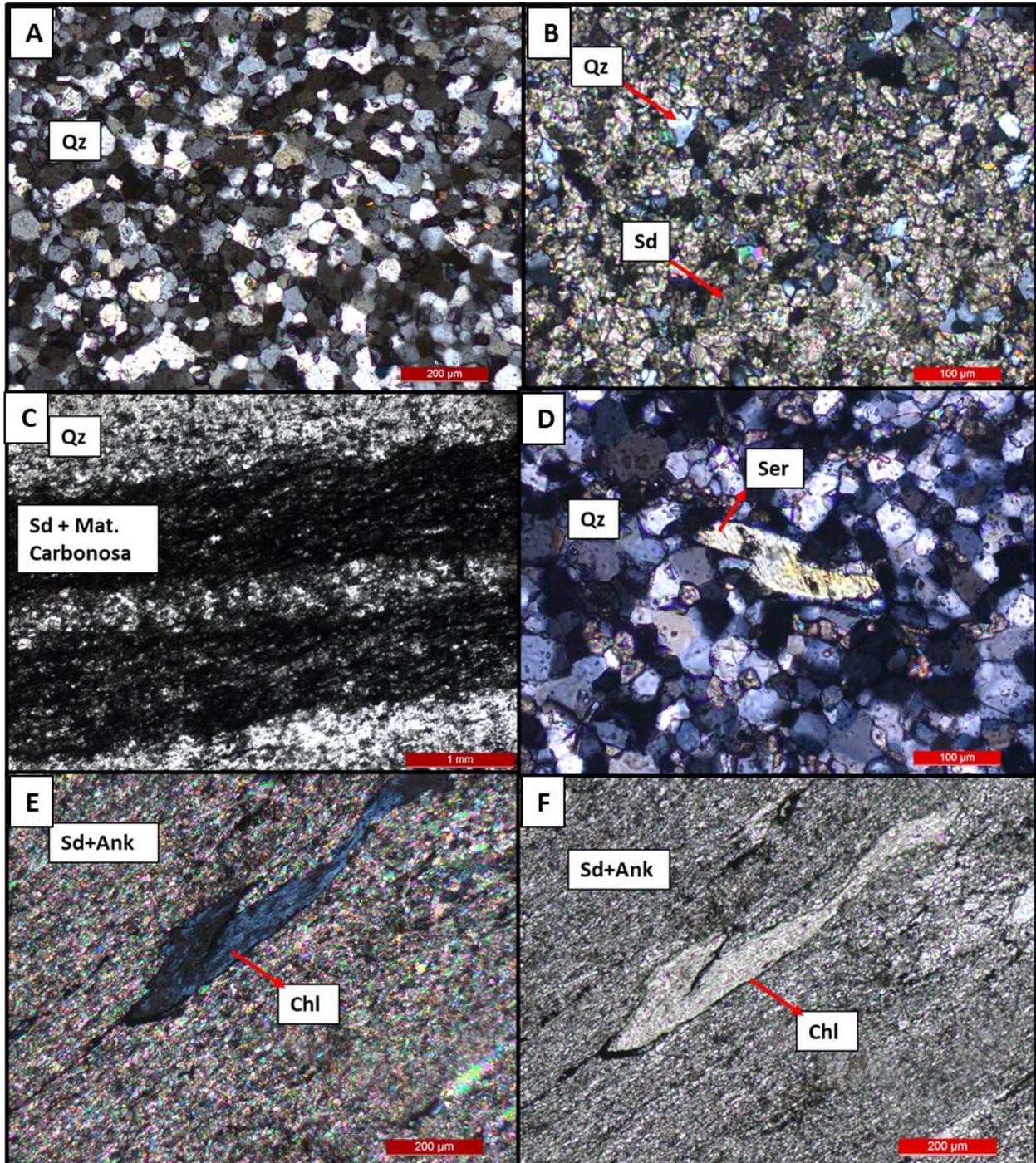


Figura 16 - Fotomicrografias das amostras de FFB e chert ferruginosos: A) Detalhe de banda quartzosa na amostra de FFB 12AVN01. Aspecto granoblástico e contatos poligonais (LT/NC); B) Detalhe de banda carbonática de composição

siderítica com quartzo subordinado, na amostra de FFB 02QN03LE (LT/NC); C) Bandamento milimétrico, com bandas carbonáticas ricas em matéria carbonosa; amostra de chert 20CP0036 (LT/NP); D) Cristal de sericita fino e isolado em matriz quartzosa; amostra de chert 20CP0036 (LT/NC); E) Cristal de clorita em matriz carbonática fina, concordante à foliação; amostra de FFB 12AVN01 (LT/NC); F) Mesma imagem em LT/NP.

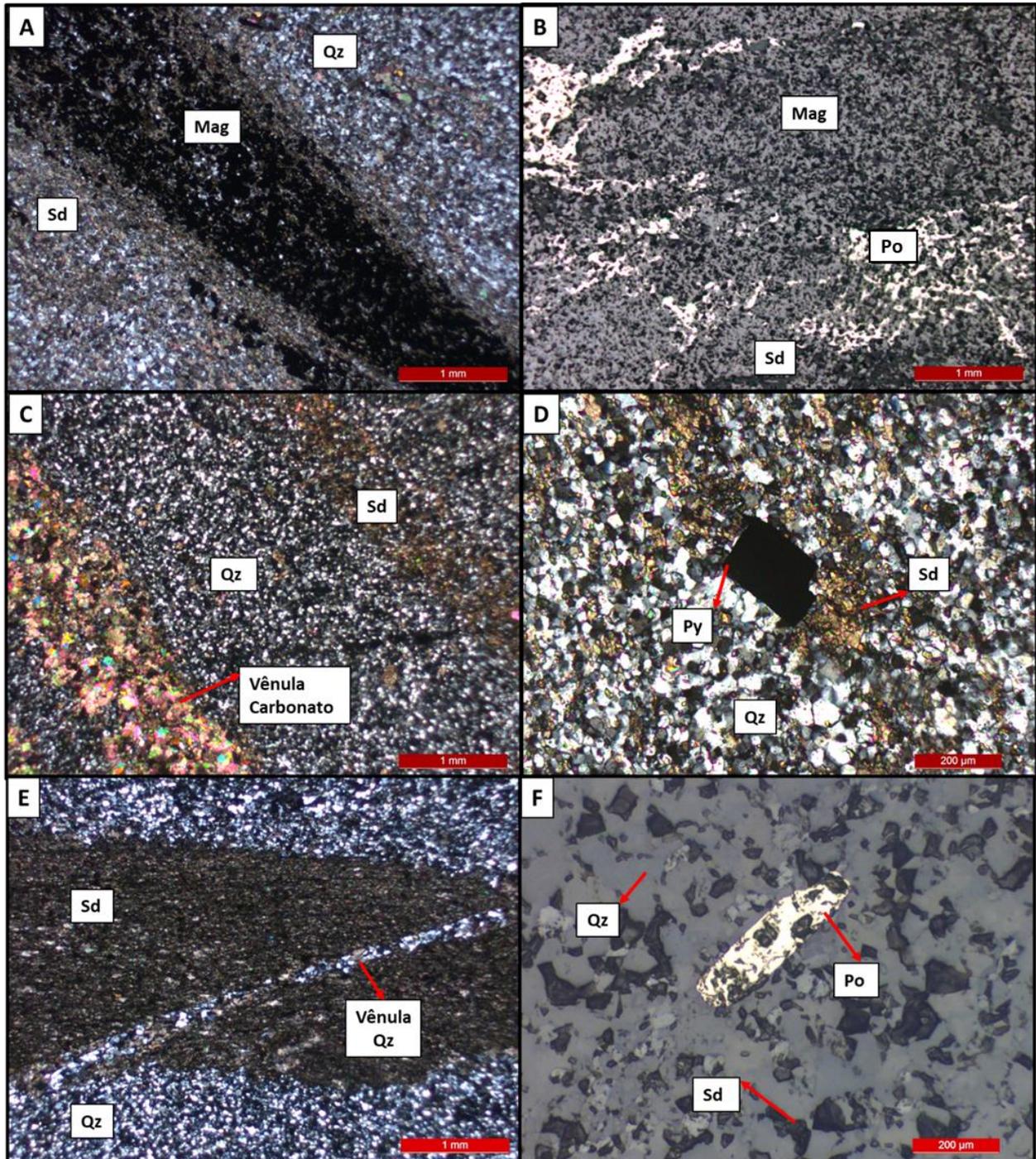


Figura 17 – Fotomicrografias de FFB e chert ferruginosos com destaque para feições de alteração hidrotermal: A) Bandas magnetíticas sobrecrecidas às bandas carbonáticas na amostra de FFB a magnetita 01CR2726 (LT/NC); B)

Banda magnética sobrecrescida à matriz carbonática associadas a massas disformes de pirrotita, amostra 01CR2726 (LR/NC – Luz refletida/Nicol cruzado); C) Vênula carbonática composta por ankerita/calcita sobreposta à banda siderítica, amostra de FFB 47QM1235 (LT/NC); D) Cristal euédrico de pirita sobrecrescido à siderita em matriz quartzo-carbonática, amostra de FFB 17QN0402 (LT/NC); E) Vênula quartzosa seccionando obliquamente a banda siderítica, amostra de FFB 13AVN0201 (LT/NC); F) Cristal ripiforme de pirrotita em banda siderita dominada, amostra de FFB 50QM1227 (LR/NC).

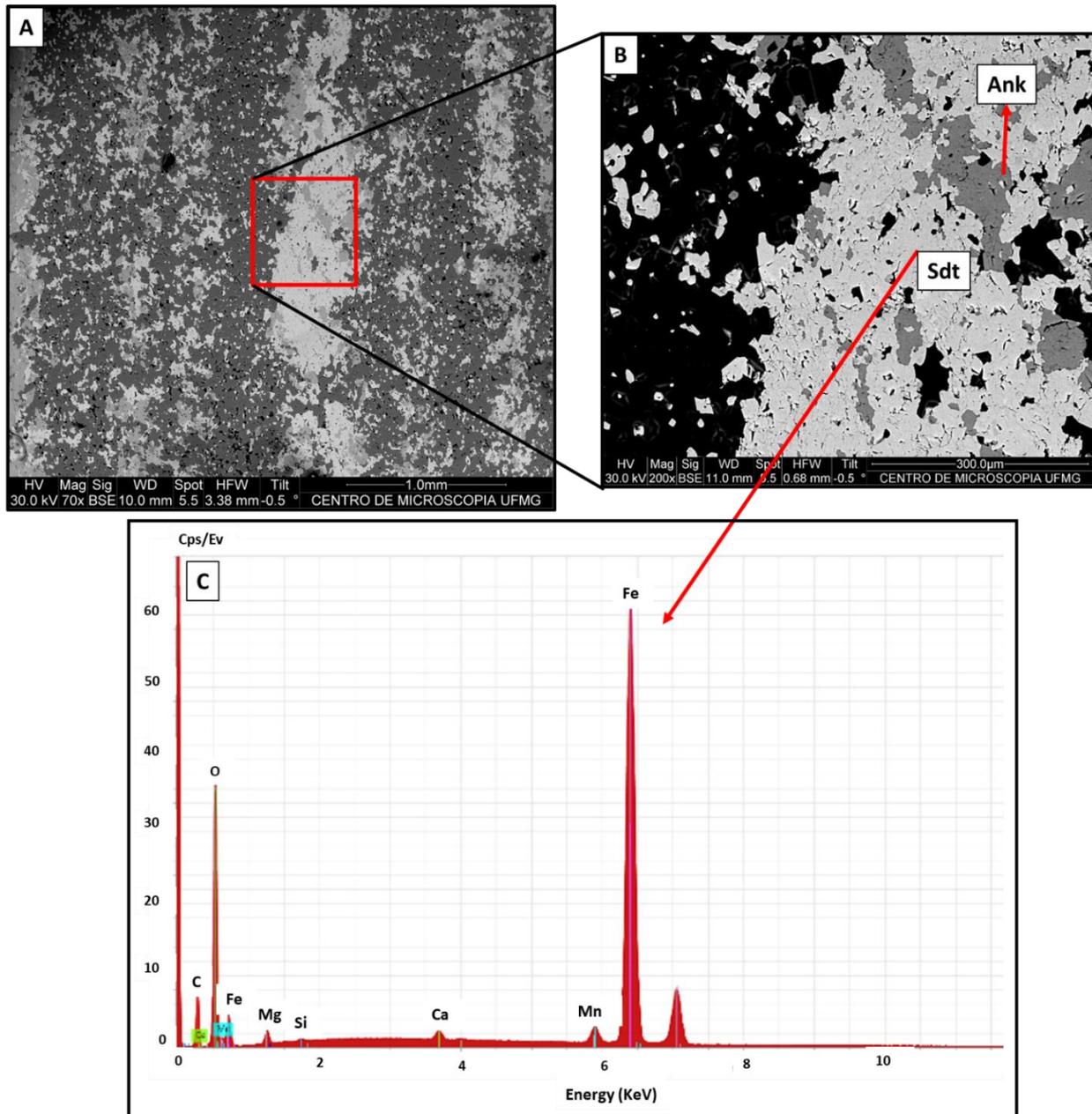


Figura 18 – Imagens de MEV (elétrons retroespalhados) da amostra 01QN03LE: A) Identificação do bandamento composicional de acordo com a escala de tons de cinza – bandas quartzosas de coloração escura; bandas sideríticas de coloração clara; e ankerita em tons intermediários. Aumento de 70x; B) Detalhe da imagem A). Aumento de 200x; C)

Espectro de emissões obtido com sensor EDS. Pico de emissão associado à banda siderítica, distinguido pelo elemento Fe.

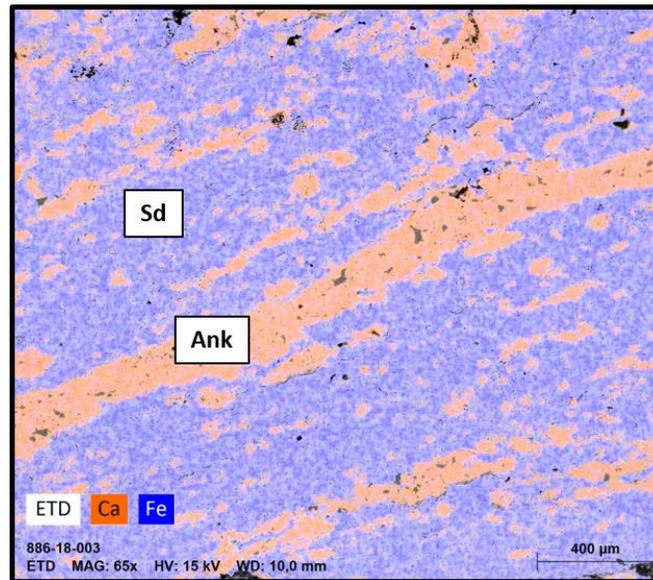


Figura 19 - Mapa composicional da amostra 01QN03LE evidenciando a intercalação entre domínios ricos em Ca (ankerita - porções alaranjadas), e domínios ricos em Fe (siderita – porções azuladas). Aumento de 65x.

#### ***4.1.2. Amostras de minério***

As amostras de minério selecionadas para o estudo são principalmente compostas por quartzo, carbonatos (ankerita, siderita, calcita) e sulfetos, em proporções variadas. Na maioria das amostras é evidente a existência do bandamento reliquiar característico da FFB/chert ferruginoso ainda preservado (

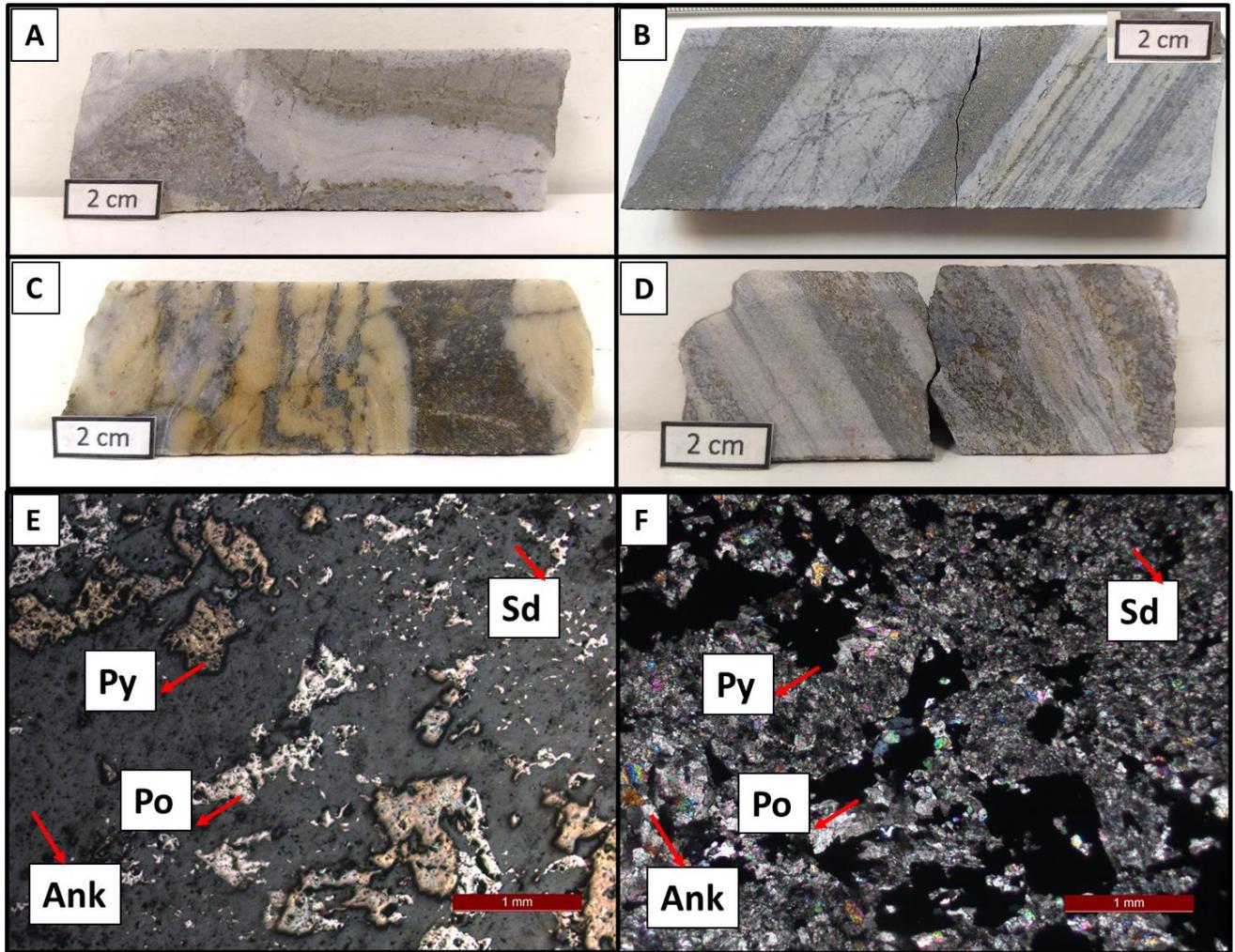


Figura 20A, 20B, 20C e 20D).

O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas quartzo-dominadas e bandas carbonato/sulfeto-dominadas, com espessura que varia de submilimétrica a milimétrica (

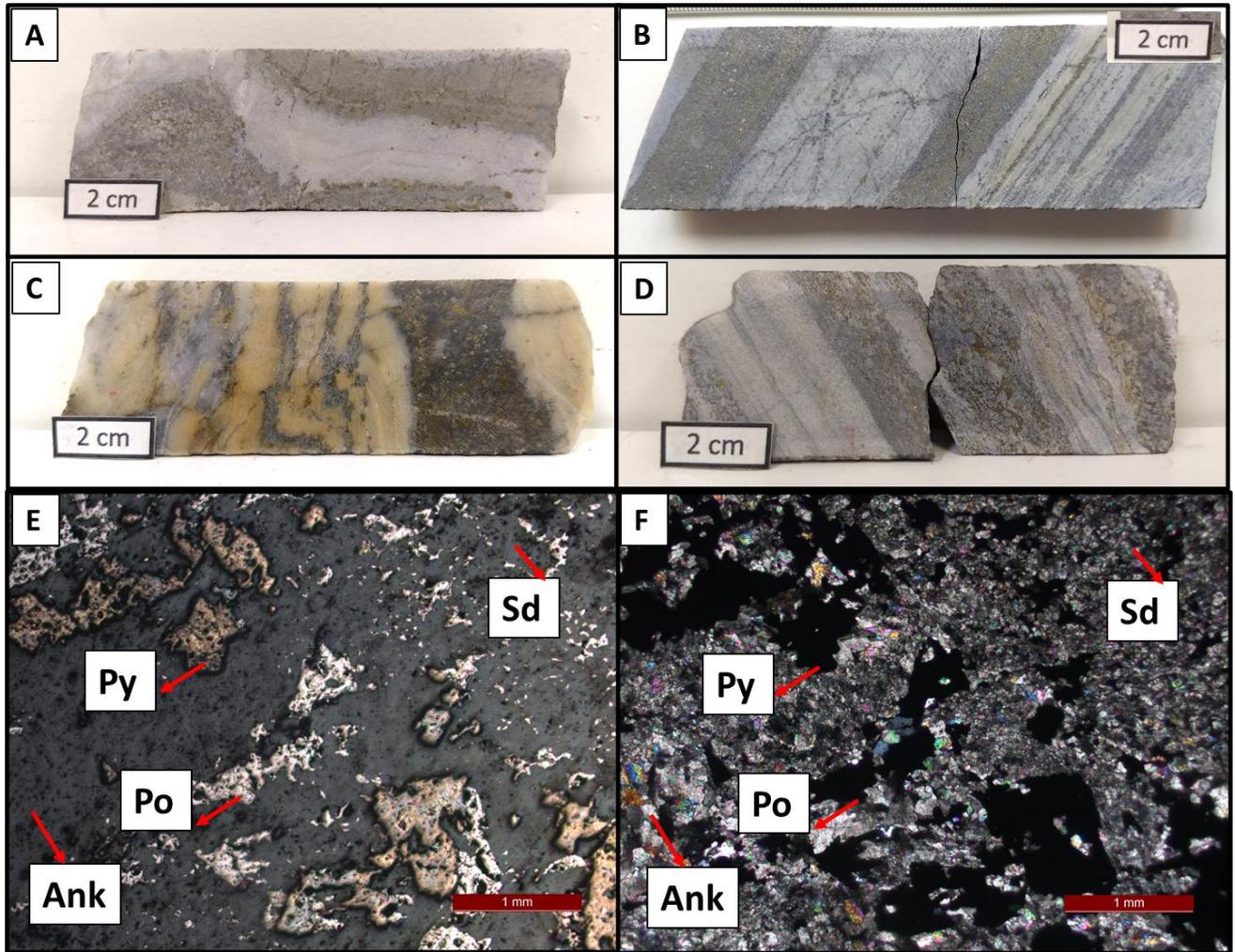
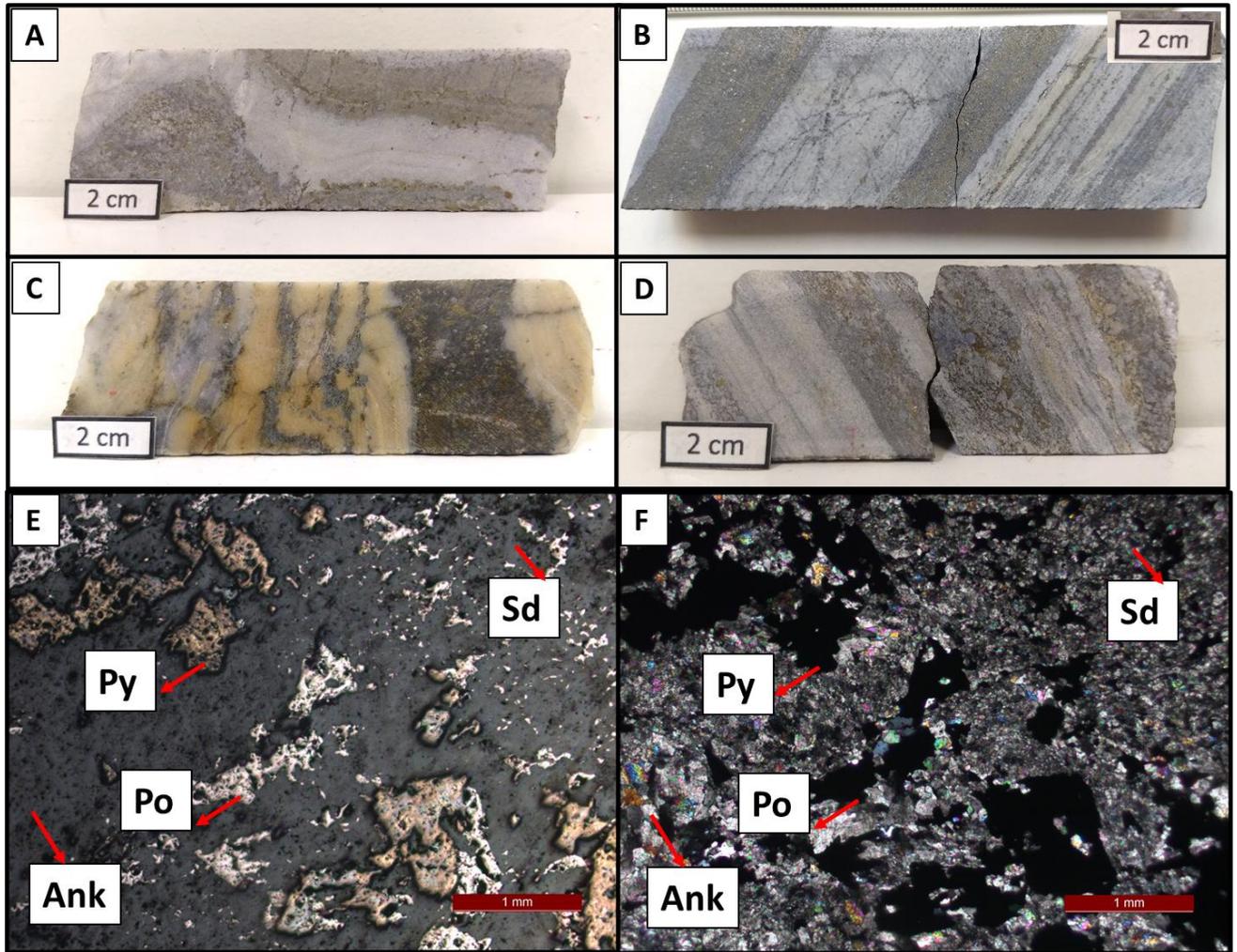


Figura 20A, 20B, 20C e 20D). As bandas quartzosas podem conter em proporções relativamente baixas sulfetos e carbonatos disseminados, geralmente sobrepostos à trama original da rocha. O quartzo apresenta granulação fina, aspecto granular, com contatos que variam de poligonais a lobados, e extinção comumente ondulante.

As bandas compostas predominantemente por carbonato e sulfeto podem conter também quartzo subordinado. Carbonato ocorre em três tipos principais: siderita, ankerita e calcita (



*Figura 20E, 20F, Figura 21B, 21E e 21F). Siderita é geralmente fina, anédrica, com aspecto terroso; ankerita varia de fina a grossa, anédrica a euédrica, com textura lisa e coloração mais clara quando em nicóis paralelos; calcita apresenta granulação média a grossa, subédrica a euédrica, coloração clara e textura lisa.*

Os sulfetos descritos são pirita, pirita arsenical, pirrotita, arsenopirita e calcopirita (

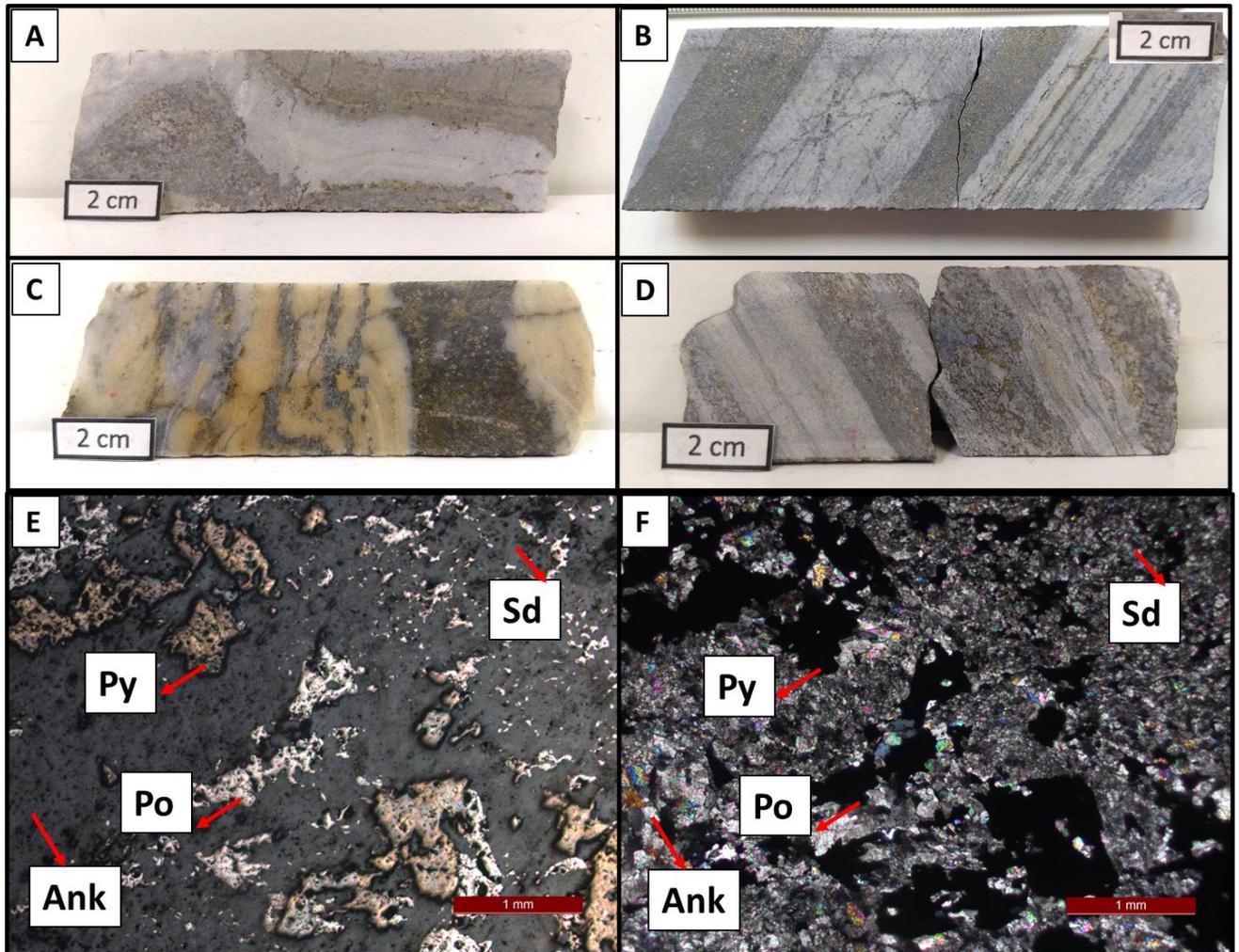


Figura 20E, 20F, Figura 21A, Figura 21B, Figura 21C, Figura 21D, Figura 21E e Figura 21F). Ocorrem geralmente sobrecrecidos à matriz, localmente como porfiroblastos, variando de anédricos a euédricos, e granulação fina a grossa. Pirita é o sulfeto dominante, geralmente com hábito cúbico, podendo apresentar transição gradual para pirita arsenical (

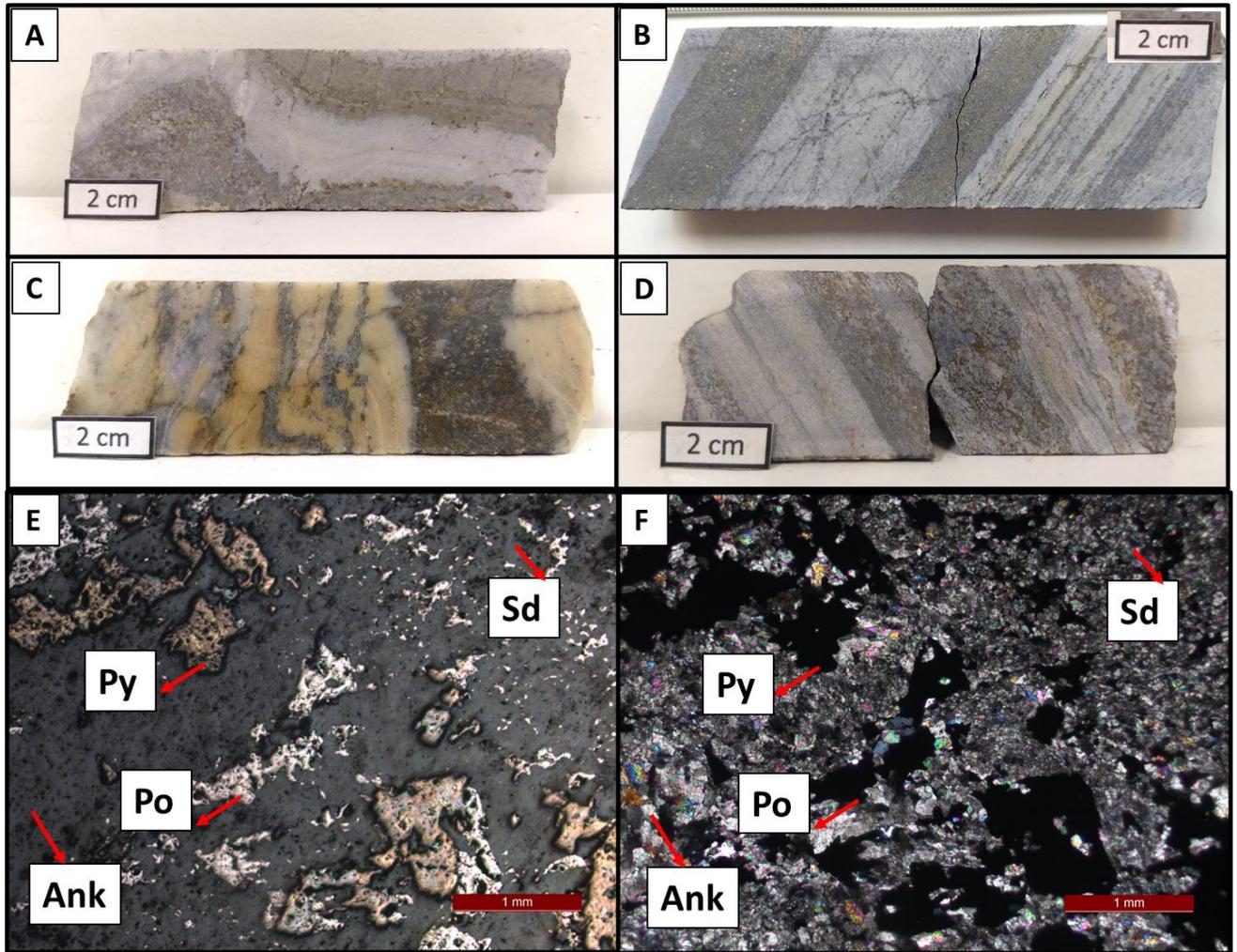


Figura 20E e Figura 21D). Pirrotita ocorre geralmente como massas disformes (

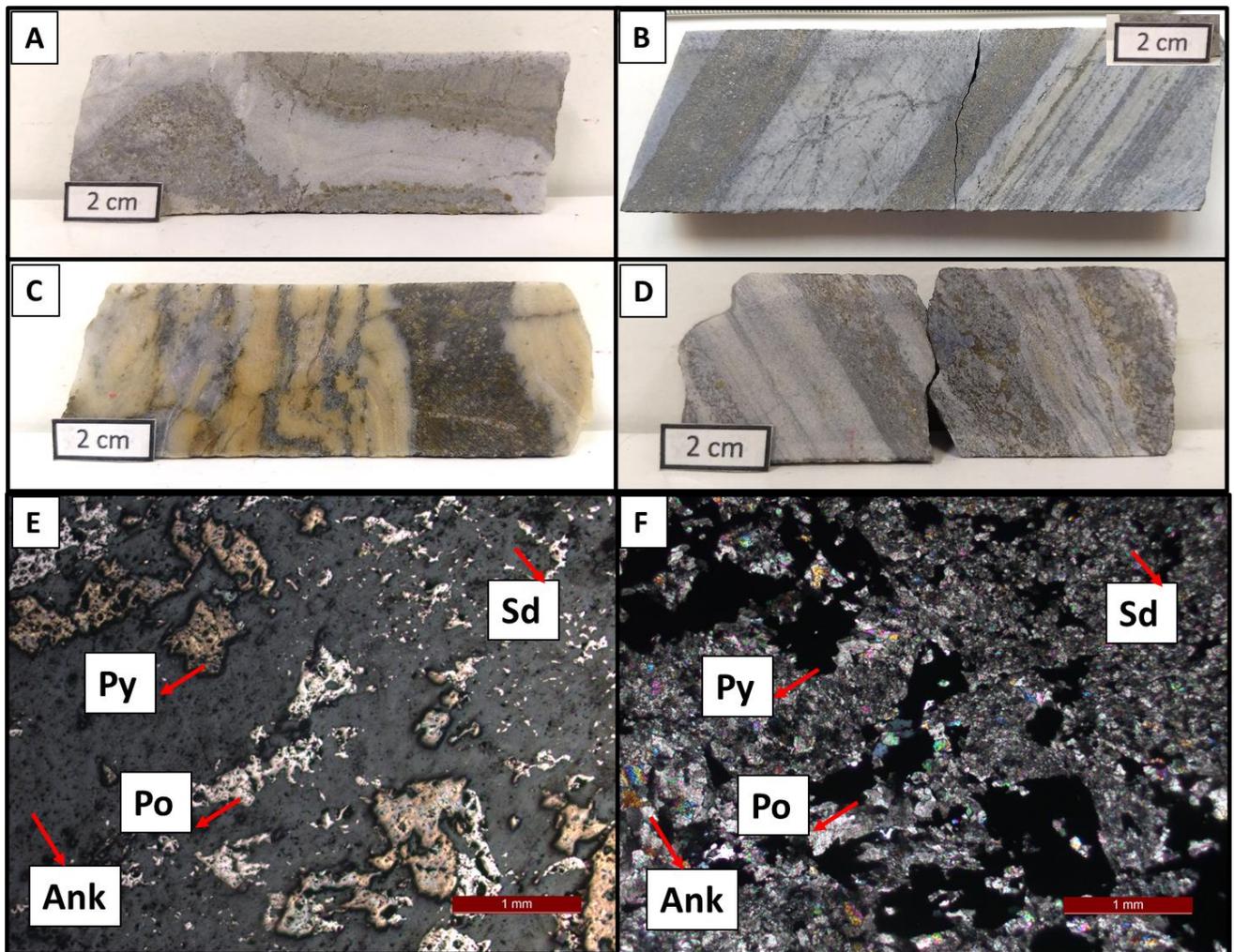


Figura 20E), sobrecrecidas ou entremeadas à matriz; localmente apresenta hábito ripiforme. Arsenopirita ocorre com hábito acicular, geralmente com cristais alongados (Figura 21D); localmente ocorre como massas, associadas a pirita ou não (Figura 21A). Calcopirita ocorre como mineral acessório.

Feições comuns também descritas nessas amostras são vênulas quartzo-carbonáticas, podendo conter sulfetos, além de sombras de pressão de quartzo associadas a pirita euédrica sobrecrecida à matriz carbonática

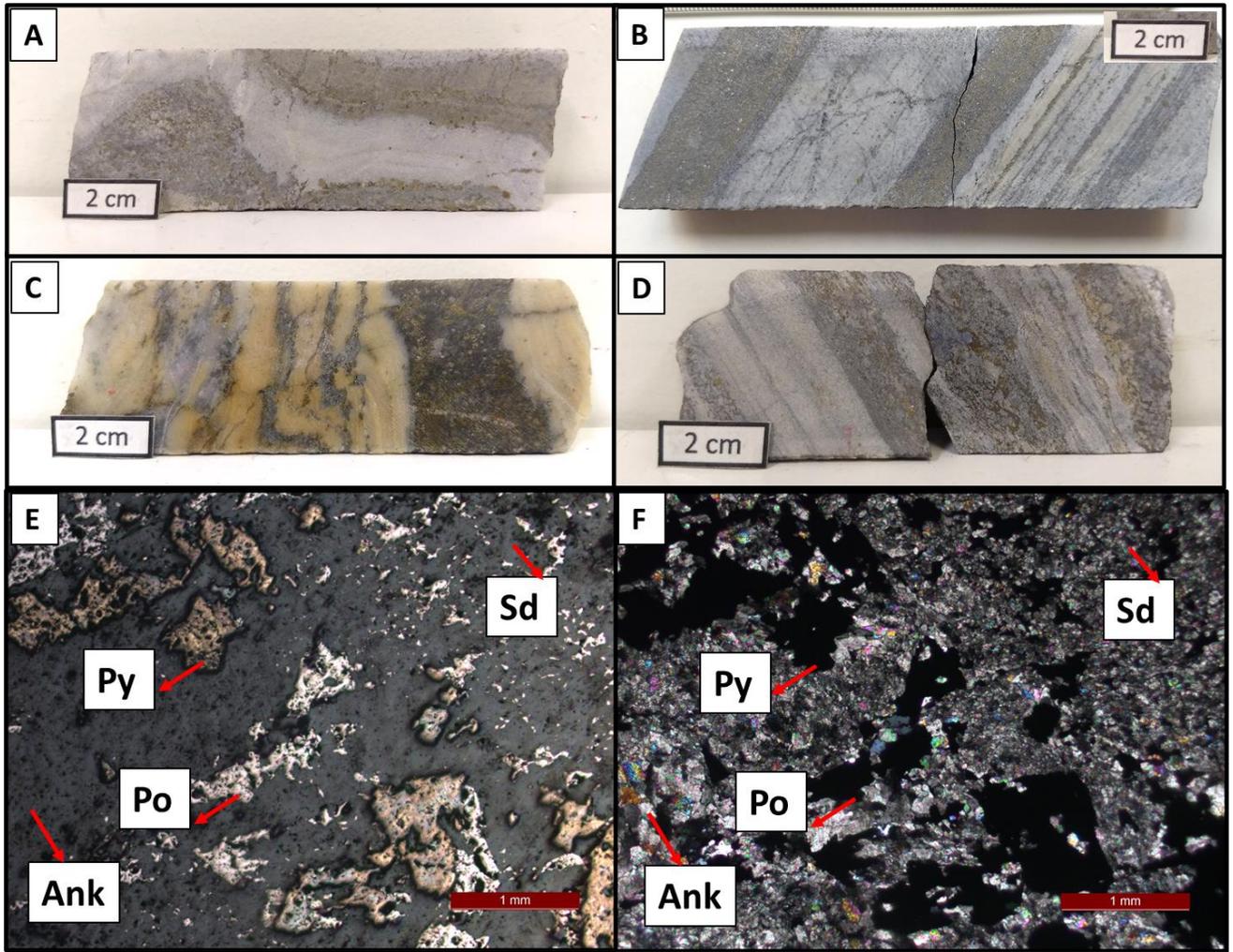


Figura 20A e 21B).

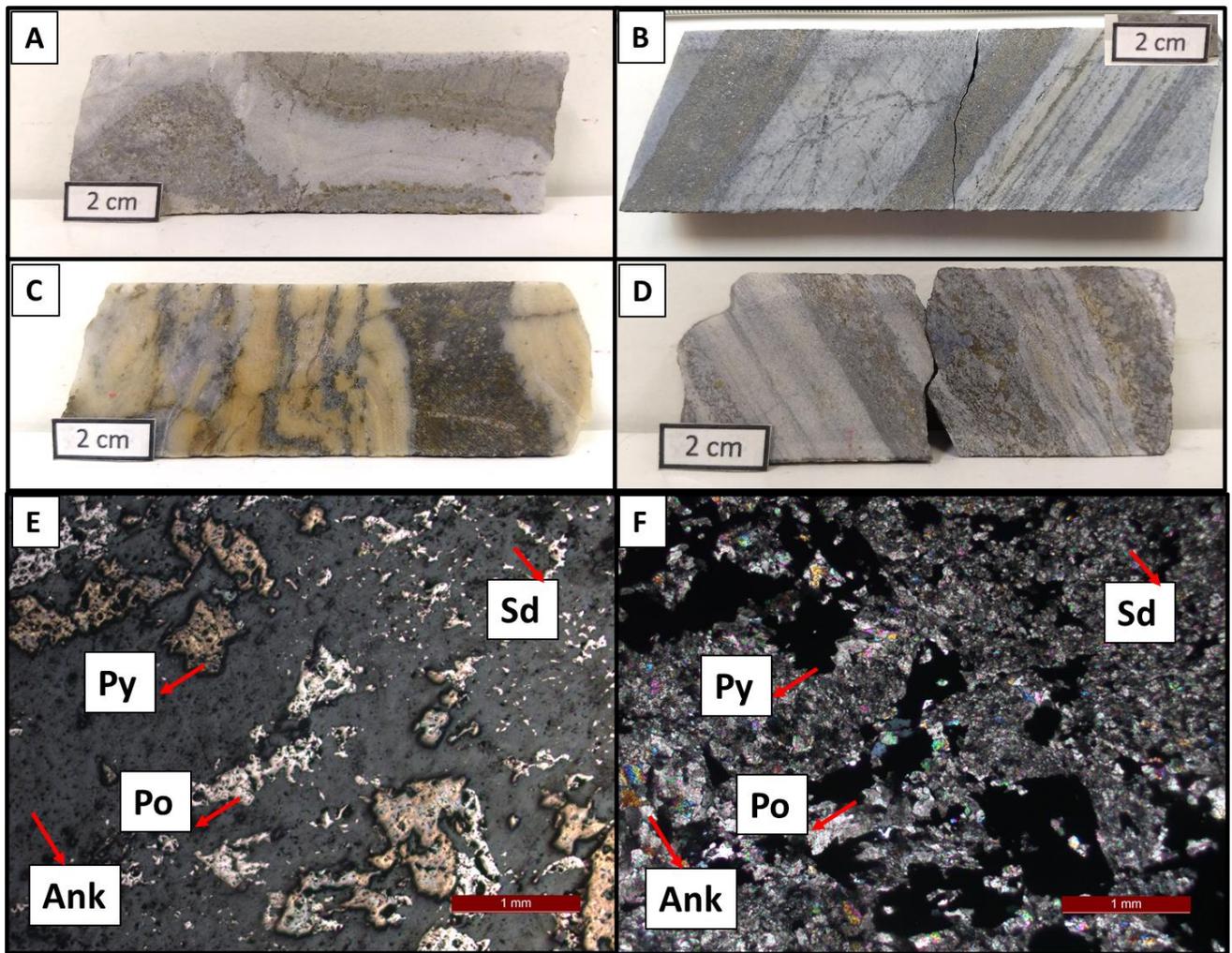


Figura 20 – Amostras de minério com bandamento reliquiar da FFB preservado e bandas carbonáticas substituídas por sulfetos: A) Amostra 05CR2760; B) Amostra 46QM1234; C) Amostra 47QM1235; D) Amostra 06CR2765.

Fotomicrografias das amostras de minério: E) Pirita/pirita arsenical em contato com cristais de pirrotita em matriz carbonática (LR/NC); F) Mesma imagem em LT/NC.

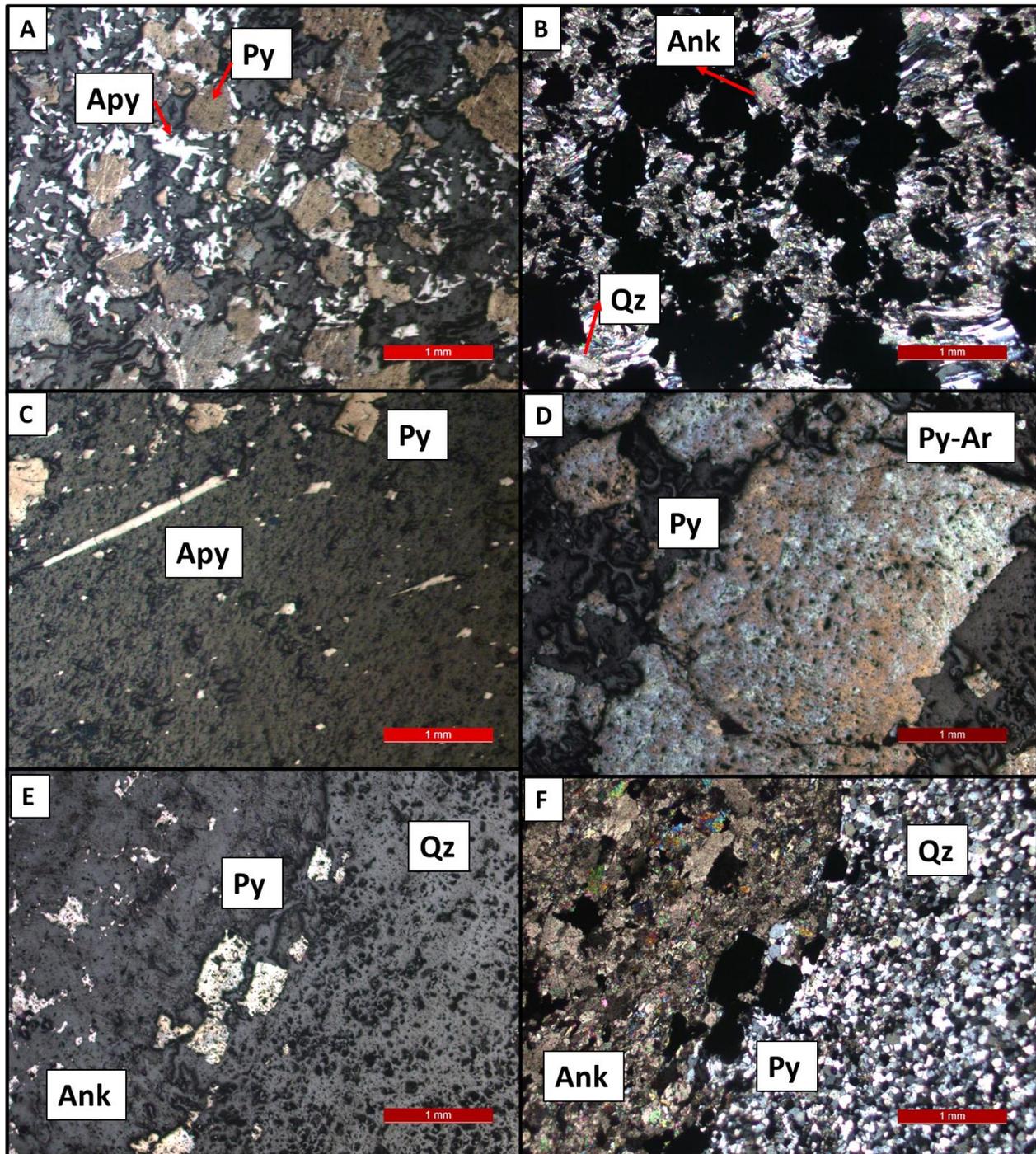


Figura 21 – Fotomicrografias das amostras de minério: A) Pirita/pirita arsenical em contato transicional com arsenopirita, sobrecrescidos à matriz carbonática; amostra 46QM1234 (LR/NP); B) LT/NC: Sombras de pressão de quartzo associadas aos sulfetos; C) Cristais euédricos de arsenopirita, aciculares, e pirita, cúbicos, em matriz carbonática; amostra 47QM1235 (LR/NP); D) Cristal euédrico de pirita/pirita arsenical com granulação grossa na amostra 05CR2760 (LR/NP); E) Cristais euédricos a subédricos de pirita no contato entre banda carbonática e banda quartzosa (LT/NC); F) Mesma imagem em LT/NC.

### 4.1.3. Rochas vulcânicas

A rocha vulcânica da mina Lamego é descrita por Sales (1998), Martins et al. (2016) e Morales et al. (2016) como metabasalto com possíveis variações para metandesito. São rochas faneríticas de cor verde clara a escura e textura maciça (*Figura 22A e Figura 22B*), constituídas por plagioclásio (15-53%), epidoto/clinozoisita (4-20%) e actinolite/tremolita (2-30%). Microscopicamente essas rochas representam um litotipo com granulação fina a média, inequigranular e textura predominantemente granoblástica (*Figura 22C, Figura 22D, Figura 22E e Figura 22F*).

O plagioclásio tabular, de granulação fina a média, localmente mostra planos de geminação (macla da albita) preservados (*Figura 23A*). Grande parte está substituído por clinozoisita, clorita ou também por carbonato, geralmente dispersos na matriz, ou também formando agregados. A actinolita/tremolita ocorre com granulação que varia de fina a média, dominando grãos subédricos de hábito tabular a acicular (*Figura 23B*). Localmente é radial, associada a agregados de plagioclásio. Epidoto e clinozoisita são ambos anédricos, geralmente com granulação semelhante à da matriz e, em algumas porções, como porfiroclastos. São comumente arredondados, levemente alongados (*Figura 23C e Figura 23D*).

Quando hidrotermalizadas gradam para tipos foliados, apresentando textura que varia de granoblástica a lepidoblástica e nematoblástica. Podem conter carbonatos, geralmente como microvenulações, e clorita, além de quartzo e sulfetos (pirrotita, pirita e calcopirita) que ocorrem como acessórios.

A clorita forma palhetas finas entremeadas à matriz, geralmente anédricas, cor verde com pleocroísmo fraco. Quando com granulação pouco mais grossa são subédricas. Carbonato pode apresentar granulação destoante da média da rocha, localmente com cristais subédricos a euédricos, mas predominantemente anédricos, comumente em finas vênulas. Em algumas porções observa-se a associação actinolita-epidoto substituída por carbonato sobrecrescido à trama da rocha.

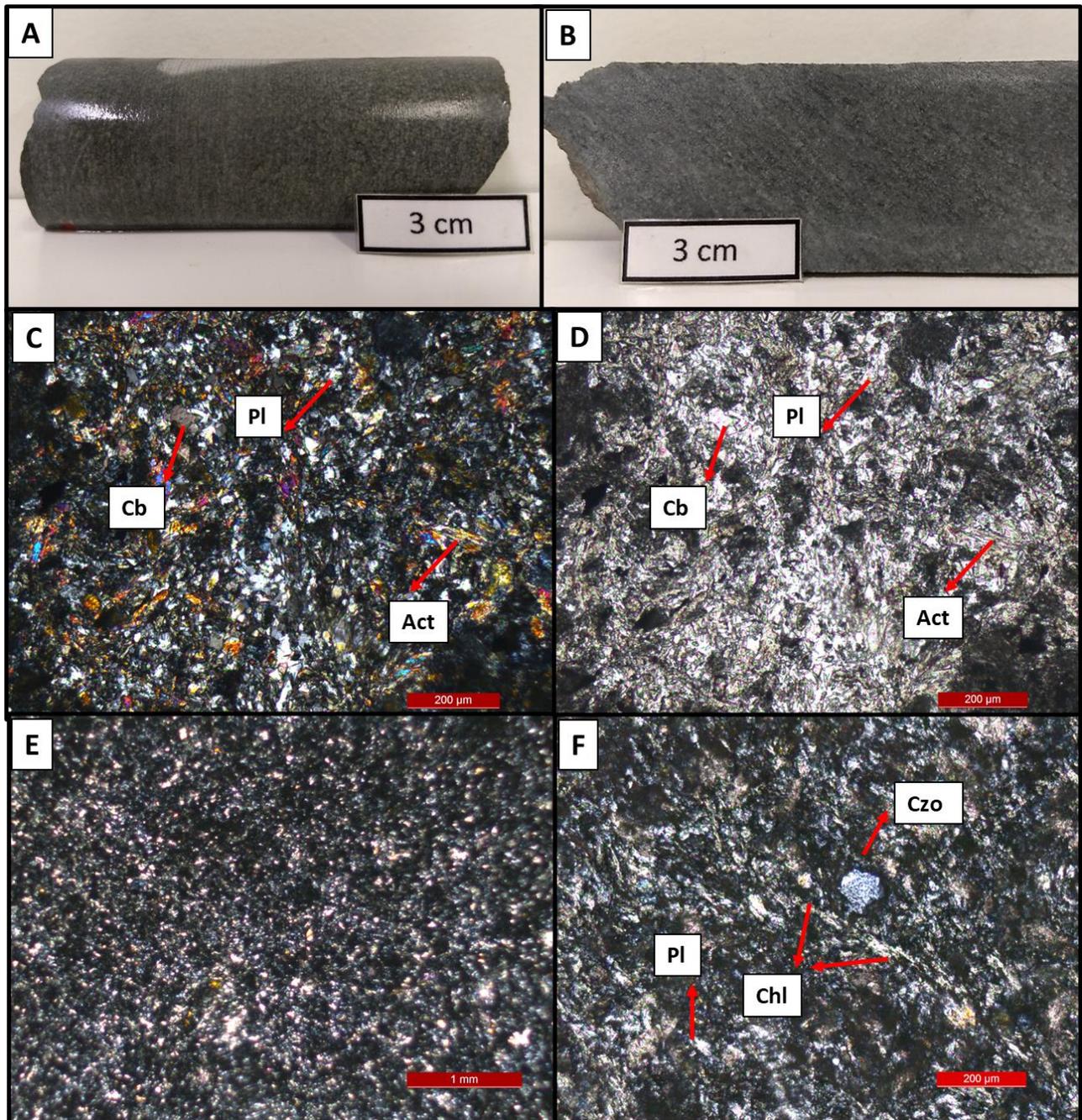


Figura 22 – Amostras de rochas vulcânicas coletadas em testemunhos de sondagem: textura fanerítica, cor verde e foliação incipiente. A) Amostra 27CP0042; B) Amostra 30QM1127; C) Fotomicrografia mostrando aspecto geral da matriz da amostra 27CP0042: plagioclásio e actinolita de granulação fina (LT/NC); D) LT/NP; E) Fotomicrografia mostrando aspecto geral da amostra 30QM1127. Matriz de granulação fina composta essencialmente por clorita, plagioclásio e carbonato (LT/NC); F) Detalhe da matriz fina composta por plagioclásio e clorita, com porfiroclasto de clinozoisita; amostra 30QM1127 (LT/NC).

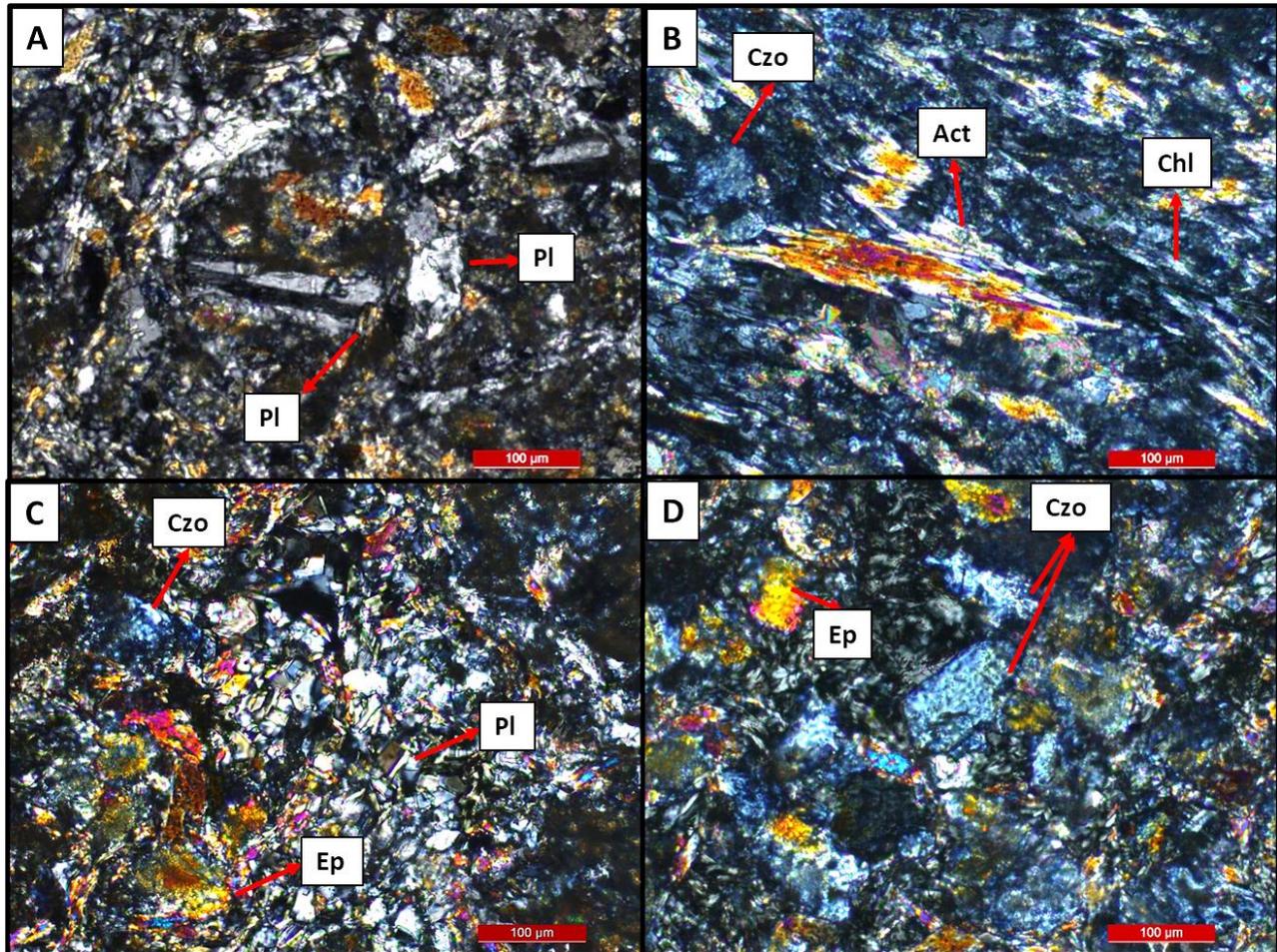


Figura 23 – Fotomicrografias das rochas vulcânicas: A) Plagioclásio euédrico tabular com geminação da albita em matriz composta por plagioclásio e epidoto; amostra 27CP0042 (LT/NC); B) Porfiroclasto de actinolita em matriz composta por feldspato, clinozoisita e clorita. Feldspato comumente substituído por clinozoisita; amostra 15CR2788 (LT/NC); C) Matriz fina composta por plagioclásio com porfiroclastos de epidoto; amostra 27CP0042 (LT/NC); D) Cristais subédricos e textura porfiroclástica de epidoto e clinozoisita; amostra 27CP0042 (LT/NC).

#### 4.1.4. Pelito carbonoso

O pelito carbonoso possui granulação fina, cor preta a cinza escura, foliada. A rocha suja a mão ao tato, principalmente ao contato com os planos de deslocamento da foliação. Vênulas quartzo-carbonáticas estão disseminadas e ocorrem na forma de lentes, de espessura milimétrica a submilimétrica, concordantes à foliação (*Figura 24A*).

Microscopicamente a rocha apresenta textura lepidoblástica e é composta essencialmente por matéria carbonosa, quartzo, sericita e carbonato. A foliação é definida pela orientação da matéria carbonosa e sericita. É fracamente anastomótica e contorna faixas e porfiroclastos de quartzo e carbonato em formato lenticular (*Figura 24B e Figura 24C*).

A matéria carbonosa é representada por camadas escuras, amorfas, dispostas segundo a foliação. Sericita ocorre como grãos finos, ripiformes, lenticulares a sigmóides, alongados segundo a foliação, subédricos a anédricos. Estão dispersos pela matriz em meio à massa de matéria carbonosa e localmente estão associadas às faixas quartzosas.

Quartzo e carbonato ocorrem predominantemente em agregados que compõem vênulas, lentes em formato sigmoide, orientadas segundo a foliação. Quartzo é o mineral dominante nessas faixas e compõe aproximadamente 40% da rocha. Formam agregados de grãos de granulação fina, porém maior do que a da matriz, anédricos a subédricos, com contatos que variam de retos a disformes, com extinção ondulante. Carbonatos ocorrem geralmente associados aos agregados de quartzo e são descritos com granulação fina, mais grossa do que a do quartzo, anédricos a euédricos.

Sulfetos (pirita e pirrotita) e opacos ocorrem principalmente associados às venulações quartzo-carbonáticas, muitas vezes com sombras de pressão.

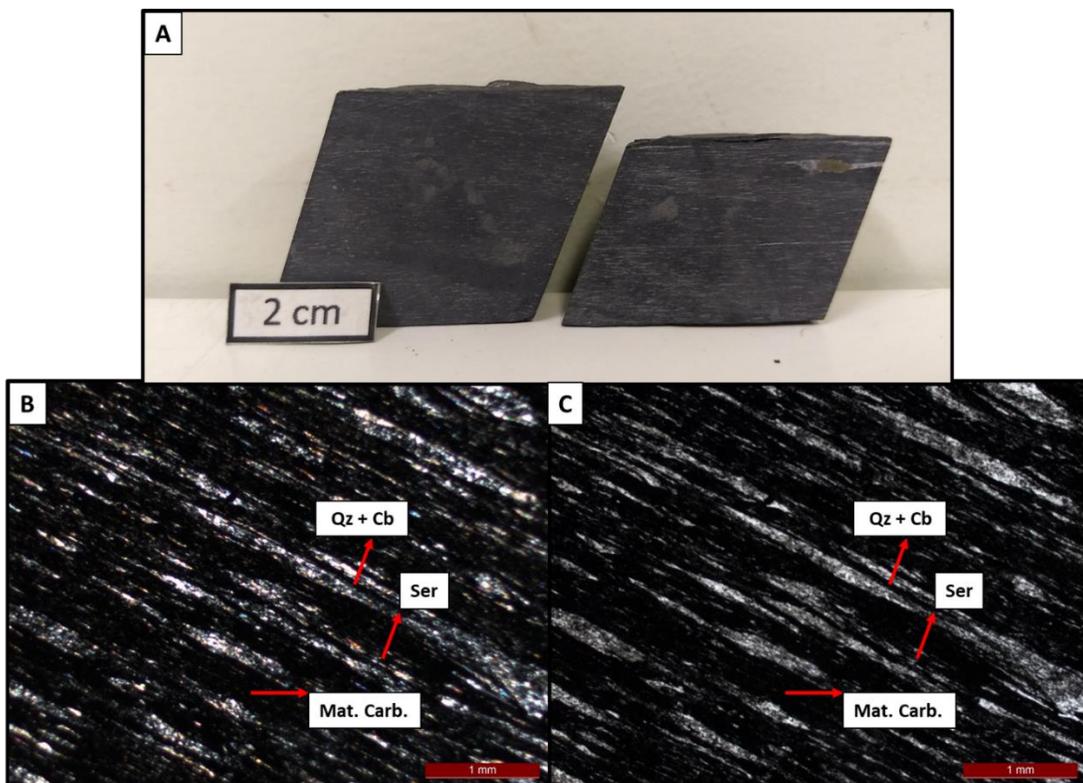


Figura 24 – Pelito carbonoso: A) Amostra de pelito carbonoso 19CR2793 coletada em testemunho de sondagem;; B) Fotomicrografia da amostra 19CR2793 mostrando matriz composta por matéria carbonosa e lentes quartzo-carbonáticas concordantes à foliação (LT/NC); C) LT/NP.

## 5. ARTIGO

### **Geochemistry of BIF, ferruginous chert and volcanic rocks from the Archean Lamego gold deposit: depositional model and implications for metallogenesis and geotectonic context of the Rio das Velhas greenstone belt**

Vinícius Nogueira DUARTE<sup>1</sup>, Lydia Maria LOBATO<sup>1</sup>, Rosaline Cristina FIGUEIREDO E SILVA<sup>1</sup>, Noreto Costa SENA<sup>1</sup> and Breno de Souza MARTINS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geociências, Centro de Pesquisa Manuel Teixeira da Costa, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270, Brasil ([vinicius.nogueira.duarte@gmail.com](mailto:vinicius.nogueira.duarte@gmail.com))

<sup>2</sup> Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, LMG-746, km 1, Minas Gerais, Brasil.

---

**Abstract:** The paper focuses on metamorphosed banded iron formation and ferruginous chert host gold mineralization in the Lamego orogenic gold deposit, which is inserted in the context of the Neoproterozoic Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. These chemical sedimentary rocks are classified as Algoma-type BIF and occur in a typical association of deep oceanic rocks: intermediate to mafic volcanic, BIF, and carbonaceous pelite. With a relatively low Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> average content, these rocks are close to the 15% limit that distinguishes BIF and ferruginous chert from one another. Their dominant iron mineral is fine-grained siderite, which is considered the primary phase, darkened by the presence of carbonaceous matter. Ankerite is subordinate, both hydrothermal and primary, whereas magnetite and stilpnomelane occur locally and are secondary. Both the BIF and chert have no significant mineralogical and geochemical variations that could have directly influenced gold mineralization, such as facilitating sulfide precipitation. Their geochemistry and rare-earth elements (REE) patterns indicate sedimentation in a deep marine environment with hydrogenous, high temperature hydrothermal fluids and detrital contributions. Among the main characteristics of the PAAS normalized patterns are: positive La, Eu and Ce anomalies; heavy REE enrichment, relative to the light and intermediate REE; chondritic to superchondritic values for Y/Ho ratios. The volcanic rock from the base of the Lamego stratigraphic sequence varies from basalts to andesitic basalts, with a calcium-alkaline signature defined by the ratio La/Sm > 3. This composition is similar to those of the basal volcanic rocks at the nearby, world-class Cuiabá deposit, where these constitute the hosts to mineralized, shear-related quartz veins. The Nb and Ta negative anomalies identified in the multielement spidergram normalized to the primitive mantle indicate that they are closely associated with continental arc basalts. The geochemical results suggest that the Lamego rocks are associated with a marine environment, under the influence of a continental arc, probably related to the Rio das Velhas II event (2800 - 2760 Ma). Alternatively, some authors argue in favor of BIF deposition in restricted basins. In the case of Lamego, the latter hypothesis is supported by the existence of samples with Y/Ho ratios below chondritic values. In addition, these results extend the gold exploration horizon in the Rio das Velhas greenstone, since they further supports the strong epigenetic character of the hydrothermal mineralizing event, which apparently overlapped the entire volcano-sedimentary rock package.

**Keywords:** Banded iron formation; rare-earth elements; mafic volcanics; Archean; greenstone belt Rio das Velhas; gold mineralization.

## 5.1. Introduction

Banded iron formations (BIF) are chemical sedimentary rocks that contain 15 – 40% of total Fe in their composition. Banding is defined by the successive intercalation of bands containing iron-bearing minerals, such as carbonates, silicates, oxides, and iron-poor bands, dominated by chert, quartz, and minor carbonate (e. g., James, 1954; Klein, 2005; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017).

These rocks generally occur in Archean to Paleoproterozoic terranes interlayered with volcanic and sedimentary rocks, in greenstone belts (Algoma type) and in sedimentary successions within well-preserved Meso- to Neoproterozoic and Paleoproterozoic sedimentary basins (Lake Superior type) (Muhling and Rasmussen, 2020). The Archean Rio das Velhas greenstone belt, Algoma-type BIF, the subject of the present paper, is genetically associated with ultramafic/mafic to intermediate volcanic rocks, and on a smaller scale, to felsic rocks, carbonaceous shale, and greywacke (Beukes and Gutzmer, 2008; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017). Because these rocks are associated with the ocean floor environment, their formation and deposition are closely linked to hydrothermal vent fluids related to underwater volcanism (Gross, 1980; Planavsky et al., 2010; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

In this study, we undertake petrographic and geochemical studies at the BIF-hosted Lamego gold deposit, inserted in the context of the Archean Rio das Velhas greenstone belt (Fig. 1) (Dorr II et al., 1957; Loczy and Ladeira, 1976), a basal supracrustal, metavolcano-sedimentary sequence in the Quadrilátero Ferrífero (QF), Minas Gerais, Brazil. It is located in the town of Sabará, 5 km southwest of the world-class Cuiabá gold deposit (Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Kresse et al., 2018), to the northern portion of the QF. Exploited in an underground mine by AngloGold-Ashanti Córrego do Sítio Mineração S/A, Lamego is an Archean orogenic gold deposit (Martins et al., 2016), with estimated mineral resources of 12.13 million tons, at an average grade of 3.06 g/t Au (AGA personal communication, 2019). The four orebodies (Cabeça de Pedra, Carruagem, Arco da Velha and Queimada) are structured along the Lamego fold bounded by the association (base to top) of volcanic rock, BIF/ferruginous and/or carbonaceous chert, and carbonaceous pelite, metamorphosed into the greenschist metamorphic facies (Figs. 2 and 3) (Sales, 1998; Martins et al., 2016).

The analysis details petrographic and geochemical characteristics of the BIF/ferruginous and/or carbonaceous chert in order to: 1) associate their primary geochemical signature and mineralogy with the gold mineralization, so as to investigate if their composition somehow influenced gold enrichment; 2) validate a depositional setting within the Rio das Velhas basin according to the rare-earth elements

(REE) systematics and determine the reservoirs of these chemical sediments: volcanogenic hydrothermal fluids, seawater (hydrogenous component), and clastic contamination.

Based on works such as Beukes and Gutzmer (2008), Planavsky et al. (2010) and Thurston et al. (2012) Gourcerol et al. (2016) and Araújo and Lobato (2019) carried out similar studies on a regional scale. Gourcerol et al. (2016) have investigated four BIF-hosted gold deposits (Meadowbank, Meliadine, Musselwhite and Beardmore-Geraldton) from four different greenstone belts in Canada, while Araújo and Lobato (2019) focused on BIF-hosted gold deposits (Cuiabá, Lamego, Raposos, Urubu, São Bento) in the Rio das Velhas greenstone belt as a whole.

The present work also explored the importance of the volcanic rocks (basalt-andesite) at the base of the Lamego sequence. The combined interpretation of the geochemistry of BIF and volcanic rocks allows for a better understanding of their tectonic environment, enriching the discussion about the tectonic evolution of the Rio das Velhas greenstone belt. The results presented here reveal a continental-arc environment, indicating a new tectonic setting not proposed by the other authors who have studied basalts from different locations in the Rio das Velhas greenstone belt (Zucchetti, 1998; Zucchetti et al., 2000a; Verma et al.; 2017).

## **5.2. Geological context**

### ***5.2.1 Regional geology***

The present paper focuses on rocks of the Rio das Velhas Supergroup (Dorr II et al., 1957; Loczy and Ladeira, 1976), the eponymous Archean greenstone belt, in the QF (Figure 1). The QF (Dorr II, 1969) is an important Brazilian metallogenic province that covers a region of approximately 7,000 km<sup>2</sup> (e.g. Lobato et al., 2014), being located on the border between the southern portion of the São Francisco Craton (Almeida, 1977) and the Araçuaí orogen (Pedrosa-Soares et al., 2007).

The QF consists of an association of supracrustal rocks preserved in keels, aged between the Neoproterozoic and the Paleoproterozoic, surrounded by granite-gneissic domes that make up its basement (Figure 1). On a regional scale, it has a rectangular shape, resulting from polyphasic deformation cycles (Chemale Jr. et al., 1994).

The QF's stratigraphy is divided into four main units that represent the stages of Archean crust formation and basin- opening and closing cycles: (i) Metamorphic complexes of Archean age, (ii) Rio das Velhas Supergroup, (iii) Minas Supergroup, and (iv) Itacolomi Group.

*The Archean metamorphic complexes* are essentially composed of TTG-type (trondhjemitonalito-granodiorito) (Noce et al., 1997) gneisses, migmatites and granitoids, and occur as domes bordering the supracrustal sequences in tectonic contacts (Alkmim and Marshak, 1998). The main complexes are Belo Horizonte, Bonfim, Bação, Campo Belo, Caeté, Santa Bárbara and Santa Rita. They represent the result of magmatic-metamorphic events named by Lana et al. (2013), Farina et al. (2015), and Farina et al. (2016) as Santa Bárbara (SB - 3220 to 3200 Ma), Rio das Velhas I (RVI - 2930 to 2850 Ma), Rio das Velhas II (RVII - 2800 to 2760 Ma), and Mamona (2750 to 2680 Ma).

The Rio das Velhas Supergroup (Dorr II et al., 1957; Loczy and Ladeira, 1976) (Figure 1) is composed of metavolcano-sedimentary rocks with the predominance of clastic over volcanic rocks, as proposed by Baars (1997). Most of these rocks display mineral assemblage indicative of greenschist facies metamorphic conditions, locally reaching amphibolite facies, and are commonly affected by hydrothermal alteration (Zucchetti et al., 1998).

This sequence hosts a large number of gold deposits at its basal unit, the Nova Lima Group, as is the case in the Cuiabá, Lamego, Raposos, and Morro Velho deposits (e.g., Ladeira, 1988; Junqueira, 1997; Lobato et al., 2001a; Lobato et al., 2001b; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Martins et al., 2016; Kresse et al., 2018). As a rule, mineralization is structurally controlled and occurs in three main styles, according to Lobato et al. (2001a): sulfide replacement zones in BIF; disseminated sulfide minerals and gold in hydrothermally altered rocks along shear zones; and auriferous quartz–carbonate–sulfide veins and veinlets in mafic, ultramafic, and felsic volcanic rocks, as well as in clastic sedimentary rocks.

Dorr II (1969) divided the Rio das Velhas Supergroup into the Nova Lima and Maquiné groups, from the bottom to the top. The U-Pb dating (SHRIMP and ID-TIMS) performed by Noce et al. (2005) for the volcanoclastic rocks of Rio Acima, Caeté, and Rio Vermelho provided ages between  $2792 \pm 11$  and  $2751 \pm 9$  Ma. Hartmann et al. (2006) obtained a maximum deposition age of  $2749 \pm 7$  Ma for detrital zircons of sandstones at the top of the Nova Lima Group.

Using the concept of lithofacies associations for Archean terranes (Eriksson et al., 1994), Baltazar and Zucchetti (2007) defined four sedimentary cycles related to the deposition of seven lithofacies associations in the Rio das Velhas greenstone belt:

- (i) Cycle 1: deposition of mafic-ultramafic and volcano-chemical-sedimentary associations in a deep-sea environment, with the opening of a basin and the gradual decrease in volcanic spills accompanied by an increase in chemical deposition.

- (ii) Cycle 2: clastic-chemical-sedimentary, resedimented and coastal associations, in a platformal and coastal environment, with shallower waters far from the volcanic centers.
- (iii) Cycle 3: deposition of the volcanoclastic and resedimented associations, in a collisional environment, with the formation of island arcs; proximal and distal turbidites, alluvial fans, and fluvial deposits.
- (iv) Cycle 4: deposition of the non-marine association in a fore-arc basin; there are alluvial fans and fluvial deposits characteristic of young intertwined rivers.

The Minas Supergroup (Dorr II et al., 1957; Dorr II, 1969) is a Neoproterozoic to Paleoproterozoic metasedimentary unit (Koglin et al., 2014; Babinski et al., 1995), lying in an angular unconformity over the Rio das Velhas Supergroup (Alkmim and Marshak, 1998). It contains clastic and chemical sedimentary rocks that include quartzites, metaconglomerates, metapelites, and a thick sequence of Lake Superior type BIF (Chemale Jr. et al., 1994). They represent a gradation from continental environment to continental shelf, approximately 6,000m thick. The Itacolomi Group (Dorr II, 1969; Alkmim and Marshak, 1998), in turn, occurs in a regional angular unconformity over the Minas Supergroup, restricted to the south part of the QF.

The QF presents a complex tectonic-structural evolution resulting from several tectonic events that have taken place throughout its geological evolution (Alkmim and Marshak, 1998; Baltazar and Zucchetti, 2007; Teixeira et al., 2015). Baltazar and Zucchetti (2007) recognize four phases of structural generations (D1, D2, D3 and D4) in the Rio das Velhas greenstone belt, related to three deformational events. The D1 and D2 are both associated with ductile and progressive Archean regimes; the D3 generation is correlated to an extensional, Paleoproterozoic regime; and D4 is characterized by a compressive, ductile-brittle event of Neoproterozoic age.

### ***5.2.2 Geological context of the Lamego gold deposit***

The Lamego deposit (Figure 2 and Figure 3) is part of the volcanoclastic association (sedimentation cycle 3) proposed by Baltazar and Zucchetti (2007). Sales (1998) and Martins et al. (2016) suggest the following stratigraphic sequence for the Lamego volcano-sedimentary package:

- Basalt with possible variation to andesite, and a calcium-alkaline affinity; it is represented by massive metabasalt and schist composed by chlorite, carbonate, quartz, sericite, and plagioclase, with thickness ranging between 150 to 200 m.

- BIF and ferruginous to carbonaceous chert, with thickness ranging from 1 to 8 m, locally reaching 15 m. Light bands are dominated by quartz, with subordinate carbonate, whereas dark bands

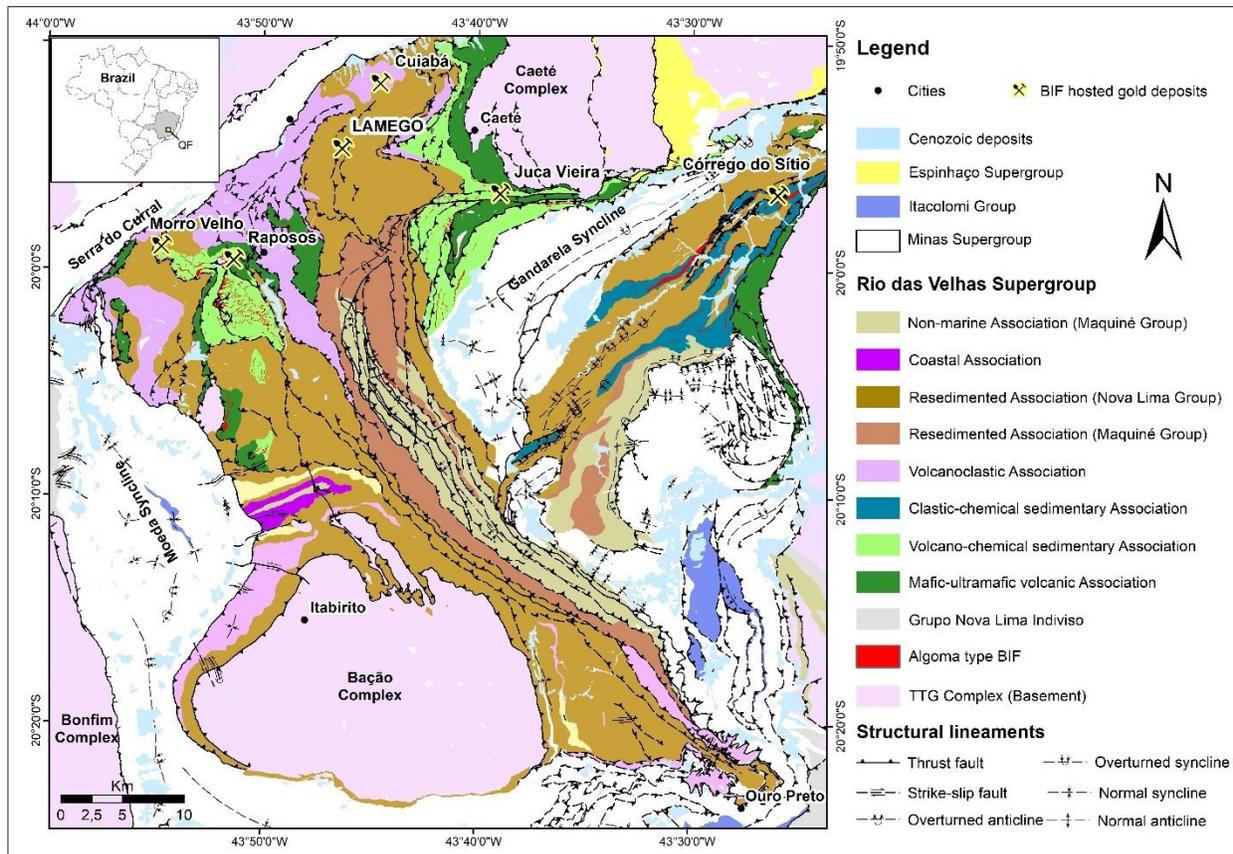


Figure 1 - Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero highlighting the Rio das Velhas greenstone belt and the lithofacies associations defined by Baltazar and Zucchetti (2007). Modified from Lobato et al. (2005).

are carbonate (usually siderite) rich, with carbonaceous matter. The Lamego BIF generally presents Fe values close to the 15% limit, which generates a variation between the BIF and ferruginous chert throughout the deposit. Magnetite BIF is a minor occurrence.

- Carbonaceous pelite, represented by dark-colored phyllite, is composed of quartz, sericite, and carbonaceous matter, with a thickness from 1 to 5 m.

- Pelites with epiclastic and volcanoclastic contribution, forming schists and phyllites with sericite, quartz, carbonate, chlorite, and carbonaceous matter.

- Diabase dikes and sills composed of hornblende, actinolite-tremolite, epidote, chlorite, carbonate, plagioclase, sericite, and quartz.

The Lamego deposit is delimited by the Lamego fold, with a perimeter of approximately 4.8 km and a lateral length that reaches 450 m (Figure 2Figure 3); it is defined by the association of BIF/chert capped by a layer of carbonaceous pelite. It is a reclined, isoclinal, cylindrical and rootless fold, with an NW-SE oriented fold axis, plunging between 20° and 30° SE/E (Martins et al., 2016). The Queimada

and Arco da Velha orebodies are situated on the overturned and normal limbs, respectively. The Cabeça de Pedra orebody sits at the SW hinge zone, whereas the Carruagem orebody at the NE fold end.

Sales (1998), Martins (2011) and Martins et al. (2016) describe the structural evolution in the Lamego deposit and separate sets of structures associated with deformational events, which overlap each other and generate a complex and polyphasic structural context. Martins (2011) and Martins et al. (2016) define two generations of structures, respectively named G1 and G2. The NE-SW-striking G1-related structures dip SE and were developed in a progressive deformation (ductile-brittle character) associated with the gold mineralization control. The N-S-striking G2 structures are essentially brittle and dip to the W.

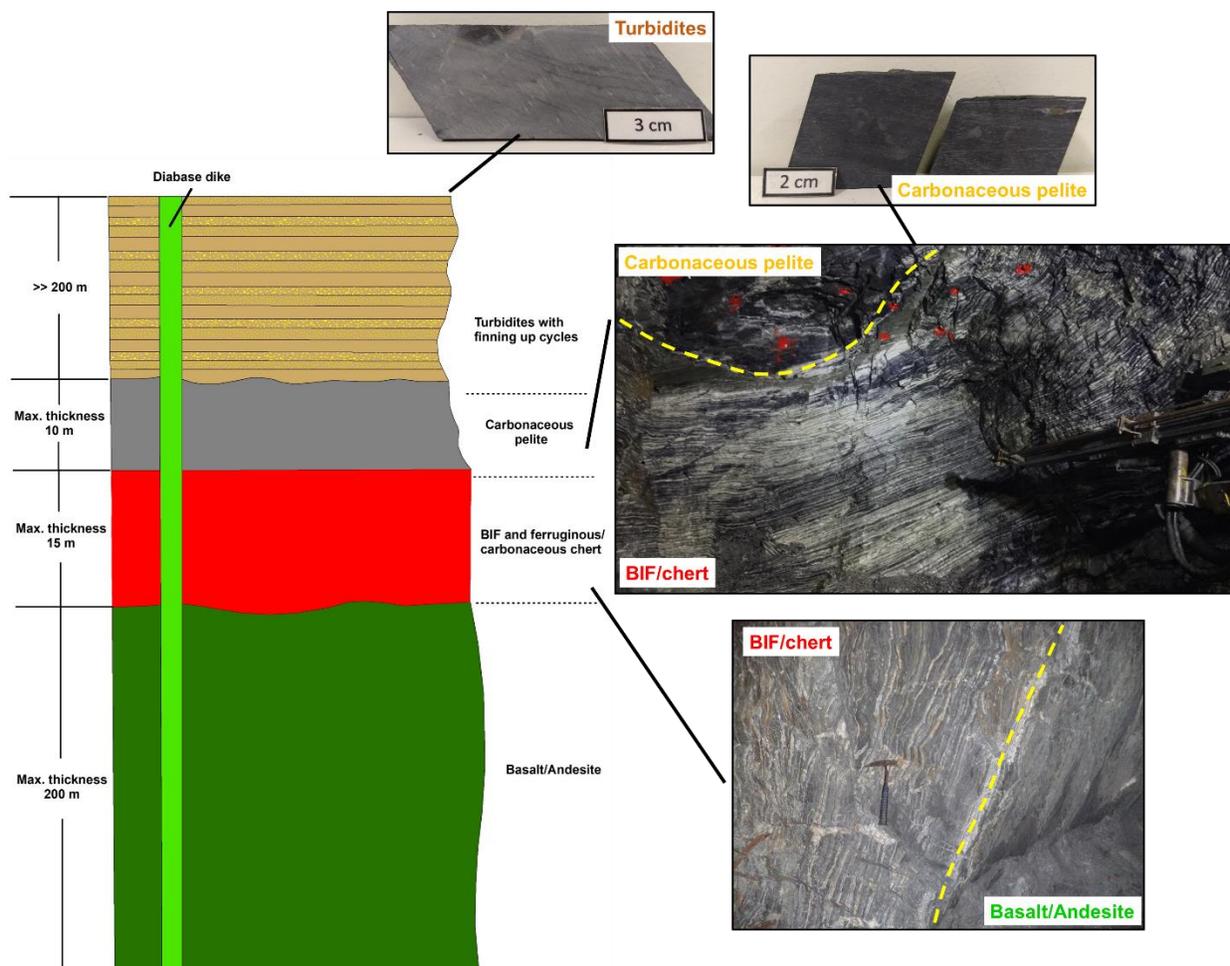


Figure 2 - Stratigraphic column of the Lamego gold deposit as proposed by Sales (1998) and Martins et al. (2016).

### 5.2.3 Gold mineralization and hydrothermal alteration

Lamego is a structurally controlled BIF hosted gold deposit where mineralization is distributed over four orebodies, namely Cabeça de Pedra, Carruagem, Arco da Velha and Queimada. There are two

main styles of mineralization (Sales, 1998, Martins, 2011, Martins et al., 2016, and Morales et al., 2016): (i) gold-bearing sulfide minerals related to the replacement of iron-rich bands in BIF and chert by sulfides, mainly pyrite, arsenical pyrite, pyrrhotite and arsenopyrite (massive sulfide zones); (ii) free gold in quartz veins, predominantly masses of smoky quartz, in shear-related zones (massive silicification zones).

Sales (1998) details the hydrothermal alteration in the Lamego mafic volcanic rocks based on the work of Vieira (1991), and identifies five alterations facies (Types 1 to 5). For the Rio das Velhas greenstone belt, this latter author classified proximal (sericite), intermediate (carbonate), and distal (chlorite) hydrothermal alteration zones; the intensity of quartz veining, associated with the occurrence of sulfides, increases from the distal to the proximal zone. Martins et al. (2016) describe three types of hydrothermal alteration that affect all lithotypes, including BIF. They are represented by quartz in silicification zones, sulfides, and carbonates, mainly ankerite.

The U-Pb SHRIMP dating of monazite grains in mineralized mafic rock indicates a mineralization age of 2730 +/- 42 Ma (Martins et al., 2016).

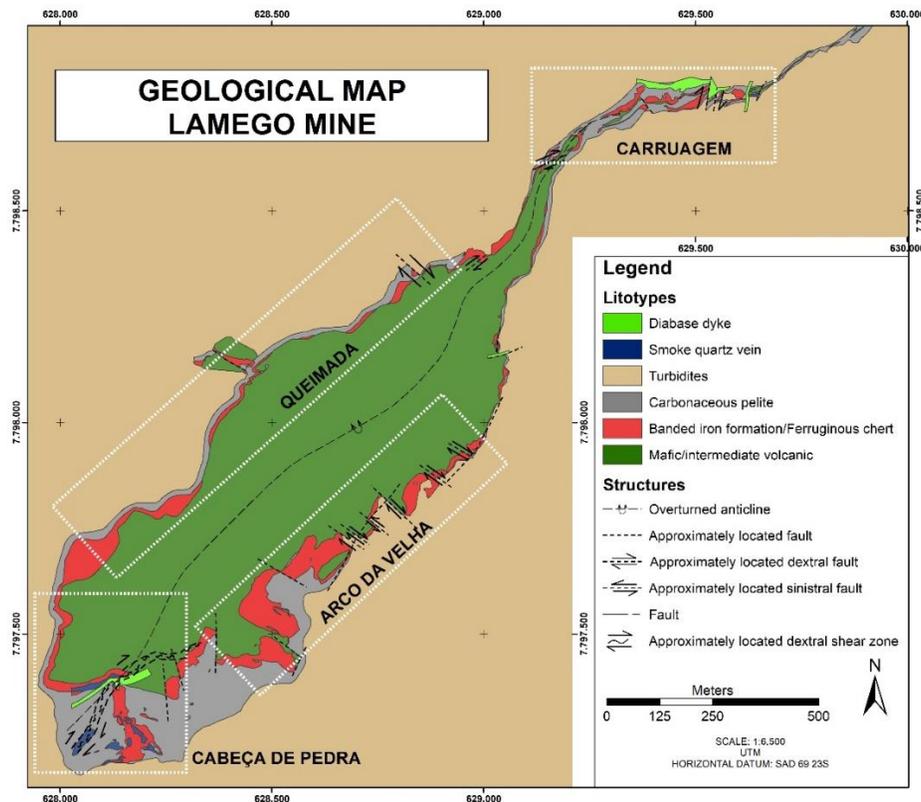


Figure 3 - Geological map of the Lamego gold deposit showing the main orebodies: Queimada, Carruagem, Arco da Velha e Cabeça de Pedra. Modified from Villanova (2011).

### **5.3. MATERIALS AND METHODS**

#### ***5.3.1 Sampling***

Seeking the best coverage and representativeness of the Lamego deposit rocks, the following lithotypes were sampled: BIF and chert, non- or slightly hydrothermally altered; hydrothermally altered BIF/chert (including ore samples); volcanic rocks; and carbonaceous pelite.

The software Leapfrog Geo 5.04 was used for spatial control of the collected samples (Figure 4).

##### ***5.3.1.1 BIF and ferruginous chert***

Twenty-four samples of non- or slightly hydrothermally altered BIF and ferruginous chert from the Lamego deposit were collected in core samples (nine samples) and outcrops of underground galleries (fifteen samples) (Tabela 1).

The samples display banding/lamination and absence or minimal occurrence of features indicative of hydrothermal alteration, such as sulfides, venulations and carbonate alteration.

The four orebodies (Cabeça de Pedra, Arco da Velha, Carruagem and Queimada) were sampled at all levels with available access (Figure 4).

To complement the data, five BIF/ferruginous chert samples were added: three from the Carruagem orebody and two from the Queimada orebody, all taken from Araújo (2018), where the sampling criteria were similar to those described here.

##### ***5.3.1.2 Hydrothermally altered BIF and ferruginous chert***

Eleven drill core samples of hydrothermally altered BIF and ore (quartz/sulfide dominated) were collected in the Carruagem and Queimada orebodies.

##### ***5.3.1.3 Volcanic rocks***

Nine drill core samples were collected, with three samples from each of the Cabeça de Pedra, Carruagem and Queimada orebodies.

Five volcanic rocks samples taken from Araújo (2018) were integrated into the work; three samples from the Queimada body and two from the Carruagem.

The mean value for Cuiabá basal volcanic rocks (Silva, 2006) is also used for comparison.

##### ***5.3.1.4 Carbonaceous pelite***

Three drill core samples of carbonaceous pelite, two from the Cabeça de Pedra and one from the Carruagem.

### 5.3.2 Petrographic analysis

Macroscopic petrography was performed for all samples in order to filter those considered to have the best degree of preservation of primary structures and features.

Table 6 – BIF, ferruginous chert, hydrothermally altered BIF, ore, mafic volcanic and carbonaceous pelite samples collected in the four orebodies (Carruagem, Cabeça de Pedra, Arco da Velha e Queimada).

Sample	Litotype	Orebody	Level	Sample	Litotype	Orebody	Level
01QN03LE	BIF	Queimada	3	01CR2726	Hydrothermally altered BIF	Carruagem	8
02QN03LE	BIF	Queimada	3	05CR2760	Ore	Carruagem	8/9
17QN0400	BIF	Queimada	4	06CR2765	Ore	Carruagem	8/9
17QN0401**	Chert	Queimada	4	07CR2767	Hydrothermally altered BIF	Carruagem	8/9
17QN0402*	BIF	Queimada	4	33QM1184	Hydrothermally altered BIF	Queimada	4/5
06AVN2LE	BIF	Arco da Velha	2	41QM1228	Ore	Queimada	4/5
12AVN01	BIF	Arco da Velha	1	46QM1234	Ore	Queimada	4/5
13AVN0200	BIF	Arco da Velha	2	47QM1235	Hydrothermally altered BIF	Queimada	5
13AVN0201**	BIF	Arco da Velha	2	48CR0160	Hydrothermally altered BIF	Carruagem	9
02CR2737	BIF	Carruagem	4/5	49CR0168	Ore	Carruagem	9
03CR2741	Ferruginous Chert	Carruagem	4/5	50QM1227	Hydrothermally altered BIF	Queimada	5
04CRN6.1B	BIF	Carruagem	6	11CP0038	Mafic volcanic	Cabeça de Pedra	6
07CRN6.1C	BIF	Carruagem	6	15CR2788	Mafic volcanic	Carruagem	8/9
08CRN8.1	BIF	Carruagem	8	17CR2790	Mafic volcanic	Carruagem	8/9
09CRN4.1Sub	BIF	Carruagem	4	18CR2787	Mafic volcanic	Carruagem	8/9
10CRN8.1Asc	Ferruginous Chert	Carruagem	8	27CP0042	Mafic volcanic	Cabeça de Pedra	5/6
11CRN7.1	Ferruginous Chert	Carruagem	7	30QM1179	Mafic volcanic	Queimada	4/5
24CR2803	BIF	Carruagem	8/9	37QM1173	Mafic volcanic	Queimada	4/5
10CP0039	Ferruginous Chert	Cabeça de Pedra	6	08CP0039	Mafic volcanic	Cabeça de Pedra	6
14CP0039	Ferruginous Chert	Cabeça de Pedra	6	31QM1179	Mafic volcanic	Queimada	4/5
20CP0036	BIF	Cabeça de Pedra	6	CRN1Mafica002*	Mafic volcanic	Carruagem	2
45QM1234	Ferruginous Chert	Queimada	5/6	CRN1MaficaA001*	Mafic volcanic	Carruagem	1
21QN0401	Ferruginous Chert	Queimada	4	QUN1Mafica001*	Mafic volcanic	Queimada	1
44QM1234	BIF	Queimada	5/6	QUN1Mafica002*	Mafic volcanic	Queimada	2
LAM01CR*	BIF	Carruagem	-	QUN2Mafica001*	Mafic volcanic	Queimada	1
LAM02CR*	BIF	Carruagem	-	19CR2793	Carbonaceous pelite	Carruagem	8/9
LAM18CR*	BIF	Carruagem	-	29CP0040	Carbonaceous pelite	Cabeça de Pedra	5/6
LAM03QM*	Ferruginous Chert	Queimada	-	36CP0049	Carbonaceous pelite	Cabeça de Pedra	5/6
LAM05QM*	Ferruginous Chert	Queimada	-	-	-	-	-

\*Samples from Araújo (2018)

\*\*Carbonate/chert layers only

Thirty-one polished thin sections were described: eighteen of BIF/ferruginous chert; four of the volcanic rocks; two of carbonaceous pelite; and seven of altered BIF/ore. A Leika- reflected and transmitted light-microscope was used.

Two metallized thin-sections were studied using the SEM (scanning electron microscope) at the UFMG Microscopy Center with an EDS (energy-dispersive detector) attached.

The analyzed samples were metallized beforehand with a thin sheet of graphite in order to make them conductive. The SEM used was a Quanta 200 FEI, equipped with an X-ray spectrometry microanalysis system (EDS) Bruker Nano. Analyzes were carried out with electron acceleration voltage between 15 kV and 30 kV and analyzed in the SEM through images created by the backscattering electron detector (BSE).

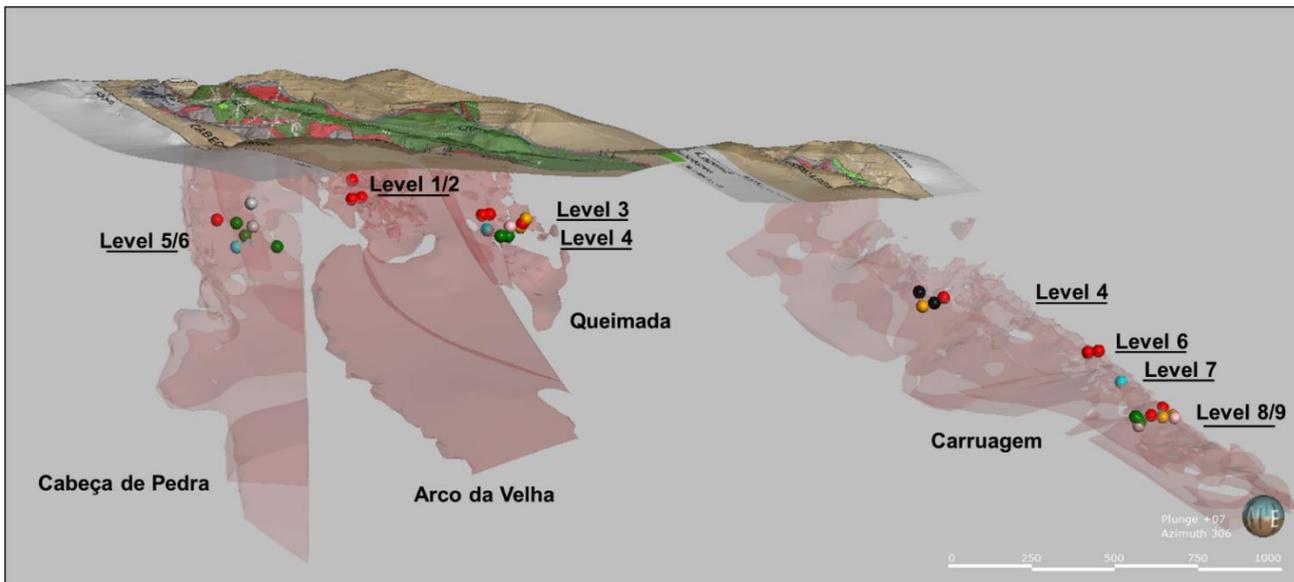


Figure 4 – BIF (red), ferruginous chert (light-blue), volcanics (green), carbonaceous pelite (light gray), altered magnetite BIF (black), altered carbonate BIF (light pink) and ore (orange) samples collected in the four orebodies (E-W view) of the Lamego gold deposit: Carruagem, Queimada, Arco da Velha and Cabeça de Pedra.

### 5.3.3 Geochemical analyses

Whole-rock geochemical analyses were performed at the Bureau Veritas Minerals laboratory in Canada. Forty-seven samples were analyzed, among twenty-four of BIF and ferruginous chert, eleven of altered BIF and ore, nine of volcanic rocks and three of carbonaceous pelite. The study includes major, minor and trace elements.

Major and some minor elements were analyzed by ICP-ES/MS after lithium borate digestion. The concentration of the other minor and trace elements, including REE were obtained by ICP-MS after dissolution by lithium borate and/or aqua regia. The concentrations of C and S were determined by the Leco analytical method.

### 5.3.4 Data comparison, normalization and calculation of anomalies

#### 5.3.4.1 BIF/ferruginous chert, hydrothermally altered BIF, ore and carbonaceous pelite samples

The BIF geochemical evaluation was made by relying on papers that seek to characterize the REE geochemistry of (modern/past) seawater and volcanogenic hydrothermal fluids (Figure 5) (Alibo and Nozaki, 1999; Bau and Dulski, 1999), given that these references are generally considered as the main BIF chemical reservoirs (Alexander et al., 2008; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016).

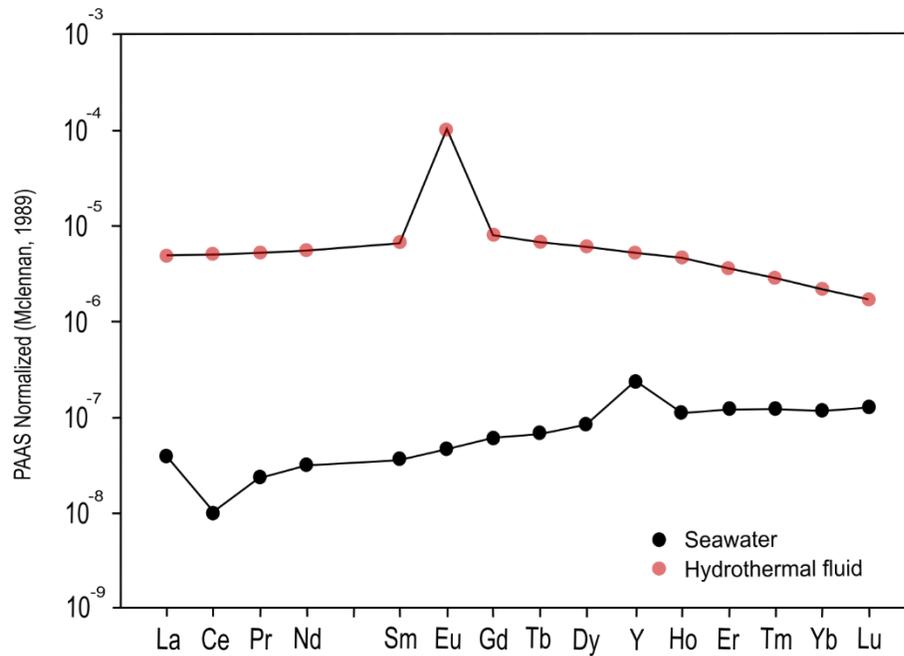


Figure 5 - REE + Y of hydrothermal fluid (Bau and Dulski, 1999) and seawater (Alibo and Nozaki, 1999) (McLennan, 1989) PAAS-normalized patterns.

The geochemical normalization of the REE + Y was made using the PAAS (McLennan, 1989) based on the literature in order to highlight the anomalies that represent the genesis of BIF and ferruginous chert.

According to Lawrence and Kamber (2006) the marine patterns of REE + Y are recognized by their distance from the smooth curve normalized by the shale. The expected concentration of a given REE can be approximated by interpolating the values of the neighboring REE. However, in situations where a particular REE behaves anomalously, it is not included in the calculation. Lawrence and Kamber (2006) define marine anomalies as:

$L_n/L_n^*$ , where  $L_n$  = lanthanide concentration normalized by the shale and  $L_n^*$  = expected and calculated normalized concentration from the following equations:

$$- La_n^* = Pr_n^*(Pr_n / Nd_n)^2 \quad - Ce_n^* = Pr_n^*(Pr_n / Nd_n)$$

$$- Eu_n^* = (Sm_n^2 * Tb_n)^{1/3} \quad - Gd_n^* = (Tb_n^2 * Sm_n)^{1/3}$$

$$- Y_n^* = Y_n / (0,5Er_n * 0,5Ho_n)$$

### 3.4.2 Volcanic rock samples

The volcanic rock samples normalization was made according to the Sun and McDonough (1989) chondrite for the REE diagram, and according to the primitive mantle of Palme and O'Neill (2014) for the multi-element diagram (major and trace elements).

## 5.4. RESULTS

### 5.4.1 Petrography

The studied rocks are all metamorphic, greenschist facies, however, the sedimentary nomenclatures were privileged aiming at the objective of the work of discussing the depositional model of the Lamego rocks.

#### 5.4.1.1 BIF and ferruginous chert

Siderite/ankerite BIF, magnetite BIF, and its variations to ferruginous chert were the possible descriptions, depending on the carbonate/quartz ratios. Both BIF and chert present carbonaceous matter contribution.

*Carbonate BIF and chert* are characterized by the intercalation of millimeter to centimeter light-beige-to-white bands and dark-gray-to-black bands (Figure 6A and 6B). Microscopically, the banding can be thinner, submillimetric, defining a lamination (Figure 6C). In general, there is predominance of quartz bands, with a modal average of 65% quartz and 35% carbonates.

The light bands are composed of quartz, with minor carbonate (siderite and ankerite). Quartz is fine-grained, generally with polygonal and lobate contacts, locally with undulating extinction. Throughout the quartz bands, carbonate appears in isolated, fine- to medium grained, euhedral to anhedral, stained crystals.

The dark bands are composed of carbonate, with quartz locally dispersed in the matrix. They are dominated by fine-grained siderite, varying from anhedral to subhedral, usually with some carbonaceous matter as inclusions. Ankerite occurs in smaller proportions - as subhedral to euhedral, slightly coarser-grained, with clearer and smoother surfaces than siderite. Sericite, stilpnomelane, and chlorite are accessory minerals.

Carbonaceous matter is present in most samples, usually in quantities ranging from 1% to 5% (Figure 6D). It forms black, thin, discontinuous blades, in agreement with the compositional banding.

The existence of two carbonates under the optical microscope, one fine-grained and stained by dark dust, and the coarser-grained, with a cleaner and smoother surface, was confirmed by SEM with an EDS sensor attached, indicating that they are siderite and ankerite, respectively (Figure 6E and 6F).

The backscattered electron image (Figure 6E) for sample 01QN03LE distinguishes through the gray scale: quartz, siderite and ankerite, represented, respectively, by dark, light and intermediate gray. The compositional difference between the two carbonates are also highlighted by the Fe and Ca compositional map (Figure 6F). In this image, the Ca-rich phases, correlated to ankerite, are in orange tones, while the Fe-rich phases, in bluish tones, are correlated to siderite.

*Magnetite BIF* has medium- to fine-grained, subhedral to euhedral magnetite crystals overgrown on its carbonate bands (Figure 7A and 7B). Magnetite is generally dominant over carbonates in the iron-rich bands, commonly associated with pyrite and pyrrhotite (Figure 7B and Figure 7C). In the quartz bands, magnetite may be present as overgrown, isolated crystals.

Hydrothermal features are few in the non-altered samples and dominant in the hydrothermally altered samples. They are mainly evidenced by (i) quartz-carbonate veins, cross-cutting or parallel to banding (Figure 7D); minerals in veins are coarser grained than the host matrix's; (ii) coarse- to medium-grained ankerite, subhedral to euhedral, overgrowing the matrix or gradually advancing into carbonate bands (Figure 7E); (iii) sulfide minerals, such as pyrite, pyrrhotite and arsenical pyrite, overgrown and associated with the carbonate/magnetite bands (Figure 7C).

#### **5.4.1.2 Volcanic rocks**

The volcanic rocks are described by Sales (1998), Martins et al. (2016) and Morales et al. (2016) as basalt, with possible variations to andesite. It is a massive, phaneritic, light to dark green rock, composed predominantly of plagioclase (15-53%), actinolite (2-30%), and epidote/clinozoisite (4-20%) (Figure 8A, 8B, 8C, 8D and 8E). Microscopically, this rock is fine- to medium-grained, with inequigranular and granoblastic texture (Figure 8B, 8C, 8D and 8E).

Fine- to medium-grained, tabular plagioclase shows preserved twinning plans (albite law) (Figure 8B). Much of it is replaced by clinozoisite, chlorite, or carbonate, dispersed in the matrix and locally forming aggregates. Actinolite is fine- to medium-grained, dominating subhedral, with tabular to acicular habit (Figure 8C). It may occur as radial fibers associated with plagioclase aggregates. Epidote and clinozoisite are both anhedral, medium-grained, locally presenting a porphyroclastic microstructure (Figure 8B, 8C, 8D and 8E).

Where hydrothermally altered, the volcanic rock may be strongly foliated, presenting a microstructure that varies from granoblastic to lepidoblastic and nematoblastic. It may contain carbonate minerals (20-41%), usually as veintlets, and chlorite (9-47%) (Figure 88C) in addition to quartz and sulfides (pyrrhotite, pyrite and chalcopyrite) as accessory minerals.

Chlorite forms thin reeds, usually anhedral, light green, with weak pleochroism; where coarser they are subhedral. Carbonate can vary from fine to coarse grained, subhedral to euhedral, but predominantly anhedral, commonly in veinlets. In some portions, the actinolite-epidote association is replaced by carbonate that is overgrown in the rock matrix.

## **5.4.2 Geochemistry**

### **5.4.2.1 BIF and ferruginous chert**

Samples with  $\text{Fe}_2\text{O}_{3T} \geq 15\%$  are classified as BIF. They have  $\text{SiO}_2$  content varying between 43.03 and 71.87%, and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  between 15.40 and 30.04% (Table 7). Samples with  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 15\%$  are classified as ferruginous chert and are characterized by high levels of  $\text{SiO}_2$ , 72.04 - 93.77% and low  $\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$  contents, 2.44 - 14.43%.

Immobile, crustal elements usually associated with a clastic contribution (Bau, 1993; Bolhar et al., 2004) occur in low concentrations, as shown in Table 7. Titanium, Th, Hf and Sc are generally below the detection limit;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ranges from undetectable (<0.01%) to 0.34%; and Zr from 0.40 ppm to 3.00 ppm.

The distribution pattern of REE + Y normalized to PAAS and the associated anomalies and ratios are relatively uniform (Figure 9A and 9B). However, they present low concentrations of REE + Y and, in some samples, one or more REE values are below the detection limit and it is not possible to calculate all anomalies. Among the calculated results, the following stand out:

- La, Ce, Eu and Gd have positive anomalies;
- Chondritic to superchondritic Y/Ho ratios;
- Relative enrichment of heavy REE (HREE) comparatively to the mid REE (MREE) and light REE (LREE).

For comparative purposes, the mean values of notable Archean BIF and iron formations (IF) are plotted in the spiders and discussion diagrams (Figure 9A, 9B, Figure 12, Figure 13A, 13B and 13C): Witwatersrand (Viehmann, 2015), Isua (Frei, 2007), Kurumam (Bau and Dulski, 1996), North Craton of China – NCC (Moon et al., 2017) and Meadowbank (Gourcerol et al., 2016).

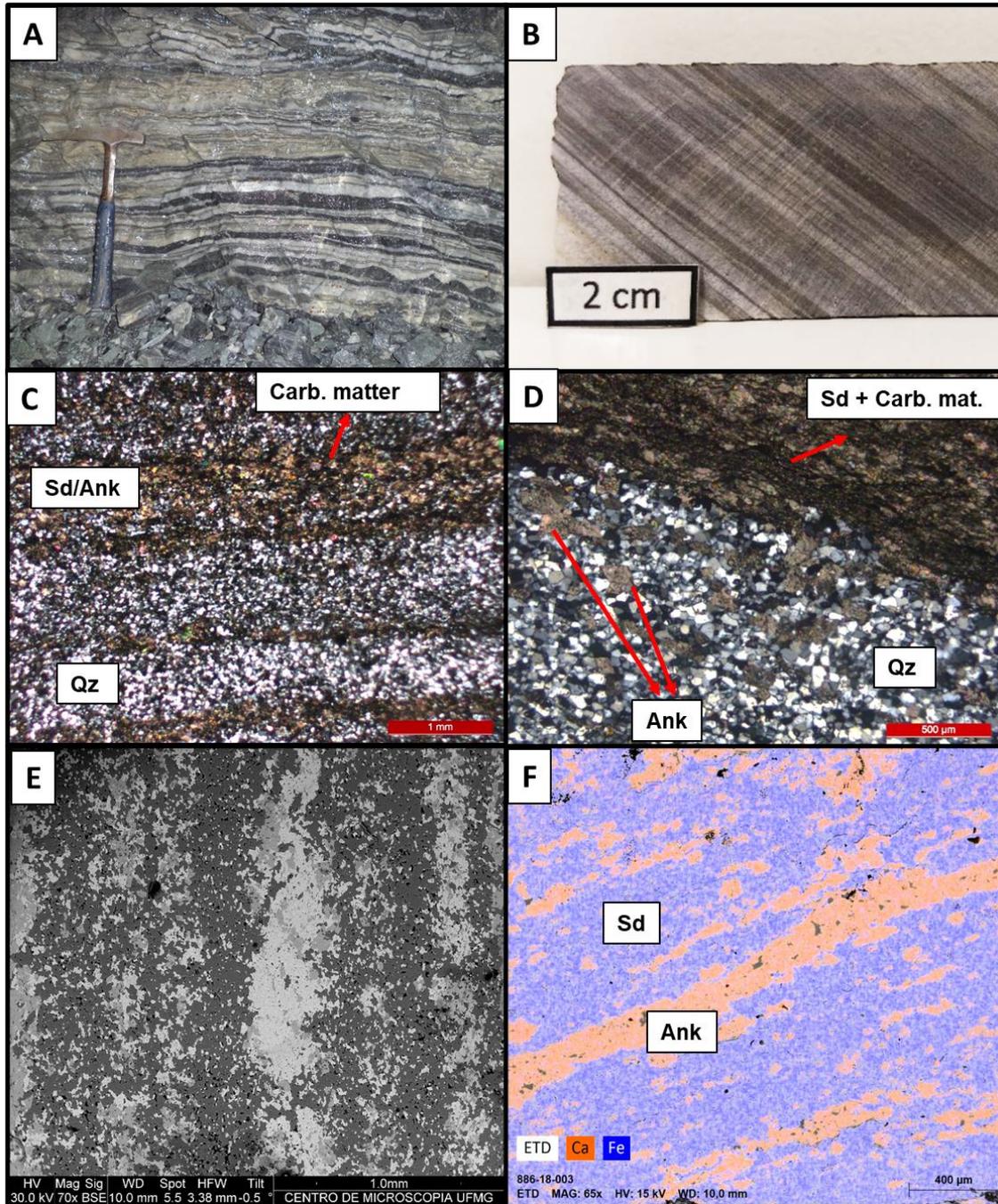


Figure 6 - BIF and ferruginous chert: A) BIF outcrop in the Carruagem orebody – sublevel 4.1; B) Compositional banding in the drill core sample 24CR2803 (BIF); C) Photomicrograph of compositional banding, quartz and siderite. Sample 01QN03LE (BIF) – plane polarized light (PPL); D) Detail of carbonaceous levels in agreement with the banding (carbonate bands). Sample 01QN03LE (BIF) - PPL; E) BSE image showing compositional banding according to gray scale: quartz bands – darkest gray; sideritic bands – lightest gray; ankerite - intermediate gray. Sample 01QN03LE (BIF); F)

Compositional map showing the intercalation between Ca-rich carbonate, ankerite (Ca-rich carbonate in orange), and siderite (Fe-rich carbonate in, siderite (blue)). Sample 01QN03LE (BIF).

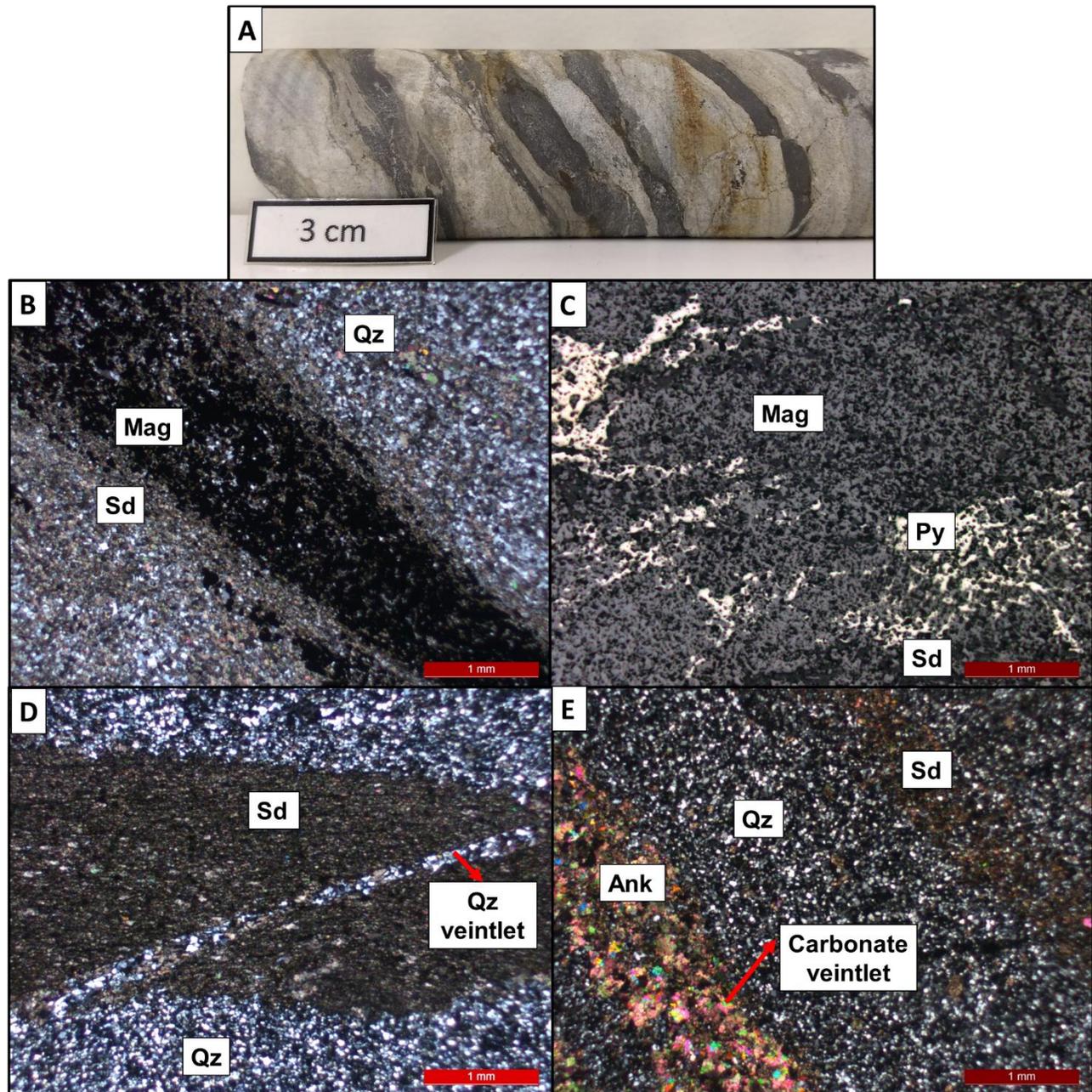


Figure 7 – Hydrothermally altered BIF and ferruginous chert: A) Drill core magnetite BIF with quartz-carbonate veins. Sample 01CR2726; B) Subhedral to euhedral fine to medium grained magnetite crystals overgrown to the siderite bands. Sample 01CR2726 - Cross-polarized light (CPL); C) Magnetite band with pyrite masses overgrown to the siderite crystals in the sample 01CR2726 – Reflected light (RL); D) Quartz-carbonate venules cross-cutting the siderite band. Sample 08CRN8.1 (BIF) - CPL; E) Ankerite/siderite bands cross-cut by carbonate venules. Sample 02QN03LE (BIF) - CPL.

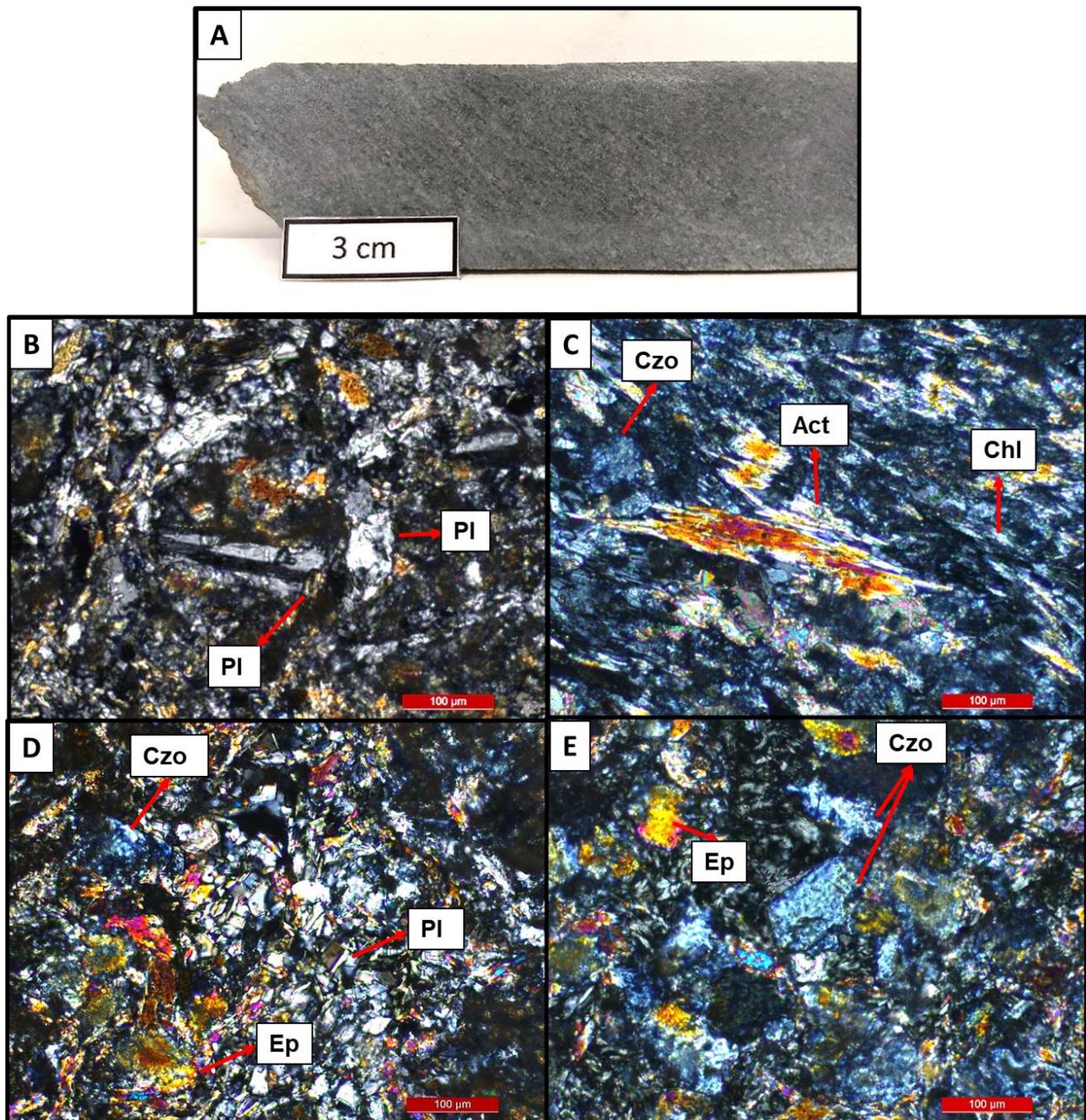


Figure 8 – Volcanic rocks: A) Drill core sample 27CP0042. Phaneritic texture, green color and incipient foliation; B) Photomicrograph of sample 27CP0042 showing tabular plagioclase with albite twinning - CPL; C) Photomicrograph of sample 15CR2788 showing tremolite/actinolite porphyroblast in a matrix composed of feldspar and clinozoisite. Feldspar is commonly replaced by clinozoisite and chlorite - CPL; D) Fine-grained plagioclase matrix with epidote and clinozoisite porphyroblasts. Sample 27CP0042 - CPL; E) Subhedral epidote and clinozoisite porphyroblasts in a fine-grained plagioclase matrix. Sample 27CP0042 - CPL.

### - BIF samples

Nineteen samples are classified as BIF (Table 7). They have slightly negative to strongly positive La anomalies ( $La_n/La_n^* = 0.86 - 6.77$ , mean = 2.69). Samples 02QN03LE and 24CR2803 stand out with abnormally positive values, 9.29 and 70.57, respectively. Cerium anomalies are slightly negative to moderately positive ( $Ce_n/Ce_n^* = 0.92 - 2.57$ , mean = 1.65), with an outlier -  $Ce_n/Ce_n^* = 8.67$  - in sample 24CR2803.

Gadolinium and Eu anomalies are predominantly positive, ranging from mild to strong ( $Gd_n/Gd_n^* = 0.91 - 4.02$ , mean = 2.32;  $Eu_n/Eu_n^* = 1.27 - 3.42$  - mean = 2,15). The Y/Ho ratios present a large amplitude, varying from subchondritic to superchondritic (22 - 70), with dominant superchondritic values of between 30 and 40.

The patterns have a positive slope ( $Pr/Sm_{PAAS} = 0.36 - 0.83$ ) and are characterized by HREE enrichment relative to LREE ( $Nd/Yb_{PAAS} = 0.21 - 0.83$ ).

### - Ferruginous chert samples

Eight samples are classified as ferruginous chert (Table 7). They present low  $\Sigma REE+Y$  concentrations (0.447 – 3.180) and have patterns enriched in HREE relative to LREE ( $Nd/Yb_{PAAS} = 0.16 - 0.84$ , mean = 0.55). Due to some REE values below the detection limit, it was possible to calculate the Eu, La, Ce, Gd, Y/Ho anomalies for only three samples.

Anomalies of La and Ce are light to moderate positive ( $La_n/La_n^* = 1.37 - 1.96$ , mean = 1.76;  $Ce_n/Ce_n^* = 1.06 - 1.63$ , mean = 1.32). Europium and Gd anomalies are positive, mild to intense ( $Eu_n/Eu_n^* = 1.57 - 4.01$ , mean = 2.94;  $Gd_n/Gd_n^* = 1.04 - 3.00$ , mean = 1.77). Y/Ho ratios present subchondritic to superchondritic values.

#### *5.4.2.2 Hydrothermally altered BIF/chert and ore samples*

REE + Y PAAS normalized patterns are shown in Figure 9.

### - Carbonate BIF

Four samples are classified as carbonate BIF (Table 7). They are characterized by positive to negative La ( $La_n/La_n^* = 0.88 - 2.83$ , mean = 1.47) and Ce ( $Ce_n/Ce_n^* = 0.80 - 1.28$ , mean = 0.94) anomalies. Europium and Gd anomalies are positive, varying from moderate to strong to Eu ( $Eu_n/Eu_n^* = 1.42 - 3.30$ , mean = 2.13), and dominantly weak to Gd ( $Gd_n/Gd_n^* = 1.12 - 1.29$ , mean = 1.21). This samples have a pattern enriched in HREE ( $Nd/Yb_{PAAS} = 0.27 - 0.55$ , mean = 0.44), with positive slope ( $Pr/Sm_{PAAS} = 0.60 - 0.92$ , mean = 0.81) and a chondritic to superchondritic Y/Ho ratios (25.71 - 48.00).



Zr (ppm)	0.1	0.8	1	0.8	1	1.1	2.7	1.8	0.5	0.6
Hf (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sc (ppm)	1.00	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Nb (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sr (ppm)	0.5	15.4	15.4	3.3	2	5.2	<0.5	2.7	11	<0.5
Ta (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ni (ppm)	0.1	5.8	2.6	2.1	3.5	4.3	1.8	3.1	1.6	6.3
V (ppm)	8.00	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Au (ppb)	0.5	3.6	2.6	<0.5	<0.5	0.5	0.9	1.3	<0.5	<0.5
As (ppm)	0.5	125.6	17.9	32	2.4	3.8	7.4	3.8	0.7	0.8
W (ppm)	0.5	0.9	<0.5	7.1	1.1	0.5	0.9	2.4	<0.5	0.6
Sb (ppm)	0.1	3.3	0.2	0.4	0.2	0.2	<0.1	0.1	<0.1	0.1
TOT/S (%)	0.02	0.22	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	<0.02
TOT/C (%)	0.02	4.13	4.26	3.55	3.72	4.95	3.88	3.06	3.72	2.96
C/ORG (%)	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29
La (ppm)	0.1	0.9	0.8	0.9	0.5	1	0.5	0.7	0.4	0.2
Ce (ppm)	0.1	1.3	0.8	1.9	0.9	2	1.4	1.2	0.5	0.6
Pr (ppm)	0.02	0.12	0.06	0.2	0.09	0.14	0.11	0.11	<0.02	<0.02
Nd (ppm)	0.3	<0.3	0.4	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	<0.3	<0.3
Sm (ppm)	0.05	0.15	0.07	0.18	0.11	0.14	0.19	0.1	<0.05	<0.05
Eu (ppm)	0.02	0.07	0.03	0.07	0.08	0.04	0.05	0.04	0.05	0.02
Gd (ppm)	0.05	0.21	0.24	0.38	0.35	0.29	0.12	0.24	0.17	0.17
Tb (ppm)	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	<0.01	<0.01
Dy (ppm)	0.05	0.16	0.15	0.24	0.12	0.27	0.13	0.16	0.1	0.06
Y (ppm)	0.1	1.1	0.9	0.9	0.7	2	0.7	1.4	1	0.2
Ho (ppm)	0.02	0.02	<0.02	0.03	0.02	0.08	0.02	0.04	<0.02	<0.02
Er (ppm)	0.03	0.16	0.13	0.13	0.11	0.31	0.13	0.16	0.1	0.06
Tm (ppm)	0.01	0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	<0.01
Yb (ppm)	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.33	0.05	0.11	0.07	0.08
Lu (ppm)	0.01	0.02	0.01	<0.01	0.01	0.07	0.02	0.02	0.02	<0.01
ΣETR		4.29	3.67	5.74	3.57	7.43	4.15	5.02	2.42	1.39
Y/Ho		55.00	-	30.00	35.00	25.00	35.00	35.00	-	-
Nd/Yb <sub>(PAAS)</sub>		-	0.48	0.83	0.69	0.18	1.16	0.53	-	-
Pr/Sm <sub>(PAAS)</sub>		0.50	0.54	0.70	0.51	0.63	0.36	0.69	-	-
La/La* <sub>(PAAS)</sub>		-	9.29	0.86	2.69	2.80	2.89	4.04	-	-
Ce/Ce* <sub>(PAAS)</sub>		-	2.57	0.96	1.61	2.06	2.34	2.01	-	-
Eu/Eu* <sub>(PAAS)</sub>		2.43	2.18	2.16	3.42	1.27	1.49	1.82	-	-
Y/Y* <sub>(PAAS)</sub>		1.07	-	0.88	0.88	0.78	0.79	1.07	-	-
Gd/Gd* <sub>(PAAS)</sub>		1.72	4.02	2.93	3.18	1.85	0.91	2.25	-	-

Sample		13AVN0200	13AVN0201	17QN0400	17QN0402	20CP0036	24CR2803	44QM1234	03CR2741	10CRN8.1Asc
Element	D.L.	BIF	BIF	BIF	BIF	BIF	BIF	BIF	Chert	Chert
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	68.27	48.74	67.69	43.03	72.02	70.81	55.44	78.67	72.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.02	0.09	0.02	0.01	0.05	0.17	0.11	<0.01	0.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.04	18.29	21.13	17.65	29.07	15.92	15.4	25.11	12.65	14.43
MgO (%)	0.01	0.59	1.44	0.77	1.71	1	1.02	1.2	0.66	0.76
CaO (%)	0.01	1.95	9.27	2.52	5.4	1.5	2.44	3.03	0.7	2.69
Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	0.03	<0.01	0.05	0.18	0.01	0.03	0.11	0.04	0.03
MnO (%)	0.01	0.38	0.68	0.45	0.86	0.39	0.35	0.5	0.32	0.37
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.002	0.002	0.002	<0.002	0.002	<0.002	0.003	0.002	<0.002	0.002
LOI (%)	-5.1	10.5	18.6	10.8	19.7	9.1	9.7	14.4	7.00	9.6

Total (%)	0.01	100.00	99.98	99.99	99.97	99.99	99.99	99.9	100.00	100.00
Th (ppm)	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Zr (ppm)	0.1	1.5	1.4	0.6	0.6	0.8	1.5	1.2	0.4	1
Hf (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sc (ppm)	1.00	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Nb (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sr (ppm)	0.5	3.6	15.9	4.9	9.4	3.6	7.1	23.7	0.9	4.2
Ta (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Ni (ppm)	0.1	3	2.2	2.4	3	4.4	4.7	5.1	1.4	3.1
V (ppm)	8.00	<8	<8	8.00	10	<8	<8	<8	<8	<8
Au (ppb)	0.5	<0.5	17.3	3.1	1.2	10.2	<0.5	24553.7	<0.5	0.8
As (ppm)	0.5	6.4	1.1	1.7	1.3	14.2	4.1	>10000.0	8.2	3.8
W (ppm)	0.5	2.4	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	3	517.1	<0.5	1.3
Sb (ppm)	0.1	0.4	0.2	<0.1	0.1	0.4	0.4	30.2	0.1	0.3
TOT/S (%)	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	9.13	<0.02	0.03
TOT/C (%)	0.02	3.39	5.84	3.55	6.3	3.09	3.25	2.55	2.27	3
C/ORG (%)	0.02	-	-	0.47	-	0.6	0.4	0.38	-	-
La (ppm)	0.1	0.6	1.5	0.5	0.8	0.6	0.4	1.5	0.2	0.4
Ce (ppm)	0.1	0.9	2.2	0.9	1.6	0.6	0.4	2.1	0.4	0.9
Pr (ppm)	0.02	0.09	0.2	0.07	0.14	0.05	0.02	0.25	<0.02	0.08
Nd (ppm)	0.3	0.4	0.8	0.4	0.7	0.3	0.3	1.1	<0.3	0.4
Sm (ppm)	0.05	0.07	0.16	0.1	0.18	<0.05	<0.05	0.19	0.05	0.06
Eu (ppm)	0.02	<0.02	0.09	0.03	0.11	0.03	0.04	0.08	0.03	0.04
Gd (ppm)	0.05	0.2	0.3	0.25	0.34	0.08	0.16	0.38	0.14	0.17
Tb (ppm)	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	<0.01	0.04	<0.01	0.01
Dy (ppm)	0.05	0.1	0.16	0.13	0.22	0.07	0.09	0.28	0.1	0.09
Y (ppm)	0.1	1	2.1	0.6	1.8	0.8	0.4	2.9	0.3	0.9
Ho (ppm)	0.02	<0.02	0.03	0.03	0.03	<0.02	<0.02	0.06	0.02	<0.02
Er (ppm)	0.03	0.11	0.18	0.08	0.08	0.05	0.08	0.17	0.06	0.12
Tm (ppm)	0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01
Yb (ppm)	0.05	0.05	0.16	0.07	0.07	<0.05	<0.05	0.17	<0.05	<0.05
Lu (ppm)	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	0.01
ΣETR		3.53	7.94	3.18	6.11	2.59	1.89	9.8	1.30	3.18
Y/Ho		-	70.00	20.00	60.00	-	-	48.33	15.00	-
Nd/Yb <sub>(PAAS)</sub>		0.67	0.42	0.48	0.83	-	-	0.54	-	-
Pr/Sm <sub>(PAAS)</sub>		0.81	0.79	0.44	0.49	-	-	0.83	-	0.84
La/La* <sub>(PAAS)</sub>		2.07	1.88	3.66	2.24	6.77	70.57	1.82	-	1.96
Ce/Ce* <sub>(PAAS)</sub>		1.28	1.27	2.12	1.65	2.08	8.67	1.07	-	1.63
Eu/Eu* <sub>(PAAS)</sub>		-	2.62	1.72	2.96	-	-	1.89	-	3.23
Y/Y* <sub>(PAAS)</sub>		-	1.66	0.76	2.29	-	-	1.79	0.54	-
Gd/Gd* <sub>(PAAS)</sub>		3.35	1.83	3.72	2.00	-	-	1.81	-	3.00

Sample	10CP0039	11CRN7.1	14CP0039	17QN0401	21QN0401	45QM1234	49CR0168	05CR2760	06CR2765	
Element	D.L.	Chert	Chert	Chert	Chert	Chert	Chert	Ore	Ore	Ore
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	86.83	85.86	78.29	93.77	95.16	76.87	66.2	45.42	54.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.06	0.02	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.05	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.04	7.82	8.77	13	2.52	2.15	13.32	17.51	31.44	26.08
MgO (%)	0.01	0.48	0.38	0.9	0.04	0.21	0.62	1.04	1.18	1.62
CaO (%)	0.01	0.15	0.12	0.18	1.67	0.93	1.5	3.44	7.27	7.56
Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.03	0.01	0.03	0.1	0.04	0.03

MnO (%)	0.01	0.19	0.17	0.33	0.05	0.06	0.26	0.26	0.46	0.71
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.002	<0.002	0.002	<0.002	0.003	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.002
LOI (%)	-5.1	4.5	4.7	7.2	1.8	1.4	7.3	11.3	14.1	9.2
Total (%)	0.01	100.01	100.01	99.99	100.01	100	100	99.96	99.94	99.96
Th (ppm)	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Zr (ppm)	0.1	0.8	0.6	1.3	0.7	0.9	0.8	5.5	2.6	2.8
Hf (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sc (ppm)	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	<1
Nb (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.5
Sr (ppm)	0.5	<0.5	<0.5	0.9	6.2	9.2	4.8	31.5	30.4	24.5
Ta (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
Ni (ppm)	0.1	3.8	2	4.3	2.5	5.4	4.8	7.6	12.1	6.3
V (ppm)	8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Au (ppb)	0.5	<0.5	<0.5	1	1.8	22.4	3.1	22501.2	19952.8	187.8
As (ppm)	0.5	1.9	3.5	<0.5	1.5	48.7	99.1	>10000.0	8721.7	248.9
W (ppm)	0.5	7.9	1	<0.5	<0.5	<0.5	1.1	101.3	3.8	1.6
Sb (ppm)	0.1	0.2	<0.1	0.1	0.2	<0.1	0.6	14.1	13.2	1.7
TOT/S (%)	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.21	10.72	11.7	6.25
TOT/C (%)	0.02	1.36	1.44	2.39	0.54	0.44	2.43	1.46	3.91	3.94
C/ORG (%)	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La (ppm)	0.1	<0.1	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	1.3	2.6	1.8
Ce (ppm)	0.1	0.2	0.3	0.3	0.7	0.4	0.5	1.3	2.6	2.2
Pr (ppm)	0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.03	0.03	0.04	0.13	0.29	0.26
Nd (ppm)	0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.6	1.1	0.9
Sm (ppm)	0.05	<0.05	0.08	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.12	0.25	0.18
Eu (ppm)	0.02	<0.02	0.05	<0.02	0.03	<0.02	0.03	0.11	0.17	0.09
Gd (ppm)	0.05	<0.05	0.29	<0.05	0.22	<0.05	0.08	0.2	0.2	0.29
Tb (ppm)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.05	0.05
Dy (ppm)	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.11	0.06	0.07	0.22	0.28	0.28
Y (ppm)	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.5	2.2	2.8
Ho (ppm)	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.04	0.07	0.07
Er (ppm)	0.03	0.07	0.04	0.03	0.06	0.05	0.06	0.15	0.16	0.25
Tm (ppm)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.03	0.02
Yb (ppm)	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.09	0.18	0.25
Lu (ppm)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.03	0.03
ΣETR		0.447	1.28	1.23	2.05	1.74	2.08	5.83	10.21	9.47
Y/Ho		-	-	-	-	-	-	37.50	31.43	40.00
Nd/Yb <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	0.55	0.51	0.30
Pr/Sm <sub>(PAAS)</sub>		-	0.16	-	-	-	-	0.68	0.73	0.91
La/La* <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	3.34	2.02	1.30
Ce/Ce* <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	1.33	0.98	0.85
Eu/Eu* <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	3.88	3.10	2.04
Y/Y* <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	1.19	1.29	1.31
Gd/Gd* <sub>(PAAS)</sub>		-	-	-	-	-	-	1.35	0.75	1.21

Sample		41QM1228	46QM1234	48CR0160	01CR2726	47QM1235	50QM1227	07CR2767	33QM1184	19CR2793
Element	D.L.	Ore	Ore	Mag. BIF	Mag. BIF	Carb. BIF	Carb. BIF	Carb. BIF	Carb. BIF	Carbon. pelite
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	60.23	71.8	72.35	55.18	61.45	42.89	32.49	65.76	59.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.31	0.11	0.25	0.27	0.23	0.09	0.15	0.2	19.19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.04	16.15	16.25	13.83	32.72	22.62	26.33	30.62	16.26	3.88
MgO (%)	0.01	2.44	0.89	0.55	1.39	1.41	3.84	0.96	1.08	3.08
CaO (%)	0.01	6.58	1.43	6.9	5.27	1.61	4.98	11.61	4.34	0.94

Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.39
K <sub>2</sub> O (%)	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.59
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	0.12	0.04	0.01	0.04	0.04	<0.01	0.09	0.04	0.09
MnO (%)	0.01	0.5	0.34	0.24	0.3	0.72	1.02	0.36	0.36	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.002	0.003	<0.002	0.002	0.003	0.002	<0.002	0.005	<0.002	0.074
LOI (%)	-5.1	13.6	9.1	5.9	4.7	11.9	20.8	23.6	11.9	7.2
Total (%)	0.01	99.95	100	99.99	99.96	99.97	99.93	99.94	99.99	99.83
Th (ppm)	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	8
Zr (ppm)	0.1	2.7	1.7	1.8	3.5	1.6	1.1	1.8	1.8	139.2
Hf (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	3.3
Sc (ppm)	1	1	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	31
Nb (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	8.1
Sr (ppm)	0.5	69.6	4	14.3	14.5	11.9	17.9	24.4	12.3	54.7
Ta (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.7
Ni (ppm)	0.1	10.2	4.1	6.1	9.1	6.5	5.4	2.2	2.4	234.6
V (ppm)	8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	196
Au (ppb)	0.5	9274.4	3.2	14.6	181.5	5646.8	1.1	6.5	1.2	<0.5
As (ppm)	0.5	>10000.0	19.9	6.3	1.6	>10000.0	7	193.5	2.9	340.1
W (ppm)	0.5	6.1	1	9.1	2.4	0.7	0.5	267.4	0.6	10.6
Sb (ppm)	0.1	11	0.5	0.4	1.7	5.1	0.5	0.7	<0.1	0.4
TOT/S (%)	0.02	7.55	0.03	0.24	1.23	1.91	0.32	0.09	<0.02	<0.02
TOT/C (%)	0.02	3.07	3.02	1.89	1.93	3.75	7.7	7.76	3.76	2.98
C/ORG (%)	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La (ppm)	0.1	4.4	0.4	4.7	4.8	2.6	1.3	3.1	1.8	31.8
Ce (ppm)	0.1	7.7	0.4	8.7	9	4.5	1.6	4.9	2.7	63.1
Pr (ppm)	0.02	0.94	0.03	1.11	1.16	0.57	0.18	0.63	0.34	7.17
Nd (ppm)	0.3	3.4	<0.3	4.2	4.3	2	0.9	2.4	1.2	25.8
Sm (ppm)	0.05	0.65	<0.05	0.78	0.91	0.43	0.19	0.43	0.24	5.02
Eu (ppm)	0.02	0.28	<0.02	0.26	0.37	0.15	0.14	0.22	0.08	1.06
Gd (ppm)	0.05	0.9	0.06	0.81	0.97	0.64	0.27	0.6	0.31	3.57
Tb (ppm)	0.01	0.13	<0.01	0.14	0.16	0.12	0.04	0.09	0.05	0.55
Dy (ppm)	0.05	0.85	<0.05	0.76	0.92	0.69	0.3	0.61	0.3	3.31
Y (ppm)	0.1	5.8	0.6	4.9	6.3	3.6	2.1	5	2.4	17.9
Ho (ppm)	0.02	0.19	<0.02	0.16	0.21	0.14	0.06	0.14	0.05	0.67
Er (ppm)	0.03	0.57	0.05	0.46	0.62	0.46	0.24	0.43	0.25	2.14
Tm (ppm)	0.01	0.08	<0.01	0.06	0.08	0.07	0.04	0.06	0.03	0.3
Yb (ppm)	0.05	0.47	<0.05	0.4	0.57	0.44	0.28	0.36	0.18	2.05
Lu (ppm)	0.01	0.07	<0.01	0.06	0.09	0.07	0.05	0.05	0.03	0.32
ΣETR		26.43	1.54	27.50	30.46	16.48	7.69	19.02	9.96	164.76
Y/Ho		30.53	-	30.63	30.00	25.71	35.00	35.71	48.00	26.72
Nd/Yb <sub>(PAAS)</sub>		0.60	-	0.87	0.63	0.38	0.27	0.55	0.55	1.05
Pr/Sm <sub>(PAAS)</sub>		0.91	-	0.89	0.80	0.83	0.60	0.92	0.89	0.90
La/La* <sub>(PAAS)</sub>		0.96	-	0.95	0.89	0.88	2.83	1.12	1.03	0.90
Ce/Ce* <sub>(PAAS)</sub>		0.86	-	0.86	0.83	0.80	1.28	0.86	0.81	0.91
Eu/Eu* <sub>(PAAS)</sub>		1.96	-	1.57	1.93	1.42	3.30	2.30	1.50	1.18
Y/Y* <sub>(PAAS)</sub>		1.10	-	1.12	1.09	0.88	1.07	1.27	1.29	0.93
Gd/Gd* <sub>(PAAS)</sub>		1.30	-	1.05	1.09	1.12	1.29	1.27	1.18	0.99

Sample	29CP0040	36CP0049	Araújo (2018)	LAM01CR	LAM02CR	LAM18CR	LAM03QM	LAM05QM		
Element	D.L.	Carbon. pelite	Carbon. pelite	Elementos	D.L.	BIF	BIF	BIF	Chert	Chert
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	57.05	66.7	SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	62.59	67.00	52.86	76.99	90.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	18.41	15.52	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.03	0.04	0.34	0.05	0.01

Fe2O3 (%)	0.04	5.25	4.12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	19.6	19.67	30.04	11.39	2.44
MgO (%)	0.01	3.69	3.55	MgO (%)	0.01	1.42	0.88	0.65	0.91	0.84
CaO (%)	0.01	1.74	0.19	CaO (%)	0.01	2.21	1.24	8.93	2.27	2.25
Na2O (%)	0.01	0.47	0.33	Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01
K2O (%)	0.01	3.48	2.8	K <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	0.01	0.07	<0.01	<0.01
TiO2 (%)	0.01	0.79	0.64	TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01
P2O5 (%)	0.01	0.07	0.08	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	-	-	-	-	-
MnO (%)	0.01	0.03	0.01	MnO (%)	0.01	0.51	0.43	0.25	0.39	0.14
Cr2O3 (%)	0.002	0.071	0.059	Cr (ppm)	0.01	20	20	30	30	20
LOI (%)	-5.1	8.7	5.7	LOI (%)	0.01	12.05	10.49	4.93	7.34	3.4
Total (%)	0.01	99.77	99.82	Total (%)	0.01	98.42	99.77	98.16	99.35	99.28
Th (ppm)	0.2	9.4	7.8	Th (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.8	<0.1
Zr (ppm)	0.1	130.2	117.6	Zr (ppm)	2	2	2	3	2	2
Hf (ppm)	0.1	3.5	3.3	Hf (ppm)	0.2	<0.2	<0.2	0.2	<0.2	0.2
Sc (ppm)	1	31	23	Sc (ppm)	1	<1	<1	<1	<1	<1
Nb (ppm)	0.1	9	7.3	Nb (ppm)	0.2	<0.2	<0.2	0.3	1.1	<0.2
Sr (ppm)	0.5	101.4	51.9	Sr (ppm)	0.1	9	4.5	14.1	8	8.3
Ta (ppm)	0.1	0.7	0.6	Ta (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Ni (ppm)	0.1	312.6	213.8	Ni (ppm)	1	3	<1	5	2	4
V (ppm)	8	186	145	V (ppm)	5	5	6	13	12	<5
Au (ppb)	0.5	1	0.9	Au (ppb)	0.5	6	-	19	-	-
As (ppm)	0.5	395.3	138.5	As (ppm)	0.1	19.7	5.2	246	1.5	3.2
W (ppm)	0.5	9	8.4	W (ppm)	1	8	2	7	1	<1
Sb (ppm)	0.1	2.2	0.6	Sb (ppm)	0.05	<0.05	0.08	3.53	0.08	0.09
TOT/S (%)	0.02	0.05	0.03	S (%)	0.02	0.03	0.03	1.03	0.02	0.04
TOT/C (%)	0.02	3.39	2.07	-	-	-	-	-	-	-
C/ORG (%)	0.02	-	0.57	-	-	-	-	-	-	-
La (ppm)	0.1	29.9	26.1	La (ppm)	0.5	0.8	0.5	0.8	0.9	1
Ce (ppm)	0.1	55.4	46.1	Ce (ppm)	0.5	1.2	0.8	1.7	1.6	1.8
Pr (ppm)	0.02	5.89	5.85	Pr (ppm)	0.03	0.11	0.1	0.21	0.18	0.21
Nd (ppm)	0.3	21.7	19.5	Nd (ppm)	0.1	0.6	0.4	1	0.9	0.9
Sm (ppm)	0.05	4.4	3.43	Sm (ppm)	0.03	0.17	0.15	0.23	0.23	0.19
Eu (ppm)	0.02	0.94	0.87	Eu (ppm)	0.03	0.06	0.05	0.15	0.06	0.17
Gd (ppm)	0.05	4.43	3.15	Gd (ppm)	0.05	0.16	0.3	0.52	0.18	0.22
Tb (ppm)	0.01	0.71	0.47	Tb (ppm)	0.01	0.03	0.02	0.06	0.02	0.04
Dy (ppm)	0.05	4.43	2.67	Dy (ppm)	0.05	0.17	0.13	0.53	0.15	0.27
Y (ppm)	0.1	26.2	15.3	Y (ppm)	0.5	1.6	1.1	3.2	0.8	1.3
Ho (ppm)	0.02	0.91	0.63	Ho (ppm)	0.01	0.06	0.05	0.12	0.02	0.05
Er (ppm)	0.03	2.71	1.77	Er (ppm)	0.03	0.12	0.11	0.31	0.06	0.18
Tm (ppm)	0.01	0.38	0.26	Tm (ppm)	0.01	0.02	0.02	0.07	0.02	0.07
Yb (ppm)	0.05	2.59	1.66	Yb (ppm)	0.03	0.06	0.14	0.4	0.06	0.26
Lu (ppm)	0.01	0.4	0.29	Lu (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.08	<0.01	0.03
ΣETR		160.99	128.05	ΣETR		5.17	3.88	9.38	5.18	6.69
Y/Ho		28.79	24.29	Y/Ho		26.67	22.00	26.67	40.00	26.00
Nd/Yb(PAAS)		0.70	0.98	Nd/Yb(PAAS)		0.83	0.24	0.21	1.25	0.29
Pr/Sm(PAAS)		0.84	1.07	Pr/Sm(PAAS)		0.41	0.42	0.57	0.49	0.69
La/La*(PAAS)		1.08	0.78	La/La*(PAAS)		3.39	1.25	1.35	1.96	1.37
Ce/Ce*(PAAS)		1.00	0.76	Ce/Ce*(PAAS)		1.72	0.92	1.11	1.28	1.06
Eu/Eu*(PAAS)		1.05	1.31	Eu/Eu*(PAAS)		1.68	1.74	2.72	1.57	4.01
Y/Y*(PAAS)		1.04	0.90	Y/Y*(PAAS)		1.15	0.92	1.03	1.44	0.85
Gd/Gd*(PAAS)		1.09	1.11	Gd/Gd*(PAAS)		0.96	2.45	1.77	1.28	1.05

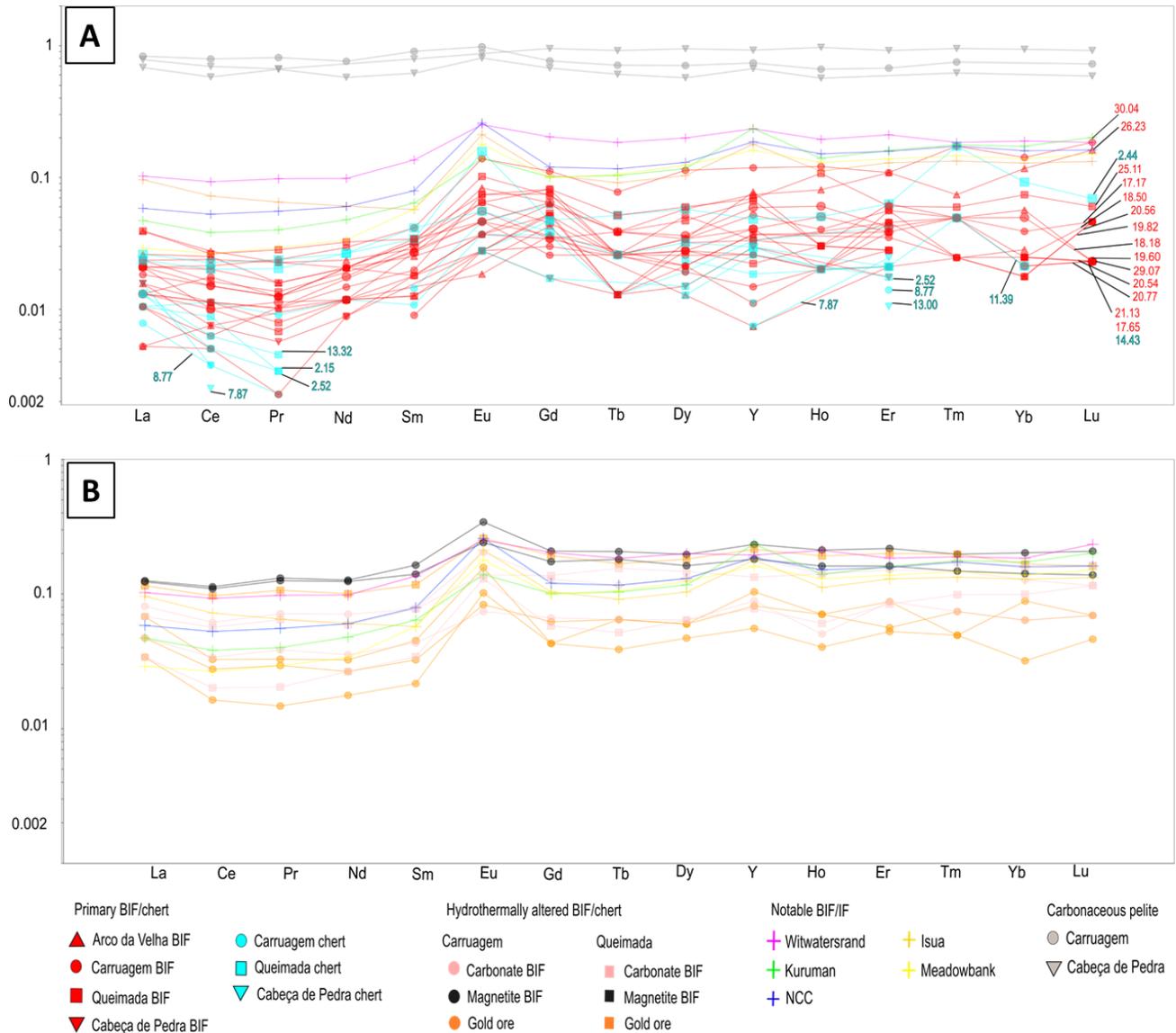


Figure 9 - PAAS-normalized patterns from the Lamego gold deposit samples: A) REE + Y patterns for BIF, ferruginous chert and carbonaceous pelite. For each sample, the  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  percentage is shown towards the end of the element distribution line, showing that the REE concentration of chert samples is consistently lower than that of BIF; B) REE + Y patterns for hydrothermally altered BIF, including magnetite and carbonate BIF, as well as ore samples. Notable BIF/IF samples are plotted on both diagrams: Witwatersrand (Viehmann, 2015), Isua (Frei, 2007), Kurumam (Bau and Dulski, 1996), North Craton of China – NCC (Moon et al., 2017) and Meadowbank (Gourcerol et al., 2016).

#### 5.4.2.2 Volcanic rocks

Major and trace element values are shown in Table 8. The samples have a  $\text{SiO}_2$  content between 43.52 and 57.40%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  between 5.80 and 12.36%, and low values of  $\text{TiO}_2$ , from 0.61 to 1.44%. The

total alkali content ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) is relatively low, 1.79 to 4.63%, as well as the MgO, that ranges from 4.43 to 6.80%, with an outlier at 9.29 % (Table 8).

On the Zr/Ti x Nb/Y diagram (Pearce, 1996) (Figure 10A), the volcanic rocks plotted out in the transition between basalts (nine samples) and andesite/andesitic basalts (five samples). According to the Zr versus Y diagram (after Ross and Bédard, 2009) (Figure 10B), thirteen of the fourteen samples are located in the field of the calcium-alkaline series.

The multi-element primitive mantle (Palme and O'Neill, 2014) normalized spidergram (major and trace elements) (Figure 11A) shows patterns similar to those of the Vanuatu arc basalts (Peate et al., 1997) and also to basalts and andesites from the North Atlantic craton in Greenland (Szilas, 2018). These characteristics include the relative enrichment of the high-field-strength elements (HFSE) in relation to the low-force-field elements (large-ion lithophile elements - LILE), in addition to negative anomalies of Ta and Nb (Szilas, 2018; Wyman et al., 1996). Titanium-normalized values are consistent with the average value of basalt samples from the Vanuatu arc (Peate et al., 1997). Lead and Sr have both positive and negative anomalies.

Chondrite-normalized (Sun and McDonough, 1989) REE plot (Figure 11B) presents enrichment of the LREE in relation to HREE, with a tendency of flat pattern and slightly negative to slightly positive Eu and Ce anomalies ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 - 1.13$ ;  $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1.00 - 1.08$ ). The LREE can show enrichments of up to 70 times (La), in contrast to HREE, with an enrichment in the range of 10 to 20 times. Compared to the basalts/andesites of Szilas (2018) and the average value of samples by Peate et al. (1997), samples at Lamego have similar patterns, being slightly more La- and Ce-enriched than those of Peate et al. (1997).

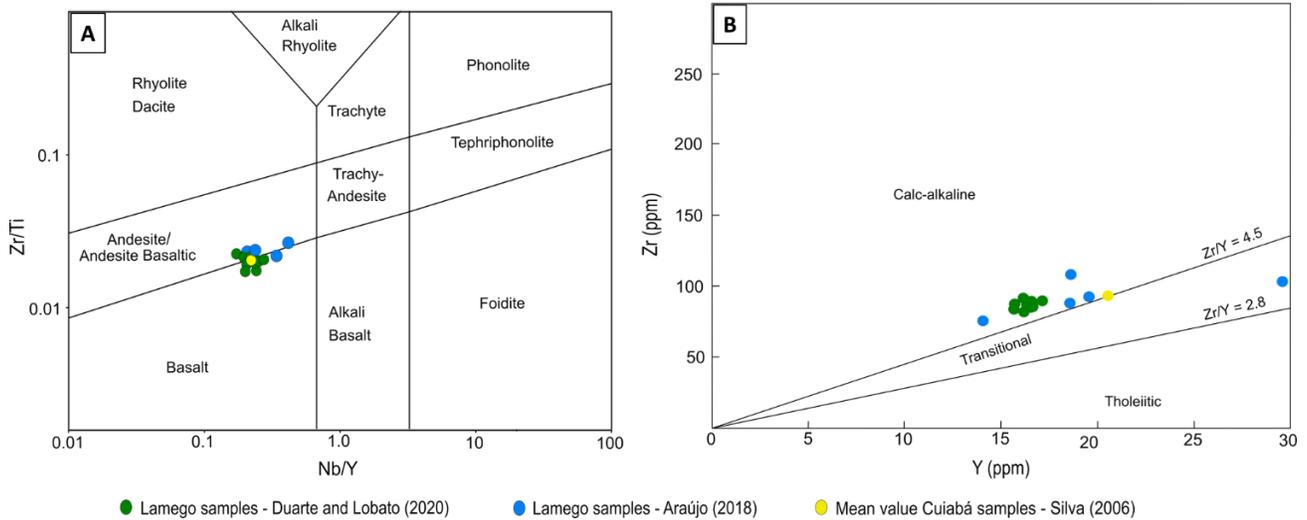


Figure 10 - Classification diagrams for basalts: A) Zr / Ti x Nb / Y diagram (Pearce, 1996); B) Zr x Y diagram for magmatic affinities (after Ross and Bédard, 2009). The mean value for Cuiabá deposit volcanic rock samples are from Silva (2006).

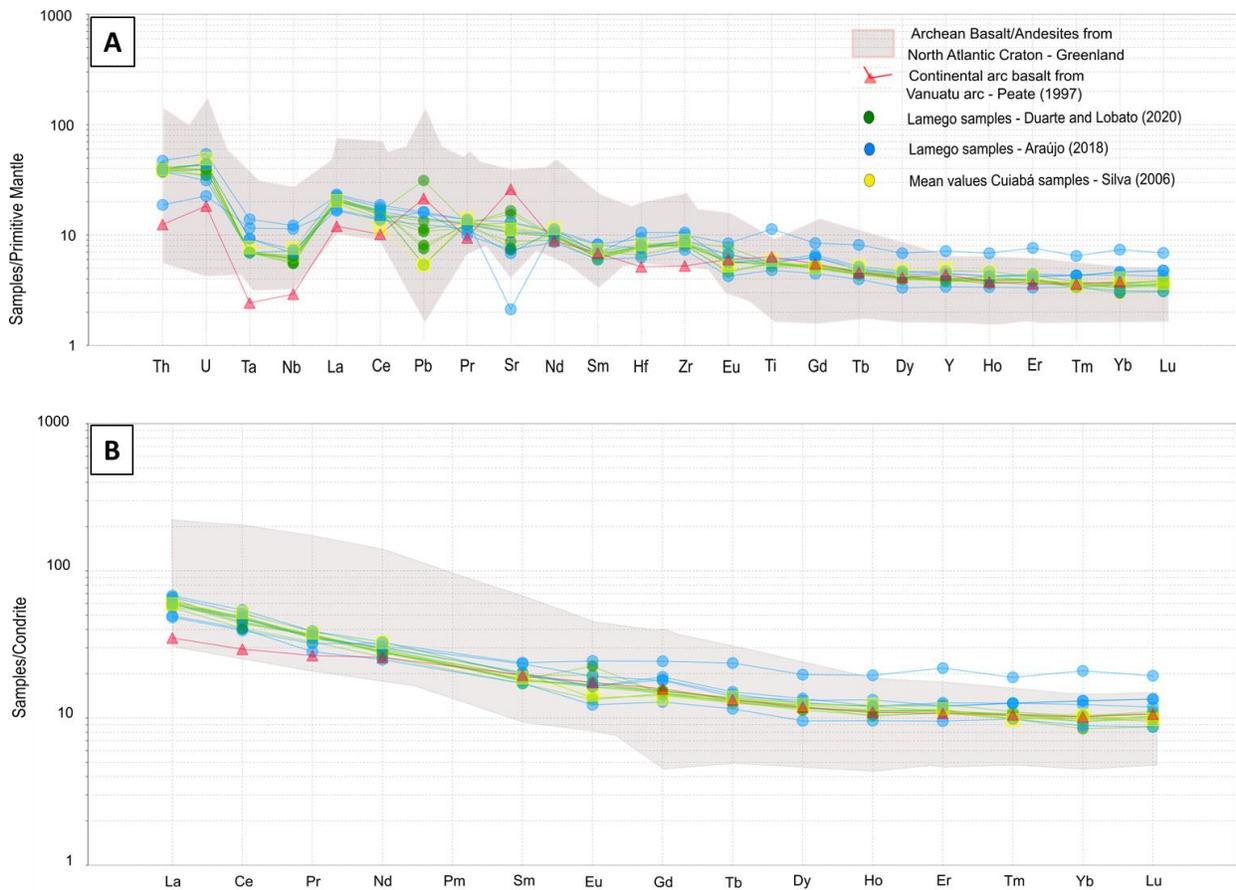


Figure 11 - A) Multi-elementary spidergram for basalt samples normalized to the primitive mantle (Palme and O’Neill, 2014); B) REE spidergram for basalt samples normalized to the chondrite (Sun and McDonough, 1989). Basalts/Andesites

from the North Atlantic Craton (light beige shade) are from Szilas (2018); average basalt value of Vanuatu continental-arc (red line) from Peate et al. (1997).

Table 8 – Geochemical data for basalt/andesite samples from the Lamego gold deposit.

Samples		11CP0038	15CR2788	17CR2790	18CR2787	27CP0042	30QM1177	31QM1179	37QM1173	08CP0039
Elements	D.L.	Basalt*	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt	Basalt*	Basalt*	Basalt
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	52.44	53.9	53.1	53.42	53.93	55.04	51.51	55.48	57.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	14.95	14.53	14.8	15.09	14.98	14.5	14.27	14.52	14.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.04	7.68	8.85	8.58	8.88	7.56	6.8	7.47	7.7	8.08
MgO (%)	0.01	5.57	5.8	5.8	6.04	5.68	4.92	5.45	5.6	5.49
CaO (%)	0.01	10.58	9.3	9.29	10.4	10.39	9.2	8.65	5.92	7.55
Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	1.95	3.07	3.14	1.78	2.61	2.5	3.37	3.68	3.19
K <sub>2</sub> O (%)	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.03	0.01	0.01
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	0.69	0.67	0.71	0.71	0.71	0.71	0.66	0.7	0.73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.1	0.12	0.12
MnO (%)	0.01	0.14	0.15	0.14	0.15	0.14	0.12	0.14	0.11	0.13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.002	0.016	0.015	0.015	0.016	0.015	0.015	0.014	0.015	0.017
Ba (ppm)	1	11	10	11	9	19	8	11	70	11
Sc (ppm)	1	28	28	29	30	29	28	28	30	30
LOI	-5.1	5.6	3.4	4.1	3.2	3.6	5.9	8.2	5.9	2.4
Total (%)	0.01	99.79	99.8	99.81	99.78	99.8	99.82	99.82	99.81	99.8
Be (ppm)	1	<1	2	<1	2	1	<1	<1	<1	1.00
Co (ppm)	0.2	38.5	35.7	35.6	40.2	36.6	37.4	35.2	35.6	40.8
Cs (ppm)	0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1
Ga (ppm)	0.5	14.1	13.6	14.0	14.4	13.4	15.5	13.5	10.6	12.2
Hf (ppm)	0.1	2.3	2.4	2.4	2.4	2.0	2.4	2.3	2.4	2.4
Nb (ppm)	0.1	3.6	3.7	3.6	3.4	3.6	3.9	3.3	3.7	3.8
Rb (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	1.2	0.3	<0.1
Sn (ppm)	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Sr (ppm)	0.5	366.7	249.9	232.2	343.1	286.3	234.7	168.3	193.7	257.2
Ta (ppm)	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Th (ppm)	0.2	3.4	3.2	3.2	3.4	3.3	3.5	3.4	3.3	3.5
U (ppm)	0.1	0.9	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.9	1.00
V (ppm)	8	205	201	203	203	207	191,00	188,00	190,00	189,00
W (ppm)	0.5	<0.5	0.6	0.8	0.7	0.7	1.00	0.6	<0.5	<0.5
Zr (ppm)	0.1	86,0	82.6	86.2	84.3	83.9	89.6	86,00	85.2	89.8
Y (ppm)	0.1	16.6	16.2	16.7	15.8	15.8	16.2	16.5	16.5	17.2
La (ppm)	0.1	13.5	14.4	13.9	14.4	14.7	15.3	14.2	13.3	14.2
Ce (ppm)	0.1	28.9	28.8	29.9	29.7	29.3	27,00	26.6	24.8	27.4
Pr (ppm)	0.02	3.38	3.49	3.33	3.42	3.31	3.45	3.45	3.11	3.48
Nd (ppm)	0.3	13.3	13.0	12.9	13.1	14.1	13,00	13.7	12.1	13.6
Sm (ppm)	0.05	2.71	2.96	2.79	2.81	3.11	2.78	2.73	2.61	2.9
Eu (ppm)	0.02	0.97	1.13	0.94	0.94	0.79	1.3	0.98	0.77	1.01
Gd (ppm)	0.05	3.13	3.13	3.13	3.01	2.92	2.96	3.02	3.00	3.09
Tb (ppm)	0.01	0.51	0.51	0.51	0.49	0.47	0.48	0.49	0.48	0.5
Dy (ppm)	0.05	3.03	3.13	3.21	3.1	2.95	2.86	2.96	2.94	2.95
Ho (ppm)	0.02	0.58	0.68	0.67	0.64	0.63	0.59	0.61	0.63	0.63
Er (ppm)	0.03	1.8	2.04	1.84	1.82	1.89	1.78	1.85	1.85	1.84
Tm (ppm)	0.01	0.27	0.28	0.27	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.27
Yb (ppm)	0.05	1.65	1.72	1.77	1.69	1.74	1.43	1.73	1.6	1.6
Lu (ppm)	0.01	0.26	0.25	0.27	0.24	0.28	0.22	0.27	0.26	0.25
TOT/C (ppm)	0.02	0.81	0.32	0.28	0.22	0.35	0.93	1.39	0.84	0.05
TOT/S (ppm)	0.02	<0.02	0.13	<0.02	<0.02	0.03	0.02	0.02	0.07	0.17
Mo (ppm)	0.1	1.9	0.6	0.9	0.4	0.6	0.9	0.3	0.9	1.7
Cu (ppm)	0.1	69.3	89.8	80.2	79.4	81.5	31.1	69.6	77.9	90.3
Pb (ppm)	0.1	5.8	1,0	1,0	1.4	1.5	31.1	2.5	2,00	2.1
Zn (ppm)	1	57	47	51	55	49	52,00	58,00	60,00	46,00
Ni (ppm)	0.1	84.6	77.9	72.8	74.8	74.9	71.7	85.4	90.9	82.8

As (ppm)	0.5	1.6	17.9	26.8	2.6	22.8	13.7	1.5	1.5	9.9
Cd (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sb (ppm)	0.1	1.9	1.2	1.7	1.3	1.5	1.6	1.4	1.4	3.6
Ag (ppm)	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppm)	0.0005	<0.0005	0.0008	0.001	<0.0005	0.0012	1.4	<0.5	0.9	3.2
Hg (ppm)	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Se (ppm)	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

\*Andesitic basalts/Andesites

Araújo (2018)		CRN1MAFICA002	CRN1MAFICA001	QUN1Mafica001	QUN1Mafica002	QUN2MAFICA001
Elements	D.L.	Basalt	Basalt*	Basalt*	Basalt*	Basalt
SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	43.52	53.17	52.98	54.94	50.77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	12.87	16.8	15.82	14.8	12.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	12.36	10.32	9.57	9.44	5.8
MgO (%)	0.01	6.1	9.29	5.45	6.8	4.43
CaO (%)	0.01	9.33	0.83	7.7	7.89	7.37
Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	2.61	1.52	2.33	2.12	4.53
K <sub>2</sub> O (%)	0.01	0.03	1.24	0.01	0.01	0.1
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	1.44	0.75	0.71	0.73	0.61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.01	0.17	0.11	0.12	0.12	0.1
MnO (%)	0.01	0.19	0.08	0.15	0.15	0.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.03	0.14	0.02	0.02	0.01
Ba (ppm)	100	100	400	100	100	100
Sc (ppm)	1	36	28	30	29	24
LOI	0.01	10.07	5.79	5.27	3.29	13.22
Total (%)	-	98.75	98.75	98.75	98.75	98.75
Be (ppm)	-	-	-	-	-	-
Co (ppm)	1	39.0	61.0	38.0	41.0	33.0
Cs (ppm)	0.01	0.35	1.71	0.1	0.1	0.23
Ga (ppm)	0.1	15.8	19.1	16.5	14.0	11.1
Hf (ppm)	0.2	2.8	3.2	2.5	2.3	1.9
Nb (ppm)	0.2	6.8	7.3	4.1	4.4	4.3
Rb (ppm)	0.2	1.1	44.6	0.4	0.2	2.3
Sn (ppm)	1	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0
Sr (ppm)	0.1	151.5	46.9	233.0	291.0	162.5
Ta (ppm)	0.1	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3
Th (ppm)	0.05	1.6	4.02	3.44	3.41	3.19
U (ppm)	0.05	0.52	1.25	1.01	1.02	0.72
V (ppm)	5	272	178	242	216	186
W (ppm)	1	3.0	3.0	3.0	1.0	3.0
Zr (ppm)	2	104.0	109.0	89.0	93.0	76.0
Y (ppm)	0.5	29.7	18.6	18.6	19.6	14.1
La (ppm)	0.1	11.4	15.6	14	16	11.7
Ce (ppm)	0.5	24	31.2	28.7	33	24.6
Pr (ppm)	0.03	3.03	3.67	3.31	3.68	2.67
Nd (ppm)	0.1	15.0	15.3	14.0	14.4	11.6
Sm (ppm)	0.03	3.62	2.99	3.08	3.55	2.62
Eu (ppm)	0.03	1.41	0.95	0.95	1.11	0.71
Gd (ppm)	0.05	4.97	3.89	3.72	3.68	2.63
Tb (ppm)	0.01	0.88	0.56	0.54	0.52	0.43
Dy (ppm)	0.05	4.99	3.43	3.2	3.33	2.42
Ho (ppm)	0.01	1.1	0.68	0.68	0.75	0.54
Er (ppm)	0.03	3.6	2.09	1.99	1.98	1.57
Tm (ppm)	0.01	0.48	0.32	0.32	0.32	0.25
Yb (ppm)	0.03	3.54	2.22	2.21	2.09	1.5
Lu (ppm)	0.01	0.49	0.34	0.34	0.3	0.22
TOT/C (ppm)	-	-	-	-	-	-
TOT/S (ppm)	-	-	-	-	-	-
Mo (ppm)	1	<1	1.0	<1	<1	<1

Cu (ppm)	1	43,0	23,0	35,0	69,0	66,0
Pb (ppm)	2	<2	<2	<2	3	3
Zn (ppm)	2	90	139	74	77	48
Ni (ppm)	1	62,0	562,0	95,0	95,0	80,0
As (ppm)	0.1	5.7	57.7	11.6	16.9	54.6
Cd (ppm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sb (ppm)	0.05	0.24	0.23	1.44	2.14	23.9
Ag (ppm)	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppm)	0.005	0.01	0.007	0.009	<0.005	<0.005
Hg (ppm)	0.005	0.06	0.058	0.011	0.005	<0.005
Se (ppm)	0.2	0.2	<0.2	<0.2	0.3	0.6

\*Andesitic basalts/Andesites

## 5.5. DISCUSSION

### 5.1.1 BIF and ferruginous chert

#### 5.1.1.1 Primary features

The primary characteristics of the host BIF in the Lamego gold deposit are locally preserved despite the great extent of the associated hydrothermal alteration. These rocks are fine-grained, siderite dominated, and present an earthy aspect due to inclusions and coating of carbonaceous material in the carbonate (Figure 6C and Figure 6D). Although dominantly a hydrothermal mineral, ankerite may also occur as a primary carbonate, as is the case in other BIF-hosted orogenic deposits elsewhere (Ribeiro-Rodrigues et al., 2007- Cuiabá; Gourcerol et al. (2016) – Musselwhite; Konhauser et al., 2017). Primary ankerite is fine-grained, strongly intermingled with the matrix (Figure 6C, Figure 6D and Figure 6E), whereas hydrothermal ankerite is coarse-grained, euhedral, commonly in association with vein quartz.

Magnetite BIF, already described by Sales (1998), Martins et al., (2016), Araújo (2018), and Araújo and Lobato (2019), was not considered as a primary mineral. As pointed out by the magnetite geochemistry via ICP-MS performed by Araújo and Lobato (2019), its primary signatures are modified by the hydrothermal alteration (gold mineralization), or even by the diabase dikes that cut the deposit.

#### 5.5.1.2 REE + Y systematics and high T volcanogenic hydrothermal influence

The BIF and ferruginous chert samples from the Queimada, Carruagem, Arco da Velha, and Cabeça de Pedra orebodies normalized to the PAAS (McLennan, 1989) present similar REE patterns, recording the hydrogenous and the high-temperature (high-T), hydrothermal volcanogenic influence (Figure 9A and 9B). The main characteristics encountered in the Lamego samples, which are typically indicated by some authors (Bolhar et al., 2004; Bolhar et al., 2005; Alexander et al., 2008; Thurston et al., 2012; Gourcerol et al., 2016) are as follow:

- Positive La anomalies, typical of the marine environment. They are associated with the insolubility stability of this element due to the electronic configuration of its outermost layer.
- Depletion in the LREE and MREE relative to the HREE. This is linked to the hydrogenous contribution, given the greater stability and affinity of the HREE (ionic radius decreases from light to heavy) in bonds with carbonate ions.
- Positive Eu anomalies (Figure 9A), typically related to high-T hydrothermal volcanogenic fluids.
- Slightly positive Ce anomalies, suggesting BIF formation in a dominantly anoxic environment, or with low oxygen availability.
- Positive Gd anomalies and significant variations in Y and Er, which generate patterns with a scattered aspect, mainly in relation to the HREE.

The Y/Ho ratios, varying from 15 to 70, can be influenced by hydrogenous contribution, which has superchondritic ratios ( $Y/Ho > 27$ ), or by detrital and high-T hydrothermal volcanogenic fluids, with chondritic ratios ( $Y/Ho$  close to 27) (Bau and Dulski, 1996; Bau and Dulski, 1999; Bau et al., 1997; Bolhar et al., 2004). Samples with  $Y/Ho \leq 27$  ratios (06AVN2LE, 17QN0400, 03CR2741, LAM01CR, LAM02CR, LAM18CR and LAM05QM) also have low concentrations of aluminum (<0.01 to 0.06%), suggesting a greater hydrothermal contribution. Sample LAM18CR is an exception, with an  $Al_2O_3$  concentration of 0.34%, and a chondritic value for the Y/Ho ratio of 26.67 due the presence of sericite (Araújo, 2018), which in turn indicates a possibly significant clastic contribution (Bolhar et al., 2004; Bolhar et al., 2005). In addition, Eu positive anomalies are present in all of the samples, with an emphasis on LAM18CR and LAM05QM, which possess higher Eu anomalies (2.34 and 3.45, respectively).

Figure 9A shows the PAAS-normalized samples with the levels of  $Fe_2O_3$  associated with each one. Studies such as those by Gourcerol et al. (2015, 2016) had already demonstrated that the mineral phases richer in Fe generally produce normalized patterns, with one or two orders of magnitude higher than the samples of chert.

Most ferruginous chert samples at Lamego ( $\leq 15\% Fe_2O_3$ ) have low REE values, normally below the detection limit. Samples with  $Fe_2O_3$  contents between 15% and 21% define continuous patterns and are mixed in the normalized diagram; it is hard to create a relationship between the REE contents and the  $Fe_2O_3$  percentages. Sample 17QN0402 ( $Fe_2O_3 = 29\%$ ) is an exception in this group.

Samples with the highest Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (25, 26 and 30%) levels are the ones with the highest REE contents, with normalized values reaching 0.1. An exception is sample LAM18CR, which has 2.44% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, but with a high REE content. This sample has magnetite, which probably contributes to the REE enrichment; however, magnetite, in this case, is a hydrothermal mineral.

Archean BIF and IF are also plotted in Figure 9A Figure 9B for comparison: Witwatersrand (Viehmann, 2015); Isua (Frei, 2007); Kurumam (Bau and Dulski, 1996); North Craton of China – NCC (Moon et al., 2017); and Meadowbank (Gourcerol et al., 2016). They are slightly more REE-enriched, with a flatter tendency for HREE and visually more prominent Eu anomalies, mainly due to higher relative Gd in the Lamego samples.

In order to estimate the influence of hydrothermal volcanogenic and hydrogenous fluids in the deposition of these chemical sediments, Gourcerol et al. (2016) propose the use of the Eu/Sm and Sm/Yb ratios (Figure 12). They use a calculated mixing curve in which the extremes are seawater (Alibo and Nozaki, 1999) and a high-T hydrothermal fluid (Thurston et al., 2012). As a practical use of this estimation, it is possible to predict the BIF precipitation position within the basin. The greater the Eu anomaly, the greater the hydrothermal contribution, and the greater the proximity to the hydrothermal exhalation sources.

The Lamego samples plot close to the mixing line (Figure 12 **Error! Reference source not found.**), with a slightly higher Sm/Yb ratio trend in half of them. The proximity to the calculated line indicates good adhesion to the mixture between seawater and hydrothermal fluid. Gourcerol et al. (2016) suggest that samples further away from the mixing line may reflect high-grade metamorphic conditions, a pattern which obviously does not apply to Lamego - where metamorphism is low in the greenschist facies. This behavior may be best explained by post depositional hydrothermal contribution associated with gold mineralization, mainly for the samples LAM03QM and 07CRN6.1C.

The high-T hydrothermal contribution varies from 0 to 10% (Figure 12). However, it is not possible to separate the samples according to the different orebodies that could represent areas with different distances from the hydrothermal vents. Similarly, the average values of the notable BIF/IF samples (Witwatersrand, Isua, Kurumam, NCC, and Meadowbank) are in the same mixing line field as the Lamego samples.

Alexander et al. (2008) propose three diagrams: (i) Eu/Sm x Sm/Yb – Fig. Figure 13A; (ii) Eu/Sm x Y/Ho - Fig. Figure 13B; and (iii) Sm/Yb x Y/Ho - Fig. Figure 13C, with mixing curves calculated from seawater samples from Alibo and Nozaki (1999) and high-T hydrothermal fluid from Bau and Dulski (1999).

These diagrams focus on the 0 - 10% hydrothermal contribution intervals. Most samples present a high-T hydrothermal fluid contribution  $\leq 1\%$ , as well as the notable BIF/IF samples (Figs. Figure 13A and Figure 13B). The use of this diagram by other authors points out a similar trend (e.g., Huang et al., 2019, and references therein).

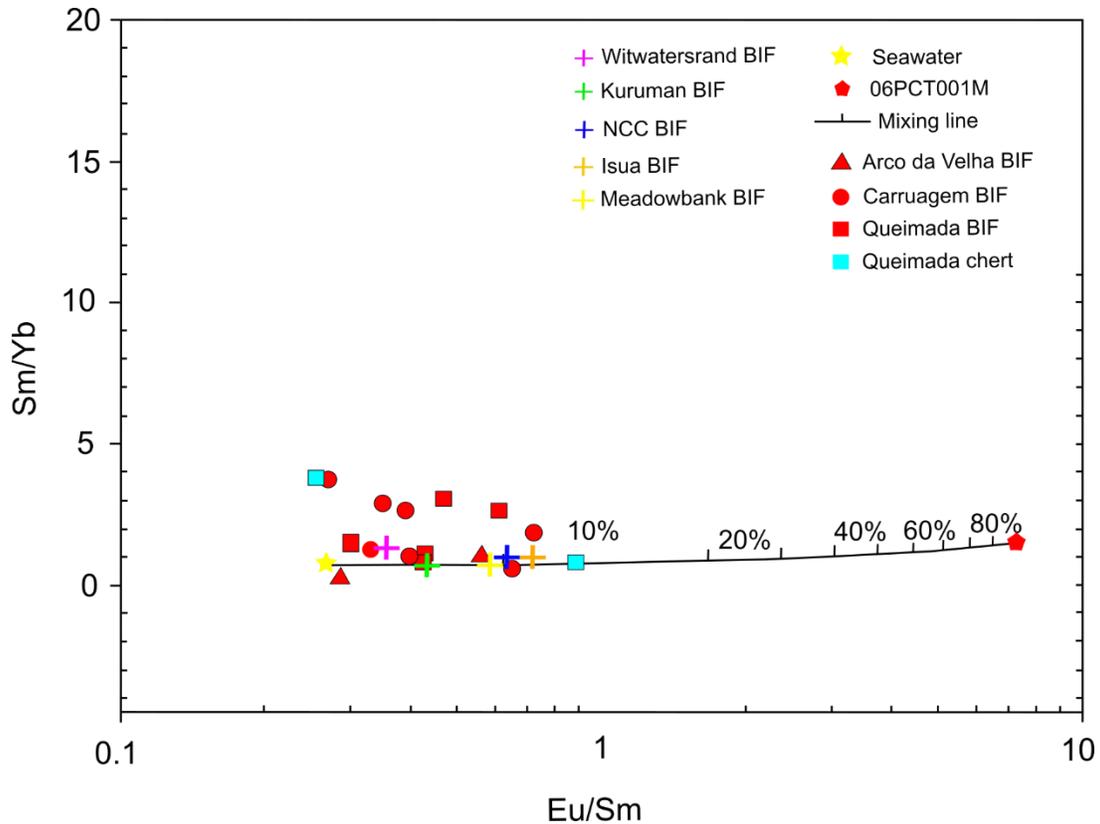


Figure 12 - Eu/Sm x Sm/Yb diagram proposed by Gourcerol et. al (2016) to estimate the hydrothermal contribution during BIF and chert deposition. Mixing line calculated from the Alibo and Nozaki (1999) seawater sample and high-T volcanogenic hydrothermal fluid sample – 06PCT001M (Thurston et al., 2012).

According to Klein and Beukes (1989), Khan et al. (1996), and Alexander et al. (2008), this contribution ( $\leq 0.1\%$ ) represents a mixing ratio of 1000:1 between seawater and high-T hydrothermal fluids that allows the generation of such REE patterns. The relatively weak adherence to the mixing curve - for example, of the high Sm/Yb ratios (Fig. Figure 13A), may indicate an additional source of REE (Alexander et al., 2008), which seems to be the case for the Lamego samples.

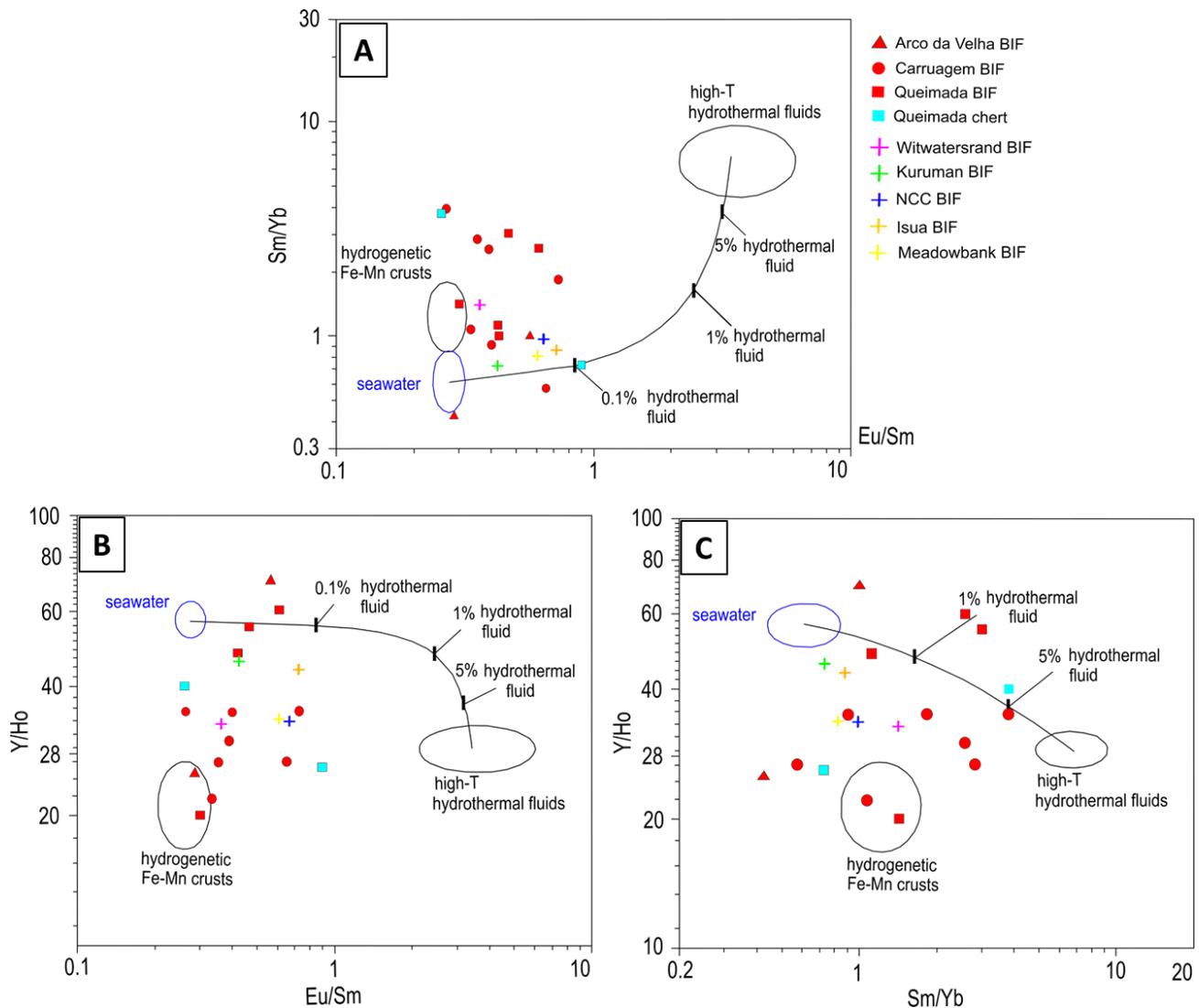


Figure 13 - Alexander et al. (2008) diagrams for hydrothermal contribution estimation for BIF deposition at the Lamego gold deposit: A)  $Eu/Sm$  x  $Sm/Yb$ ; B)  $Eu/Sm$  x  $Y/Ho$ ; C)  $Sm/Yb$  x  $Y/Ho$ .

The  $Sm/Yb$  x  $Y/Ho$  diagram (Fig. 13C) incorporates a higher percentage of high-T hydrothermal fluids comparatively to the diagrams of Figures Figure 13A and Figure 13B, and is in agreement with the Gourcerol et al. (2016) approach. Discordant with the 0.1% contribution given by the  $Eu/Sm$  ratio (Figs. Figure 13A and Figure 13B), the  $Sm/Yb$  x  $Y/Ho$  diagram (Fig. Figure 13C) indicates that the Lamego samples have a dispersion between the fields of 0 to 5%, therefore a more significant contribution of hydrothermal fluids from ocean floor vents. These fluids have high  $Sm/Yb$  values and chondritic ratios, with  $Y/Ho$  ratios close to 28 (Alexander et al., 2008).

The mixing curves of Figures Figure 12, Figure 13A, Figure 13B, and Figure 13C suggest that the precipitation of the Lamego BIF is linked to a relatively restricted high-T volcanogenic contribution,

between 0 and 10%, and may be even more restricted (0 to 0.1%), as shown in Figures Figure 13A and Figure 13B. This may be interpreted to reflect both a significant lateral distance from the volcanogenic source, as well as a greater hydrogenous influence on the precipitation of these chemical sedimentary rocks.

Despite this probable lateral distance, when comparing several Rio das Velhas greenstone belt BIF, Araújo and Lobato (2019) propose that the BIF and ferruginous chert from the Lamego and Urubu deposits, composed predominantly of carbonate, would be the closest to the volcanogenic sources.

#### *5.5.1.3 Geochemistry of hydrothermally altered BIF and ore samples*

The hydrothermally altered, carbonate (ankerite), magnetite BIF and ore samples show geochemical characteristics similar to those of the non-altered BIF samples (Table 7). The PAAS-normalized samples of Figure 9B have concordant trends, but values with a higher order of magnitude.

These patterns are even more similar to the notable BIF/IF patterns (Figure 9B), presenting the same order of magnitude and with well defined Eu and Y anomalies, in addition to a planar tendency and little dispersion of the HREE. The hydrothermal alteration responsible for gold mineralization does not considerably alter the primary REE geochemical characteristics of these rocks. In addition to an increase in the total REE content, there is a tendency for the REE patterns to homogenize, which seems to reflect the main characteristics of the original host rocks. In a study carried out specifically on hydrothermal calcites from Archean gold deposits, Kalliomaki et al. (2019) demonstrate that the adjacent and host rocks can strongly affect the chemistry of trace elements in calcite, without necessarily inheriting identical REE characteristics.

As a rule, the REE content in hydrothermal fluids is extremely low and thus the change in the REE patterns of the host rock during fluid-rock interaction is practically non-existent (Bau, 1991). If one considers that a fluid composed of H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-NaCl was responsible for the low REE content mineralization in Lamego (Morales et al., 2016), it can be said that the influence of the host rocks, such as BIF and ferruginous chert, overlapped the fluid's influence, thus preserving the primary geochemical characteristics in the altered rocks.

As pointed out by Gourcerol et al. (2015), one clear evidence of hydrothermal alteration after precipitation may be related to the predominance of light negative Ce anomalies. This is due to the oxy-reduction conditions of the mineralizing fluid, not consistent with the probable anoxic- or low-oxygen conditions in the Archean ocean.

### 5.5.2 *Volcanic rocks*

The study of Archean volcanic rocks involves a series of precautions due to the various post-magmatic processes which they may have been subjected to (e.g.: ocean floor- and hydrothermal alteration, metamorphism). In the case of Lamego, the observed mineral paragenesis, actinolite-plagioclase-epidote/clinozoisite, fits the greenschist metamorphic facies conditions, whereas chlorite, carbonate/quartz veins with sulfide minerals are related to the superimposed hydrothermal alteration responsible for gold mineralization.

Seeking to highlight the original characteristics of the volcanic rocks, high-field-strength elements (HFSE) and REE were used for data analysis. These are considered as minimally mobile; their concentrations are not significantly modified by processes such as ocean floor hydrothermal alteration and low-grade metamorphism (Zucchetti, 1998; Martins et al., 2017).

The volcanic rock at the Lamego deposit varies from basic to intermediate, probably resulting from successive variations in spills. The samples are plotted close to the limit region between basalt and andesite/andesitic basalt in the Zr/Ti x Nb/Y diagram (Pearce 1996) (Figure 10A) and show a narrow limit between the two lithotypes.

Szilas (2018) proposes the La/Sm ratio as one of the best tools for distinguishing between the tholeiitic and calcium-alkaline petrogenetic suites for Mesoarchean rocks from the North Atlantic craton in Greenland. Based on this relationship, Szilas (2018) separates the basalts and andesites into two well-defined groups: La/Sm < 3 ratios, associated with the tholeiitic suite, and La/Sm ratios > 3, of the calcium-alkaline suite. Following this classification, all fourteen Lamego samples, including those from Araújo (2018), have a calcium-alkaline character - with an La/Sm average of 4.80, corroborating the Zr x Y diagram (after Ross and Bédard, 2009) (Figure 10B).

Zucchetti (1998) and Zucchetti et al. (2000), who studied several occurrences of mafic rocks in the Nova Lima Group of the Rio das Velhas greenstone belt, did not identify rocks of calcium-alkaline signature. The authors defined basalts as tholeiites and magnesian tholeiites, and, at the time, Lamego was not sampled. In a study on the Rio das Velhas greenstone belt's komatiites and basalts, Verma et al. (2017) classify basalts from the region between Sabará and Caeté (Figure 1) as high-magnesium basalts (39.5 - 41.5%), which contrast with those of Lamego, that present MgO ranging between 4.43 and 9.29%.

Silva (2006) presents a geochemical analysis of eight samples of the lower mafic volcanic rock from the Cuiabá gold deposit (positioned stratigraphically below the Cuiabá BIF) and eight samples of the upper mafic (positioned above the Cuiabá BIF) volcanic rock (stratigraphy after Ribeiro-Rodrigues

et al., 2007). They are classified as basalts and andesitic basalts with calcium-alkaline and tholeiitic signature, respectively. The samples classified as basalt and andesitic basalt in the present study, stratigraphically positioned below the Lamego BIF (Figure 2), seem to be correlated with the lower mafic volcanic rock of Cuiabá (Silva, 2006), with a clear distinction between the geochemical affinities of these rocks and the other basalts studied in the Rio das Velhas greenstone belt until now (Zucchetti et al., 2000a; Verma et al., 2017).

### ***5.5.3 Geotectonic context***

The basalt/andesitic basalts at Lamego have typical signatures of continental volcanic arc rocks with calcium-alkaline affinity, and they are similar to the volcanic rocks at the base of the Cuiabá deposit stratigraphy (Silva, 2006) (Figure 10A, 10B, Figure 11A, 11B, Figure 14A and Figure 14B). These geochemical characteristics indicate a more felsic and restricted volcanism, which followed the komatiitic and tholeiitic spills proposed by Zucchetti (1998), Zucchetti et al. (2000a) and Verma et al. (2017).

As shown in the Pearce (2008) (Figure 14B) diagram, the Lamego samples, as well as the komatiite and high-magnesium basalts samples from Verma et al. (2017), plot above the MORB-OIB array. They show the association with subduction environments – continental-arc and island-arc, respectively. Parallel trends to the arc-array may indicate the occurrence of partial melting and/or fractional crystallization during the arc evolution, whereas the steep transition between the two sets of samples (Lamego and Verma et al., 2017 samples) may indicate greater assimilation and/or contamination from the continental crust during the transition from the island to the continental arc environment (Pearce, 2008; Pearce, 2014; Smithies et al., 2018).

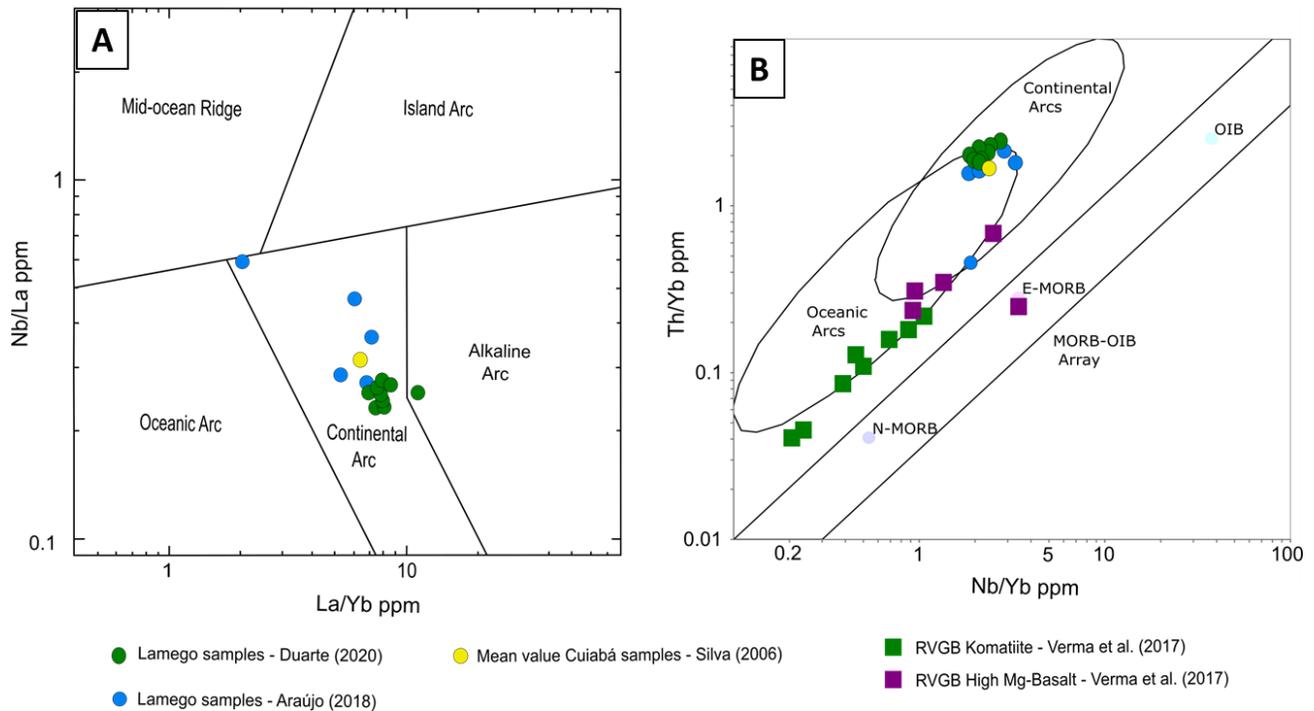


Figure 14 - Basaltic composition rock discrimination diagrams for geotectonic environments: A) La/Yb x Nb/La diagram proposed by Hollocher et al. (2012); B) Nb/Yb x Th/Yb diagram proposed by Pearce (2008).

The ultramafic/mafic volcanism related to the island-arc environment (Zucchetti, 1998; Zucchetti et al., 2000a, Verma et al., 2017) may be related to the Rio das Velhas I (2920 - 2850 Ma) event proposed by Lana et al. (2013). On the other hand, the volcanic rock in the Lamego gold deposit is probably associated with the Rio das Velhas II event (2800 - 2760 Ma). At this time, both the continental arc formation (Lana et al., 2013; Farina et al., 2016) and the deposition of the upper units of the Nova Lima Group took place, in the context of the volcanoclastic association of the Rio das Velhas greenstone belt cycle 3 sedimentation (Zucchetti et al., 1998; Baltazar and Zucchetti, 2007) (Figure 15).

The stratigraphic association at Lamego, with mafic and intermediate volcanic rocks and, generally, with pillow-type structures (Zucchetti, 1998; Zucchetti et al., 2000b), in addition to BIF/ferruginous chert and carbonaceous pelites, implies a sequence closely related to an ocean floor environment (Beukes and Gutzmer, 2008; Bekker et al., 2010; Konhauser et al., 2017). The 0 – 10% influence of high-T hydrothermal fluids associated with the possible detrital contribution in the BIF deposition, and the negative Nb and Ta anomalies (Figure 11A) for the Lamego volcanic rock, indicate an ocean floor environment in a region influenced by the arc, close to the continental source, probably related to the frontal part of the arc or even to its back-arc region (Figure 15). Soares et al. (2020) propose a similar environment and tectonic evolution for the Pitangui greenstone belt, indicating a coeval

evolution for both the Pitangui and the Rio das Velhas greenstone belts in the south of the São Francisco craton.

Some authors also argue in favor of the formation of Archean BIF in restricted basins (Barrett et al., 1988; Bolhar et al., 2005; Gourcerol et al., 2016). A fractionation between Y and Ho is proposed from the particles scavenging by Fe oxyhydroxides that can generate Y/Ho ratios with chondritic values, or even lower in an environment with low open ocean water recharge. These findings were made in experimental studies by Bau (1999) and observed in subsequent studies on BIF (Gourcerol et al., 2016). In the case of Lamego, this hypothesis can be supported both by the existence of samples with Y/Ho ratios below chondritic values, and by the deposit stratigraphy itself. The association of volcanic rock, BIF/ferruginous chert and carbonaceous pelite, surrounded by a thick layer of pelitic rocks, may also indicate a restricted environment. A similar scenario occurs at the nearby Cuiabá deposit, which may represent another restricted basin.

#### ***5.5.4 Metallogenic implications***

Despite the representative sampling of the four orebodies at Lamego, both vertical and lateral, no significant mineralogical and/or geochemical variations and/or correlations which could directly have influenced gold mineralization are perceived, a result similar to the one documented by Gourcerol et al. (2016).

In Lamego, the chemical sedimentary rocks have relatively low Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> levels (Table 7). For this reason, replacement-style mineralization, in association with sulfide-bearing gold, was not favored - as has been the case in the Cuiabá deposit (Lobato et al., 2001b; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007).

The similarities between the basal volcanic rock at the Lamego and Cuiabá gold deposits may also have metallogenic implications for Lamego, since, in Cuiabá, auriferous orebodies are found in association with quartz-carbonate veins, in shear-related zones that cut these rocks (eg.: VQZ, Serrotinho Footwall, Grande Grande Footwall) (Vitorino, 2017).

Moreover, the correlation of the Lamego deposit rocks with the Rio das Velhas II event (Lana et al., 2013) (Figure 15), associated with a continental-arc environment, helps to enhance the mineral exploration horizon in the Rio das Velhas greenstone belt, since the mineralizing hydrothermal event had a strong epigenetic character, not being restricted only to rocks of a specific evolutionary phase of the greenstone belt in the QF.

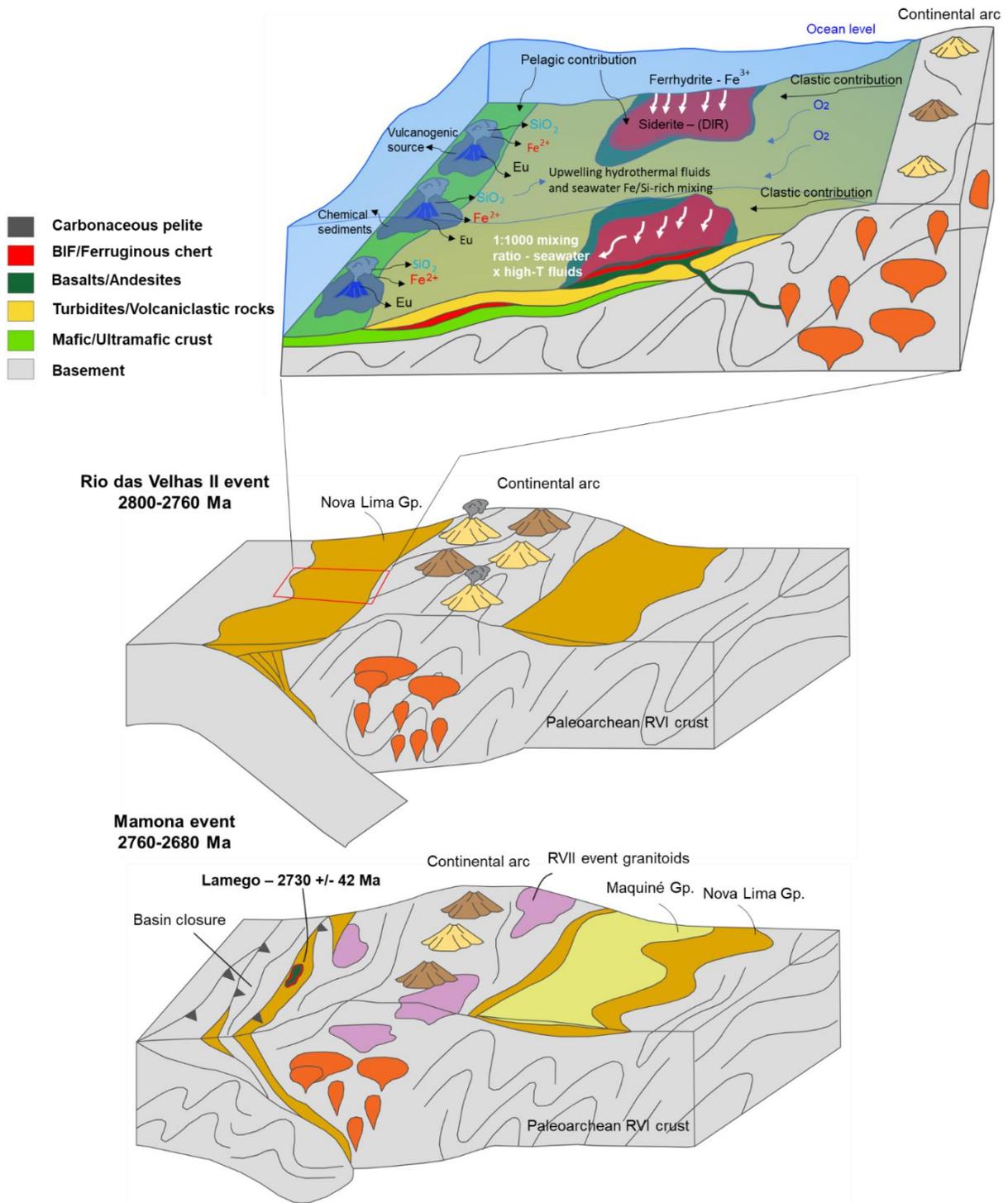


Figure 15 - Schematic block diagram showing the tectonic evolution context of the Rio das Velhas greenstone belt (RVII and Mamona events) as proposed by Lana et al. (2013) and Farina et al. (2015). Detailing of Lamego rocks deposition setting and tectonic context associated with the RVII block diagram - ocean floor environment with significant lateral distance to the hydrothermal exhalation source and relatively close to the continental-arc. Evolution sketch modified from Farina et al. (2015). Gp: Group; RV: Rio das Velhas.

This may be verified in other gold deposits within the Rio das Velhas greenstone, such as the BIF-hosted Raposos deposit, where the country rocks are tholeiitic basalts and komatiites (Junqueira et al., 2007), probably linked to the Rio das Velhas I event (island-arc environment - Zucchetti et al., 2000a, Lana et al., 2013; Farina et al., 2016; Verma et al., 2017).

In addition, the Lamego mineralization age is at 2730 +/- 42 Ma, as proposed by Martins et al. (2016), encompassing a period that goes from the Rio das Velhas II to the Mamona events. This may infer that mineralization probably took place in association to the Rio das Velhas basin closure's affecting the entire volcano-sedimentary rock package.

## 5.6. CONCLUSIONS

Petrographic and geochemical studies at the BIF-hosted Lamego gold deposit, inserted in the context of the Archean Rio das Velhas greenstone belt (Figure 1), detailed the characteristics of the BIF/ferruginous chert, as well as the volcanic rocks at the base of the sequence. These are some of the highlights:

- (i) Petrographic studies indicate that BIF and ferruginous chert with preserved primary characteristics are essentially sideritic, possibly with ankeritic contribution (Figure 6A, 6B, 6C, 6D, 6E and 6F). Due to the dominance of these carbonate phases, no significant mineralogical and geochemical variations have been documented that could influence gold mineralization.
- (ii) BIF and ferruginous chert geochemical studies show that REE signatures remained preserved even after metamorphic, hydrothermal, and deformational events that took place in the Rio das Velhas greenstone belt. The REE spidergrams normalized to PAAS (Figure 9A and 9B) have characteristics that denote precipitation in a marine environment, with the influence of high-T volcanogenic hydrothermal fluids and possible detrital contribution. A significant lateral spacing of these rocks in relation to the volcanogenic source is assumed, since the high-T hydrothermal contribution varies from 0 to 10% (Figure 12Figure 13A, 13B and 13C).
- (iii) The volcanic rocks at the Lamego deposit are classified as calcium-alkaline basalt and andesitic basalt/andesite (Figure 10A and 10B) and have the typical geochemical characteristics of continental-arc basalts (Figure 11A, 11B, Figure 14A and 14B). The data presented contrasts with previous studies that treat the Rio das Velhas greenstone belt

volcanic rocks as magnesian tholeiites and tholeiites (Zucchetti, 1998; Verma et al., 2017).

- (iv) The petrographic and geochemical characteristics of these rocks (BIF/ferruginous chert, basalt/andesitic basalts) indicate a probable geotectonic context related to an ocean floor environment, in a region under the influence of the continental-arc (Figure 15), associated with the Rio das Velhas II event (2800 - 2760 Ma) proposed by Lana et al. (2013).
- (v) The correlation of the Lamego deposit rocks with the Rio das Velhas II event (Lana et al., 2013) (Figure 15) contributes to enlarge the mineral exploration horizon in the Rio das Velhas greenstone belt. The mineralizing hydrothermal event apparently affected rocks of different evolutionary phases of the greenstone belt, with a strong epigenetic character.

## 6. DISCUSSÕES ADICIONAIS

### 6.1. Estimativa contribuição terrígena

Em relação à contribuição detrítica Gourcerol et al. (2016) propõem a utilização de uma curva de mistura calculada a partir de amostra de água do mar de Alibo & Nozaki (1999) e o pelito MUQ (Kamber et al., 2005), em um diagrama  $(Pr/Nd)_{MUQ}$  versus  $Y/Ho$  (Figura 25). Uma vez que para o presente trabalho foi utilizado o PAAS como padrão normalizador das amostras, o mesmo diagrama foi reproduzido adotando-se o PAAS como referência para normalização.

A primeira razão expressa a inclinação do padrão que é influenciada pela contaminação detrítica, e a segunda distingue entre valores supercondríticos, condríticos e subcondríticos, que também podem denotar contaminação. As porcentagens apresentadas são representativas da influência relativa dos membros extremos da linha de mistura e não valores absolutos.

As amostras analisadas estão predominantemente logo abaixo da linha de mistura o que evidencia a influência hidrotermal de alta temperatura. A extensão relativa da contaminação detrítica pode ser estimada entre 50-100% (Figura 25), com predomínio de amostras próximas à região da amostra de MUQ, sugerindo que mesmo pequena contaminação detrítica pode influenciar fortemente na assinatura geoquímica (Gourcerol et al., 2016). As amostras 17QN0402 e 17AVN0201 destacam-se das demais por possuírem valores bastante elevados de  $Y/Ho$ , indicando forte predomínio da influência hidrogena (Figura 25).

Os valores médios das amostras de formações ferríferas notáveis (Witwatersrand - Viehmann, 2015; Isua - Frei, 2007; Kurumam - Bau and Dulski, 1996; North Craton of China – NCC - Moon et al., 2017; and Meadowbank - Gourcerol et al., 2016) apresentam-se concordantes à linha de mistura, com contribuições detríticas relativas entre 30 a 80% (Figura 25).

A contribuição detrítica relativa indicada no diagrama pode ser ainda mais uma evidência da possível proximidade do ambiente de formação das FFB/*chert* de Lamego com o arco magmático associado ao evento Rio das Velhas II (2800 - 2760 Ma) (Lana et al., 2013).

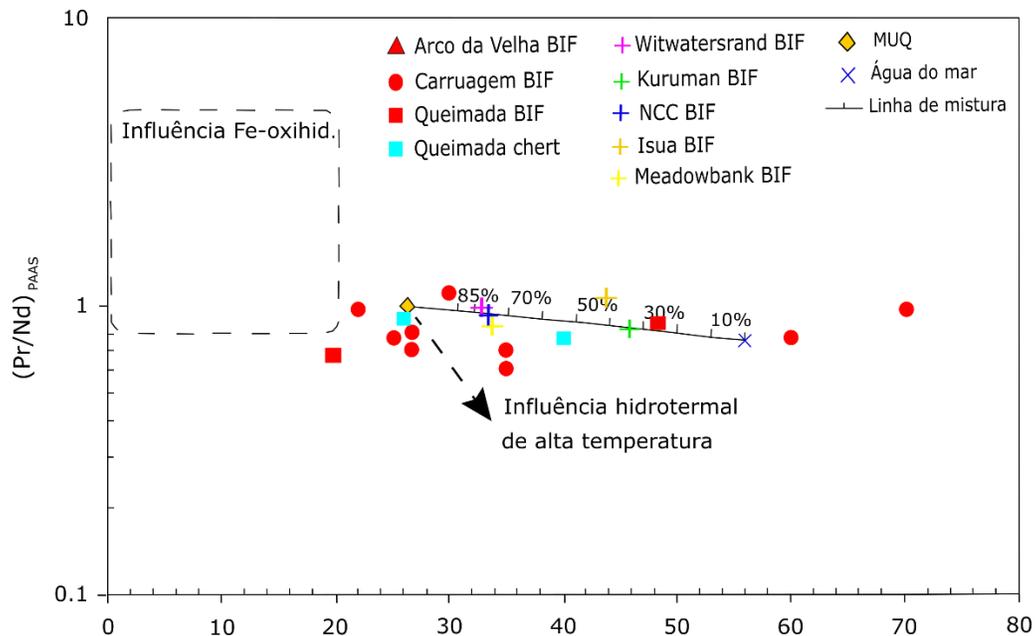


Figura 25 – Diagrama binário (Y/Ho x Pr/Nd<sub>PAAS</sub>) proposto por Gourcerol et al. (2016) para estimativa terrígena na deposição das FFB e chert. Linha de mistura calculada a partir de amostra de MUQ (Kamber et al., 2005) e amostra de água do mar de Alibo e Nozaki (1999).

## 6.2. Estimativa contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta temperatura para amostras de FFB alteradas e minério

Buscando realizar uma comparação entre amostras alteradas e não alteradas foram plotados também os diagramas de estimativa hidrotermal de Gourcerol et al. (2016) e Alexander et al. (2008) para as amostras de FFB alteradas (carbonato e magnetita) e minério (Figura 26 e Figura 27). Nos mesmos diagramas são plotadas também as amostras de FFB/IF notáveis: Witwatersrand (Viehmann, 2015), Isua (Frei, 2007), Kurumam (Bau e Dulski, 1996), North Craton of China – NCC (Moon et al., 2017) and Meadowbank (Gourcerol et al., 2016).

As amostras alteradas apresentam-se concordantes às amostras de FFB não alteradas e às amostras de FFB/IF notáveis.

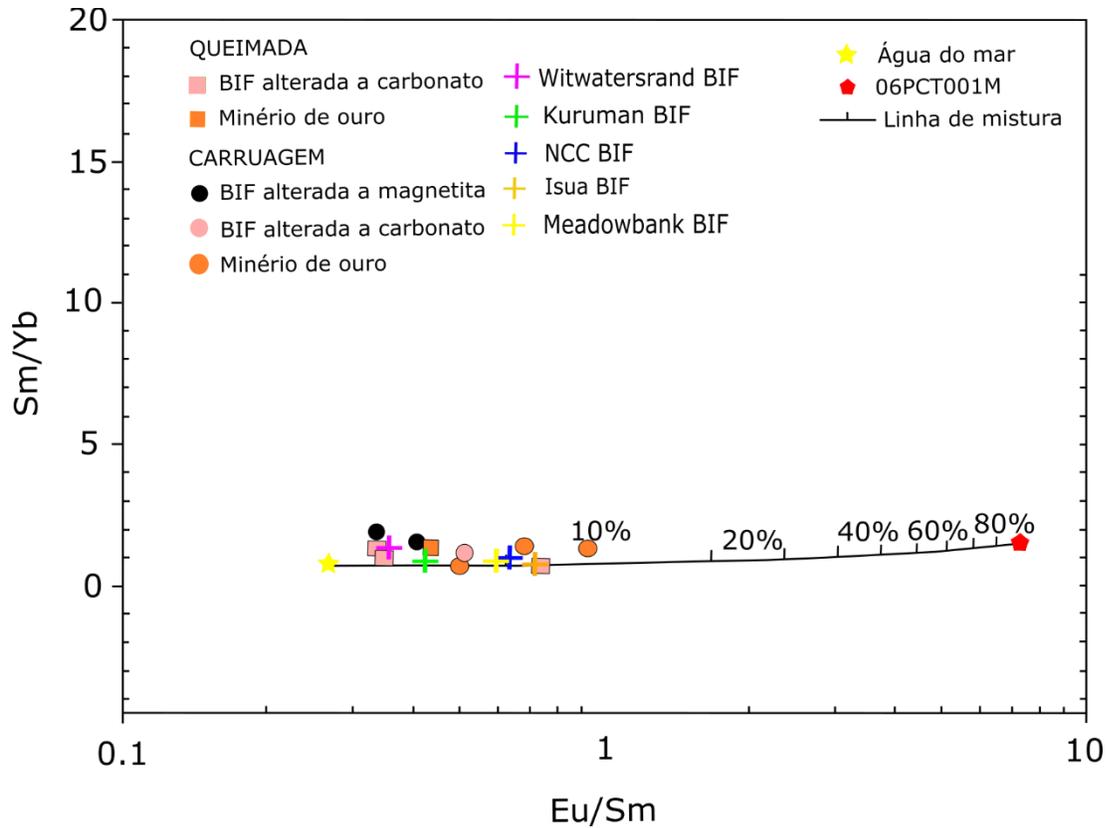


Figura 26 – Diagrama Eu/Sm x Sm/Yb proposto por Gourcerol et al. (2016) para estimativa da contribuição hidrotermal vulcanogênica durante a deposição da FFB e chert. Linha de mistura calculada a partir de amostras de água marinha de Alibo e Nozaki (1999) e amostra de fluido hidrotermal vulcanogênico de alta T de Thurston et al. (2012).

No diagrama de Gourcerol et al. (2016) as amostras se concentram no campo de 0 a 10% de contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta temperatura, com apenas uma amostra de minério do corpo Carruagem situada logo no início do campo entre 10 e 20% (Figura 26). Para os diagramas Eu/Sm x Sm/Yb e Eu/Sm x Y/Ho (Alexander et al., 2008), a contribuição hidrotermal vulcanogênica restringe-se ao campo de 0,1%, com a mesma amostra de minério plotando no campo de variação entre 0,1 e 1% (Figura 27A e 27B). O diagrama Sm/Yb x Y/Ho (Alexander et al., 2008), com campos de contribuição distintos, classifica as amostras com uma contribuição hidrotermal de até 1%, com uma amostra de FFB a magnetita plotando no campo de contribuição entre 1 e 5% (Figura 27C).

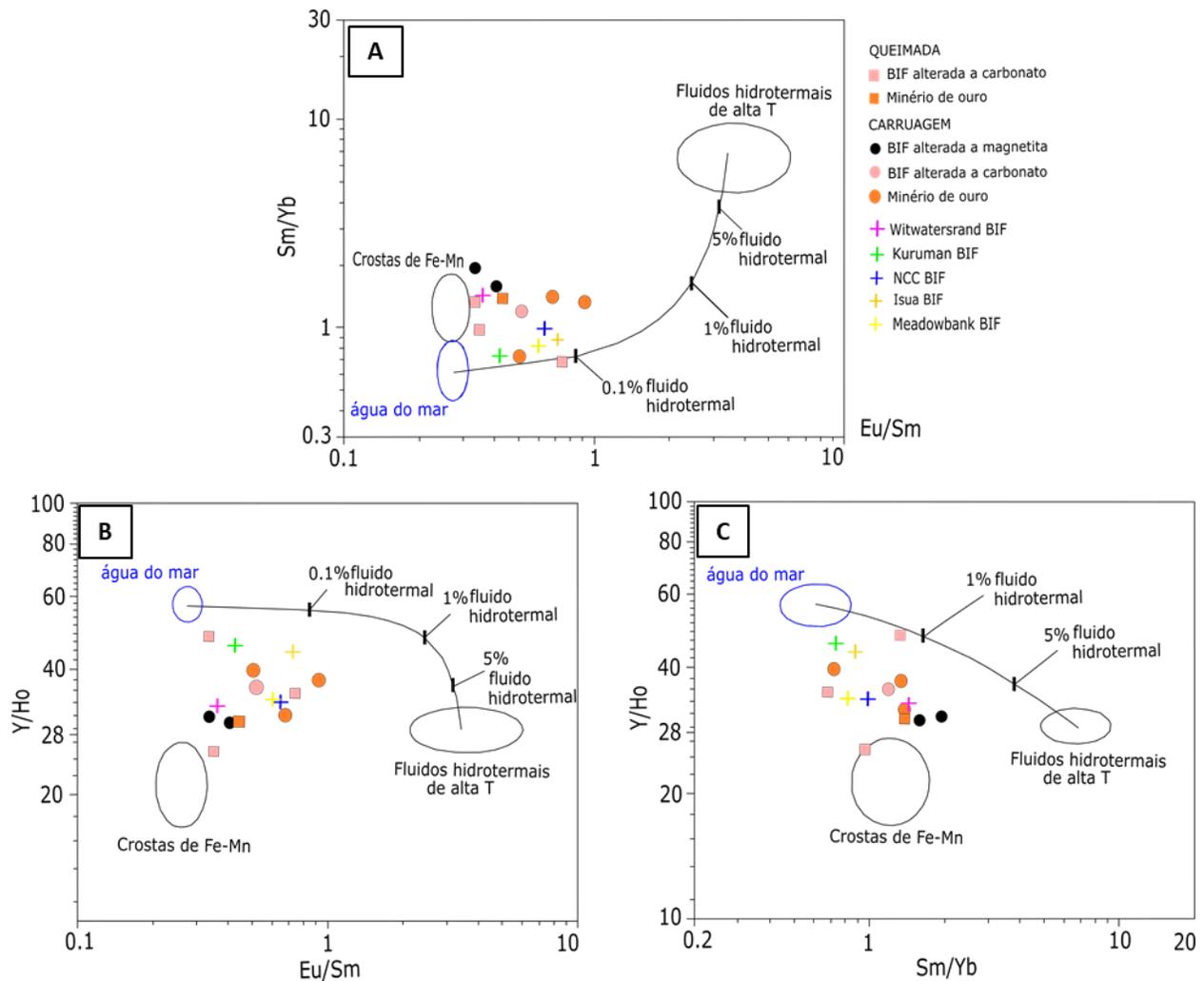


Figura 27 – Diagramas propostos por Alexander et al. (2008) para estimativa da contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta T para deposição de FFB aplicados para as amostras de FFB/chert ferruginoso hidrotermalmente alteradas e amostras de minério: A) Eu/Sm x Sm/Yb; B) Eu/Sm x Y/Ho; C) Sm/Yb x Y/Ho.

A partir dos diagramas conclui-se que a contribuição vulcanogênica de alta temperatura para essas amostras, assim como para as amostras não alteradas, pode ir até 10%, segundo o diagrama de Gourcerol et al., (2016) (Figura 26), ou ser ainda mais restrita, até 0,1%, de acordo com os diagramas Eu/Sm x Sm/Yb e Eu/Sm x Y/Ho de Alexander et al., (2008) (Figura 27A e 27B). Essa última situação representaria uma taxa de mistura entre água marinha e fluido hidrotermal de alta temperatura de 1000:1 (Klein and Beukes, 1989; Khan et al., 1996; Alexander et al., 2008).

A semelhança entre o comportamento geoquímico das amostras alteradas e não alteradas nos diagramas apresentados é mais uma evidência que a alteração hidrotermal pós deposicional,

associada à mineralização aurífera, não afetou a distribuição dos ETR, conforme já demonstrado nos diagramas *spider* normalizados ao PAAS.

### 6.3. Ranking de amostras para contribuição vulcanogênica de alta temperatura segundo a razão Eu/Sm

Considerando a razão Eu/Sm como parâmetro de referência da contribuição vulcanogênica de alta temperatura (Gourcerol et al., 2016; Alexander et al., 2008) (*Figura 26, Figura 27A e 27B*), apresenta-se um ranking de Eu/Sm (*Tabela 9*) para todas as amostras estudadas, onde quanto maior o valor da razão, maior é a contribuição hidrotermal vulcanogênica. O objetivo de se realizar essa correlação entre a contribuição vulcanogênica de cada amostra é a tentativa de se determinar entre os corpos de FFB (representados pelos corpos de minério: Carruagem, Queimada, Arco da Velha e Cabeça de Pedra) aqueles considerados mais próximos e aqueles mais distantes das fontes exalativas hidrotermais da bacia.

Tabela 9 – Ranking de amostras considerando a razão Eu/Sm como parâmetro para determinação da contribuição hidrotermal vulcanogênica de alta T relativa entre amostras de FFB/chert ferruginoso alteradas e não alteradas.

Amostra	Litotipo	Corpo de minério	Eu/Sm
LAM03QM	Chert ferruginoso	Queimada	0,26
07CRN6.1C	FFB	Carruagem	0,26
06AVN2LE	FFB	Arco da Velha	0,29
17QN0400	FFB	Queimada	0,30
48CR0160	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	0,33
LAM02CR	FFB	Carruagem	0,33
33QM1184	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	0,33
47QM1235	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	0,35
LAM01CR	FFB	Carruagem	0,35
02CR2737	FFB	Carruagem	0,39
08CRN8.1	FFB	Carruagem	0,40
01CR2726	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	0,41
44QM1234	FFB	Queimada	0,42
02QN03LE	FFB	Queimada	0,43
41QM1228	Minério	Queimada	0,43
01QN03LE	FFB	Queimada	0,47
06CR2765	Minério	Carruagem	0,50
07CR2767	FFB hidrotermalmente alterada	Carruagem	0,51
13AVN0201	Chert ferruginoso	Arco da Velha	0,56
17QN0402	FFB	Queimada	0,61
LAM18CR	FFB	Carruagem	0,65
05CR2760	Minério	Carruagem	0,68
04CRN6.1B	FFB	Carruagem	0,73
50QM1227	FFB hidrotermalmente alterada	Queimada	0,74
LAM05QM	Chert ferruginoso	Queimada	0,89
49CR0168	Minério	Carruagem	0,92



**Aumento da  
contribuição  
hidrotermal  
vulcanogênica de  
alta T**

A partir da *Tabela 9* é evidente que não há uma distinção clara entre as posições de precipitação/formação da FFB/*chert* ferruginoso, uma vez que os valores de Eu/Sm encontram-se distribuídos aleatoriamente, tanto em relação aos corpos de minério, quanto em relação às profundidades, e também em relação aos tipos de amostras consideradas (FFB, *chert* ferruginoso, FFB alterada e minério).

A situação descrita indica que a posição da fonte exalativa não apresenta uma proximidade ou distanciamento maior/menor em relação a um corpo de FFB em específico. Dessa maneira, o material oriundo das fontes exalativas provavelmente se espalhava pelo ambiente marinho a partir da mistura com os componentes hidrôgenos, se precipitando em porções distintas da bacia, a depender de condições específicas de concentração/saturação/oxirredução.

## 7. CONCLUSÕES

Estudos petrográficos e geoquímicos realizados no depósito aurífero Lamego (*Figura 8*), inserido no contexto do *greenstone belt* Arqueano Rio das Velhas (*Figura 5*), detalham as características das FFB/*chert* ferruginosos, assim como das rochas vulcânicas da base da sequência estratigráfica do depósito. As conclusões são apresentadas a seguir:

- (i) Estudos petrográficos indicam que a FFB e o *chert* ferruginoso com características primárias preservadas são essencialmente sideríticos, com contribuição ankerítica (*Figura 15 e Figura 16*). Devido à dominância dessas fases carbonáticas, não foram descritas variações mineralógicas e geoquímicas que pudessem influenciar diretamente na mineralização aurífera.
- (ii) Estudos geoquímicos mostram que as assinaturas de ETR + Y das FFB/*chert* ferruginosos se mantêm preservados mesmo após eventos metamórficos, hidrotermais e deformacionais que se sobrepuseram às rochas do *greenstone belt* Rio das Velhas (*Figure 9*). O diagrama de ETR + Y normalizado ao PAAS apresenta características que denotam precipitação em ambiente marinho, sob a influência de fluidos hidrotermais vulcanogênicos de alta temperatura e contribuição detrítica. Um espaçamento lateral significativo em relação à fonte vulcanogênica é proposto uma vez que a contribuição hidrotermal de alta temperatura varia de 0 – 10% (*Figure 12*), podendo ser ainda mais restrita,  $\leq 0,1\%$  (*Figure 13*).

- (iii) Não foi constatada uma distinção entre as posições de precipitação das FFB/*chert* ferruginosos dentro da bacia. Dessa maneira não se pode determinar uma posição de maior/menor proximidade/distanciamento de um corpo de minério específico em relação às fontes hidrotermais vulcanogênicas (Tabela 9).
- (iv) As rochas vulcânicas de Lamego são classificadas com basaltos a basaltos andesíticos/andesitos cálcio-alcálicos, com características geoquímicas típicas de basaltos de arco continental (*Figure 10**Figure 11**Figure 14*). Os dados apresentados contrastam com estudos previamente apresentados que descrevem as rochas vulcânicas máficas do *greenstone belt* Rio das Velhas como tholeiitos e tholeiitos magnesianos (Zucchetti, 1998; Verma et al., 2017).
- (v) As características geoquímicas e petrográficas das FFB/*chert* ferruginosos, rochas vulcânicas e pelito carbonoso indicam um provável contexto geotectônico relacionado a um ambiente de fundo marinho, sob a influência do arco continental, associado ao evento Rio das Velhas II (2800 – 2760 Ma), proposto por Lana et al. (2013) (*Figure 15*).
- (vi) A similaridade entre as rochas vulcânicas basais dos depósitos Cuiabá e Lamego pode ter ainda implicações metalogenéticas para Lamego, uma vez que em Cuiabá diversos corpos auríferos são encontrados em veios quartzo-carbonáticos associados a zonas de cisalhamento que cortam essas rochas (VQZ, Serrotinho Footwall, Grande Grande Footwall) (Vitorino, 2017).
- (vii) A correlação entre as rochas de Lamego e o evento Rio das Velhas (II) (Lana et al., 2013) contribui para ampliar o horizonte exploratório no *greenstone belt* Rio das Velhas. O evento hidrotermal responsável pela mineralização aurífera teve um caráter fortemente hidrotermal e afetou rochas de diferentes fases evolutivas do *greenstone*.

## 8. REFERÊNCIAS

- Alibo, D. S., Nozaki, Y. 1999. Rare earth elements in seawater: Particle association, shale-normalization, and Ce oxidation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 363 – 372.
- Alkmim, F. F., Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29 – 58.
- Alkmin, F. F., Martins-Neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33: 127 – 139.
- Alkmin, F. F., Noce, C. M. 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. In: Alkmin, F. F., Noce, C. M. (Editors), *International Geoscience Programme (IGCP) 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Field Guide & Abstracts*: 114 p.
- Almeida, F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349 – 364.
- Alexander, B. W., Bau M., Anderson, P., Dulski, P. 2008. Continentally-derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 378 - 394.
- Araújo, J. C. S. 2018. Modelo deposicional das formações ferríferas bandadas hospedeiras de ouro no greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, com base em geoquímica e análise in situ de magnetita por ablação a laser via ICP-MS. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais: 182 p.
- Araújo, J. C. S., Lobato, L. M. 2019. Depositional model for banded iron formation host to gold in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Brazil, based on geochemistry and LA-ICP-MS magnetite analyses. *Journal of South American Earth Sciences* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.021>
- Baars, F. J. 1997. The São Francisco craton. In Wit, M. J. and Ashwal, L. D. eds. *Greenstone Belts: Oxford Monogr on Geol and Geophys*, Claredon Press, Oxford, 35: 529 – 557.
- Babinski, M., Chemale, F., Van Schmus, W. R. 1995. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research*, 72: 235 – 245.

- Baltazar, O. F., Zucchetti, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32: 471 – 499.
- Barbosa, A., L., M. 1968. Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. In: Conferência proferida pela Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo de Minas Gerais, Belo Horizonte. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto: 63p.
- Barrett, T. J., Fralick, P. W., Jarvis, I. 1988. Rare-earth-element geochemistry of some Archean iron formations north of Lake Superior, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25: 570 – 580.
- Bau, M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93: 219 – 230.
- Bau, M. 1993. Effects of syn- and post-depositional processes on the rare-earth element distribution in Precambrian iron-formations. *European Journal of Mineralogy*, 5: 257 – 268.
- Bau, M. 1999. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 67 – 77.
- Bau, M., Dulski, P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79: 37 – 55.
- Bau, M., Dulski, P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155: 77 – 90.
- Bau, M., Höhndorf, A., Dulski, P., Beukes, N. J. 1997. Sources of Rare-Earth Elements and Iron in Paleoproterozoic Iron-Formations from the Transvaal Supergroup, South Africa: Evidence from Neodymium Isotopes. *The Journal of Geology*, 105: 121 – 129.
- Bekker, A., Slack, J. F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K. O., Rouxel, O. J. 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105: 467 – 508.
- Beukes, N., Gutzmer, J. 2008. Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archean-Paleoproterozoic boundary. *Society of Economic Geologists Reviews*, 15: 5 – 47.

- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181 - 183.
- Bolhar, R., Kamber, B. S., Moorbath, S., Fedo, C. M., and Whitehouse, M. J. 2004. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 43 – 60.
- Bolhar, R., Van Kranendonk, M. J., Kamber, B. S. 2005. A trace element study of siderite-jasper banded iron formation in the 3.45 Ga Warrawoona Group, Pilbara Craton - Formation from hydrothermal fluids and shallow seawater. *Precambrian Research*, 137: 93 – 114.
- Boström, K. 1970. Submarine volcanism as a source for iron. *Earth and Planetary Science Letters*, 9: 348 – 354.
- Chemale Jr., F., Rosiere, C. A., Endo, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 65: 25 – 54.
- Condie, K. 1976. Trace element geochemistry of Archean greenstone belts. *Earth Science Reviews*, 12: 393 - 417.
- Condie, K. 1981. Archean greenstone belts. Amsterdam, Elsevier: 434p.
- Dorr II, J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Geological Survey Professional Paper: 110p.
- Dorr II, J. V. N., Pomerene, J. E., Rynearson, G. A. 1957. In: Mineral DNPM (Ed.), Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral, Minas Gerais: 81p.
- Eriksson, K. A., Krapez, B., Fralick, P. W. 1994. Sedimentology of archean greenstone belts: Signatures of tectonic evolution. *Earth Science Reviews*, 37: 1 – 88.
- Farina, F., Albert, C., Lana, C. 2015. The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). *Precambrian Research*, 266: 375 – 394.

- Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippertt, J. P., Cutts, K., Alkmim, F. F., Lana, C. 2016. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 68: 4 – 21.
- Fernandes, R. C., Endo, I., Pereira, R. M. P., Rivarola, I., Souza, J. C. 2016. Geologia e evolução estrutural do depósito aurífero Cuiabá: novas perspectivas para exploração mineral. In: VII SIMEXMIN (Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral), Ouro Preto. Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB).
- Frei, R., Polat, A. 2007. Source heterogeneity for the major components of 3.7 Ga Banded Iron Formations (Isua Greenstone Belt, Western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation. *Earth and Planetary Science Letters*: 253, 266 – 281.
- Gair, J.E. 1962. Geology and ore deposit of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey, Professional Paper, 341-A: 67 p.
- Gourcerol, B., Thurston, P. C., Kontak, D. J., Côté-Mantha, O., Biczok, J. 2016. Depositional setting of Algoma-type banded iron formation. *Precambrian Research*, 281: 47 – 79.
- Gourcerol, B., Thurston, P. C., Kontak, D. J., O., Côte-Mantha, Biczok, J. 2015. Distinguishing primary and mineralization-related signatures of chert from the banded iron-formation-hosted gold deposits at Musselwhite, Ontario and Meadowbank, Nunavut. Geological Survey of Canada, Current Research 2015-1, 21p. doi:10.4095/295531.
- Gross, G. A. 1980. On Classification of Iron Formations based on Depositional Environments: *Canadian Mineralogist*, 18: 215 – 222.
- Hartmann, L. A., Endo, I., Suita, M. T. F., Santos, J. O. S., Frantz, J. C., Carneiro, M. A., McNaughton, N. J., Barley, M. E. 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, 20: 273 –285.
- Hasui, L. A. 2010. A grande colisão Pré-Cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. *Geociências UNESP*, 29: 141 – 169.
- Heimann, A., Johnson, C. M., Beard, B. L., Valley, J. W., Roden, E. E., Spicuzza, M. J., Beukes, N. J. 2010. Fe, C, and O isotope compositions of banded iron formation carbonates demonstrate a major

role for dissimilatory iron reduction in ~2.5 Ga marine environments. *Earth and Planetary Science Letters*, 294: 8 – 18.

Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E., Roberts, D. 2012. Geochemistry of Amphibolite-Facies Volcanics and Gabbros of the Støren Nappe in Extensions West and Southwest of Trondheim, Western Gneiss Region, Norway: A Key to Correlations and Paleotectonic Settings. *American Journal of Science*, 312: 357 – 416.

James, H. L. 1954. Sedimentary facies of iron-formation: *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 49: 235 – 293.

Junqueira, P. A., Lobato, L. M., Ladeira, E. D., 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.

Kalliomaki, H., Wagner, T., Fusswinkel, T., Schultze, D. 2019. Textural evolution and trace element chemistry of hydrothermal calcites from Archean gold deposits in the Hattu schist belt, eastern Finland: Indicators of the ore-forming environment. *Ore Geology Reviews*, 112: 103006.

Kamber, B. S., Greig, A., Collerson, K. D. 2005. A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 1041 – 1058.

Khan, R. M. K., Das Sharma S., Patil, D. J., Naqvi, S. M. 1996. Trace, rare-earth element, and oxygen isotopic systematics for the genesis of banded iron-formations: evidence from the Kushtagi schist belt, Archean Dhaewar Craton, India. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 60, 3285 – 3294.

Klein, C., Beukes, N. J. 1989. Geochemistry and sedimentology of a facies transition from limestone to iron-formation deposition in the Early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Economic Geology*, 84: 1733 – 1744.

Klein, C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, 90: 1473–1499.

Koglin, N., Zeh, A., Cabral, A. R., Gomes, A. A. S., Neto, A. V. C., Brunetto, W. J., Galbiatti, H. 2014. Depositional age and sediment source of the auriferous Moeda Formation, Quadrilátero

- Ferrífero of Minas Gerais, Brazil: New constraints from U-Pb-Hf isotopes in zircon and xenotime. *Precambrian Research*, 255: 96–108.
- Konhauser, K. O., Planavsky, N. J., Hardisty, D. S., Robbins, L. J., Warchola, T. J., Haugaard, R., Lalonde, S. V., Partin, C. A., Oonk, P. B. H., Tsikos, H., Lyons, T. W., Bekker, A., Johnson, C. M. 2017. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth-Science Reviews*, 172: 140–177.
- Kresse, C., Lobato, L. M., Hagemann, S., Figueiredo e Silva, R. C., 2018. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: Implications for the hydrothermal fluid evolution, *Ore Geol. Rev.*, 98: 1 – 27.
- Ladeira, E. A. 1988. Metalogenia dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In Schobenhauer, C., Coelho, C. E. S. eds. *Principais depósitos minerais do Brasil. Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio*, p. 301–375.
- Lana, C., Alkmim, F. F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H. A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 231: 157–173.
- Lawrence, M. G., Kamber, B. S. 2006. The behaviour of the rare earth elements during estuarine mixing-revisited. *Marine Chemistry*, 100: 147–161.
- Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C., Vieira, F. W. R. 2001a. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, 36: 249–277.
- Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C., Costa, M. N. S., Martins, R., Lehne, E., Alves, J. V., Tassinari, C. C. G., Vieira, F. W. R., Biasi, E. E., Silve, R. C. F. E., Pereira, V. C. A., Noce, C. M. 2001b. Geologia do depósito de ouro Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais., in Jost, H., Brod, J. A., de Queiroz, E. T. eds., *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB), p. 3–77.
- Lobato, L. M., Baltazar, O. F., Reis, L. B., Achtschin, A. B.; Baars, F. J., Timbó, M. A., Berni, G. V, Mendonça, B. R. V. de, Ferreira, D. V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração

e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM.

Lobato, L. M., Santos, J. O. S., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., Noce, C. M. 2007. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews* 32: 674–680.

Lobato, L.M., Renger, F.E., Silva, R.C.F., Rosiere, C.A., Baars, F.J., Rolin, V.K. 2014. Metalogênese do setor meridional do Cráton São Francisco, in: Silva, M.G., Neto, M.B.R., Jost, H., Kuyumjian, R.M. (Eds.), *Metalogênese Das Províncias Tectônicas Brasileiras*. Belo Horizonte, p. 119–140.

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

Machado, N., Carneiro, M. A. 1992. U-Pb evidence of Late Archean tectonothermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Can. J. Earth Sci*, 29: 2341 – 2346.

Machado, N., Noce, C. M., Ladeira, E. A., Belo de Oliveira, O. A. 1992. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of American Bulletin*, 104: 1221-1227.

Machado, N., Schrank, A., Noce, C. M., Gauthier, G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean – Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 259 - 276.

Martins, B S. 2011. *Controle da Mineralização Aurífera de Lamego, Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 250p. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

Martins, B. S., Lobato, L. M., Rosière, C. A., Hagemann, S. G., Santos, J. O. S., Villanova, F. L. dos S. P., Figueiredo e Silva, R. C., Ávila Lemos, L. H. 2016. The Archean BIF-hosted Lamego gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero: Evidence for Cambrian structural modification of an Archean orogenic gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 72: 963–988.

Martins, P. L. G., Toledo, C., L., B., Silva, A. M., Chemale Jr., F., Santos, J., O. S., Assis, L. M. 2017. Neoproterozoic Magmatism in the Southern Amazonia Craton, Brazil: Petrography, Geochemistry

and Tectonic Significance of Basalts from the Carajás Basin. *Precambrian Research*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.013>.

McLennan, S. B. 1989. Rare Earth elements in sedimentary rocks. Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B. R., MCKay, G. A. (eds.) *Geochemistry and Mineralogy of the Rare Earth Elements*. Mineralogical Society of America, Washington, 169 -200.

McLennan, S., M., Hemming, S., McDaniel, D. K., Hanson, G. N. 1993. Geochemical approaches to sedimentations, provenance and tectonics. In: Johsson, M. J., Basu, A. (eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America, Special Paper: 284, 21 – 40.

Morales, M. J., Figueiredo e Silva, R. C., Lobato, L. M., Gomes, S. D., Gomes, C. C. C. O., Banks, D. A. 2016. Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted Lamego gold mineralization: Microthermometric and LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 72: 510–531.

Moon, Inkyeong, Lee, I., Yang, X. 2017. Geochemical constraints on the genesis of the Algoma-type banded iron formation (BIF in Yishui County, western Shandong Province, North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 89: 931 – 945.

Moreira, H., Lana, C., Nalini, H. A. 2016. The detrital zircon record of an Archean convergent basin in the Southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 275: 84-99.

Muhling, J. R., Rasmussen, B. 2020. Widespread deposition of greenalite to form Banded Iron Formations before Great Oxidation Event. *Precambrian Research*, 339: 105619.

Noce C.M., Teixeira W., M. N. 1997. Geoquímica dos gnaisses TTGs e granitóides neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 27: 25–32.

Noce, C. M., Zuccheti, M., Baltazar, O. F., Armstrong, R., Dantas, E., Renger, F. E., Lobato, L. M. 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoproterozoic Rio das Velhas Greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): U-Pb zircon dating of volcanoclastic graywackes. *Precambrian Research*, 141: 67–82.

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 Wisconsin. Wisconsin: 106 p.

- Padgham, W.A., Fyson, W. K. 1992. The Slave Province? A distinct Archean craton. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29: 2072 – 2086.
- Palme, H., O'Neill, H. 2014. Cosmochemical Estimates of Mantle Composition, in *Treatise on Geochemistry*, Elsevier Ltd., 2ed: 1 – 39.
- Pearce, J. A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams in trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, p. 79 – 113.
- Pearce, J. 2008. Geochemical Fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100: 14 – 48.
- Pearce, J. 2014. Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. *Elements*, 10: 101 – 108.
- Peate, D. W., Pearce, J. A., Hawkesworth, C. J., Colley, H., Edwards, C. M. H., Hirso, K. 1997. Geochemical variations in Vanuatu arc lavas: The role of subducted material and a variable mantle wedge composition. *Journal of Petrology*, 38: 1331 – 1358.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Alkmim, F. F., Silva, L. C., Babinski, M., Cordani, U. G., Castañeda, C. 2007. Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, 15: 1 – 16.
- Planavsky, N., Bekker, A., Rouxel, O. J., Kamber, B., Hofmann, A., Knudsen, A., Lyons, T. W. 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 6387 – 6405.
- Ribeiro-Rodrigues, L. C., de Oliveira, C. G., Friedrich, G. 2007. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32: 543 – 570.
- Robert, F., Poulsen, K. H., Cassidy, K., F., Hodgson, C. J. 2005. Gold Metallogeny of the Superior and Yilgarn Cratons. *One Hundredth Anniversary Volume*, Jeffrey W. Hedenquist, John F. H. Thompson, Richard J. Goldfarb, Jeremy P. Richards. *Society of Economic Geology*, 1001 – 1033.
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F. F., Stevens, G., Armstrong, R. 2013 Stabilization of the southern portion of the São Francisco craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224: 143 – 159.

- Rosière, C. A., Spier, C. A., Rios, F. J., Suckau, V. E. 2008. The itabirites from the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade ores: an overview. *Economic Geology*, 15: 223 - 254.
- Ross, P. S., Bédard, J. H. 2009. Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46: 823 – 839.
- Sales, M. A. dos S. 1998. The Geological Setting of the Lamego Banded Iron-Formation-Hosted Gold Deposit, Quadrilátero Ferrífero District, Minas Gerais - Brazil. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciências Geológicas, Queen's University, Ontario, Canada: 262p.
- Schorscher, H. D. 1978. Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. 30th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Recife, 292 – 293.
- Schorscher, H.D. 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 51: 767 – 768.
- Silva, C. M. G. 2006. Aplicação de isótopos radiogênicos na mineralização de ouro da mina Cuiabá. greenstone belt Rio das Velhas (MG). 175p. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Smithies, R. H., Ivanic, T. J., Lowrey, J. R., Morris, P. A., Barnes, S. J., Wyche, S., Lu, Y. J. 2018. Two distinct origins for Archean greenstone belts. *Earth Planetary Science Letters*, 487: 106 – 116.
- Soares, M. B., Neto, A. V. C., Silva, W. F. 2020. The development of a Meso- to Neoproterozoic rifting-convergence-collision-collapse cycle over an ancient thickened protocontinent in the South São Francisco craton, Brazil. *Gondwana Research*, 77: 40 – 66.
- Sugitani, K., Yamamoto K., Adachi, M., Kawabe, I., Sugisaki, R. 1998. Archean cherts derived from chemical, biogenic and clastic sedimentation in a shallow restricted basin: examples from the Gorge Creek Group in the Pilbara Block. *Sedimentology*, 45: 1045 – 1062.
- Sun, S. S., McDonough, W. F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J. (Eds), *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345.

- Szilas, K. 2018. A geochemical overview of mid-archaeon metavolcanic rocks from Southwest Greenland: *Geosciences*, 8: 0266.
- Teixeira, W., Ávila, C. A., Dussin, I. A., Corrêa Neto, A. V., Bongiolo, E. M., Santos, J. O., Barbosa, N. S. 2015. A juvenile accretion episode (2.35-2.32Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research*, 256: 148 – 169.
- Thurston, P. C., Kamber, B. S., Whitehouse, M. 2012. Archean cherts in banded iron formation: Insight into Neoproterozoic ocean chemistry and depositional processes. *Precambrian Research*, 214–215: 227 – 257.
- Verma, S. K., Oliveira, E. P., Silva, P. M., Moreno, J. A., Amaral, W. S. 2017. Geochemistry of komatiites and basalts from the Rio das Velhas and Pitangui greenstone belts, São Francisco Craton, Brazil: Implications for the origin, evolution, and tectonic setting. *Lithos*, 284–285: 560 – 577.
- Viehmann, S., Bau, M., Hoffmann, J. E., Munker, C. 2015. Geochemistry of the Krivoy Rog Banded Iron Formation, Ukraine, and the impact of peak episodes of increased global magmatic activity on the trace element composition of Precambrian seawater. *Precambrian Research*, 270: 165 – 180.
- Vieira, F. W. R. 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In Ladeira, E. A., ed., *Brazil Gold'91*: Balkema, Rotterdam - Netherlands, p. 319 - 325.
- Villanova, F. L. S. P. 2011. Mapeamento Geológico em escala 1:5.000 da superfície e região circunvizinha da mina Lamego, Sabará, Minas Gerais. Trabalho Geológico de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais: 80p.
- Vitorino, A. L. A. 2017. Mineralização aurífera associado aos veios quartzo-carbonáticos hospedado na unidade máfica basal da jazida Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais: 98p.
- Winter, J. D. 2010. *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall. 702p.

Wyman, D. A. [editor], Bailes, A. H., Christiansen, E. H., Galley, A. G., Jenner, G. A., Keith, J. D., Kerrich, R., Lentz, D. R., Leshner, C. M., Lucas, S. B., Ludden, J. N., Pearce, J. A., Peloquin, S. A., Stern, R. A. 1996. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Short Course Notes, Geological Association of Canada, 12: 402p.

Zucchetti, M. 1998. Geoquímica dos Metabasaltos do Grupo Nova Lima, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 97p. Universidade Federal de Minas Gerais: 97p. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

Zucchetti, M., Baltazar, O. F., Raposo, F. O. 1998. Estratigrafia, in Companhia de Pesquisa Mineral de Recursos Minerais. Projeto Rio das Velhas - texto explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000: Belo Horizonte, Brazil, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) / Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil (CPRM), p. 13–41.

Zucchetti, M., Lobato, L.M, Baars, F.J. 2000a. Genetically diverse basalt geochemical signatures developed in the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira Geociências, SBG*, 30(1,2,3): 393-398.

Zucchetti, M., Lobato, L. M., Baltazar, O. F. 2000b. Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environments, Rio das Velhas Greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, MG - Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 388–392.

**ANEXOS****ANEXOS****I – FICHAS DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA****II – COLLAR DOS FUROS AMOSTRADOS****III – COORDENADAS DAS AMOSTRAS COLETADAS**

## I - FICHAS DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

## Amostra 01QN03LE



Descrição macro: Rocha bandada com intercalações sucessivas de bandas claras e bandas cinza escuras. O bandamento é milimétrico a submilimétrico, definindo uma espécie de laminação na rocha. Cristais de pirita de granulação fina ocorrem dispersos na matriz ou associados a venulação. Em direção à borda superior (imagem) ocorre banda cinza escura pouco mais espessa, aparentemente cortada por venulações.

## Mineralogia

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	40%	Pirita	1%
Quartzo	53%		
Muscovita	1%	Outros	
		Matéria carbonosa:	5%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha bandada de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, localmente granolepdoblástica definida pela orientação de cristais de carbonato estirados e deformados. O bandamento é definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem exclusivamente nas bandas carbonáticas, predominantemente de maneira restrita, localmente ocorrendo em maior quantidade. Esses filmes carbonosos, em porções localizadas, envolvem cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa em padrão aproximadamente anastomosado.

Quartzo: granulação predominantemente fina, porém em uma das extremidades da lâmina parece ocorrer gradação para bandas com granulação mais grossa. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: Ocorrem de três formas: (i) carbonato de granulação extremamente fina, anédrico, aspecto “sujo”, terroso, sendo difícil a distinção entre cristais – parece compor a matriz da rocha e ocorre tanto nas bandas ricas em carbonato, quanto nas bandas ricas em quartzo; (ii) carbonato de granulação pouco mais grossa, anédricos a euédricos, aspecto pouco mais “limpo” em relação ao (i). Ocorrem também nas duas bandas (quartzosas e carbonáticas). Em algumas bandas carbonáticas esses representam o carbonato principal; (iii) Carbonatos de granulação mais grossa do que (i) e (ii) associados a venulações discordantes ao bandamento, localmente dobrados. Formam agregados de cristais de aspecto “sujo”.

Muscovita fina (sericita) ocorrem muito localmente e com granulação fina, geralmente com hábito placóide e cristais subédricos a anédricos. Estão comumente associados às bordas dos carbonatos de granulação grossa, ou entremeados em pequenos espaços entre os grãos de quartzo.

Minerais opacos são descritos como pirita que ocorrem como cristais de granulação fina, anédricos, geralmente dispostos segundo o bandamento e/ou formando algo parecido a lâminas também dispostas de maneira concordante ao bandamento. Cristal de pirita euédrico de tamanho 1 mm ocorre isoladamente e se destaca considerando a granulação fina da rocha.

**Interpretação:** Apesar de apresentar feições e estruturas que remetem a deformação e hidrotermalismo, ainda é possível reconhecer o predomínio de suas feições originais, principalmente o bandamento definido pelas bandas quartzo-carbonáticas de granulação fina. As feições hidrotermais estão relacionadas à ocorrência de sulfetos, principalmente pirita, e também aos carbonatos de granulação pouco mais grossa, associados tanto às bandas quanto às venulações. Há de se fazer ainda distinção entre o carbonato hidrotermal e o carbonato possivelmente relacionado a recristalização.

### Fotomicrografias

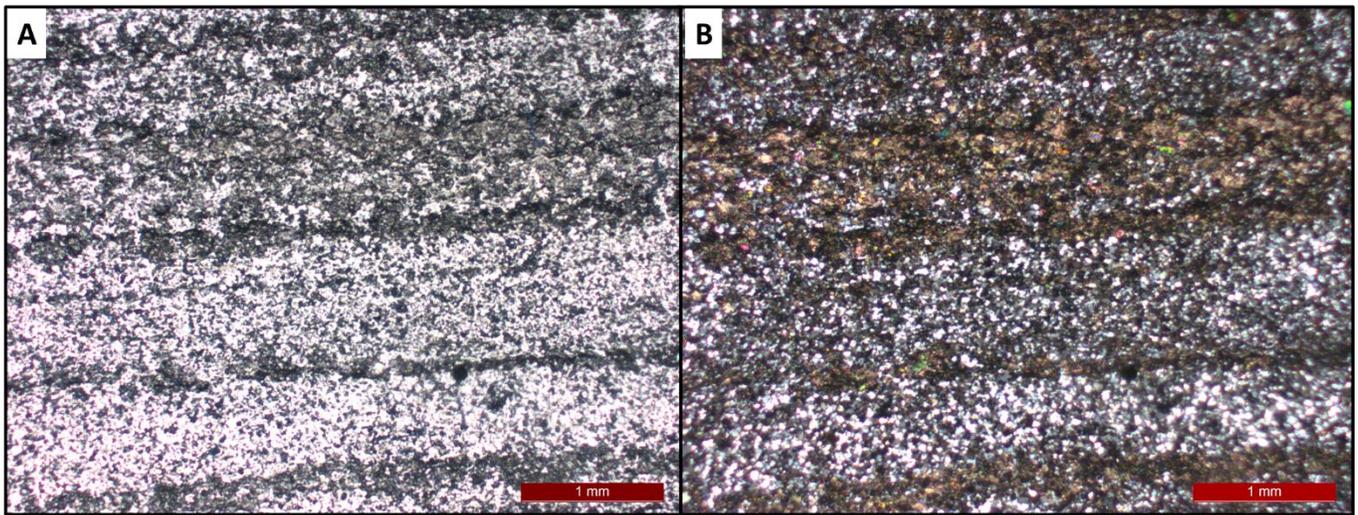


Figura 28: A) Bandamento definido pelas lâminas carbonáticas (sideríticas/ankeríticas) e quartzosas. Níveis delgados de matéria carbonosa (faixas opacas) dispostos concordantes ao bandamento nas bandas carbonáticas (LT/NP); B) LT/NC.

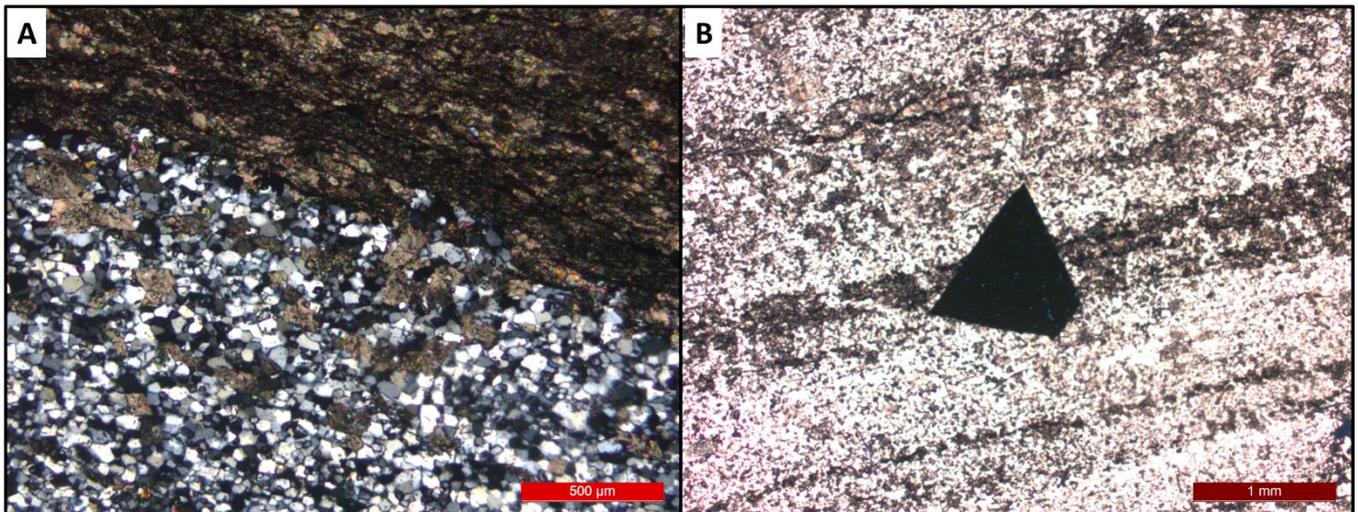


Figura 29: A) Zoom no contato entre bandas carbonática e quartzosa. Banda carbonática com predominância de cristais anédricos a subédricos, aspecto terroso e com intercalação de matéria carbonosa, concordante ao bandamento. Banda quartzosa com ocorrência de

*cristais de carbonato de aspecto “mais limpo”, subédricos a euédricos, entremeados à matriz (LT/NC); B) Cristal de pirita, euédrico, milimétrico, sobrecrecido à banda carbonática (LT/NP).*

### Amostra 02QN03LE



**Descrição macro:** Rocha com bandamento/laminação milimétrica a submilimétrica, definida pela intercalação sucessiva de níveis bege claro e níveis cinza escuro. Possível identificar algumas venulações perpendiculares ao bandamento e raros cristais euédricos de pirita.

### Mineralogia

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	34%	Pirita	<=1%
Quartzo	65%		
		Outros	
		Matéria carbonosa	<=1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

### Descrição Microscópica

Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento/laminação definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, aparentando predomínio das bandas quartzosas. Minerais opacos são finos e ocorrem dispersos, em quantidade praticamente desprezível.

Na porção central da lâmina ocorre um domínio quartzo-carbonático de mesma granulação da rocha, mas onde esses minerais ocorrem em proporções aparentemente similares, sem definir claramente, porém, um bandamento/laminação.

Venulações perpendiculares a oblíquas ao bandamento ocorrem localmente com extensão variada. A granulação dessas venulações é pouco maior que a da rocha e são compostas essencialmente por quartzo.

Filmes de matéria carbonosa ocorrem muito localmente, sendo praticamente desprezíveis.

Quartzo: granulação predominantemente fina e textura granoblástica. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Dispersos nas bandas carbonáticas ou concentrados em algumas bandas, principalmente nas extremidades da lâmina, ocorrem cristais geralmente anédricos e mais grossos do que os da matriz. Nesses cristais é possível observar cores de interferência elevadas em nicóis cruzados, com aparência pouco mais “limpa” do que os cristais finos da matriz.

Pirita: ocorre como mineral acessório. São cristais de granulação fina, anédricos a euédricos, isolados e dispersos pela matriz.

**Interpretação:** Apesar de algumas feições e características indicativas de hidrotermalismo, a rocha apresenta predomínio de suas feições originais, principalmente o bandamento definido pela intercalação de

bandas de granulação fina ricas em quartzo e pobres em carbonato, e bandas ricas em carbonato e pobres em quartzo. Carbonatos de granulação mais grossa podem ser interpretados como hidrotermais ou resultado de recristalização. Em alguns locais, eles parecem ser resultados de recristalização pois “substituem” a massa carbonática fina.

### Fotomicrografias

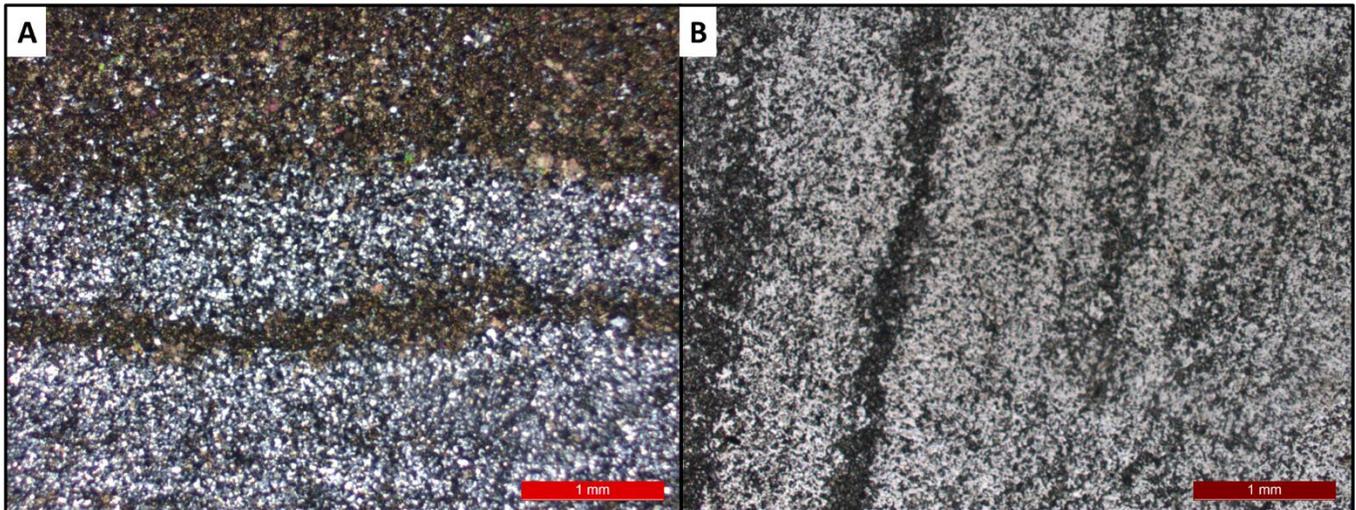


Figura 30: A – Bandamento definido pela intercalação sucessiva de lâminas milimétricas a submilimétricas carbonáticas (sideríticas, com ankerita subordinada) e quartzosas (LT/NC); B - Bandamento definido pela intercalação sucessiva de lâminas milimétricas a submilimétricas carbonáticas (sideríticas, com ankerita subordinada) e quartzosas (LT/NP).

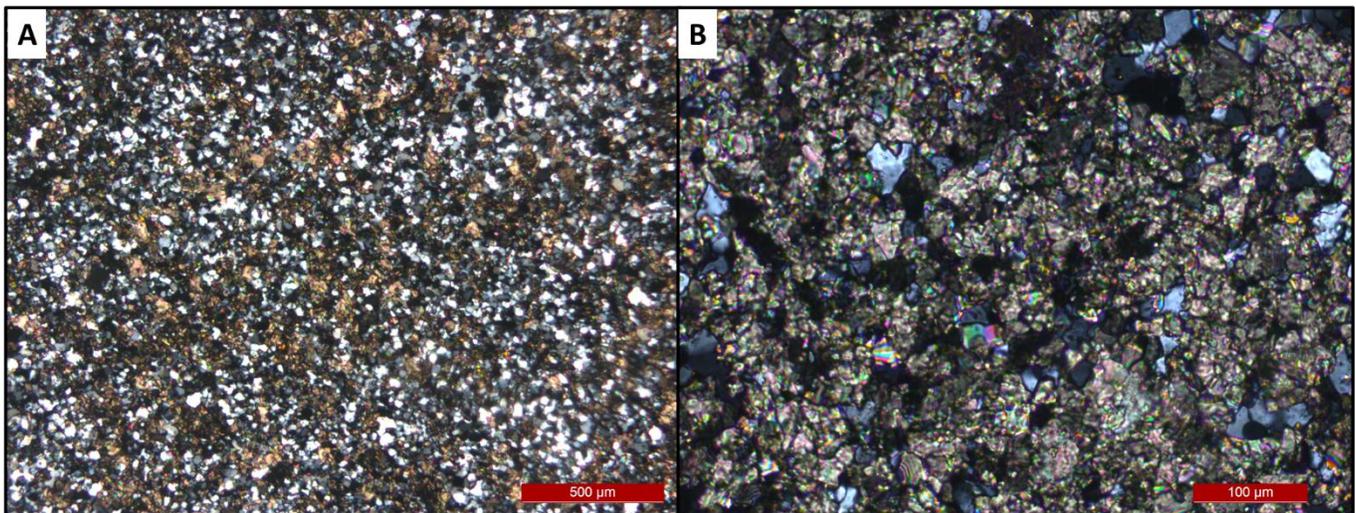


Figura 31: A – Zoom na transição entre banda carbonática e banda quartzosa, com leve predomínio de carbonato (siderita/ankerita) (LT/NC); B – Zoom na banda carbonática (siderítica). Cristais subédricos, textura terrosa e aspecto sujo. Cristais de quartzo dispersos na matriz (LT/NC).

**Amostra 03CR2741**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento milimétrico a submilimétrico (lâminação) caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro e bandas cinza escura.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	40%	Pirita	<=1%
Quartzo	56%		
		Outros	
		Matéria carbonosa:	3%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica**

Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, definindo uma laminação. Bandas (lâminas) quartzosas parecem predominar em relação às carbonáticas. Minerais opacos são identificados principalmente como pirita e ocorrem dispersos, com granulação extremamente fina e em quantidade praticamente desprezível.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem restrita e exclusivamente nas bandas carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina, localmente variando para granulação pouco mais grossa. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Dispersos nas bandas carbonáticas ou concentrados em alguns níveis ocorrem agregados de cristais pouco mais grossos, que podem apresentar aspecto “terroso” ou ter aspecto pouco mais “limpo”.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação das feições originais, considerando mineralogia e bandamento composicional típico das formações ferríferas bandadas. Indício de alteração hidrotermal está relacionado aos cristais de carbonato de granulação pouco mais grosso do que a da matriz da rocha, vênulas isoladas e sulfetos que ocorrem em quantidade praticamente desprezível.

## Fotomicrografias

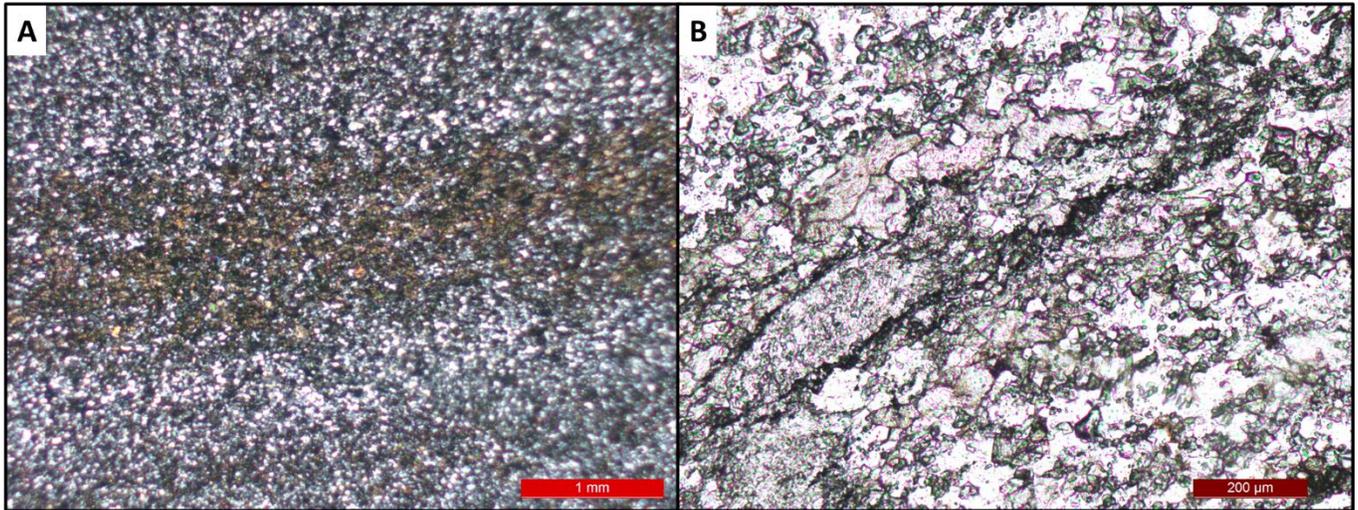


Figura 32: A) Bandamento definido pela intercalação entre lâminas milimétricas de carbonato e quartzo. O carbonato é predominantemente fino e com aspecto terroso dada a presença de inclusões (LT/NC); B) Níveis carbonosos em meio à matriz carbonática (siderítica/ankerítica) (LT/NP).

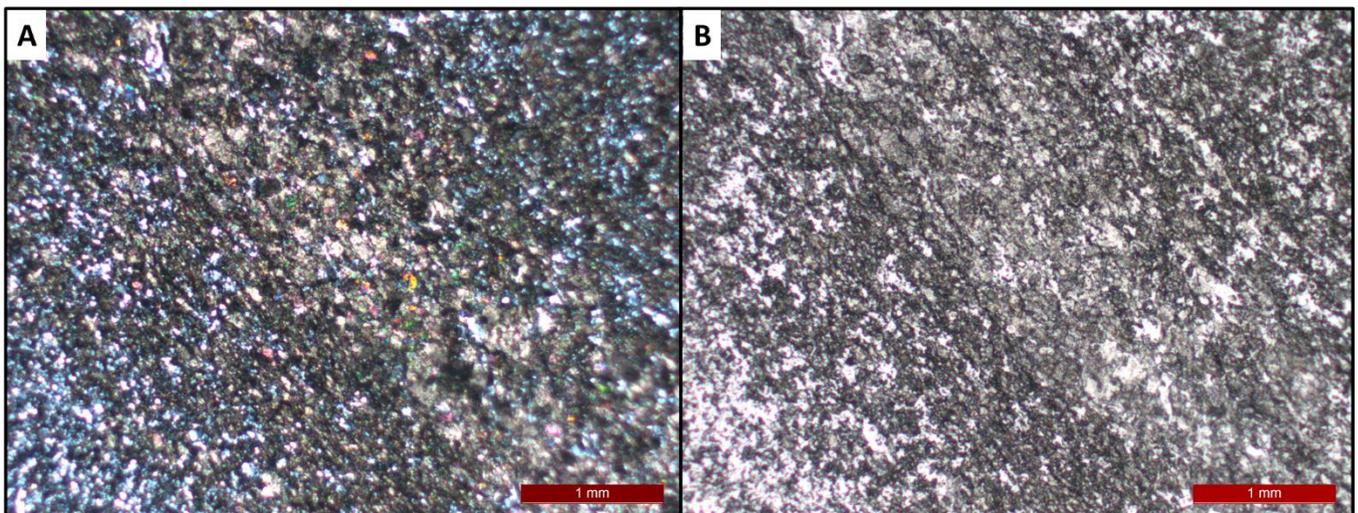
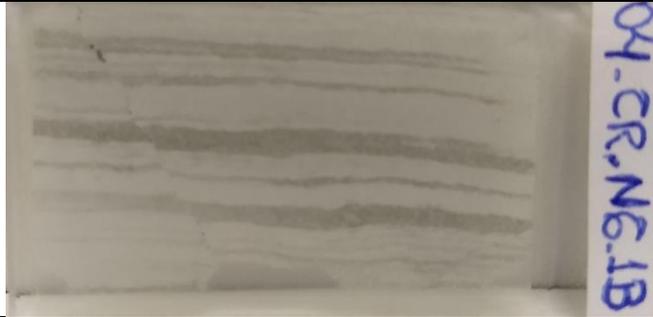


Figura 33: A) Banda carbonática com presença de dois carbonatos distintos (ankerita e siderita): (i) cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados (siderita) (LT/NC); (ii) dispersos nas bandas carbonáticas ou concentrados em alguns níveis ocorrem agregados de cristais pouco mais grossos, que podem apresentar superfície com aspecto mais limpo e liso (ankerita); B) LT/NP.

**Amostra 04CRN6.1B****Descrição macro:**

Rocha com bandamento milimétrico a submilimétrico (lâminas) caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro e bandas cinza escura. Venulação submilimétrica corta o bandamento discordantemente, deslocando as bandas em uma microfalha normal e gerando rejeito submilimétrico. Pelo brilho metálico, há ocorrência de sulfetos finos associados às venulações.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	33%	Pirita	<=1%
Quartzo	65%		
		<b>Outros</b>	
		Matéria carbonosa:	2%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, o que define uma laminação, aparentando leve predomínio das bandas quartzosas. Minerais opacos ocorrem como acessórios e de duas formas: i) associados à venulação oblíqua ao bandamento, quando apresentam granulação fina a média e são subédricos a euédricos; e ii) dispersos na matriz da rocha, com granulação ainda mais fina, subédricos a anédricos.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem restritamente e principalmente associadas às bandas carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Cristais de granulação pouco mais grossa, anédricos a euédricos também ocorrem dispersos pela matriz da rocha, principalmente associados às bandas carbonáticas. Têm aspecto pouco mais “limpo” quando comparados aos cristais de granulação fina da matriz. Alguns cristais de granulação mais grossa também ocorrem muito localmente associados às bordas de venulações.

Pirita: ocorre como mineral acessório e de duas formas: i) cristais associados à venulação oblíqua ao bandamento, quando apresentam granulação fina a média e são subédricos a euédricos. A pirita pode ser lisa a pouco porosa; e ii) dispersos na matriz da rocha, com granulação ainda mais fina, subédricos a anédricos.

Venulações: ocorrem 3 a 4 venulações de tamanho submilimétrico, essencialmente quartzosas, que cortam o bandamento obliquamente. O quartzo tem granulação pouco mais grossa do que a da rocha. De maneira

geral as venulações são muito restritas e não geram halos de alteração significativos. Destaque para uma venulação que secciona a lâmina, sendo visível a olho nu, e desloca o bandamento em um microfalhamento normal. Nessa venulação ocorrem pirritas associadas.

**Interpretação:** Rocha apresenta ótimo grau de preservação das características e feições originais, principalmente no que se diz respeito ao bandamento e mineralogia.

Indícios de alteração estão restritos à ocorrência localizada de venulações, a ocorrência isolada de carbonatos pouco mais grossos do que a matriz, e sulfetos que ocorrem como acessórios.

### Fotomicrografias

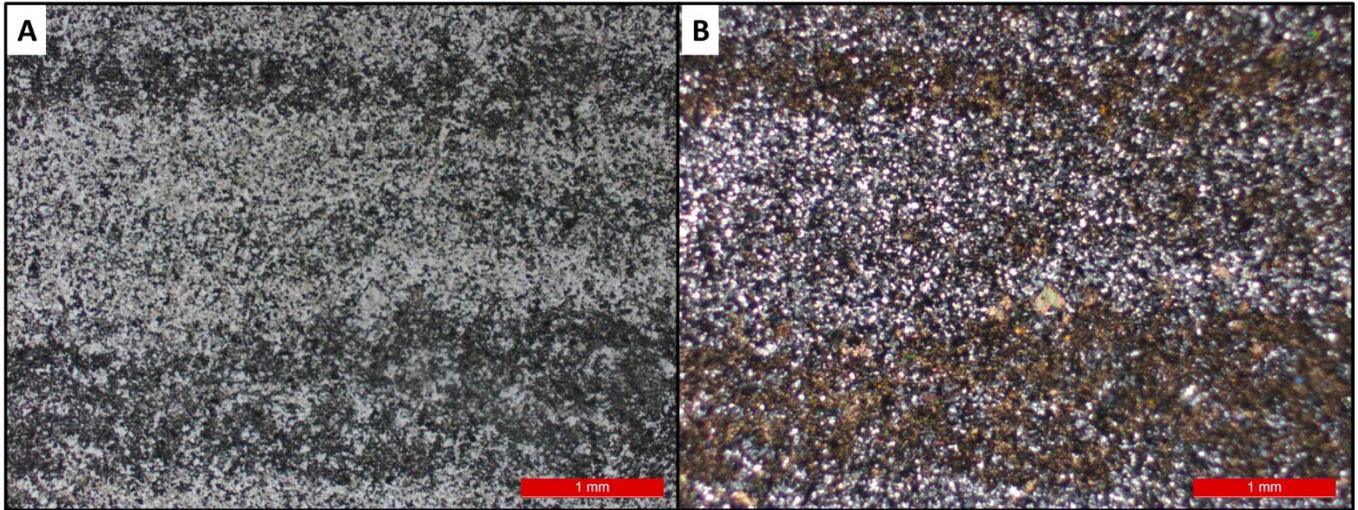


Figura 34: A) Bandamento milimétrico a submilimétrico definido pelas lâminas carbonáticas e quartzosas (LT/NP); B) LT/NC.

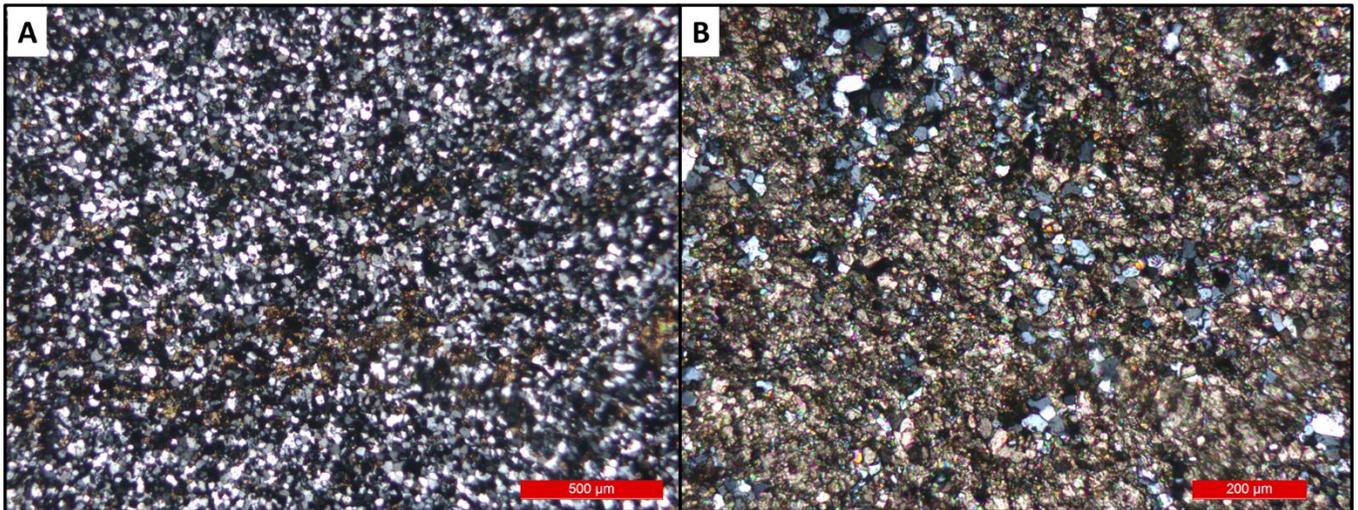


Figura 35: A) Zoom na banda quartzo dominada, com ocorrência disseminada de carbonato fino e aspecto terroso (siderita) (LT/NC); B) Zoom na banda carbonática(siderítica): predomínio de cristais anédricos, aspecto terroso, com inclusões de matéria carbonosa. Quartzo encontra-se disperso, entremeado à matriz carbonática (LT/NC).

**Amostra 06AVN2LE**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento milimétrico a submilimétrico caracterizando uma laminação definida pela intercalação sucessiva de bandas incolores a cinza claro e cinza escuro. Cristais de sulfeto de granulação fina a extremamente podem ser identificados devido ao brilho metálico dourado de algumas pintas dispersas na lâmina.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	25%	Pirita	<=1%
Quartzo	74%		
		Outros	
		Matéria carbonosa:	<=1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica**

Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, definindo uma laminação. Bandas (lâminas) quartzosas predominam em relação às carbonáticas. Minerais opacos são identificados como cristais de granulação fina e ocorrem isolados e dispersos na matriz.

Venulações são compostas por quartzo, ocorrem preferencialmente paralelas ao bandamento e são distinguidas dos grãos da matriz pela granulação pouco mais grossa e pelos contatos mais lobados ou ondulados. Localmente encontram-se dobradas em dobras fechadas, tipo Z e S.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem muito localmente e exclusivamente nas bandas carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina, localmente variando para granulação pouco mais grossa. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados.

Pirita: Ocorre como mineral acessório. Os cristais têm granulação fina, mas mais grossa quando comparada à rocha em geral. Ocorre geralmente como cristais euédricos sobrecrescidos, com aspecto poroso e com várias inclusões. Cristais anédricos a subédricos, mais finos, também ocorrem dispersos.

**Interpretação:** Indícios de hidrotermalismo estão associados à ocorrência localizada de sulfetos e venulações predominantemente quartzosas. Não ocorre carbonato de granulação mais grossa do que a da matriz. Rocha apresenta, de forma geral, bom estado de preservação das feições originais/primárias.

## Fotomicrografias

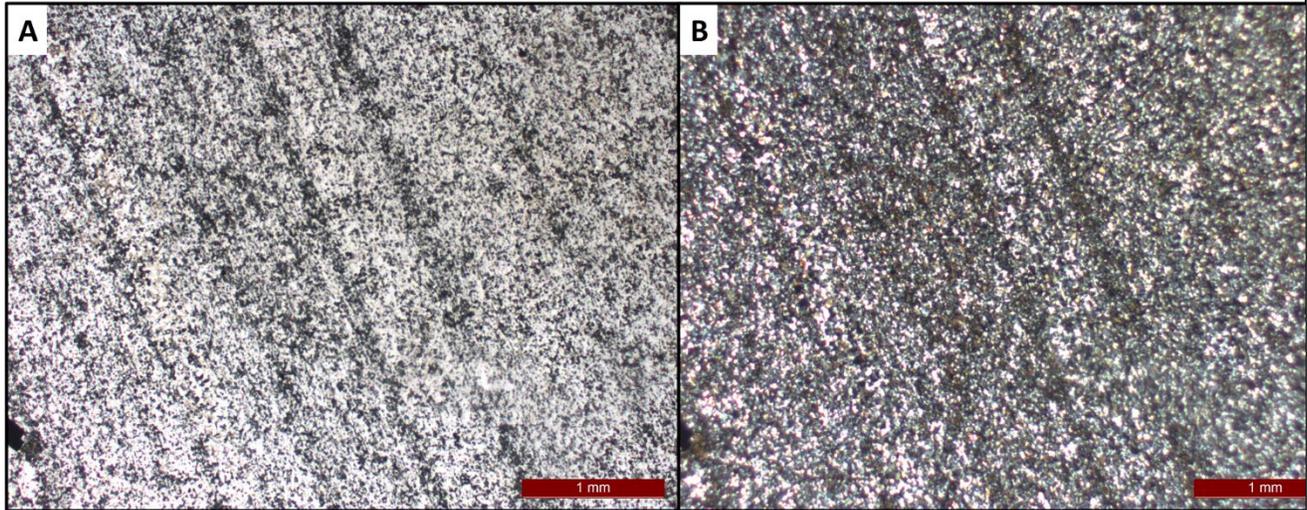


Figura 36: A) Bandamento definido pela intercalação sucessiva de lâminas submilimétricas de carbonato fino (siderita) e lâminas milimétrica compostas por quartzo (LT/NP); B) LT/NC.

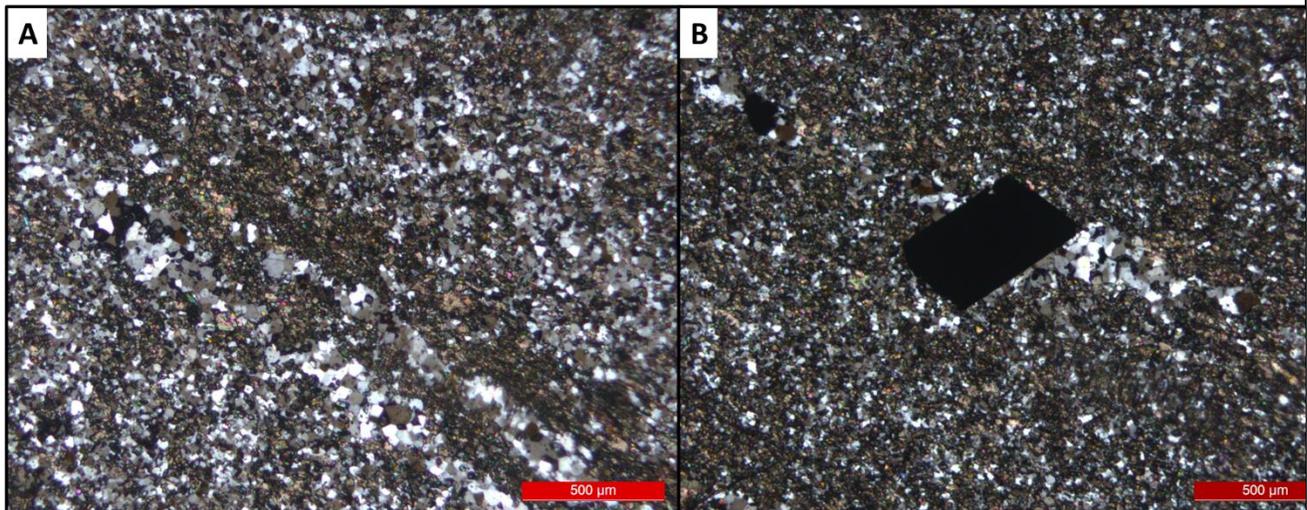
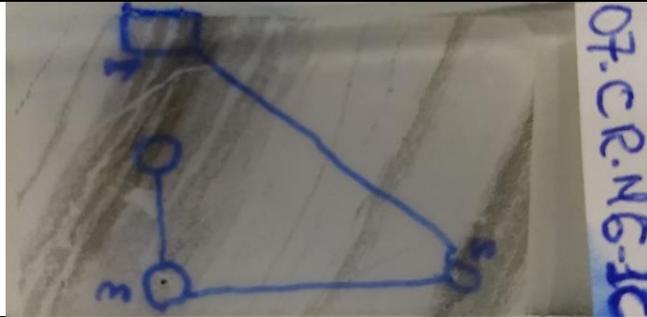


Figura 37: A) Vênulas quartzosas (granulação pouco maior do que rocha) dispostas de maneira concordante ao bandamento, no contato entre banda carbonática e quartzosa (LT/NC); B) Cristal euédrico de pirita de granulação média, associado a venulação de quartzo e sobrecrecido à matriz carbonato dominada (LT/NC).

**Amostra 07CRN6.1C**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento submilimétrico a centimétrico que define uma laminação. O bandamento é caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas totalmente incolores (translúcidas) e bandas cinza escuras a cinza claras, com leve predomínio das bandas incolores. O bandamento é localmente irregular, apresentando ondulações abertas. Venulações, especificamente duas de tamanho milimétrico, são visíveis e seccionam a lâmina de forma oblíqua ao bandamento. Sulfetos submilimétricos dispersos na matriz, concentrados na porção central da lâmina ou associados a algumas bandas em outras porções.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	28%	Pirita	<=1%
Quartzo	68%		
Sericita	<=1%		
		Outros	
		Matéria carbonosa:	3%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, definindo uma laminação. Bandas (lâminas) quartzosas predominam em relação às carbonáticas. Venulações quartzo-carbonáticas ocorrem tanto paralelamente quanto obliquamente ao bandamento, e se confundem com a trama original da rocha, a não ser pelo fato de apresentarem granulação mais grossa do que a matriz.

Minerais opacos ocorrem como acessórios, granulação fina, dispersos na matriz ou nas venulações.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem restrita e exclusivamente nas bandas carbonáticas e são concordantes ao bandamento.

Quartzo: granulação predominantemente fina, variando de uma granulação muito fina até uma granulação pouco mais grossa, mas ainda fina. Os contatos dos grãos de quartzo variam de retos, a lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Carbonatos de granulação mais grossa do que a da matriz, anédricos a euédricos, ocorrem também nas bandas, geralmente ocorrendo uma transição do carbonato fino até esse mais grosso. Esse último tem aspecto pouco mais “limpo” do que o fino e apresenta faces mais bem formadas. Cristais de carbonato ainda mais grosseiros ocorrem associados às venulações quartzo-carbonáticas.

Pirita ocorre como mineral acessório, com granulação fina, em sua maioria cristais subedrais a euedrais, podendo ou não ter textura porosa.

Cristal único e isolado de sericita encontra-se entremeadado na matriz quartzosa. Apresenta granulação fina, semelhante à da matriz. O cristal é subédrico, com cor de interferência amarelo pálido, não pleocróico e relevo mais alto do que o quartzo.

**Interpretação:** Rocha apresenta bom grau de preservação. Carbonatos de granulação pouco mais grossa que a matriz ocorrem concentrados em algumas porções e podem ser resultado de hidrotermalismo. Sulfetos ocorrem muito localmente, mas também são evidências de alteração posterior. A possível sericita pode ser um resquício de contaminação detrítica ou evidência de alteração hidrotermal.

### Fotomicrografias

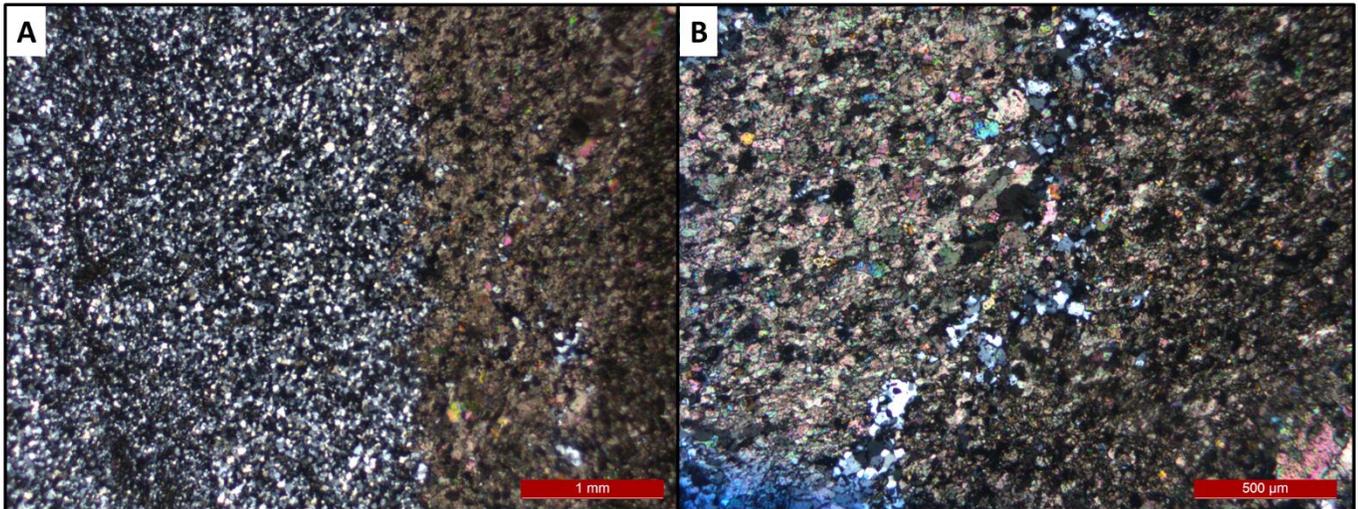


Figura 38: A) Contato entre banda quartzosa e banda carbonática, ambas de espessura milimétrica. O carbonato (de aspecto terroso e com inclusões) é a siderita, com ocorrência dispersa de cristais de ankerita (LT/NC); B) Transição entre carbonato fino (direita), de aspecto terroso e superfície “suja”, dominada por inclusões – siderita -, e carbonato de granulação mais grossa (esquerda), aspecto mais “limpo” e superfície mais clara – ankerita (LT/NC).

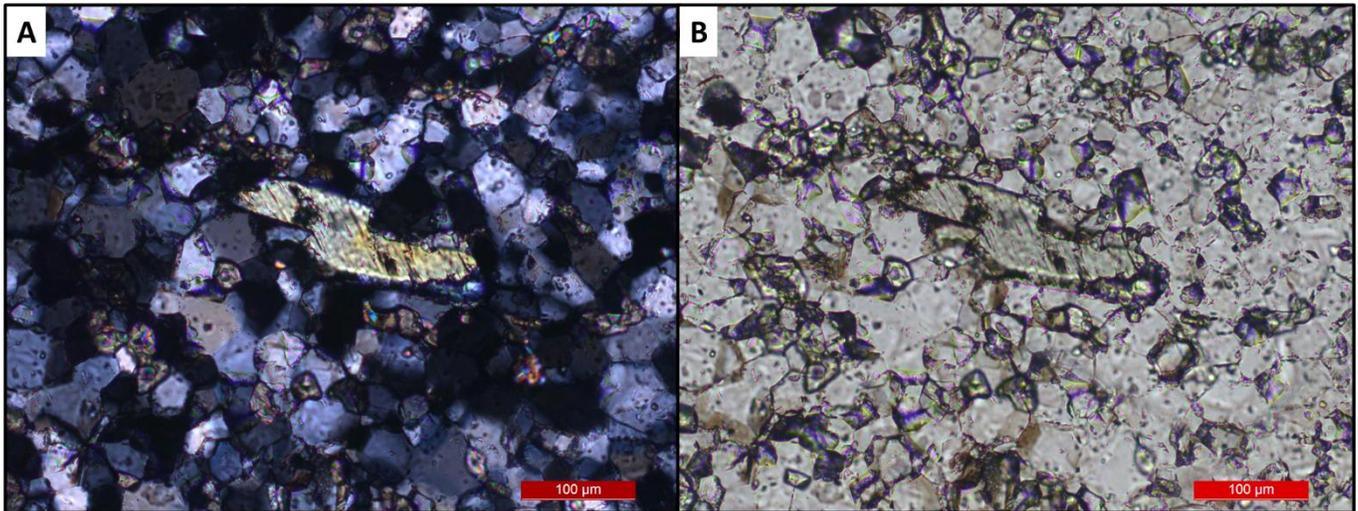


Figura 39: A) Cristal de sericita entremeadado à matriz quartzosa em zoom na banda quartzo dominada (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 08CRN8.1**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento submilimétrico a centimétrico, formando uma laminação. O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a cinza escura, com a presença de uma banda de coloração preta no centro da lâmina. Diversas venulações submilimétricas, aproximadamente seis visíveis, seccionam e descolam o bandamento em microfalhas normais com rejeitos submilimétricos a milimétricos, e ângulos em torno de 30 graus em relação à horizontal.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	30%	Pirite e Pirrotita	<1%
Quartzo	66%		
Sericita	<=1%	Outros	
		Matéria carbonosa:	3%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, o que define uma laminação. Bandas ricas em quartzo dominam. Duas a três bandas ricas em carbonato, com coloração escura, ocorrem bem definidas. Em algumas porções o quartzo e o carbonato ocorrem em quantidades similares. Minerais opacos ocorrem como acessórios, com granulação fina, anédricos a subédricos, dispersos na matriz.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem principalmente associadas às bandas carbonáticas, e definem filmes descontínuos que acompanham o bandamento.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso”/”sujo” e coloração marrom em nicóis cruzados. Em algumas bandas ricas em carbonato, esses minerais estão orientados e levemente estirados, paralelamente ao bandamento, sendo contornados pelos filmes de matéria carbonosa. Cristais de granulação pouco mais grossa, anédricos a euédricos, também ocorrem dispersos pela matriz da rocha, principalmente associados às bandas carbonáticas, ou diretamente associados às venulações quartzo-carbonáticas. Têm aspecto pouco mais “limpo” quando comparados aos cristais de granulação fina da matriz.

Pirita e Pirrotita: cristais de pirita e pirrotita ocorrem como acessórios com granulação fina, anédricos a subédricos, dispersos na matriz, localmente estirados segundo o bandamento da rocha.

Cristais apresentam geralmente aspecto poroso com inclusões aparentemente de carbonato.

Sericita: ocorre como mineral acessório entremeada na matriz da rocha de forma dispersa, associada tanto ao carbonato quanto ao quartzo. Apresenta granulação fina, semelhante a da matriz e hábito placóide.

Venulações são milimétricas a submilimétricas e ocorrem em quantidade significativa, contabilizando 6 venulações, quartzosas a quartzo-carbonáticas, em sua maioria discordantes ao bandamento, mas podem ser também concordantes. Tanto o quartzo quanto o carbonato ocorrem com granulação mais grossa do que a matriz da rocha. O carbonato é ainda mais distintivo por apresentar aspecto mais “limpo”.

de ocorrência de venulações, a rocha apresenta feições estruturais (bandamento) e mineralógicas aparentemente preservadas. Carbonato e quartzo finos, esse último provavelmente já recristalizado, parecem ser minerais primários. A ocorrência das venulações, apesar da quantidade, é também limitada e não causa alterações significativas em escala de lâmina. Sulfetos, no caso pirita, tem ocorrência muito limitada.

### Fotomicrografias

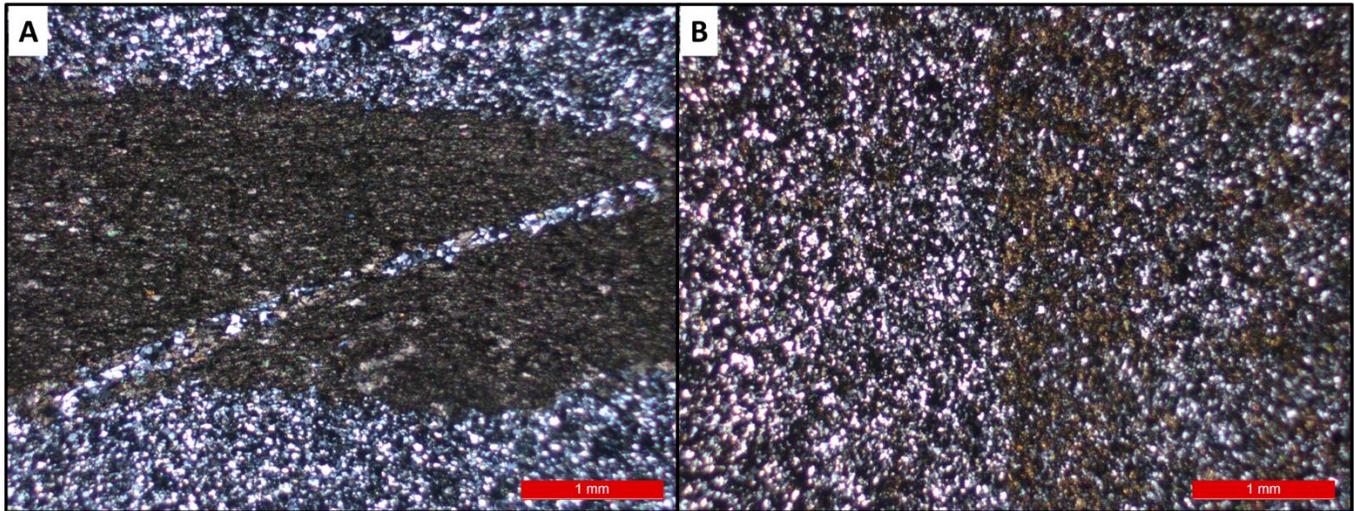


Figura 40: A) Bandamento milimétrico definido pela intercalação de lâminas carbonáticas (sideríticas) e quartzosas. Vênula quartzo-carbonática seccionando a banda carbonática obliquamente (LT/NC); B) Detalhe do contato entre banda quartzo-dominada e banda carbonato-dominada com contribuição de quartzo na matriz (LT/NC).

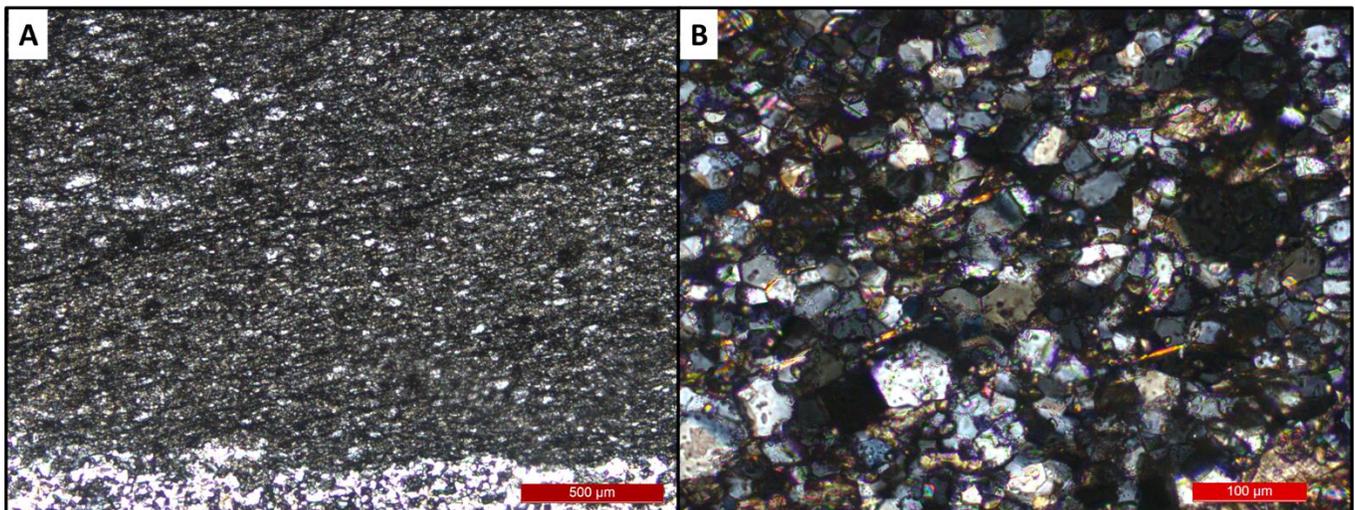


Figura 41: A) Detalhe da banda carbonática com níveis de matéria carbonosa dispostos de maneira concordante à foliação/bandamento (LT/NP); B) Detalhe da banda quartzosa com ocorrência de sericita entremeada e dispersa na matriz (LT/NC).

**Amostra 09CRN4.1sub**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento milimétrico a submilimétrico que gera uma laminação. O bandamento é caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro e bandas cinza escura, com predomínio das bandas claras.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	20%	Pirita	<=1%
Quartzo	77%	Pirrotita	<=1%
Sericita	<=1%	Outros	
		Matéria carbonosa:	2%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, definindo uma laminação. Bandas (lâminas) quartzosas predominam em relação às carbonáticas. Venulações quartzo-carbonáticas ocorrem paralelamente ao bandamento, e se confundem com a trama original da rocha.

Minerais opacos ocorrem como acessórios, com granulação extremamente fina e em quantidade praticamente desprezível.

Lâminas finas, escuras de matéria carbonosa ocorrem restrita e exclusivamente nas bandas carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo variam de retos, a lobados ou serrilhados. Quartzo de granulação pouco mais grossa também ocorre, aparentemente associado a venulações quartzo-carbonáticas. Nesses casos, os contatos entre os grãos são predominantemente retos e poligonais.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Carbonatos de granulação mais grossa do que a da matriz, geralmente euédrico, ocorrem associados às venulações quartzo-carbonáticas, entremeados nos grãos de quartzo. Apresenta aspecto pouco mais “limpo” do que o carbonato de granulação fina da matriz. Podem conter inclusões.

Pirita e pirrotita: ocorrem como minerais acessórios, com granulação extremamente fina e dispersos pela matriz da rocha. Pirrotita subédrica, hábito tabular, com inclusões ocorre isoladamente.

Sericita ocorre local e isoladamente, aparecendo como um cristal alongado definindo um filme entremeado na matriz.

Venulações: compostas por quartzo e carbonato, são concordantes ao bandamento da rocha. São identificadas pela granulação pouco mais grossa do quartzo e carbonato e pelos cristais euedrais de carbonato. São facilmente confundidas com as bandas originais da rocha.

**Interpretação:** rocha apresenta um bandamento composicional reliquiar, parcialmente preservado, aparentemente sobreposto pela entrada de venulações quartzo-carbonáticas paralelas ao bandamento. Existe a possibilidade dessas venulações, pelo fato de serem concordantes ao bandamento, serem produtos de recristalização. No entanto, a amostra como um todo apresenta um clareamento, provavelmente resultado da alteração hidrotermal e entrada de venulações.

A partir dessas observações, conclui-se que a rocha foi submetida a um processo de silicificação.

Apesar das características citadas, a rocha apresenta quantidade praticamente insignificante de sulfetos.

### Fotomicrografias

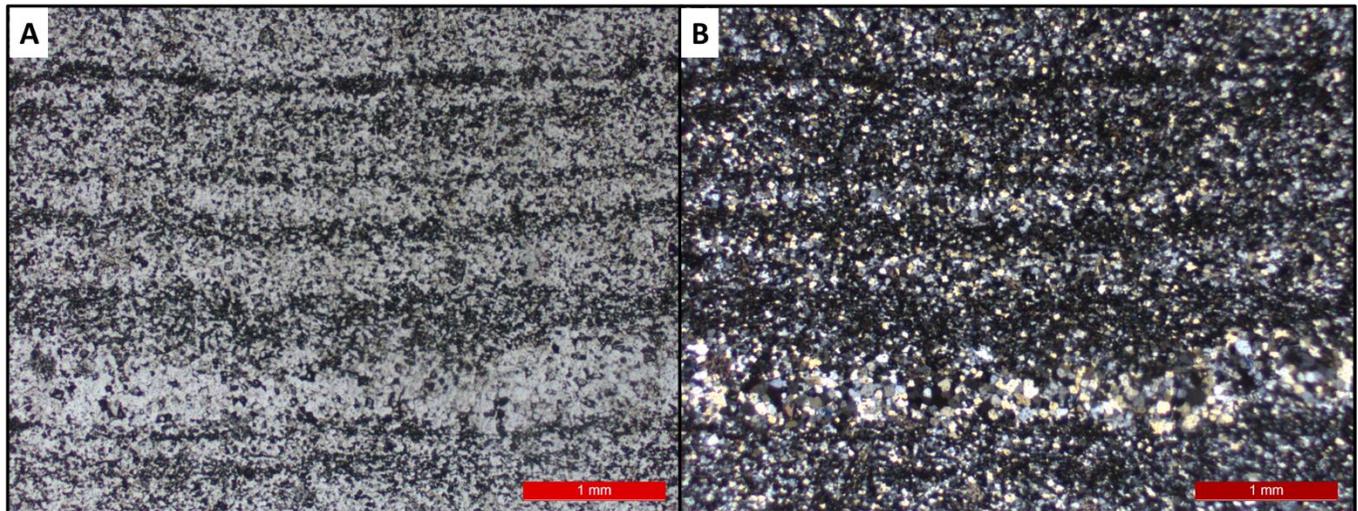


Figura 42: A) Bandamento milimétrico a submilimétrico definido pela intercalação sucessiva de bandas carbonáticas e quartzosas. Bandas carbonáticas restritas, com domínio da matriz quartzosa. Na porção inferior da lâmina, vênula quartzosa concordante ao bandamento (LT/NP); B) LT/NC.

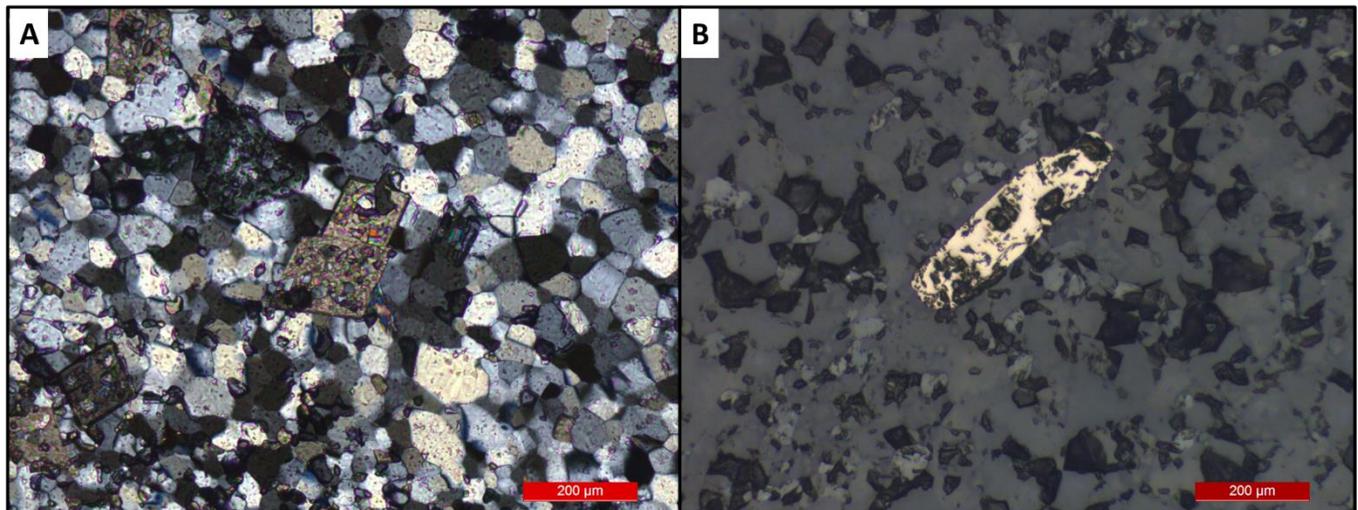


Figura 43: A) Detalhe da banda quartzosa com carbonato euédrico sobrecrecido à matriz (LT/NC); B) Cristal de pirrotita sobrecrecido à matriz quartzo-carbonática (LR/NC).

**Amostra 10CRN8.1asc**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento submilimétrico a centimétrico. O bandamento é caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro e bandas bege claro/amarelo pálido, com leve predomínio das bandas beges. O bandamento está localmente dobrado. Venulações, especificamente três, são visíveis e seccionam a lâmina tanto de forma oblíqua ao bandamento como também de forma aproximadamente concordante. Sulfetos submilimétricos são identificados em uma das extremidades da lâmina e são euédricos a subédricos, cor amarela forte e hábito cúbico.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	49%	Pirita	<=1%
Quartzo	50%	Pirrotita	<=1%
		<b>Outros</b>	
		Matéria carbonosa:	<=1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina e textura granoblástica. Apresenta um bandamento/laminação reliquiar definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. Na maior parte da lâmina, porém, esse bandamento está aparentemente transposto, sendo difícil sua identificação devido a ocorrência de grande quantidade de carbonato entremeado na matriz quartzosa, ou também devido ao carbonato sobrecrecido que se sobrepõe às estruturas primárias. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, mas mais do que a estrutura bandada, predomina na rocha uma massa quartzo-carbonática. Mineraias opacos são finos e ocorrem dispersos, em quantidade praticamente desprezível.

Venulações ocorrem tanto de forma concordante ao bandamento reliquiar quanto de forma oblíqua. Elas cortam toda a extensão da lâmina e são compostas essencialmente por carbonato e pouco quartzo. O carbonato tem granulação média, que se destaca em relação a matriz, com ocorrência de alguns agregados de cristais de granulação ainda mais grossa, subédricos a euédricos.

Filmes de matéria carbonosa ocorrem localmente.

**Quartzo:** granulação predominantemente fina e textura granoblástica. Os contatos dos grãos de quartzo com são predominantemente irregulares, variando de lobados a serrilhadas e poligonais.

**Carbonato:** na matriz ocorrem cristais de granulação semelhante à da rocha, bem como cristais de granulação mais grossa, por vezes formando agregados. Variam de anédricos a euédricos, mas os cristais de granulação mais grossa são predominantemente subédricos. O aspecto “sujo” dos cristais varia em proporções variadas pela lâmina. Predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados.

Perto de uma das bordas das lâminas ocorre uma banda composta essencialmente por carbonato de granulação média, com alguns cristais euédricos. Formam-se agregados de carbonatos com grãos de quartzo reliquiares envolvidos pela massa carbonática, que aparentemente está sobrecrecida à rocha.

Pirita e pirrotita: ocorrem como minerais acessórios. São cristais de granulação fina, anédricos a euédricos, isolados e dispersos pela matriz. Cristais de pirrotita são mais alongados, enquanto cristais de pirita apresentam hábito cúbico. Ambos têm aspecto poroso, localmente liso, parecendo conter inclusões.

**Interpretação:** Apesar de algumas feições e características indicativas da rocha original, a lâmina apresenta uma quantidade de carbonato ainda não vista anteriormente. Muitas vezes esses cristais apresentam granulação média, são euedrais e formam agregados, associando essas fases a processos hidrotermais relacionados a uma forte alteração a carbonato.

### Fotomicrografias

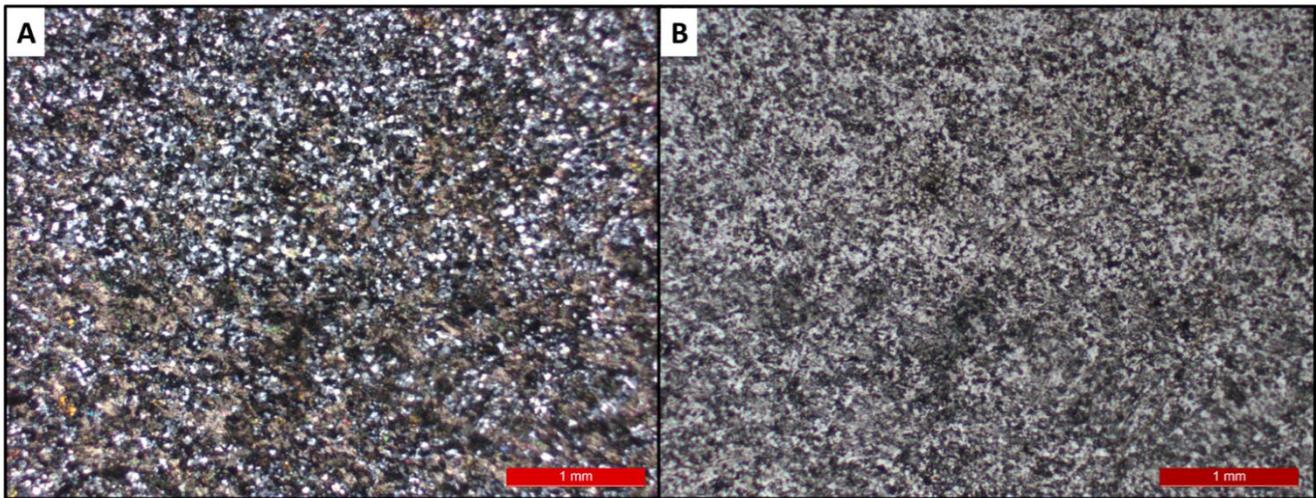


Figura 44: A) Matriz quartzo-carbonática com bandamento definido pela intercalação milimétrica de bandas carbonáticas (siderita) e bandas quartzo-carbonáticas. Domínio de carbonato em relação ao quartzo (LT/NC); B) LT-NP.

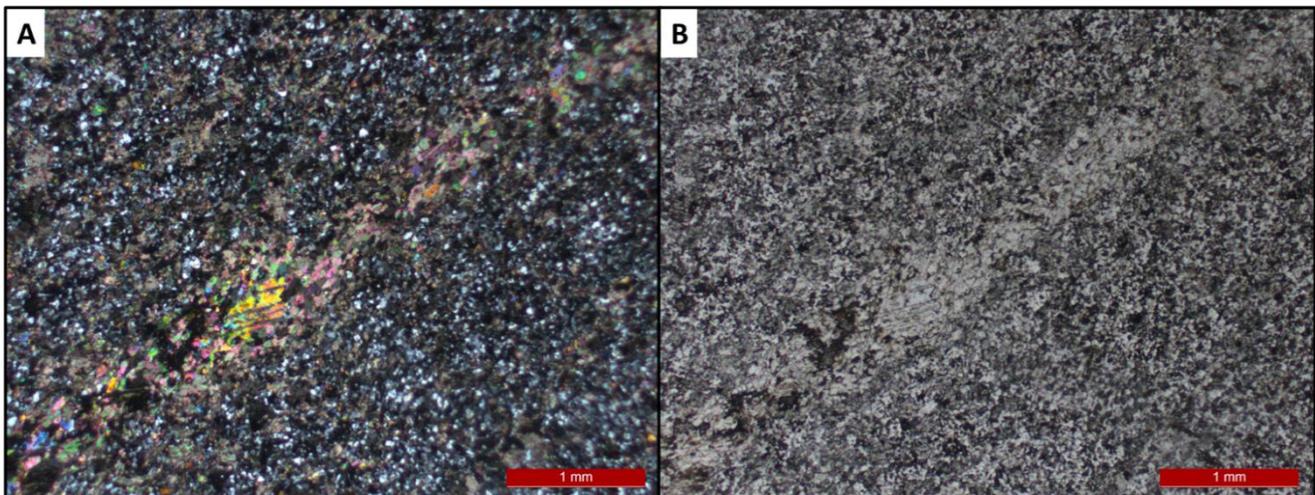
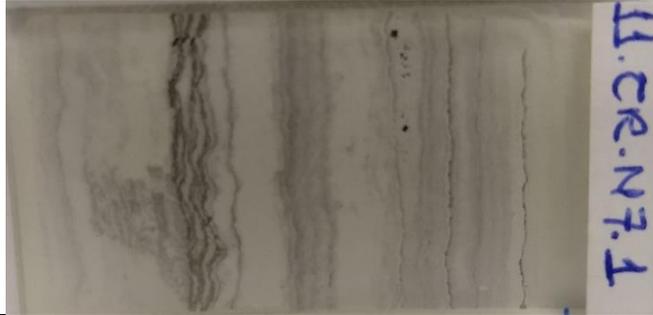


Figura 45: A) Cristais de carbonato de granulação grossa na banda carbonática, intercalada às bandas quartzo-carbonáticas (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 11CRN7.1**



**Descrição macro:** Rocha com bandamento submilimétrico a centimétrico, laminada. O bandamento é caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas totalmente incolores (translúcidas), bandas cinza escuras e cinza claras. O bandamento apresenta microdobras. Sulfetos de coloração amarela forte, submilimétricos, euédricos a subédricos ocorrem tanto dispersos pela matriz como também associados às bandas mais escuras. Uma venulação de tamanho centimétrico e espessura submilimétrica é visível na porção central da lâmina e corta o bandamento obliquamente. Alguns cristais incolores a cinza claros, subédricos a anédricos e granulação mais grossa que a matriz, ocorrem localmente.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	17%	Pirita	1%
Quartzo	80%	Outros	
		Matéria carbonosa:	2%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha bandada/laminada de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. As bandas ricas em quartzo dominam amplamente, sendo a ocorrência das bandas ricas em carbonato relativamente restrita. A espessura do bandamento varia de submilimétrica a centimétrica. O bandamento apresenta microdobras, notadamente nas bandas carbonáticas.

Minerais opacos ocorrem dispersos, associados às venulações e com granulação fina a média.

Lâmina finas, escuras e descontínuas de matéria carbonosa ocorrem geralmente restritas às bandas carbonáticas. Localmente podem estar dobradas (dobras apertadas), principalmente no domínio carbonático. Venulações ocorrem predominantemente concordantes ao bandamento, mas também de forma oblíqua. Apresentam espessura submilimétrica a milimétrica e estão comumente associadas às bandas carbonáticas, facilmente distinguíveis pela granulação mais grossa em relação ao restante da rocha. São compostas essencialmente por quartzo com algum carbonato associado.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados. Na própria matriz percebe-se a existência de dois conjuntos de granulações distintas, uma extremamente fina, e outra pouco mais grossa. Quartzo associado às venulações apresenta granulação ainda mais grossa (granulação média).

Carbonato: predominam cristais de granulação muito fina, anédricos a subédricos, coloração bege a marrom em nicóis cruzados. Formam agregados finos de aspecto terroso (sujo), talvez devido à matéria carbonosa, concentrados em bandas. Localmente, os carbonatos apresentam granulação pouco mais grossa, média, subédricos a euédricos, e aspecto “mais limpo”, dispersos na matriz fina.

Cristais e pirita apresentam granulação fina a média, e podem estar associados tanto às bandas carbonáticas, quanto às venulações quartzosas. No primeiro caso, os cristais são anédricos, com superfície arredondada,

aspecto vermiforme, textura porosa, aparentemente sobrecrecidos nas zonas de charneira das microdobras. No segundo caso, os cristais são em sua maioria euédricos, alguns subédricos, hábito cúbico, textura porosa. **Interpretação:** Aparentemente, a rocha apresenta um bom grau de preservação. Predomina amplamente cristais de quartzo e carbonato de granulação fina, considerados primários ou metamórficos. Cristais de quartzo de granulação pouco mais grossa podem ser resultado de recristalização ou em algumas partes de alteração hidrotermal (o que não seria tão provável, pois praticamente não ocorrem cristais de carbonato associados com granulação média a grossa). Venulações ocorrem principalmente associadas às bandas carbonáticas, silificando essas bandas e apresentando granulação bem maior que de todo o restante da rocha. Sulfetos ocorrem localmente, associados tanto às venulações quanto às bandas de carbonato fino.

### Fotomicrografias

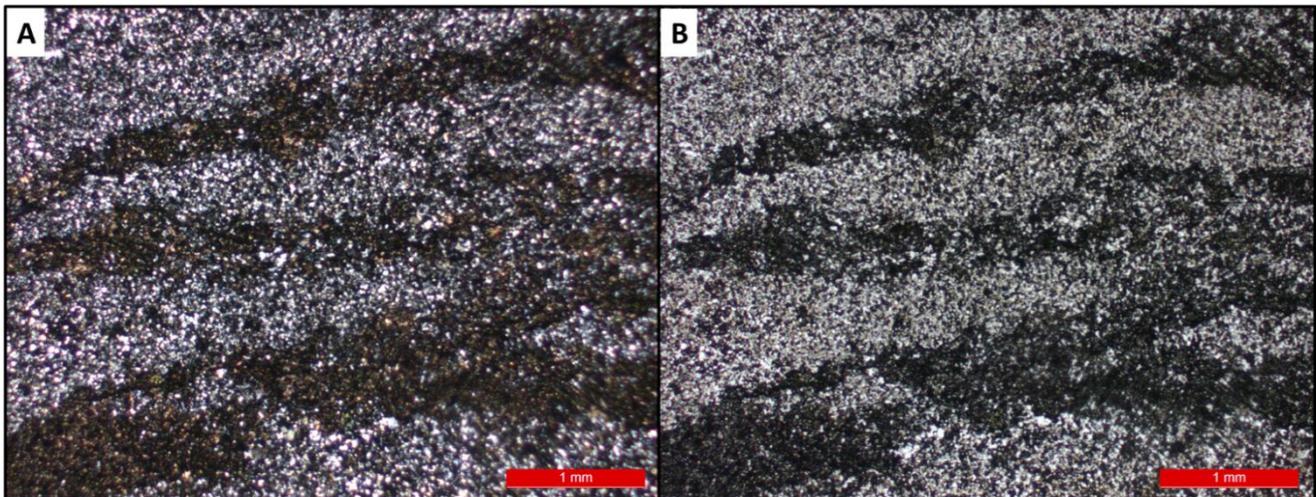


Figura 46: A) Bandamento milimétrico a submilimétrico definido pela intercalação de lâminas quartzosas e lâminas carbonáticas (sideríticas) com níveis de matéria carbonosa. Bandas encontram-se defletidas em dobras abertas (LT/NC); B) LT/NP.

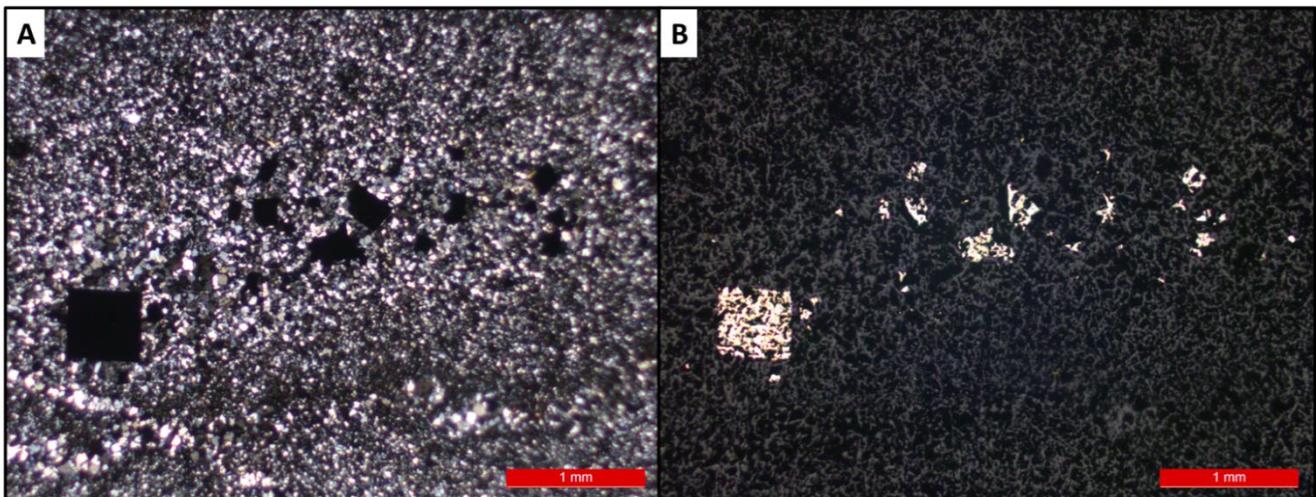


Figura 47: A) Cristais euédricos de pirita milimétricos a submilimétricos associados a vênula de quartzo na matriz quartzosa (LT/NC); B) LR/NC.

**Amostra 12AV01**

**Descrição macro:** Rocha bandada com bandamento milimétrico a submilimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro e bandas cinza escura. A lâmina apresenta-se dividida em dois domínios bem definidos: um de coloração clara, dominado por bandas de coloração cinza clara a bege (mais espessas) em detrimento das bandas escuras, e outro domínio de coloração predominantemente cinza escura, dominado por bandas escuras mais espessas em relação às bandas claras. Venulação submilimétrica corta o bandamento discordantemente.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	38%	Pirita	<=1%
Quartzo	58%	<b>Outros</b>	
Clorita	<=1%	Matéria carbonosa:	3%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica a granolepdoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica. A lâmina é dividida em dois domínios bem definidos: um dominado por bandas ricas em quartzo e com carbonato fino ocorrendo subordinadamente, associado a raras e finas bandas com predomínio de carbonato em relação ao quartzo; outro domínio caracterizado pela presença abundante de bandas carbonáticas com algumas poucas bandas com predomínio de quartzo. Nessas bandas, os cristais finos de carbonato que compõe a matriz estão orientados e aparentemente estirados, definindo uma foliação subparalela ao bandamento. Minerais opacos ocorrem dispersos e com granulação fina.

Lâmina finas, escuras e descontínuas de matéria carbonosa ocorrem restritas às bandas carbonáticas. Localmente podem estar dobradas (dobras apertadas), principalmente no domínio carbonático.

Venulações também ocorrem principalmente associadas ao domínio carbonático e podem estar localmente dobradas. São venulações quartzo-carbonáticas, concordantes ou não ao bandamento/foliação.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, coloração bege em nicóis cruzados. Os cristais estão orientados na direção do bandamento composicional (subparalela à foliação).

Localmente, mas também orientados, ocorrem cristais de quartzo e carbonato de granulação pouco mais grossa, com até 0,5 mm, associados na forma de veios, que seccionam principalmente as bandas carbonáticas. Nesses cristais é possível observar cores de interferência de ordem elevada características dos carbonatos, geralmente com aspecto mais “limpo” quando comparados ao carbonato da matriz. São interpretados como veios pela associação de cristais de granulação pouco mais grossa que a rocha em geral, em faixas estreitas que cortam as bandas de uma extremidade a outra.

**Pirita:** cristais de pirita ocorrem quase exclusivamente no domínio carbonático. Apresentam granulação fina, são anédricos e orientados segundo a direção do bandamento/foliação definida pela orientação dos cristais de carbonato da matriz. Localmente ocorrem um ou dois cristais com granulação mais grossa.

**Clorita:** ocorrência de cristais incolores com hábito placóide em uma faixa restrita dentro do domínio carbonático. Apresentam granulação fina, mas maior que a da matriz; são subedrais e apresentam-se orientados segundo a foliação/bandamento. Sob nicóis cruzados tem uma cor azulada.

**Interpretação:** Domínio rico em quartzo está aparentemente bem preservado de alteração hidrotermal. Domínio rico em carbonato aparenta estar mais alterado, pela presença de venulações, sulfeto (mesmo que em quantidades baixas), e carbonato de granulação pouco mais grossa.

### Fotomicrografias

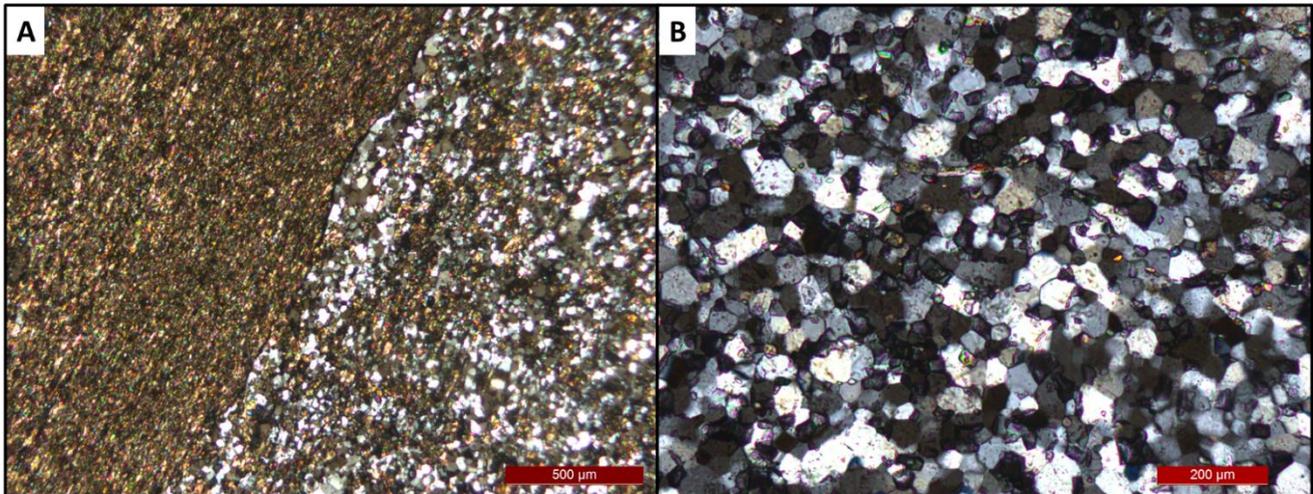


Figura 48: A) Detalhe do contato entre bandas milimétricas de composição carbonática (siderítica) e quartzo-carbonática (LT/NC); B) Zoom na banda quartzosa, destacando contatos poligonais entre os cristais (LT/NC).

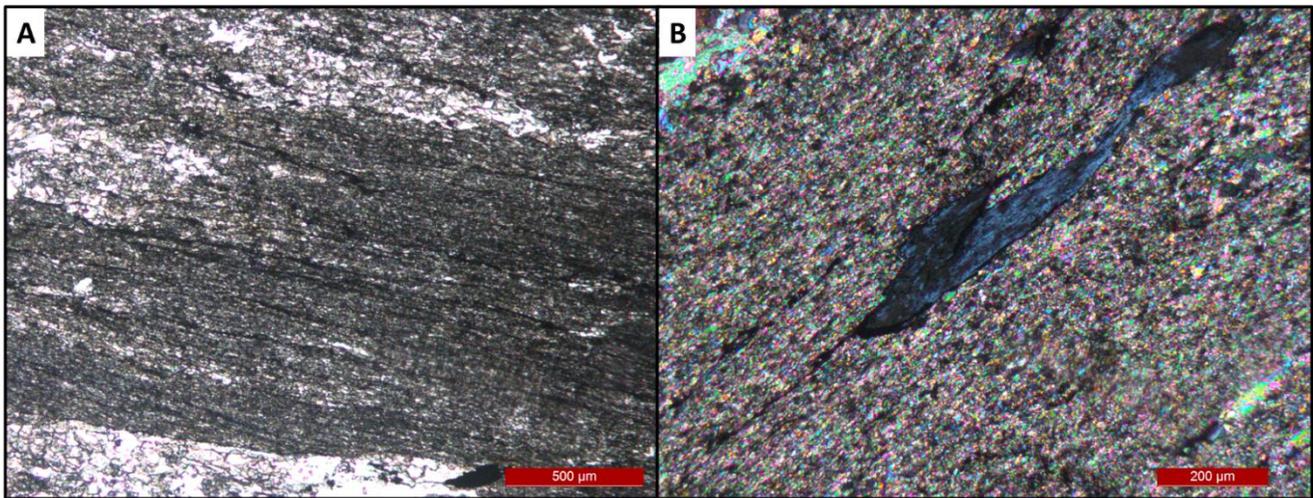


Figura 49: A) Níveis de matéria carbonosa (lentes opacas) na banda carbonática, concordantes à foliação/bandamento (LT/NP); B) Cristal de clorita na banda carbonática, concordante à foliação/bandamento (LT/NC).

**Amostra 13AVN02**

**Descrição macro:** Rocha bandada/laminada de granulação fina, com bandamento submilimétrico a centimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a transparentes e bandas cinza escuras a pretas. O bandamento encontra-se levemente ondulado. Venulações de espessura submilimétrica a milimétrica ocorrem concordantes ao bandamento ou obliquamente, nesses casos gerando um rejeito submilimétrico no bandamento.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	34%	Pirita	<1%
Quartzo	65%		
		<b>Outros</b>	
		Matéria carbonosa:	1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica.

Lâminas delgadas, escuras, descontínuas a pouco contínuas de matéria carbonosa ocorrem geralmente localmente e restritas às bandas carbonáticas.

Venulações ocorrem com espessura milimétrica a submilimétrica e composição quartzo-carbonática, com domínio de quartzo. Venulações ocorrem tanto concordantes ao bandamento, quando ficam restritas às bandas carbonáticas ou quartzosas misturando-se à matriz, como também de forma discordante, quando cortam o bandamento obliquamente em toda a extensão da lâmina. As venulações são identificadas por apresentarem granulação pouco mais grossa do que a da rocha e pelas relações de corte.

Quartzo: granulação predominantemente fina, localmente com aparência de quartzo microcristalino, com contatos irregulares entre os grãos. A granulação do quartzo varia tornando-se mais grossa em determinadas porções da lâmina, com os contatos entre os grãos tendendo a padrões poligonais, geralmente retos. A variação de granulação e a diferença entre as formas de contato entre os grãos indica a possibilidade de silificação e ou venulações disseminadas na matriz da rocha. Nas bandas carbonáticas o quartzo ocorre principalmente como cristais de granulação fina, isolados/dispersos na matriz.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, coloração bege a marrom escuro em nicóis cruzados, e aspecto “sujo”/”manchado” quando observado em nicóis paralelos. Os cristais estão orientados na direção do bandamento composicional (subparalela à foliação). Nas bandas carbonáticas ocorrem também cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa, fina a média, geralmente anédricos, localmente subédricos, com aspecto mais claro, “limpo”.

Nas bandas quartzosas o carbonato ocorre entremeado na matriz como cristais de granulação fina, anédricos, localmente formando agregados.

Pirita: cristais de pirita ocorrem isoladamente associados às bandas carbonáticas como minerais acessórios. Apresentam granulação fina a média, euédricos a subédricos.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação das estruturas (bandamento) e mineralogia primária, dominando o quartzo e o carbonato, siderita.

As evidências de alteração hidrotermal são exaltadas pela presença restrita de pirita e de carbonatos de granulação mais grossa e aspecto claro, “limpo”, que provavelmente são resultado da recristalização e formação de ankerita. A quantificação do grau de silicificação é dificultada pela dificuldade de separação entre o quartzo original recristalizado e o quartzo de veio entremeadado/disseminado na matriz.

### Fotomicrografias

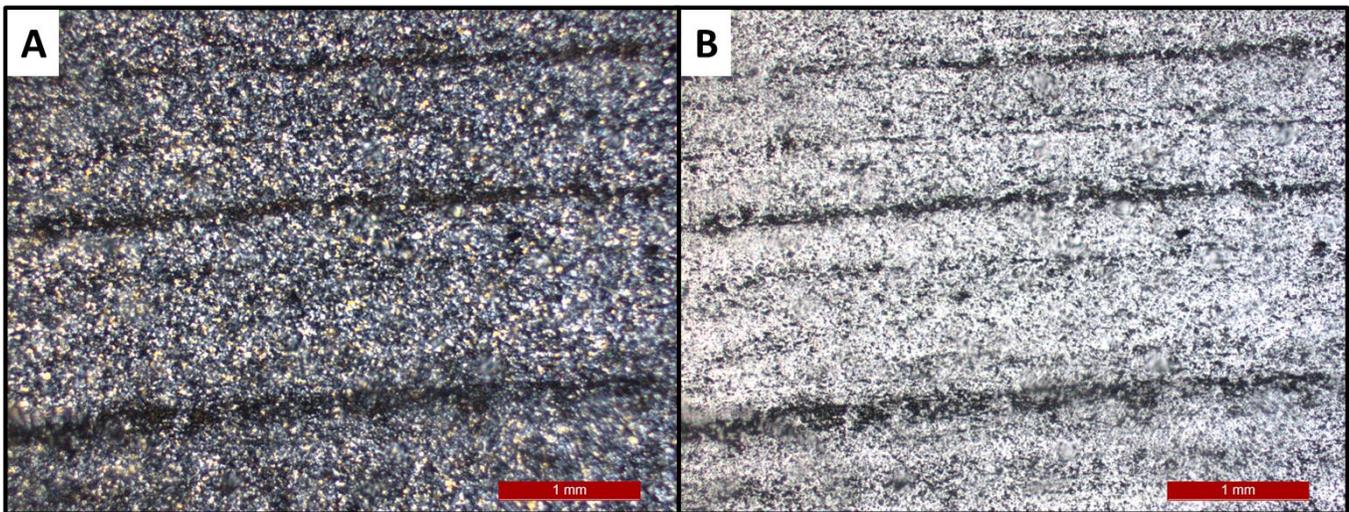


Figura 50: A) Bandamento milimétrico a submilimétrico definido pela intercalação sucessiva de lâminas quartzosas e lâminas (finas) carbonáticas (sideríticas) (LT/NC); B) LT/NP.

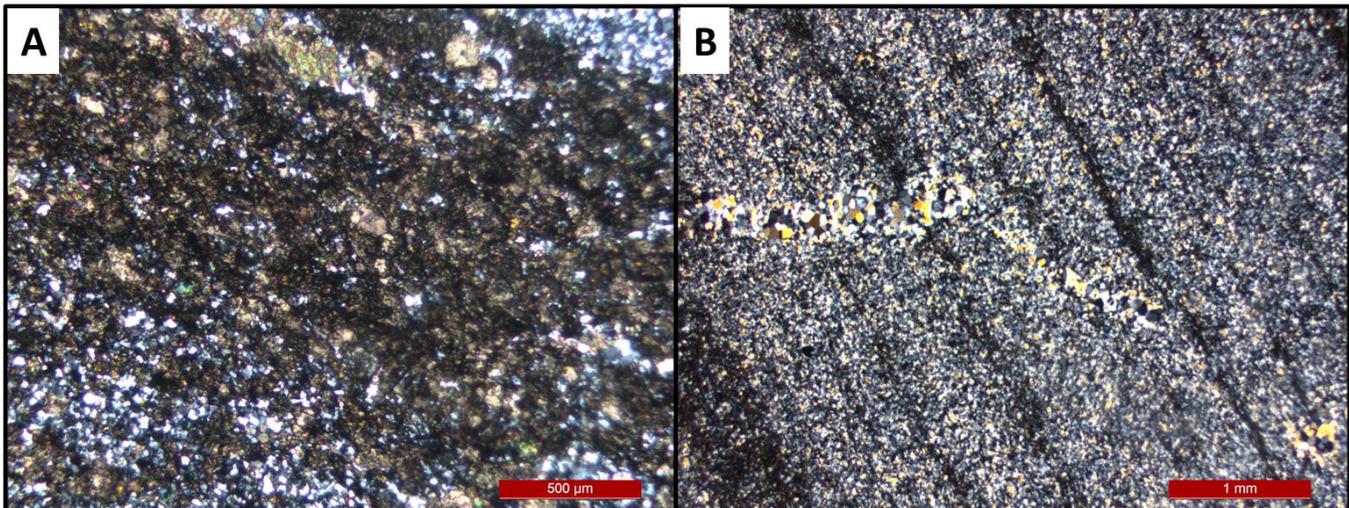


Figura 51: A) Detalhe da banda carbonática com carbonato fino e aspecto terroso (siderita) e carbonato de granulação pouco mais grossa e textura “limpa” e lisa (ankerita) (LT/NC); B) Venulação quartzosa cortando obliquamente o bandamento (LT/NC).

**Amostra 14CP0039**

**Descrição macro:** Rocha bandada de granulação fina, com bandamento submilimétrico a centimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a transparentes e bandas cinza escuras a pretas. As bandas claras predominam amplamente em relação às escuras, com destaque para uma banda específica que chega a 2,5cm. As bandas escuras, bem menos espessas, estão localmente dobradas. Venulação submilimétrica perpendicular ao bandamento secciona a lâmina na parte central.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	20%	Pirita	<1%
Quartzo	79%	<b>Outros</b>	
		Matéria carbonosa:	1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas/lâminas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas/lâminas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, predominando amplamente as bandas quartzosas.

Lâmina delgadas, escuras, descontínuas de matéria carbonosa ocorrem em algumas poucas porções, geralmente restritas às bandas carbonáticas.

Venulações quartzo-carbonáticas apresentam espessura milimétrica a submilimétrica e ocorrem de forma discordante (oblíquas a sub-perpendiculares) ao bandamento, e também de forma concordante. Venulações podem estar entremeadas na matriz e por terem mesma composição da rocha são identificadas pela granulação mais grossa, fina a média, dos grãos de quartzo e carbonato.

Quartzo: granulação predominantemente fina, com variações sutis, mas bem marcadas entre domínios de granulação muito fina e domínios de granulação fina a média. Os contatos dos grãos de quartzo, principalmente nas porções de granulação mais grossa, são comumente poligonais, geralmente retos, subordinadamente lobados ou irregulares. Nas porções de granulação mais fina os contatos entre os grãos são mais irregulares, apresentando maior contribuição de cristais finos de carbonato na matriz do que em relação às porções de granulação mais grossa. Nas bandas carbonáticas o quartzo ocorre principalmente como cristais de granulação fina, isolados/dispersos na matriz.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, coloração bege a marrom escuro em nicóis cruzados, e aspecto “sujo”/“manchado” quando observado em nicóis paralelos. Nas bandas carbonáticas ocorrem também cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa, anédricos a subédricos, geralmente com aspecto mais claro, “limpo” e localmente com cor de interferência mais alta. Esses cristais estão aparentemente associados a porções próximas às venulações.

Nas bandas quartzosas o carbonato ocorre entremeado na matriz como cristais de granulação fina, anédricos, localmente formando agregados, ou como cristais de granulação fina a média, euédricos e subédricos, de granulação fina a média e com aspecto mais claro do que o carbonato da matriz.

Pirita: um único cristal de pirita de granulação média, euédrico, ocorre isoladamente.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação das estruturas (bandamento) e mineralogia primária, dominando o quartzo e o carbonato, siderita. As evidências de alteração hidrotermal são exaltadas pela presença restrita de pirita e de carbonatos de granulação mais grossa e aspecto claro, “limpo”, que provavelmente são resultado da recristalização e formação de ankerita. As venulações também indicam presença de alteração. Algumas bandas espessas de quartzo com variação sutil na granulação dos cristais podem indicar processos de silicificação.

### Fotomicrografias

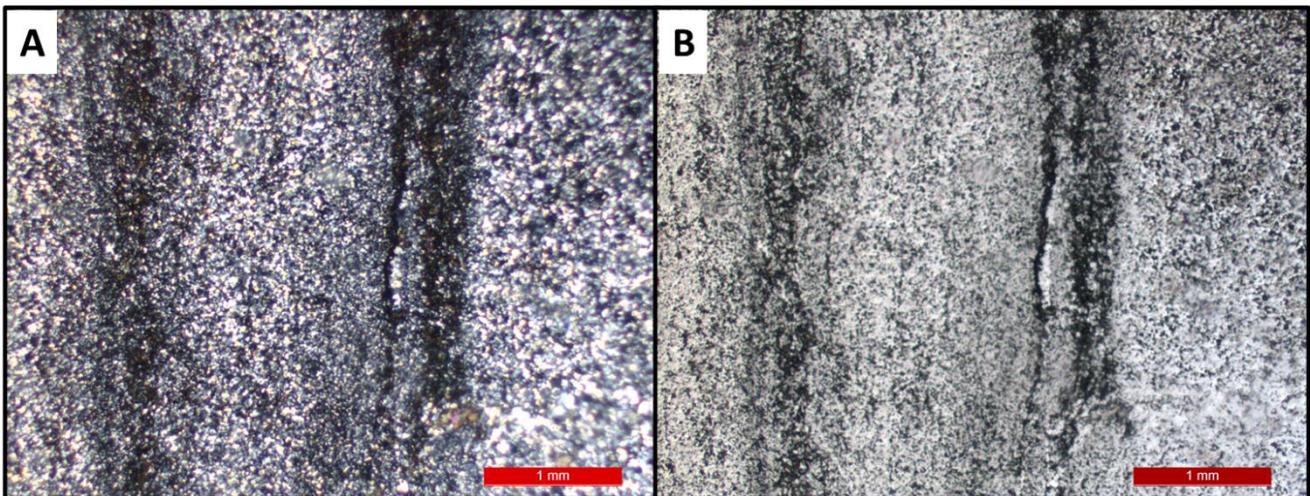


Figura 52: A) Bandamento composicional milimétrico a submilimétrico definido pela intercalação sucessiva de lâminas quartzosas e carbonáticas (sideríticas) (LT/NC); B) LT/NP.

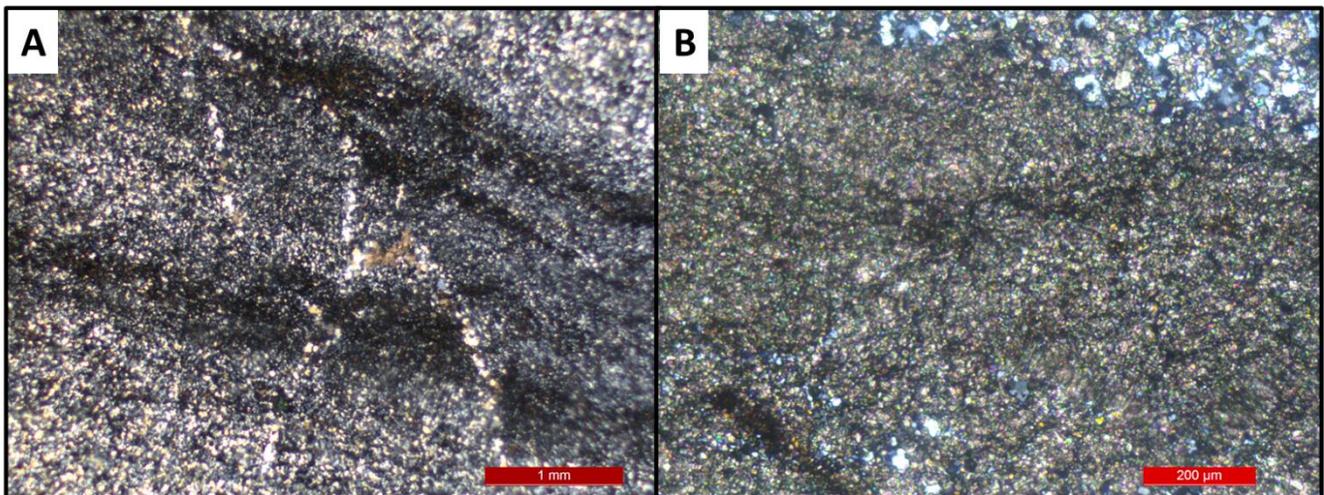
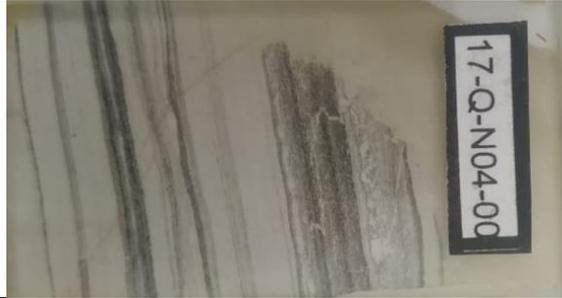


Figura 53: A) Venulações quartzo-carbonáticas discordantes ao bandamento composicional (LT/NC); B) Detalhe da banda carbonática, siderítica, com contribuição ankerítica e níveis de matéria carbonosa (LT/NC).

**Amostra 17QN0400**

**Descrição macro:** Rocha bandada/laminada de granulação fina, com bandamento submilimétrico a centimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a transparentes e bandas cinza escuras a pretas. Dentro das bandas claras, que se apresentam mais espessas, é possível observar um bandamento/laminação caracterizado pela intercalação de bandas transparentes incolores e bandas transparentes com coloração bege. Venulação submilimétrica dobrada, com dobras apertadas, secciona o bandamento e apresenta-se como se o bandamento fosse estrutura plano-axial à dobra.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	29 %		
Quartzo	70 %		
		Outros	
		Matéria carbonosa:	1%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica**

Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por lâminas/bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e lâminas/bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, com predomínio das bandas quartzosas.

Lâmina delgadas, escuras, descontínuas de matéria carbonosa ocorrem muito localmente e geralmente estão restritas às bandas carbonáticas.

Venulações quartzo-carbonáticas ocorrem de forma concordante ao bandamento, apresentando-se localmente dobradas. As venulações apresentam espessura submilimétrica a milimétrica e granulação fina a média, maior que a da rocha, e ocorrem predominantemente associadas às bandas carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, mas também lobados ou irregulares. Nas bandas carbonáticas o quartzo ocorre principalmente como cristais de granulação fina, isolados/dispersos na matriz.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, coloração bege a marrom escuro em nicóis cruzados, e aspecto “sujo”/”manchado” quando observado em nicóis paralelos. Os cristais estão orientados na direção do bandamento composicional (subparalela à foliação). Nas bandas carbonáticas ocorrem também cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa, fina a média, anédricos a subédricos, geralmente com aspecto mais claro, “limpo” e localmente com cor de interferência mais alta.

Nas bandas quartzosas o carbonato ocorre entremeado na matriz como cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, localmente formando agregados.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação das estruturas (bandamento) e mineralogia primária, dominando o quartzo e o carbonato, siderita.

As evidências de alteração hidrotermal são exaltadas pela presença de carbonatos de granulação mais grossa e aspecto claro, “limpo”, que provavelmente são resultado da recristalização e formação de ankerita, e também pelas venulações quartzo-carbonáticas.

### Fotomicrografias

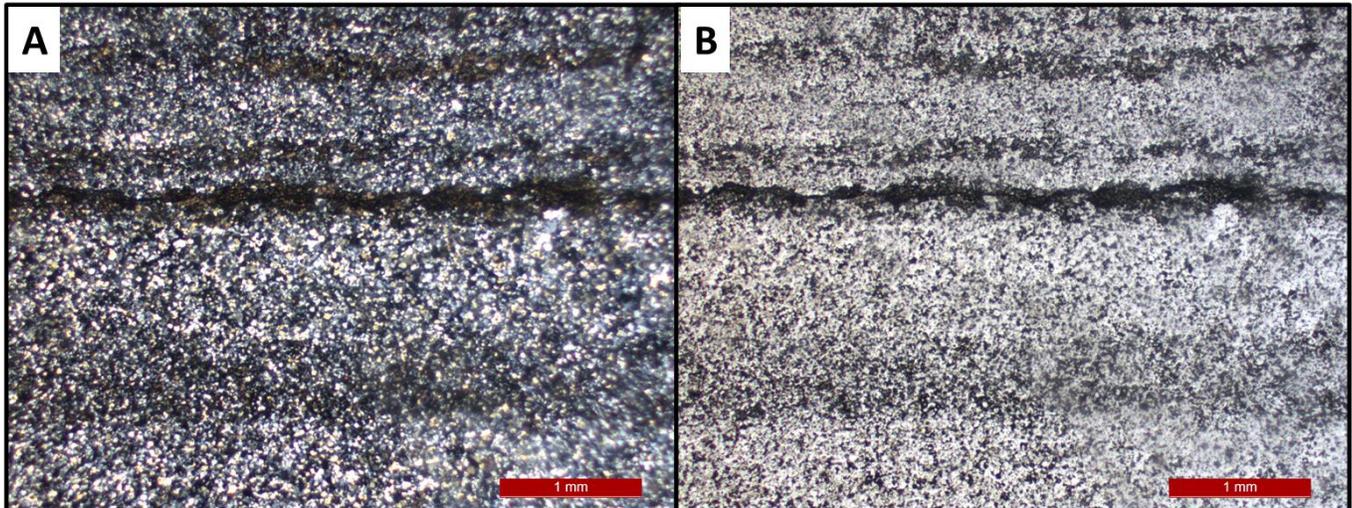


Figura 54: A) Bandamento milimétrico a submilimétrico, com intercalações sucessivas de lâminas quartzosas (predominantes) e carbonáticas (sideríticas) (LT/NC); B) LT/NC.

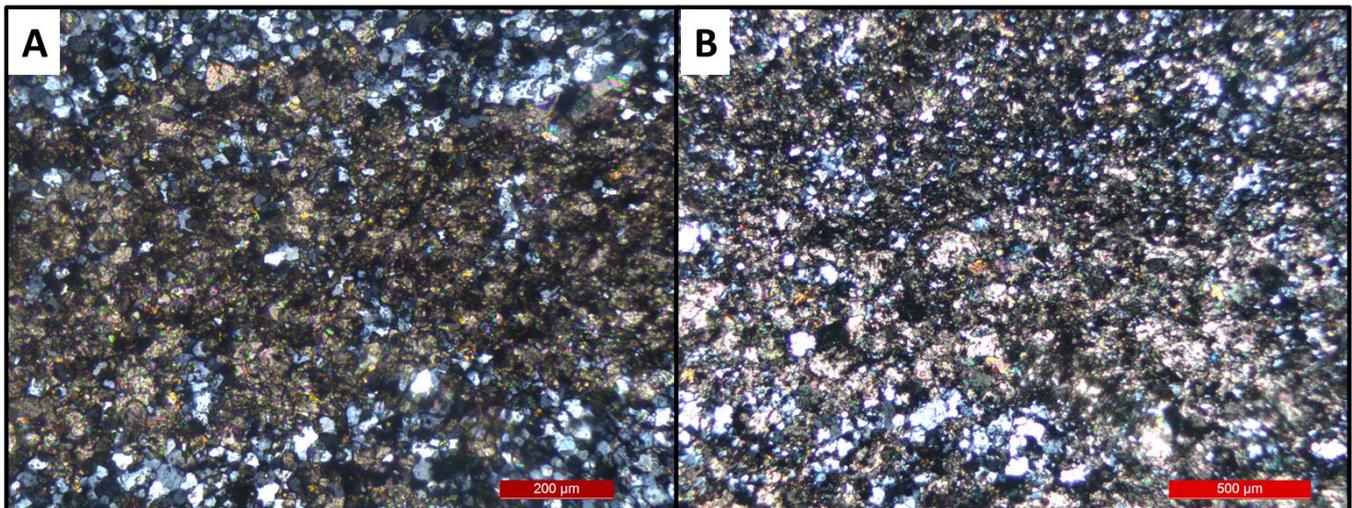


Figura 55: A) Zoom na banda carbonática com contribuição de quartzo: carbonato fino, coloração marrom escura e aspecto “terroso” – siderita – com cristais de granulação pouco mais grossa e superfície mais clara – ankerita (LT/NC); B) Transição entre siderita (parte superior) e ankerita (parte inferior) com quartzo entremeado a matriz (LT/NC).

**Amostra 20CP0036**

**Descrição macro:** Rocha com bandamento planar-paralelo milimétrico a submilimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro/transparentes e bandas cinza escuras a pretas. Cristais de tamanho submilimétrico de brilho metálico (provavelmente sulfetos) ocorrem disseminados pela rocha. Em algumas porções é possível observar cristais euédricos, retangulares, predominantemente nas bandas escuras. Uma venulação de espessura submilimétrica secciona a lâmina transversalmente, com ângulo oblíquo em relação ao bandamento.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	47%	Pirita	1%
Quartzo	50%	Pirrotita	<=1%
		Outros	
		Matéria carbonosa:	2%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica.

As bandas quartzosas, diferentemente das outras lâminas descritas, apresentam uma relação de até 50% com o carbonato, podendo ser denominadas bandas quartzo-carbonáticas. Ambos minerais ocorrem como massas anédricas, entremeadas entre si, sendo difícil a distinção entre cristais. Os cristais de carbonato apresentam cor marrom clara a escura, com aspecto levemente “sujo”, características típicas de siderita.

As bandas carbonáticas são subordinadas em relação às quartzo-carbonáticas, e são dominadas por carbonato de granulação fina, cor marrom escura/claro a bege, subédrico a anédrico (provavelmente siderita). Formam massas disformes entremeadas ao quartzo, que ocorre de forma subordinada.

Cristais de granulação média a grossa de quartzo e carbonato ocorrem de forma restrita.

Nas bandas carbonáticas e localmente nas bandas quartzo-carbonáticas ocorrem lâminas finas, escuras (pretas), opacas, descontínuas a contínuas e concordantes ao bandamento. São descritas como bandas de matéria carbonosa e estão concentradas principalmente em duas bandas carbonáticas, destacando em ambas a coloração preta que sobrepõe à cor marrom-bege do carbonato.

Pirita está disseminada pela lâmina. Dominam cristais euédricos a subédricos, granulação fina a média, aparentemente sobrecrecidos às massas carbonáticas. Podem ocorrer também estirados paralelamente ao bandamento, por vezes com sombra de pressão de quartzo.

Pirrotita ocorre de forma restrita, preferencialmente estiradas paralelamente ao bandamento, sob a forma de palhetas com as bordas arredondadas.

Destaca-se também uma vênula de espessura submilimétrica que secciona o bandamento obliquamente, composta essencialmente por quartzo de granulação média e contatos bem definidos entre os grãos.

**Interpretação:** Características primárias (bandamento e composição mineralógica) apresentam-se preservadas, ao menos visualmente, em escala macro e micro.

Ocorrência disseminada de pirita, mesmo que em baixa proporção considerando-se a lâmina como um todo, indica que a amostra passou por processos significativos de hidrotermalismo.

Venulações são restritas. Em contrapartida, o carbonato apresenta características típicas da siderita, que representa a fase primária de precipitação, com ocorrência muito restrita de ankerita.

### Fotomicrografias

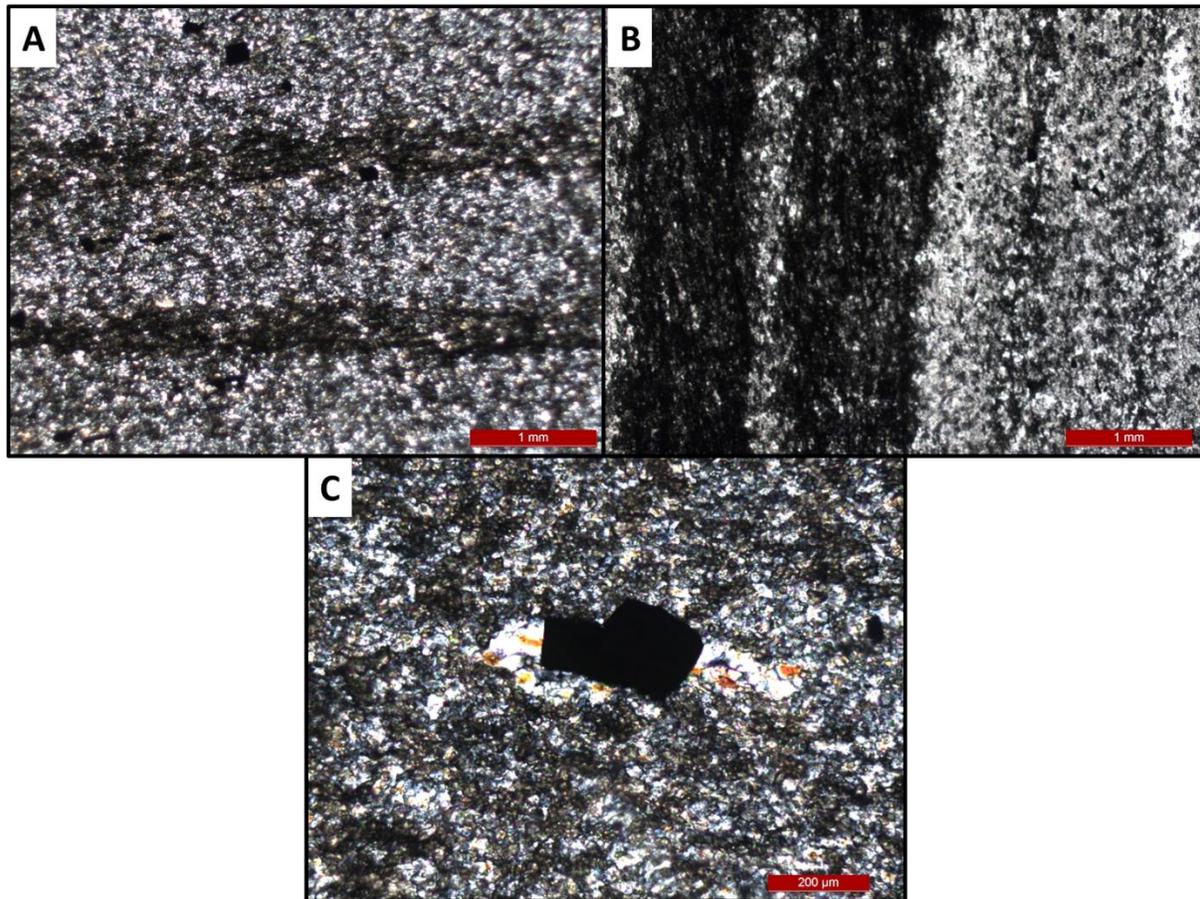


Figura 56: A) Bandamento milimétrico definido pela intercalação sucessiva de lâminas quartzosas e lâminas sideríticas (submilimétricas) (LT/NC) ; B) Bandamento milimétrico definido pela intercalação sucessiva de lâminas quartzosas e lâminas sideríticas com contribuição de matéria carbonosa – material de coloração escura, disposto de maneira concordante à banda carbonática (LT/NP); C) Cristal de pirita euédrico sobrecrecido à matriz quartzo-carbonática, com sombra de pressão de quartzo (LT/NC).

**Amostra 21QN04**

**Descrição macro:** Rocha com aspecto maciço, granular, transparente, com coloração branca a bege claro. Alguns traços de espessura submilimétrica e coloração branca ocorrem seccionando a lâmina transversalmente.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos
Carbonatos	10%	
Quartzo	90%	
		Outros
		Matéria carbonosa: <1%

**Nome da rocha:** *Chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação fina, textura granoblástica e aspecto maciço. A rocha é composta essencialmente por quartzo com ocorrências de massas/lâminas dispersas e delgadas de agregados de carbonatos finos.

Matéria carbonosa ocorre muito restritamente como pequenas lâminas ou inclusões associada a porções dos domínios carbonáticos.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos entre os grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, mas ocorrem também contatos lobados e irregulares.

Carbonato: ocorrem como agregados de cristais anédricos de granulação fina e aspecto “sujo”, coloração marrom a bege, que se encontram entremeados e isolados na matriz. Esses agregados estão localmente orientados, como se definissem um bandamento reliquiar. Localmente ocorrem cristais de granulação fina a média, subédricos a euédricos, coloração bege, aspecto ainda “sujo” mas pouco mais “limpo”, isolados na matriz.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação da mineralogia primária, dominando o quartzo e o carbonato, siderita.

As evidências de alteração hidrotermal são associadas pela presença restrita de carbonatos de granulação mais grossa e aspecto claro, “limpo”, que provavelmente são resultado da recristalização e formação de ankerita.

## Fotomicrografias

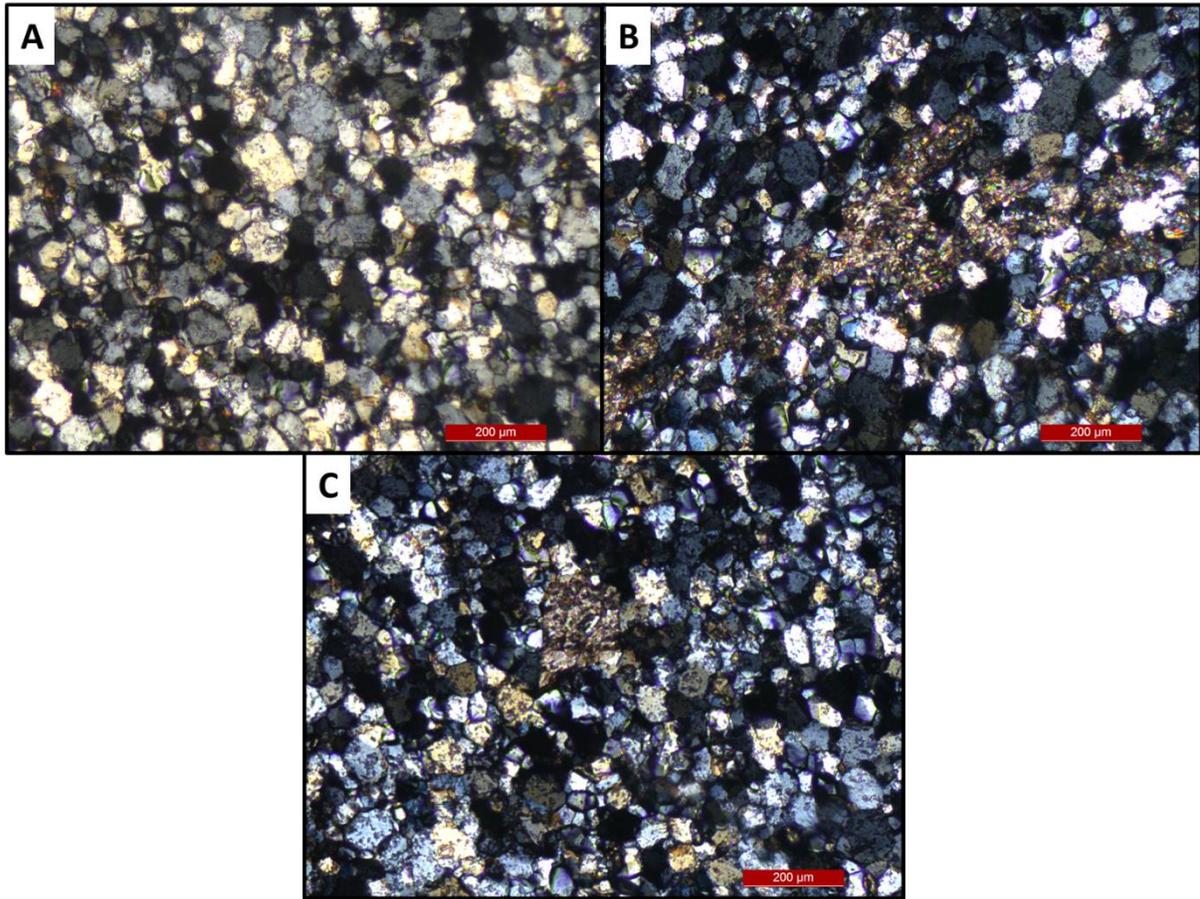


Figura 57: A) Detalhe da banda quartzosa, destacando contatos poligonais entre os cristais (LT/NC); B) Detalhe da banda quartzosa com lentes sideríticas intercaladas à matriz (LT/NC); C) Cristal subédrico de carbonato (siderita/ankerita) em meio à matriz quartzosa (LT/NC).

## Amostra 24CR2803



**Descrição macro:** Rocha bandada de granulação fina, com bandamento milimétrico a submilimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a transparentes e bandas cinza escuras a pretas. As bandas claras predominam em relação às escuras. Venulação submilimétrica oblíqua ao bandamento secciona a lâmina por quase toda sua extensão.

## Mineralogia

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	60%	Pirita	<=1%
Quartzo	35%		
		Outros	
		Matéria carbonosa:	5%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e carbonato subordinado, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica.

Lâmina finas, escuras, descontínuas a contínuas de matéria carbonosa ocorrem geralmente restritas às bandas carbonáticas, localmente conferindo um aspecto anastomosado para essas bandas ao contornar cristais de carbonato.

Uma venulação de espessura submilimétrica é observada por quase toda a extensão longitudinal da lâmina, ocorrendo de forma oblíqua ao bandamento. É composta essencialmente por quartzo, com carbonato subordinado. Apresenta granulação fina a média, visivelmente maior que a granulação da rocha.

Quartzo: granulação predominantemente fina. Os contatos dos grãos de quartzo são comumente poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados. Nas bandas carbonáticas o quartzo ocorre principalmente como cristais de granulação fina, isolados/dispersos na matriz.

Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, coloração bege a marrom escuro em nicóis cruzados, e aspecto “sujo”/”manchado” quando observado em nicóis paralelos. Os cristais estão orientados na direção do bandamento composicional (subparalela à foliação). Nas bandas carbonáticas ocorrem também cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa, anédricos a subédricos, geralmente com aspecto mais claro, “limpo” e localmente com cor de interferência mais alta, com tons de rosa e azul claro. Em alguns locais chega-se a ventilar a ideia de porções com carbonato de granulação mais grossa tratem-se de venulações concordantes ao bandamento, porém, não há como chegar a uma conclusão definitiva.

Nas bandas quartzosas o carbonato ocorre entremeado na matriz como cristais de granulação fina, anédricos, localmente formando agregados, ou como cristais de granulação fina a média, euédricos e subédricos, de granulação fina a média e com aspecto mais claro do que o carbonato da matriz.

Pirita: cristais de pirita ocorrem isoladamente, como minerais acessórios.

**Interpretação:** Rocha apresenta um bom grau de preservação das estruturas (bandamento) e mineralogia primária, dominando o quartzo e o carbonato, siderita.

As evidências de alteração hidrotermal são exaltadas pela presença restrita de pirita e de carbonatos de granulação mais grossa e aspecto claro, “limpo”, que provavelmente são resultado da recristalização e formação de ankerita.

### Fotomicrografias

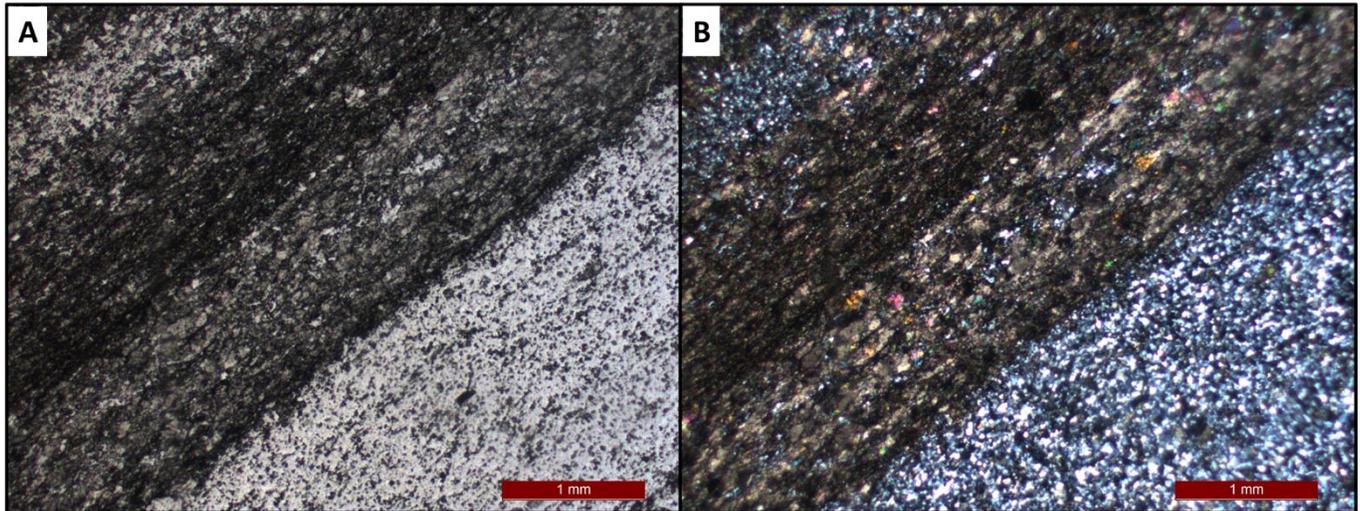


Figura 58: A) Bandamento milimétrico definido pela intercalação sucessiva de bandas quartzosas e bandas carbonáticas (sideríticas/ankeríticas) com contribuição de matéria carbonosa. Destaque para lente de matéria carbonosa no contato entre banda carbonática e quartzosa (LT/NP); B) LT/NC.

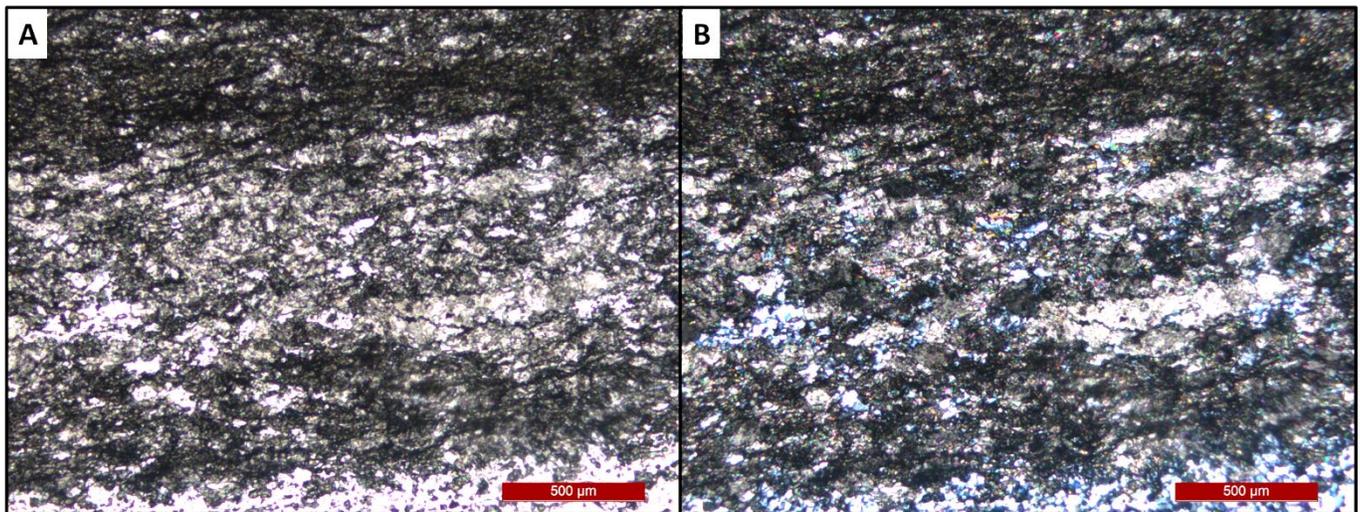


Figura 59: A) Zoom na banda carbonática, com a presença de carbonato fino e aspecto terroso, carbonato de granulação fina/média com superfície lisa e “limpa”, matéria carbonosa e quartzo subordinado (LT/NP); B) LT/NC.

**Amostra 01CR2726**

**Descrição macro:** Rocha bandada, coloração predominantemente clara e com granulação fina. O bandamento é definido pela intercalação de bandas milimétricas a centimétricas de coloração preta a cinza escura, com bandas mais espessas de coloração clara a transparentes. Os níveis escuros formam massas de granulação fina, localmente dobradas e deformadas. Lâminas escuras, extremamente finas e descontínuas, e aparentemente de mesma composição dos níveis escuros que definem o bandamento, também ocorrem de forma concordante ou não ao bandamento. Venulações ocorrem disseminadas.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonato	24%	Pirita/Pirrotita	2%
Quartzo	43%	Magnetita	23%
Stilplomelano	8%		

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso hidrotermalmente alterado

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação fina, com textura granoblástica e bandamento, milimétrico a centimétrico, definido por níveis ricos em magnetita e carbonato (aparentemente siderita), intercalados com níveis mais espessos ricos em quartzo com carbonato subordinado e localmente com alguma magnetita. Localmente as bandas ricas em magnetita podem estar associadas com pirita. Pelas relações de contato entre grãos e pela maneira como ocorre, a magnetita parece estar sobrecrescida ao carbonato, sendo assim, possivelmente, uma fase posterior. Nessas bandas, o carbonato ocorre tanto com granulação fina, anédrico a subédrico e aspecto sujo, até carbonatos de granulação mais grossa, anédricos a euédricos.

A magnetita apresenta predominantemente granulação fina, similar à granulação do quartzo que compõe a matriz. Localmente ocorrem cristais pouco mais grossos. Os cristais ocorrem em contato entre si e dessa forma gera-se aspecto de uma massa contínua de granulação fina concentrada em bandas.

Quando em associação com pirita, a magnetita está também sobrecrescida, gerando relictos de pirita em meio aos grãos/massa de magnetita (inclusões). Nesses casos, a pirita forma massas anédricas entremeadas à magnetita. Ocorre também como cristais anédricos a euédricos dispersos pela matriz.

Pirrotita também ocorre, subordinadamente, como cristais isolados, subédricos, ou como massas estiradas/concordantes com o bandamento/foliação.

Quartzo ocorre predominantemente com granulação fina e contatos geralmente retos, poligonais, mas também lobados a serrilhados.

Carbonato ocorre com granulação fina, anédricos a euédricos, tanto entremeados às massas quartzosas, quanto associados às bandas magnetíticas. Em geral, apresentam aspecto “sujo”, terroso, mas com muito menos presença de “sujeira” quando comparado às demais lâminas.

Stilplomelano: cristais de granulação fina, hábito acicular, pleocróicos (cor varia de bege claro a marrom – verde – escuro) e com extinção paralela. Cor de interferência azul a rosa (forte). Ocorrem entre ou próximos

às massas de magnetita, localmente associadas a quartzo e carbonato de granulação grossa, mas também dispersos na matriz entre cristais de quartzo-carbonato. Localmente ocorre com padrão fibro-radial.

Venulações também estão presentes, e ocorrem tanto de forma discordante quanto de forma concordante. São reconhecidas principalmente pelos cristais de quartzo e carbonato de granulação grossa.

**Interpretação:** De maneira geral a rocha encontra-se fortemente alterada. Presença de vênulas com cristais de carbonato e quartzo de granulação grossa, cristais de carbonato pouco mais grossos que a matriz, aparentemente recristalizados e/ou hidrotermais, também ocorrem disseminados. A ocorrência de sulfetos em associação com a magnetita também corrobora a alteração. A magnetita está, visualmente, sobrecrecida à rocha original, obliterando e/ou substituindo as bandas carbonáticas (ricas em ferro).

### Fotomicrografias

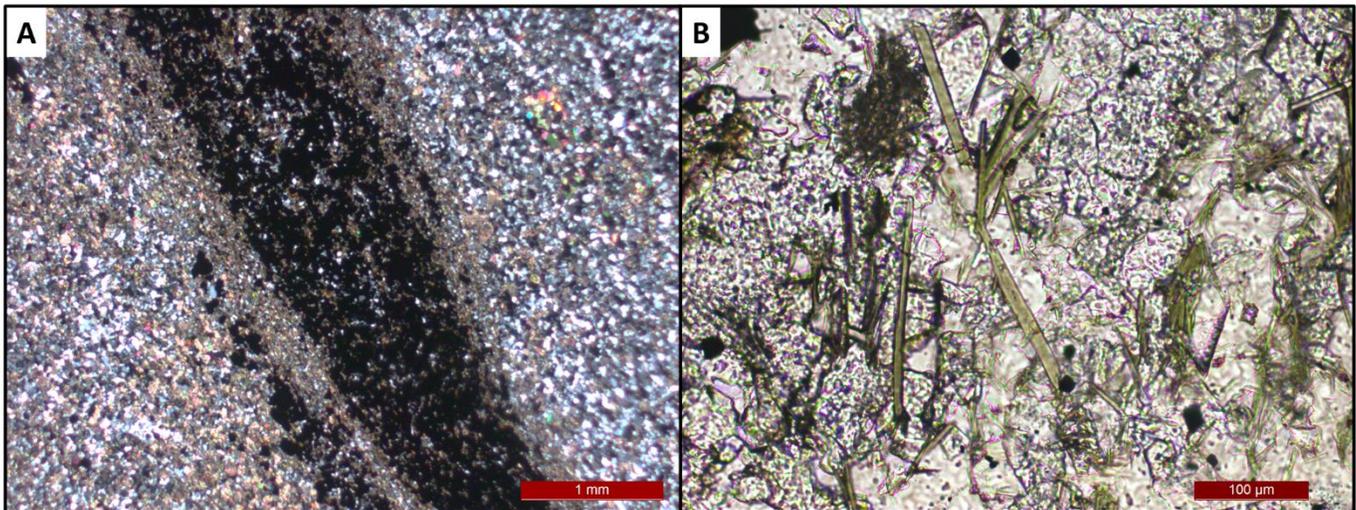


Figura 60: A) Bandas ricas em magnetita (escura) sobrecrecida ao carbonato fino e de aspecto terroso (siderita), intercaladas às bandas quartzosas, com ocorrência de carbonato (siderita/ankerita) subordinado (LT/NC); B) Zoom na banda carbonática/magnetítica, com a ocorrência de cristais aciculares de stilpnomelano (LT/NP).

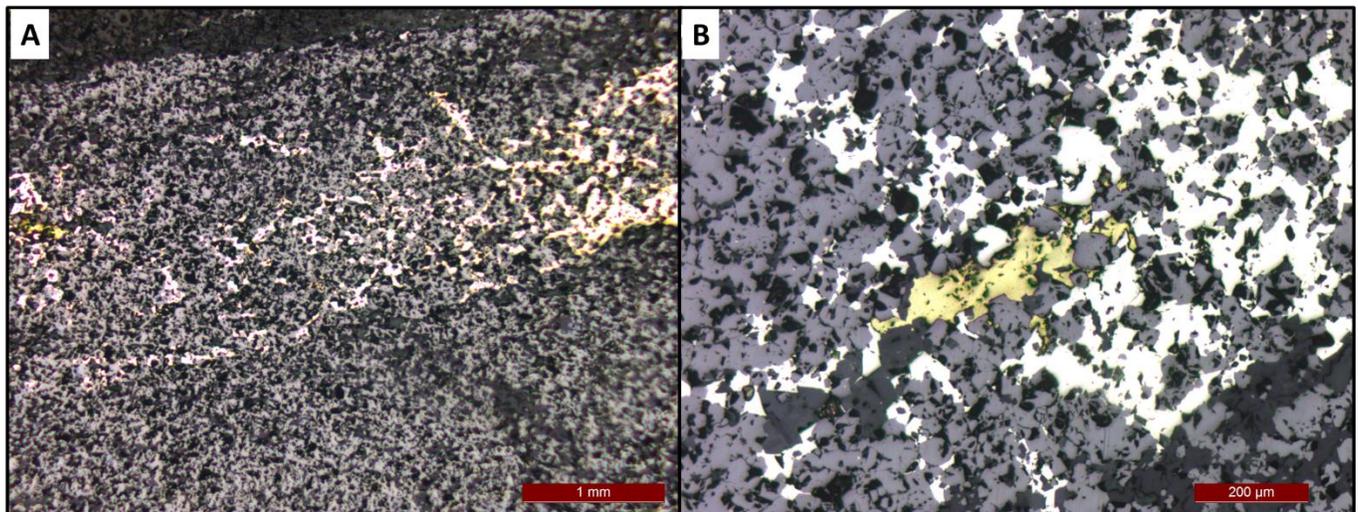


Figura 61: A) Banda magnetítica com pirita e pirrotita dispostos de maneira concordante ao bandamento. Ocorrência localizada de calcopirita. (LR/NC); B) Zoom na banda magnetítica com destaque para cristal de calcopirita envolto com pirita anédrica (LR/NC).

**Amostra 05CR2760**

**Descrição macro:** Rocha com textura granoblástica e aspecto maciço, com granulação fina a grossa, e predominantemente incolor e transparente. A rocha é composta essencialmente por mineral incolor de granulação fina, dominante na matriz, associado a cristais subesféricos, brancos a beges, de granulação fina a média que se encontram dispersos e sulfetos de granulação fina a grossa, anédricos a euédricos, placóides a cúbicos, disseminados por toda a lâmina. Em direção a borda inferior da lâmina a granulação da rocha aumenta, com ocorrência e domínio de cristais de granulação grossa de sulfetos e carbonatos, localmente formando agregados – massas de coloração bege. Venulações de espessura submilimétrica ocorrem de forma esparsa e dobradas.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Carbonatos	45%	Pirita/Pirita arsenical	9 %
Quartzo	45%	Arsenopirita	1%
		<b>Outros</b>	

**Nome da rocha:** Minério de Au

**Descrição microscópica**

Rocha inequigranular e textura granoblástica composta essencialmente por quartzo, carbonato e sulfetos. A matriz é fina, granoblástica, sendo dominada por cristais de quartzo e carbonato entremeados. O quartzo é subédrico a anédrico, com contatos lobados a poligonais e extinção ondulante.

O carbonato ocorre como cristais de granulação fina a média, entremeados à matriz ou também como cristais isolados, dispersos, de granulação média a grossa, subédricos a euédricos. Possuem coloração bege clara, com superfície que varia de lisa a “terrosa”.

Venulações quartzo-carbonáticas ocorrem seccionando a lâmina em diversas porções, geralmente com cristais de granulação grossa, destoantes em relação à matriz.

Sulfetos ocorrem disseminados e em agregados por toda a lâmina. São descritos pirita, pirita arsenical e arsenopirita.

Pirita ocorre como cristais de granulação média a grossa, geralmente euédricos, mas também anédricos a subédricos, sobrecrescidos à matriz. Apresentam inclusões de carbonato.

Em algumas porções, há uma gradação para domínios de pirita-arsenical, e também o contato de pirita e arsenopirita.

Cristais de arsenopirita apresentam hábito tabular típico, em formato de agulha. São comumente euédricos, com granulação média. Ocorrem de maneira subordinada à pirita, disseminados na matriz quartzo-carbonática.

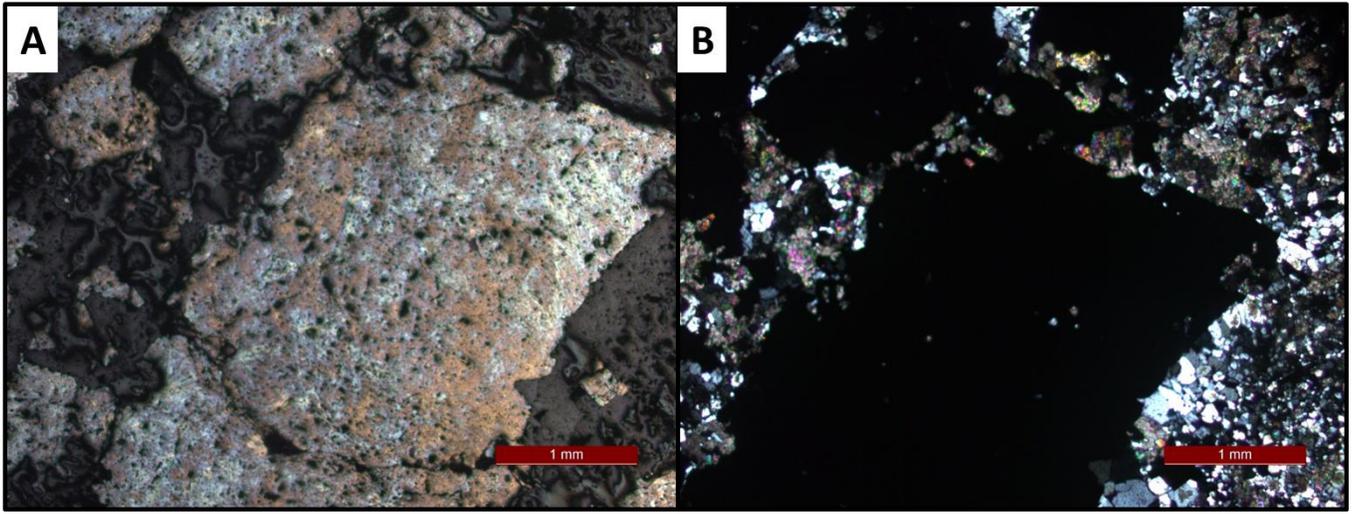
**Fotomicrografias**

Figura 62: A) Cristais euédricos de granulação grossa de pirita arsenical sobrecrescidos à matriz quartzo-carbonática (LR/NP); B) LT/NC.

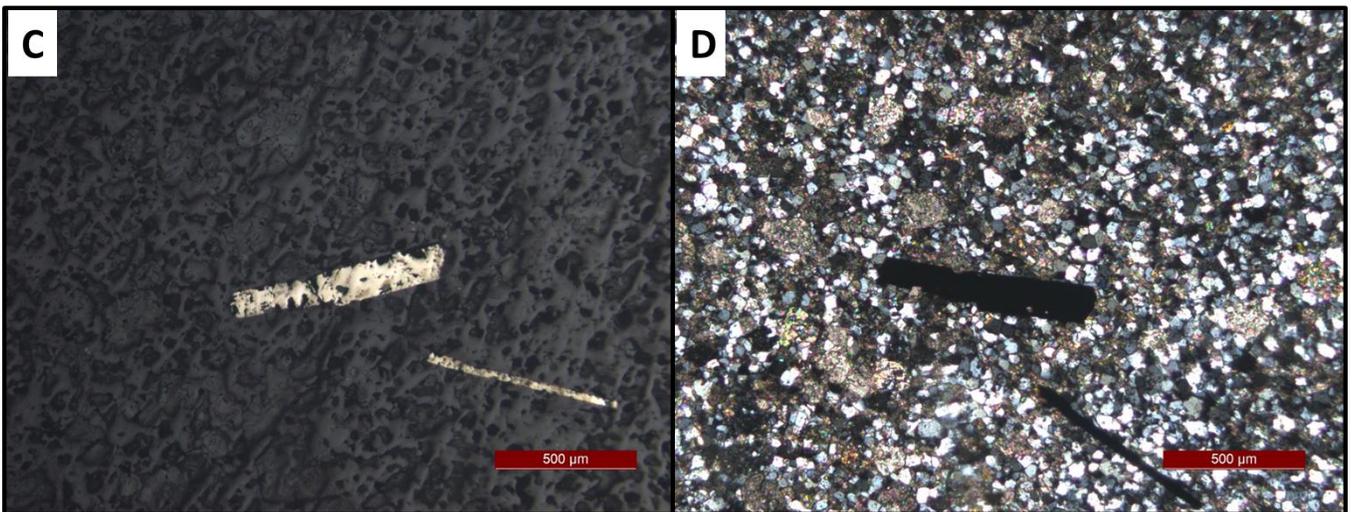


Figura 63: C) Cristais euédricos aciculares de arsenopirita sobrecrescidos à matriz quartzo-carbonática fina (LR/NC); D) LT/NC.

**Amostra 06CR2765**

**Descrição macro:** Rocha de granulação fina a grossa, coloração bege clara a incolor, com bandamento reliquiar visível. O bandamento é caracterizado por uma laminação, identificada pela intercalação sucessiva de bandas incolores, beges e cinzas escuras. Essa estrutura é sobreposta por agregados de cristais de granulação fina a grossa que formam massas beges, provavelmente compostas por carbonato, estiradas segundo o bandamento/foliação. Sulfetos, pirita e pirrotita, ocorrem também associados a essas massas. Cristais de pirita ocorrem com granulação média, anédricos, enquanto a pirrotita ocorre como massas anédricas estiradas segundo o bandamento/foliação, contornando os cristais de carbonato.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	40%	Pirita/Pirita arsenical	18 %
Quartzo	30%	Pirrotita	12%
Clorita	<=1%		
		Outros	

**Nome da rocha:** Minério de Au

**Descrição microscópica**

Rocha inequigranular e textura granoblástica composta essencialmente por quartzo, carbonato e sulfetos. A matriz apresenta granulação que varia de fina a média, com textura granoblástica. A lâmina pode ser separada em dois domínios: (i) – Massa carbonática entremeada com sulfetos; (ii) – Porções quartzo-dominadas, com bandamento reliquiar.

O domínio (i) é carbonato dominado. O carbonato possui granulação predominantemente média a grossa e encontra-se alinhado com e localmente estirado segundo uma foliação que é concordante ao bandamento reliquiar. Os cristais são anédricos a euédricos e possuem cor bege clara e superfície que varia de textura de lisa a terrosa (aparentemente com algumas inclusões).

Os minerais opacos são pirita e pirrotita e ocorrem entremeados à massa carbonática segundo a foliação. A granulação pode variar de fina a grossa. São anédricos a euédricos, apresentando hábito cúbico a tabular (pirita e pirrotita, respectivamente).

O domínio (ii) é composto essencialmente por quartzo com intercalações de bandas carbonáticas reliquiarias da FFB. O quartzo tem granulação fina, cristais anédricos, com contatos poligonais a lobados, podendo apresentar extinção ondulante. As bandas carbonáticas são dominadas por carbonato de granulação grossa, semelhantes aos tipos descritos no domínio (i).

Venulações compostas por quartzo-carbonato e sulfeto seccionam a lâmina em diversas direções.

Clorita ocorre como mineral acessório. Descrita com granulação fina, formando lentes delgadas no contato entre bandas carbonáticas e quartzosas.

## Fotomicrografias

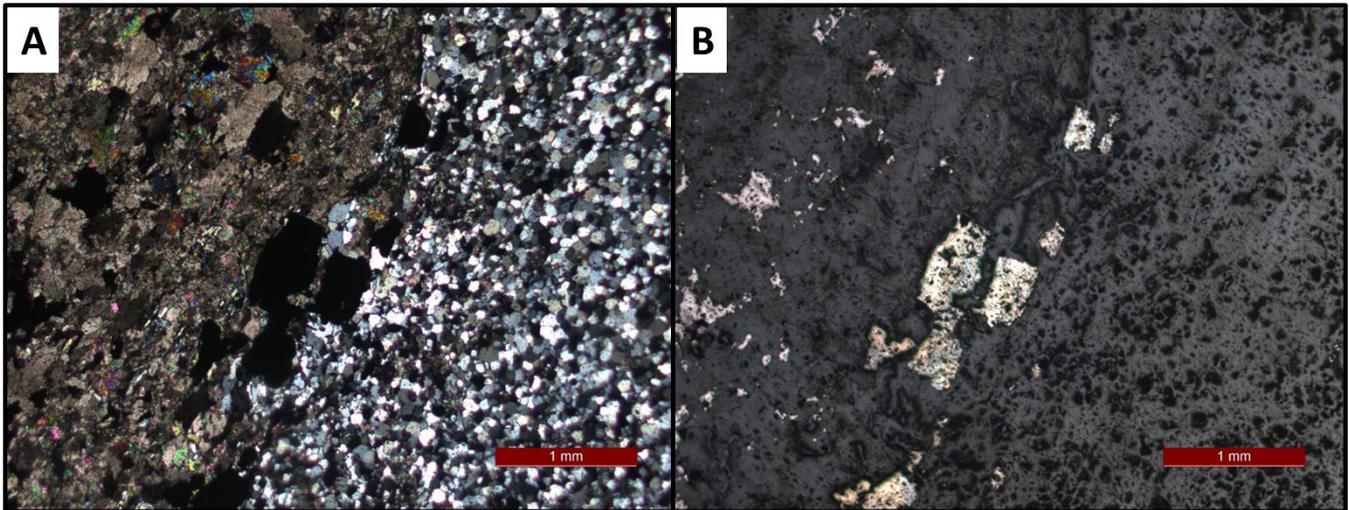


Figura 64: A) Cristais euédricos de pirita/pirita arsenical de granulação média no contato entre banda carbonática e banda quartzosa. Banda carbonática com intercalação de cristais de granulação fina a média, textura lisa a “terrosa” e coloração bege clara a escura (LT/NC); B) LR/NC.

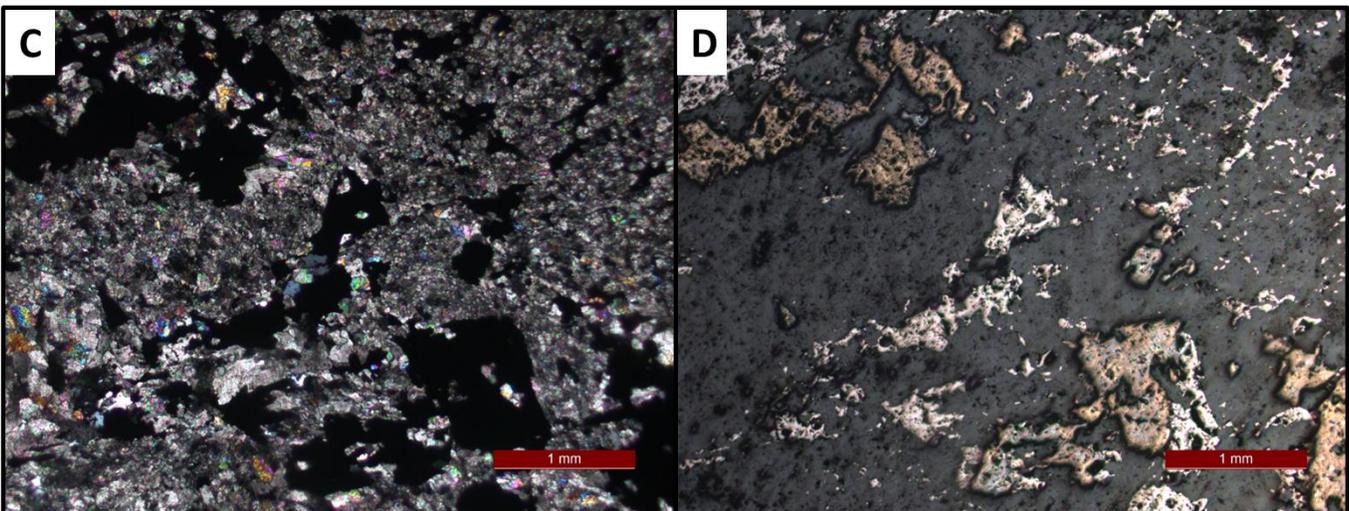


Figura 65: C) Cristais de anédricos a subédricos de pirita/pirita arsenical/pirrotita sobrecrecidos à matriz carbonática. Os carbonatos apresentam granulação que varia de fina a média, textura lisa a “terrosa” e coloração bege clara a escura (LT/NC); D) LR/NC.

**Amostra 07CR2767**

**Descrição macro:** Rocha bandada/laminada de granulação fina, com bandamento submilimétrico a milimétrico caracterizado pela intercalação sucessiva de bandas cinza claro a transparentes e bandas cinza escuras a pretas. As bandas claras e escuras apresentam-se em proporções aproximadamente semelhantes, com leve domínio das bandas escuras. O bandamento encontra-se levemente ondulado seguindo dobras abertas e seccionado por banda composta por massa de granulação fina de coloração bege amarelada, aparentemente concordante ao bandamento, que na porção central da lâmina está estrangulada, mas que aparenta se expandir em direção às laterais da lâmina. Na parte estrangulada ocorre massa de coloração marrom metálico, provavelmente composta por pirrotita, de tamanho pouco maior que 1 cm. Venulações ocorrem tanto de forma concordante ao bandamento quanto obliquamente. Apresentam espessura submilimétrica e continuidade limitada na escala de observação.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Carbonatos	48%	Pirita	2%
Quartzo	44%	Pirrotita	2%
Clorita/Muscovita	<1%	Outros	
		Matéria carbonosa:	3%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso hidrotermalmente alterado

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação predominantemente fina, textura granoblástica, com bandamento definido por bandas ricas em quartzo e pouco carbonato, e bandas ricas em carbonato e quartzo subordinado. A espessura do bandamento varia de milimétrica a submilimétrica, formando uma laminação, aparentando leve predomínio das bandas quartzosas. Minerais opacos, pirita e pirrotita, ocorrem de maneira restrita, associados às venulações quartzo-carbonáticas ou também sobrecrecidos à matriz, geralmente concordantes ao bandamento.

Destaca-se na porção central da lâmina banda carbonática espessa, com até 3cm, concordante ao bandamento e com estrutura em *pinch and swell*. Essa banda é cortada por venulações quartzo-carbonáticas com pirrotita milimétrica associada e estirada segundo o bandamento. Cristais finos de pirita e pirrotita estão disseminados nessa banda. Cristais finos de clorita e muscovita ocorrem também nas bordas dessa estrutura ou associados às venulações quartzo-carbonáticas que segmentam a banda carbonática principal. Matéria carbonosa ocorre de forma restrita como lâminas estiradas segundo o bandamento, geralmente associada à interface entre as bandas quartzosas e carbonáticas.

Quartzo: granulação predominantemente fina, porém nas regiões venulares há predomínio de granulação média. Os contatos dos grãos de quartzo são poligonais, geralmente retos, raramente lobados ou serrilhados. Carbonato: predominam cristais de granulação fina, anédricos a subédricos, raramente euédricos, com aspecto “terroso” e coloração marrom em nicóis cruzados. Dispersos nas bandas carbonáticas ocorrem

cristais com até 0,5 mm de espessura. Em algumas bandas, cristais de granulação pouco mais grossa também ocorrem de forma concentrada, e podem apresentar aspecto mais “limpo”.

Especificamente na banda carbonática espessa, na região central da lâmina, os carbonatos apresentam granulação fina que grada para granulação média a grossa nas regiões de venulações quartzo-carbonáticas. Formam uma massa de carbonato fino, de coloração pouco mais clara e textura mais lisa do que o carbonato da matriz da rocha, com contatos bem definidos e de aspecto granoblástico.

**Interpretação:** Amostra com alteração a carbonato e sulfeto significativas.

A banda mais espessa de carbonato fino na região central da lâmina é provavelmente um pequeno veio de composição predominante de ankerita. A segmentação da banda carbonática por outras vênulas quartzo-carbonáticas com sulfetos associados também sustenta essa ideia.

### Fotomicrografias

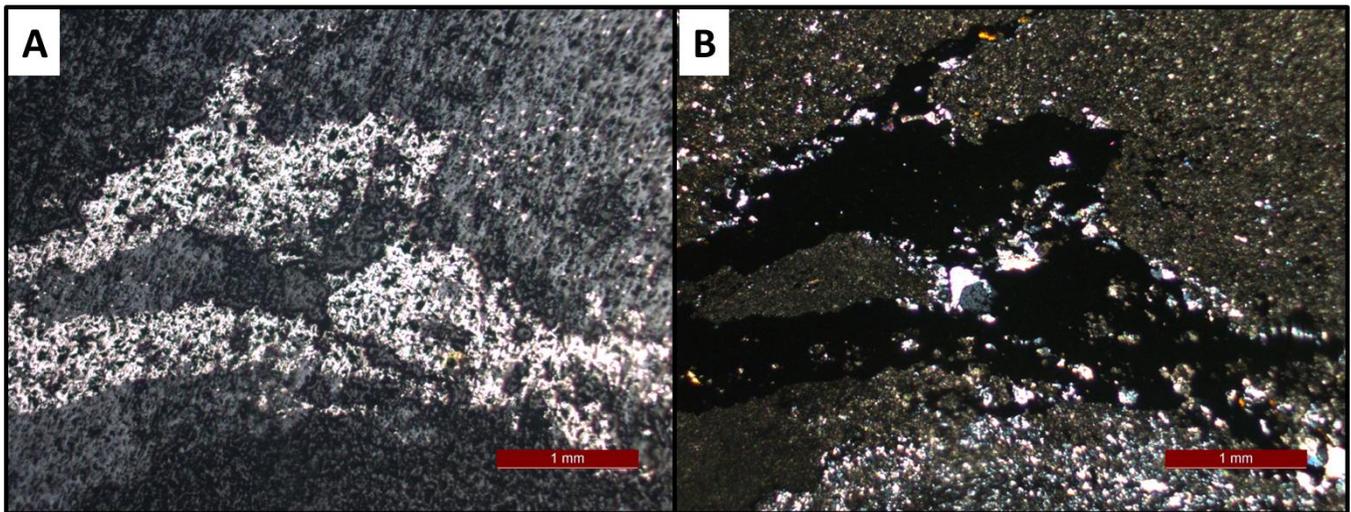


Figura 66: A) Banda de pirrotita anédrica e fina, associada a cristais de quartzo, sobrecrecida à banda carbonática de granulação fina (LR/NC); B) LT/NC.

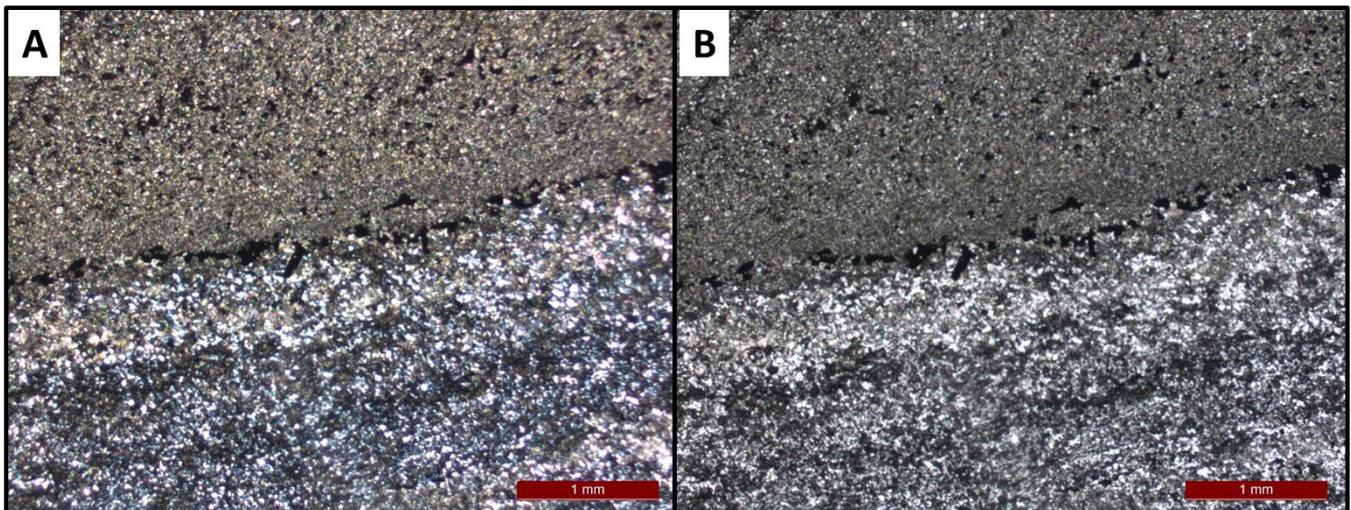


Figura 67: A) Cristais de pirita e pirrotita, subédricos, de granulação média a fina, alinhados ao contato entre banda quartzosa e banda carbonática. Bandamento típico da FFB definido pela intercalação sucessiva de bandas carbonáticas e quartzosas ainda preservado (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 46QM1234**

**Descrição macro:** Rocha bandada, inequigranular, com intercalação de bandas transparentes e bandas marrons/beges. As bandas marrons são compostas essencialmente por sulfetos e carbonato, enquanto as bandas transparentes são compostas por quartzo, contendo sulfetos disseminados. Sulfetos apresentam granulação média a grossa e variam de anédricos a euédricos. Estão aparentemente sobrecrescidos à matriz quartzo-carbonática original da rocha.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Quartzo	45%	Pirita	20%
Carbonatos	25%	Arsenopirita	9%
		Pirrotita	1%

**Nome da rocha:** Minério de Au

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, bandada e foliada, composta essencialmente por sulfetos, quartzo e carbonato. O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas quartzosas e bandas carbonáticas de espessura milimétrica. Com grande intensidade nas bandas carbonáticas, mas também nas quartzosas os sulfetos estão sobrecrescidos à rocha.

O quartzo é fino, anédrico, com contatos poligonais a lobados e extinção ondulante.

O carbonato apresenta granulação que varia de fina a grossa. Quando fino, o carbonato apresenta textura “terrosa” e coloração marrom escura, com a presença de pequenas inclusões em superfície. Quando com granulação mais grossa, o carbonato pode ser euédrico, com hábito tabular, coloração bege clara e superfície lisa. O carbonato está orientado segundo a foliação. Cristais tabulares de granulação grossa encontram-se estirados segundo a foliação, podendo estar associados a sombras de pressão que bordejam os sulfetos.

Sulfetos são pirita, pirrotita e arsenopirita. Pirita é dominante e ocorre predominantemente com granulação grossa, variando de cristais anédricos a euédricos.

Arsenopirita ocorre com cristais finos a grossos, anédricos a euédricos. Quando euédricos possuem hábito tabular a acicular. Quando anédricos, formam massas entremeadas à matriz ou em contato gradual nas bordas dos cristais de pirita, como em um processo de recristalização e/ou substituição.

Pirrotita de maneira mais restrita, nas bandas carbonáticas e quartzosas com hábito acicular. Quando nas bandas carbonáticas podem estar em contato com pirita marcando uma transição entre os dois minerais.

### Fotomicrografias

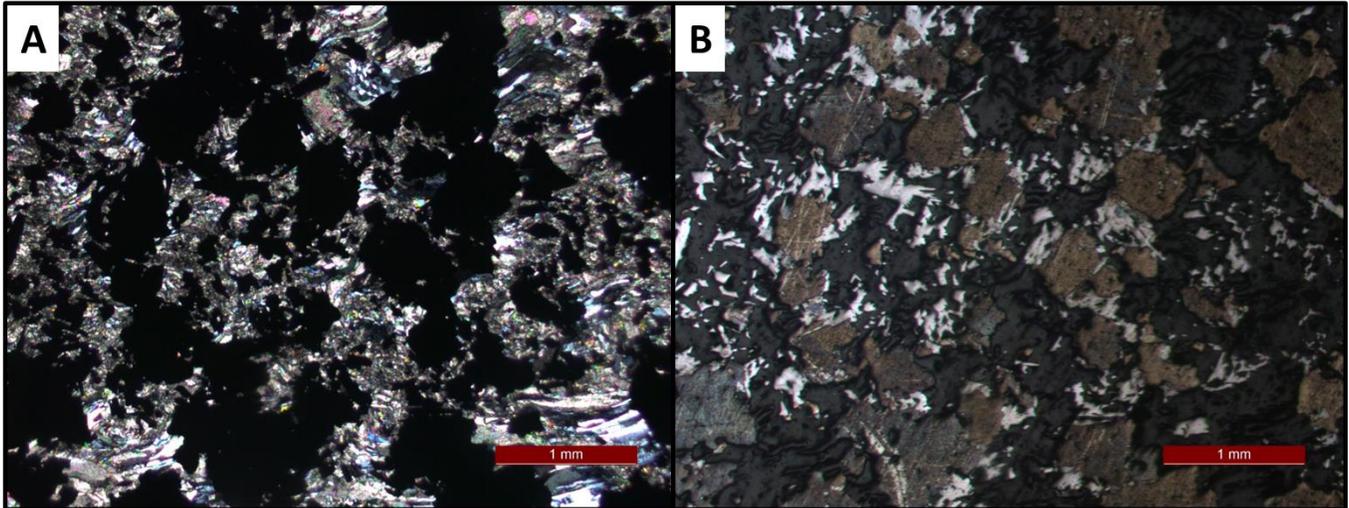


Figura 68: A) Pirita/pirita arsenical e arsenopirita sobrecrescidos à matriz carbonática. Sulfetos apresentam granulação média a grossa e cristais subédricos. Arsenopirita ocorre via de regra nas bordas dos cristais de piritas/pirita arsenical (LT/NC); B) LR/NC.

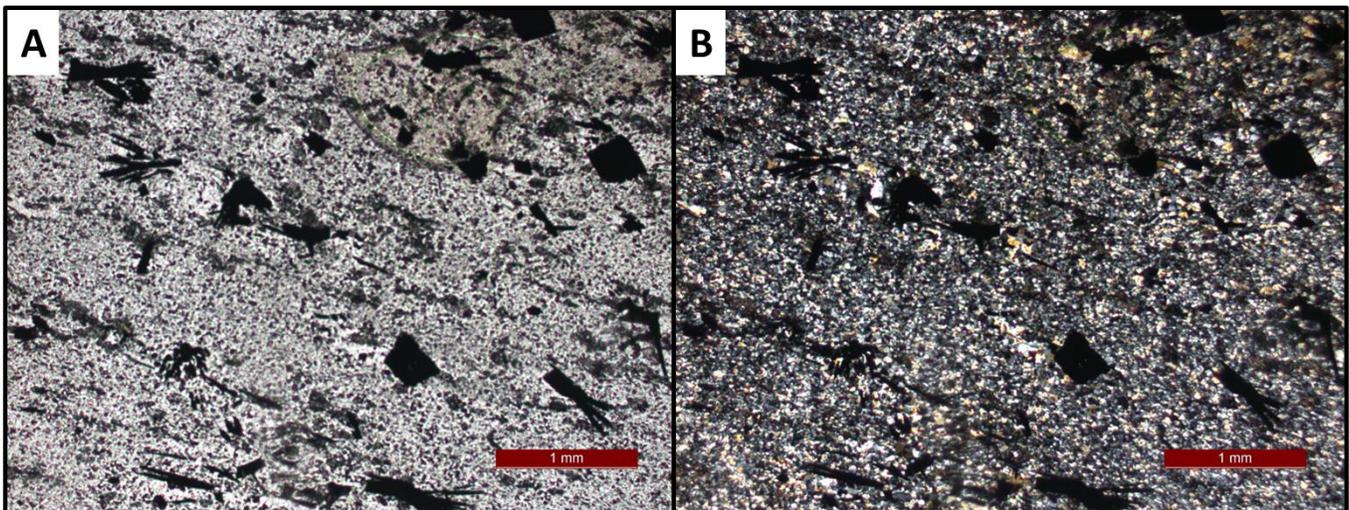


Figura 69: A) Sulfetos, pirita e arsenopirita, sobrecrescidos à matriz quartzosa. Sulfetos são predominantemente euédricos a anédricos com granulação média a grossa (LT/NP); B) LT/NC.

**Amostra 47QM1235**



**Descrição macro:** Rocha inequigranular, granulação fina a média, bandada. O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas incolores (quartzosas) e bandas beges claro (carbonáticas). Sobrepostas às bandas carbonáticas, sulfetos de granulação fina a média, euédricos e hábito cúbico, estão disseminados e dispostos segundo a foliação/bandamento.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Quartzo	49%	Pirita	4%
Carbonatos	45%	Arsenopirita	2%

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso hidrotermalmente alterado

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, bandada e foliada, composta essencialmente por quartzo, carbonato e sulfetos. O bandamento é definido pela intercalação sucessiva de bandas quartzosas e bandas carbonáticas de espessura milimétrica a submilimétrica, bem similar ao já descritos nas amostras de FFB.

O quartzo apresenta granulação fina e contatos que variam de poligonais a lobados. São anédricos e podem apresentar extinção ondulante.

O carbonato é via de regra fino, anédrico, com aspecto terroso e coloração marrom escura, dada, aparentemente por inclusões em sua superfície.

Carbonato e quartzo de granulação pouco mais grossa ocorrem dispersos na matriz ou então associados à venulações que seccionam a amostra. Quando com granulação mais grossa, o carbonato tende a ser subédrico, com textura lisa e coloração clara.

Sulfetos são pirita e arsenopirita e ocorrem geralmente associados às bandas carbonáticas. Pirita é dominante e ocorre com granulação média a grossa, variando de cristais anédricos a euédricos. Quando euédrico a pirita apresenta hábito cúbico. A Arsenopirita ocorre com granulação fina a média, subédrica a euédrico, com hábito tabular a acicular. Está geralmente associada às bandas carbonáticas e mais localmente sobreposta à banda quartzosa.

### Fotomicrografias

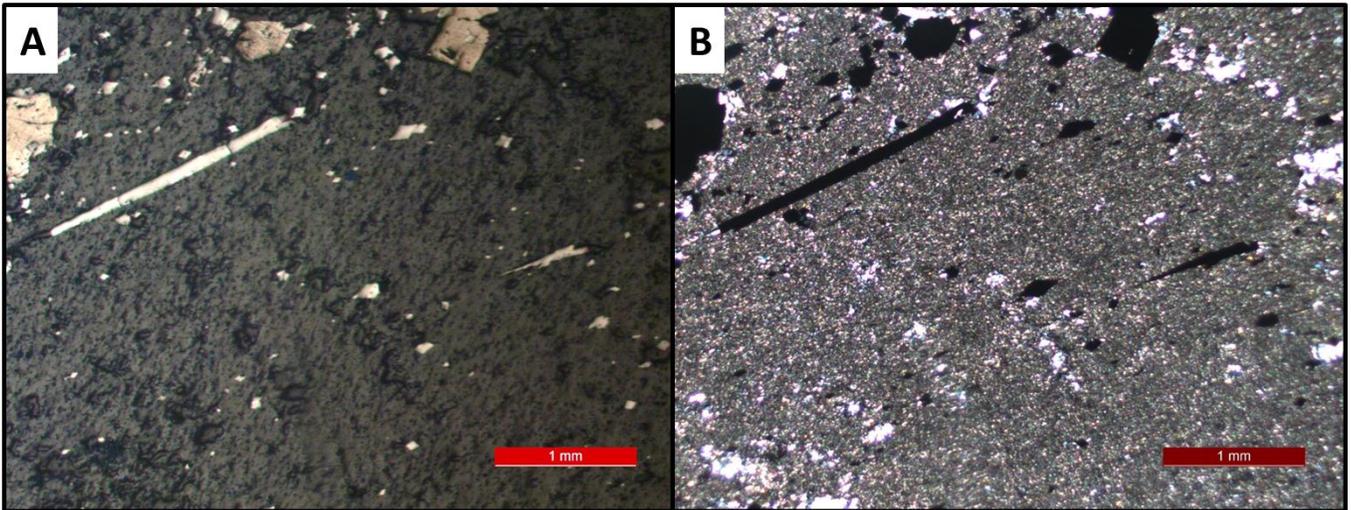


Figura 70: A) Cristais de arsenopirita (hábito acicular) e pirita (hábito cúbico) sobrecrecidos à matriz carbonática e orientados segundo a foliação. Matriz carbonática fina e com aspecto superficial “terroso” (LR/NC); B) LT/NC.

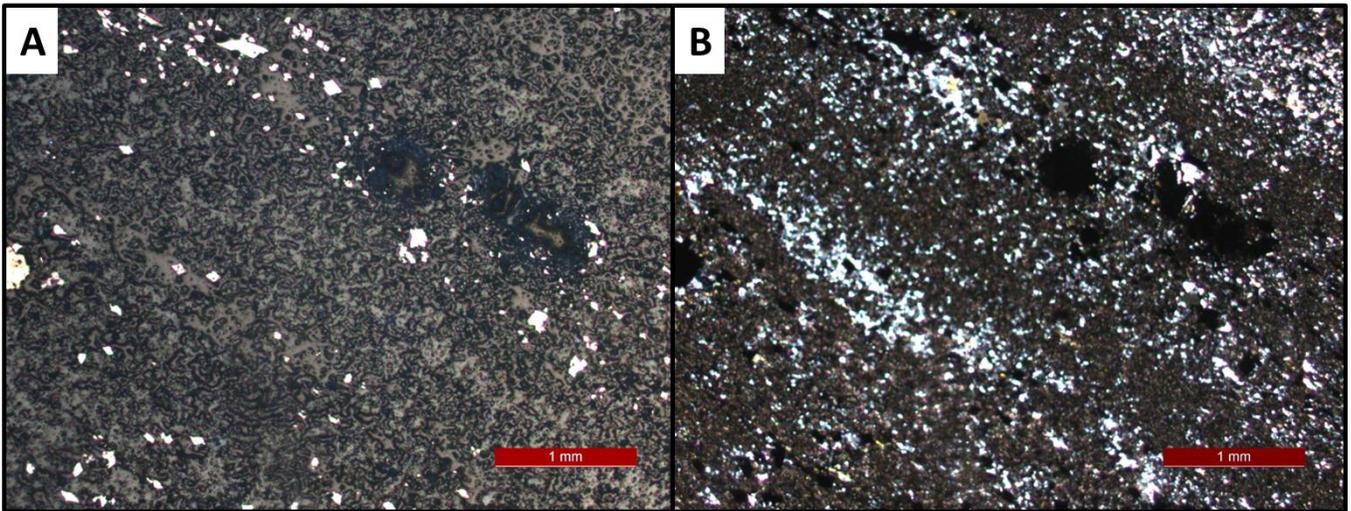


Figura 71: A) Cristais de pirita disseminados entre as bandas quartzo-carbonáticas. Pirita é predominantemente subédrica, com granulação média. Apresenta-se sobrecrecida e geralmente associada às bandas carbonáticas (LR/NP); B) LT/NC.

**Amostra 48CR0168**

**Descrição macro:** Rocha bandada, com bandamento milimétrico a submilimétrico definido pela intercalação sucessiva de bandas escuras e bandas claras. As bandas escuras são finas e gradam para trilhas de cristais euédricos, cúbicos, subordinadas às bandas claras.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Quartzo	60%	Magnetita	15%
Carbonatos	25%	Pirita	<=1%
		<b>Outros:</b>	

**Nome da rocha:** Formação ferrífera bandada/*chert* ferruginoso hidrotermalmente alterado

**Descrição microscópica:** Rocha de granulação fina, com textura granoblástica e bandamento, milimétrico a centimétrico, definido por níveis ricos em magnetita e carbonato, intercalados com níveis mais espessos ricos em quartzo com carbonato subordinado e localmente com alguma magnetita. Localmente as bandas ricas em magnetita podem estar associadas com pirita. Pelas relações de contato entre grãos e pela maneira como ocorre, a magnetita parece estar sobrecrescida ao carbonato fino. Nessas bandas, o carbonato ocorre tanto com granulação fina, anédrico a subédrico e aspecto sujo, até carbonatos de granulação mais grossa, anédricos a euédricos, também associados a veios em contato com as bandas magnetíticas.

A magnetita apresenta predominantemente granulação fina, similar à granulação do quartzo que compõe a matriz. Localmente ocorrem cristais pouco mais grossos. Os cristais ocorrem em contato entre si e dessa forma gera-se aspecto de uma massa contínua de granulação fina concentrada em bandas.

Quando em associação com pirita, a magnetita está também, aparentemente, sobrecrescida, gerando relictos de pirita em meio aos grãos/massa de magnetita (a pirita, em muitos casos, ocorre como inclusão). Nesses casos, a pirita forma massas anédricas entremeadas à magnetita. Ocorre também como cristais anédricos a euédricos dispersos pela matriz.

Pirrotita também ocorre, subordinadamente, como cristais isolados, subédricos, ou como massas estiradas/concordantes com o bandamento/foliação.

Quartzo ocorre predominantemente com granulação fina e contatos geralmente retos, poligonais, mas também lobados.

Carbonato ocorre de duas maneiras: (i) com granulação fina, anédricos a subédricos, tanto entremeados às massas quartzosas, quanto associados às bandas magnetíticas. Em geral, apresentam aspecto “sujo”, terroso; (ii) com granulação fina a grossa, anédricos a euédricos, textura lisa e coloração bege clara. Estão, aparentemente, associados a veios concordantes ao bandamento que bordejam as bandas magnetíticas ou sobrecrescidos à matriz carbonática fina.

Interpretação: De maneira geral a rocha encontra-se fortemente alterada. Presença de vênulas com cristais de carbonato e quartzo de granulação grossa, cristais de carbonato pouco mais grossos que a matriz, aparentemente recristalizados e/ou hidrotermais, também ocorrem disseminados. A ocorrência de sulfetos em associação com a magnetita também corrobora a alteração. A magnetita está, visualmente, sobrecrecida à rocha original, obliterando e/ou substituindo as bandas carbonáticas (ricas em ferro).

### Fotomicrografias

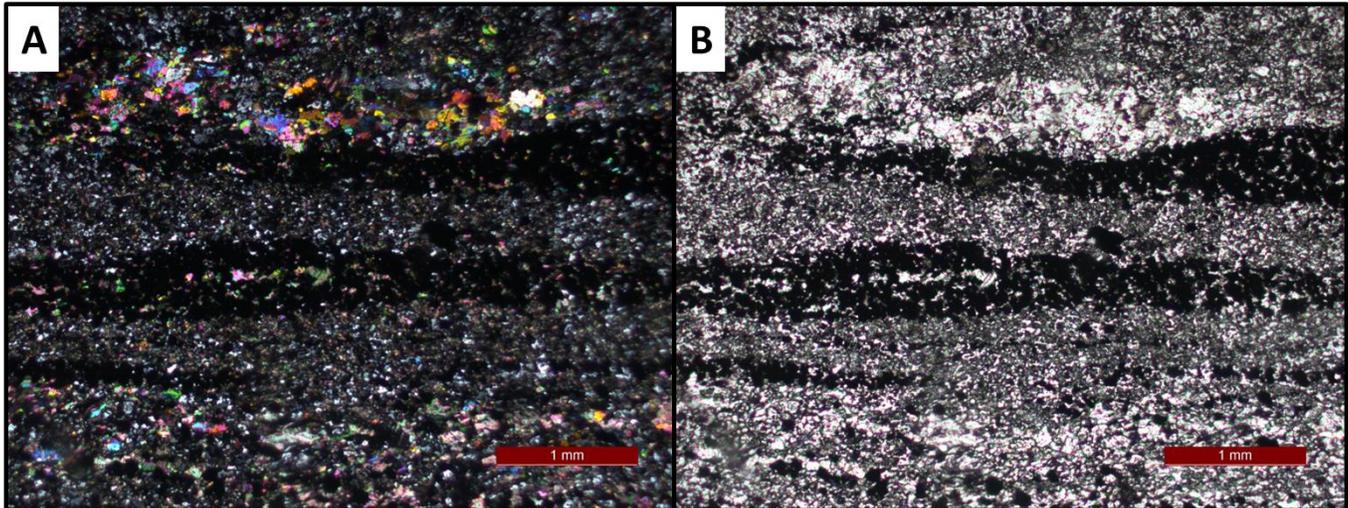


Figura 72: A) Bandamento milimétrico definido pela intercalação sucessiva entre bandas de quartzo e bandas de magnetita. Magnetita subédrica a euédrica, de granulação média a grossa, comumente associada a carbonato de granulação média a grossa e textura lisa (LT/NC); B) LT/NP.

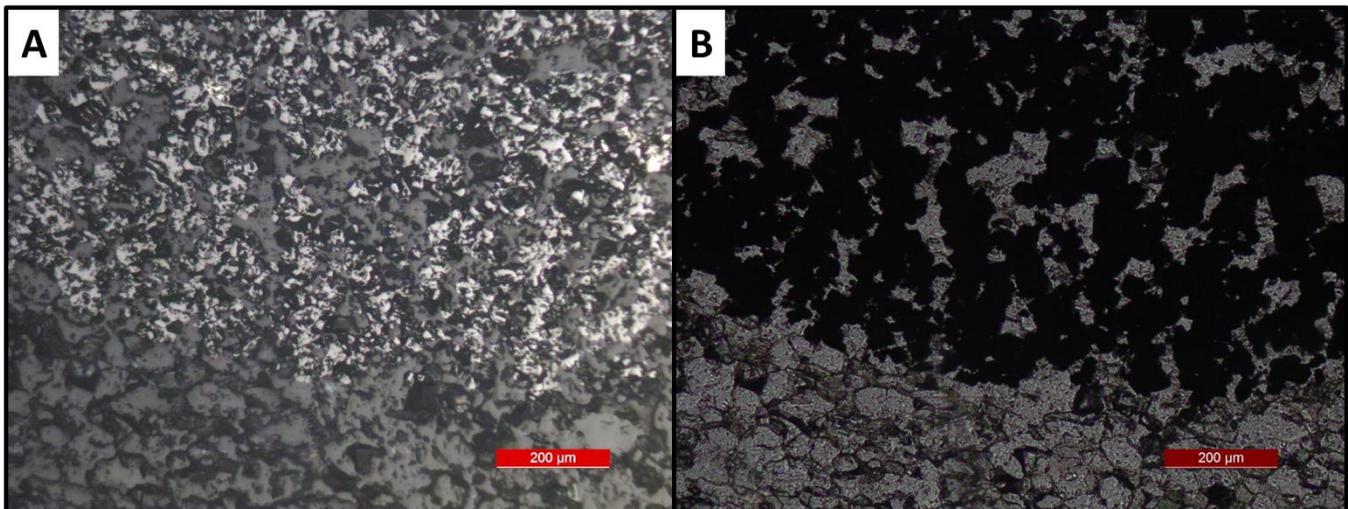


Figura 73: A) Cristais subédricos a euédricos de granulação média a grossa de magnetita sobrecrecidos à banda carbonática (LR/NP); B) LT/NP.

**Amostra 15CR2788**

**Descrição macro:** Rocha com textura predominantemente maciça, granulação fina a média, apresentando foliação incipiente que caracteriza localmente textura granolepdoblástica. Possui coloração verde claro a branco, predominantemente incolor. A trama da rocha é definida pela associação de mineral verde, dominante e que aparentemente define a foliação incipiente, mineral branco comumente esférico, que pode formar agregados e que pode se apresentar estirado seguindo a foliação, e mineral incolor, de aspecto granular, mas que pode se apresentar de forma concordante à foliação. Mineral pouco mais escuro ocorre como cristais finos, anédricos e restritos à porção central da lâmina.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Plagioclásio	25%	Pirita	<1%
Actinolita	25%	Pirrotita	<1%
Carbonatos	20%	Calcopirita	<1%
Epidoto/clinozoisita	20%		
Clorita	9%	Outros	
Quartzo	<1%		-

**Nome da rocha: Andesito/Basalto**

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, de granulação predominantemente fina, localmente média, e textura nematoblástica. A rocha apresenta-se estruturada com uma foliação definida pela orientação de cristais ripiformes de anfibólios, plagioclásio e carbonatos.

A rocha é essencialmente constituída por plagioclásio, epidoto, clinozoisita, actinolita/tremolita, carbonato e clorita. Manchas disformes de coloração cinza escura a preta são interpretadas como leucoxênio. Estão disseminadas na lâmina e conferem um aspecto sujo, como se alguns minerais, principalmente o epidoto, estivessem encobertos por uma poeira. Outros minerais que ocorrem em menor proporção são quartzo e opacos (pirrotita, pirita, calcopirita).

A trama da rocha é composta por uma matriz fina de agregados de clinozoisita, plagioclásio, actinolita, epidoto e clorita, como ocorrências de cristais de granulação mais grossa, como é o caso dos carbonatos.

De maneira geral, a clinozoisita ocorre como pseudomorfo da albita, em muitos casos apresentando hábito tabular característico dos cristais de plagioclásio. Predominam cristais anédricos (clinozoisita e epidoto), geralmente com granulação semelhante à da matriz ou pouco mais grossa, e em algumas porções como porfiroblastos. Os cristais são comumente arredondados, levemente alongados. Como características diagnósticas o epidoto apresenta cores de interferência entre primeira e segunda ordem, localmente com variações concêntricas nas cores de interferência. A clinozoisita apresenta cor de interferência azul anômala a amarelo pálido. Esses minerais estão comumente encobertos por uma poeira de aparência fina e escura, descrita como leucoxênio.

O plagioclásio, predominantemente albita, apresenta-se com granulação fina a média, cristais euédricos a anédricos e hábito tabular. Ocorrem como um dos constituintes principais da matriz, como cristais reliquiares, principalmente estirados segundo a foliação. Cristais de granulação pouco mais grossa (média) ocorrem dispersos pela matriz, de forma isolada, por vezes apresentando planos de geminação que definem as maclas da albita e Carlsbad. Cristais de albita estão comumente pseudomorfizados por clinozoisita.

A actinolita ocorre como cristais finos na matriz ou cristais de granulação média, geralmente subédricos a anédricos. Apresentam hábito tabular, ripiforme, geralmente alongados. A cor de interferência varia de primeira a segunda ordem, predominando laranja, com pleocroísmo entre verde claro a incolor.

Epidoto e clinozoisita ocorrem como cristais anédricos, geralmente com granulação semelhante à da matriz ou pouco mais grossa e em algumas porções como porfiroblastos. Os cristais são comumente arredondados, levemente alongados. Como características diagnósticas o epidoto apresenta cores de interferência entre primeira e segunda ordem, localmente com variações concêntricas nas cores de interferência. A clinozoisita apresenta cor de interferência azul anômala a amarelo pálida. Esses minerais estão comumente encobertos por uma poeira de aparência fina e escura, descrita como leucoxênio.

Clorita ocorre de forma mais restrita como cristais finos entremeados na matriz. São subédricos a anédricos, incolores, com pleocroísmo que varia de incolor a verde claro. Localmente ocorrem como agregados associados ao plagioclásio.

Cristais de carbonato apresentam granulação média, são subédricos a anédricos, predominando cristais tabulares orientados segundo a foliação da rocha. Não apresentam pleocroísmo e sob nicóis cruzados têm coloração que varia entre bege a rosa/verde claro, associado a cor de interferência de alta ordem. Os cristais estão aparentemente sobrecrescidos à matriz e estão comumente associados a opacos (sulfetos) e ao epidoto e a clinozoisita.

Quartzo ocorre como mineral acessório, com cristais de granulação fina, anédricos, dispersos pela matriz, ou localmente associados e sombras de pressão nos carbonatos.

Sulfetos e opacos são também acessórios e apresentam granulação fina. Estão dispersos pela matriz da rocha ou associados aos cristais de carbonato, quando apresentam granulação mais grossa do que o padrão apresentado na matriz. São descritos pirita, pirrotita e calcopirita.

## Fotomicrografias

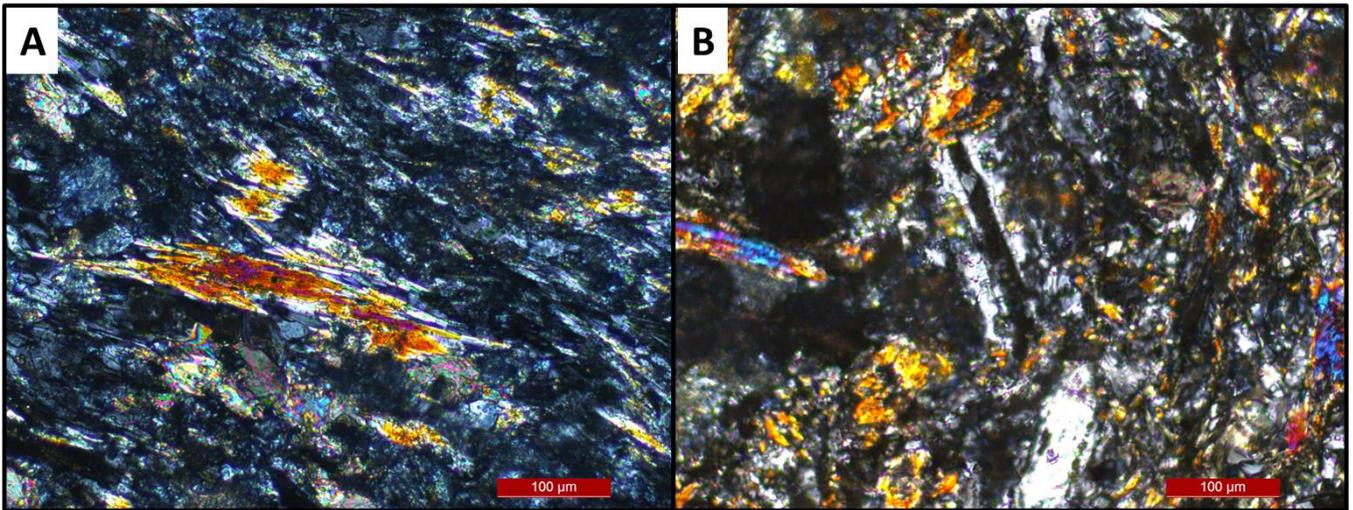


Figura 74: A) Porfiroblastos de actinolita em matriz composta por clorita, feldspato e clinozoisita (LT/NC); B) Cristais de plagioclásio com macla da albita em contato com epidoto, actinolita e carbonato (LT/NC).

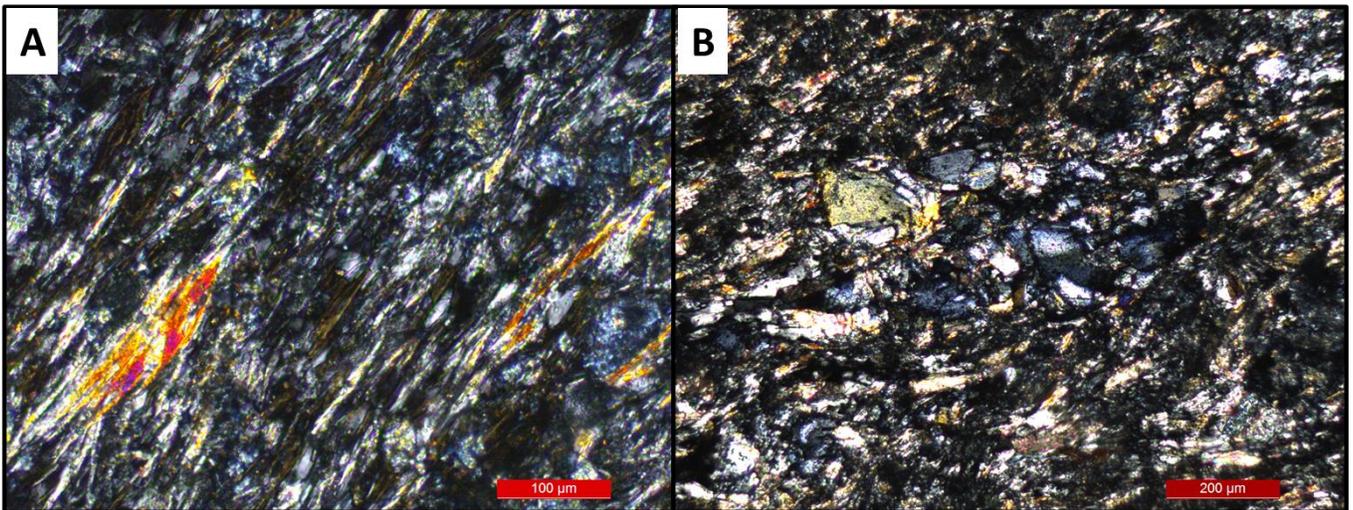


Figura 75: A) Matriz composta por actinolita, plagioclásio e clorita, com cristais orientados e estirados segundo a foliação (LT/NC); B) Porfiroblastos de clinozoisita em matriz composta por actinolita e plagioclásio (LT/NC).

**Amostra 27CP0042**

**Descrição macro:** Rocha com textura maciça, aspecto granular e granulação fina a média. É predominantemente incolor e transparente, com alguma contribuição de coloração verde claro. A trama da rocha é definida pela associação de mineral branco, submilimétrico a milimétrico, predominantemente esférico e que pode formar agregados; mineral incolor anédrico, de granulação fina, aparentemente em proporção similar ao mineral branco; e mineral de coloração verde, granulação fina, que se confunde ao mineral incolor na trama da rocha por apresentar intensidade de cor fraca. Venulação submilimétrica secciona a lâmina transversalmente.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Plagioclásio	54%	Pirita	<1%
Actinolita	30%	Calcopirita	<1%
Epidoto/clinozoisita	10%	Outros opacos	<1%
Clorita	4%		
Carbonatos	1%	Outros	
Quartzo	<1%		

**Nome da rocha:** Andesito/Basalto

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, de granulação predominantemente fina, localmente média e textura granoblástica. A rocha apresenta-se com aspecto maciço, com ocorrência de foliação incipiente marcada pela rara orientação de minerais ripiformes.

A rocha é essencialmente constituída por plagioclásio, epidoto, clinozoisita, actinolita/tremolita e clorita. Manchas disformes de coloração cinza escura a preta são interpretadas como leucoxênio. Estão disseminadas na lâmina e conferem um aspecto sujo, como se alguns minerais, principalmente o epidoto, estivessem encobertos por uma poeira. Outros minerais que ocorrem em menor proporção são carbonatos, quartzo e opacos (pirita, calcopirita).

A trama da rocha é composta por uma matriz fina de agregados de plagioclásio, actinolita e epidoto, como ocorrências de cristais de granulação pouco mais grossa disseminados.

O plagioclásio, predominantemente albita, apresenta-se com granulação fina a média, cristais euédricos a anédricos e hábito tabular. Ocorrem como constituinte principal da matriz, como cristais reliquias, deformados ou não, localmente formando agregados aparentemente ainda preservados. Cristais de granulação pouco mais grossa (média) ocorrem dispersos pela matriz, de forma isolada, por vezes apresentando planos de geminação que definem as maclas da albita e Carlsbad. Plagioclásio pode estar se alterando para epidoto/clinozoisita ou mesmo para carbonato. Textura ofítica a subofítica pode ser identificada como textura primária reliquiar nas porções onde cristais de plagioclásio estão parcialmente inclusos ou que se encerram nas faces dos cristais ripiformes de actinolita.

A actinolita ocorre como cristais finos na matriz ou cristais de granulação média, geralmente subédricos a anédricos. Apresentam hábito tabular, ripiforme, geralmente alongados. Localmente apresentam textura radial, associados a agregados de plagioclásio (textura subofítica). A cor de interferência varia de primeira a segunda ordem, com pleocroísmo entre verde claro a incolor.

Epidoto e clinozoisita ocorrem como cristais anédricos, geralmente com granulação semelhante à da matriz ou pouco mais grossa e em algumas porções como porfiroblastos. Os cristais são comumente arredondados, levemente alongados, mas não apresentam orientação definida. Como características diagnósticas o epidoto apresenta cores de interferência entre primeira e segunda ordem, localmente com variações concêntricas nas cores de interferência. A clinozoisita apresenta cor de interferência azul anômala a amarelo pálido. Esses minerais estão comumente encobertos por uma poeira de aparência fina e escura, descrita como leucoxênio.

Clorita ocorre de forma restrita como cristais finos entremeados na matriz. São subédricos a anédricos, incolores, com pleocroísmo que varia de incolor a verde claro. Localmente ocorrem como agregados associados ao plagioclásio.

Carbonato ocorre muito localmente (mineral acessório). Apresenta granulação fina a média, coloração bege clara e sem pleocroísmo. Os cristais estão dispersos pela matriz, localmente formando agregados junto a concentrações de epidoto/clinozoisita/plagioclásio, onde é possível perceber que o plagioclásio está se alterando para essas fases minerais. Pode estar associado também a uma venulação quartzo-carbonática.

Quartzo ocorre como mineral acessório, com cristais de granulação fina, anédricos, dispersos pela matriz, ou associados a uma venulação quartzo-carbonática com cristais com granulação média.

Sulfetos e opacos são também acessórios e apresentam granulação fina. São descritas pirita e calcopirita.

## Fotomicrografias

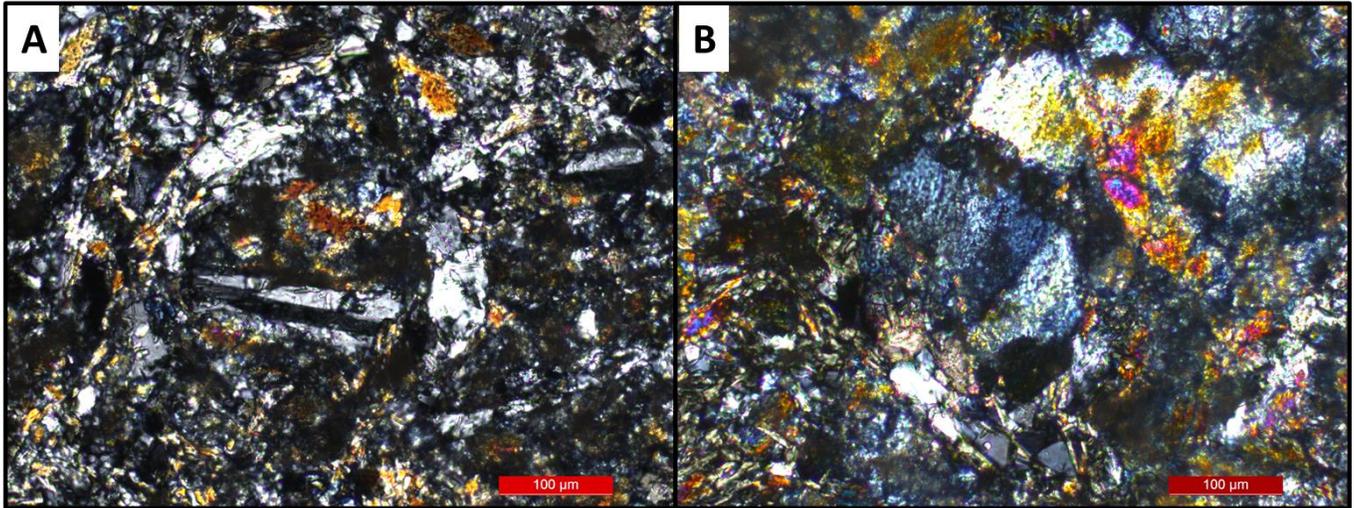


Figura 76: A) Cristal de plagioclásio tabular com geminação da albita em matriz composta por plagioclásio e epidoto (LT/NC); B) Cristais granoblásticos de epidoto e clinozoisita em matriz composta por plagioclásio e actinolita (LT/NC).

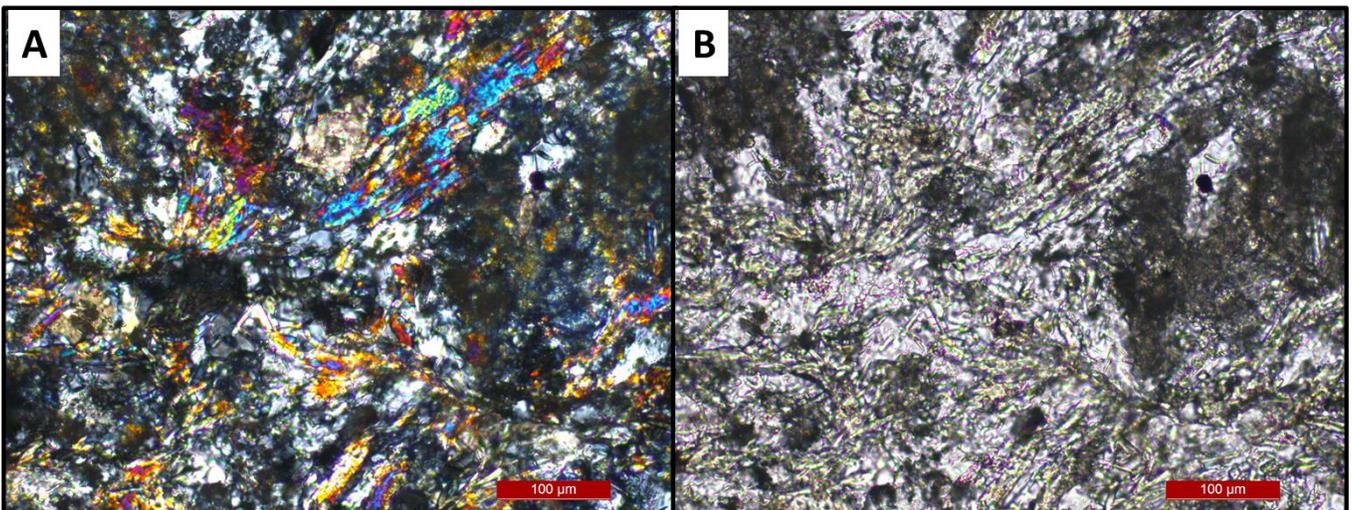


Figura 77: A) Actinolita ripiforme (localmente em agregados fibro-radiais) em matriz feldspática (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 30QM1177**

**Descrição macro:** Rocha com textura maciça, aspecto granular e granulação fina a média. É predominantemente incolor e transparente, com contribuição de coloração verde claro. A trama da rocha é definida pela associação de mineral branco, submilimétrico a milimétrico, predominantemente esférico e que pode formar agregados; mineral incolor anédrico, de granulação fina, aparentemente em proporção similar ao mineral branco; e mineral de coloração verde, granulação fina, que se confunde ao mineral incolor na trama da rocha por apresentar intensidade de cor fraca. Venulação submilimétrica secciona a lâmina. Alguns pequenos pontos dourados também podem ser vistos dispersos pela lâmina e são descritos como sulfetos isolados na matriz.

**Mineralogia**

<b>Transparentes</b>		<b>Opacos</b>	
Plagioclásio	15%	Pirita	<=1%
Clorita	47%	Calcopirita	<=1%
Carbonatos	27%		
Actinolita	5%		
Epidoto/clinozoisita	5%		<b>Outros</b>
Quartzo	<=1%		

**Nome da rocha:** Andesito/Basalto

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, de granulação predominantemente fina, localmente média, e textura granoblástica com alguma ocorrência de textura lepdoblástica. A rocha apresenta-se com aspecto maciço, com ocorrência de foliação incipiente marcada pela orientação de filossilicatos.

A rocha é essencialmente constituída por carbonato, clorita, plagioclásio, epidoto, clinozoisita e actinolita. Manchas disformes de coloração marrom a cinza escura são interpretadas como leucoxênio. Estão disseminadas na lâmina e conferem um aspecto sujo, como se a rocha estivesse encoberta por camada fina de poeira. Outros minerais que ocorrem em menor proporção são quartzo e opacos (pirita, calcopirita).

A trama da rocha é composta por uma matriz fina de agregados de clorita, plagioclásio, actinolita e epidoto, com ocorrências de cristais de carbonato de granulação pouco mais grossa disseminados.

A clorita, juntamente ao plagioclásio, são os minerais dominantes. A clorita ocorre ripiforme, geralmente anédrica e de coloração verde, com pleocroísmo fraco. Localmente ocorrem cristais de granulação pouco mais grossa e subédricos. O plagioclásio ocorre como cristais anédricos finos e entremeados na matriz, incolores e sem pleocroísmo. Isolados na matriz podem ser observados alguns cristais de granulação média com hábito tabular ainda preservado e resquícios da geminação da albita.

Os carbonatos podem apresentar granulação destoante da média da rocha, localmente com cristais subédricos a euédricos, mas predominantemente anédricos. Aparentemente, a matriz da rocha se transforma nos cristais de carbonato de coloração bege claro que se apresentam disseminados e sobrecrecidos à trama

da rocha. Em algumas porções pode-se observar a associação de clorita, actinolita e epidoto se transformado em carbonato.

A actinolita, o epidoto e a clinozoisita ocorrem como fases residuais e são identificadas dispersas na matriz como cristais anédricos a subédricos.

A actinolita ocorre como cristais finos na matriz ou cristais de granulação média, geralmente subédricos a anédricos. Apresentam hábito tabular, ripiforme, geralmente alongados.

Sulfetos e opacos são também acessórios e apresentam granulação fina. São descritos pirita e pirrotita.

Venuações quartzo-carbonáticas ocorrem isoladamente, sendo descritas duas: uma composta essencialmente por carbonatos de granulação média a grossa, subédricos, e outra composta por quartzo e carbonatos de granulação fina a média e cristais anédricos.

### Fotomicrografias

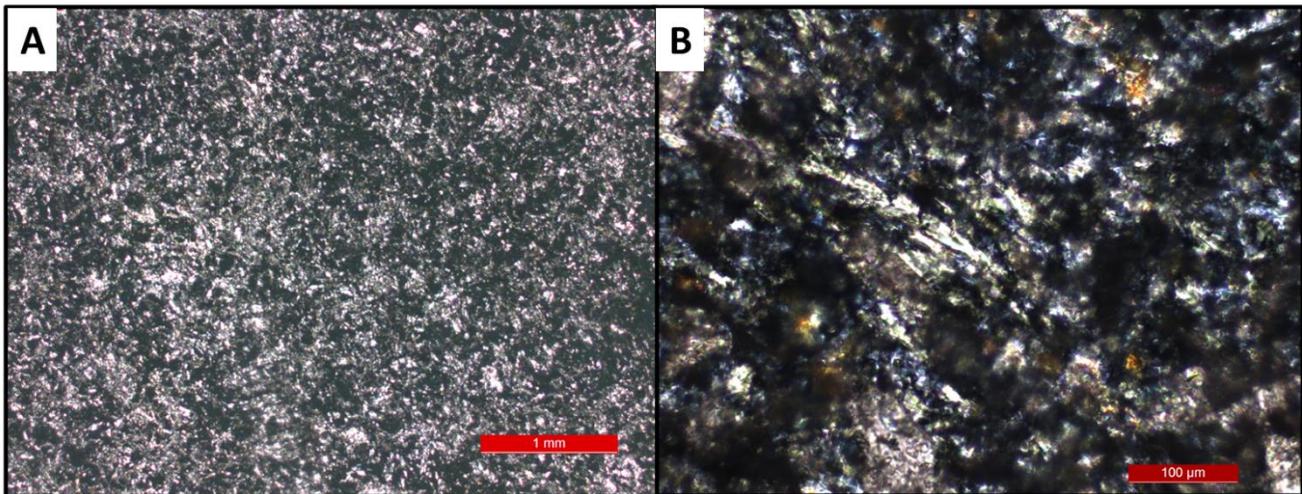


Figura 78: A) Matriz fina e textura granoblástica, composta essencialmente por clorita, plagioclásio e carbonato (LT/NC); B) Detalhe de cristal de clorita, ripiforme, em matriz de clorita, plagioclásio e carbonato. Aspecto manchado na superfície é interpretado como ocorrência de leucoxênio (LT/NC).

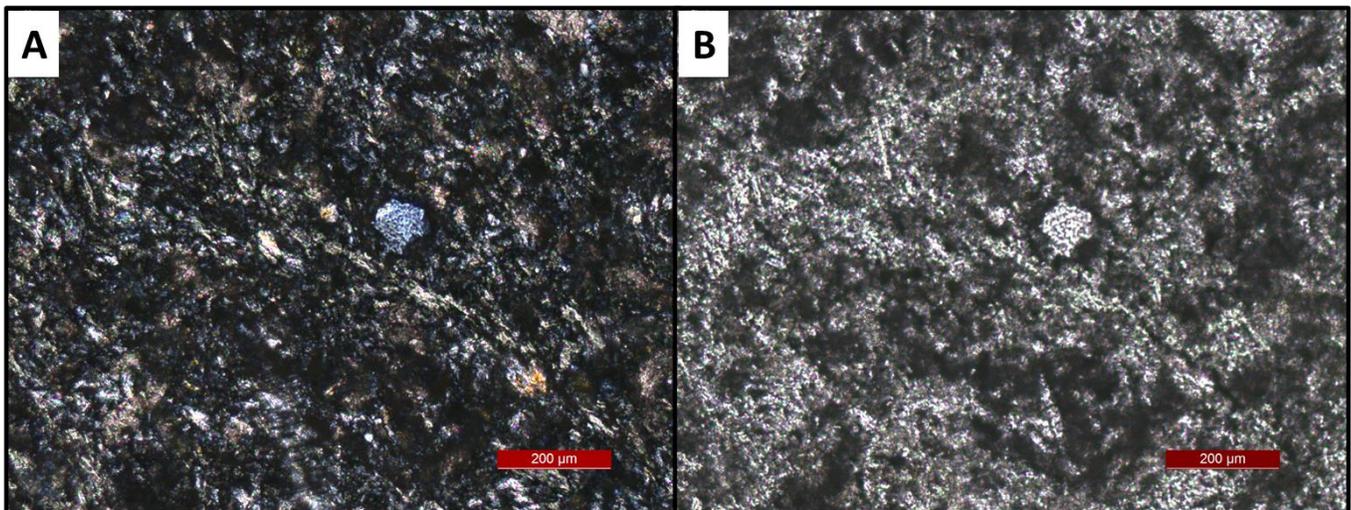


Figura 79: A) Cristal de clinozoisita envolto por cristais de clorita e plagioclásio em matriz fina e textura granoblástica a lepdoblástica. Manchas escuras na superfície da lâmina são interpretadas como leucoxênio (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 31QM1179**

**Descrição macro:** Rocha inequigranular, granulação fina a média, com textura granoblástica, levemente foliada. É predominantemente verde claro a incolor, transparente. A trama da rocha é definida pela associação de mineral escuro (marrom/verde escuro) de granulação mais grossa, milimétrico, predominantemente esférico, que está disseminado na matriz fina composta essencialmente de mineral verde claro. Algumas vênulas concordantes à foliação seccionam a lâminas em diversas porções.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos	
Plagioclásio	11%	Pirita	<=1%
Clorita	42%	Calcopirita	<=1%
Carbonatos	41%		
Actinolita	2%		
Epidoto/clinozoisita	4%		<b>Outros</b>
Quartzo	<=1%		

**Nome da rocha:** Andesito/Basalto hidrotermalmente alterado

**Descrição microscópica:** Rocha inequigranular, de granulação predominantemente fina com ocorrência de porfiroblastos dispersos pela matriz. A textura varia de lepdoblástica (dominante) a porfiroblástica, em alguns pequenos domínios que formam agregados de cristais de granulação média a grossa. A rocha apresenta-se foliada com a orientação de pequenos cristais ripiformes a tabulares que dominam a composição da matriz.

A rocha é essencialmente constituída por carbonato, clorita, plagioclásio, epidoto/clinozoisita e actinolita subordinada. Manchas disformes de coloração marrom a cinza escura são interpretadas como leucoxênio. Estão disseminadas na lâmina e conferem um aspecto sujo, como se a rocha estivesse encoberta por camada fina de poeira. Outros minerais que ocorrem em menor proporção são quartzo e opacos (pirita, calcopirita). A trama da rocha é composta por uma matriz fina de agregados de clorita, mineral dominante na matriz, com plagioclásio subordinado. Ambos minerais apresentam hábito ripiforme, orientados segundo a foliação e levemente estirados. Carbonato também se mistura à matriz, geralmente substituindo cristais de plagioclásio e clorita.

A clorita ocorre ripiforme, geralmente anédrica e de coloração marrom a verde quando em nicóis paralelos, com pleocroísmo fraco. Localmente ocorrem cristais de granulação pouco mais grossa e subédricos. O plagioclásio ocorre como cristais anédricos finos e entremeados na matriz, incolores e sem pleocroísmo. Isolados na matriz podem ser observados porfiroblastos substituídos por carbonato. Apresentam-se de maneira discordante à matriz, apenas com o hábito tabular preservado.

Em algumas porções pode-se observar a associação de clorita, actinolita e epidoto se transformado em carbonato.

A actinolita, o epidoto e a clinozoisita ocorrem como fases residuais e são identificadas dispersas na matriz.

Epidoto/clinozoisita ocorrem de geralmente como porfiroblatos, subédricos, de granulação média. A actinolita ocorre como cristais finos na matriz, geralmente subédricos a anédricos. Apresentam hábito tabular, ripiforme, geralmente alongados. Sulfetos e opacos são também acessórios e apresentam granulação fina. São descritos pirita e pirrotita. Venulações quartzo-carbonáticas ocorrem localmente, sendo descritas dois tipos: uma composta essencialmente por carbonatos de granulação média a grossa, subédricos, e outra composta predominantemente por quartzo, com carbonato subordinado, de granulação média e cristais anédricos.

### Fotomicrografias

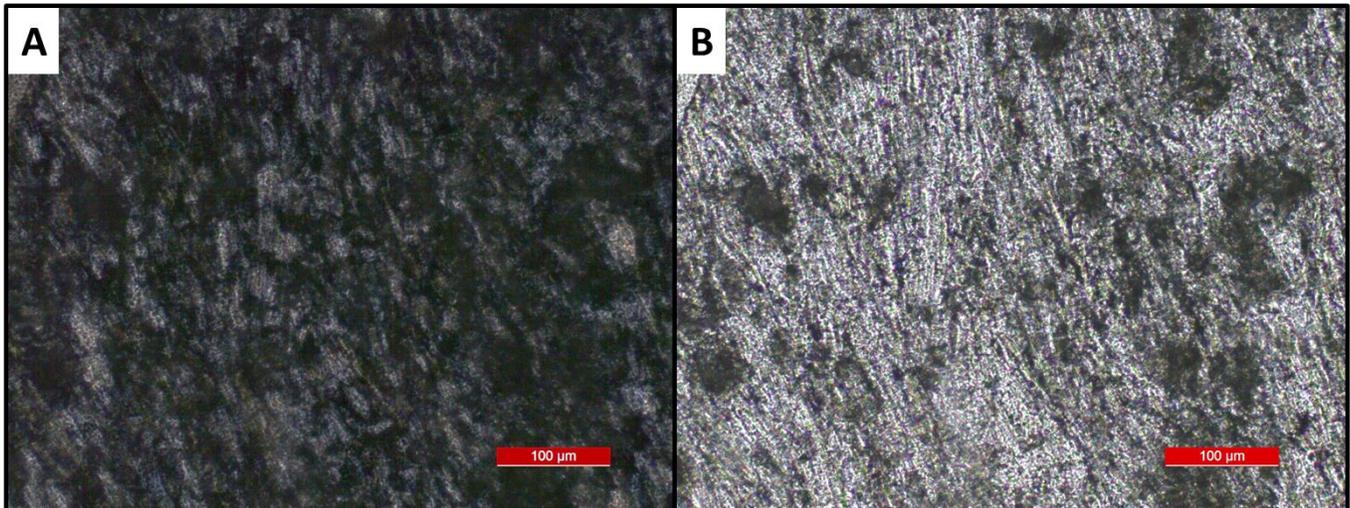


Figura 80: A) Matriz com textura lepidoblástica a nematoblástica, granulação fina, composta essencialmente por clorita e plagioclásio. Carbonato ocorre sobrecrecido à matriz. Manchas escuras de aspecto terroso são descritas como luecoxênio (LT/NC); B) LT/NP.

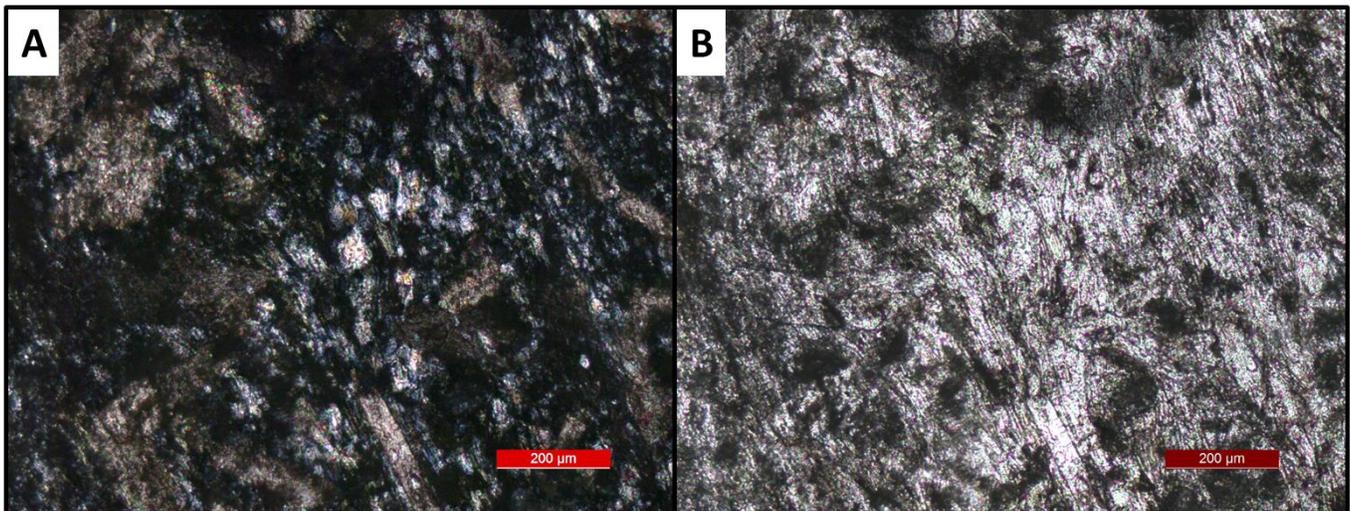


Figura 81: A) Detalhe da matriz fina, com cristais de clorita e plagioclásio tabulares, com carbonato de granulação grossa, anédrico, sobrecrecido à matriz e também substituindo cristais de plagioclásio (LT/NC); B) LT/NP.

**Amostra 19CR2793**

**Descrição macro:** Rocha de granulação fina, coloração predominantemente preta e fortemente foliada. A rocha apresenta uma matriz composta por material escuro que apresenta uma foliação milonítica, contornando pequenas lentes incolores em formato de olho estiradas segundo a foliação que compõem cerca de 40% da rocha. Essas lentes apresentam estrutura *pinch-and-swell*, raramente apresentando-se contínuas.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos
Carbonatos	3%	
Quartzo	43%	
Sericita	4%	
		Outros
		Matéria carbonosa: 50%

**Nome da rocha:** Pelito carbonoso

**Descrição microscópica:** Rocha foliada, de granulação fina e textura lepdoblástica. Composta essencialmente por matéria carbonosa, quartzo, sericita e carbonato.

A foliação é definida pela orientação da matéria carbonosa e sericita. A foliação é levemente anastomosada e contorna faixas e porfiroclastos de quartzo e carbonato em formato lenticular.

A matriz é composta basicamente por matéria carbonosa, sericita e quartzo, subordinado.

A matéria carbonosa domina a matriz, sendo composta por uma massa escura. Sericita ocorre como cristais finos esbeltos, ripiformes, lenticulares a sigmóides, alongados segundo a foliação, subédricos a anédricos. Estão dispersos pela matriz em meio à massa de matéria carbonosa e localmente estão associadas às faixas quartzosas.

Quartzo e carbonato ocorrem predominantemente em agregados granoblásticos que compõem faixas (vênulas??) em formatos lenticulares a sigmóides orientadas segundo a foliação.

Quartzo é o mineral dominante nessas faixas e compõe aproximadamente 40% da lâmina. Formam agregados de cristais de granulação fina, maior do que a da matriz, anédricos a subédricos, com contatos que variam de poligonais e disformes e extinção localmente ondulante.

Carbonatos ocorrem geralmente associados aos agregados de quartzo e são descritos como cristais de granulação fina, mais grossa do que a do quartzo, anédricos a euédricos, textura lisa e limpa.

Interpretação: agregados de quartzo são provavelmente venulações dispostas segunda a foliação. O carbonato, pelas características visuais, é provavelmente ankerita, geralmente associado à recristalização ou ao crescimento hidrotermal.

### Fotomicrografias

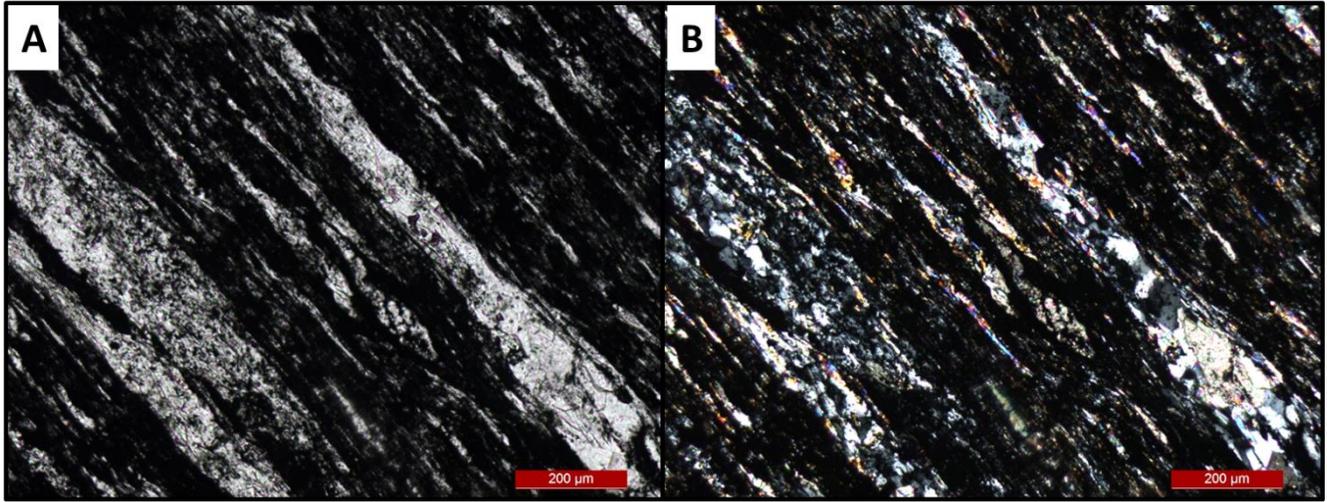


Figura 16: A) Foliação definida pela orientação da massa de matéria carbonosa e por cristais ripiformes de sericita. Lentes quartzo-carbonáticas, de granulação mais grossa do que a da rocha, ocorrem concordantes à foliação em estrutura do tipo pinch and swell, compondo aproximadamente 50% da rocha (LT/NP); B) LT/NC.

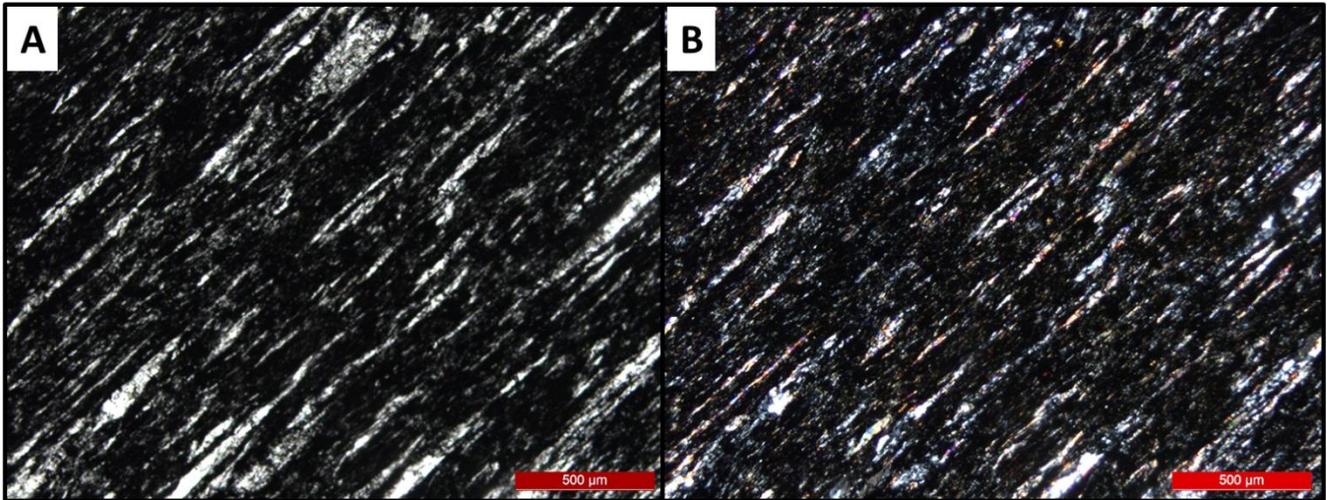


Figure 17: A) Foliação definida pela orientação da massa de matéria carbonosa e por cristais ripiformes de sericita. Lentes quartzo-carbonáticas, de granulação mais grossa do que a da rocha, ocorrem concordantes à foliação em estrutura do tipo pinch and swell, compondo aproximadamente 50% da rocha (LT/NP); B) LT/NC.

**Amostra 36CP0049**

**Descrição macro:** Rocha de granulação fina, coloração predominantemente preta e fortemente foliada. A rocha apresenta uma matriz composta por material escuro com pequenas lentes incolores em formato lenticular estiradas segundo a foliação. Essas lentes apresentam estrutura *pinch and swell*, raramente apresentando-se contínuas. Uma única venulação contínua de espessura submilimétrica secciona a lâmina subparalelamente à foliação.

**Mineralogia**

Transparentes		Opacos
Carbonatos	1%	
Quartzo	9%	
Sericita	25%	
		Outros
		Matéria carbonosa: 65%

**Nome da rocha: Pelito carbonoso**

**Descrição microscópica:** Rocha foliada, de granulação fina e textura lepdoblástica. Composta essencialmente por matéria carbonosa, sericita, quartzo e carbonato.

A foliação é definida pela orientação da matéria carbonosa e sericita. A foliação é levemente anastomosada e contorna agregados de sericita e quartzo em formato lenticular/sigmoide.

A matriz é composta basicamente por matéria carbonosa, sericita e quartzo, subordinado.

A matéria carbonosa domina a matriz, sendo composta por uma massa escura. Sericita ocorre como cristais finos esbeltos, ripiformes, lenticulares a sigmóides, alongados segundo a foliação, subédricos a anédricos. Geralmente formam agregados envoltos pela matriz carbonosa.

Quartzo e carbonato ocorrem de forma subordinada, geralmente associados aos agregados de sericita ou em venulações quartzo-carbonáticas.

Formam agregados de cristais de granulação fina, maior do que a da matriz, anédricos a subédricos, com contatos que variam de poligonais e disformes e extinção localmente ondulante.

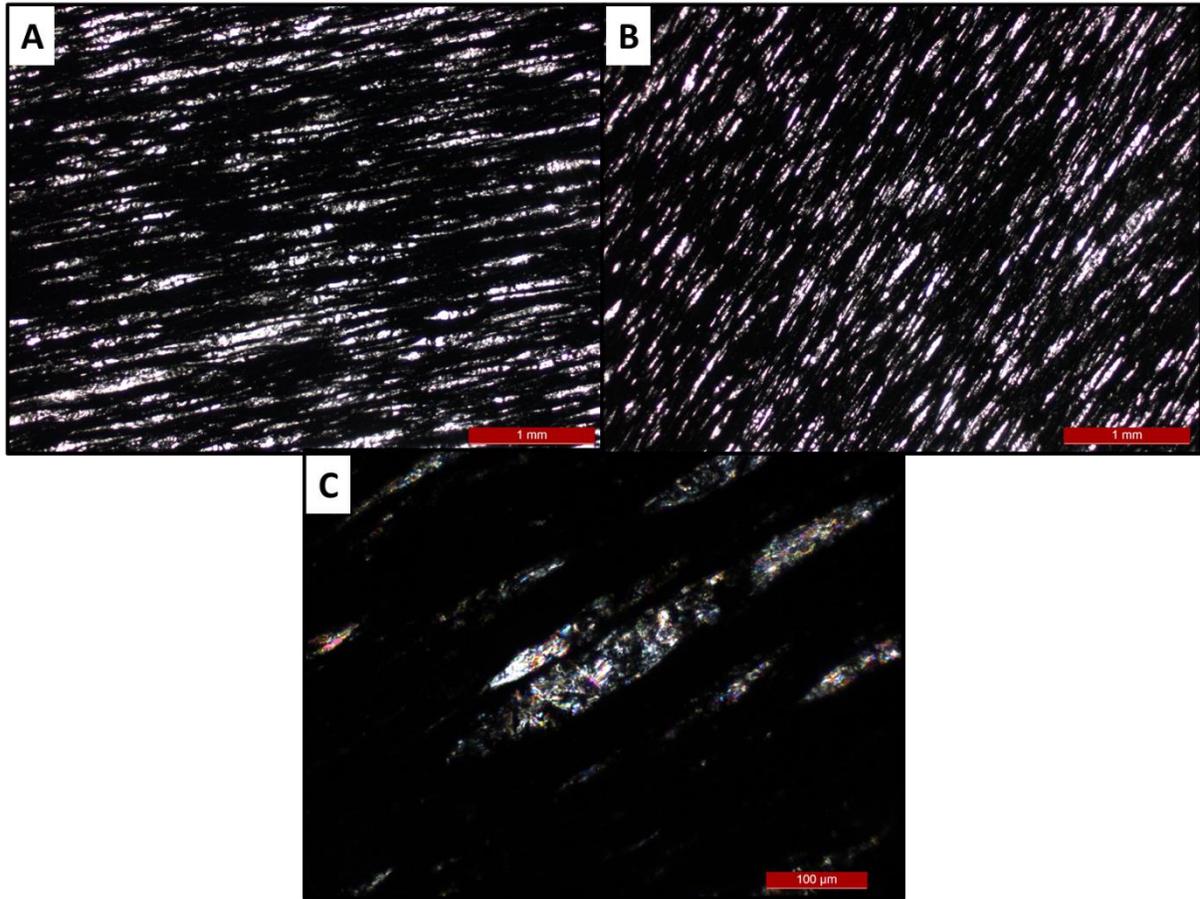
**Fotomicrografias**

Figura 82: A) Lentes quartzo-carbonáticas-sericíticas em geometria do tipo pinch-and-swell dispostas de maneira concordante à foliação em matriz composta essencialmente por matéria carbonosa (LT/NP); B) Lentes quartzo-carbonáticas-sericíticas em geometria do tipo pinch and swell dispostas de maneira concordante à foliação em matriz composta essencialmente por matéria carbonosa (LT/NP); C) Zoom na lente quartzo-carbonática-sericítica com geometria pinch-and-swell em matriz de matéria carbonosa (LT/NC).

## II – COLLAR DOS FUIROS AMOSTRADOS

<b>*COLLAR dos furos amostrados</b>				
<b>FURO</b>	<b>XCOLLAR</b>	<b>YCOLLAR</b>	<b>ZCOLLAR</b>	<b>PROFUNDIDADE</b>
CBPBUD0036	-95524.86	-96932.45	858.683	196.5
CBPBUD0038	-95523.77	-96930.76	858.694	223.92
CBPBUD0039	-95522.99	-96930.25	859.044	237.51
CBPBUD0040	-95522.45	-96929.95	859.114	236.53
CBPBUD0042	-95521.58	-96929.47	859.337	258.54
CBPBUD0051	-95521.1	-96929.47	859.028	232.05
LCRD2732A	-94095.25	-95450.65	598.52	89.75
LCRD2737	-94095.55	-95450.43	599.64	97.35
LCRD2741	-94095.87	-95450.31	599.24	84.75
LCRD2760	-92882.25	-95479.49	394.95	57.6
LCRD2765	-92882.76	-95480.02	394.28	52.8
LCRD2767	-92881.15	-95479.78	394.72	81.85
LCRD2776	-92924.01	-95546.01	395.582	69.46
LCRD2777	-92924.13	-95546.66	394.853	62.21
LCRD2785	-92922.25	-95545.59	394.888	47.91
LCRD2787	-92922.98	-95548.39	394.648	60.34
LCRD2788	-92921.51	-95545.97	394.911	54.05
LCRD2790	-92920.93	-95546.43	395.072	57.42
LCRD2793	-92922.93	-95546.17	394.878	51.55
LCRD2794	-92906.1	-95501.23	394.813	44.05
LCRD2799	-92904.7	-95501.89	394.761	48.95
LCRD2803	-92905.98	-95504.18	394.938	60.28
LCRD2629	-93984.32	-95400.6	607.3	37.24
LCRD2726	-94094.8	-95450.77	598.95	76.78
LCRD2732	-94095.24	-94095.24	598.78	93.25
LQMD1169	-95261.99	-96157.81	764.437	102.85
LQMD1170	-95262.06	-96158.35	764.382	93.7
LQMD1173	-95261.23	-96157.12	764.443	103.04
LQMD1177	-95261.19	-96158.94	764.335	84.62
LQMD1179	-95260.84	-96156.93	764.456	90.75
CBPBUD0049	-95522.2	-96930.3	858.707	218.7
CBPBUD0050	-95521.6	-96929.8	858.845	250.93
CBPBUD0053	-95520.5478	-96929.2073	859.045	250.4
CBPBUD0058	-95521.3693	-96932.6327	859.067	164.68
LQMD1227	-95225.1682	-96177.6612	716.98	60.84
LQMD1228	-95223.5868	-96175.3421	717.025	71.17
LQMD1234	-95222.8055	-96175.5293	717.413	87.8
LQMD1235	-95222.8126	-96175.3289	717.008	79.66
CARBUD0160	-93755.4652	-95538.5922	585.326	179.58
CARBUD0162	-93755.8623	-95540.3131	585.024	267.4
CARBUD0168	-93755.5152	-95538.7961	585.351	199.59
*Coordenadas locais				

## III – COORDENADAS AMOSTRAS COLETADAS

*Coordenadas amostras coletadas			
Amostra	X	Y	Z
01QN03LE	-95411.13647	-96154.33903	775.41051
02QN03LE	-95414.8463	-96123.17654	775.3160143
04CRN6.1B	-93449.96617	-95342.15366	503.0990931
06AVN2LE	-95442.42625	-96614.85625	855.5885295
07CRN6.1C	-93452.1372	-95301.52083	503.6436366
08CRN8.1	-92926.78211	-95448.55098	397.8444782
09CRN4.1Sub	-94046.01634	-95440.82478	614.1467964
10CRN8.1Asc	-92919.11368	-95459.47619	376.8935124
11CRN7.1	-93211.35377	-95393.43598	441.2889567
12AVN01	-95515.84963	-96559.77771	900.8980001
13AVN0200	-95441.15941	-96579.99526	858.0610655
13AVN0201	-95441.15941	-96579.99526	858.0610655
17QN0400	-95332.6131	-96188.16637	738.6586623
17QN0401	-95332.6131	-96188.16637	738.6586623
17QN0402	-95332.6131	-96188.16637	738.6586623
21QN0401	-95360.42795	-96173.72537	738.218114
01CR2726	-94087.66857	-95501.03764	629.7656357
02CR2737	-94110.2452	-95485.00716	628.3824421
03CR2741	-94122.17421	-95473.13608	624.9075846
05CR2760	-92883.52393	-95441.68974	378.3513289
06CR2765	-92886.25727	-95477.04031	375.9406403
07CR2767	-92863.91742	-95450.28973	374.4942271
08CP0039	-95637.18128	-96868.39619	744.5844403
10CP0039	-95662	-96849	716
11CP0038	-95621.21004	-96912.15678	787.3121804
14CP0039	-95662.21147	-96849.81075	716.1143835
15CR2788	-92924.6704	-95549.99133	377.6067674
17CR2790	-92930.6704	-95540.99133	382.6067674
18CR2787	-92942.6704	-95529.99133	371.6067674
19CR2793	-92918.98498	-95543.23089	351.3660074
20CP0036	-95660.7374	-96955.27669	796.1228169
24CR2803	-92903.74065	-95507.66046	382.0460839
27CP0042	-95593.16009	-96782.30117	709.1160605
29CP0040	-95594.16802	-96871.23402	776.4802886
30QM1177	-95292.4738	-96137.36816	710.4716668
31QM1179	-95295.4738	-96132.36816	709.4716668
36CP0049	-95522.2	-96930.3	858.707
37QM1173	-95292.4738	-96137.36816	710.4716668
41QM1228	-95221.14455	-96151.75778	758.5832747
44QM1234	-95210.93229	-96152.0971	769.7829264
45QM1234	-95210.93229	-96152.0971	769.7829264
46QM1234	-95203.86389	-96143.78432	785.0323493
47QM1235	-95210.86389	-96140.78432	780.0323493
48CR0160	-93913.91628	-95572.50525	621.849937
49CR0168	-93934.67362	-95601.39611	611.550141
50QM1227	-95233.16493	-96180.92565	761.3452235
33QM1184	Furo trancado		
*Coordenadas locais			