



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



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

MINERALIZAÇÃO AURÍFERA ASSOCIADA AOS VEIOS QUARTZO-CARBONÁTICOS HOSPEDADOS NA UNIDADE MÁFICA BASAL DA JAZIDA CUIABÁ, GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL.

**AUTOR:** André Luiz Andrade Vitorino

**ORIENTAÇÃO:** Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva

**CO-ORIENTAÇÃO:** Profa. Dra. Lydia Maria Lobato

Nº 179

**BELO HORIZONTE**

**DATA (07/12/2017)**

**Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da jazida Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.**

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

Área de Concentração: Geologia  
Econômica e Aplicada.

Orientadora: Profa. Dra. Rosaline  
Cristina Figueiredo e Silva

Co-orientadora: Profa. Dra. Lydia Maria  
Lobato

Belo Horizonte  
**2017**

V845m  
2017

Vitorino, André Luiz Andrade.

Mineralização aurífera associada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal da jazida Cuiabá, greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / André Luiz Andrade Vitorino – 2017.  
viii, 98 f., enc. (principalmente color.)

Orientadora: Rosaline Cristina Figueiredo e Silva.

Coorientadora: Lydia Maria Lobato.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2017.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 55-59.

Inclui anexos.

1. Ouro – Minas e mineração – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. 2. Alteração hidrotermal – Teses. 3. Geoquímica – Teses. I. Figueiredo e Silva, Rosaline Cristina. II. Lobato, Lydia Maria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 553(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**MINERALIZAÇÃO AURÍFERA ASSOCIADA AOS VEIOS  
QUARTZO-CARBONÁTICOS HOSPEDADOS NA UNIDADE MÁFICA BASAL DA  
JAZIDA CUIABÁ, GREENSTONE BELT RIO DAS VELHAS, QUADRILÁTERO  
FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL.**

**ANDRÉ LUIZ ANDRADE VITORINO**

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 07 de dezembro de 2017, pela banca constituída pelos membros:

Profª. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva - Orientadora  
UFMG

Prof. Atlas Vasconcelos Corrêa Neto  
UFRJ

Prof. Roberto Perez Xavier  
UNICAMP

Belo Horizonte, 7 de dezembro de 2017.



## AGRADECIMENTOS

Expresso minha enorme gratidão a todos que de alguma maneira tenha contribuído com a realização deste trabalho.

À orientadora Prof. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva, pela amizade, dedicação, apoio, incentivo e discussões que acrescentaram ao trabalho, desenvolvimento pessoal e profissional.

À co-orientadora Prof. Lydia Maria Lobato pelo total apoio, correções, dicas, discussões e incrível prazer e amor em transmitir conhecimentos.

Ao Rodrigo Martins pela oportunidade e que tornou possível a realização desse trabalho.

Ao Prof. Luiz Cláudio M. Montenegro responsável pelo Laboratório de Tratamento de Minérios no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, pela disponibilidade, paciência e apoio.

À AngloGold Ashanti, pelo apoio logístico e financiamento.

Aos funcionários do Centro de Microscopia da UFMG, principalmente ao William.

Aos geólogos e amigos da AngloGold Ashanti, pelas discussões técnicas, momentos de trabalho e descontração, e em especial ao Rogério Alves, Rafael Chaves, Henrique Vigário, Fernando Villanova, Julia Prates, Julia Ferreira, Frederico Lana, Marcelo Sirtoli, Roberto Moreno e Raphael Fernandes.

A todos os técnicos e auxiliares de exploração da Mina Cuiabá e Lamego, onde tenho verdadeiros companheiros de trabalho que estão sempre disponíveis.

Ao Vassily Rolin pela correção e discussões geológicas.

Ao Roberto Xavier e Atlas Córrea-Neta pelas correções e sugestões.

À Carolin Kresse, companheira de trabalho.

A minha esposa Taciene, pelo amor, paciência e companheirismo.

A todos familiares, em especial meus pais e irmão, por todos ensinamentos, pela compreensão da ausência nos momentos importantes e exemplo de vida.

Aos amigos da cidade de Lavras, pelos momentos de descontração e companheirismo.

*“Os pensamentos sem conteúdo são vazios, as  
intuições sem conceitos são cegas”.*

Immanuel Kant

## ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos e justificativa .....	1
1.2 Localização e vias de acesso .....	2
1.3 Apresentação do trabalho.....	2
CAPÍTULO 2 - MÉTODOS DE TRABALHO .....	3
2.1 Amostragem e preparação das amostras para a caracterização mineral .....	4
2.2 Mineral Liberation Analyser (MLA) .....	5
CAPÍTULO 3 - VEIOS QUARTZO-CARBONÁTICOS EM GREENSTONE BELT .....	6
3.1 Classificação de veios quartzo-carbonáticos em depósitos de ouro hospedados em greenstone belt ..	8
3.1.1 Veios de preenchimento de falha (faut-fill vein) .....	8
3.1.2 Veios extensionais, extensão oblíqua e veios de extensão em arranjo (vein array).....	9
3.1.3 Veios em estruturas stockwork e brecha.....	10
3.2 Veios quartzo-carbonáticos no greenstone belt Rio das Velhas .....	11
3.2.1 Lineamento Córrego do Sítio.....	11
3.2.2 Lamego.....	12
CAPÍTULO 4 - GOLD MINERALIZATION ASSOCIATED WITH QUARTZ-CARBONATE VEINS HOSTED IN THE LOWER METAMAFIC UNIT OF THE WORLD-CLASS CUIABÁ DEPOSIT, RIO DAS VELHAS GREENSTONE BELT, MINAS GERAIS, BRAZIL.....	13
4.1 Introduction.....	13
4.2 Geology of the Quadrilátero Ferrífero region .....	16
4.2.1 Stratigraphy.....	16
4.2.2 Structural setting .....	17
4.3 Materials and analytical methods.....	18
4.4 Geology of the Cuiabá deposit.....	20
4.5 Gold mineralization hosted in the lower metamafic unit.....	23
4.5.1 Structural setting of vein systems .....	26
4.5.2 Distal zone: Carbonate-quartz-plagioclase-chlorite schist.....	30
4.5.3 Intermediated zone: Chlorite-sericite-quartz-carbonate schist .....	30
4.5.4 Proximal zone: Quartz-carbonate-sericite schist.....	31
4.5.5 Vein systems .....	34
4.6 Ore characterization by MLA .....	41
4.7 Discussion .....	45
4.7.1 Structural analysis.....	45

4.7.2 Vein system evolution.....	47
4.7.3 Implications for mineral exploration.....	50
4.7.4 Mineral Liberation Analysis – MLA .....	51
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXO I – LISTA DE AMOSTRAS SELECIONADAS EM FUROS DE SONDAGEM.....	60
ANEXO II – PETROGRAFIA MICROSCÓPICA .....	69
ANEXO III – TABELAS E GRÁFICOS OBTIDOS POR MLA .....	92

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1-1: Mapa de acessos à Mina Cuiabá a partir de Belo Horizonte.....	2
Fig. 2-1: Ilustração de uma partícula mapeada utilizando o modulo GXMAP.....	6
Fig. 3-1: Arranjos geométricos comuns dos veios em zonas de cisalhamento, e suas relações com os eixos de encurtamento (dZ) e alongamento (dX).....	10
Fig. 4-1: Geological map of the QF region with principal lithofacies associations of the Rio das Velhas greenstone belt and location of the Cuiabá mine .....	15
Fig. 4-2: Geological map of Level 11 of the Cuiabá mine showing the main orebodies associated with BIF and mineralized zones related to quartz-carbonate veins .....	15
Fig. 4-3: Flow chart of mount preparation used for the Mineral Liberation Analyser (MLA) analyses. ....	20
Fig. 4-4: Stratigraphic column at the Cuiabá mine .....	22
Fig. 4-5: Schematic map of Level 15 of the Cuiabá mine showing the main orebodies .....	24
Fig. 4-6: Photograph of drill core sample and photomicrographs of polished thin sections taken of the basal metandesite, highlighting aspects of the hydrothermal alteration zonation in the lower metamafic unit of the Cuiabá mine. ....	25
Fig. 4-7: 3D geological model from VQZ mineralized zone.....	26
Fig. 4-8: Simplified geological map of the mine gallery at the VQZ mineralized zone, Level 15. ....	28
Fig. 4-9: A) Photomicrographs of polished thin section showing structural features, density stereograms of foliation S0-1 .....	29
Fig. 4-10: Polished thin sections photomicrographs of intermediated hydrothermal zone. ....	32
Fig. 4-11: Photomicrographs of polished thin sections showing the main sulfide minerals associated with proximal hydrothermal alteration zone .....	33
Fig. 4-12: Schematic block diagram showing vein types of the lower mafic unit at the Cuiabá deposit. ....	35
Fig. 4-13: Main characteristics of V1 vein system. ....	37

Fig. 4-14: Cutting relationship between V1, V2 and V3 vein systems.....	39
Fig. 4-15: Details of V3 veins at VQZ mineralized zone .....	40
Fig. 4-16: V4 vein system. ....	41
Fig. 4-17: Photomicrographs of polished sections showing different grain sizes of quartz-carbonate veins concentrated material.....	42
Fig. 4-18: Accumulated grain size and distribution for the quartz-carbonate veins and host rock ...	44
Fig. 4-19: SEM backscattered electron images and accompanying MLA images of binary gold particles in contact with pyrite, ankerite and quartz. ....	44
Fig. 4-20: Relation between S0 banding, S1 flexural foliation and S2 mylonitic foliation.....	45
Fig. 4-21: Stereogram projections illustrating the geometric arrangements of extensional veins in D1 shear zones from the Cuiabá deposit, and their relationship to incremental axes of shortening (dZ), elongation (dX) and shear displacement (SD).. ....	47
Fig. 4-22: Evolutionary model of the V1 and V2 vein systems.....	49
Fig. 4-23: Vein system evolutionary model hosted in the lower mafic unit, Cuiabá deposit. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tab. 3-1: Classificação e características principais dos diferentes tipos de veios associados a depósitos de ouro hospedados em greenstone belt.....	9
Tab. 4-1: Quartz-carbonate vein systems of the lower mafic unit at the Cuiabá deposit .....	34
Tab. 4-2: Sample mineral composition determined by MLA of the quartz-carbonate veins and host rock.....	43

## Resumo

A jazida de Cuiabá está localizada no distrito do Quadrilátero Ferrífero (QF) na região sudeste do estado de Minas Gerais, sendo a maior mina subterrânea do Brasil com um recurso total de 5,78 Moz e teor médio de 10,26 g/t. Este depósito de ouro tipo orogênico é parte do *Greenstone belt* Rio da Velhas, uma associação de rochas vulcânicas máficas, formação ferrífera bandada (FFB), pelitos carbonosos e pelitos micáceos, metamorfizados em fácies xisto verde. A estrutura deposicional e os corpos de minério são controlados por uma dobra anticlinal, com o flanco norte em posição invertida e o flanco sul em sequência normal. O eixo da dobra possui direção  $116^\circ$  com ângulo de mergulho entre  $35^\circ$  e  $12^\circ$ . Predomina mineralização associada a sulfetos e hospedadas na FFB-Cuiabá, relacionadas a zonas de alteração hidrotermal. Os principais corpos de minério são denominados Fonte Grande Sul, Serrotinho, Balancão e Galinheiro, contendo outros de importância secundária como o Galinheiro Extensão, Surucucu, Canta Galo and Dom Domingos. Ocorrem outros tipos de mineralização associadas à veios de quartzo em zonas de cisalhamento e sulfetos disseminados em rochas vulcânicas ricas em ferro na unidade máfica superior, como por exemplo os corpos de minério Viana, Galinheiro Quartzo e Galinheiro Footwall, que localmente foram lavrados. Recentemente foram descobertas novas zonas mineralizadas associadas à unidade máfica basal e denominadas VQZ, Serrotinho Footwall e Fonte Grande Sul Footwall, onde a mineralização está relacionada as zonas de alteração hidrotermal à clorita (distal), carbonato (intermediária) e sericita (proximal).

Apenas uma geração de estruturas (G1) está relacionada aos veios quartzo-carbonáticos hospedados na unidade máfica basal. O evento deformacional de direção principal SSE-NNW é caracterizado por uma compressão em condições dúctil-rúptil. Os principais elementos estruturais são o bandamento composicional S0, foliação flexural S1 e a foliação milonítica S2 acompanhada pelo desenvolvimento da lineação mineral Lmin1, lineação de interseção Lint1, dobras isoclinais e intrafoliais F1, além de veios quartzo-carbonáticos. Quatro sistemas de veios quartzo-carbonáticos são identificados: V1, V2, V3 e V4. O sistema de veios V1 é classificado como de preenchimento de falha, controlado pela foliação S2, é a principal fonte de ouro e foram gerados nas fases iniciais do hidrotermalismo. Os veios V2 também são mineralizados e contemporâneos em relação ao V1, controlados pela foliação S1 e subdivididos em três tipos de acordo com a orientação interna dos minerais: V2a classificado como preenchimento de falha, V2b e V2c são veios extensionais. Os veios V3 e V4 também são extensionais e gerados na fase final do evento deformacional. Todos os sistemas de veios estão relacionados ao cisalhamento D1 e a análise estrutural dos veios indica a rotação do vetor principal de encurtamento durante a deformação progressiva e sucessiva injeção de fluidos hidrotermais. As características dos sistemas de veios indicam uma diminuição progressiva na atividade tectônica acompanhada pela diminuição na temperatura de formação dos veios. Estudos de caracterização do minério, realizados utilizando-se o *MLA (Mineral Liberation Analyser)*, demonstram uma composição

a quartzo-pirita-ankerita com 98 % de ouro liberado. O tamanho dos grãos de ouro varia entre 1 e 250 µm e ocorrem como uma liga de ouro e prata. Apesar de a maioria dos grãos de ouro estarem liberados, grandes quantidades de partículas de ouro fino somente podem ser extraídas após a moagem e lixiviação com cianeto.

*Palavras chave: jazida Cuiabá, ouro orogênico, veios quartzo-carbonáticos, zonas de cisalhamento, caracterização mineral.*

### **Abstract**

The Cuiabá deposit, located in the Quadrilátero Ferrífero district (QF) in the southeastern part of the state Minas Gerais, is the largest underground mine in Brazil (5.78 Moz resources of 10.26 g/t). This world-class orogenic gold deposit is part of the Rio das Velhas greenstone belt, a typical association of mafic volcanic rocks, banded iron formation (BIF), carbonaceous phyllite and micaceous phyllite, metamorphosed to the greenschist facies conditions. The depositional structure and orebodies are controlled by an anticline fold, indicating an inverted north flank and a normal sequence in the south. The fold axis dips to 116° azimuth direction and plunges between 35° and 12°. The predominant sulfide mineralization is associated with the Cuiabá-BIF, and related to hydrothermal alteration zones. The main orebodies are Fonte Grande Sul, Serrotinho, Balanção and Galinheiro, with Galinheiro Extensão, Surucucu, Canta Galo and Dom Domingos of secondary importance. Other two-mineralization styles are shear-related quartz veins and disseminated sulfides minerals in Fe-rich, upper mafic volcanic unit, such as the locally mined Viana, Galinheiro Quartzo and Galinheiro Footwall orebodies, associated with the upper mafic unit. Recently three new gold mineralized zones were discovered and named VQZ, Serrotinho Footwall and Fonte Grande Sul Footwall, where the mineralization is a shear-related quartz-carbonate veins type hosted in the lower mafic volcanic unit, associated to distal (chlorite), intermediate (carbonate) and proximal (sericite) hydrothermal alteration zones.

Only one structure generation (G1) is related to the lower metamafic unit hosting gold-bearing quartz-carbonate veins. The event is characterized by a SSE-NNW directed, transpressive stress under ductile to brittle conditions, with structural elements including the compositional banding S0, flexural foliation S1, and a mylonitic foliation S2 accompanied by the development of mineral lineation Lmin1, intersection lineation Lint1, isocline and intrafolial folds F1 and quartz veins. Four quartz-carbonate vein types are identified in the lower metamafic unit: V1, V2, V3 and V4. The V1 system is a S2-controlled fault-fill type, and the main source of gold. The V2 veins are also mineralized, controlled by the S1 foliation and subdivided in three sub-types, according to internal crystals orientation: V2a is classified as fault-fill, while V2b and V2c are extensional veins. The V3 and V4 systems are also extensional veins. All vein systems are related to D1 shearing and the veins structural

analyses indicates a shorting vector rotation during the deformational event and hydrothermal fluid input. A proposed evolutionary model for the vein systems suggest that the ore-forming fluid responsible for gold mineralization channeled along D1 shear zones and dispersed along the S0-1 structures. The internal vein features and the trapping temperatures indicates a progressively tectonic activity decrease. Ore characterization studies, conducted by the MLA (Mineral Liberation Analyser) technique, demonstrate a quartz-pyrite-ankerite composition with 98 % of liberated gold. Gold grains range in size between 1 and 250  $\mu\text{m}$  and occur as Au-Ag electrum. Although the majority is present as liberated gold, high quantities of small gold particles may be only extracted after ultra-fine milling followed by cyanide leaching.



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), local onde está inserida a jazida Cuiabá, é uma importante província mineral devido principalmente aos seus depósitos de ferro e ouro de relevância mundial. As jazidas de ouro, localizadas no QF, também possuem extrema relevância histórica e econômica, onde se destacam os depósitos associados ao Supergrupo Rio das Velhas, como por exemplo, Morro Velho, Raposos e Juca Vieira, que não estão mais em atividade, e as minas Cuiabá, Córrego do Sítio, Lamego, Pilar e Pitangui, que estão em atividade de lavra. Atualmente a mina Cuiabá, propriedade da AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração (AGA), é a mais importante mina de ouro do QF e também a maior mina subterrânea do país. Por esse motivo, essa jazida vem sendo objetivo de vários estudos acadêmicos buscando o entendimento dos controles da mineralização e gênese do depósito (e.g. Vial, 1988; Vieira, 1992; Toledo, 1997; Ribeiro-Rodrigues, 1998; Ribeiro-Rodrigues *et al.*, 2007; Lobato *et al.*, 1998; Lobato *et al.*, 2001 e Martins, 2000). Devido ao fato de a mineralização aurífera em Cuiabá ocorrer principalmente hospedada na formação ferrífera bandada (FFB), estudos ao longo dos anos foram focados nesse tipo de mineralização. O presente trabalho é pioneiro no sentido de caracterizar em detalhe, mineralizações auríferas associadas a veios quartzo-carbonáticos na unidade metamáfica basal com importância econômica e potencial para serem exploradas.

A dissertação faz parte do programa de Pós-graduação em Geologia Econômica e Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), e tem orientação da Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva, e co-orientação da Profa. Dra. Lydia Maria Lobato. Insere-se em termo de cooperação AGA-FUNDEP-UFMG.

### 1.1 *Objetivos e justificativa*

Mineralização aurífera associada às rochas máficas não é o principal estilo de mineralização presente na jazida Cuiabá. Entretanto, foram identificadas novas regiões mineralizadas dentro da jazida, com potencial para serem exploradas, hospedadas na unidade metamáfica basal e relacionadas a veios quartzo-carbonáticos, e estas são o foco principal do trabalho. A classificação dos veios, através do mapeamento geológico em subsolo e petrografia descritiva, e a caracterização mineral utilizando o MLA foram técnicas realizadas de forma a auxiliar o entendimento da mineralização, os controles estruturais e favorecer os processos de beneficiamento do minério. Dessa maneira os objetivos específicos são:

I – Identificar e classificar as gerações de veios quartzo-carbonáticos mineralizados ou não hospedados na unidade máfica basal;

II – Estabelecer os controles estruturais dos veios quartzo-carbonáticos;

III – Elaborar um modelo de evolução dos sistemas de veios quartzo-carbonáticos;

IV – Auxiliar nos processos de beneficiamento do minério.

### 1.2 Localização e vias de acesso

A mina Cuiabá está localizada no município de Sabará, região centro-sul do estado de Minas Gerais, a leste da capital Belo Horizonte. A partir de Belo Horizonte o acesso pode ser feito de duas maneiras (Fig.1-1). A primeira opção, cerca de 33 km, é através da rodovia BR-262, sentido Sabará-Caeté, que pode ser acessada pelo Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, sentido Vitória, ou pela MG-050 através da Av. José Candido da Silveira região leste de Belo Horizonte. Até a entrada de Sabará percorre-se cerca de 10 Km, pela BR-262, onde segue-se pela Av. Perimetral, margeando o ribeirão Sabará, até a R. Presidente Juscelino Kubitschek; na rotatória do “trevo do Gaia” siga pela BR-262, sentido Caeté, por aproximadamente 6 Km até a entrada da Mina Cuiabá. A segunda opção pode ser feita percorrendo 25 km pela BR-381, sentido Vitória, até o trevo da cidade de Caeté, onde acessa-se a MG-435 e percorre-se cerca de 12 Km até a entrada da cidade. A partir da entrada, segue-se pelas Avenidas Jair Dantas e Vicente C. Borges, em direção a Sabará. De Caeté até Sabará, segue-se novamente pela BR-262 por cerca de 11 Km até a portaria da Mina Cuiabá, totalizando 70 km.

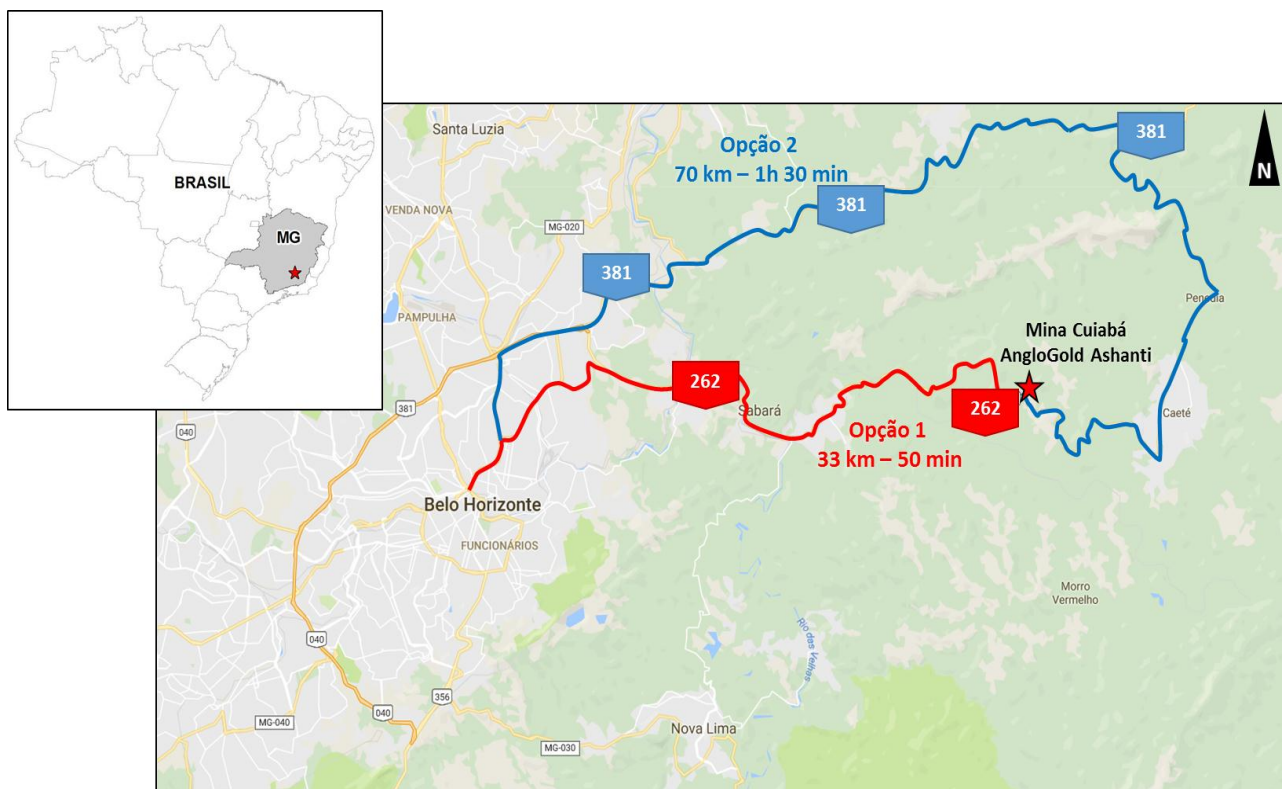


Fig. 1-1: Mapa de acessos à Mina Cuiabá (AngloGold Ashanti) a partir de Belo Horizonte (fonte: GoogleMaps).

### 1.3 Apresentação do trabalho

A presente dissertação de mestrado é apresentada em cinco capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 1: introdução, principais objetivos e localização da área.

- Capítulo 2: metodologia detalhada utilizada na amostragem e método de caracterização mineral utilizando o *Mineral Liberation Analyser (MLA)*.
- Capítulo 3: apresenta uma revisão bibliográfica sobre veios quartzo-carbonáticos em *greenstone belt*.
- Capítulo 4: artigo em inglês, submetido à revista *Ore Geology Reviews*, intitulado “*Gold mineralization associated with quartz-carbonate veins hosted in the lower metamafic unit of the world-class Cuiabá deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Minas Gerais, Brazil*”. Onde estão contidos os principais resultados referentes ao trabalho.
- Capítulo 5: Considerações finais.

## **CAPÍTULO 2 - MÉTODOS DE TRABALHO**

A metodologia utilizada para classificação dos veios quartzo-carbonáticos e caracterização mineral na unidade metamáfica inferior da jazida Cuiabá seguiu as seguintes etapas:

I – Revisão bibliográfica sobre veios quartzo-carbonáticos em *greenstone belt* (vide capítulo 3) e bibliografias relevantes ao trabalho.

II – Mapeamento litológico-estrutural de detalhe, escala 1:100, nas galerias subterrâneas selecionadas devido ao grande volume e diversidade de veios, além de possuir teores significativos em ouro. Também foram coletados dados pontuais ao longo de galerias que contem veios relacionados ao trabalho.

III – Coleta de amostras em testemunhos de sondagem diamantada de superfície e nas galerias mapeadas para confecção de lâminas delgadas e polidas. Foram coletadas amostras orientadas nas paredes das galerias com objetivo de obter dados para análises estruturais. As amostras orientadas foram serradas perpendicularmente ao plano da foliação principal (plano XY do elipsoide de deformação), e quando se fez necessário foram feitos dois cortes na mesma amostra, um paralelo a lineação mineral (plano XZ) e outro perpendicular à lineação mineral (plano YZ), com objetivo de se obter uma melhor análise de relação de corte e cinemática das estruturas.

IV – Descrição petrográfica e estrutural em lâminas delgadas polidas dos diferentes tipos de veios e rochas encaixantes.

V – Classificação dos veios segundo Robert e Poulsen (2001).

VI – Amostragem e preparação das amostras para caracterização mineral utilizando o MLA (vide item 2.1).

VII – Caracterização mineralógica em microscópio eletrônico utilizando o MLA (vide item 2.2).

## **2.1 Amostragem e preparação das amostras para a caracterização mineral**

A amostragem para caracterização mineral foi realizada a partir de rejeitos de britados (granulometria 80% passante a 3 mm) de furos de sondagem diamantada em subsolo, com diâmetro BQ (36 mm). Os furos foram executados pela AngloGold Ashanti com objetivo de interceptar as zonas mineralizadas associadas aos veios quartzo-carbonáticos. As amostras demarcadas para análises química variam de 0,80 a 1,20 m de comprimento, respeitando os contatos litológicos. As análises químicas para ouro, enxofre e arsênio foram realizadas em laboratório da própria empresa. Para a caracterização mineral foram selecionadas amostras com teor de ouro acima de 2 g/t (*cut-off* de recursos atual da mina) individualizadas por litotipo. Como a mineralização ocorre principalmente nos veios quartzo-carbonáticos, e subordinadamente na rocha encaixante alterada à sericita, dois litotipos principais foram selecionados: (1) veios quartzo-carbonáticos; e (2) rocha encaixante. Duas amostras compostas (*bulk samples*), uma de veio pesando 74 kg e teor médio de 16,30 g/t, e outra para a rocha encaixante com 66 kg e 12,80 g/t, foram a base dos estudos de caracterização.

Após a separação, as amostras foram britadas no laboratório de preparação de amostras da mina Córrego do Sítio II (AngloGold Ashanti), em britadores do tipo panela, por cerca de dois minutos, até atingir um produto com granulometria de 80% passante a 75 µm. Esse material britado foi colocado em um funil, juntamente com água, que tem sua saída direcionada para um concentrador centrífugo tipo Falcon com vazão programada para 0,075 l/s. O material retido no concentrador foi coletado, condicionado em bandejas devidamente identificadas, secado em estufas e peneirado em conjunto de peneiras com aberturas nominais de 150, 75 e 45 µm, de forma a gerar quatro concentrados com diferentes faixas granulométricas (+150, +75, +45 e -45 µm) para cada litotipo. Todo o processo a partir da concentração gravimétrica até o peneiramento foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios no Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, sobre a supervisão e auxílio do Prof. Dr. Luiz Cláudio M. Montenegro. Foram confeccionadas oito seções polidas, uma para cada faixa granulométrica e provenientes dos diferentes litotipos. Para análises no MLA as seções polidas foram revestidas com carbono no Centro de Microscopia da UFMG.

Além das análises do material concentrado em seções polidas (material particulado), também foram realizadas análises pontuais em lâminas delgadas polidas, em amostras de rochas, coletadas em furos de sondagem diamantada, que contêm partículas de ouro visíveis com intuito de obter informações principalmente sobre associação mineral e tamanho das partículas de ouro.

Os estudos de identificação e química mineral a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura-MEV associada à espectrometria de raios-X por dispersão de energia (*EDS-energydispersive spectrometry*), e análise do grau de liberação mineral (*Mineral Liberation Analyser*)

foram realizados no Centro de Microscopia da UFMG, utilizando o MEV modelo Quanta 200 FEI com *software* MLA acoplado. A identificação mineral através da análise de raio-X requer que um banco de dados de minerais seja cadastrado no sistema, o que envolve a coleta pontual de espectros de raios-X com alta precisão nas diferentes fases minerais existentes na amostra (Fandrich et al. 2007). Para auxiliar no processo da construção da biblioteca mineral, foram previamente realizadas descrições petrográficas em microscópio ótico das amostras serem analisadas no MLA.

## **2.2 Mineral Liberation Analyser (MLA)**

A análise de liberação mineral é um tópico de extrema importância quando se trata de mineralogia aplicada e processos metalúrgicos. Dados de liberação mineral são parâmetros fundamentais utilizados no design e otimização de plantas de beneficiamento mineral (Gu, 2003). As técnicas de análises implementadas pelo MLA fornecem informações mineralógicas automatizadas e otimizadas (Fandrich *et al.*, 2007) que são fundamentais para determinar a performance de todos os processos químicos e físicos envolvidos no beneficiamento de minérios de ouro (Louis *et al.*, 2011).

O MLA consiste em um sistema automatizado acoplado ao MEV, equipado com espectrômetros de raios-X por dispersão de energia, e um conjunto de *softwares* que incorpora as tecnologias do MEV (Sylvester, 2012). O método combina as imagens de elétrons retroespalhados (BSE) e análises de raios-X para fornecer informação mineralógica automatizada a respeito de um determinado material. As imagens de alta resolução das partículas geradas pelo MEV permitem ao MLA discriminar as fases minerais dentro de uma partícula, através de técnicas avançadas de análises de imagens (Fandrich *et al.*, 2007), além da obtenção de dados como mineralogia modal, porosidade, tamanho de grãos e forma, associações mineralógicas e mapas texturais coletados em superfícies de rochas polidas, sedimentos ou outras amostras particuladas (Sylvester, 2012).

De acordo com Fandrich *et al.* (2007) o MLA opera em oito modos de análises, sendo cada um aplicado para determinado material.

- 1) *Standard BSE liberation analysis (BSE)*
- 2) *Extended BSE liberation analysis (XBSE)*
- 3) *Ford analysis or grain-based X-ray mapping (GXMAP)*
- 4) *Sparse phase liberation analysis (SPL)*
- 5) *X-ray modal analysis (XMOD)*
- 6) *Rare phase search (RPS)*
- 7) *Latti analysis (SXBSE)*
- 8) *Schouwstra analysis (SPL-dual zoom)*

Nesse trabalho foram adotados os modos de análises GXMAP e SPL. O primeiro modo usa o raio-X para mapear fases que não podem ser segmentadas utilizando-se apenas os diferentes tons de

cinza nas imagens de elétrons retroespalhados (BSE). O GXMAP permite ao operador selecionar determinadas fases minerais (fases que possuem os espectros semelhantes) a serem mapeadas através do raio-X e as fases que são facilmente identificadas são mapeadas utilizando o BSE, desse modo o processo se torna mais ágil e eficaz (Fandrich *et al.*, 2007). A figura 2-1 mostra as vantagens entre o método GXMAP em comparação a um tradicional mapeamento com raios-X, por exemplo, em uma partícula contendo quartzo, pentlandita e calcopirita.

O modo de análises SPL é recomendado para minérios de baixo teor, quando as fases minerais associadas a fase de maior interesse tem importância relevante. Consiste no rastreamento de imagens de elétrons retroespalhados, utilizando intervalos de tons de cinzas condizentes com a fase mineral de interesse, e executa-se o modo de análise XBSE em cada partícula rastreada (Fandrich *et al.*, 2007). O método XBSE consiste em um método avançado, em que cada imagem BSE é coletada e segmentada para delinear os limites dos grãos em cada partícula, e então cada grão mineral é analisado com um raio-X. O processo off-line gera mapas das partículas onde é possível identificar o grau de liberação mineral e dados de associações (Fandrich *et al.*, 2007).

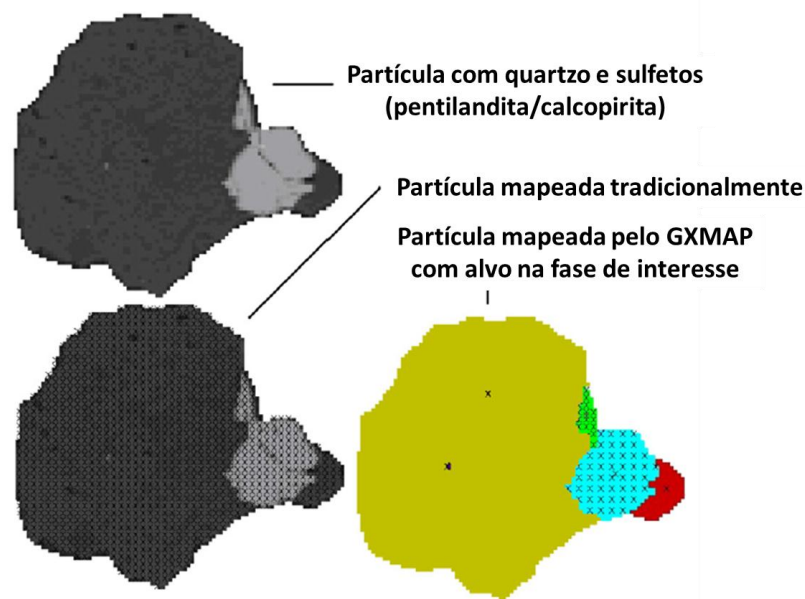


Fig. 2-1: Ilustração de uma partícula contendo quartzo e sulfetos mapeada utilizando o módulo GXMAP (modificado de Fandrich *et al.*, 2007).

### CAPÍTULO 3 - VEIOS QUARTZO-CARBONÁTICOS EM *GREENSTONE BELT*

Veios são feições comuns em depósitos de ouro hospedados em *greenstone belts*, em muitos casos compondo a maior parte do minério, mas podem também ser tardios em relação ao minério em outros depósitos. A análises de veios em terrenos metamórficos polideformados pode ser valiosa para entender a sequência de eventos responsáveis pela geração e deformação dos depósitos de ouro (Robert e Poulsen, 2001). Ramsey e Huber (1987) usam o termo veio para designar o material

hidrotermal que preenche o espaço entre paredes de fraturas. Para Bons *et al.* (2012), veios são definidos como agregados minerais que precipitam a partir de um fluido em locais com dilatação, com exceção para os diques ígneos e leucossomas. Os veios estão presentes em quase todas as rochas e são facilmente reconhecidos no campo, devido ao contraste de cor existente entre rocha hospedeira e veio, também podem representar fases de atividade geológica ocorridas após a formação da rocha hospedeira (Bons *et al.*,2012).

Em veios hidrotermais, o quartzo é o principal mineral estéril (ganga) e normalmente é a única fase precipitada ao longo de toda a evolução de um sistema hidrotermal. Portanto, as características do quartzo, como sua morfologia, estrutura do cristal, composição química e propriedades físico-químicas, podem refletir as diferentes condições hidrotermais durante o crescimento do veio, incluindo as que estão associadas às mineralizações em ouro (Dong *et al.*, 1995).

Segundo Dubé e Gosselin (2007), depósitos associados a veios quartzo-carbonáticos hospedados em *greenstone belts* são estruturalmente controlados, estão geralmente associados a zonas de cisalhamentos e falhas, e comumente ocorrem encaixados em rochas máficas ricas em ferro, metamorizadas na fácies xisto verde e localmente na fácies anfíbolito. Poulsen *et al.* (2000) sugerem que depósitos associados a veios quartzo-carbonáticos hospedados em *greenstone belts* sejam classificados como um subtipo dos depósitos orogênicos de Groves *et al.* (1998). São constituídos por sistemas complexos de veios quartzo-carbonáticos contendo ouro, veios com estrutura laminada, característico de preenchimento de falha (*fault-fill*), e localmente estão associados a veios extensionais e brechas. O ouro ocorre principalmente confinado nos veios, porém também pode estar presente em quantidades significativas nos sulfetos, ricos em ferro, disseminados na rocha encaixante (Dubé e Gosselin, 2007).

Na maioria dos depósitos de ouro hospedados em *greenstone belts*, vários tipos de veios estão presentes, comumente estão relacionados espacialmente, mas não necessariamente temporalmente. A melhor maneira de se observar e estabelecer a relação temporal entre veios é analisando a relação de intercessão entre eles, ou seja, a relação de corte (Robert e Poulsen, 2001). Geometricamente a relação de corte entre veios pode ocorrer de três maneiras: sistemática, conflitante ou misturada. A primeira forma indica que os veios foram gerados em tempos diferentes, e um sistema de veios é sistematicamente cortado por outro. Relações de corte conflitantes e misturadas sugerem que os veios sejam gerados ao mesmo tempo, ou em períodos muito próximos, pois hora um sistema de veios corta o outro, e em outro local ele é cortado.

### **3.1 Classificação de veios quartzo-carbonáticos em depósitos de ouro hospedados em *greenstone belt***

Robert e Poulsen (2001) propõem uma classificação prática para veios, com ênfase aos veios mineralizados em ouro associados a *greenstone belt*, baseada na estrutura hospedeira, geometria e feições internas do veio, aspectos que podem ser observados em campo (Tab. 3-1). Desse modo os veios e os grupos de veios são individualizados em: (1) veios de preenchimento de falha (*fault-fill*); (2) veios extensionais e de extensão oblíqua (*extensional and oblique-extensional*) e veios extensionais em arranjo (*extensional vein array*); (3) veios em *stockwork* e veios em brechas. As descrições dos diferentes estilos de veios abaixo são conforme Robert e Poulsen (2001) e adotada no presente trabalho.

#### **3.1.1 Veios de preenchimento de falha (*faut-fill vein*)**

Os veios de preenchimento de falha são os mais comuns em depósitos de ouro sendo a maior fonte de extração de minério nesses tipos de depósito. Tipicamente ocupam as partes centrais de zonas de cisalhamento e falhas, onde podem ser paralelos ou levemente oblíquos a estrutura hospedeira. A maioria ocorre em ângulo de mergulho superior a 45°, porém também podem ser encontrados em ângulos suaves. São caracterizados pela presença de estruturas como *slickensides* e *slickenlines*, e lascas da rocha encaixante foliada em meio aos veios. Veios de preenchimento de falha também podem estar associados com dobras, em *dilational jogs* discordantes do bandamento devido a deslizamentos nos flancos, e ao longo do bandamento.

Em relação à estrutura interna, os veios de preenchimento de falha comumente são constituídos por quartzo laminado, onde as bandas de quartzo normalmente são separadas por faixas da rocha encaixante, contendo minerais hidrotermais como turmalina, sericita ou clorita. Essas faixas podem ser notadas tanto em escala microscópica como em afloramentos.

Dois mecanismos são propostos para a gênese de veios de preenchimento de falha. O primeiro supõe que a dilatação ocorra através de bandas de desprendimento (*releasing bands*) e aberturas (*jogs*), em baixo ângulo em relação a fratura de cisalhamento ou falha, durante o deslizamento (McKinstry, 1948; Sibson, 1990 *in* Robert e Poulsen, 2001). Esse processo pode ser marcado por texturas tipo quebra e preenchimento (*crack-seal*) paralelas às aberturas (*jogs*), trilhas de inclusões e fibras minerais paralelas à direção de deslizamento. O segundo mecanismo, denominado de *crack-seal-slip*, envolve dilação resultante de repetidos episódios de extensão ortogonal ou oblíqua de uma fratura de cisalhamento, alternados com deslizamentos ao longo da fratura (Jébrak, 1992; Petit *et al.*, 1999 *in* Robert e Poulsen, 2001).



<b>Tipo de veio</b>	<b>Feições internas</b>	<b>Estrutura associada</b>	<b>Geometria</b>
Veio de preenchimento de falha	Quartzo laminado e faixas da rocha encaixante hidrotermalizadas	Zonas de cisalhamento e falha	Paralelo ou levemente oblíquo a estrutura hospedeira. Veios lenticulares são comuns
Veio extensional e de extensão oblíqua	Quartzo com estrutura maciça, estruturas tipo <i>open-space filling</i> e <i>crack-seal</i>	Fora da zona de cisalhamento. Planos AC em dobras. Em alto ângulo em camadas competentes	Paredes planas e paralelas, ângulo de mergulho baixo a moderado em relação a zona de cisalhamento. Perpendicular ou oblíquo a zona de charneira de dobras
Veio extensional em arranjo		Zona de cisalhamento e camadas competentes	Veios planares a sigmoidais escalonados. Veios em alto ângulo com a foliação
<i>Stockwork</i>	Dois ou mais arranjos de veios extensionais ou de extensão oblíqua	Comum em zonas de intersecção de veios e camadas competentes	Zonas tabulares ou em forma de charuto
Brecha	Fragmentos angulares de rocha não rotacionados imersos em matriz hidrotermal	Ao longo de falha ou zona de cisalhamento	Paralelo a estrutura hospedeira

Tab. 3-1: Classificação e características principais dos diferentes tipos de veios associados a depósitos de ouro hospedados em greenstone belt. Modificado de Robert e Poulsen (2001).

### 3.1.2 Veios extensionais, extensão oblíqua e veios de extensão em arranjo (*vein array*)

Veios extensionais e veios de extensão oblíqua, em conjunto ou sozinhos, preferencialmente de desenvolvem em rochas competentes. Em um grande número de depósitos minerais eles são auríferos, porém possuem relevância econômica limitada. Em outros depósitos, veios extensionais, estão sobrepostos ao minério podendo ser estéril ou mineralizados. Podem ocorrer relacionados a zonas de cisalhamento rúptil-dúctil ou associados a rochas pouco deformadas fora das zonas de cisalhamento. Veios extensionais também ocorrem em arranjos com veios escalonados, associados a camadas mais competentes e associados a dobras (Hodgson, 1989 *in* Robert e Poulsen, 2001). Os veios de extensão oblíqua são geralmente planares e geralmente ocorrem conectando os veios de preenchimento de falha ou veios extensionais, ou como pares conjugados em camadas competentes. A maioria dos veios extensionais, em depósitos de ouro hospedados em *greenstone belt*, ocorrem isolados ou como parte de veios *en echelon*, e possuem ângulo de mergulho baixo.

Em geral, os veios extensional e veios de extensão oblíqua, possuem paredes paralelas e planares, diferentemente das paredes curvas e irregulares dos veios de preenchimento de falha. Apresentam cristais de quartzo com estrutura maciça, texturas tipo *open-space filling* e *crack-seal*, fibras de crescimento mineral e bandamento interno. Texturas tipo *open-space filling* são caracterizadas por agregados euédricos de cristais hidrotermais como por exemplo carbonado, pirita,

turmalina e scheelita incorporados na parede dos veios. Fibras de crescimento mineral, consistem de minerais extremamente alongados, associados aos veios, e que mostram uma direção preferencial constante. Elas representam o crescimento progressivo a partir de uma abertura na fratura e geralmente registram a direção de abertura do veio.

### 3.1.3 Veios em estruturas *stockwork* e *brecha*

Veios tipo *stockwork* consistem em dois ou mais arranjos de veios interconectados, são preferencialmente formados em rochas competentes e possuem morfologias variadas e estrutura interna complexa. Podem formar estruturas simples, compostas por dois ou três veios com direções bem definidas, até arranjos complexos com veios e vênulas de direções variadas. A morfologia geral de uma zona com veios em *stockwork* pode ser semelhante à de um charuto ou em forma de uma tábua alongada. Geralmente a relação de corte entre os sistemas de veios que compõem a zona de *stockwork* é conflitante, o que indica uma origem contemporânea entre os veios.

Brechas hidrotermais consistem de fragmentos angulosos da rocha encaixante, mostrando nenhuma evidência de rotação ou translação em larga escala, encaixados em uma matriz composta por minerais hidrotermais como, por exemplo, quartzo e turmalina. Veios em brecha e/ou brechas hidrotermais são tipicamente desenvolvidas em zonas de cisalhamento, especialmente em zonas rúpteis, ou em locais onde as zonas de cisalhamento interceptam rochas competentes, é comum estarem associados aos veios tipo preenchimento de falha. São entendidas como sendo geradas a partir de repetidos incrementos de fragmentação individualizados, causados pela combinação de processos deformacionais e hidráulicos, e preenchimento com material hidrotermal (Sibson, 1986; Jébrak, 1997 in Robert e Poulsen, 2001).

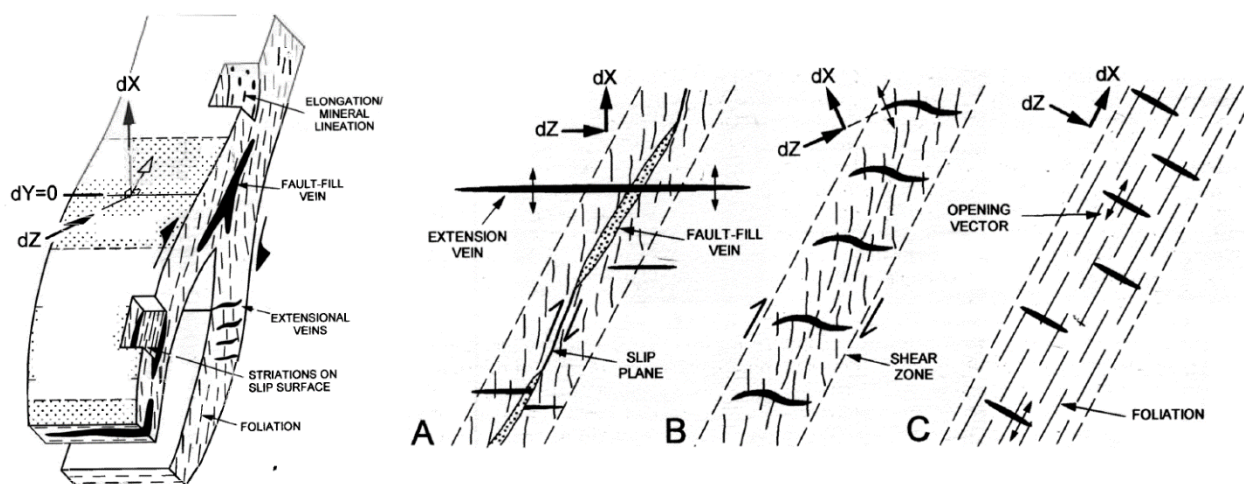


Fig. 3-1: Arranjos geométricos comuns dos veios de preenchimento de falha (*fault-fill*) e veios extensionais (*extensional vein*) em zonas de cisalhamento (*shear zone*), e suas relações com os eixos de encurtamento ( $dZ$ ) e alongamento ( $dX$ ). A) Veios de preenchimento de falha na parte central da zona de cisalhamento reversa, mostrando relações de corte

conflitantes com os veios extensionais que se estendem para fora da zona de cisalhamento. B) Veios extensionais *en echelon* com formato sigmoidal dentro da zona de cisalhamento. C) Veios extensionais *en echelon* planares dentro da zona de cisalhamento (Robert and Poulsen, 2001).

### **3.2 Veios quartzo-carbonáticos no greenstone belt Rio das Velhas**

Trabalhos relacionados a classificação e análises em veios quartzo-carbonáticos associados a mineralização de ouro no QF, foram elaborados recentemente por Pereira *et al.* (2013) e Ribeiro *et al.* (2013) no lineamento Córrego do Sítio, e por Morales *et al.* (2016) e Martins *et al.* (2016) no depósito de Lamego.

#### **3.2.1 Lineamento Córrego do Sítio**

No lineamento Córrego do Sítio, Pereira *et al.* (2013) identificou cinco sistemas de veios, segundo Robert e Poulsen (2001), V1, V2, V3, V4 e V5, para os depósitos de Carvoaria, Cachorro Bravo e Laranjeiras. A mineralização ocorre associada aos veios V1 que são classificados como preenchimento de falha (*fault-fill*), compostos principalmente por quartzo, ankerita e sericita, contendo também arsenopirita, pirita, pirrotita, esfalerita e bertierita como minerais acessório, além de localmente apresentar partículas de ouro livre. Possuem quartzo laminado, lineação de estiramento e fragmentos da rocha hospedeira paralelos à margem do veio. São interpretados como pré a sin-deformacionais, teriam percolados através de zonas de cisalhamento e se dispersado ao longo da rocha hospedeira.

O sistema de veios V2 é composto por veios extensionais e de extensão oblíqua, pois possuem crescimento mineral perpendicular à parede do veio. São constituídos por quartzo e ankerita como minerais principais, pirita e pirrotita como acessórios. Veios V1 e V2 apresentam relação de corte conflitante, apesar de na maior parte dos depósitos os veios V2 cortarem os V1, entretanto, localmente os veios V2, são cortados ou se desenvolvem a partir dos V1. Relação que sugere a contemporaneidade parcial entre os sistemas V1 e V2, porém o sistema V2 não está mineralizado.

Veios classificados como extensional e brecha hidráulica são componentes do sistema V3, formados por quartzo, ankerita e fragmentos de rocha. Apresentam relação de corte sistemática em relação aos sistemas V1 e V2, indicando foram formados posteriormente. O que é reforçado pela estrutura que controla os veios V3, discordantes das principais estruturas do depósito.

O sistema de veios V4 são classificados como extensionais, representa a última geração de veios e possuem relação de corte sistemática em relação aos sistemas anteriores. São compostos basicamente quartzo, carbonato e clorita, com pirrotita como acessório. Os veios do sistema V5, são classificados como *stockwork* e estão restritos aos diques metabásicos. Possuem composição formado por quartzo, carbonato, clorita e pirita, e não é observada relação de corte com os demais sistemas.

Ribeiro *et al.* (2013) classificou quatro sistemas de veios V1, V2, V3 e V4 para o depósito Laranjeiras, sendo que os sistemas V1, V2 e V3 são correlacionados aos sistemas de Pereira *et al.* (2013), e o sistema V4 é semelhante ao sistema V5. Inclusões fluidas em quartzo dos veios V1 e V2 sugerem que os fluidos mineralizantes possuam baixa a média salinidade (8,5% em peso de NaCl) e temperatura para precipitação do ouro de  $280\pm 17^\circ$  C. Os dados de inclusões fluidas nos veios do sistema V4, que são associados aos diques máficos, mostram valores de salinidade mais altos, média de 14,9% em peso de NaCl. Esses dados, juntamente com os obtidos nas análises de isótopos de oxigênio, sugerem que os sistemas de veios V1, V2 e V3 sejam formados a partir da precipitação de fluidos metamórficos. Por outro lado, os dados obtidos para o sistema V4, sugerem um cenário diferente, com a interação de águas meteóricas e fluidos magmáticos diluídos.

### 3.2.2 *Lamego*

De acordo com as relações estruturais e a rocha hospedeira, Morales *et al.* (2016) classificaram três sistemas de veios no depósito Lamego, focado no corpo de minério Cabeça de Pedra. O sistema V1 é composto principalmente por quartzo fumê e pirita, classificado como extensional, restrito a FFB, onde veios estão discordantes do bandamento S0 e associados com zonas de charneiras das dobras D1. De composição semelhante aos veios V1, veios V2 são subdividido de acordo com a rocha hospedeira. Onde paralelos ao bandamento da FFB são denominados V2b, e onde concordantes com a foliação tectônica S1-2 dos metabasaltos, metapelitos carbonosos e micáceos são denominados como V2a, V2c e V2d, respectivamente. O sistema de veios V3 é classificado de forma independente, em relação aos anteriores, pois exhibe estilo geométrico e morfológico distinto. Está tipicamente associado a zonas de cisalhamento e falhas, formando estruturas tipo en echelon e stockwork, composto basicamente por quartzo leitoso.

Durante a fase de dobramento, rochas mais competentes em Lamego, como p. ex. FFB, tendem a gerar fraturas paralelas ao eixo das dobras próximo as regiões de charneira. Essas fraturas permitiram infiltração do fluido hidrotermal pelas zonas de cisalhamento e falhas, servindo de canais para a percolação dos veios V1. Após a infiltração, o fluido hidrotermal dispersa-se ao longo dos planos de foliação S0 e S1-2, gerando os veios do sistema V2. Os veios V3 representam estágios finais de recristalização a partir dos sistemas de veios anteriores (Morales *et al.*, 2016). De acordo com Martins *et al.* (2016), os veios dos sistemas V1 e V2 foram gerados durante o evento tectônico progressivo D1 e são interpretados como sendo de idade Arqueana. Os fluidos hidrotermais responsáveis pela mineralização em ouro no corpo de minério Cabeça de Pedra foram formados pela interação de fluidos com baixa salinidade (2 % em peso NaCl), em temperaturas entre 200 e 370° C, características de fluidos metamórficos aquo-carbonáticos (Morales *et al.*, 2016).

## **CAPÍTULO 4 - GOLD MINERALIZATION ASSOCIATED WITH QUARTZ-CARBONATE VEINS HOSTED IN THE LOWER METAMAFIC UNIT OF THE WORLD-CLASS CUIABÁ DEPOSIT, RIO DAS VELHAS GREENSTONE BELT, MINAS GERAIS, BRAZIL.**

### ***4.1 Introduction***

The Rio das Velhas greenstone belt is located in the Quadrilátero Ferrífero (QF) region, an important Brazilian metallogenic province in the southern border of the São Francisco Craton (Almeida, 1967) (Fig. 4-1). The major gold deposits of the QF are hosted in rocks of the Nova Lima Group, basal unit of the Rio das Velhas Supergroup, an Archean greenstone belt of the same name. The deposits are classified as orogenic following designation by Groves et al. (1998).

The gold-only deposits hosted in rocks of the Rio das Velhas Supergroup show distinctive mineralization styles associated with highly deformed and hydrothermally altered zones along thrust-shear belts, being characterized by a consistent linear orientation of ore bodies along a plunge. They are hosted in banded iron formation (BIF), ferruginous chert, mafic-ultramafic and sedimentary rocks (e.g., Lobato et al., 2001). Three main mineralization styles are identified (e.g., Ribeiro-Rodrigues et al., 1997); 1) stratabound-replacement (e.g. Cuiabá, Morro Velho, São Bento and Lamego); 2) disseminated, with sulfide minerals related to hydrothermal alteration in shear zones (e.g. Raposos and Juca Vieira) and; 3) shear-related, quartz-carbonate veins (e.g. Córrego do Sítio).

The Cuiabá deposit (Fig. 4-1) is the major gold producer in the QF, and the largest underground mine in Brazil, counting 18 levels with 1,100 m in depth below surface. The first legalized exploration reports date back to 1740. The company Saint John Del Rey Mining Ltda. acquired the exploitation rights in 1834. Afterwards, Anglo American became holder of the deposit in 1996, and the property was signed over to AngloGold Ashanti (AGA) in 1999. Present reserves amount to 1.18 Moz with a cutoff grade at 5.85 g/t, and estimated total resources of 5.78 Moz at 10.26 g/t. In 2015, Cuiabá achieved 5 Moz of overall production (Resources and Reserves Evaluation Report, AngloGold Ashanti, 2016).

The Cuiabá gold deposit consists of volcanic and sedimentary rocks, with mineral parageneses typical of the greenschist facies metamorphic conditions. The local rock stratigraphy encompasses a lower metamafic unit, BIF and metachert (carbonaceous and-or ferruginous), carbonaceous phyllite, an upper metamafic unit, micaceous phyllite and metavolcanoclastic rocks on top (Figs. 4-2 and 4-4). Historically the major source of gold at Cuiabá is associated with massive and disseminated sulfide minerals, mainly pyrite and pyrrhotite, hosted in BIF and metachert, especially in the Fonte Grande Sul, Serrotinho, Balancão and Galinheiros orebodies (Fig. 4-2). However, a small amount of gold associated with quartz-carbonate veins hosted in the upper metamafic unit have also been mined, in orebodies Viana, Galinheiro Footwall and Galinheiro Quartzo (Fig. 4-2) (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

In 2015, a surface exploration diamond drill hole targeting mineralization hosted in the Fonte Grande Sul orebody, below level 20 (approximately 1,200 m below surface, 290 m below sea level), casually intersected a vast silification zone hosted in the lower metamafic unit containing coarse-grained, visible gold particles. Based on those initial drill holes, exploration work in mine galleries has been under way looking for similar mineralization styles, with potential to be mined. Three new gold mineralized zones have been identified, namely VQZ (*Veio de quartzo* in Portuguese), Fonte Grande Sul Footwall (FGS FW) and Serrotinho Footwall (SER FW) (Fig. 4-2). In these, the mineralization is dominated by free gold particles in quartz veins and disseminated sulfide minerals in hydrothermally altered surrounding rocks.

Over the years most studies of the Cuiabá gold deposit have focused on BIF-hosted mineralization (Vial, 1980; Vieira, 1992; Toledo, 1997; Ribeiro-Rodrigues, 1998; Martins, 2000; Lobato et al., 2001). The present investigation is original in the sense that it is the first time a shear-related gold orebody of economic importance is described at Cuiabá. The VQZ system is also presently being investigated by Kresse et al. (2016) in order to compare fluid composition with other BIF-related orebodies. We thus hope to provide a better understanding of this exploration target in the region.

Detailed vein system studies help provide information to better understand mineralization history, as well as formation temperature, composition and origin of the ore-forming fluid (Bons et al., 2012). This study presents the classification of quartz-carbonate vein types hosted in the lower metamafic unit of the Cuiabá deposit, as well as their petrographic characterization and structural control. The aim is to help understand the genesis, the vein system evolution and propose a gold mineralization model.

Since most of the gold in Cuiabá has historically been recovered from sulfide leaching, our experience working with free gold, which is the case in the vein systems in this study, is relatively limited. For this reason, MLA-based analyses (Mineral Liberation Analyser) of mineralogical characterization of quartz-carbonate veins and wall rocks have been undertaken. According to Gu (2003), mineral liberation data are fundamental parameters used in processing plant design and optimization. The main aim of the ore characterization using MLA is describe the gold particles to determine the gold speciation, grain size and mode of occurrence, and thus furnish further support to the metallurgical plant process.



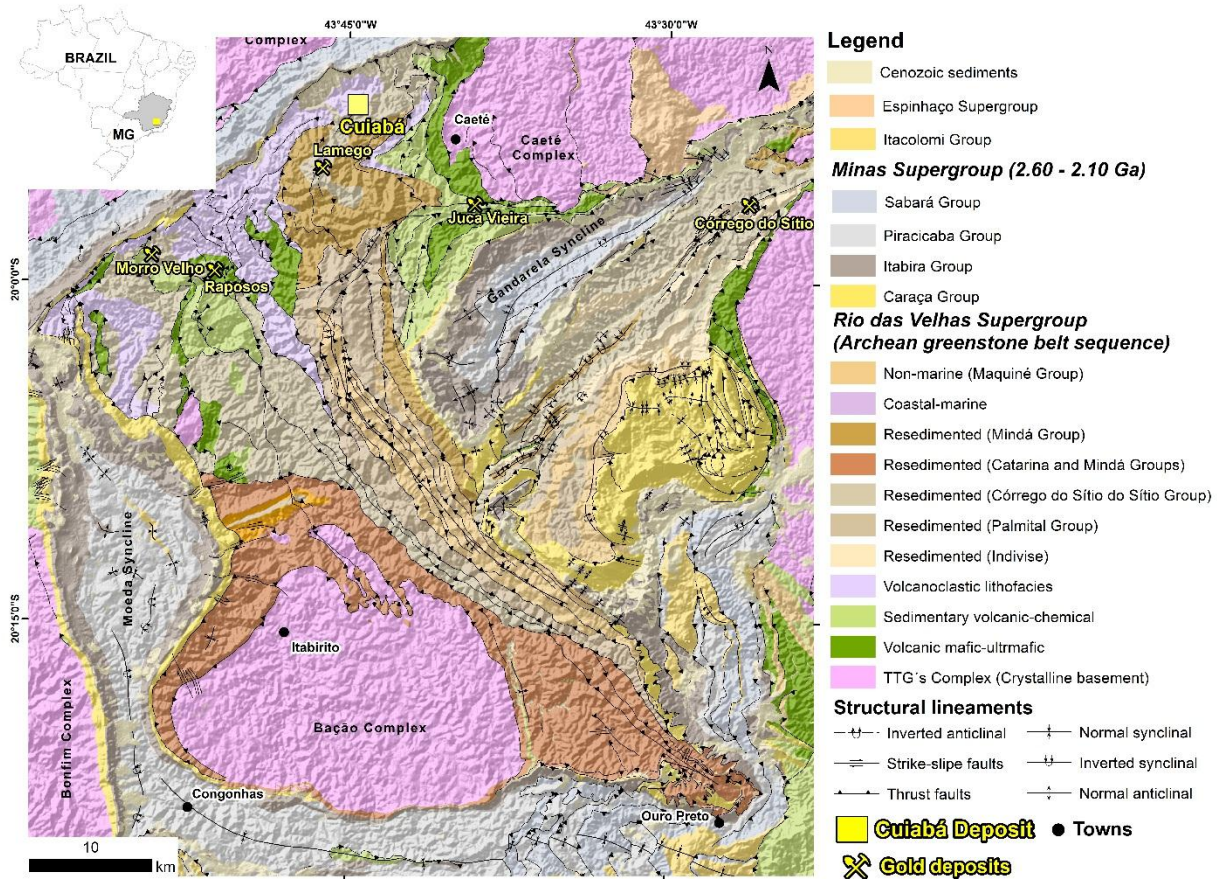


Fig. 4-1: Geological map of the QF region with principal lithofacies associations of the Rio das Velhas greenstone belt and location of the Cuiabá mine (after compilation by Lobato et al., 2005, based on Dorr, 1969; Baltazar and Zucchetti, 2007).

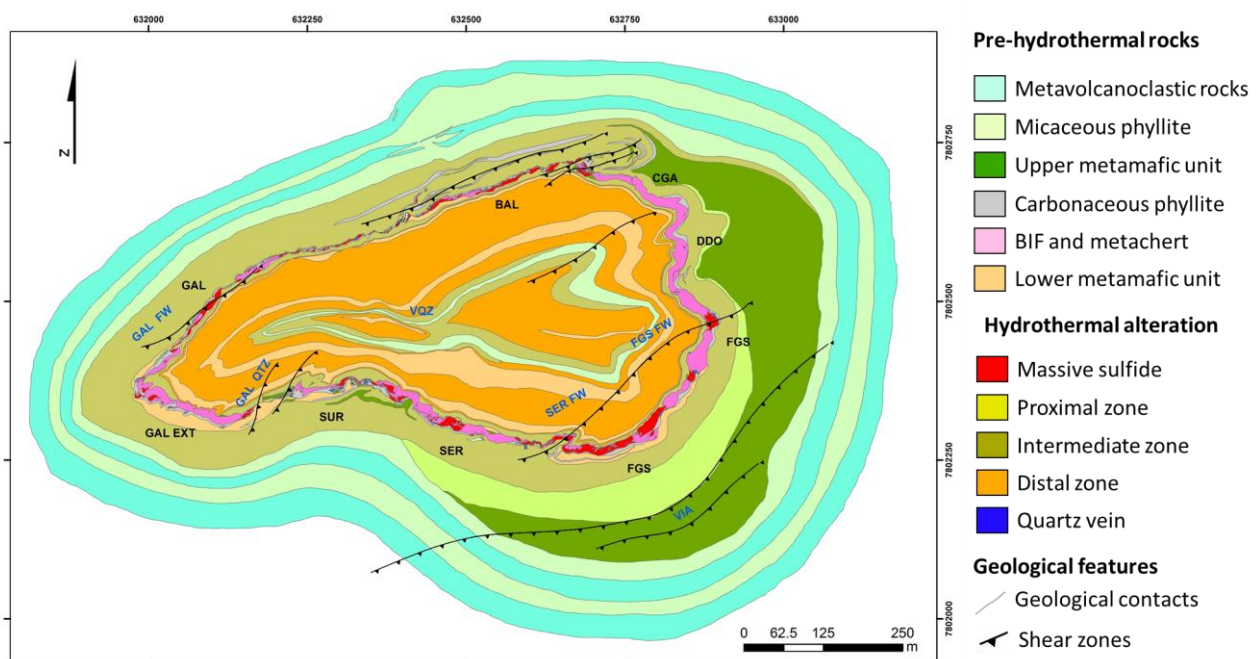


Fig. 4-2: Geological map of Level 11 of the Cuiabá mine showing the main orebodies associated with BIF (FGS – Fonte Grande Sul, SER – Serrotinho, BAL – Balancão, GAL – Galinheiro, GAL EXT – Galinheiro extensão, DDO – Dom

Domingos, CGA – Canta Galo, SUR – Surucu), and mineralized zones related to quartz-carbonate veins (VQZ, SER FW – Serrotinho Footwall, FGS FW – Fonte Grande Footwall) (data provided by AngloGold Ashanti).

## **4.2 Geology of the Quadrilátero Ferrífero region**

### **4.2.1 Stratigraphy**

The QF region is subdivided in three geotectonic units by Dorr et al. (1957): 1) crystalline basement; 2) an Archean greenstone belt sequence – Rio das Velhas Supergroup; and 3) supracrustal Paleoproterozoic metasedimentary rocks (Fig. 4-1). The rocks of the basement can be subdivided into three main groups (Farina et al., 2016): i) fine-grained banded orthogneisses; ii) leucogranites and aplitic/pegmatitic veins and dikes and; iii) medium-to coarse-grained, mostly weakly foliated granites.

Four magmatic events described as the Santa Bárbara, Rio das Velhas I, Rio das Velhas II and Mamona are identified, spanning from 3.2 to 2.7 Ga (Farina et al., 2015; Farina et al., 2016; Lana et al., 2013; Romano et al., 2013). These periods of magmatic activity embody a significant part of the protracted tectonomagmatic Archean history of the Quadrilátero Ferrífero (Farina et al., 2016).

The Rio das Velhas Supergroup is a greenstone belt consisting of a metavolcanic-sedimentary sequence, subdivided in the Nova Lima and Maquiné groups. Baltazar and Zucchetti (2007) suggest the formation of two distinctive greenstone belts dated between 2.90 Ga to 2.78 Ga, and identified seven lithofacies associations, which were generated during four tectono-sedimentary stages. (I) Volcanic mafic-ultramafic, predominantly composed of basaltic and ultramafic lavas, gabbro intrusions, anorthite and peridotite, with BIF intercalations, ferruginous chert, carbonaceous pelite, turbidite and felsic-volcanoclastic rocks. (II) Sedimentary volcanic-chemical, composed of tholeiites intercalated with BIF and ferruginous chert, containing less clastic sediments like turbidites and carbonaceous pelite. (III) Sedimentary clastic-chemical, characterized by alternating micaceous pelites (or chlorite schist) and BIF, and subordinate ferruginous chert and carbonaceous pelite. (IV) Volcanoclastic with monomitic and polymitic breccias, greywacke conglomerates, sandstone and mudstone. (V) Resedimented, widely distributed in the QF, and including three different sequences of argillaceous greywacke, two of them metamorphosed at the greenschist facies, in the northern and eastern sector, and the other at amphibolite facies conditions in the southern portion. (VI) Coastal-marine association, restricted to a small area to the north of the Bação complex, and composed of sandstone with cross-bedding of medium to large dimension, sandstone with rip marks and herringbone structures, and silty sandstones. (VII) Non-marine association, corresponding to the Casa Forte and Maquiné formations in the central and eastern part of the QF, consisting of fine- to coarse-grained conglomeratic sandstones.



The Paleoproterozoic Minas Supergroup (Dorr, 1969; Babinski et al., 1991; Renger et al., 1995) is a ca. 6000 m-thick package of clastic and chemical rocks (Alkmim and Marshak, 1998) lying unconformably on the Archean greenstone belt. The Minas Supergroup (Fig. 4-1) can be subdivided in two sequences separated by a regional unconformity (Alkmim and Martins-Neto, 2012): i) continental to marine sediments composed to Caraça, Itabira and Piracicaba Groups (Dorr, 1969; Renger et al., 1995); and ii) submarine fan deposit represented by Sabará Group (Alkmim and Marshak, 1998).

The rocks of the Itacolomi Group (Dorr, 1969) outcrop in the NE part of the QF, comprises an up to 2 km-thick section of medium-to coarse-grained impure metasandstones, metaconglomerates and minor phyllites separated from the underlying Minas Supergroup by a low-dipping regional unconformity (Dorr, 1969; Alkmim and Martins-Neto, 2012).

The Espinhaço Supergroup covers a small area of the NE of the QF, with conglomerates and sandstones deposited between 1.84 and 1.71 Ga (Machado et al., 1989).

#### **4.2.2 Structural setting**

The QF is characterized by a complex structural setting divided in different tectonic events and deformation phases recorded along their geological evolution (e.g., Dorr, 1969; Drake and Morgan, 1980; Endo, 1997; Alkmim and Marshak, 1998; Chemale et al., 1994; Chauvet et al., 1994; Baltazar and Zucchetti, 2007). The main structural features of the QF are domes formed of Archean basement surrounded by large Paleoproterozoic synclines (Dorr, 1969).

Baltazar and Zucchetti (2007) described four structural domains in the QF, defined by their structural arrangement according to main structural directions. Four generations D1, D2, D3 and D4 of tectonics structures are proposed, related to three deformation events that affected the Rio das Velhas greenstone belt. The first two generations (D1 and D2) are related to a progressive deformation event and were originated during the Archean. The D1 generation is correlated to an N to S tectonic transport, resulting in inverse faults of E-W direction, dipping to the north, sub-horizontal open flexural folds verging to the S, as well as tight to isoclinal folds with axes plunging to ENE. The second structural generation D2 are typified by NW-striking thrust faults in association with tight to isoclines NW trending folds, verging to SW. Mineral lineations are N60°E/20° orientated, and were generated by a NE-SW-directed compression. Generation D3 were generated between 2.1 and 1.9 Ga in an extensional regime, with nucleation of regional synclines. The D4 deformation is correlated to the Neoproterozoic to Early Ordovician Brasiliano event (ca. 0.65-0.45 Ga) with compression and transport from E to W (e.g., Endo and Fonseca, 1992; Chemale et al., 1994; Alkmim and Marshak, 1998).

Alkmim and Marshak (1998) proposed three kinematic phases that affect the rocks of both the Rio das Velhas and Minas Supergroup (Minas accretionary orogeny by Teixeira et al., 2015). The first episode (D1) generated fold and thrust belts with a NE–SW trend, verging to NW, during the Rhyacian (2.1–2.0 Ga). The second phase (D2) is related to the Paleoproterozoic orogenic collapse, caused by a regional extensional tectonic event, resulting in the uplift of the Archean granite–gneiss domes and formation of the regional synclines (the dome-and-keel structure of Marshak and Alkmim, 1989). The third event (D3) is related to the Neoproterozoic Brasiliano orogeny, and was responsible for the formation of fold and thrust belts verging to the west.

#### **4.3 *Materials and analytical methods***

Classification of the different vein types and the understanding of their controlling structures were undertaken by detailed geological underground mapping and petrographic description. To elucidate the sequence of vein growth and deformation, the field relationship and structural control of different types of veins were investigated. Detailed work on hand specimen and polished thin sections was carried out in addition to establishing the mineral composition and internal textures. A development drift to the Balancão orebody at level 15 (800 m under the surface, 60 m above sea level) was selected and mapped at the 1:100 scale. This area was chosen since it contains the best occurrence of the different quartz-carbonate vein types. Other quartz-carbonate veins occurrences associated with the lower metamafic unit in the mine were also investigated, as well as surface and underground drill core samples.

The structural and lithological mapping points were marked with the use of tape and compass, starting from the topographic base points and/or from sampling channel previously determined by tachymeter. The geological points were projected along the plunge on a surface of 1.50 m above the drift's ground level to draw the geological maps.

For the petrographic studies, 25 polished thin sections of selected rock samples from the development drift as well as from drill cores were used. Most of the sections were cut perpendicular to the foliation and parallel to the mineral lineation for the purpose of kinematic analyses. A few sections were cut orthogonal to both foliation and lineation, or parallel to both foliation and lineation, in order to facilitate three-dimensional structural analysis. Mineral identification was mainly carried out through conventional transmitted and reflected light microscopy. The microscopic analysis of the thin sections was conducted using a Leica microscope equipped with a Leica DFC290 camera, with objective lenses of 2.5x 5x 10x 20x 50x, at the Laboratory of Metallogeny and Fluid Inclusions, Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa – CPMTIC at the Federal University of Minas Gerais – UFMG.

Sample preparation processes for MLA analyses is presented in figure 4-3. The geometallurgical characterization was done using crushed rock residues from drill cores, previously analyzed for gold concentrations at AngloGold Ashanti lab (AGA). Samples containing gold grades higher than 2.00 g/t (current Cuiabá deposit cut-off) were selected. As gold mineralization occurs in different lithotypes, the collected sample material was individualized in two lithologies: (1) quartz-carbonate veins; and (2) hydrothermalized host rock. Two composite samples with 74 kg and 66 kg, respectively, were used on geometallurgical characterization. The composites were created based on drill cores geological description and spatial distribution. The quartz-carbonate veins composite is formed by 29 aliquots from crushed residues and the host rock by 23.

All samples were grinded to a fine of 80 % passing on a 75  $\mu\text{m}$ , at the AGA lab facility. This process reduces the sample particle size that fed a centrifugal separator (Falcon). The concentrated aliquot was dry sieved using mesh sizes of 150, 75, and 45  $\mu\text{m}$ . The stages of gravimetric concentration and screening were performed in the Mineral Treatment Laboratory at the Department of Mining Engineering at UFMG. Polished section of each grain size was analyzed by MLA at the Center of Microscopy (UFMG) using a Scanning Electron Microscope (SEM) Quanta 200 FEI.

The MLA technique consists of an automated system coupled to SEM. This method combines electron backscattered images (BSE) and X-ray analyses (EDS) to provide detailed mineralogical information concerning a specific material. The carried out high resolution images of particles allow the MLA to distinguish their mineral phases by high technology image analyses (Fandrich et al., 2007). A supplying side effect is the generation of data, concerning the modal mineralogy, porosity, grain size and shape, associated minerals and textural maps of the surface of polished rocks, sediments and other particular rocks (Sylvester, 2012). Fandrich et al. (2007) described eight measurement modes offered by the MLA and their applications. Two of them are used in this study: Ford analysis or grain-based X-ray mapping (GXMAP); and sparse phase liberation analysis (SPL).

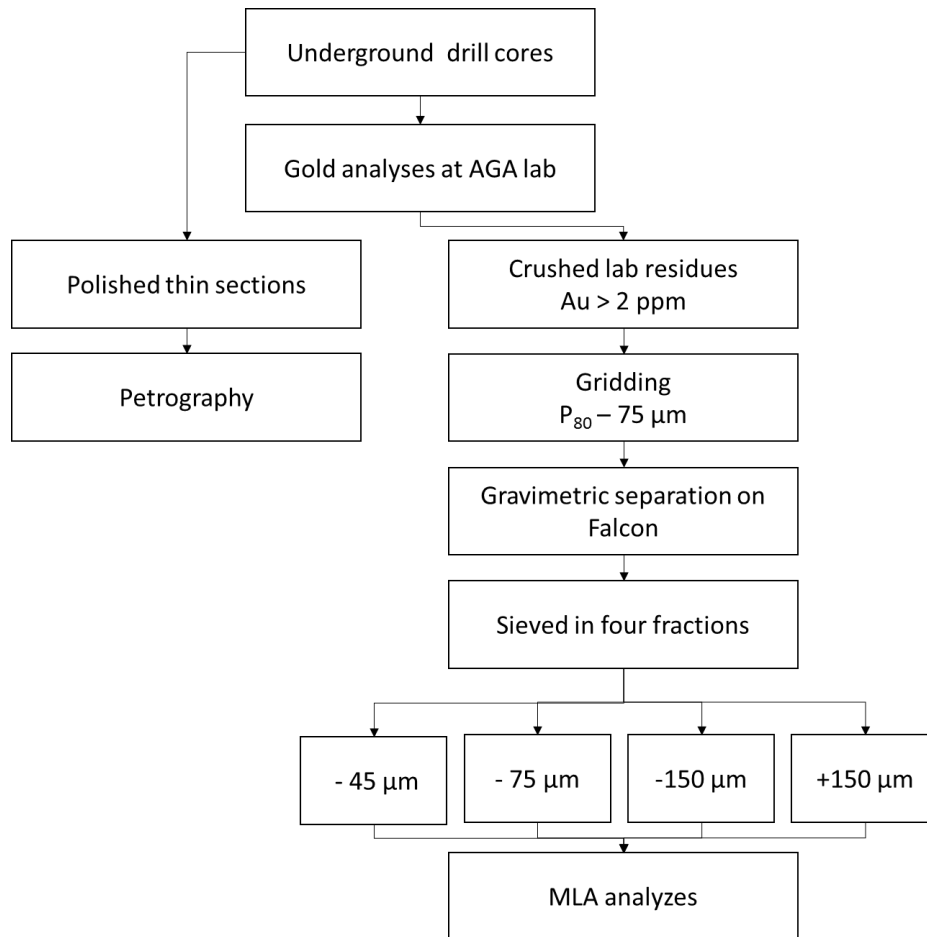


Fig. 4-3: Flow chart of mount preparation used for the Mineral Liberation Analyser (MLA) analyses.

#### 4.4 Geology of the Cuiabá deposit

The Cuiabá deposit is located in the northeastern part of the QF, within the volcanoclastic association of Baltazar and Zucchetti (2007) (Fig. 4-1), a part of the metavolcano-sedimentary rocks of the Nova Lima Group. Vial (1980) established the stratigraphy of the deposit as a lithological succession of metavolcanic, metavolcanoclastic and metasedimentary rocks characterized by greenschist facies mineral assemblages, structural-controlled by an anticline fold named Cuiabá Fold. Vial (1980), Vieira (1992), Lobato et al. (2001) and Fernandes et al. (2016) also describe the stratigraphy of the deposit in detail (Fig. 4-4).

Metandesite with intercalated phyllites represent the basal units of the stratigraphic column (Fig. 4-4). This lower mafic unit is overlain by chemical-sedimentary rocks, composed of banded iron formation (BIF) and ferruginous chert. Above the chemical unit are carbonaceous phyllite and metabasalt with intercalated micaceous phyllite. The uppermost unit is formed by micaceous phyllite and metavolcanoclastic rocks.

The lower metamafic rocks are light green and fine-grained (Fig. 4-4), both massive and foliated. Main minerals are amphibole, plagioclase, clinozoisite/epidote, chlorite and quartz. Vieira (1992) has described the presence of pillow lavas, and variolites of andesitic composition.

The overlying BIF (Fig. 4-4) ranges in thickness between 1 and 15 m, and is characterized by alternating layers of dark quartz-carbonate-carbonaceous matter and translucent to orange quartz-carbonate-chert bands (e.g., Lobato et al., 2001). Two individual BIF layers in the Cuiabá deposit are distinguished, and separated by a 0.15-1.00 m metamafic volcanic layer. The lower BIF, typically banded and abundant in Fe-carbonate and carbonaceous matter, is the main host to gold. The upper layer consists of highly deformed, ferruginous metachert rich in carbonaceous matter (Lobato et al., 2001).

Carbonaceous phyllite (Fig. 4-4) surrounds BIF, and varies between 1 and 5 m. It is mainly composed of muscovite, quartz, carbonate, chlorite and carbonaceous matter. Lenses of carbonaceous phyllite are also present in the lower and upper mafic volcanic units.

The upper metamafic unit (Fig. 4-4) displays a similar mineralogical composition to the lower mafic unit, consisting of chlorite, epidote, plagioclase, quartz and subordinate amphibole. It has basaltic composition, with a higher Fe/Mg ratio compared to the lower, andesitic mafic unit (Vieira, 1992).

Micaceous phyllite (Fig. 4-4), varying between 1 and 5 m, form lenses in the metavolcanic rocks, or are intercalated with these and with carbonaceous phyllite. Zones less affected by deformation show the primary layering marked by alternating millimetre to centimetre layers of distinct grain size and mineralogy.

Metavolcanoclastic rocks (Fig. 4-4) of dacitic to rhyolitic composition are at the top of the stratigraphic sequence, forming a 500 m thick unit that represent the most abundant rock type in the area. Quartz and plagioclase phenocrysts are the main components in a mica-chlorite-quartz-carbonate matrix.

The Cuiabá fold (Fig. 4-2) is an anticline with an inverted northern flank and a normal southern flank (Vial, 1980; Vieira, 1992; Toledo, 1997; Ribeiro-Rodrigues, 1998; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Fernandes et al., 2016). This structure is marked by surrounding BIF with a N116°-directed axis, and dipping angles that vary between 35° for the shallower levels, and 12° below level 18. This dip direction also controls the mineralized orebodies, and at least three deformational phases that affected the region of the deposit. The genesis of the of Cuiabá fold is still under debate (e.g. Vial, 1980; Vieira, 1992; Toledo, 1997; Ribeiro-Rodrigues, 1998; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007; Fernandes et al., 2016). One hypothesis assumes the Cuiabá fold to have a sheath or tube shape (Vial, 1980; Toledo, 1997; Ribeiro-Rodrigues, 1998; Ribeiro-Rodrigues et al., 2007). On the other hand, Vieira (1992), Holcombe and Couglin (2003) and Fernandes et al. (2016) agree that the Cuiabá

structure is a type-3 re-folded fold (Ramsay and Huber, 1987). Fernandes et al. (2016) suggest a structural evolution model for the Cuiabá deposit, where reclined folds were progressively refolded, and propose that the fold could be opened in its northern part.

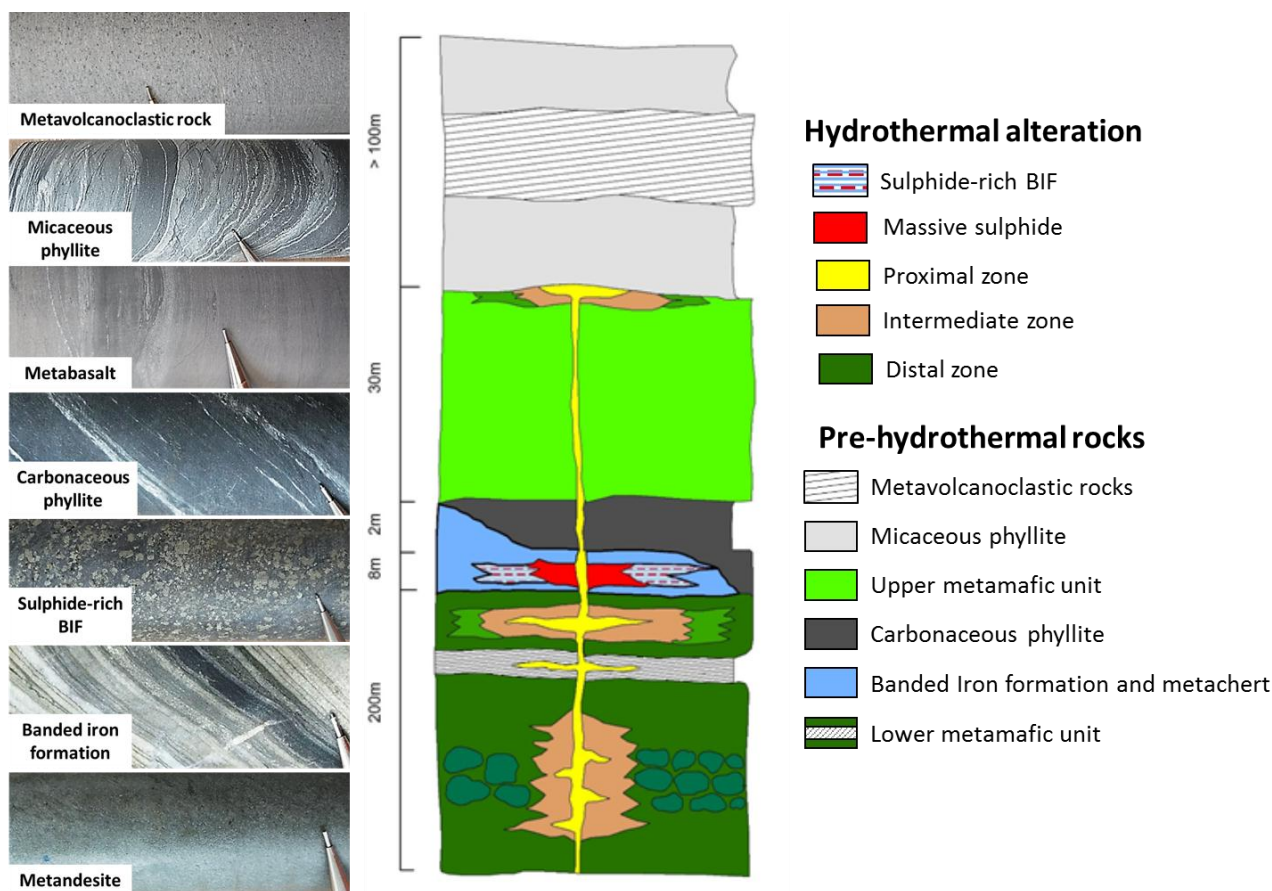


Fig. 4-4: Stratigraphic column at the Cuiabá mine (after Fernandes et al., 2016).

The four main orebodies at the Cuiabá deposit are Fonte Grande Sul, Serrotinho, Galinheiro and Balancão, while Galinheiro Extensão, Surucucu, Canta Galo and Dom Domingo are secondary (Figs. 4-2), all classified as stratabound mineralization style-I by Ribeiro-Rodrigues (1998), hosted in BIF and ferruginous chert. Other mineralization styles (Ribeiro-Rodrigues, 1998) are shear-zone related quartz veins (style-II) and disseminated sulfides associated with Fe-rich volcanic rocks (style-III). According to Lobato et al. (2001), the mineralization is directly related to hydrothermal alteration within zones of a high fluid flow rate indicated by hydrothermal zonation.

The mineralization styles II and III are observed in both the upper and basal metamafic units. They are typical of orebodies Viana, Galinheiro FW, Balancão FW and Galinheiro Quartzo (Ribeiro-Rodrigues, 1998) (Figs. 4-2), associated with the upper metabasalt unit. The Viana orebody was mined in shallow levels (levels 3 and 4), and is related with shear zones on the hanging wall of the normal fold limb. Orebodies Galinheiro FW and Balancão FW are located on the footwall of the inverted limb (Figs. 4-2), and only the Galinheiro FW was mined at level 12.

#### ***4.5 Gold mineralization hosted in the lower metamafic unit***

In the center of the Cuiabá fold, three recently discovered gold mineralized zones associated with the lower metamafic unit are described in this study. They comprise quartz-carbonate veins, namely VQZ, Fonte Grande Sul Footwall (FGS FW), and Serrotinho Footwall (SER FW) (Fig. 4-5). These three mineralized zones are related to hydrothermal alteration and ductile-brittle shear zones where gold is present mainly as visible particles within quartz-carbonate veins, but also disseminated in sulfide minerals in the host rock. These regions are characterized by different types of interconnected quartz-carbonate veins where four vein systems V1, V2, V3 and V4 are described (Tab. 4-1). They are structurally controlled and associated with hydrothermal alteration. Hydrothermal alteration halos vary from 10 m to a few centimeters in width, and could be divided into three zones related with both quartz-carbonate vein and deformation intensity: distal, intermediated and proximal (Fig. 4-6). The distal zone is marked by chlorite, with carbonate indicating the transitions between the distal and intermediate zone; sericite is present in the proximal zone.

The VQZ is located in the centre of the Cuiabá fold associated with a N70°E shear-zone possibly linked to the Galinheiro Quartz orebody along the strike direction (Fig. 4-5), dipping parallel to the main ore bodies plunge (116°/15°) (Fig. 4-7). Surface and underground drill core data indicate that VQZ have a linear shape and a continuous mineralized zone up to 2 km in depth along the plunge, which may achieve up to 30 m in thickness (Fig. 4-7). Data from channel and drill core samples (Fig. 4-7) indicate average grades of 5.00 g/t that locally reach up to 500 g/t due to the presence of coarse gold particles.

Located on the footwall of the normal limb of the Cuiabá fold, the SER FW and FGS FW mineralized zones (Fig. 4-5) contains minor volumes of quartz veins in relation to VQZ. They are related to another shear zone, parallel to the VQZ-Galinheiro Quartz, on the footwall of the Serrotinho and Fonte Grande Sul orebodies (Fig. 4-5).

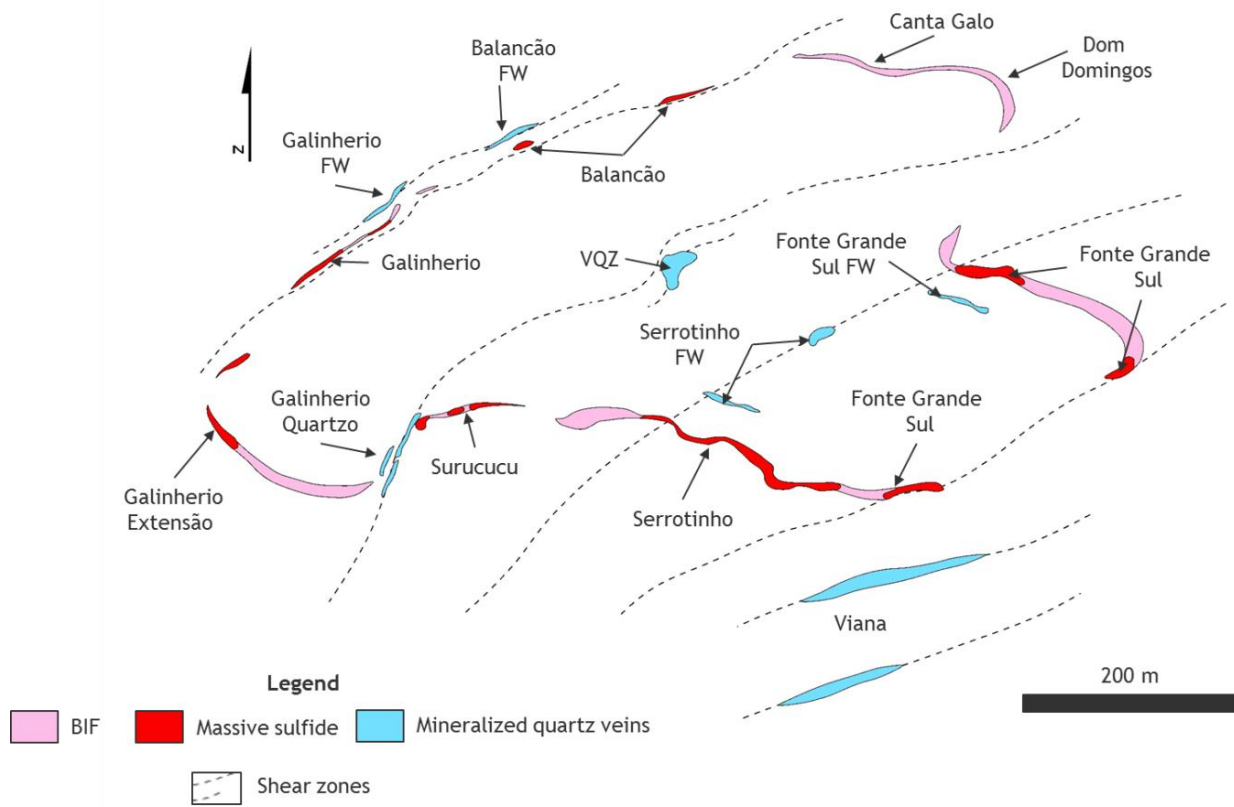


Fig. 4-5: Schematic map of Level 15 of the Cuiabá mine showing the main orebodies (massive sulfide) associated with the BIF, and mineralized zones hosted in the quartz-carbonate veins. Note the relations between shear zones and gold mineralization.



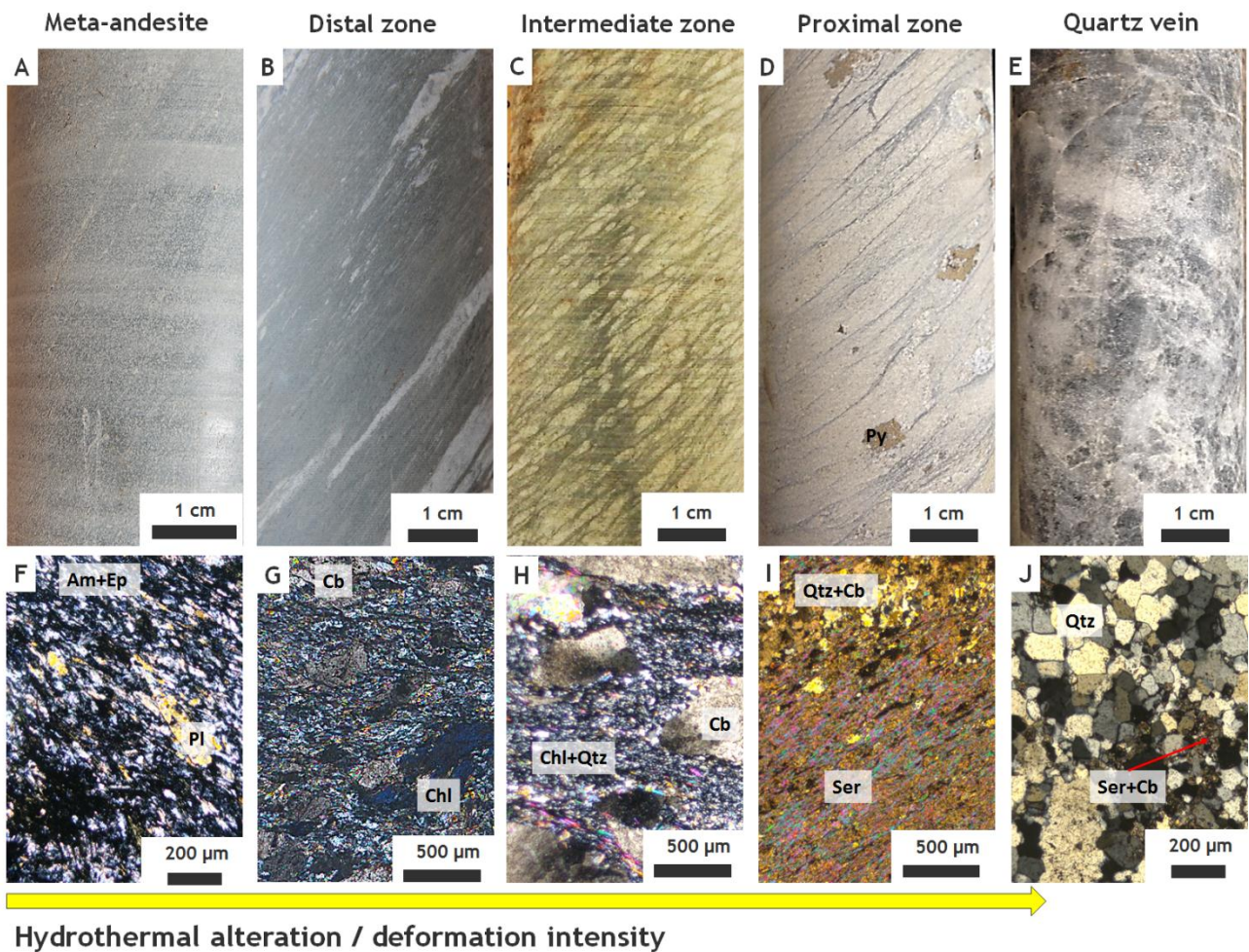


Fig. 4-6: (A-E) Photograph of drill core sample. (F-J) Photomicrographs of polished thin sections taken under transmitted light, crossed nicols, of the basal metandesite, highlighting aspects of the hydrothermal alteration zonation in the lower metamafic unit of the Cuiabá mine. A) Massive metandesite. B) Zone of pervasive chlorite alteration and quartz-carbonate veinlets in the distal alteration zone. C) Carbonate alteration zone, where this mineral is surrounded by chlorite and sericite in an anastomosed foliation. D) Sericite, proximal hydrothermal zone with coarse-grained pyrite (Py) grains and quartz-carbonate veins. E) Massive quartz veins. F) Fine-grained metandesite composed of amphibole (Am), epidote (Ep) and plagioclase (Pl) porphyroblasts. G) Chlorite (Chl) zone showing nematoblastic texture with carbonate (Cb). H) Carbonate alteration zone with fine-grain chlorite (Chl) surrounding carbonate (Cb) porphyroblasts. I) Sericite zone with lepidoblastic texture containing sericite (Ser), opaque minerals, as well as coarse-grained quartz (Qtz) and carbonate minerals (Cb). J) Zone of quartz vein with coarse- to medium grained quartz (Qtz) and clusters of sericite and carbonate.

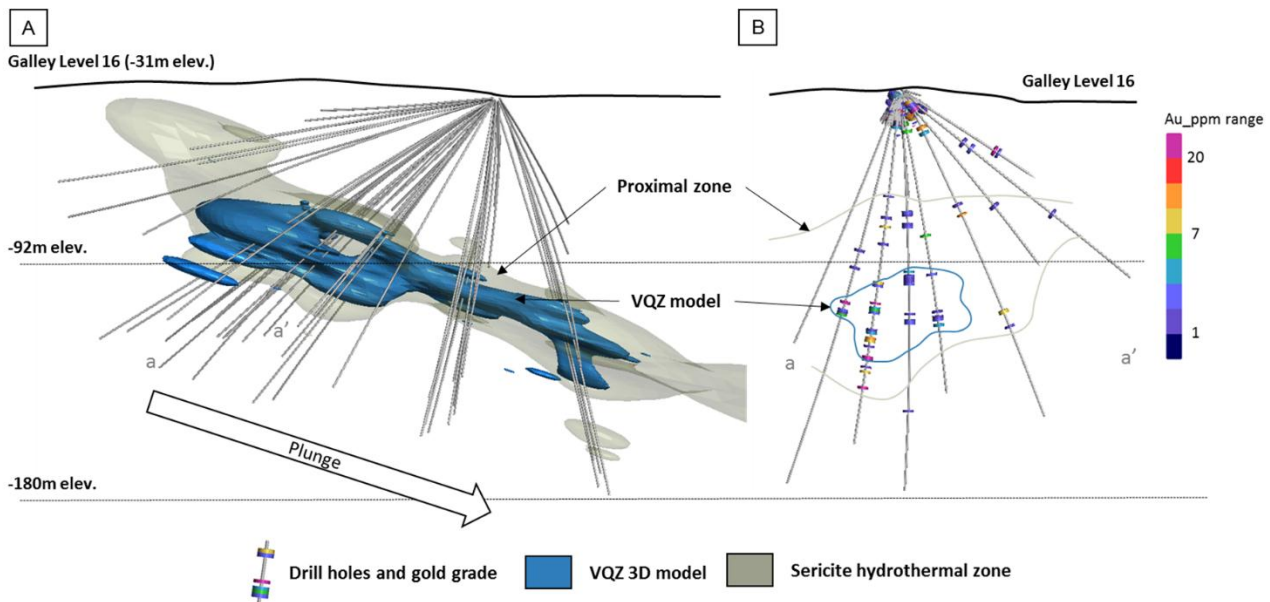


Fig. 4-7: 3D geological model from VQZ mineralized zone. A) looking parallel to the plunge. B) cross-section a-a' orthogonal to the plunge, showing the gold grade variability in the quartz-carbonate veins (VQZ model) and host rock (proximal zone).

#### 4.5.1 Structural setting

Only one structural generation G1 is associated with quartz-carbonate veins hosted in the lower mafic unit. This comprised the S0 compositional banding, the S1 flexural foliation, the S2 mylonitic foliation, an intersection lineation Lint1 sub-parallel to both F1 axis fold and mineral lineation Lmin1. These are all accompanied by isoclinal and intrafolial folds F1, shear zones D1, quartz-carbonate veins, boudinage, pinch-and-swell and flanking structures. The compositional banding is characterized by a spaced cleavage, morphologically undulated, spaced from a few millimeters to 0.50 cm. It is marked by the alternation between prismatic mineral domains, such as amphibole, granoblastic quartz and carbonate grains, and levels of phyllosilicates such as white mica, chlorite and sericite (Fig 4-9A).

Under the microscope, the tectonic-flexural foliation S1, parallel to S0, is described as a slaty cleavage with millimetric spacing, morphologically straight, and best developed in micaceous levels. In stereographic projection, the polar points of S0 and S1 show a great circle with a 130°/30° direction, with most points in the 161°/45° direction and extremes at 216°/47° and 020°/40° (Fig. 4-9B).

Forming a sharp angle in relation to the S1 foliation, the S2 mylonitic foliation (Fig. 4-9A) developed in association with the D1 shear zones. The transition between the distal to proximal hydrothermal alteration zones is accompanied by grain-size reduction and the development of S2. Foliation S2 is defined by a continuous and anastomosing cleavage marked mainly by chlorite, fine-grained carbonate and sericite, involving coarser granoblastic minerals like quartz and carbonate. The

stereogram projection of polar points presents a maximum concentration at  $145^{\circ}/46^{\circ}$  (Fig. 4-8D). The thickness of the D1 shear zones range from a few centimeters to 30 m, with intense silicification (quartz-carbonate veins) and hydrothermal alteration on the host rock. These shear zones enclose isoclinal and intrafolial folds, normally with disrupted flanks and cane-like geometry. Kinematic indicators such as sigmoids, S-C structures, and asymmetric boudins indicate a reverse movement (top-to-NW) (Fig. 4-9C).

The intersection between the S1 flexural and the S2 mylonitic foliations is marked by the intersection lineation Lint1 with a modal maximum of  $112^{\circ}/24^{\circ}$  (Fig. 4-8C and G). Where the S2 mylonitic foliation predominates (Fig. 4-8A), the Lmin1 mineral lineation is observed, and characterized by sericite, pyrrhotite and pyrite aligned parallel to Lint1 (Fig. 4-9D). Boudinage and pinch-and-swell structures are observed in quartz-carbonate veins concordant to the S2 mylonitic foliation, during layer-parallel extension due to competence contrasts between veins and host rock. The boudin long axes are parallel to the Lmin1, and ruptured in all three directions forming a chocolate tablet shape.

Low-amplitude folds and discrete shear bands are locally associated with quartz-veins boudins, and crosscut the mylonitic foliation S2. According to Passchier (2001), these are described as flanking structures, i.e., respectively flanking folds and flanking shear bands (Fig. 4-9E), related to quartz vein development. The N-NW-oriented flanking shear bands have a high dipping angle ( $> 70^{\circ}$ ) to the E-SE (Fig. 4-9F); they occur in domains of few centimeters and show normal sense displacement in opposite to D1 shear direction. The flanking folds axis is defined by the intersection between S2 and the flanking shear bands plane, and is also limited by the N-S directed flanking folds hinge zone dipping to the S-SE (Fig. 4-9F).



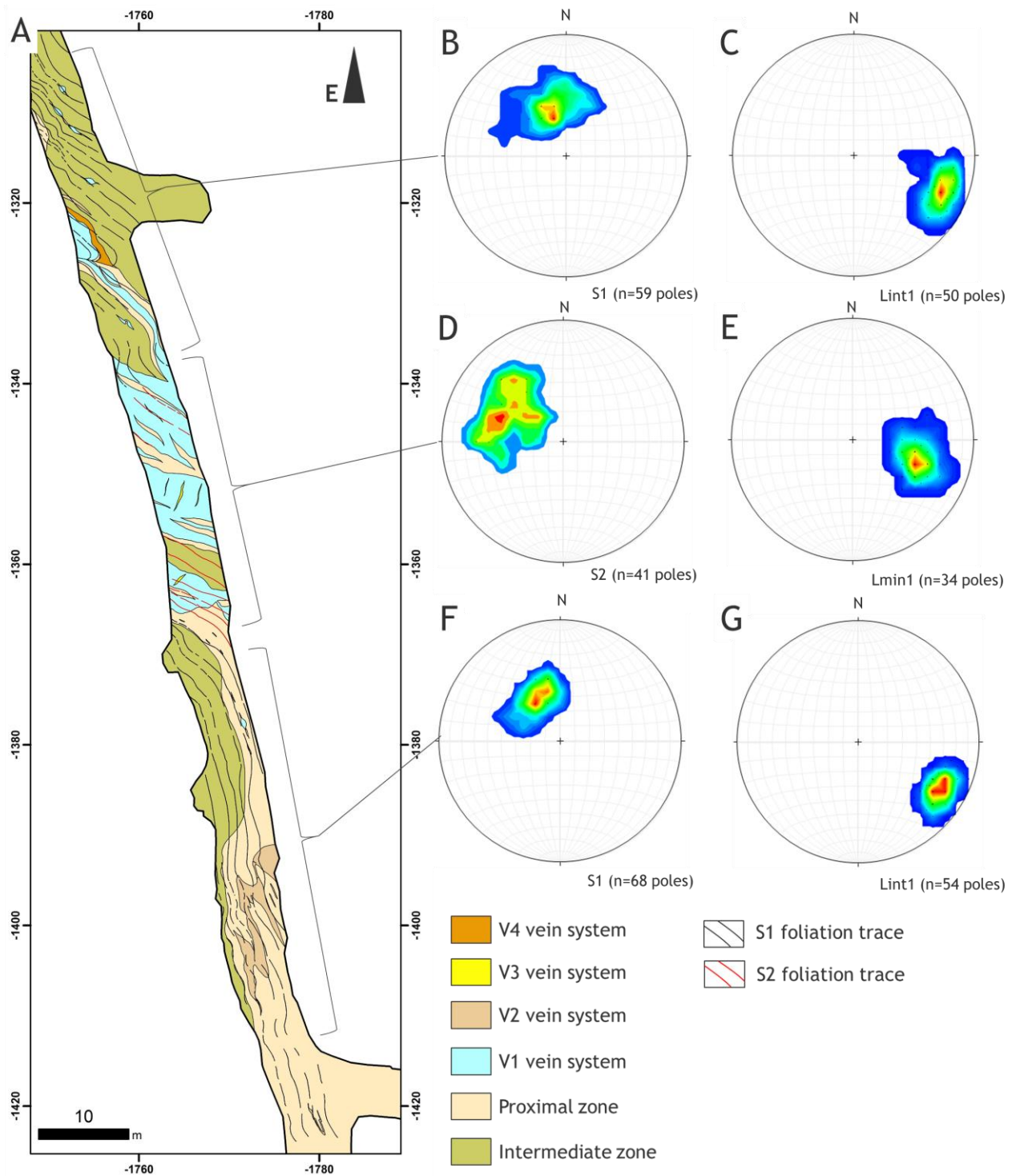


Fig. 4-8: (A) Simplified geological map of the mine gallery at the VQZ mineralized zone, Level 15, Cuiabá mine, illustrating the vein systems (item 4.5.4), hydrothermal alteration zones, and main foliation trace. (B-G) Structural stereogram density data of polar points (equal area and lower hemisphere). B) The S1 flexural foliation eastern of the shear zone with maximum concentration to SSE. C) Intersection lineation Lint1 to the east of the shear zone with maximum concentration to SE. D) S2 mylonitic foliation in the shear zone with maximum concentration to ESE. E) Mineral lineation (Lmin1) in the shear zone with a maximum to SE. F) S1 flexural foliation to the west of the shear zone with maximum to SE. G) Intersection lineation to the west of the shear zone with maximum to SE.

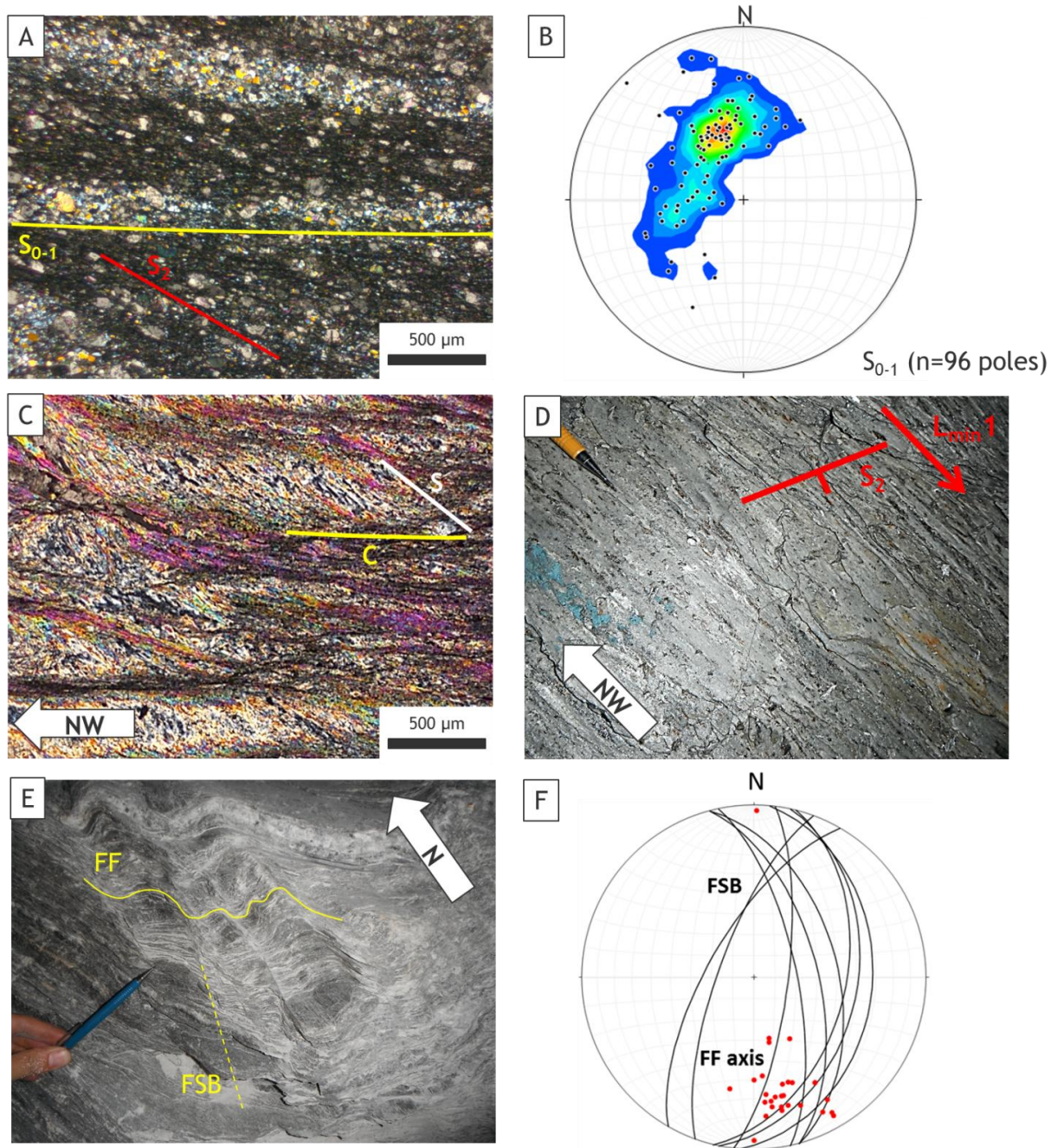


Fig. 4-9: A) Photomicrograph of polished thin section showing the relation between the compositional banding  $S_{0-1}$  and the mylonitic foliation  $S_2$  in the chlorite to carbonate hydrothermal alteration zones of metandesite. The polished thin section cut is perpendicular to the intersection lineation  $L_{int1}$ . B) Density stereogram of foliation  $S_{0-1}$  polar points suggesting a great circle in  $130^\circ/30^\circ$  (southern hemisphere same area). C) Photomicrograph of polished thin section of the hydrothermal sericite zone with evidence of a S-C foliation, parallel to the mineral lineation  $L_{min1}$ . The asymmetry of the S-C structure indicates a reverse movement and tectonic transport from SE to NW. D) Photograph of mine gallery, hydrothermal sericite zone with widespread Pyrrhotite composing the mineral lineation  $L_{min1}$  at the plane of the mylonitic foliation  $S_2$ . E) Details of flanking folds (FF) and flanking shear bands (FSB) in metandesite, underground gallery wall. F) Stereogram projection with FSB planes and FF axis (red points), lower hemisphere equal area. (A) and (C) transmitted light, crossed nicols, 25X.

## 4.5.2 *Hydrothermal alteration*

### 4.5.2.1 *Distal chlorite zone*

The distal hydrothermal alteration zone is a fine-grained, dark-green to gray rock with quartz-carbonate veinlets (Fig. 4-6B), and local plagioclase porphyroblasts. It shows nematoblastic and lepidoblastic textures where quartz, plagioclase and carbonate constitute microlith domains, whereas chlorite imprints a cleavage. Chlorite comprises up to 40 % of the rock, 20 % of quartz, 20 % of plagioclase, 15 % is carbonate and minor amounts of opaque minerals. Two types of carbonate are noted. Predominates a fine-grained (< 800  $\mu\text{m}$ ), stained and granoblastic carbonate (Carb-I), containing angular and/or serrated rims with ankerite composition. A clear, coarse-grained subhedral carbonate (Carb-II), with calcite composition, shows undulose extinction and well defined cleavage. Quartz is fine grained (< 200  $\mu\text{m}$ ), granoblastic, anhedral to subhedral with polygonal rims or lobate contacts. Porphyroblasts of plagioclase, up to 300  $\mu\text{m}$ , are commonly replaced by carbonate (Fig. 4-6G). Fine-grained plagioclase is oriented according to the S2 foliation. Pyrite, titanite and chalcopyrite are dispersed in the matrix or concordant to the S2 foliation.

### 4.5.2.2 *Intermediated carbonate $\pm$ chlorite zone*

Identified by a typical brownish green colour due to the presence of carbonate minerals, the intermediate zone contains quartz-carbonate veins and veinlets, and a well-developed mylonitic foliation S2 (Fig. 4-6C). Microscopically, they exhibit granoblastic and lepidoblastic textures with intercalation between quartz-carbonate and sericite domains related with S2-foliation (Figs. 4-10A and B). Carbonate minerals make up 60 % of the total rock volume; the Carb-I type is most common. Fine-grained quartz grains (< 100  $\mu\text{m}$  in size) are normally polygonal with angulose or lobate borders, undulose extinction and subgrain formation. Albite is associated with carbonate and quartz, and may be altered to sericite. The typical sericite cleavage led to the formation of a lepidoblastic texture with locally anastomosed enclosing prismatic minerals. Pyrite and titanite are the main accessory minerals, making up 5 %. Pyrite is fine to medium grained (< 2000  $\mu\text{m}$ ), euhedral to subhedral, with common porous nucleus, forming poikiloblasts with sericite and carbonate inclusions (Figs. 4-10C and D). It locally shows anisotropy, indicating to contain arsenic in its composition. Very fine-grained titanite and arsenopyrite are associated with sericite and carbonate. Chalcopyrite and pyrrhotite are also present, but in small amounts (Figs. 4-10C and D).

#### 4.5.2.3 Proximal sericite zone

These are beige rocks intensely veined with quartz and carbonate, showing a penetrative mylonitic foliation S2 (Fig. 4-6D). Disseminated pyrite and pyrrhotite are common, and their content increases towards the proximity to veins. This zone is characterized by the presence of bands of sericite and quartz-carbonate that impart a granoblastic and lepidoblastic texture, respectively, to the rock (Fig. 4-6I). Sericite comprises up to 70 % of the total rock volume, and it is more common in the cleavage domains (S2 foliation). The Carb-I type is stretched along S2 foliation while Carb-II occurs as xenoblasts. Quartz is fine grained ( $< 100 \mu\text{m}$ ), subhedral to anhedral, with lobate or polygonal borders, and show undulose extinction with subgrain formation. Pyrite and pyrrhotite are the main ore mineral assemblage with minor chalcopyrite and sphalerite; they may compose up to 10 % of total rock in volume close to vein zones. Pyrite is fine to medium grained ( $< 3000 \mu\text{m}$ ), and where coarser-grained it is euhedral to subhedral with irregular borders in association with quartz-carbonate veinlets. Two types of pyrite are discriminated (Kresse, 2017). The Py2 is typically porous and dominates central portions of pyrite grains. A smooth, subhedral to euhedral pyrite-3 (Py3) is overgrowth-surrounding Py2 (Fig. 4-11A).

Fine-grained pyrrhotite is preferentially stretched along the S2 domains (Figs. 4-11B and C). Very fine-grained arsenopyrite is also common. Chalcopyrite is fine grained ( $< 300 \mu\text{m}$ ), with polygonal to lobate borders, typically on rims of coarse-grained pyrrhotite (Fig. 4-11D and F). Spheroidal titanite forms narrow trails in sericite domains (Figs. 4-11B and C).



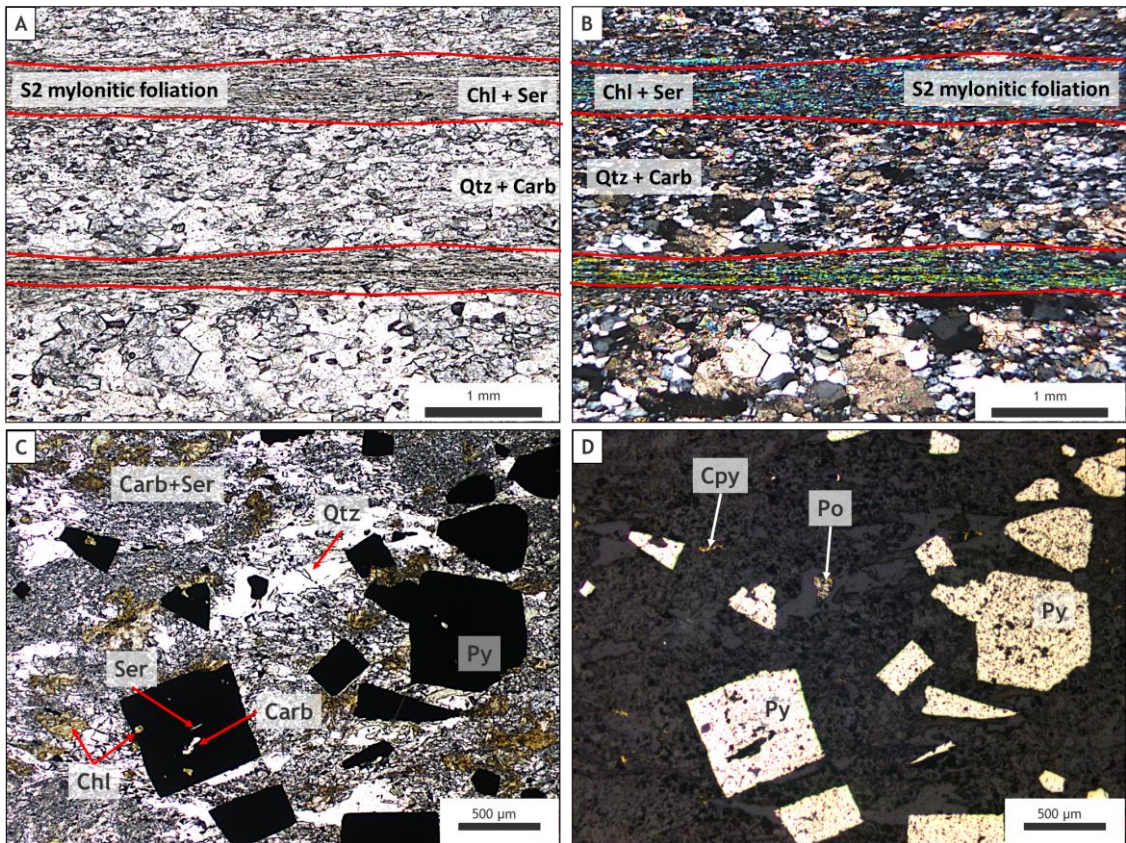


Fig. 4-10: Photomicrographs of intermediated carbonate alteration zone. A and B shows granoblastic domain composed by quartz (Qtz) and carbonate (Carb), while lepidoblastic is formed by chlorite (Chl) and sericite (Ser). C and D Coarse poikiloblasts euhedral pyrites (Py), with sericite (Ser), carbonate (Carb) and chlorite (Chl) inclusions in a quartz-carbonate-sericite matrix, containing minor fine grained chalcopyrite (Cpy) and pyrrhotite (Po). A and B transmitted light, 25 x. C transmitted light, 50 x. D reflected light 25 x.



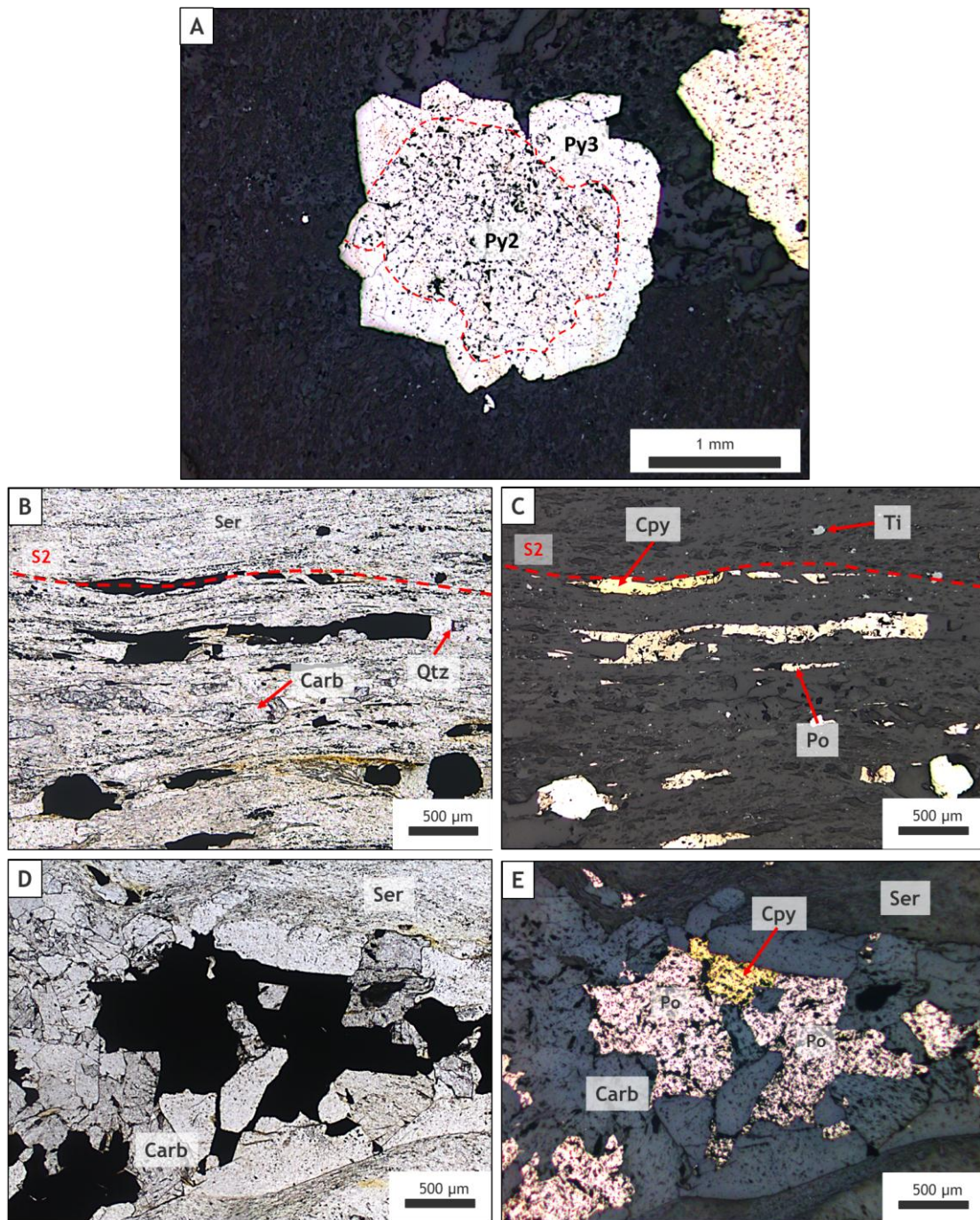


Fig. 4-11: Photomicrographs of polished thin sections taken under reflected (A, C and E) and transmitted light (B and D) showing the main sulfide minerals associated with sericite alteration zone of metandesite. A) Two types of pyrite. A smooth subhedral pyrite 3 (Py3) surrounding the porous pyrite 2 (Py2) which dominates the central part of the grain. B and C) Stretched chalcopyrite (Cpy) and pyrrhotite (Po) crystals along the S2 mylonitic foliation in a carbonate+sericite matrix containing very fine-grained titanite (Ti). D and E) Anhedral chalcopyrite (Cpy) along the subhedral coarse-grained pyrrhotite (Po) border.

### 4.5.3 Vein systems

Based on the controlling structures, geometry and internal features, veins may be classified into three main types (Hodgson, 1989; Robert et al., 1994; Robert and Poulsen, 2001; Bons et al., 2012): (1) fault-fill, (2) extensional (oblique-extensional), and (3) breccia veins.

All three vein types are recognized and heterogeneously distributed in the lower mafic unit of the Cuiabá deposit (Tab. 4-2 and Fig. 4-12). They are controlled by distinct geological structures, varying with respects to internal features and mineralogical compositions. In general, they are composed of quartz and carbonate, and related to the brittle-ductile D1 shear zones. The fault-fill veins are the most common, and the main source of gold mineralization.

Vein system	Sub-groups	Structural control	Minerals		Vein geometry	Classification (Robert and Poulsen, 2001)
			Main	Ore mineral assemblage (<5 %)		
V1	-	S2	Qtz-I, Qtz-II, Carb, Ser, Chl and Alb	Py, Po, Cpy, Sph, Aspy, Gal & gold particles	Folded, boudins, pinch and swell.	Fault-fill
V2	V2a	S1	Qtz-II, Qtz-I, Carb, Ser, Chl and Alb	Py, Po, Cpy, Sph, Gal, Aspy and gold particles	Tabular	Extensional veins
	V2b				Tabular and folded	Oblique-extensional
	V2c				Folded, boudins, and sigma shapes	Fault-fill
V3	-	S2	Qtz-III and Qtz-IV	-	En-echelon	Extensional array veins
V4	V4	Flanking structures	Qtz-V and Carb	Py and Po	Tabular and Massive	Extensional and Brecciated veins

Tab. 4-1: Quartz-carbonate vein systems hosted by the lower mafic unit of the Cuiabá deposit, including controlling structures, main and accessory mineralogical composition, internal geometry of grouped vein families, and vein classification after Robert and Poulsen (2001). Qtz – quartz, Carb – carbonate, Ser – Sericite, Chl – Chlorite, Alb – Albite, Py – Pyrite, Po – Pyrrhotite, Aspy – Arsenopyrite, Sph – Sphalerite, Gal – Galena.



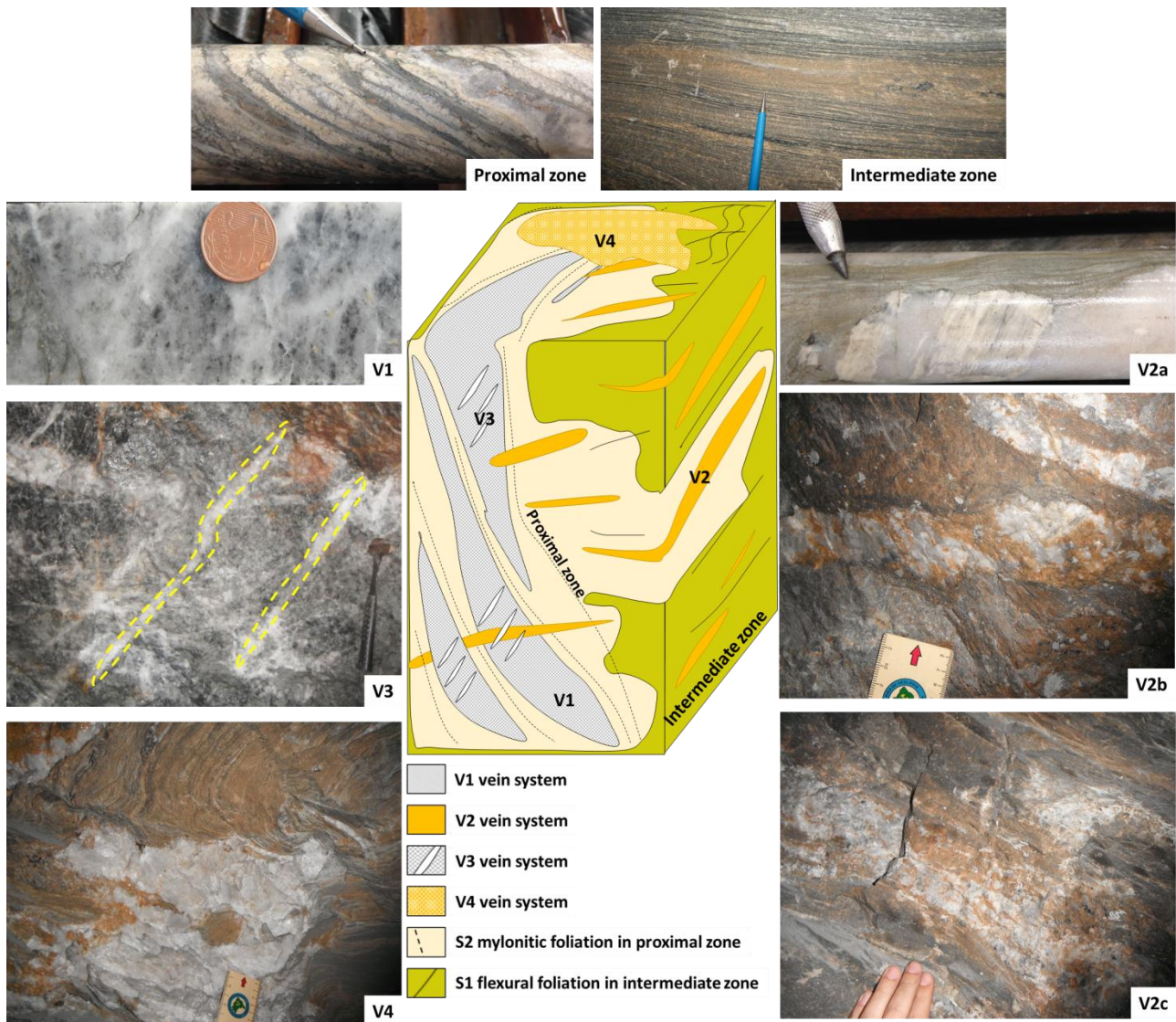


Fig. 4-12: Schematic block diagram (not to scale) showing vein types of the lower mafic unit of the Cuiabá deposit. V1: fault-fill vein associated with the mylonitic foliation S2. V2a: quartz-carbonate extensional veins controlled by foliation S1. V2b: quartz-carbonate oblique-extensional veins controlled by foliation S1. V2c: quartz-carbonate veins with laminated structure classified as shear veins. V3: echelon-type extensional veins. V4: milky quartz veins with brecciated structure. Intermediate zone: Carbonate alteration zone with small quartz-carbonate veinlets. Proximal zone: Sericite alteration zone with narrow quartz-carbonate veins and disseminated sulfide minerals.

#### 4.5.3.1 V1 system

The V1 system corresponds to the main gold-hosting vein type of the lower mafic unit at Cuiabá, where it displays 30 to 50 m extension along strike and up to 30 m thickness (Fig. 4-10). The longest axis of V1 veins coincides with the Lmin1 and extends as deep as ~200 m based on descriptions of underground drill holes. They are commonly homogeneous and mesoscopically massive, and lack ribbon or fibrous textures. They were emplaced during the D1 shearing, parallel to slightly oblique to the mylonitic foliation S2 (Figs. 4-10 and 4-12). Wallrock blocks close to the V1 fault-fill veins are deformed under ductile conditions, typically showing sericite and sulfide alteration,

which may contain significant amounts of gold. The contact between the vein and the wallrock is non-planar. Fragments of sericitized metandesite, ranging between a few millimetres to 10 m in thickness, are found included in the V1 veins (Fig. 4-13A). These fragments show microstructures such as S-C fabrics, pressure shadows, recrystallized borders around pyrites and a strong mineral lineation Lmin1. The ratio vein/wallrock is variable along the strike.

Morphologically, V1 veins are folded and boudinaged (Fig. 4-13A and 4-13B), generating three dimension pinch and swell structures. The boudinaged structures with rounded borders are asymmetrical with a ratio of 10/1 in relation to major and minor stretching axis (Lmin1).

Mineral assemblages of the V1 vein systems are homogeneous and comprise over 80% of smoky and white quartz, ~5 to 10% of carbonate, with minor proportions (~5-10%) of sericite and chlorite-rich films or pods, and local albite. Pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite and galena occur as accessory phases (<5 %).

Gold is heterogeneously distributed in the V1 veins, with particles generally of microscopic size; however visible coarse-grained gold particles are common in certain parts of the VQZ (Fig. 4-13C). Gold particles are mainly included in micro fractures in quartz, associated with carbonate and sericite agglomerates, and less commonly in porous pyrite (Py3 by Kresse, 2017). Local concentrations of gold are also common in or close to fragments and slivers of sericite-bearing wall rock.

Under the microscope, quartz and carbonate are elongated, and orientated parallel to the vein wall (mylonitic foliation S2). Two distinct types of quartz are present: the predominant smoky, translucent quartz-I (Qtz-I) is medium to coarse grained, between 5.0 and 0.5 mm. Grain boundaries are not clear and present fuzzy edges. Most of Qtz-I displays undulose extinction and sub-grain formation (Fig. 4-13D), where the contact between sub-grains are gradational and curvilinear. The gray, smoky colour is due to impurities and abundant fluid inclusions (Ribeiro et al, 2015).

They are commonly surrounded by newly formed, fine-grained (< 0.5 mm), polygonal granoblastic, clear (milky) quartz-II (Qtz-II) (Fig. 4-13D). They may have lobate irregular boundaries and are normally associated with sericite and chlorite showing a preferred elongated orientation that defines a continuous cleavage (Fig. 4-13D).



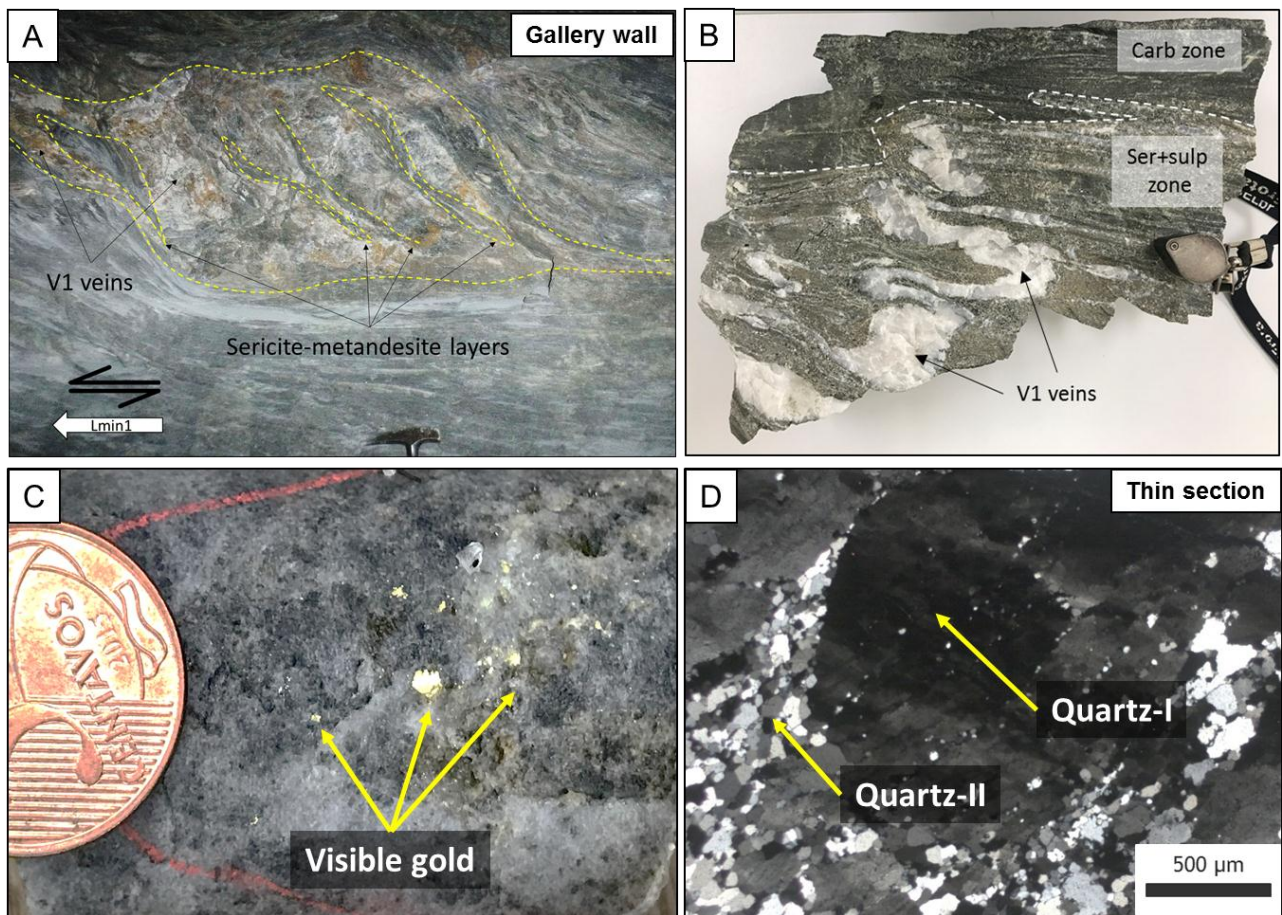


Fig. 4-13: Main characteristics of V1 vein system. A) Asymmetric boudin-shaped V1 vein with fragments of sericitized metandesite host rocks indicating reverse movement. B) Hand specimen containing folded and boudinage V1 veins involved by sericite+sulfide hydrothermal zone. C) Hand specimen of V1 smoky-quartz vein with very-coarse gold particles. D) Coarse translucent quartz-I showing undulose extinction and surrounded by a new granoblastic quartz-II (transmitted light, crossed nicols, 25 x).

#### 4.5.3.2 V2 system

The V2 vein system (Tab. 4-2) is hosted by the flexural foliation S1, and is at a high angle to parallel in relation to the mylonitic foliation S2 (Figs. 4-12A and 4-14A). This is the most abundant vein type in the center of the Cuiabá fold, and may occur tens to hundreds of meters away from the D1 shear zone as well. Individual V2 veins are narrowerless thick in relation to V1, with high length/width ratios, they can extend until 100 m along the strike and range between a few centimetres up to 2 m in thickness. The hydrothermal alteration halo surrounding the V2 vein system also varies from the sericite (proximal) to chlorite (distal); however. The cutting relationship between V1 and V2 systems is mutual, V2 vein cuts V1 and vice-versa (Fig. 4-14A). The V2 veins have also been observed interconnecting V1 veins (Fig. 4-14 B).

Vein filling are predominantly milky Qtz-II and smoky Qtz-I, carbonate, as well as subordinate sericite, chlorite, albite, pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite. Free gold particles are also described, but in minor quantity in comparison with V1 veins.

According to crystal orientation in relation to the vein wall, the V2 veins are subdivided in three distinct types V2a, V2b and V2c (Tab. 4-2 and Fig. 4-12). The V2a is classified as extensional as preferred orientation of quartz crystals is at very high angle or orthogonal to the wall rock boundaries (Figs. 4-14A and B). Where crystal orientation is oblique or at low angle to the vein wall, veins are classified as oblique-extensional, and belong to the V2b type (Fig. 4-12). Those with quartz and carbonate oriented parallel to the vein wall are defined as fault-fill and described as V2c (Fig. 4-12). Vein types V2a and V2b are rarely noticed, whereas the V2c type is the most common.

The V2a veins are morphologically tabular and show internal structures like honeycombed and fibrous quartz. Quartz and carbonate are coarse grained up to 1 cm, polygonal or euhedral (Fig. 4-14C).

The V2b type have the same internal structures in relation to V2a; however they are tabular, folded and the vein walls are usually not planar. The V2c vein type displays a variable geometry. Besides tabular and folded, they could have boudins and sigmoidal shapes and is common appear in the extremities of V1 (Fig. 4-14D). V2c are structurally banded or laminated with alternating millimetre- to centimetre- thick layers of carbonate and quartz. Quartz and carbonate show undulatory extinction with subgrain formation.



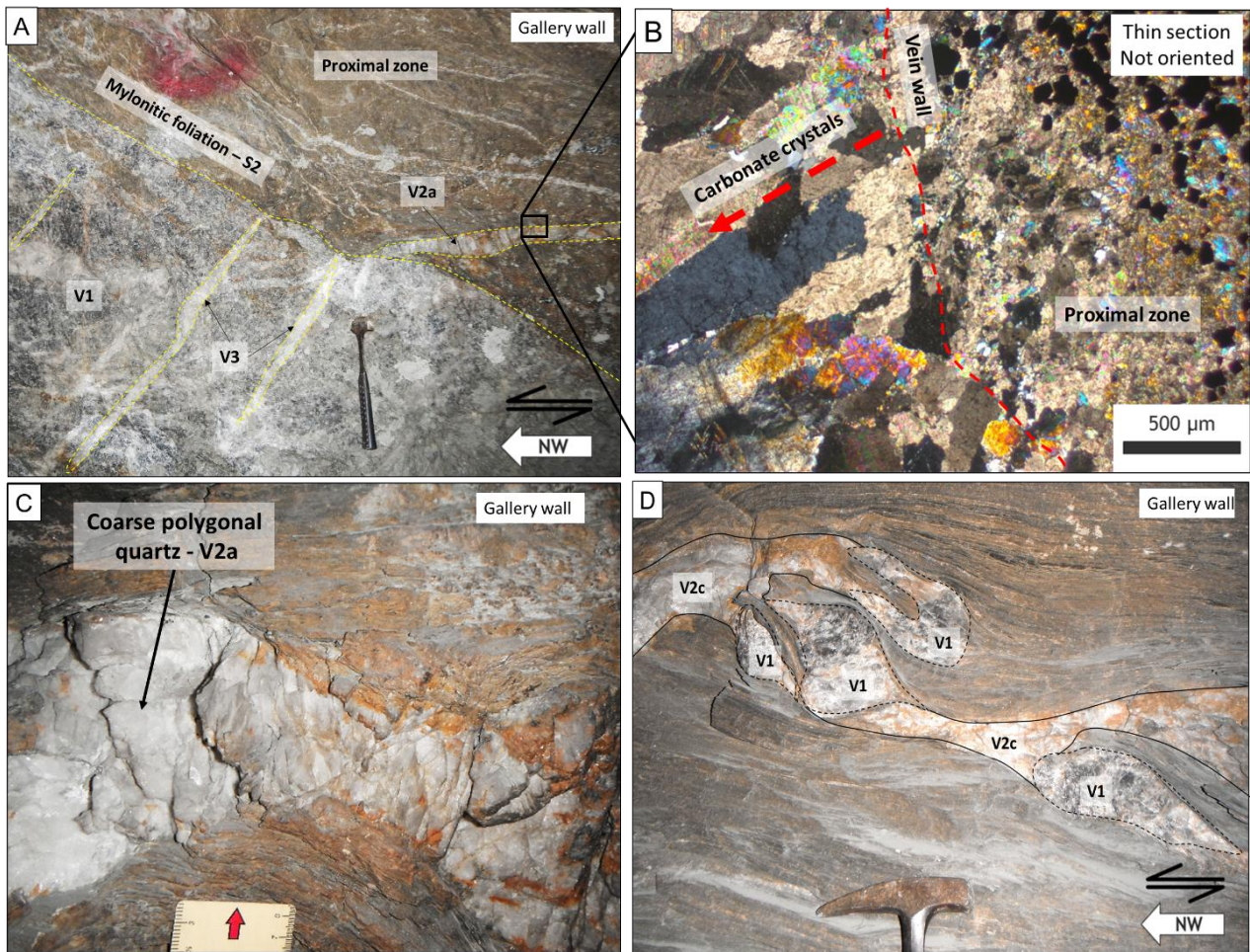


Fig. 4-14: A) Spatial relationships between V1, V2 and V3 vein systems, hosted in proximal zone at VQZ gallery wall. V2a extensional vein with quartz and carbonate crystals orthogonal to vein wall (details in B) discordant to mylonitic foliation S2. C) Coarse grained quartz and carbonate crystals in V2a extensional vein. D) V2c fault-fill veins interconnecting V1 boudins.

#### 4.5.3.3 V3 system

The V3 veins (Tab. 4-2 and Fig. 4-15A) are also associated with D1-shear zones, occurring at high angle with the S2-mylonitic foliation (Figs. 4-12 and 4-15A), and with an average attitude of  $287^{\circ}/36^{\circ}$ . They are immersed in the V1 vein system (Fig. 4-14A) and have the smallest areal distribution in relation to all vein systems. V3 veins has an average thickness of ~5-15 cm and up to 1 m along the strike. They occur *en echelon* arrangement, planar or sigmoidal shape, where the central part of the vein is rotate (Fig. 4-14A). They essentially consist of transparent, coarse to very coarse-grained ( $> 0.5$  cm), euhedral quartz-III (Qtz-III) (Figs. 4-15B and C), with straight crystal borders and angular contacts. Locally, a new granoblastic quartz-IV (Qtz-IV) is formed around the Qtz-III (Kresse, 2017). V3 veins cut V1 and V2 vein systems, while the contact with V1 veins is diffuse. Their internal structure is massive with parallel and non-linear veins walls, and the presence of druses is common (Fig. 4-15A).

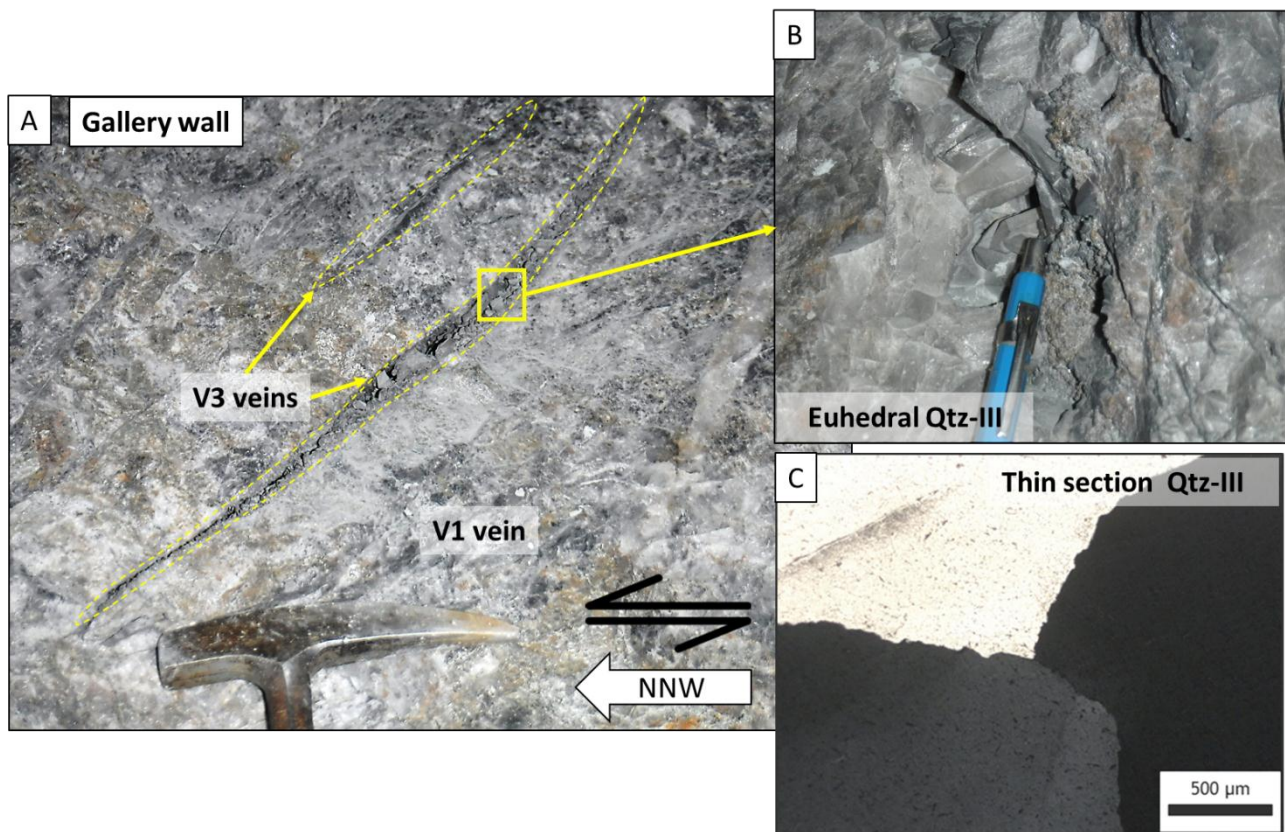


Fig. 4-15: Details of V3 veins immersed in V1, gallery wall at VQZ mineralized zone, Level 15. A) Planar to sigmoidal shape *en echelon* arrangement showing a reverse movement. B) Very coarse-grained euhedral quartz-III in V3 veins, and (C) detail in photomicrography, transmitted light, crossed nicols, 25 x.

#### 4.5.3.4 V4 system

The V4 vein system is associated with the flanking structures (Figs. 4-16A and B) cross-cutting the mylonitic foliation S2 (Fig. 4-16A and C), containing no significant gold (below the cut-off, 2.00 g/t). They are less abundant than V1 and V2 veins and are present in restrict areas of the Cuiabá deposit. They present massive textures, morphologically tabular with rectilinear wall (Fig. 4-16D) or forming irregular shapes (Fig. 4-16A and C). Wall rock hydrothermal alteration around V4 is minor or absent, and their fragments are commonly found in the inner parts of the veins generating breccia. The V4 veins are mainly composed of coarse-grained milky quartz (Qtz-V) and calcite, with subordinate pyrite and pyrrhotite. Pyrite and pyrrhotite are present as centimetre-sized agglomerates up to 10 cm, and locally as well formed crystals (Fig. 4-16C).



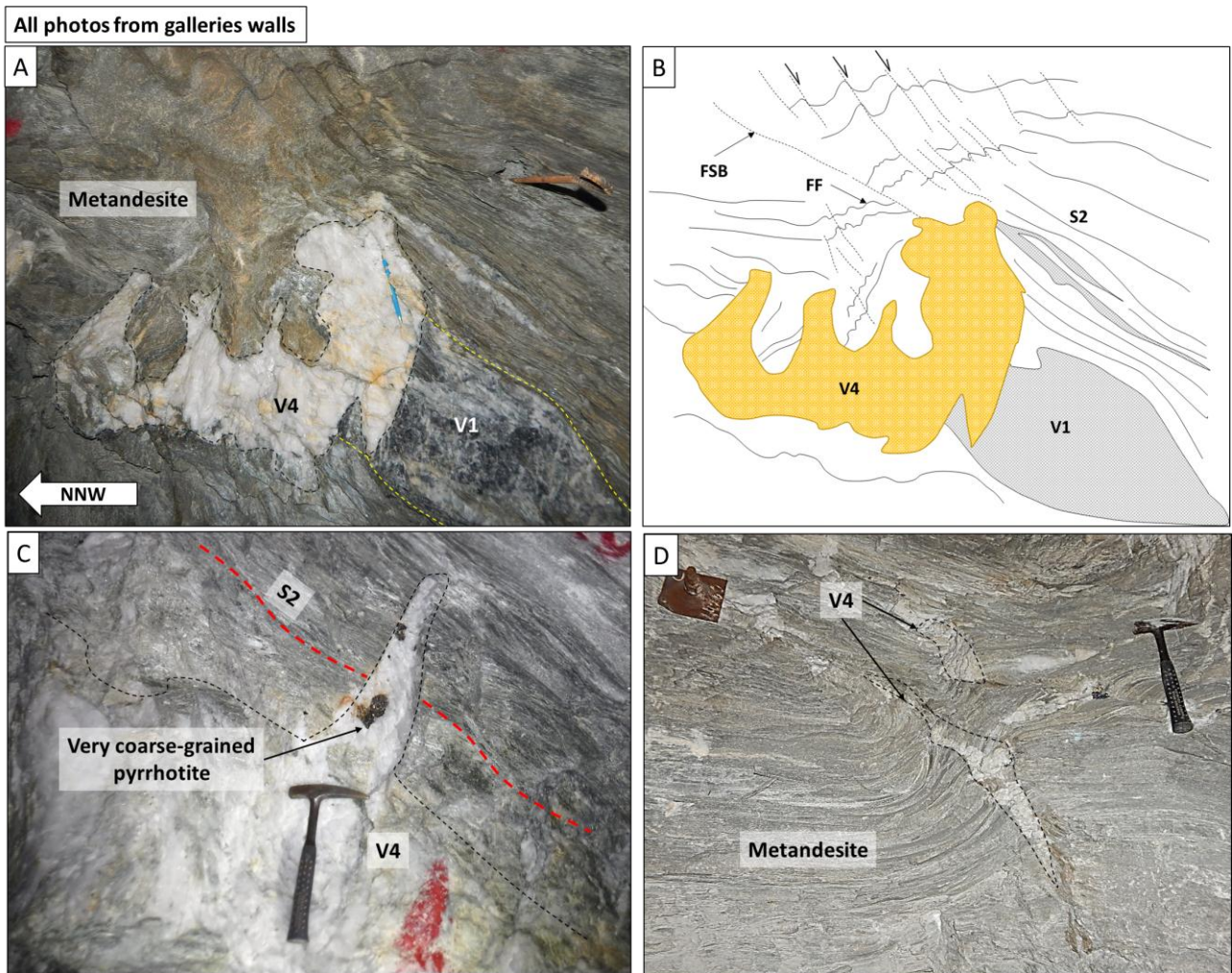


Fig. 4-16: V4 vein system. A and B) V4 vein associated with reverse sense flanking shear bands (FSB) and flanking folds (FF), discordant to S2 mylonitic foliation and crosscutting V1 vein. C) Irregular shape V4 vein containing very coarse-grained pyrrhotite. D) Tabular shape V4 veins associated with reverse sense flanking structures.

#### 4.6 Ore characterization by MLA

Gold mineralization in the lower mafic unit of the Cuiabá mine occurs mainly in the V1 and V2 quartz-carbonate vein systems (Tab. 4-2), but also in the sulfide-rich sericite hydrothermal zone. Due to the difficulty in collecting a bulk sample of each vein system, individual composite samples of two lithologies were generated: (1) quartz-carbonate veins and (2) host rock.

The gold and multi-elements assay results of each aliquots show that the average gold grade of the quartz-carbonate veins is 16.97 g/t, and 14.46 g/t for the host rock. In the quartz-carbonate samples, the gold only has a high positive correlation with silver, where the gold to silver ratio Au/Ag is 17:1. However, in the host rock, gold is associated with silver, copper, lead and zinc, and Au/Ag is 11:1.



Using the products of gravimetric concentration of each composite, four polished sections with different grain sizes were produced,  $-45\ \mu\text{m}$ ,  $+45$  to  $-75\ \mu\text{m}$ ,  $+75$  to  $-150\ \mu\text{m}$  and  $+150\ \mu\text{m}$  (Fig. 4-17), all of them scanned by MLA.

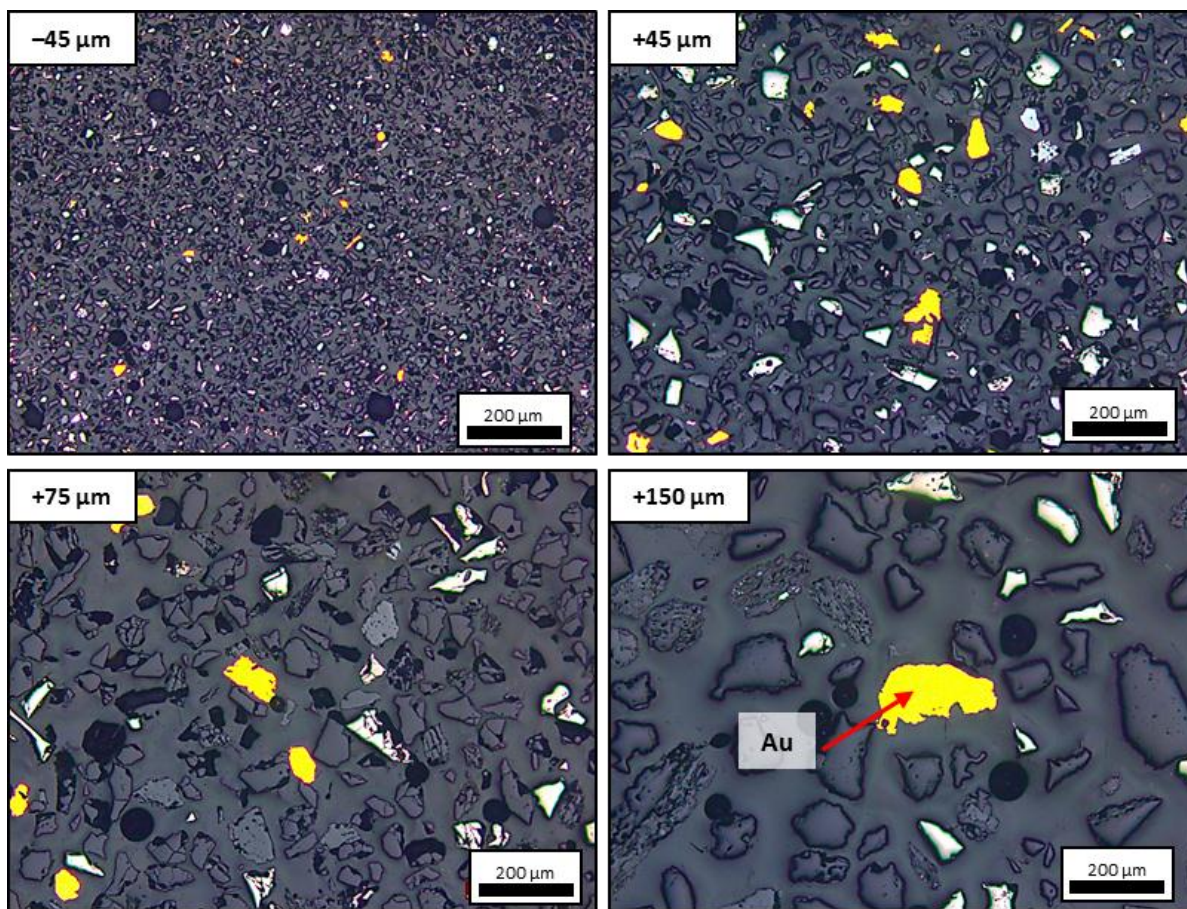


Fig. 4-17: Photomicrographs of polished sections showing different grain sizes ( $-45$ ,  $+45$ ,  $+75$  and  $+150$ ) of quartz-carbonate veins concentrated material. The strong yellow color particles are gold (electrum Au-Ag) and the others are gangue minerals, such as quartz, carbonate and sulfides. Reflected light, crossed nicols, 25 x.

The modal mineral composition determined by MLA revealed that the quartz-carbonate vein composite is basically composed by quartz, pyrite, ankerite, muscovite and albite with small amounts of gold particles (Tab. 4-2). Sulfide minerals correspond to 24.09 % of the sample from which 20.69% is represented by pyrite and the rest by pyrrhotite, galena, arsenopyrite and chalcopyrite (Tab. 4-2). A total of 6064 gold grains were counted. Gold is mostly presented as electrum, associated with silver, and rarely as native gold. Generally, the gold grains are very-fine with size varying between 1 and 250  $\mu\text{m}$ , since 40.66 % of the particles smaller than 53  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-18A). The exposure of the gold grains in the gravity concentrates shows that 98.32 % is liberated (free gold). The number of gold particles associated with other minerals (binary particles) represent a small amount that increases with the decrease of grain size (0.20% in the coarsest fraction  $+150\ \mu\text{m}$ , to 25.60% in the finest fraction of

-45 µm). Where associated with other particles, gold forms binary particles in contact with quartz, ankerite, pyrite, arsenopyrite, muscovite or galena (Fig. 4-19).

In the gravity concentrate of the host rock, the main mineral components are ankerite, quartz, pyrite and muscovite with accessory albite, chlorite, pyrrhotite and gold particles (Tab. 4-3). Sulfide minerals totalize 19.06% of the sample, and as well as in the quartz veins, pyrite is the main component with 16.32 %, followed by pyrrhotite, galena, arsenopyrite and chalcopyrite in less quantity (Tab. 4-2). Commonly, gold occurs associated with silver forming a metallic alloy, and less commonly as native gold. A total of 3858 grains were mapped with grain size varying between 1 and 212 µm (0.71% smaller than 7 µm), and 50.91% smaller than 53 µm (Fig. 4-18B). Liberated gold particles correspond to 98.54 % in total. Gold particles associated with other minerals show an abrupt increase from 0.28 % (in the +150 µm fraction) up to 15.53 % (in the +75 µm fraction). Fractions of +45 and -45 µm make up 22.22 %, and 23.16 % are of respective associations. Binary gold particles are associated with quartz, ankerite, muscovite, albite, pyrite and chlorite (Fig. 4-19).

Mineral composition (%) - Quartz-carbonate vein						Mineral composition (%) - Host rock					
Mineral	+150	+75	+45	-45	Global	Mineral	+150	+75	+45	-45	Global
Quartz	42.46	49.83	40.31	24.77	40.14	Ankerite	17.23	19.47	28.28	35.05	25.06
Pyrite	21.15	17.79	24.67	17.66	20.69	Quartz	20.55	31.18	29.18	21.63	24.23
Ankerite	13.51	13.37	18.48	35.04	18.13	Pyrite	15.31	23.88	21.31	10.78	16.32
Muscovite	12.77	5.84	2.95	5.22	8.56	Muscovite	25.81	10.94	6.45	12.65	15.92
Albite	5.83	5.04	3.15	4.04	4.90	Albite	13.82	7.82	4.92	7.40	9.31
Pyrrhotite	0.64	1.82	2.74	3.11	1.64	Chlorite	5.20	2.05	1.75	2.40	3.20
Galena	0.08	0.04	1.01	3.16	0.78	Pyrrhotite	0.90	2.38	2.19	1.68	1.62
Chlorite	0.70	0.82	0.65	0.94	0.75	Galena	0.12	0.17	0.90	1.97	0.84
Arsenopyrite	0.25	0.71	1.27	1.43	0.72	Scheelite	0.40	0.46	0.84	1.40	0.80
Anphiboles	0.03	0.32	0.38	1.08	0.33	Rutile	0.27	0.16	0.14	0.60	0.34
Rutile	0.18	0.18	0.12	0.43	0.21	Anphiboles	0.13	0.10	0.16	0.48	0.24
Apatite	0.12	0.13	0.03	0.26	0.13	Arsenopyrite	0.00	0.00	0.22	0.49	0.19
Chalcopyrite	0.09	0.03	0.02	0.17	0.08	Apatite	0.11	0.08	0.14	0.19	0.13
Sphalerite	0.06	0.11	0.03	0.02	0.06	Chalcopyrite	0.03	0.08	0.14	0.13	0.09
Others	2.10	3.94	4.16	2.42	2.83	Others	0.12	1.17	3.25	2.82	1.57
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>Total</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

Tab. 4-2: Sample mineral composition determined by MLA in each grain size fraction (+150, +75, +45, -45 and Global) of the quartz-carbonate veins (left) and host rock (right hand) with gold concentrations higher than 2 g/t Au.

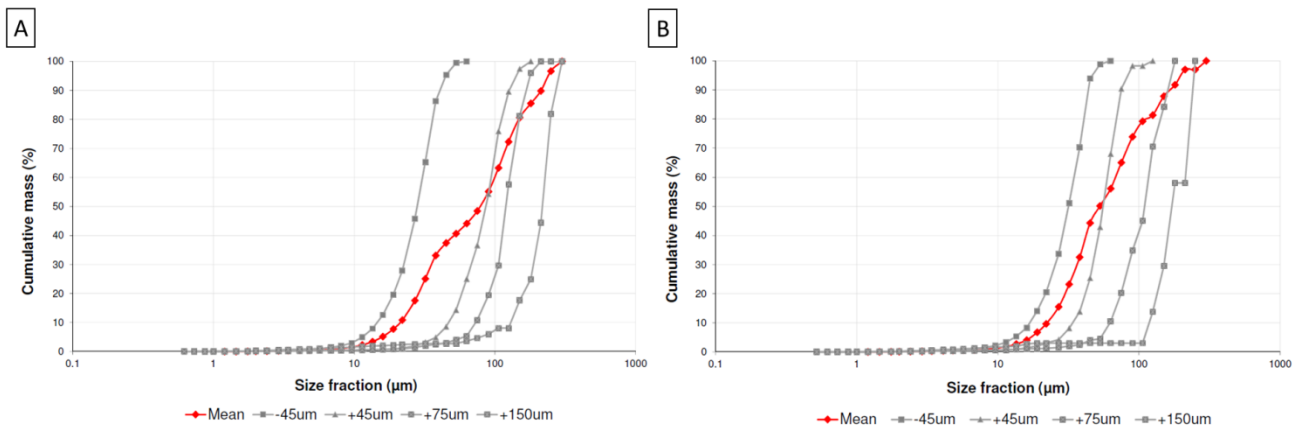


Fig. 4-18: Accumulated grain size and line (related) distribution for the quartz-carbonate veins (A) and host rock (B) with gold concentrations above 2 g/t Au.

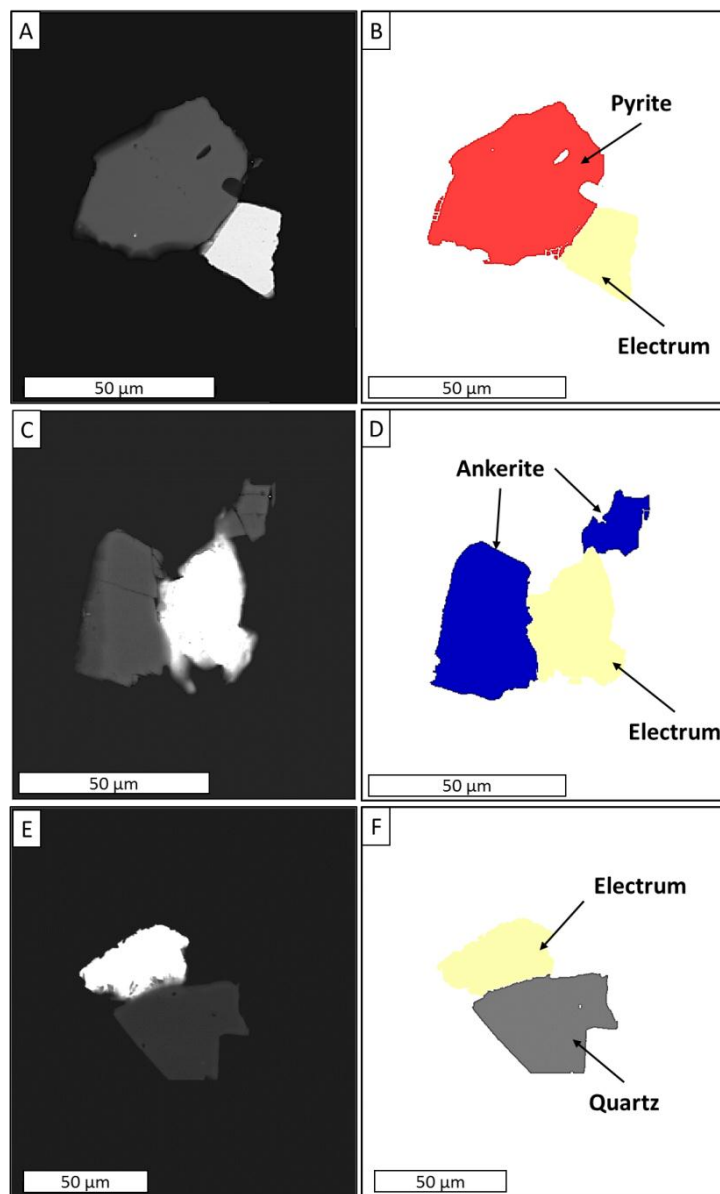


Fig. 4-19: SEM backscattered electron images (A, C and E) and accompanying MLA images (B, D and F). Binary gold particles (electrum) in contact with pyrite (A, B), ankerite (C, D) and quartz (E, F).

## 4.7 Discussion

### 4.7.1 Structural analysis

All the tectonics structures related to the quartz-carbonate veins in the lower metamafic unit at Cuiabá are interpreted as belonging to a single structural generation formed during a progressive ductile to brittle deformational event. The S0 banding and S1 foliation are parallel and generated by flexural intra-layer slips in the initial stages (Fig. 4-20). Isocline and intrafolial folds (F1) are understood to have been generated due to passive folding during flexural slip as well (according to Davis and Reynolds, 1996 and Fossen, 2012). Locally, an S2 mylonitic foliation is associated with D1 reverse shear zones, interpreted as local concentration of deformation resulting from heterogeneous deformation (Fig. 4-20). The S2 development is accompanied by hydrothermal alteration intensity from chlorite to sericite zones and consequent crystal grain size reduction. So the chlorite zone could be classified as a protomylonites, the carbonate zone as a mesomylonites and the sericite zone as an ultramylonite (according to Passchier and Trouw, 2005).

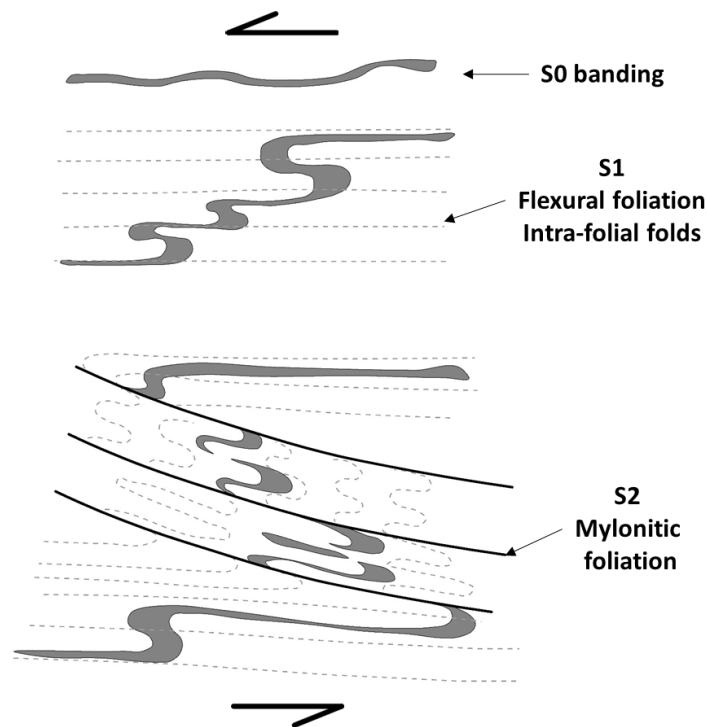


Fig. 4-20: Relation between S0 banding, S1 flexural foliation and S2 mylonitic foliation. All of them are formed during a progressive deformation.

Three lineation structures, Lmin1, Lint1 and the F1 fold axis are described, having the same direction and dipping to SE. According to Closs (1946) (in Tikoff and Grenne, 1997), lineations provide important information concerning movement and deformation of geological materials, from the micro- to plate scale. Passchier (1991) assumes that stretching lineations form in the direction of tectonic movement in simple shear. However, Sander (1930, 1970 in Tikoff and Grenne, 1997) noted

that lineations may be parallel ('a'-type lineation) or perpendicular ('b'-type lineation) to the inferred movement direction. Fossen (2012) describes that fold axis and intersection lineation are genetically different to mineral and stretching lineations, and they have a more complicated relation with the transport direction, which could be parallel, oblique or orthogonal. It is notable that the relation between lineation and related movement direction could be complex and not conclusive. Therefore, in this work we use the structural vein analyses to define these parameters. Shape, orientation and internal structures of veins reveal information about paleo-stress fields, deformation kinematics and fluid pressure (Bons et al., 2012). Robert and Poulsen (2001) show the geometric relationship among many types of veins and the corresponding incremental strain axis. The shortening (dZ) and elongation axes (dX) are parallel and orthogonal to the extensional veins direction, respectively.

Although V2a extensional veins (Fig. 4-14A) are rarely noticed in the Cuiabá deposit, their relationship with D1 shear zones indicates an ESE-NNW shortening vector (dZ) and N-S elongations axes (dX) (Fig. 4-21A). The same analysis has been conducted using the V3 extensional array veins. Laing (2004) describes such veins types and designates them as tension vein arrays (TVA). The TVAs in major fault and shear zones are subject to progressive deformation. During progressive shearing, the TVA axis rotates within the shear plane from normal to parallel to the displacement vector. According to Laing (2004), TVAs are the most effective structural tool to analyze kinematics and relative strain of shear zones. They provide two of three displacement components of their parent shear zone, i.e., direction and sense of displacement. The sigmoidal shapes and the orientation of vein tips with respects to array boundaries are indicative of the sense of shear, and the incremental axis of elongation (dX) is orthogonal to TVA (Robert and Poulsen, 2001). Therefore, the V3 veins at Cuiabá indicate an elongation vector (dX) with an ESE direction and a reverse movement (Fig. 4-15A and Fig. 4-21B).

We suggest that an initial SSE-NNW-directed, deformational phase characterized by a subhorizontal shortening vector (Fig. 4-21A) affected rocks at the Cuiabá deposit followed by a second deformational phase in the same direction, but in reverse sense, both with the same shear displacement (SD) directions (Figs. 4-21A and B). This interpretation is compatible with the Lmin1 orientation (Fig. 4-10D), and with the mineral lineation at Cuiabá deposit being parallel to the shear displacement. Taking into consideration the direction between the shearing vector and plan, besides the shortening vector rotation, a transpressive deformation is indicated.

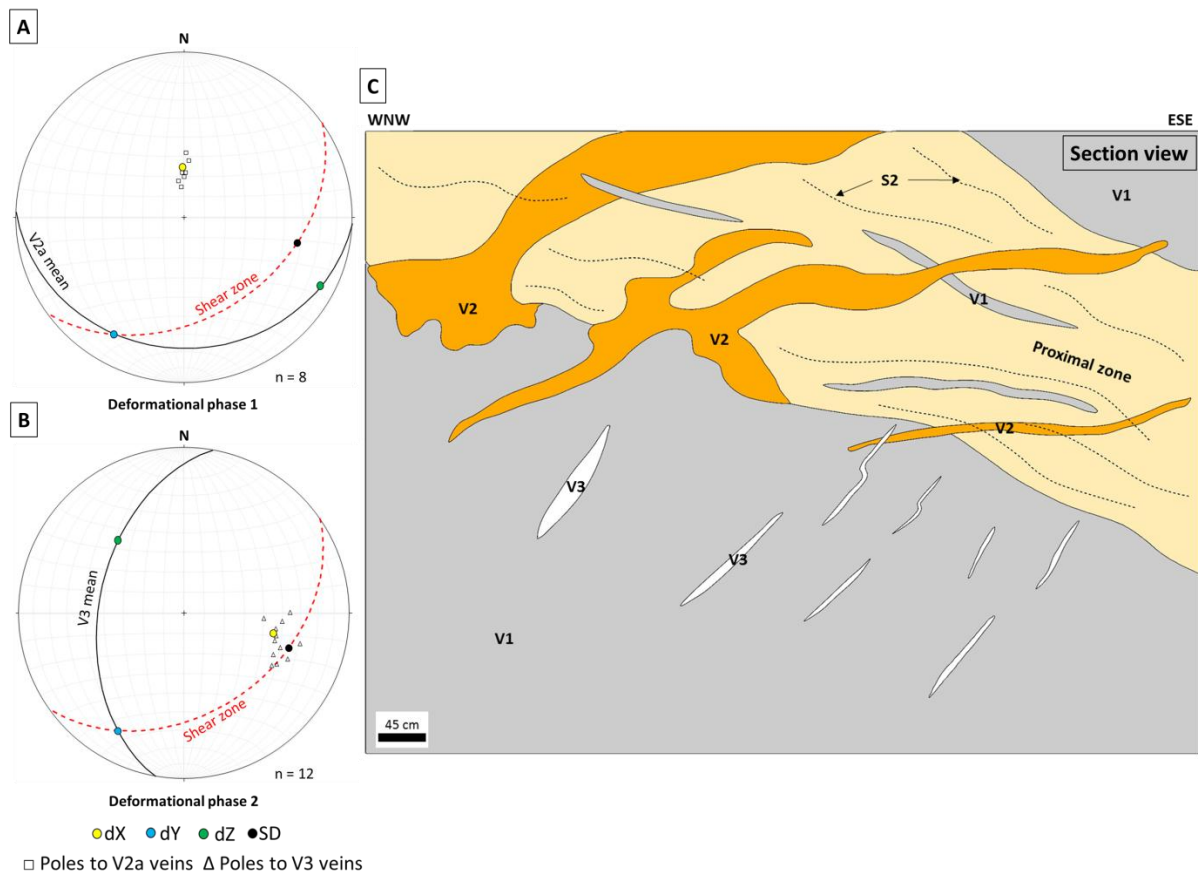


Fig. 4-21: A and B) Stereogram projections (lower southern hemisphere and same area) illustrating the geometric arrangements of extensional veins (V2a and V3) in D1 shear zones (red dashed line) from the Cuiabá deposit, and their relationship to incremental axes of shortening (dZ), elongation (dX) and shear displacement (SD). C) Schematic representation of crosscutting relationships between V1, V2 and V3 vein systems; gallery stope of VQZ mineralized zone, level 15. V1 and V2 have both conflicting and merge relationships, while V3 veins systematically cut V1 and V2 (nomenclature after Robert and Poulsen, 2001).

#### 4.7.2 Vein system evolution

A proposed evolutionary model (Figs. 4-22 and 4-23) for the vein system hosted in the lower mafic unit at the Cuiabá deposit is proposed, taking the following aspects into consideration:

- 1) Vein types and crosscutting relationships. V1 – fault-fill; V2a – extensional; V2b – oblique extensional; V2c – fault-fill; V3 – extensional array; V4 – extensional and breccia. Robert and Poulsen (2001) have established three types of crosscutting relationships that may indicate the temporal relation between veins: systematic, conflicting and merge. At Cuiabá, the V1 and V2 systems have both merge and conflicting relationship (Fig. 4-21C), while the V3 veins systematically cut V1 and V2 veins (Fig. 4-21C), and V4 cut all previous system (Fig. 4-12).
- 2) Quartz types. Smoky Qtz-I with undulose extinction is predominantly observed in V1 veins. Granoblastic Qtz-II is mainly noted in the V2 system and overgrowths on Qtz-I. Transparent and euhedral Qtz-III is surrounded by granoblastic Qtz-IV in V3 veins, and euhedral, coarse-grained



milky Qtz-V in V4 system. The characteristics of quartz crystal may reflect differing hydrothermal conditions during vein growth (Dong et al., 1995).

- 3) Fluid inclusion data by Kresse et al. (2017a). Aqueous and aqueous-carbonic fluid inclusion assemblages (FIAs) in different quartz crystals indicate distinctive trapping temperatures:  $Th_{TRAP}$  Qtz-I = 360 to 390 °C;  $Th_{TRAP}$  Qtz-II = 260 to 290 °C;  $Th_{TRAP}$  Qtz-III = 290 to 360 °C and  $Th_{TRAP}$  Qtz-V = 190 to 200 °C.

The crosscutting V1 and V2 vein relationships indicate that they are contemporaneous (Fig. 4-21), with both veins having sin-tectonics features, sharing similar mineralogical composition (Tab. 4-1), and hydrothermal alteration halos. The transition between Qtz-II and I is gradual and not abrupt, which is typical of sub-grain rotation recrystallization (Passchier and Trouw, 2005). The large amount of Qtz-I in V1 veins in relation to V2 indicates that V1 may be early hydrothermal, having originated the V2 veins as recrystallization progressed. The amount of fluid inclusions in Qtz-I is much higher than in Qtz-II (Kresse, 2017). Ribeiro et al. (2015) and Morales et al. (2016) interpreted that the elimination of pre-existing fluid inclusions of Qtz-I elsewhere as having been caused by recrystallization with fluid migration.

It is suggested that the D1 shear zones functioned as the main pathways for hydrothermal fluids. A gold-rich hydrothermal fluid progressively infiltrated through shear zones and dispersed into former fractures parallel to S0/S1 (Fig. 4-22A). The V1 veins precipitated in regions of shear zones where lithostatic pressure approximated fluid pressure, such as hinge zones and inflexions or jogs along the main mylonitic foliation direction. The presence of hydrothermally altered wall rock fragments within V1 veins (Fig. 4-13A) suggests that a new deformational pulse took place when lithostatic pressure overcame once again fluid pressure. This process may characterize a continuous and progressive cycle of deformation and fluid injection, similar to what is described by Sibson et al. (1988) and Cox (2005).

Passchier and Trouw (2005) describe the evolution from extensional to shear veins in detail. Extensional veins are formed due to an opening normal to the vein wall, and shear veins form when the opening vector is at low angle or parallel to the vein wall. This has also been observed in the case of the V2 system: V2a veins have perpendicular growing quartz and carbonate crystals that evolve to V2b veins with oblique growing crystals, and finally to V2c shear veins that formed during a flexural slip (Fig. 4-22B).

The V3 veins are classified as extensional array veins (tension gashes) and systematically crosscut V1 and V2, and therefore V3 veins must postdate V1 and V2. According to Robert and Poulsen (2001), tension gashes are precipitated parallel to the main compression vector in low lithostatic pressure zones. The euhedral crystal habit of Qtz-III and Qtz-V indicates that hydrothermal fluids precipitated slowly (Zhou et al., 2016). However, a new granoblastic Qtz-IV is locally observed



around Qtz-III suggesting tectonic activity took place at this stage. Thus, the characteristics of the V3 veins suggest a decrease in tectonic activity and hydrothermal influx accompanied by a change in the main shortening vector (dZ) direction (Fig. 4-20B).

The Qtz-V crystals from the V4 veins do not show dynamic recrystallization and deformational features, suggesting that their precipitation may have occurred under lower temperature conditions. Structures associated with these veins show normal sense, and in the opposite direction to the shear zones (Fig. 4-16B). These features indicate that the V4 veins may have precipitated in somewhat shallower crustal levels, during a late hydrothermal stage, probably associated with the orogen collapse.

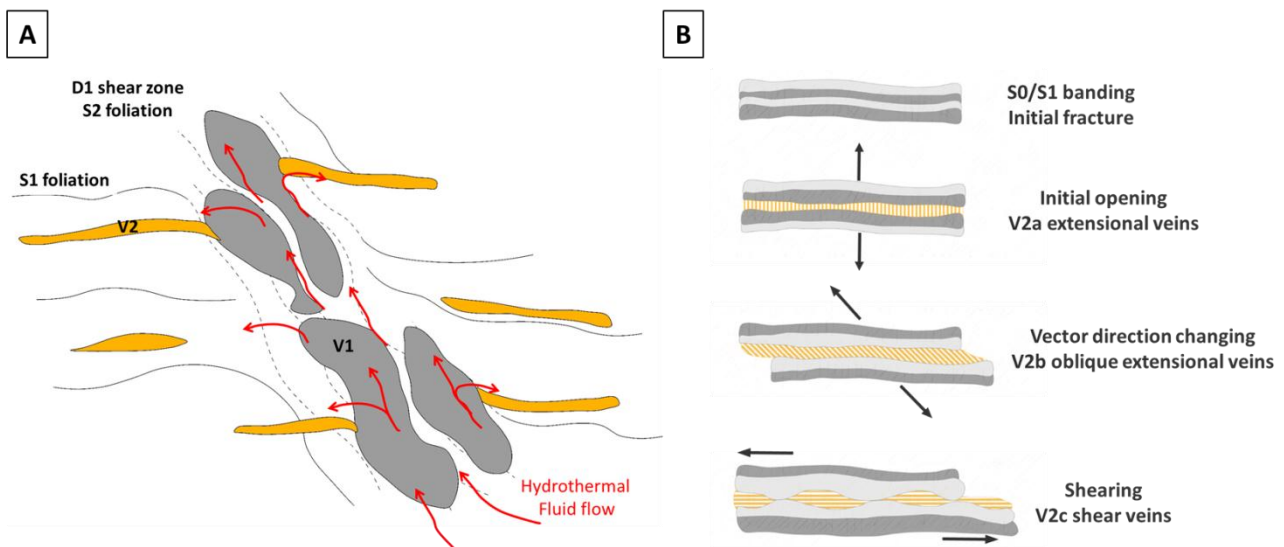


Fig. 4-22: Evolutionary model of the V1 and V2 vein systems. A) Auriferous hydrothermal fluid may percolate through D1 reverse-shear zones generating V1 veins, which are controlled by the mylonitic foliation S2. Fluids progressively infiltrate the pre-existing S1 foliation leading to the formation of V2 veins. Cross-section view, top-to NW. B) Evolution of the V2 vein system. From top to bottom, the fluid percolates through an initial fracture, parallel to the compositional layering (S0/S1), in an initial extensional stage where the main deformation vector (black arrows) is normal to the fracture wall, and V2a veins are precipitated. The main deformation vector direction changes progressively generating V2b and V2c veins.

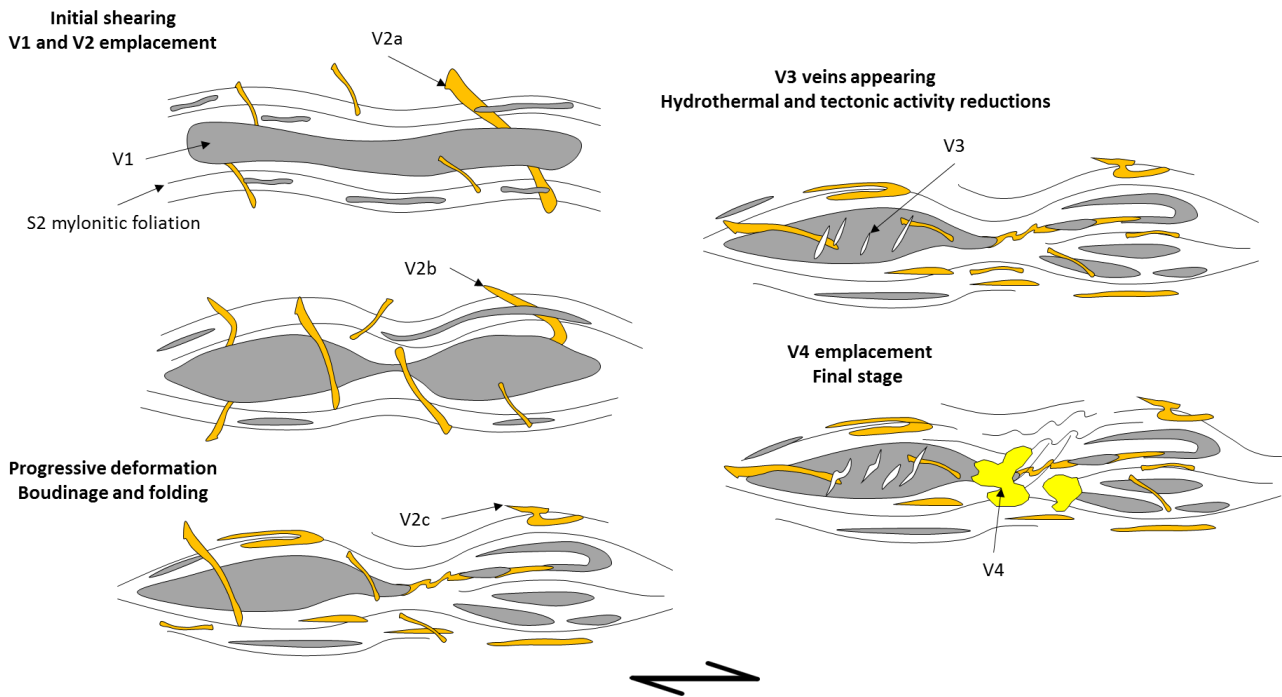


Fig. 4-23: Vein system evolutionary model hosted in the lower mafic unit, Cuiabá deposit. The V1 veins, parallel to the mylonitic foliation S2, and discordant V2 veins are formed in the early hydrothermal and deformational stages. With the progression of deformation and continuous hydrothermal fluid influx, veins are folded and boudinaged, V2a are transformed in V2b, and finally V2c. The V3 vein system appears when hydrothermal influx and tectonic activity are diminished, accompanied by a variation in the main shortening vector. The V4 veins are then precipitated in the late stage, related to the closure of orogenic, tectonic activities.

#### 4.7.3 Implications for mineral exploration

At the regional scale, there is the question of the location of the Cuiabá deposit. According to Baltazar and Zucchetti (2007) three deformational events affected the Rio das Velhas greenstone belt. The structures of the G1 generations, described in the lower metamafic unit of the Cuiabá mine, are here correlated to the D1 and D2 Archean tectonic phases of Baltazar and Zucchetti (2007). They are associated with the auriferous mineralization dated at ca. 2670 Ma by Lobato et al. (2007). However, the tectonic transport direction noted in Cuiabá in the present contribution differs to that indicated by Baltazar and Zucchetti (2007), who concluded that the same event occurred in N-NE to S-SW direction.

Two hypotheses could explain these different orientations: (1) in the context of the Minas Supergroup, Alkmim and Marshak (1998) describe a Proterozoic, thin-skinned tectonic deformation D2 verging to the NW that did not imprint a penetrative foliation in rocks of the QF. This suggests the present structural-geographical position of the Cuiabá deposit was probably modified, and reoriented during the Proterozoic. (2) For Baltazar and Zucchetti (2007), the regional structural reorientation of the Cuiabá deposit was caused by a compression with vergence to the W during the

deformational cycle D4. Martins et al. (2016) concluded that a regional D4 event verging to the E was responsible for relocating the Lamego deposit (southwestern to Cuiabá, Fig. 4-1) to its present position. The Proterozoic orogeny described by Alkmim and Marshak (1998) has the same direction and vergence as the G1 structure observed at Cuiabá. We also suggest that the Paleoproterozoic event was responsible for the reorientation of the Archean structures, repositioning the deposit to where it is today.

At the deposit scale, the implications arise from the vein type classification itself. The vein systems at the Cuiabá orogenic gold deposit have been defined based on structural relations and mineralogical compositions. Similar approach was conducted for the Córrego do Sítio Lineament and Lamego deposits (Fig. 4-1), both hosted in rocks of the Rio das Velhas Supergroup (Pereira et al., 2013; Morales et al., 2016; Martins et al., 2016). Gold-mineralized veins consisting of smoky quartz (Qtz-I) in V1-type system were also understood to be associated with fluids that percolated through shear zones. In Cuiabá, it is also assumed that D1 shear zones are the main paths for the ore-forming fluids, including those hosted in BIF. The main orebodies at Cuiabá are related to regions where D1 shear zones traversed BIF (Fig. 4-5), which led gold-rich hydrothermal fluid to react and precipitate gold.

This emphasizes the importance of the present study for future mineral exploration work related to the Rio das Velhas greenstone belt-hosted gold mineralization, providing an excellent opportunity to classify shear and extensional veins chronologically, and explore their possible link to gold mineralization in the field, extrapolating this classification to a more regional, near-mine scale.

#### **4.7.4 Mineral Liberation Analysis – MLA**

The most efficient gold extraction-processing route is directly related to the inherent mineralogical features of the gold ore being processed. The mineral assemblage determines the performance of all chemical and physical processes involved in gold extraction (Louis et al., 2011). The main aim of a ore characterization analysis is to locate and describe gold containing particles in order to determine the gold speciation, grain size and mode of occurrence (gold liberation and mineral associations) as well as to generally characterize the mineralogical composition of the ore (Louis et al., 2011). The advanced analysis techniques implemented by MLA provide an optimised and automated mineralogical information (Fandrich et al., 2007). Mineral liberation data are fundamental parameters used in processing plant design and optimization (Gu, 2003).

The gold ore associated with quartz-carbonate veins and host rock at the lower mafic unit at Cuiabá deposit are basically composed to quartz, ankerite, muscovite, albite, pyrite and phyrrotite (Tab. 1A and B), and none of these minerals are considered to interfere in the ore processing. The data point out that 59 % of gold particles in quartz-carbonate veins and 49 % in host rock are larger

than 53  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-18), and therefore can be recovered by gravimetric methods. The recovery of fine particles is limited due to the use of gravimetric concentration. Also, there are MLA limitations to identify particles finer than 2  $\mu\text{m}$  and sub-microscopic gold particles. The presence of fine-grained gold smaller than 10  $\mu\text{m}$ , as described in polished thin sections (Fig. 4-17) demonstrates the possible underestimation with respect to the results. Although approximately 98 % of gold is liberated, the process cannot be summarized by only gravimetric concentration, because of the potential influence of small particles to the final gold recovery. In contrast, small particles may be problematic for the flotation process as well. The quantity of small gold enclosed by sulfides seen in thin sections is relatively low and rare, this excludes a need of oxidation step on the process.

Thus, it is suggested that the optimal recovery method of gold is by grinding and directly leaching with cyanide. In order to get the optimal recovery, it is required to do a thoroughly study of gold liberation and energy necessary to comminute it.

## CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A jazida de Cuiabá é atualmente a maior produtora de ouro do Quadrilátero Ferrífero e maior mina subterrânea do país, com aproximadamente 1300 m de profundidade. A mineralização de ouro se hospeda principalmente em formação ferrífera bandada (FFB) e ocorre associada a presença de pirita e pirrotita. Com a crescente demanda para produção, novas áreas com potencial para conter mineralização em ouro vem sendo estudadas. Nesse contexto foram recentemente descobertas três regiões hospedadas na unidade máfica basal denominadas VQZ, Fonte Grande Sul *Footwall* e Serrotinho *Footwall*. São caracterizadas pela presença de diferentes tipos de veios quartzo-carbonático interconectados, estruturalmente controlados e associados a alteração hidrotermal na rocha encaixante. Na presente data a região do VQZ está sendo desenvolvida em subsolo e apresenta resultados positivos conforme esperado.

Apenas uma geração de estruturas (G1) está relacionada aos veios quartzo-carbonático, foram geradas durante uma deformação transpressiva de direção NNW-SSE. As estruturas planares são representadas pelo bandamento composicional S0, foliação flexural S1 e foliação milonítica S2 relacionada a zonas de cisalhamento D1. Três estruturas lineares são notadas, lineação mineral Lmin1, lineação de interseção Lint1 e eixos de dobras F1. *Flanking folds* e *flanking shear-bands* apresentam sentido contrário em relação as zonas de cisalhamento D1, sendo interpretadas como sendo geradas nos estágios finais da deformação.

Diferentes tipos de quartzo são descritos nos veios quartzo-carbonático, e representam estágios distintos de deformação e atividade hidrotermal. O quartzo fumê Qtz-I representa os estágios iniciais de deformação e introdução de fluido. Através de deformação progressiva e recristalização dinâmica é gerado o Qtz-II a partir do Qtz-I. O hábito euédrico do Qtz-III indica que o fluido hidrotermal tenha precipitado de forma lenta, entretanto a presença pontual do quartzo granoblástico Qtz-IV ao redor do Qtz-III sugere que ainda houve alguma atividade tectônica nesse estágio. O Qtz-V foi cristalizado nos estágios finais de hidrotermalismo, pois não apresenta feições de cristalização dinâmica e foi formado em condições de temperatura mais baixa.

Quatro sistemas de veios quartzo-carbonático são identificados na unidade máfica basal. Os veios de preenchimento de falha V1 são a maior fonte de ouro, controlados pela foliação milonítica S2 e principalmente compostos pelo Qtz-I. O sistema de veios V2 também está mineralizado, controlado pela foliação S1 e composto por Qtz-II > Qtz-I, ankerita além de sulfetos. É subdividido em três tipos de acordo com a orientação mineral interna: V2a veios extensionais, V2b extensão oblíqua e V2c preenchimento de falha. Ambos sistemas V1 e V2 são do tipo sin-tectônicos. O sistema de veios V3 é classificado como veio extensional ou veios de tensão em arranjo (*tension veins arrays*), o sistema V4 classificados como brechas e extensionais.

O modelo evolutivo proposto para os sistemas de veio sugere que o fluido hidrotermal tenha percolado através de zonas de cisalhamento D1, formando os veios V1, e se dispersaram ao longo das estruturas previamente existentes S0/S1 originando os veios V2. Os veios V2a, V2b e V2c são gerados durante a rotação do vetor de compressão e deformação progressiva. Os veios V3 estão relacionados aos estágios finais de hidrotermalismo e deformação, enquanto o sistema V4 representa o encerramento do fluxo hidrotermal e atividade tectônica.

O minério de ouro é predominantemente composto por quartzo, ankerita e pirita. Partículas de ouro são formadas por elétron de ouro e prata, sendo que 98 % das partículas ocorrem liberadas. O processo de beneficiamento mineral mais adequado é através de britagem e consequente lixiviação por cianeto.

A partir de dados geocronológicos obtidos em cristais de monazita hidrotermal, em amostras de minério hospedado na FFB-Cuiabá, Lobato *et al.*, (2007) obteve idade arqueana de  $2670 \pm 14$  Ma. Os veios quartzo-carbonáticos mineralizados e associados a unidade máfica basal, são classificados como sin-tectônicos e associados a zonas de cisalhamento D1, correlatas aos eventos D1 e D2 de Baltazar e Zucchetti (2007). Apesar da ausência de dados geocronológicos relacionados aos veios, interpreta-se que os mesmos também sejam de idade arqueana, no entanto trabalhos geocronológicos são sugeridos de forma a comprovar essa hipótese.

O presente trabalho confirma o potencial para existência de outras regiões dentro da jazida Cuiabá, não hospedadas na FFB, que possam conter teores em ouro e serem desenvolvidas para lavra. Esse trabalho ressalta ainda a importância em caracterizar zonas de cisalhamento semelhantes de idade arqueana no contexto do *greenstone belt* Rio das Velhas, além da possibilidade de se determinar o posicionamento relativo às zonas de cisalhamentos, a partir da classificação dos veios e alteração hidrotermal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Res.* 90, 29–58.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil: *Mar. Pet. Geol.*, v. 33, p. 127-139.
- Almeida, F.F.M., 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Departamento Nacional da Produção Mineral - Divisão de Geologia e Mineralogia: Bull, 241p.
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., 1991. Pb/Pb geochronology of carbonate rocks of Minas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 1991 Fall Meet. Suppl. v. 72, p. 531.
- Bons, P.D., Elbur, M.A., Gomes-Rivaz, E. 2012. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures: *Journal of Structural Geology*, v 42, p. 33-62.
- 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 Geol. Rev.* 32, 471–499.
- Chauvet, A., Faurre, M., Dossin, I., Charvet, J., 1994. Three-stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero: consequences for Neoproterozoic age and the formation of gold concentrations of the Ouro Preto area, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 68, 139e167.
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A., Endo, I., 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 65, 25e54.
- Cox, S.F., 2005. Coupling between deformation, fluid pressures and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust: *Economic Geology*, 100th Anniversary volume, p. 39-75.
- Davis, G.H., Reynolds, S. J., 1996. *Structural Geology of Rocks and Regions*, second ed. John Wiley and Sons, New York.
- Dong, D., Morrison, G., Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland - Classification, origin, and implication: *Economic geology*, v. 90, p. 1841-1856.
- Dorr, J.V.N., 1957. In: *Mineral DNPM (Ed.), Revisão da Estratigrafia Pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero: Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Minas Gerais, p. 81.
- Dorr, J.V.N., 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Regional Geology of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*.
- Drake, A.A., Morgan, B.A., 1980. Precambrian Plate Tectonics in the Brazilian Shield; Evidence from the Pre-Minas Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U.S. Geol. Surv.*, pp. 1e64. Prof. Paper 1119, U.S. Geological Survey, pp. B1eB19.
- Dubé, B., and Gosselin, P., 2007. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 49-73.
- Endo, I., Fonseca, M.A., 1992. Sistema de cisalhamento Fundão-Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: Geometria e cinemática. *Rev. Esc. Minas Univ. Fed. Ouro Preto* 45, 28e31.

- Endo, I., 1997. Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais (Unpublished PhD thesis). University of São Paulo, Brazil, p. 330.
- Fandrich, R., Gu, Y., Burrows, D., Moeller, K., 2007. Modern SEM-Based mineral liberation analysis: *International Journal of Mineral Processing*, v. 84, p. 310-320.
- 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*, v. 266, p. 375-394.
- Farina, F., Albert, C., Martinez, C.D., Gil, A.C., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkmim, F.F., Lana, C., 2016. The Archean-Proterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brazil): Current models and open questions: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 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 a Exploração Mineral, *Seção Pôster*. In: *VII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN*, Ouro Preto, ADIMB.
- Fossen, H., 2012. *Geologia Estrutural*, primeira edição, Oficina de texto, São Paulo.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., and Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types: *Ore Geology Reviews*, v. 13, p. 7-27.
- Gu, Y., 2003. Automated Scanning Electron Microscope Based Mineral Liberation Analysis – An Introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyser: *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v 2, p. 33-41.
- Hodgson, C.J., 1989. The structure of shear-related, vein-type gold deposits: A review: *Ore Geology Reviews*, v. 4, p. 231-273.
- Holcombe, R.J., Coughlin, T.J., 2003. Structural observations in the Northern Quadrilátero-Ferrífero and implications for gold mineralization: Internal Technical Report.
- Jébrak, M., 1992. Les textures intra-filoniennes, marqueurs des conditions hydrauliques et tectoniques: *Chronique de la Recherche Minière*, no. 506, p. 25-35.
- Kresse, C., Lobato, L.M., Figueiredo e Silva, R.C., 2016. Paragenetic mineral sequence linked to supplemental fluid inclusion data of the Cuiabá gold deposit, Iron Quadrangle, Brazil. *Seção Pôster*. In: *VII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN*, Ouro Preto, ADIMB.
- Kresse, C., 2017. Isotopic, fluid inclusion and LA-ICP-MS studies on the world-class Cuiabá gold deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, MG: implications for the mineralizing fluid reservoirs. Exame de qualificação, Universidade Federal de Minas Gerais, 92 p.
- Ladeira, E., 1980. Geology, petrography and geochemistry of Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *XVII Geowiss Lateinamer. Heidelberg*, pp. 47-48.
- Laing, W.P., 2004. Tension vein arrays in progressive strain: complex but predictable architecture, and major hosts of ore deposits: *Journal of Structural Geology*, v. 26, p. 1303-1315.
- 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* v. 231, p. 157-173.





- Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Pereira, L.M.M., Menezes, M., Junqueira, P.A., Martins-Pereira, S.L.M., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: Part I, description of selected gold deposits. *Rev. Bras. Geociências*, 28(3): 339-354.
- Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Costa, M.N.S., Martins, R., Lehne, E., Alves, J. V., Tassinari, C.G., Vieira, F.W.R., Biasi, E.E., Silva, R.C.F., Pereira, V.C.A., Noce, C.M., 2001. Geologia do depósito de ouro Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Caracterização de depósitos auríferos em distritos minerais brasileiros, Departamento Nacional da Produção Mineral/Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, 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., Ferreira, D.V., 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, CD-ROM.
- Louis, L.C., Salomon, J.T., Gavin, J.M., Juan-David, V.D.M., Tracey, A.S., 2011. Modern gold deportment and its application to industry: SGS minerals services, technical paper 4, 12p.
- Machado, N., Noce, C.M., De Oliveira, O.A.B., Ladeira, E.A., 1989. Evolução Geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior com base em geocronologia U/Pb. 5. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1989. Sociedade Brasileira de Geologia, núcleo Minas Gerais, Extended Abstract Volume, pp. 1–5.
- Machado, N., 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.
- Martins, B., Lobato, L.M., Rosière, C.A., Hagemann, S.G., Santos, J.O.S., Villanova, F. L.d.S.P., Silva, R.C.F., de 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*, v. 72, p. 963-988.
- Martins, R., 2000. Caracterização petrográfica e geoquímica mineral do minério da mina de ouro Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Unpublished M.Sc. thesis. Belo Horizonte, Brazil, Universidade Federal Minas Gerais, 125 p.
- Machado, N., Noce, C.M., De Oliveira, O.A.B., Ladeira, E.A., 1989. Evolução Geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior com base em geocronologia U/Pb: 5. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1989.
- 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*, v. 141, p. 259–276.
- McKinstry, H.E., 1948. *Mining Geology*: New York, Prentice-Hall, 680 p.
- Morales, M.J., Silva, R.C.F., Lobato, L.M., Gomes, S.D., Gomes, C.C., and 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*, v. 72, p. 510-531.
- Passchier, C.W., 1991. Geometric constraints on the development of shear bands in rocks. *Geol Mijnb* 70:203–211.
- Passchier, C.W., 2001. Flanking structures: *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 951-962.





- Passchier, C., and Trouw, R., 2005. *Microtectonics*, 2nd ed.: Berlin, Springer-Verlag.
- Petit, J.P., Wibberley, C.A.J., and Ruiz, J., 1999. "Crack-seal," slip: A new fault-valve mechanism? *Journal of Structural Geology*, v. 21, p. 1199-1207.
- Pereira, M.A.S., Lobato, L.M., Rosière, C.A., Figueiredo e Silva, R.C., 2013. Classificação dos veios quartzo-carbonáticos de depósitos auríferos no lineamento Córrego do Sítio, QF, MG: *Geonomos*, v. 21, p. 53-71.
- Poulsen, K.H., Robert, F., and Dubé, B., 2000. *Geological Classification of Canadian Gold Deposits: Geological Survey of Canada, Bulletin 540*, 106 p.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987. *The techniques of Modern Structural Geology, Volume 2: Folds and Fractures*: London, Academic Press, 700 p.
- Renger, F.E., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N., 1995. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil: *Geonomos* v. 2, p. 1-11.
- Ribeiro, Y., Silva, R.C.F., Lobato, L.M., Lima, L.C., Rios, F.J., Hagemann, S.G. and Cliff J., 2015. Fluid inclusion and sulfur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulfide veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: *Ore Geology Reviews*, v. 67, p. 11-33.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., Friedrich G., Vieira F.W.R., Chemale Jr F., Oliveira C.G., 1997. Structural styles of greenstone-hosted gold deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil). In: *SBG, Simp. Nacional Estudos Tectônicos*, 6, Brasília, Resumos Expandidos, p. 363-366.
- Ribeiro-Rodrigues, L., 1998. Gold mineralization in Archean banded iron-formation of the QF, Minas Gerais, Brazil-The Cuiabá Mine: Unpubslihed Philosophy thesis, Aachen, Germany, RTWH Aachen.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., de Oliveira, C.G., and Friedrich, G., 2007. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: *Ore Geology Reviews*, v. 32, p. 543-570.
- Robert, F., Poulsen, K.H., and Dubé, B., 1994. Structural analysis of lode gold deposits in deformed terranes: *Geological Survey of Canada, Open File Report 2850*, 140 p.
- Robert, F., Poulsen, K.H., 2001. Vein formation and deformation in greenstone gold deposits. In: Richards, J. P., Tosdal, R. M., *Structural Controls on Ore Genesis: Reviews in Economic Geology*, v. 14, p. 111-155.
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F.F., Stevens, G.S., 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*, v. 224, p. 143-159.
- Sibson, R.H., 1990. Faulting and fluid flow, in Nesbitt, B.E.; ed., *Short course on fluids in tectonically active portions of the crust: Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook*, v. 18, p. 93-129.
- Sibson, R.H., Robert, R., and Poulsen, K.H., 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits: *Geology*, v. 16, p. 551-555.
- Sylvester, P.J., 2012. Use of the mineral liberation analyzer (MLA) for mineralogical studies of sediments and sedimentary rocks: In Sylvester, P. J. (Ed.), 2012. *Quantitative Mineralogy and Micro-análises of Sediments and Sedimentary Rocks*, 42, Mineralogical Association of Canada Short Course, p. 1-16.

- Teixeira, W., Ávila, C., Dussin, I., Neto, A.C., Bongioio, E., Santos, J., 2015. A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: zircon U–Pb–Hf and geochemical evidences. *Precambrian Res.* 256, 148–169.
- Tikoff, B., Green, D., 1997. Stretching lineations in transpressional shear zones: an example from the Sierra Nevada Batholith, California: *Journal of structural geology*, v.19, p. 29-39.
- Toledo, C., 1997. Controle estrutural da mineralização aurífera na mina de Cuiabá, setor noroeste do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero: Unpublished M.Sc. thesis, Campinas, Brazil, Universidade Estadual de Campinas.
- Vial, D.S., 1980. Mapeamento Geológico do Nível 3 da mina de Cuiabá, Mineração Morro Velho as: Internal Report.
- Vial, D.S., 1988. Mina de ouro de Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Schobenhau, C., Coelho, C.E.S. (Eds.), *Principais depósitos minerais do Brasil. Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio*, vol. 3, pp. 413–419.
- Vieira F.W.R., 1992. Geologia da Mina de Cuiabá, Níveis 03 e 04. Internal Report, Mineração Morro Velho S. A., Nova Lima, 23 p.
- Zhou, X., Lin, S., Anderson, S.D., 2016. Stratigraphy, structure and lode gold system at the Central Manitoba mine trend, Rice Lake greenstone belt, Archean Superior Province, Manitoba, Canada: *Precambrian Research*, v. 281, p. 80-100.



## **ANEXO I**



### **AMOSTRAS SELECIONADAS PARA DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA EM FUROS DE SONDAGEM DE SUPERFÍCIE**

Furo	Amostra	De (m)	Até (m)	Litologia	Descrição macro	Fotos
CBABSD0003A	F03A-AM-01	1408,47	1408,57	Zona proximal	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cor cinza-verdeado, presença de veios e venulações quartzo-carbonáticas.</p> <p>Alteração sericítica prevasiva e intensa silicificação, alteração clorítica restrita e controlado por S2. Arsenopirita fina é comum no quartzo e principalmente nas zonas de sericita.</p> <p>Veios de quartzo leitoso a fumê com ankerita, espessura de até 10 cm.</p>	
CBABSD0003A	F03A-AM-02	1410,13	1410,30	Zona proximal	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cor cinza-verdeado, presença de veios e venulações quartzo-carbonáticas.</p> <p>Alteração sericítica prevasiva e intensa silicificação, alteração clorítica restrita e controlado por S2. Arsenopirita fina é comum no quartzo e principalmente nas zonas de sericita.</p> <p>Veios de quartzo leitoso a fumê com ankerita, espessura de até 10 cm.</p>	



CBABSD0003A	F03A-AM-03	1455,15	1455,30	Zona proximal	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza esverdeado, avermelhado quando intemperizado. Presença de venulações quartzo-carbonáticas controladas por S2. Pirita disseminada no xisto e principalmente nas bordas das vênulas. Arsenopirita é rara e muito fina.</p>		
CBABSD0003A	F03A-AM-04	1456,70	1456,80	Zona intermediária	<p>Sericita-clorita-quartzo-carbonato xisto verde-claro. Presença de veios quartzo-carbonáticos dobrados ou concordantes com S2. Alteração clorítica pervasiva e carbonatação disseminada. Pirita disseminada tanto no xisto como nos veios, pirrotita e arsenopirita dispersas em menor quantidade.</p>		





CBABSD0003A	F03A-AM-05	1462,00	1462,10	Zona proximal	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza com bandas esverdeadas. Foliação milonítica (S2) bem desenvolvida. Venulação intensa e concordante com a foliação milonítica S2. Veios quartzo-carbonáticos de até 10 cm de espessura. Sulfetação moderada com pirita disseminada, localmente arsenopirita fina na foliação e traços de pirrotita.</p>	
CBABSD0003A	F03A-AM-06	1473,40	1473,60	V1	<p>Quartzo fumê (Qtz-I) com vênulas de quartzo leitoso (Qtz-II) intercalado com quartzo-carbonato-sericita xisto esverdeado. Sulfetação disseminada, Pirita &gt; Pirrotita &gt; Arsenopirita, localmente intensa, associada ao xisto e concordante com S2. Finas partículas de ouro visível em meio ao quartzo fumê.</p>	

CBABSD0003A	F03A-AM-07	1477,74	1477,92	V1	<p>Quartzo fumê (Qtz-I) com vênulas de quartzo leitoso (Qtz-II) intercalado com quartzo-carbonato-sericita xisto esverdeado. Sulfetação disseminada, Pirita &gt; Pirrotita &gt; Arsenopirita, localmente intensa, associada ao xisto e concordante com S2. Finas partículas de ouro (Au) visível em meio ao quartzo fumê.</p>	
CBABSD0003A	F03A-AM-08	1480,88	1481,00	Zona proximal com V4	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza com bandas esverdeada. Venulação intensa, veios de quartzo leitoso associados a clivagem de crenulação (V4). Sulfetação fraca a moderada localmente, pirita e pirrotita concordantes com a foliação minlonítica S2.</p>	





CBABSD0007	F07-AM-01	1285,74	1285,93	Zona proximal	<p>Quartzo-carbonato-sericita xisto cinza-claro a bege.</p> <p>Venulação quartzo-carbonática intensa com veios de até 10 cm. Veio de quartzo leitoso e maciço com carbonato grosso (V4). Sulfetação moderada com agregados de pirrotita e pirita disseminada.</p>		
CBABSD0007	F07-AM-02	1294,52	1294,73	Zona intermediária	<p>Sericita-clorita-quartzo-carbonato xisto verde com cristais de carbonato disseminado.</p> <p>Venulação quartzo-carbonática moderada com veios de até 10 cm dobrados ou concordantes com S2. Localmente alteração sericítica é intensa e controlada por S2. Sulfetação dispersa com pirita fina à média disseminada e pirrotitas isoladas.</p>		

CBABSD0007	F07-AM-03	1324,10	1324,27	V2	<p>Veio quartzo-carbonático leitoso (Qtz-II) a fumê (Qtz-I) intercalado com quartzo-carbonato-sericita xisto.</p> <p>Sulfetação, pirita e pirrotita, associada ao xisto e disseminada nos veios. Partículas de ouro visível muito fino em meio ao quartzo leitoso.</p>	
CBABSD0007	F07-AM-04	1363,25	1363,47	Zona distal	<p>Sericita-carbonato-quartzo-clorita xisto verde com cristais de carbonato estirados concordantes com S2. Venulação quartzo-carbonática moderada a fraca. Localmente faixas com alteração carbonática-sericitica intensa e concordantes a S2. Sulfetação moderada com pirita e pirrotita fina a grossa concordantes com a foliação S2, algumas subédricas.</p>	

CBABSD0009	F09-AM-01	1474,83	1475,11	V2	<p>Veio quartzo-carbonático com predomínio de quartzo leitoso (Qtz-II) sobre quartzo fumê (Qtz-I), intercalado com carbonato-quartzo-sericita xisto, concordante com a foliação milonítica S2. Sulfetação fraca a moderada, pirita &gt; pirrotita finas no contato veio-rocha.</p>	
CBABSD0009	F09-AM-02	1460,87	1461,15	V4	<p>Veio de quartzo leitoso com cristais grossos de quartzo e carbonato, intercalado com carbonato-quartzo-sericita xisto, discordante da foliação S2. Sulfetação fraca a moderada localmente pirrotita &gt; pirita, fina a média, na transição veio-rocha.</p>	



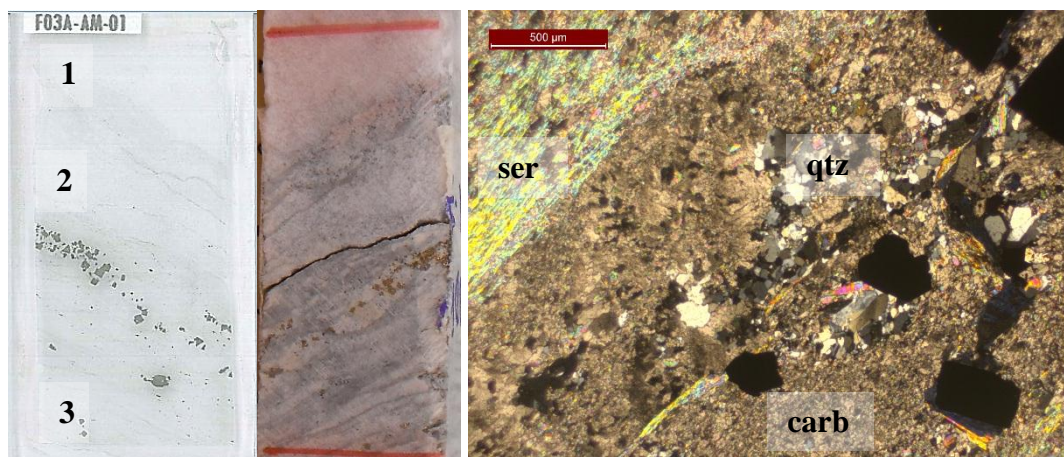
CBABSD0009	F09-AM-03	1465,34	1465,81	V1	<p>Veio quartzo-carbonático, prevalece quartzo fumê (Qtz-I) em relação ao quartzo leitoso (Qtz-II) intercalado com carbonato-quartzo-sericita xisto.</p> <p>Sulfetação fraca a moderada localmente pirrotita &gt; pirita, fina a média, no contato veio-rocha.</p>		
------------	-----------	---------	---------	----	--	---	---

## **ANEXO II**

# **PETROGRAFIA MICROSCÓPICA, AMOSTRAS DE FUROS DE SONDAGEM E GALERIAS.**

## Amostra F03A-AM-01

### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (acessórios)
± 80 Quartzo	Pirita
± 7 Carbonato	Titanita
± 5 Sericita	Pirrotita

**Nome da rocha:** Quartzo-carbonato-sericita xisto com veio de quartzo leitoso e fumê, zona proximal.

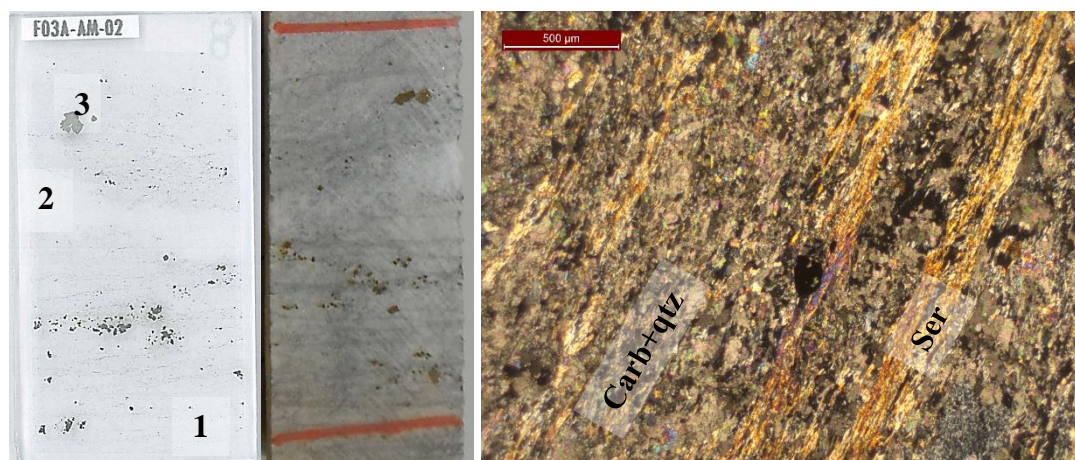
### Descrição microscópica

Lâmina pode ser dividida em três partes (1) Quartzo e carbonato grossos (2) quartzo médio a fino com porfiroblastos de carbonato (3) mica com textura lepidoblástica. (1) Representa 15% da lâmina possui textura granoblástica com cristais de quartzo e carbonato. Prevaecem cristais anédricos de quartzo (95%) com granulometria média a grossa (1000 a 200 µm), presença de extinção ondulante e formação de subgrãos; cristais com bordas lobadas. Carbonato (5%) possui granulometria média (300 µm) ocorre em cristais euédricos a subédricos em meio a massa de quartzo. (2) Representa 30% da lâmina possui textura granoblástica com cristais de quartzo (90%), carbonato (5%) e sericita (5%). Quartzo é poligonizado, euédrico a subédrico, granulometria fina a média (100 a 500 µm) nos grãos maiores nota-se extinção ondulante e bordas lobadas. Carbonato frequentemente ocorre como xenoblastos ou em cristais, euédricos a subédricos, finos em meio a massa de quartzo. Sericita é fina e está disposta em filetes orientados segundo a foliação milonítica com textura lepidoblástica. Pirita ocorre como mineral acessório, granulometria fina (50 a 100 µm), geralmente subédrica. (3) Representa 65% da lâmina possui textura granoblástica e lepidoblástica com cristais de sericita, moscovita, carbonato, quartzo e porfiroblastos de pirita. Sericita e moscovita (70%) envolvem os cristais de granulares e possuem granulometria fina a muito fina. Quartzo e carbonato (25%) com granulometria fina, estirados e alongados segundo a foliação milonítica, comumente com extinção ondulante. Pirita (4%) ocorre em cristais euédricos a anédricos, granulometria fina a grossa (10 a 400 µm), cristais com

microfraturas, por vezes com inclusões de carbonato. Titanita muito fina ocorre como mineral acessório formando trilhas orientada segundo a foliação milonítica.

### Amostra F03A-AM-02

#### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



#### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (5 %)
± 50 Carbonato	Pirita
± 30 Sericita	Pirita arsenical
± 15 Quartzo	Calcopirita

**Nome da rocha:** Quartzo-sericita-carbonato xisto com vênulas de quartzo, zona intermediária

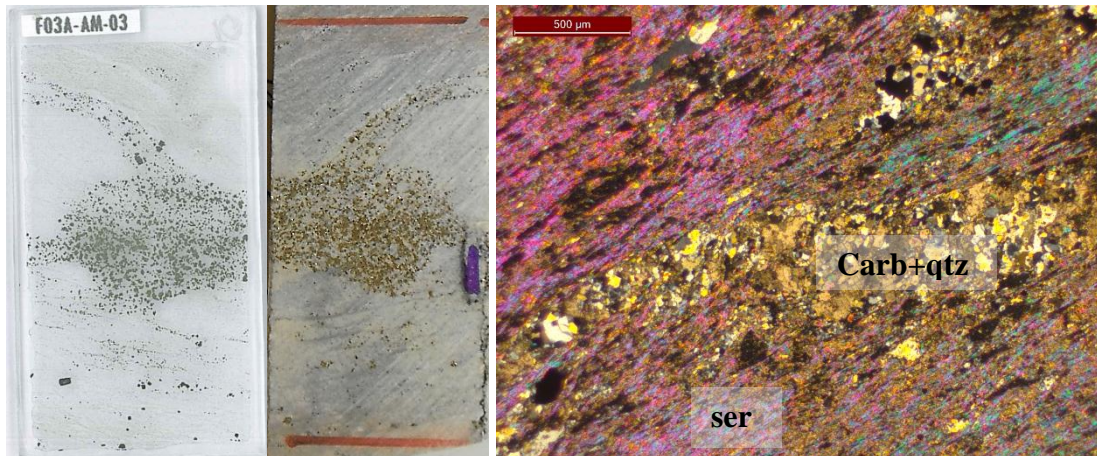
#### Descrição microscópica

Rocha com textura lepidoblástica (1) e nematoblástica (2) formada por carbonato, sericita, quartzo, clorita e porfiroblastos de opacos (3), apresenta vênulas de quartzo e carbonato (2). Carbonato (50%) de granulometria fina (< 100 a 500 µm), grãos euédricos a subédricos, textura nematoblástica (2), alongados segunda a foliação milonítica, e com contato entre grãos serrilhado. Sericita (30%) é muito fina a fina (< 100 a 200 µm), lamelar, hipidoplástico, textura lepidoblástica (2) e contato reto entre os grãos. O quartzo (15%) ocorre tanto em meio a rocha como em vênulas orientadas segunda a foliação milonítica. Na rocha possui granulometria fina (< 100 µm), euédrico a subédrico com contatos interlobados a poligonal, alguns possuem extinção ondulante e estão orientados. No veio o quartzo possui granulometria fina a grossa (<100 a >1000 µm) textura granoblástica com grãos poligonizados, nos maiores nota-se extinção ondulante, contatos retos a interlobados. Os opacos (5%) são representados principalmente por poiquiloblastos de pirita (3) com porções de pirita arsenical, granulometria varia entre muito fina a grossa (<50 a 800 µm) os mais grossos são euédricos enquanto os mais finos são anédricos. Calcopirita é notada nas bordas da pirita. Titanita com granulometria muito fina ocorre em pequenas trilhas concordantes com a clivagem. Clorita foi observada como mineral acessório formando sombra de pressão sobre a pirita.



**Amostra F03A-AM-03**

**Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia**



**Estimativa mineralógica (%)**

<b>Transparentes</b>	<b>Opacos (10 %)</b>
± 50 Carbonato	Pirita
± 30 Quartzo	Calcopirita
± 10 Sericita	Titânita

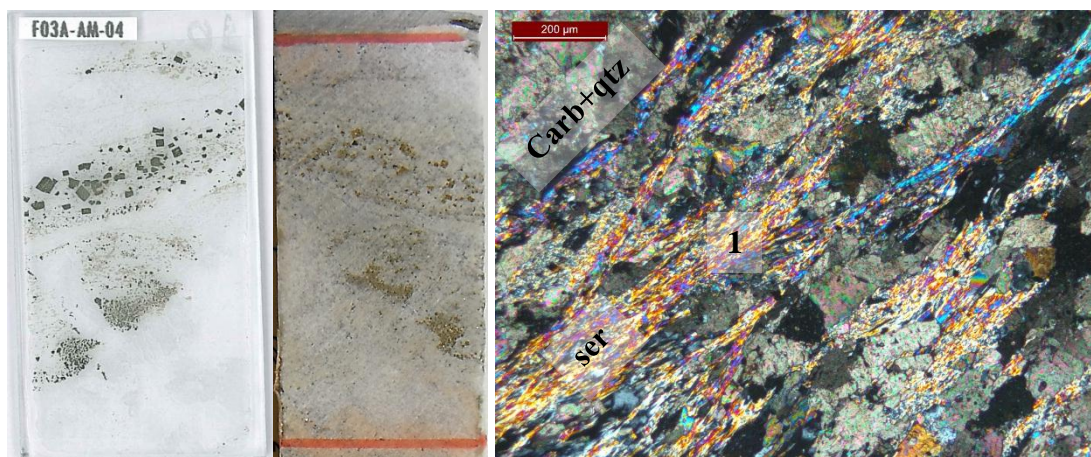
**Nome da rocha:** Sericita-quartzo-carbonato xisto com piritas associadas as vênulas de quartzo, zona intermediária

**Descrição microscópica**

Rocha com textura granoblástica e lepidoblástica composta por carbonato, quartzo, sericita e opacos. São faixas com quartzo e carbonato limitadas por sericita. Carbonato (50%) possui granulometria fina a muito fina (< 100 µm), grãos euédricos a anédricos, com bordas serrilhadas a poligonais. Quartzo (30%) ocorre tanto em meio a rocha ou em vênulas. Na rocha possui granulometria fina (100 a 200 µm), euédrico a subédrico com bordas poligonizadas ou interlobadas, por vezes apresenta extinção ondulante. No veio possui textura granoblástica, granulometria fina (200 a 400 µm), bordas poligonizadas a interlobadas. Sericita (10%) é muito fina, lamelar, com textura lepidoblástica orientanda segunda a clivagem. Opacos representam 10% da amostra ocorrem principalmente associados as vênulas quartzo-carbonáticas. O principal opaco é a pirita com granulometria fina (<500 µm), é predominantemente euédrica com algumas subédricas. Calcopirita ocorre entre as piritas com 100 µm. Ocorrem também titânitas em meio a rocha e na borda da pirita.

## Amostra F03A-AM-04

### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
60 Carbonato	Pirita
30 Quartzo	Calcopirita
5 Sericita	

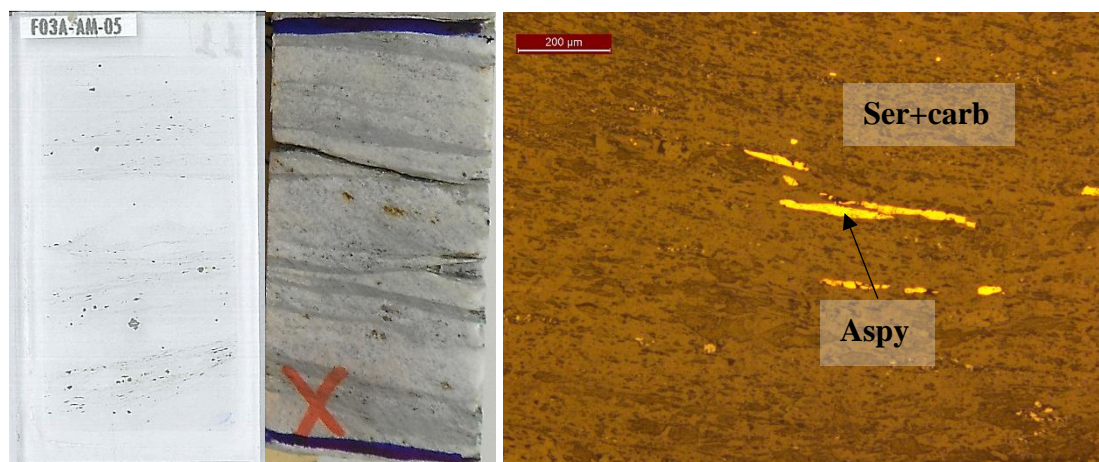
**Nome da rocha:** Sericita-quartzo-carbonato xisto com vênulas de quartzo e pirita, zona intermediária.

### Descrição microscópica

Rocha com textura granoblástica e lepidoblástica composta por carbonato, quartzo, sericita e opacos, apresenta vênulas quartzo-carbonáticas. Carbonato representa 60% da amostra, na rocha possui granulometria muito fina a fina (<100 µm), grãos euédricos a subédricos, textura nematoblástica, alongados segunda a foliação milonítica (1). No veio o carbonato é calcita de granulometria fina a média (200 a 1000 µm) euédrica a subédrica, encontra-se alongada perpendicularmente a parede da rocha. O quartzo (30%) também ocorre compondo a matriz da rocha e veio. Na rocha possui granulometria fina (<200 µm), prevalecem grãos anédricos, porém também nota-se euédricos, o contato entre os grãos é interlobado ou poligonizado. No veio o quartzo possui granulometria fina a grossa (100 a >1000 µm), subédrico, com extinção ondulante e formação de subgrãos. Sericita (5%) é muito fina, lamelas, com textura lepidoblástica orientada segunda a foliação milonítica, pode ocorrer formando foliação anastomosada em torno dos minerais prismáticos. Os opacos representam 5% da amostra, predomina pirita fina a média (100 a 500 µm), com hábito euédrico a subédrico, ocorrem próximo ao contato veio/rocha e na matriz da rocha. Calcopirita é notada com mineral acessório, granulometria fina (< 100 µm), hábito anédrico e próxima aos cristais de pirita.

**Amostra F03A-AM-05**

**Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia**



**Estimativa mineralógica (%)**

<b>Transparentes</b>	<b>Opacos (5%)</b>
± 50 Carbonato	Pirita
± 30 Quartzo	Arsenopirita
± 15 Sericita, Plagioclássio (raro)	Titanita

**Nome da rocha:** Sericita-quartzo-carbonato xisto com veios de quartzo fumê, zona intermediária.

**Descrição microscópica**

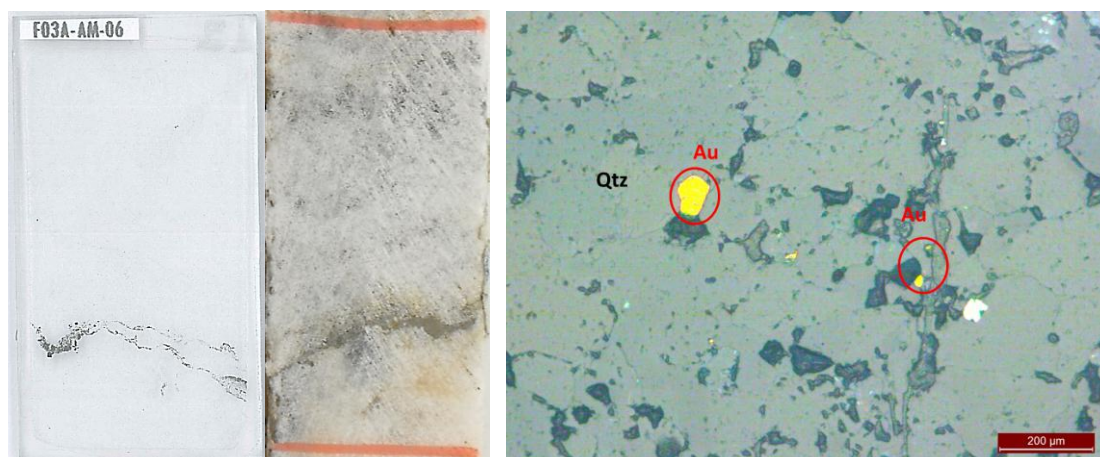
Rocha com textura lepidoblástica e nematoblástica com clivagem espaçada o domínio dos microlitons é constituído por quartzo e carbonato enquanto o domínio da clivagem (S2) por sericita, ocorrem de vênulas de quartzo e opacos. Carbonato constitui 60% da amostra, na rocha estão orientados e alongados segundo a direção da clivagem, granulometria muito fina a fina (<200 µm), possuem bordas angulosas a poligonais. No veio o carbonato possui granulometria fina a média (<1100 µm), extinção ondulante e bordas interlobadas. O quartzo (30%) quando ocorre em meio a rocha possui granulometria muito fina (< 100 µm), encontra-se orientado concordante com a clivagem, nos mais grossos nota-se extinção ondulante e formação de subgrão, as bordas são poligonais a interlobadas. Quando ocorre no veio, possui textura granoblástica, granulometria muito fina a fina (< 500 µm), presença de extinção ondulante e formação de subgrãos, com bordas poligonais a interlobadas. A sericita (10%) ocorre principalmente nos domínios da clivagem, porém também é notada nos microlitons, possui granulometria muito fina (< 50 µm) estão orientadas e alongadas segundo a clivagem, em alguns locais nota-se clivagem de crenulação. Os opacos são representados principalmente por pirita, arsenopirita e pirita arsenical, além de titanita. A pirita geralmente possui granulometria fina (<300 µm), euédrica a subédrica e está associada tanto aos domínios de microlitons quanto ao de clivagem, por vezes apresenta porções mais ricas em arsênio formando a pirita arsenical. A arsenopirita é fina (< 100 µm) encontra-se estirada e orientada segundo a clivagem e ocorre principalmente associada aos



domínios da sericita. A titanita é muito fina e ocorre como trilhas em meio as porções de sericita. O Plagioclásio foi notado como mineral acessório.

### Amostra F03A-AM-06

#### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



#### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (-5%)
90 Quartzo	Pirita
3 Carbonato	Pirita arsenical
2 Sericita	Ouro

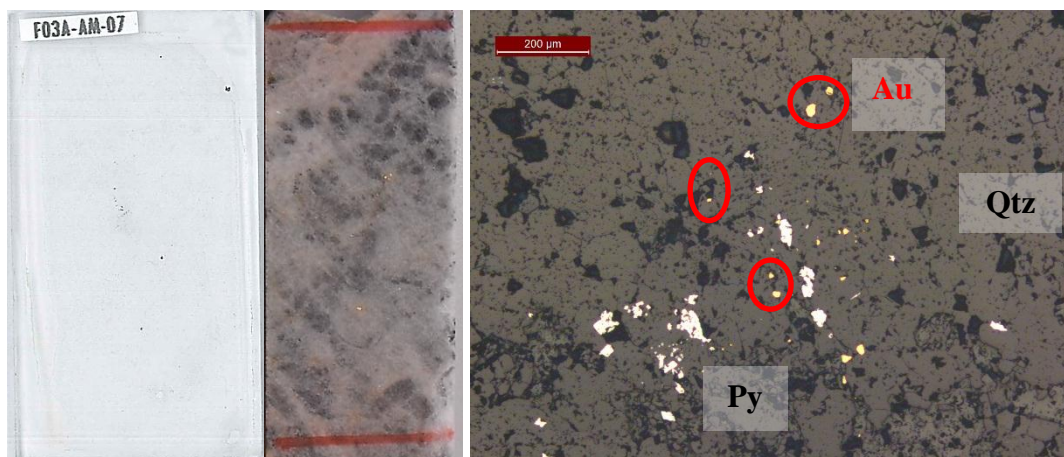
**Nome da rocha:** Veio de quartzo fumê V1

#### Descrição microscópica

Amostra composta por 90% de quartzo além de 5% de opacos e 5% de carbonato e sericita, textura granoblástica. O quartzo possui granulometria fina a média (< 2mm), os cristais mais finos (Qtz-II) possuem bordas poligonais a interlobados, são anédricos e podem estar alongados; os quartzos mais grossos (Qtz-I) possuem bordas interlobadas e são anédricos, ambos possuem extinção ondulante. Carbonato e sericita geralmente ocorrem associados, o carbonato possui granulometria fina (< 100 µm) e apresenta extinção ondulante. A sericita é muito fina e ocorre em estreitos filetes em meio ao quartzo. Os opacos ocorrem em um filete milimétrico, são representados principalmente por pirita e pirita arsenical. A pirita ocorre desde cristais euédricos de granulometria fina a muito fina (<300 µm) até cristais anédricos de granulometria muito fina. Pirita arsenical é notada como uma fase da pirita, e em aglomerados anédricos muito fino.

## Amostra F03A-AM-07

### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (1%)
90 Quartzo	Ouro
5 Carbonato	Pirita
5 Sericita, plagioclásio	

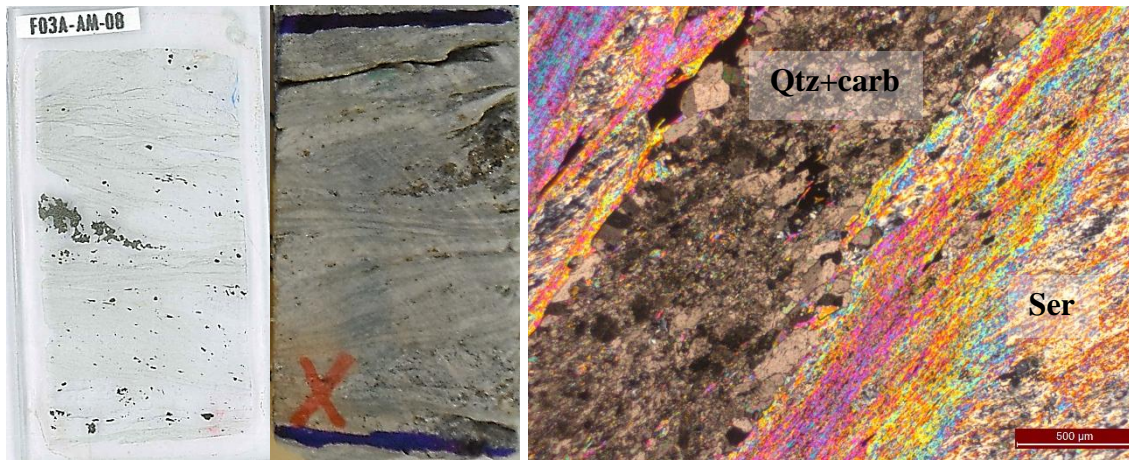
**Nome da rocha:** Veio de quartzo fumê V1.

### Descrição microscópica

Amostra composta por 95% de quartzo, 5% de carbonato, sericita, plagioclásio e pintas de ouro visível (Au). Quartzo (Qtz) em sua maioria é granoblástico, com granulometria muito fina (<100 µm), bordas poligonais a interlobadas, euédricos a subédricos. Também ocorrem porfiroblastos de quartzo com granulometria fina a média (>300 a <2500µm), bordas serrilhadas a interlobadas, subédricos a anédricos com extinção ondulante e formação de subgrãos. Localmente nota-se uma vênula de quartzo poligonal cortando o quartzo grosseiro. Plagioclásio ocorre em meio ao quartzo, possui granulometria muito fina (<100 µm) geralmente mais grosso que o quartzo, é notado também como porfiroblastos maiores que 1500 µm, é euédrico a subédrico, com bordas poligonais a serrilhada. O carbonato ocorre em meio ao quartzo, associado com o plagioclásio ou limitando o contato entre plagioclásio e quartzo, possui granulometria muito fina a fina (<200 µm), é anédrico, possui bordas irregulares. Sericita ocorre orientada em estreitos filetes, possui granulometria muito fina a fina (<100 µm), ocorre associada ao carbonato e onde o quartzo é muito fino.

**Amostra F03A-AM-08**

**Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia**



**Estimativa mineralógica (%)**

Transparentes	Opacos (5%)
60 Sericita	Pirita
30 Carbonato	Pirita arsenical
5 Quartzo	Calcopirita e Titanita

**Nome da rocha:** Quartzo-carbonato-sericita xisto com vênulas de quartzo, zona proximal.

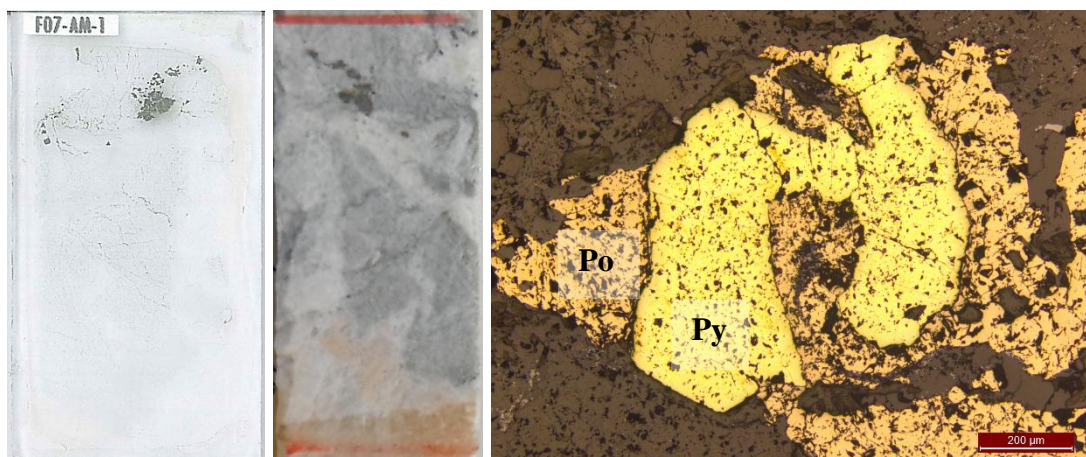
**Descrição microscópica**

Amostra composta por 60% de sericita (ser), 30% de carbonato (carb), 5% de quartzo (qtz) e 5% de opacos, possui textura granonetaoblástica lepidoblástica com clivagem espaçada marcada pela sericita, também se nota clivagem de crenulação e foliação SC. A sericita ocorre principalmente no domínio da clivagem, foliação milonítica, possui granulometria muito fina a fina (<100 µm), hábito lamelar, por vezes envolve o carbonato, aparece formando uma foliação tipo SC o sendo modificada pela clivagem de crenulação. O carbonato (por vezes calcita) possui granulometria fina (<200 µm) ocorre no domínio microlítico, é comumente estirado e orientado com ângulo oblíquo ao da clivagem, pode possuir textura nematoblástica ou granoblástica, possui bordas poligonais ou serrilhadas, hábito euédrico a anédrico. O quartzo possui granulometria fina (<100µm), ocorre associado ao carbonato com contatos interlobados ou poligonais, hábito euédrico a anédrico. Os opacos são principalmente pirita e pirita-arsenical e calcopirita e titanita em menor quantidade. A pirita possui granulometria fina a média (<3000 µm) as mais grosseiras são euédricas a subédricas, porosas, com bordas irregulares e ocorrem associadas as faixas com carbonato. As piritas mais finas ocorrem do domínio da clivagem, associadas a sericita, estão estiradas e orientadas conforme a clivagem e tendem a ser mais arsenicais. A calcopirita ocorre sempre nas bordas da pirita grosseira, possui granulometria fina (<300µm) bordas poligonais a interlobadas. A titanita é fina a muito fina, ocorre em trilhas nos domínios da clivagem, possui hábito anédrico com feições esferoidais.



## Amostra F07-AM-01

### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
70 Quartzo	Pirita
25 Carbonato	Pirrotita
5 Sericita, Feldspato e Clorita	

**Nome da rocha:** Veio de quartzo leitoso com fragmentos de quartzo-sericita xisto V1 e V2.

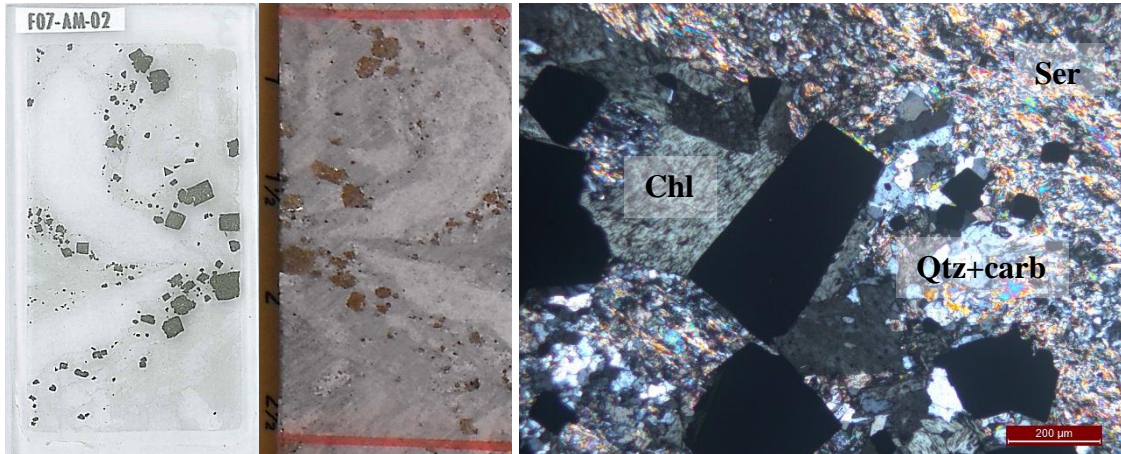
### Descrição microscópica

A amostra possui textura tipo *lath* é composta 70% por quartzo, 25% de carbonato e 5% de sericita, feldspato mais opacos, clorita ocorre como mineral acessório. O quartzo possui granulometria muito fina a fina (< 50µm), sem orientação preferencial, hábito subédrico a anédrico, com bordas irregulares a serrilhada, possui extinção ondulante. O carbonato geralmente é calcita, com granulometria média a grossa (< 5mm) hábito euédrico a subédrico com bordas retas a serrilhadas ocorre em um domínio distinto do quartzo. Carbonato fino também ocorre em meio ao quartzo, possui hábito anédrico e é intergranular. Sericita ocorrem no domínio do quartzo e com granulometria muito fina. Plagioclásio é notado em meio ao quartzo, possui granulometria fina (<500 µm) hábito subédrico com bordas poligonais. Os opacos são principalmente pirita e pirrotita, possuem granulometria fina (<1000µm) hábito anédrico a subédrico com bordas irregulares ocorrem principalmente entre a zona do carbonato grosseiro e o quartzo fino. A pirita (Py) cresce sobre a pirrotita (Po). Também nota-se calcopirita que ocorre geralmente nas bordas da pirrotita, possui granulometria fina e habito anédrico. Clorita foi observada em um cristal na borda de uma pirita.



**Amostra F07-AM-02**

**Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia**



**Estimativa mineralógica (%)**

Transparentes	Opacos
40 Carbonato	Pirita
30 Sericita	Titanita
25 Quartzo	

**Nome da rocha:** Clorita-quartzo-sericita-carbonato xisto com vênulas de quartzo, zona intermediária

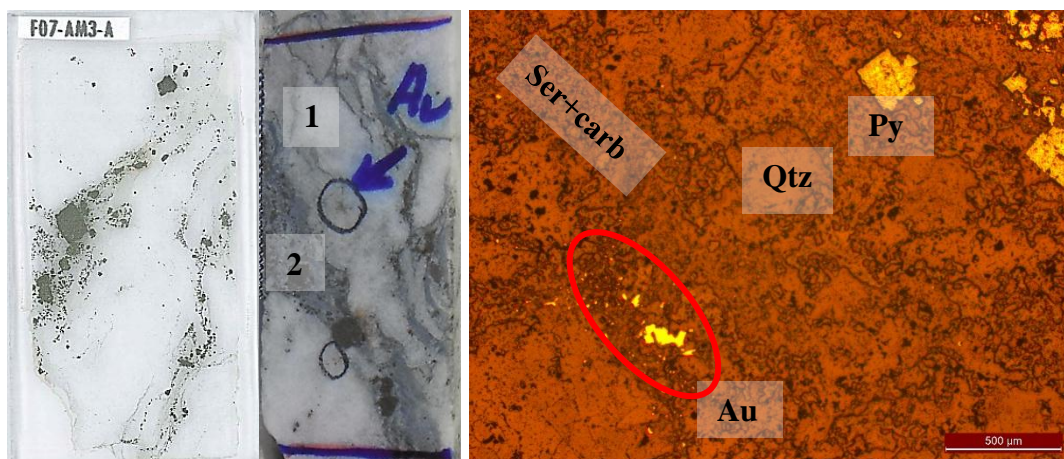
**Descrição microscópica**

Amostra formada por carbonato (40%), sericita (30%), quartzo (25%) e opacos (5%), clorita ocorre como mineral acessório. Lâmina com porções de rocha e veios. A rocha é formada principalmente por carbonato (carb) e sericita (ser), com quartzo (qtz) e clorita (chl). O Carbonato é muito fino a fino (< 500 µm), os mais grosseiros são calcita, possui arranjo irregular, habito anédrico a subédrico, bordas angulares ou serrilhadas, alguns estão alinhados e estirados segundo a clivagem. A sericita é muito fina, possui habito lamelar a acicular, por vezes ocorre orientada formando uma clivagem. O quartzo possui granulometria fina (<100 µm), habito anédrico a euédrico, os euédricos apresentam bordas poligonais ou outras bordas interlobadas a textura é granoblástica. As vênulas são compostas basicamente por quartzo e carbonato. Observam-se dois tipos de quartzo, o mais abundante é um quartzo de granulometria fina (< 500 µm), granoblástico, com bordas poligonais, habito euédrico a subédrico. O segundo quartzo é mais grosso, granulometria fina a média (< 1000 µm) possui bordas irregulares com contatos interlobados, habito anédrico, apresenta extinção ondulante e formação de subgrãos. O carbonato em meio as vênulas também são mais grosseiros do que o na rocha, possui granulometria fina (< 700 µm), geralmente é calcita, euédrico a subédrico, com bordas poligonais. Os opacos ocorrem principalmente no domínio da rocha, porém próximos aos veios. Predomina pirita e também ocorre titanita. A pirita possui granulometria fina a média (< 2000 µm), habito variando de euédrico a anédrico, geralmente porosa no centro com as bordas mais homogêneas, algumas possuem bordas interlobadas, mas a maioria é poligonal. A maioria das piritas apresentam manchas de pirita arsenical. A titanita ocorre em finos filetes em meio a sericita, granulometria

muito fina e habito esferoidal. A clorita ocorre geralmente nas bordas da pirita, como sombra de pressão, ou então em meio aos veios, possui granulometria fina (< 400 µm), hábito euédrico a subédrico com bordas retas.

### Amostra F07-AM-03

#### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



#### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (5%)
60 Quartzo	Pirita
15 Carbonato	Pirita arsenical
5 Plagioclásio	Ouro

**Nome da rocha:** Veio de quartzo com pintas de ouro V1 e V2

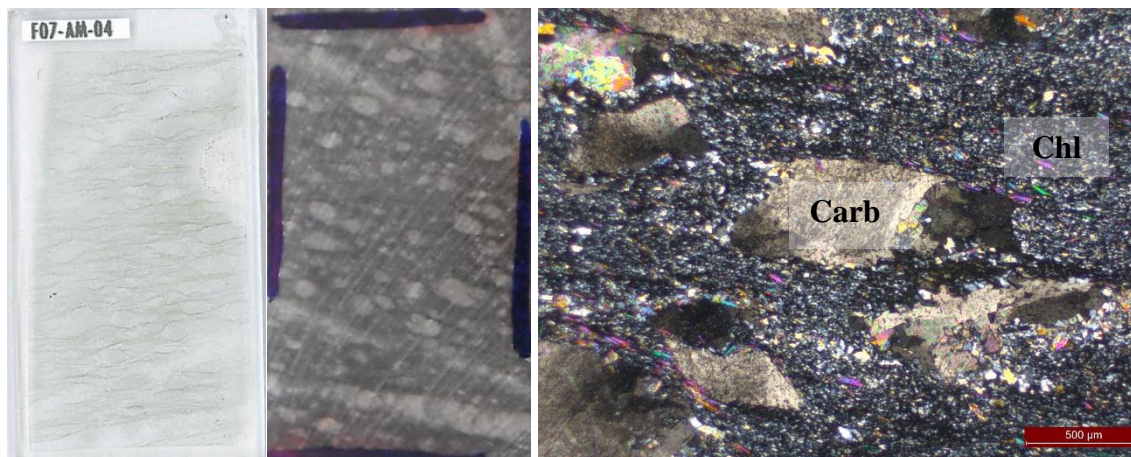
#### Descrição microscópica

A amostra é formada por quartzo (60%), carbonato (15%), sericita (15%), plagioclásio (5%) e opacos (5%), clorita ocorre como mineral acessório. A amostra pode ser dividida em duas porções (1) veio e (2) rocha. Os veios são compostos principalmente por quartzo (qtz) de granulometria fina (< 50 µm), textura granoblástica, euédrico a anédrico, com bordas poligonais ou interlobadas. Em menor quantidade ocorre quartzo de granulometria fina a média (< 1500 µm), anédrico, com bordas irregulares e contatos interlobados, com extinção ondulante e formação de subgrãos. Nos veios também ocorre carbonato (carb) com granulometria fina (< 200 µm), anédrico a subédrico, com bordas poligonais a irregulares, contatos retos ou interlobados. O plagioclásio possui granulometria média a fina (< 2000 µm) ocorre associado ao carbonato e quartzo, com habito subédrico a euédrico e bordas interlobadas. A porção da rocha é formada predominantemente por sericita muito fina, ocorre formando uma clivagem espaçada que é modificada por uma clivagem de crenulação. Em meio a sericita (ser) ocorre carbonato de granulometria muito fina. A clorita é encontrada formando sombra de pressão nas piritas. Os opacos são na maioria pirita (Py) e pirita arsenical, possuem granulometria fina a média (<2500 µm) o habito varia de euédrico a anédrico, os anédricos possuem contatos interlobados, a pirita é porosa. Calcopirita foi notada na borda de uma pirita. Observa-se também um cristal de esfarelita crescido ao redor da pirita. Pintas de ouro

são observadas em meio ao quartzo, a maior partícula possui 160  $\mu\text{m}$ , porém na média as partículas têm 20  $\mu\text{m}$ , têm habito anédrico e bordas irregulares. A maior partícula ocorre entre cristais de quartzo e carbonato com sericita e clorita em volta.

### Amostra F07-AM-04

#### Lâmina delgada / Amostra macro / Fotomicrografia



#### Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
60 Clorita	Pirita
30 Quartzo	Titanita
5 Sericita	Calcopirita

**Nome da rocha:** Quartzo-sericita-carbonato-clorita xisto, zona distal.

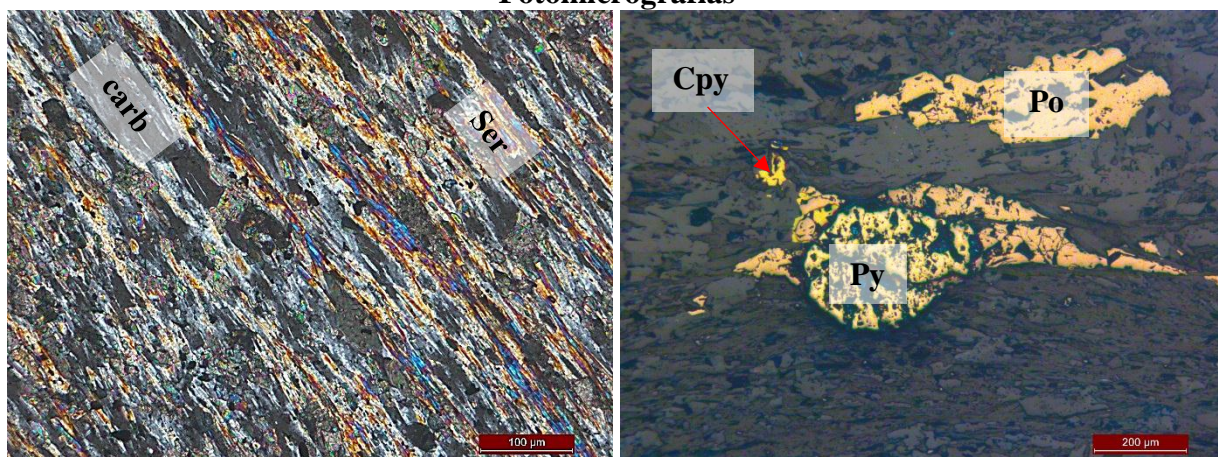
#### Descrição microscópica

Amostra com textura porfiroblástica constituída por clorita (60%), carbonato (30%), quartzo e sericita. A clorita (chl) é fina a muito fina, ocorre formando uma clivagem contínua e anastomosada (S2), contornando o carbonato (carb). O carbonato ocorre como poiquiloblastos de granulometria fina ( $< 800 \mu\text{m}$ ), a maioria possui habito anédrico, porém notam-se alguns euédricos, possui formato sigmoidal, estão estirados segundo a clivagem, apresentam extinção ondulante. O quartzo é granoblástico, ocorrem tanto em meio a rocha como em vênulas, possui granulometria fina ( $< 200 \mu\text{m}$ ), habito euédrico a anédrico, com bordas poligonais ou contato interlobados. A sericita está orientada segundo a clivagem, tem habito lamelar, granulometria fina ( $< 100 \mu\text{m}$ ) e bordas retas. Opacos ocorrem como minerais acessórios, são principalmente pirita, titanita e calcopirita, possuem granulometria muito fina, podem ocorrer associados ao carbonato ou a clorita.



N15\_AM - 01

**Fotomicrografias**



**Estimativa mineralógica (%)**

Transparentes	Opacos (2 %)
60 Muscovita	Pirrotita
38 Carbonato	Calcopirita
	Titanita

**Nome da rocha:** carbonato-muscovita xisto com pirrotita e calcopirita, zona proximal

**Descrição microscópica**

Corte paralelo a lineação mineral.

Rocha com texturas lepidoblástica e nematoblástica formada principalmente pela orientação de muscovita (sericita) e carbonato (carb), além de minerais opacos. Muscovita representa 60% da rocha é muito fina e lamelar. Carbonato perfaz 40% da amostra, possui granulação fina a média, os mais finos são anédricos a subédricos com bordas angulosas, possuem extinção ondulante, ocorrem orientados e estirados segundo a clivagem. Os carbonatos mais grossos são calcita caracterizadas pela clivagem, euédricos a subédricos com bordas angulosas com textura granoblástica. Pirrotita, calcopirita e titanita são encontrados como minerais opacos que compõem menos de 2% da rocha. Os sulfetos são notados principalmente associados as calcitas e possuem inclusões de muscovita e carbonato. A pirrotita é anédrica, granulação fina a média, com bordas interlobadas, pode ocorrer alinhada segundo a clivagem ou não. Sobrecrescida na pirrotita ou livre na matriz da rocha a calcopirita possui granulação fina, anédrica, com bordas interlobadas ou com hábito circular. Titânica é muito fina e ocorre em filões concordantes com a clivagem. Um sigmoide de pirrotita indica movimento dextral.

**N15\_AM - 02****Estimativa mineralógica (%)**

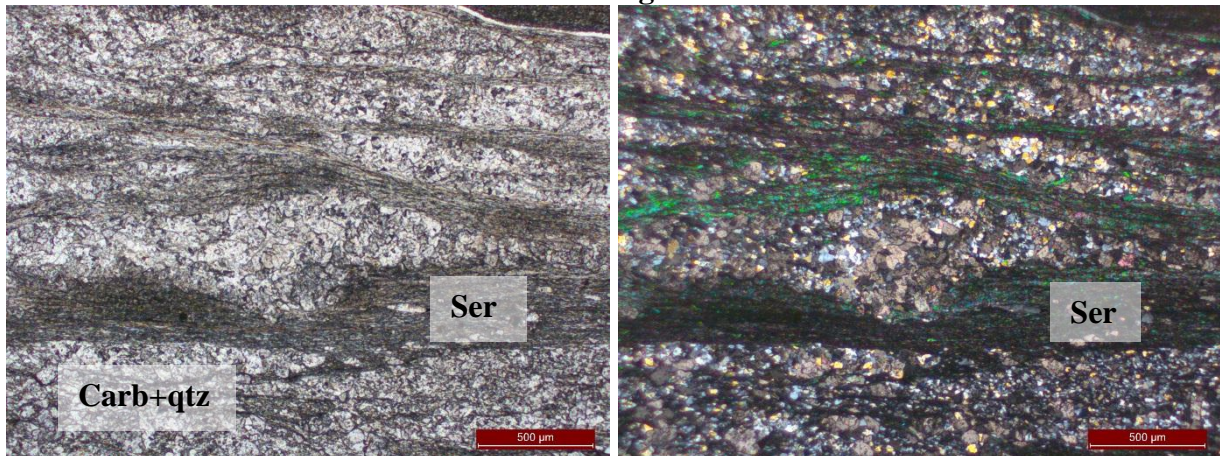
<b>Transparentes</b>	<b>Opacos (5%)</b>
60 Carbonato	Pirrotita
25 Sericita	Calcopirita
10 Quartzo	Titanita

**Nome da rocha:** Quartzo-sericita-carbonato xisto, zona intermediária

**Descrição microscópica**

Rocha com textura nematoblástica e lepidoblástica formada pela orientação de carbonato, quartzo e muscovita (sericita). Carbonato possui granulação muito fina a fina, anédrico a subédrico, com contatos interlobados a angulares, alguns com extinção ondulante, são notados raros poiquiloblastos de carbonato rodeados pela muscovita. A muscovita é muito fina (sericita) lamelar, orientada segundo a clivagem, localmente nota-se uma foliação anamostossada. O quartzo ocorre associado ao carbonato, com cristais anédricos a subédricos, possui bordas angulosas a interlobadas, granulação muito fina a fina, apresentam extinção ondulante. Pirroita, calcopirita e titânina são minerais opacos. A pirrotita é fina a grossa, anédrica a subédrica, com bordas interlobadas a angulares, quando fina ocorre orientada segundo a clivagem, quando grossa não possui orientação preferencial e ocorre associada ao carbonato e quartzo também mais grossos. Normalmente a calcopirita está sobrecrescida na pirrotita, mas também pode ocorrer livre na matriz, possui granulação fina, habito anédrico, podendo ser circular ou angulosa. A titanita é muito fina e ocorre em estreitos filões concordantes com a clivagem.

**Fotomicrografias**



**Estimativa mineralógica (%)**

Transparentes	Opacos (1%)
50 Carbonato	Pirita
40 Sericita	Titanita
10 Quartzo	Calcopirita, esfalerita e pirrotita

**Nome da rocha:** Quartzo-sericita-carbonato xisto, zona intermediária

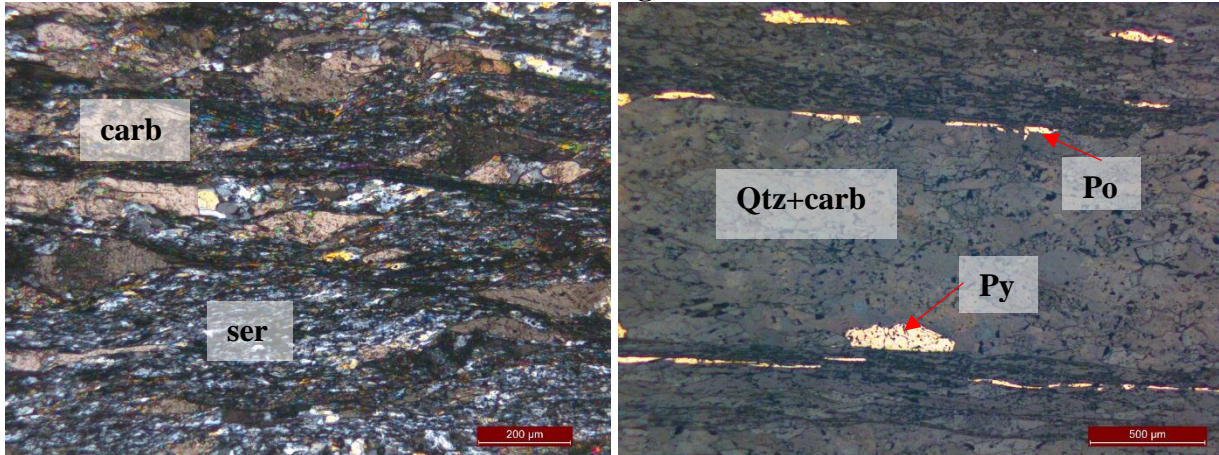
**Descrição microscópica**

Corte paralelo a lineação mineral.

Rocha com textura nematoblástica e lepidoblástica caracterizada pela orientação de quartzo (qtz), carbonatos (carb) e muscovita (ser), nota-se uma clivagem contínua com aspecto anastomosada, onde a muscovita contorna os domínios quartzo-carbonáticos. Notam-se duas clivagens, a primeira é uma xistosidade espaçada (S1) onde o domínio do microlitons é composto por quartzo e carbonato finos e o domínio da clivagem por muscovita (sericita). A segunda é uma clivagem contínua (S2), porém discreta notada pela orientação de carbonato mais grossos e muscovita (sericita). A geometria entre as duas foliações indica uma vorticidade dextral. Os opacos são pirrotita, pirita, calcopirita além de titanita e esfarelita. Pirita é muito fina a fina pode estar orientada e estirada segundo a foliação S1 em cristais alongados e anédricos, quando euédrica está dispersa na matriz. A pirrotita é muito fina a média, as mais grossas são anédricas poiquiloblásticas com inclusões de carbonato e muscovita, ocorrem associadas a calcita. Nota-se calcopirita e esfarelita crescidas nas bordas da pirrotita. Calcopirita também é observada dispersa na matriz. Finas trilhas de titanita são notadas alinhadas segundo a foliação S1.



**Fotomicrografias**



**Estimativa mineralógica (%)**

Transparentes	Opacos
60 Sericita	Pirita
30 Carbonato	Esfarelita
10 Quartzo	Titanita, pirrotita

**Nome da rocha:** quartzo-carbonato-sericita xisto, zona proximal

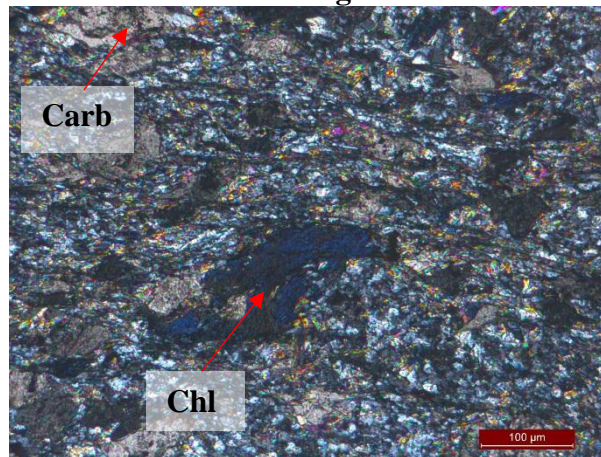
**Descrição microscópica**

Corte paralelo a lineação mineral.

Rocha com textura lepidoblástica e nematoblástica marcada pela orientação de sericita (sericita), carbonato e quartzo. Observa-se principalmente uma clivagem disjuntiva com domínios de microlitons compostos por quartzo e carbonato e os domínios da clivagem por sericita, morfologicamente é uma clivagem lisa (smooth), paralela e discreta, onde os domínios da clivagem compõe 70% da rocha. Sigmoides de carbonato indicam movimentação tanto sinistral como dextral, foliação SC mostra movimento dextral. Notam-se vênulas quartzo-carbonáticas subparalela a cliavagem (V2), onde os cristais são mais grossos em relação a matriz e orientados paralelamente a parede do veio. No veio o quartzo possui extinção ondulante e formação de subgrãos, granulação fina com bordas interlobadas, textura granoblástica geralmente é límpido (quartzo leitoso). O carbonato possui granulação média, subédrico a euédrico, com contatos retos e angulosos, podem ocorrer tanto orientados ou não conforme a parede do veio. Opacos são encontrados como minerais acessórios, pirita ocorre principalmente no domínio da clivagem, está orientada e estirada paralelamente a sericita, possui granulação fina habito lamelar com bordas retas, também é observada em cristais euédricos, finos, dispersos na matriz. Esfarelita é notada em um cristal também orientado e alongado segundo a clivagem, é mais grossa que a pirita.

N15\_AM - 05

Fotomicrografias



Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (-1%)
60 Carbonato	Pirita
30 Quartzo	Calcopirita
5 Clorita	Pirrotita
5 Sericita	Titanita

**Nome da rocha:** clorita-sericita-quartzo-carbonato xisto, zona intermediária

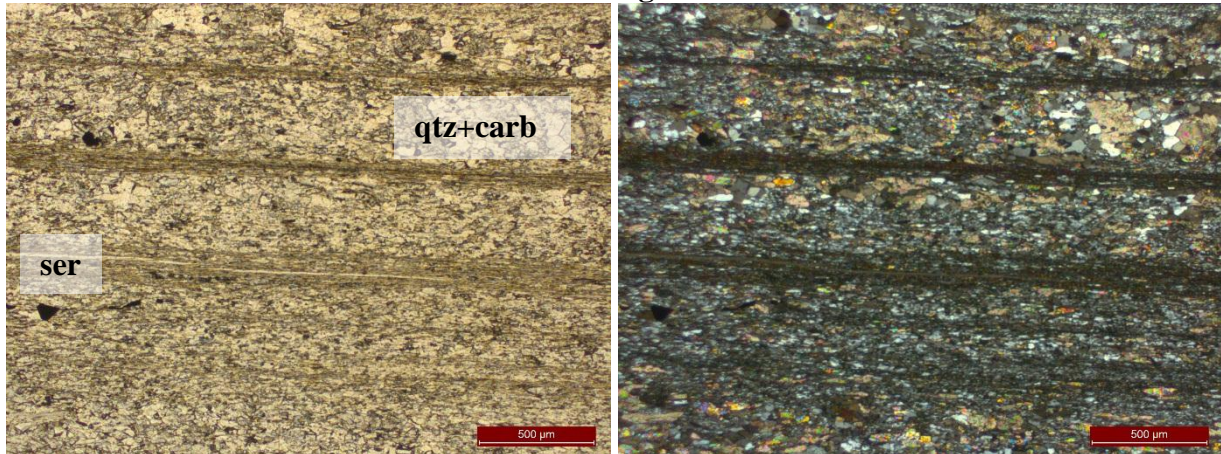
Descrição microscópica

Corte perpendicular a lineação mineral.

Rocha com textura lepidoblástica e nematoblástica caracterizada pela orientação de carbonato, quartzo e sericita. Carbonato (carb) é o principal mineral constituinte da amostra, ocorre em cristais de granulação fina a média, habito anédrico a subédrico com bordas irregulares, angulosas e serrilhadas, nos mais grossos nota-se extinção ondulante. De granulação fina a muito fina o quartzo (qtz) ocorre associado ao carbonato no domínio dos microlintons, possui habito anédrico com bordas interlobadas a poligonais, observa-se extinção ondulante e formação de subgrãos. A clorita (chl) possui granulação muito fina a fina, habito anédrico, ocorre tanto no domínio da clivagem como nos microlintons. A sericita marca o domínio da clivagem, é de granulação muito fina (sericita) e habito lamelar. Os opacos são representados por pirita, calcopirita, pirrotita e titanita. A pirita é fina, euédrica a subédrica com contados angulosos e retos, pode ocorrer estirada e alinhada segundo a clivagem ou dispersa na matriz em cristais euédricos. A calcopirita ocorre associada a pirita em cristais muito fino, anédrico, bordas interlobadas em contato reto e angular. A pirrotita é muito fina, está alinhada e orientada segundo a clivagem, anédrica com bordas interlobadas. Em finas trilhas concordantes com a clivagem a titanita possui habito circular e granulação muito fina.

N15\_AM - 06

Fotomicrografias



Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos (-1%)
40 Sericita	Pirita
40 Carbonato	Pirita arsenical
20 Quartzo	Pirrotita
	Calcopirita e titanita

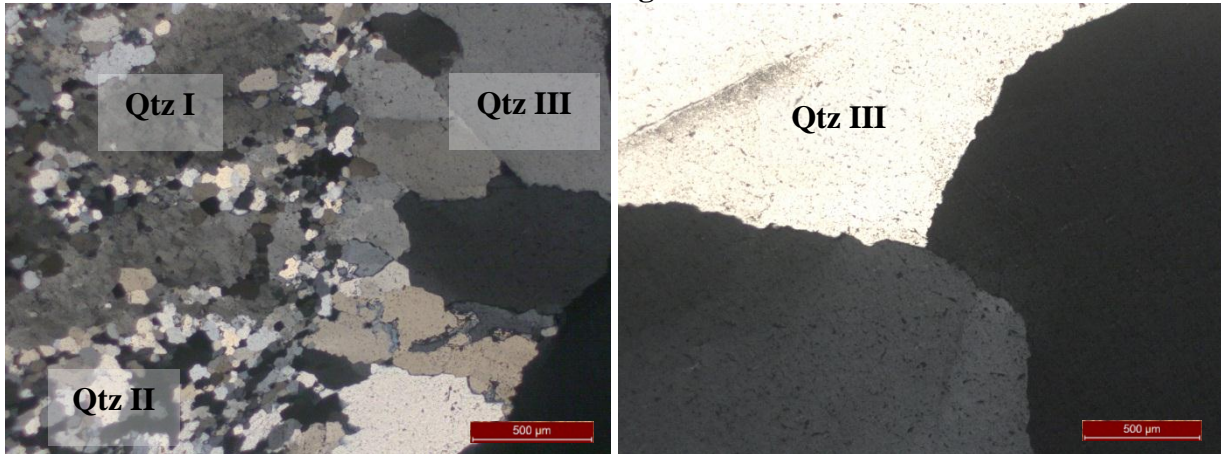
**Nome da rocha:** quartzo-carbonato-sericita xisto, zona proximal

Descrição microscópica

Rocha com textura nematoblástica marcada pela orientação de carbonato (carb) e quartzo (qtz), textura lepidoblástica caracterizada pela sericita (ser). Estruturalmente apresenta uma xistosidade espaçada, disjuntiva e zonada, morfologicamente é paralela e suave (smooth) onde a transição para o domínio de microlitons é gradacional. Os cristais de quartzo e carbonato também estão estirados segundo a clivagem e não se observa indícios de rotação. A sericita é muito fina em habito lamelar. O carbonato possui granulação fina a média, os mais finos estão estirados e orientados no domínio da clivagem, possuem habito subédrico com bordas retas e angulosas. Enquanto os mais grossos possuem textura granoblástica, com habito euédrico a subédrico, podendo estar concordantes os discordantes da clivagem. O quartzo apresenta granulação fina a muito fina, habito anédrico cor contatos interlobados ou poligonais, nos mais grossos nota-se extinção ondulante e geração de subgrãos. Os opacos ocorrem como minerais acessórios estão orientados e estirados segundo a clivagem, pirita e pirrotita são os mais abundantes, ocorrem principalmente no domínio da clivagem ou na transição para os microlitons. Possuem granulação fina a média, a pirita é límpida com bordas retas e angulosas, a pirrotita possui inclusões de carbonato e mica. A calcopirita ocorre principalmente associada a pirrotita e a titanita em finas trilhas ao longo da clivagem.



Fotomicrografias



Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
100 Quartzo	

Nome da rocha: veio de quartzo, V3.

Descrição microscópica

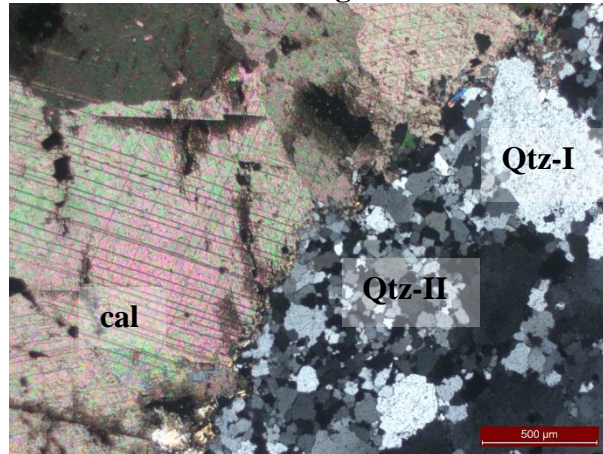
Amostra composta somente por quartzo, notam-se três tipos diferentes de cristais de quartzo. O mais abundante é um quartzo fino (tipo II), granoblástico, poligonal com bordas angulosas a interlobadas. Ocorre associado a um quartzo (tipo I) de granulação média a grossa, rico em inclusões, com extinção ondulante e surgimento de subgrãos, possui bordas serrilhadas a interlobadas e hábito anédrico.

O terceiro quartzo (tipo III) ocorre desassociado dos outros dois em contato brusco. É um quartzo muito grosso, com cristais centimétricos, possui bordas retas, contatos serrilhados, hábito euédrico a subédrico. Extinção ondulante é muito fraca a ausente e apresenta textura mais límpida em relação aos outros dois.

Quartzo tipo I e o quartzo tipo II ocorrem associadas sugerindo que o segundo seja produto da recristalização do primeiro, pois é possível notar o surgimento de novos grãos a partir do quartzo tipo I e o tipo II comumente bordeja o tipo I. Separadamente, o quartzo tipo III ocorre em contato brusco, em relação aos outros dois, onde os cristais estão crescidos perpendicularmente ao contato.

N15\_AM - 08

Fotomicrografias



Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
95 Quartzo	
5 Calcita	

**Nome da rocha:** veio de quartzo com vênula de calcita (V2)

Descrição microscópica

Amostra composta por 95% de quartzo (qtz), 5% de calcita (cal) além de opacos como acessório. Observam-se dois tipos de quartzo, o mais abundante possui granulação fina, textura granoblástica, habito poligonal com contatos angulosos a interlobados e aparência límpida (Qtz-II).

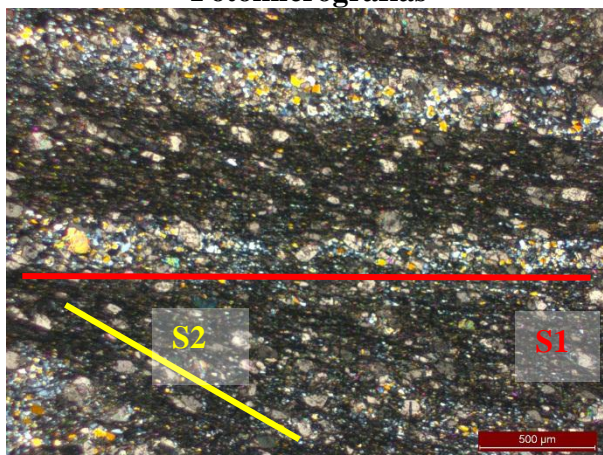
O segundo quartzo mais abundante tem granulação média a grossa, com extinção ondulante e aparecimento de subgrãos, possui bordas serrilhadas e interlobadas com habito anédrico e inclusões (Qtz-I).

No meio da lâmina ocorre uma vênula de calcita com cristais grossos de habito euédrico a subédrico, clivagem bem marcada. O contato entre os cristais de calcita é reto a ângulos, porém com os cristais de quartzo é irregular.

Associada a vênulas de calcita ocorrem cristais de pirita com granulação muito fina a grossa, habito euédrico a subédrico, as mais grossas são porosas e as mais finas ocorrem inclusas no carbonato. Um cristal anédrico de calcopirita ocorre associado a pirita inclusa na calcita.

N15\_AM – 09B

**Fotomicrografias**



**Estimativa mineralógica (%)**

<b>Transparentes</b>	<b>Opacos</b>
Carbonato	
Clorita	
Quarto	
Sericita	

**Nome da rocha:** clorita-sericita-quartzo-carbonato xisto, zona intermediária

**Descrição microscópica**

Corte perpendicular a lineação mineral

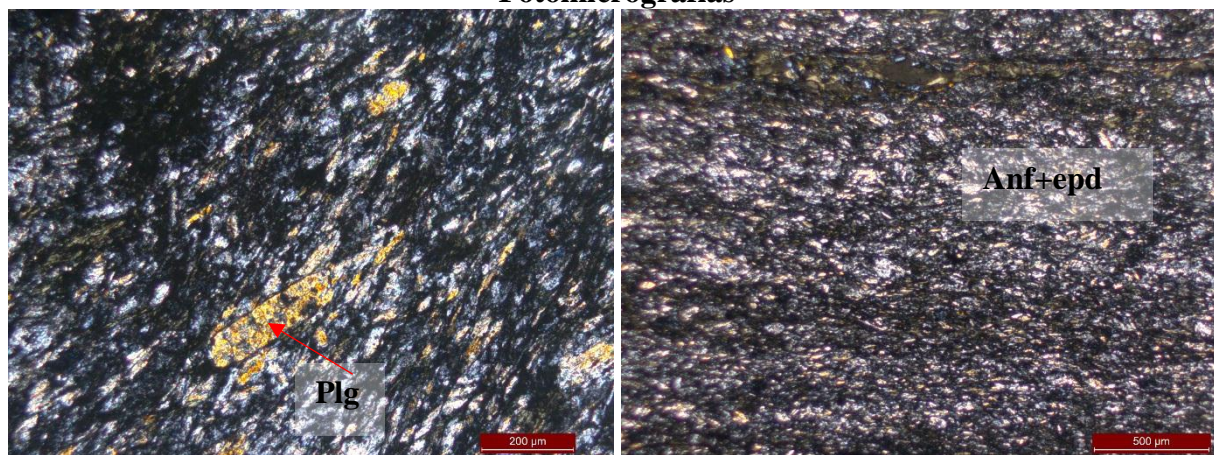
Foliação S1 é marcada por alternância de minerais filossilicatos com minerais prismáticos, é uma clivagem espaçada com o domínio da clivagem composto por sericita e clorita subordinada, o domínio do microlitons é formado por carbonato e quartzo; espaçamento de 250 a 500 microns, morfologicamente suave a reta com transição gradacional entre o domínio da clivagem e microlitons. Foliação S2 é composta por sericita, clorita e carbonato, é uma clivagem espaçada, anastomosada onde os filossilicatos contornam os carbonatos, com espaçamento menor que 100 microns e forma suavizada (ondulada).

Na lâmina A indicadores cineméticos, sigmoides de carbonato, indicam transporte tectônico de SE para NW.



N15\_AM-13

Fotomicrografias



Estimativa mineralógica (%)

Transparentes	Opacos
Anfibólio	
Epidoto	
Clorita	
Plagioclásio	

Nome da rocha: meta-andesito

Descrição microscópica

Rocha de granulometria muito fina composta por anfibólio (anf), epidoto (epd), plagioclásio (plg), clorita e turmalina, maciça a localmente foliada. Sarrafos de plagioclásio ocorrem entremeados de anfibólio, fenocristais de plagioclásio. Textura traquitica.

Foliação é marcada principalmente pela orientação do anfibólio e epidoto, é uma clivagem contínua. Vênulas de clorita e turmalina ocorrem concordantes a clivagem, espessura menor que 500 microns.

### **ANEXO III**

## **TABELAS E GRÁFICOS OBTIDOS PELO MLA**

### Mineralogia global veios de quartzo

Mineral	150um	75um	45um	<45um	Global
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Low_Counts	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No_XRay	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Quartz	42.44	49.83	40.28	24.71	40.11
Electrum	2.09	3.92	4.00	1.60	2.64
Native_Gold	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ankerite	13.50	13.37	18.46	34.96	18.12
Rutile	0.18	0.18	0.12	0.43	0.21
Muscovite	12.76	5.84	2.95	5.21	8.55
Apatite	0.12	0.13	0.03	0.26	0.13
Monazite	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01
Galena	0.08	0.04	1.01	3.16	0.78
Arsenopyrite	0.25	0.71	1.26	1.43	0.71
Pyrite	21.14	17.79	24.65	17.61	20.67
Pyrrhotite	0.64	1.82	2.74	3.10	1.64
Chalcopyrite	0.09	0.03	0.02	0.17	0.08
Sphalerite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sphalerite with mediumFe	0.06	0.11	0.03	0.02	0.06
Chlorite	0.70	0.82	0.65	0.94	0.75
Albite	5.83	5.04	3.15	4.03	4.89
(Co,Ni,Fe) <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S	0.02	0.02	0.15	0.81	0.18
Scheelite	0.01	0.00	0.01	0.08	0.02
Anfibolios	0.03	0.32	0.38	1.08	0.32
<b>Liga Fe-Cr</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>0.17</b>	<b>0.03</b>
<b>Pentlandite</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>0.08</b>	<b>0.02</b>
<b>Ullmannite</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>
<b>Oxidos Fe</b>	<b>0.03</b>	<b>0.01</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.04</b>
<b>Bolhas</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
<b>Zircon</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>

### Mineralogia global rocha encaixante

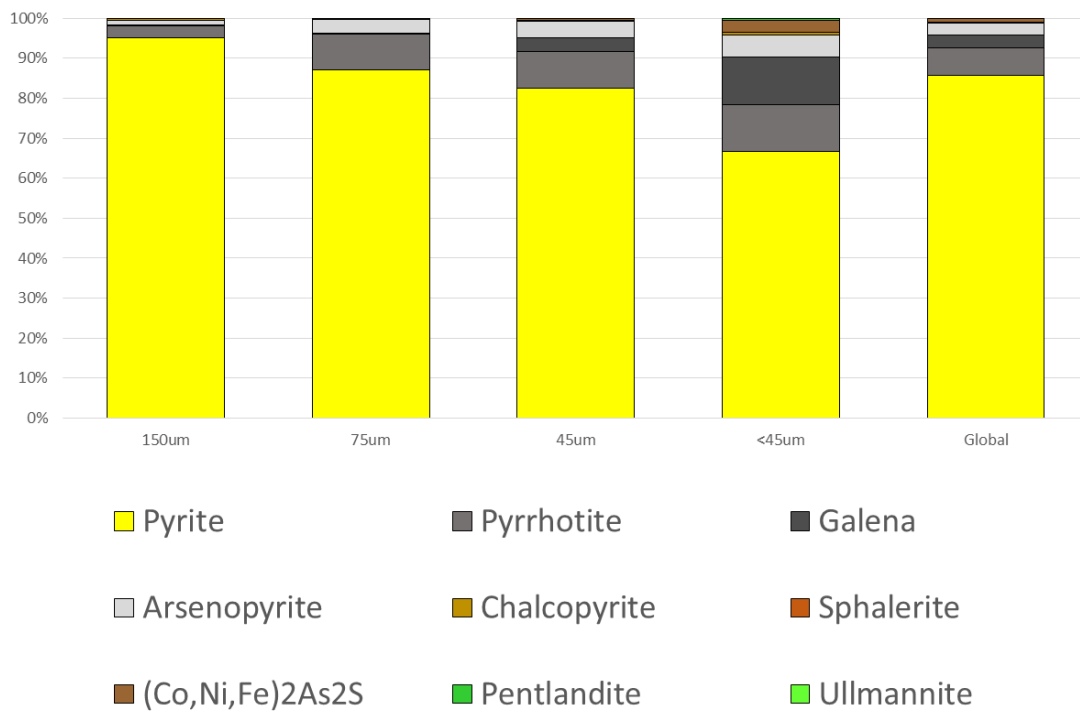
<b>Mineral</b>	<b>150um</b>	<b>75um</b>	<b>45um</b>	<b>&lt;45um</b>	<b>Global</b>
Unknown	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Low_Counts	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
No_XRay	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Quartz	20.55	31.18	29.18	21.87	24.23
Electrum	0.09	1.11	2.92	1.38	1.12
Native_Gold	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ankerite	17.24	19.41	28.39	35.05	25.06
Rutile	0.27	0.16	0.14	0.60	0.34
Muscovite	25.81	10.94	6.45	12.65	15.92
Apatite	0.11	0.08	0.14	0.19	0.13
Monazite	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02
Galena	0.12	0.17	0.90	1.97	0.84
Arsenopyrite	0.00	0.00	0.22	0.49	0.19
Pyrite	15.31	23.88	21.31	10.78	16.32
Pyrrhotite	0.90	2.38	2.19	1.68	1.62
Chalcopyrite	0.03	0.08	0.14	0.13	0.09
Sphalerite	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sphalerite with mediumFe	0.00	0.00	0.06	0.12	0.05
Chlorite	5.20	2.05	1.75	2.40	3.20
Albite	13.82	7.82	4.92	7.40	9.31
(Co,Ni,Fe) <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S	0.02	0.01	0.21	1.10	0.39
Scheelite	0.40	0.46	0.84	1.40	0.80
Anfibolios	0.13	0.10	0.16	0.48	0.24
Liga Fe-Cr	0.00	0.01	0.01	0.06	0.02
Pentlandite	0.00	0.00	0.01	0.13	0.04
Ullmannite	0.00	0.00	0.05	0.04	0.02
Oxidos Fe	0.00	0.11	0.01	0.04	0.04
Bolhas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zircon	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01





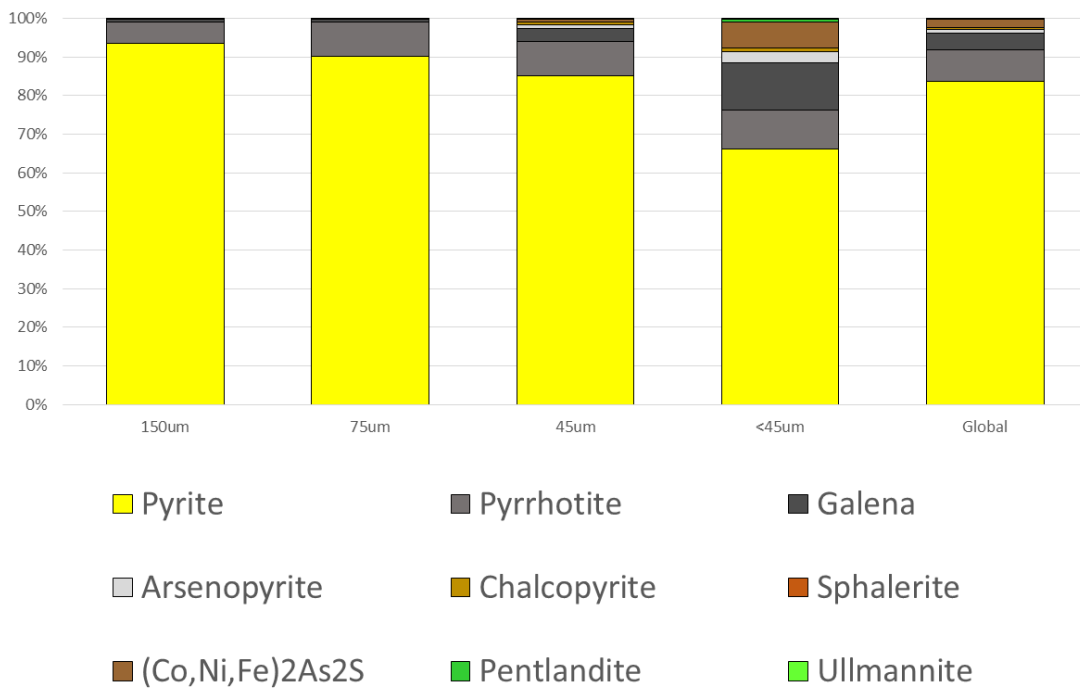
Porcentagem de sulfetos por faixa granulométrica

Veio de quartzo

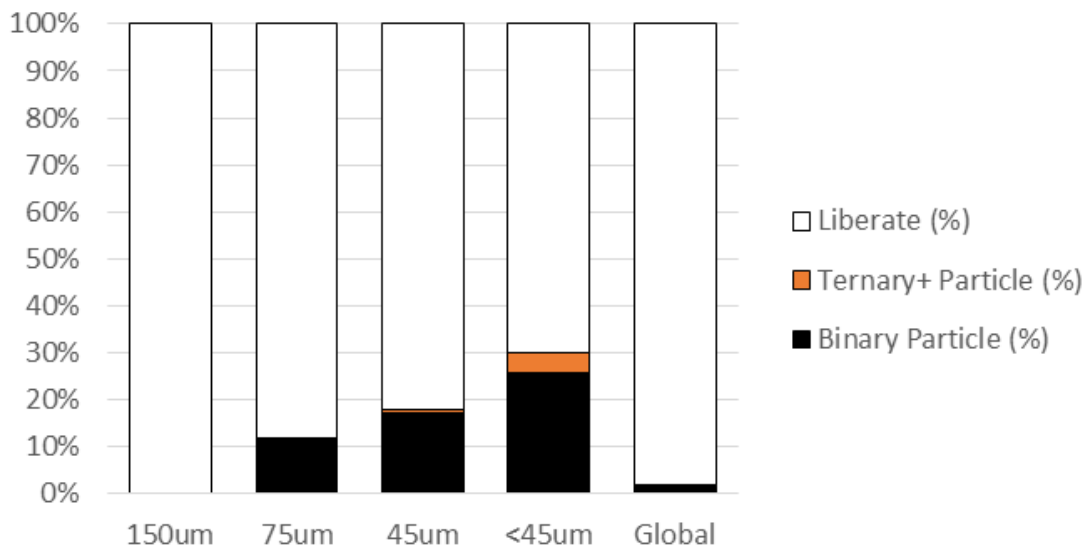


Porcentagem de sulfetos por faixa granulométrica

Rocha encaixante



### Associação dos grãos de ouro- Veio de quartzo



### Associação dos grãos de ouro - Rocha encaixante

