



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DE QUÍMICA MINERAL DO MINÉRIO EM
NÍVEIS INFERIORES DOS CORPOS FONTE GRANDE SUL E SERROTINHO DA MINA
CUIABÁ, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**

Carolina Gontijo Bernardes Silva

MONOGRAFIA nº 430

Ouro Preto, maio de 2022

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DE QUÍMICA
MINERAL DO MINÉRIO EM NÍVEIS INFERIORES DOS
CORPOS FONTE GRANDE SUL E SERROTINHO DA MINA
CUIABÁ, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 430

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E DE QUÍMICA MINERAL DO MINÉRIO EM NÍVEIS INFERIORES DOS CORPOS FONTE GRANDE SUL E SERROTINHO DA MINA CUIABÁ, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS

Carolina Gontijo Bernardes Silva

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Gláucia Nascimento Queiroga

Co-Orientador

Suellen Olívia Cândida Pinto

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 430, ano 2022/1

OURO PRETO

2022

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Carolina Gontijo Bernardes Silva

**Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

5586c Silva, Carolina Gontijo Bernardes.
Caracterização petrográfica e de química mineral do minério em níveis inferiores dos corpos Fonte Grande Sul e Serrotinho da Mina Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. [manuscrito] / Carolina Gontijo Bernardes Silva. - 2022.
65 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Gláucia Nascimento Queiroga.
Coorientadora: Suellen Olívia Cândida Pinto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Petrologia. 2. Sedimentação e depósitos. 3. Ouro - Minas e mineração. 4. Sulfetos. I. Pinto, Suellen Olívia Cândida. II. Queiroga, Gláucia Nascimento. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 552.313

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Caracterização petrográfica e de química mineral do minério em níveis inferiores dos corpos Fonte Grande Sul e Serrotinho da Mina Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais

AUTORA: CAROLINA GONTIJO BERNARDES SILVA

ORIENTADORA: Gláucia Nascimento Queiroga

Aprovada em: 27 de maio de 2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr^a. Gláucia Nascimento Queiroga Gláucia N. Queiroga DEGEO/UFOP

Prof. MSc. Edison Tazava Edison Tazava DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Gustavo H. Coelho de Melo Gustavo H. Coelho de Melo DEGEO/UFOP

Geól. Raphael do Carmo Fernandes Raphael do Carmo Fernandes ANGLOGOLD ASHANTI

Ouro Preto, 26/05/2022

Agradecimentos

Agradeço à Deus primeiramente, sem Ele nada seria possível.

Agradeço à minha orientadora Gláucia Queiroga pela ajuda, orientação e conselhos.

Agradeço à AngloGold Ashanti pela confiança e pelo tema do projeto a ser estudado, em especial à Suellen Olívia e ao João Canela.

Agradeço ao laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do Departamento de Geologia (DEGEO) da UFOP pelas análises que muito acrescentaram ao trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público e de qualidade.

Agradeço aos familiares e amigos pelo apoio e torcida.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
RESUMO	xv
1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 APRESENTAÇÃO.....	19
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	20
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.4 JUSTIFICATIVA	20
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
1.5.1 Revisão bibliográfica	21
1.5.2 Amostragem	21
1.5.3 Trabalhos de laboratório.....	22
1.5.3.1 Petrografia Macroscópica	22
1.5.3.2 Química Mineral	23
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	24
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO	24
2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO	25
2.2.1 Apresentação	25
2.2.2 Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero	28
3 ESTADO DA ARTE: GEOLOGIA DA MINA CUIABÁ	32
3.1 HISTÓRICO.....	32
3.2 MINERALIZAÇÃO DO OURO.....	32
3.3 GEOLOGIA DA MINA CUIABÁ.....	34
4 RESULTADOS.....	41
4.1 DESCRIÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA DAS AMOSTRAS E ESTUDOS DO SULFETO	41
4.1.1 Pirita	42
4.1.2.Pirrotita.....	44
4.1.3Arsenopirita.....	45
4.1.4 Calcopirita	46
4.1.5 Esfalerita.....	48
4.2 QUÍMICA MINERAL DE SULFETOS.....	48
4.2.1 Pirita	49

4.2.2.Pirrotita	51
4.2.3Arsenopirita	52
4.2.4 Calcopirita.....	54
4.2.5 Esfalerita.....	55
5 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização e acesso à Mina	21
Figura 2.1 - Vista do corpo Fonte Grande Sul e Serrotinho.....	23
Figura 2.2 -Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.....	26
Figura 2.3 -Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero... ..	27
Figura 3.1 -Coluna da Mina Cuiabá	37
Figura 3.2 - Representação da dobra tubular.....	38
Figura 3.3 -Mapa da Mina Cuiabá e interpretação do modelo.	39
Figura 3.4 -Seção em planta do nível 11	40
Figura 4.1 -Perfil geológico dos furos FGSBUD0449 e FGSBUD0440.	41
Figura 4.2 -Foto amostras da formação ferrífera bandada	42
Figura 4.3 -Fotomicrografia da formação ferrífera bandada.....	42
Figura 4.4 - Imagem elétrons retroespalhados	43
Figura 4.5 -Fotomicrografia com luz refletida	44
Figura 4.6 - Imagem elétrons retroespalhados	44
Figura 4.7 - Fotomicrografia com luz refletida	45
Figura 4.8 - Imagem com elétrons retroespalhados.....	46
Figura 4.9 - Imagem com luz refletida	47
Figura 4.10 - Imagem com luz refletida	48
Figura 4.11 - Imagem com elétrons retroespalhados.....	48
Figura 4.12 - Imagem com luz refletida	49
Figura 4.13 - Distribuição dos elementos Fe e S.....	52
Figura 4.14 - Distribuição dos elementos Fe e S.....	52
Figura 4.15 - Distribuição dos elementos Fe,S e As	55
Figura 4.16 -Distribuição dos elementos Fe, S e Cu	56
Figura 4.17 Distribuição dos elementos Fe, S e Zn.....	57
Figura 4.18 -Mapa geoquímico	58
Figura 4.19 -Mapa geoquímico	59
Figura 4.20 -Mapa geoquímico	60
Figura 5.1 -Organograma final	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados de amostragem dos corpos mineralizados.....	24
Tabela 2.2 - Síntese evolução do QF	29
Tabela 4.1 -Resultados de análise de química mineral em cristais de pirita na BIF.....	50
Tabela 4.2 - Resultados de análise de química mineral em cristais de pirrotita na BIF	52
Tabela 4.3 - Resultados de análise de química mineral em cristais de arsenopirita na BIF	54
Tabela 4.4 - Resultados de análise de química mineral em cristais de calcopirita na BIF.	56
Tabela 4.5 - Resultados de análise de química mineral em cristais de esfalerita na BIF...	57

Resumo

A Mina Cuiabá está localizada na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), a sul do Cráton São Francisco. Na região afloram rochas pertencentes ao *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, e uma associação de rochas máfico-ultramáficas vulcânicas, vulcânica-química-sedimentar e clástica-química-sedimentar. Os depósitos auríferos são estruturalmente controlados e associados aos halos de alteração hidrotermal e o minério está associado às formações ferríferas bandadas (BIF- *Banded Iron Formation*). Este trabalho de TCC realizou um estudo macro e microscópico e de química mineral de quatro amostras de formação ferrífera bandada do nível 21 da Mina Cuiabá - Fonte Grande Sul (FGS) e Serrotinho (SER). Trata-se de amostras bandadas, com bandas centimétricas leucocráticas compostas por quartzo, carbonato e clorita, com sericita subordinada; e bandas sulfetadas compostas, em ordem decrescente de abundância por pirita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita e esfalerita. Texturalmente os sulfetos mostram hábito subédrico a euédrico, tendo inclusões frequentes dos próprios sulfetos e de alguns silicatos. As análises químicas realizadas via EDS demonstraram grande homogeneidade na distribuição dos elementos principais dos sulfetos – Fe, S, Cu, As, Zn, mostrando que eles incorporaram elementos traços em sua estrutura cristalina. O mesmo padrão de comportamento já havia sido reportado no trabalho de Kresse *et al.* (2018). Esse trabalho demonstrou, inclusive, cinco gerações de pirita por meio da análise textural. Neste TCC identificamos que os cristais de pirita são límpidos e mais lisos, mas não conseguimos determinar à qual geração elas pertencem (se 2^a, 3^a, 4^a ou 5^a). Em Kresse *et al.* (2018) também há um detalhamento químico importante dos sulfetos, utilizando métodos distintos e mais robustos. Os autores trabalham com dados de Co e com a razão Co/Ni, especialmente útil para caracterizar piritas em rochas carbonáceas, que não é o caso deste TCC. Finalizando o trabalho, sugerimos aqui algumas hipóteses que podem ter levado à uma mudança qualitativa do minério da Mina Cuiabá, sempre tendo o cuidado de sugerir novos trabalhos com uma amostragem mais robusta e com análises petrográficas e microquímicas comparativas com os níveis superiores da mina. Assim, pode-se argumentar que os elementos traços incorporados na estrutura cristalina dos principais sulfetos, a presença de inclusões e/ou sobrecrecimentos de calcopirita e esfalerita e a presença de uma quantidade razoável de arsenopirita e/ou pirita rica em As podem explicar, em parte, os problemas geometalúrgicos.

Palavras chave: Quadrilátero Ferrífero, Mina Cuiabá, formação ferrífera bandada, sulfetos, petrografia, química mineral.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A Mina Cuiabá está localizada na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), a sul do Cráton São Francisco. Na região afloram rochas pertencentes ao *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, e uma associação de rochas máfico-ultramáficas vulcânicas, vulcânica-química-sedimentar e clástica-química-sedimentar (Baltazar & Zucchetti, 2007). Os depósitos auríferos são estruturalmente controlados e associados aos halos de alteração hidrotermal. Nos níveis subterrâneos da Mina Cuiabá, percebe-se que o minério está associado às formações ferríferas bandadas (BIF- *Banded Iron Formation*) do tipo Algoma. Ademais, o ouro está associado com diversos tipos de sulfeto, como, por exemplo, pirita, pirrotita, arsenopirita e calcopirita. O ouro livre encontrado está associado aos veios de quartzo fumê e leitoso e também aos veios carbonáticos.

A Mina Cuiabá é operada e gerenciada pela empresa AngloGold Ashanti Mineração Córrego do Sítio (AGA). Atualmente, as unidades nacionais da empresa AngloGold Ashanti são responsáveis por aproximadamente 15% de toda a produção de ouro no mundo, sendo que em 2020 o grupo produziu 476 mil onças de Au (aproximadamente 15 toneladas; <https://www.anglogoldashanti.com.br/negocios/ouro/>). As atividades da Mina Cuiabá datam do século 18, com prospecção em superfície, sendo que atualmente suas operações de lavra abrangem o nível 21, a uma profundidade aproximada de 1.400 metros. Estudos prévios na área de geometurgia indicam uma crescente concentração de elementos “contaminantes” no minério, tais como As, Co, Cu, Ni, Zn e Pb, afetando diretamente a etapa de beneficiamento e promovendo uma menor recuperação de ouro no final do processo. Diante deste contexto surge a proposta da presente monografia – realização de estudos petrográficos e microquímicos do minério.

O presente trabalho faz parte da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Este estudo é uma parceria empresa privada – instituição de ensino pública (AGA – UFOP), e está sendo realizado sob a orientação da professora Dra. Gláucia Nascimento Queiroga e co-orientação da Engenheira Geóloga Suellen Olívia Cândida Pinto, responsável pelo setor de Exploração Brownfields da Mina Cuiabá. Apoio laboratorial se deve ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMiC) do Departamento de Geologia (DEGEO) - UFOP.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A Mina Cuiabá encontra-se na região central do estado de Minas Gerais, junto ao limite do município de Sabará. Dista cerca de 35km de Belo Horizonte (Figura 1.1) sendo que o acesso é feito via terrestre através da BR-262.

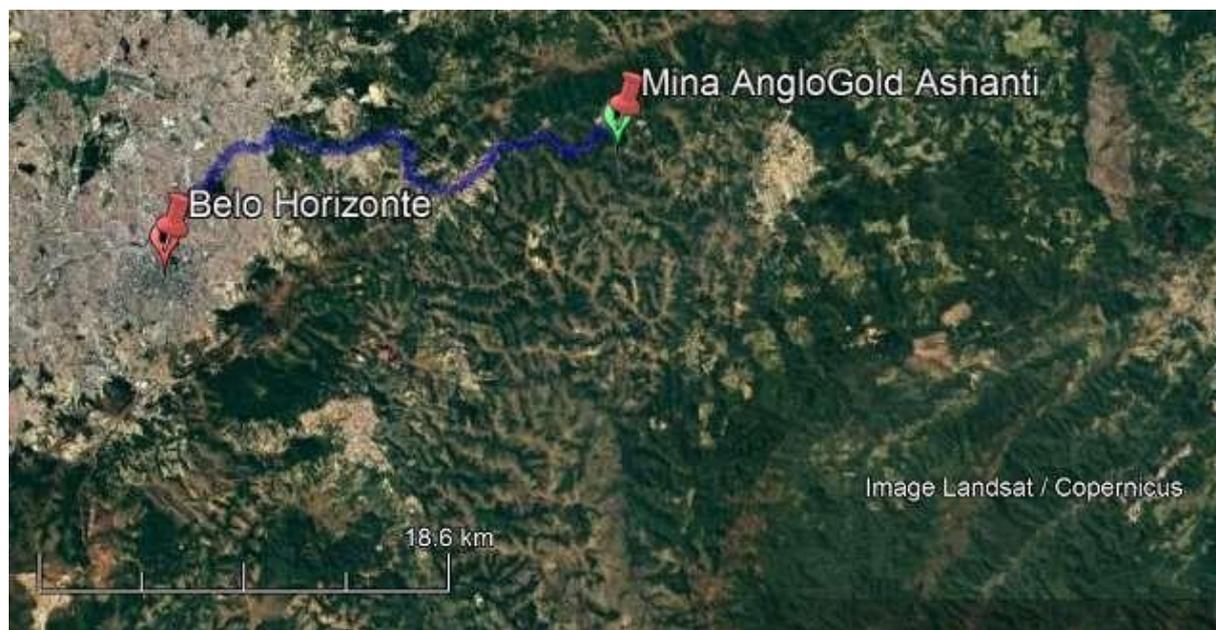


Figura 0.1 - Mapa de localização e acesso à Mina AngloGold Ashanti (Fonte: Google Maps, acesso em 12 de novembro de 2021).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a realização de um estudo macro e microscópico dos corpos mineralizados do nível 21 da Mina Cuiabá - Fonte Grande Sul (FGS) e Serrotinho (SER) - visando o detalhamento dos tipos de sulfetos e estruturas metamórfico-deformacionais. Aliado a essa caracterização, serão realizados estudos de química mineral via EDS (Espectroscopia por energia dispersiva), em microsonda eletrônica, para detalhar a composição dos principais minerais associados ao Au, bem como para verificar os principais tipos de zonamento químico, especialmente de Cu, Co, As, Ni, Zn e Pb, presentes em determinadas zonas sulfetadas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme anteriormente mencionado, a Mina Cuiabá opera atualmente no nível 21, a 1400 metros de profundidade. À medida que vem se aprofundando, os geólogos e engenheiros têm se deparado com problemas geometalúrgicos, com crescentes teores de As, Cu, Co, Ni, Zn e Pb no minério, dificultando

o processo final de beneficiamento. Tais efeitos trazem impactos diretos na porcentagem de recuperação de ouro no final do processo. Desta forma, surge o trabalho proposto, inédito para estes corposulfetados e que visa auxiliar na parte da *geometalurgia* da Mina, melhorando o processo de beneficiamento do minério com a identificação e quantificação dos principais “contaminantes” que dificultam tal processo.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no ano de 2021 e parte de 2022, enquanto a autora se encontrava em período de estágio pela empresa AGA, sob a supervisão do setor de Exploração Brownfields da Mina Cuiabá. O estudo foi realizado em quatro etapas: revisão bibliográfica, amostragem, trabalhos laboratoriais e tratamento de dados.

1.5.1 Revisão bibliográfica

Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica dos principais estudos que abrangem a Mina Cuiabá e o Quadrilátero Ferrífero. Aliados a isso, também foi feita uma contextualização dos modelos de mineralização de Au orogênico e um estudo sobre petrografia e composição química de fases sulfetadas. Foram utilizados como base, principalmente, os trabalhos realizados por Zucchetti & Baltazar (1996), Lobato (2001), Roncato Jr. *et al.* (2015), Vitorino (2017), Kresse *et al.* (2018), Castro *et al.* (2020), entre outros.

1.5.2 Amostragem

A amostragem realizada para o presente trabalho foi feita através de furos de sondagem rotativa diamantada, que compõe o plano de sondagem atual desenvolvido pela AGA. Foram consideradas amostras de testemunhos de rocha de dois furos de sondagem, com alvos definidos para os corpos FGS e SER (Tabela 1.1; Figura 1.2).

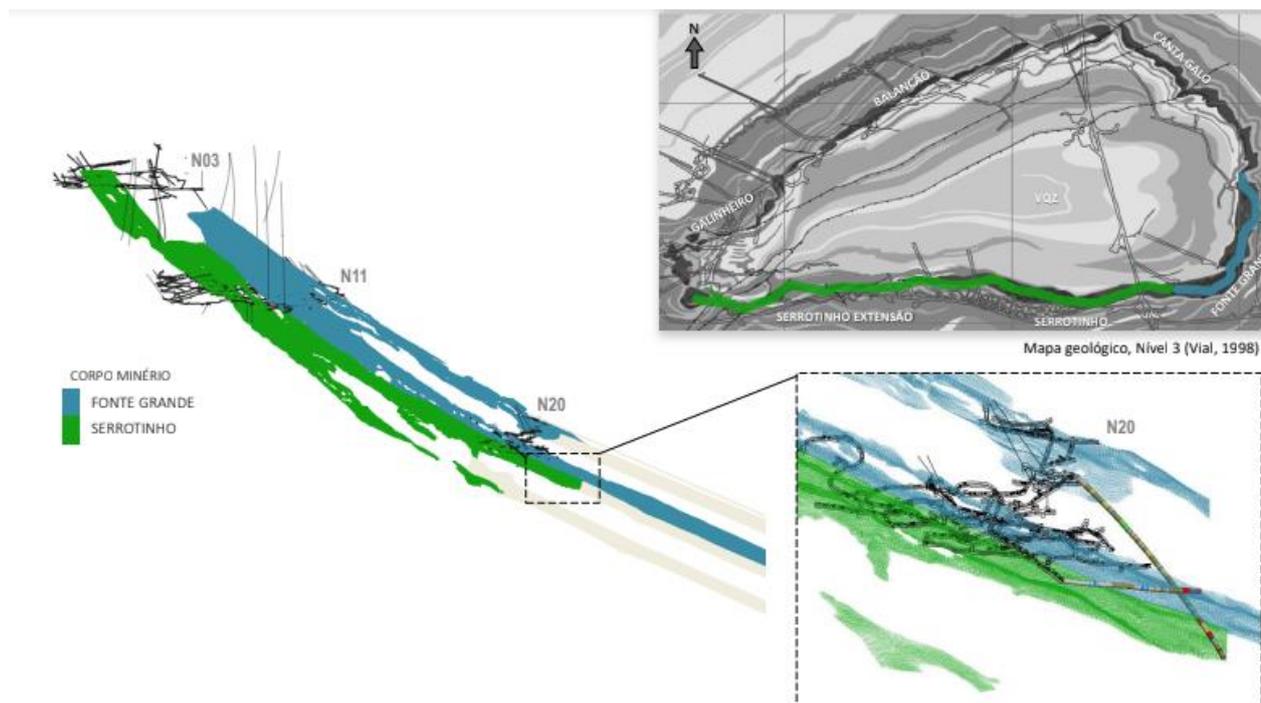


Figura 0.2 - Vista dos corpos Fonte Grande Sul e Serrotinho seus respectivos furos.

1.5.3 Trabalhos de Laboratório

Esta etapa consistiu na descrição microscópica das lâminas e também na obtenção dos dados de química mineral.

1.5.3.1 Petrografia Macroscópica

Estudos petrográficos em lâminas delgadas confeccionadas a partir das amostras coletadas (vide Tabela 1.1) foram realizados em microscópio petrográfico binocular modelo LEICA. As descrições tiveram como ênfase a determinação das principais feições texturais e paragêneses minerais, com atenção especial à minerografia dos sulfetos. Todas as lâminas descritas foram fotografadas utilizando uma câmera AxioCAM Erc5s acoplada a um microscópio binocular ZEISS no Laboratório de Microscopia da Pós-Graduação (Escola de Minas – UFOP). As abreviações minerais utilizadas nas fotomicrografias seguirão as normas internacionais de Whitney & Evans (2010).

Tabela 0.1 - Dados de amostragem dos corpos mineralizados. SER = Serrotinho, FGS = Fonte Grande Sul, BIF = formação ferrífera bandada, XG = Xisto grafitoso.

Nome Amostra	Número Amostra	Furo	Alvo	Nível	Profundidade Furo	Litologia	Fotografia das amostras (ampliável)
FGSBUD0440-01	AM01	FGSBUD0440	SER	21	348.5	BIF SULFETADA	
FGSBUD0440-02	AM02	FGSBUD0440	SER	21	383.4	BIF SULFETADA	
FGSBUD0440-03	AM03	FGSBUD0440	SER	21	395	XG	
FGSBUD0449-01	AM01	FGSBUD0449	FGS	21	274.7	BIF SULFETADA	
FGSBUD0449-02	AM02	FGSBUD0449	FGS	21	303.4	BIF SULFETADA	

1.5.3.2 Química Mineral

As microanálises qualitativas por meio do sistema EDS foram realizadas em microsonda eletrônica da marca JEOL, modelo JXA-8230, no Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do DEGEO-UFOP. Três lâminas (furos 0440-02, 0449-01 e 0449-02) foram estudadas, enfatizando os seguintes sulfetos: pirita, arsenopirita, pirrotita, calcopirita e esfalerita. Para tanto, foram medidas as concentrações dos elementos Fe, S, As, Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Co, Ni e Hg, utilizando 15kV e uma *work distance* em torno de 10mm. Em todos os campos analisados, foram obtidas imagens de elétrons retro-espalhados (BSE). Mapas químicos qualitativos via EDS também foram obtidos para determinados campos, enfatizando a composição dos sulfetos e a variação dos principais elementos ao longo dos mesmos.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), está localizado na porção sul-sudeste do Cráton São Francisco (Almeida, 1977) e possui uma área de aproximadamente 7.000 km², sendo uma importante província metalogenética que abriga grandes depósitos auríferos (Lobato *et al.* 2001) Compreende terrenos Arqueanos a Paleoproterozóicos, podendo ser dividido em três grandes unidades (Figura 2.1): (1) embasamento granito-gnáissico; (2) *greenstone belt* Rio das Velhas, e (3) sequências metassedimentares (Dorr II, 1969).

Segundo Farina *et al.* (2016), o QF é resultado de dois eventos deformacionais, sendo eles o Transamazônico, de idade paleoproterozóica, e o Pan-Africano/Brasiliano, de idade neoproterozóica. O evento Transamazônico, ou Riachão-Orosiriano, é um ciclo geodinâmico responsável pela formação de crosta continental da Plataforma Sul- Americana. Ele teve início no Paleocontinente São Francisco com a tafrogênese da massa continental e desenvolvimento de uma margem passiva, que seria correspondente do Supergrupo Minas. Com o fim das colisões é possível que se tenha formado um supercontinente que desenvolveu sob ele diversos riftes e depositou sedimentos continentais intercalados com lavas ácidas (Alkmim *et al.* 2004). O evento Brasiliano, por sua vez, compreende também um ciclo geodinâmico, que se inicia com um regime extensional e respectiva formação de riftes, ou seja, há um começo de fragmentação do supercontinente Rodínia e termina com a fusão do Gondwana. Ele foi responsável pela formação de faixas dobradas na região norte, centro-oeste, sudeste e sul do Brasil; pela formação de bacias do tipo rifte; abertura oceânica com geração de margem passiva e arcos de ilhas; evento colisional principal com episódios tectônicos, metamorfismo de alto grau e formação de *thrust and fold belts* (Almeida *et al.* 1973).

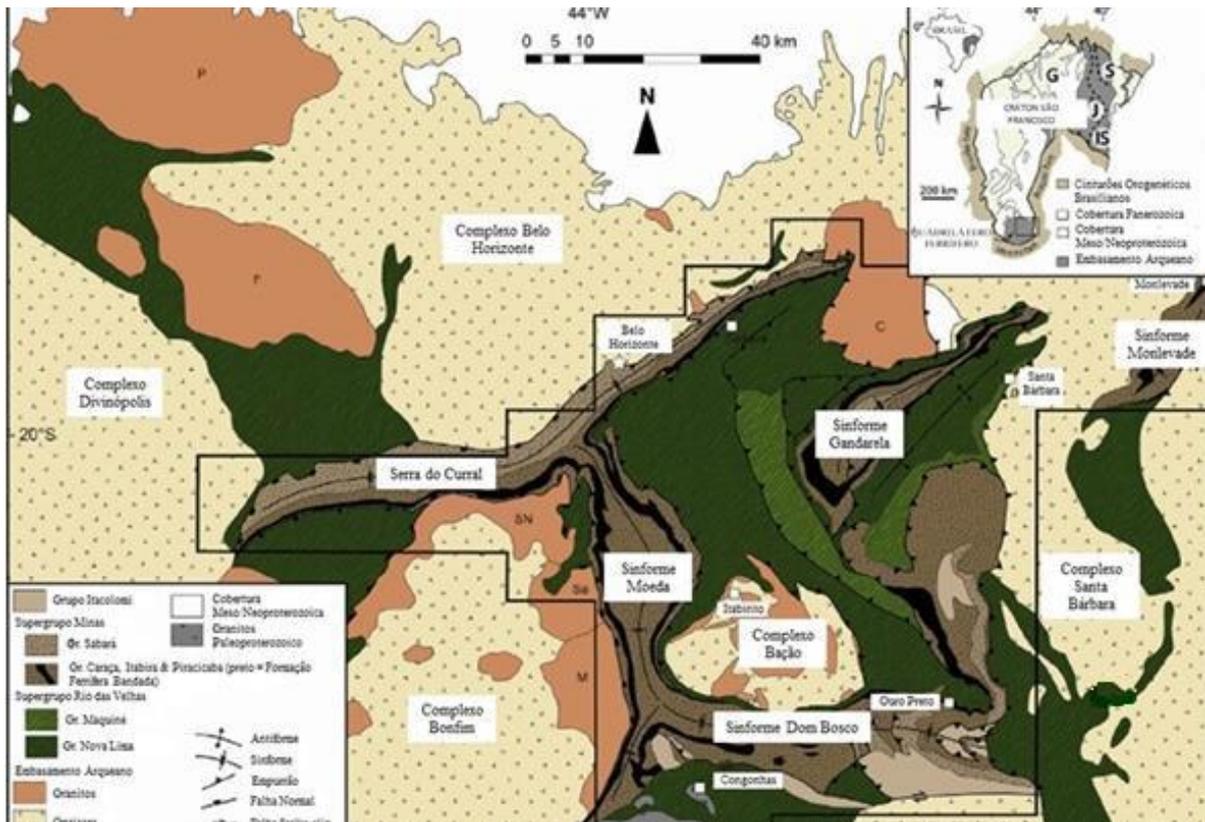


Figura 2.1 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero de acordo com Farina *et al.* (2016).

2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

2.2.1 APRESENTAÇÃO

Dorr II (1969) compilou mapeamentos e estudos realizados entre 1946 e 1962 pelo United States Geological Survey (USGS) e Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), e a partir disso desenvolveu um estudo na região do QF. Segundo Alkmim & Marshak (1998) há três grandes domínios tectono-estratigráficos que compõem o QF, sendo eles: complexos ígneos metamórficos de idade arqueana, Supergrupo Rio das Velhas (sequência do tipo *greenstone belt*, também de idade arqueana), e o Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, que seriam uma sequência supracrustal de rochas sedimentares químicas e clásticas, relacionada ao Proterozoico. Endo *et al.* (2020) redefinem a posição estratigráfica do Grupo Sabará e o inserem, juntamente com o Grupo Itacolomi, na unidade de topo do QF, denominada Supergrupo Estrada Real. Independentemente das denominações e posições estratigráficas, os grupos Sabará e Itacolomi representam uma sucessão do tipo *flysch* e molassa sin-orogênicos.

O metamorfismo regional é predominantemente de fácies xisto verde a anfíbolito, com aumento do grau metamórfico de oeste para leste (Dorr II 1969, Marshak & Alkmim 1989, Queiroz *et al.* 2019).

A coluna estratigráfica para o QF, segundo Marshak & Alkmim (1989), é representada na Figura 2.2.

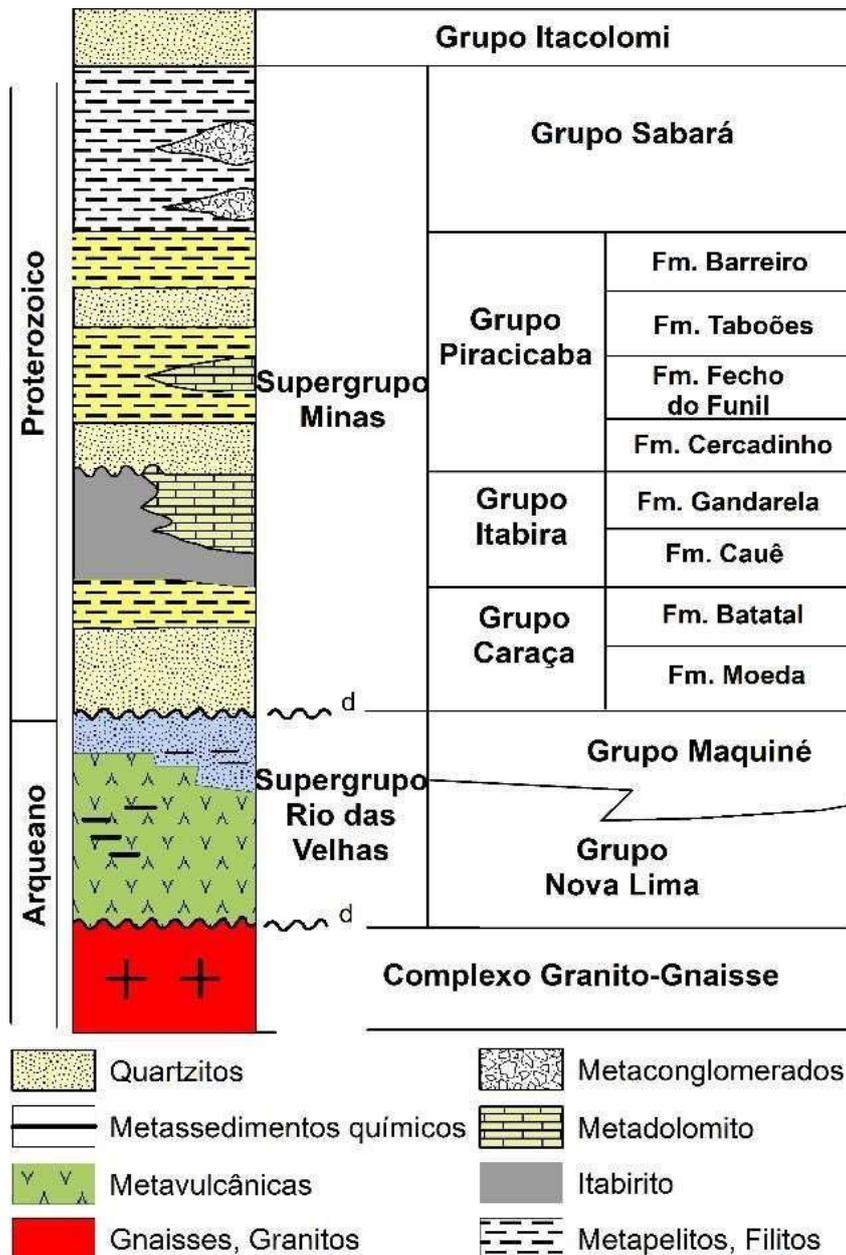


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero segundo Marshak & Alkmim (1989).

Os terrenos gnáissicos arqueanos fazem parte do embasamento cristalino e possuem composição trondhjemitó-tonalito-granodiorito (TTG), sendo expostos predominantemente como domos (por exemplo, domos de Belo Horizonte, Baçõ, Caeté) (Teixeira *et al.* 2000).

O Supergrupo Rio das Velhas, foco central deste trabalho por conter as rochas portadoras de Au, será mais bem detalhado no capítulo 3. Esta unidade sobrepõe o embasamento cristalino, sendo representada por rochas máficas e ultramáficas (komatiito – basalto), vulcânicas (dacito) e vulcanoclásticas de composição ácida a intermediária, além de rochas clásticas. O metamorfismo se

dá sob condições de fácies xisto verde a anfíbolito, com intensa alteração hidrotermal (Dorr 1969, Zucchetti & Baltazar 2000, Farina *et al.* 2016). O Supergrupo Rio das Velhas é subdividido em dois grupos – Nova Lima e Maquiné. Zucchetti & Baltazar (2000) e Baltazar & Zucchetti (2007) propuseram sete associações de litofácies para o Supergrupo Rio das Velhas, sendo elas, da base para o topo: vulcânica máfico-ultramáfica, vulcano-química, sedimentar clasto-química, vulcanoclástica, ressedimentada, costeira e não marinha.

O Grupo Nova Lima é composto em sua maioria por rochas máficas e ultramáficas, BIF's do tipo Algoma, metachert ferruginoso e sedimentos carbonosos (Zucchetti & Baltazar 2000, Baltazar & Zucchetti 2007).

O Grupo Maquiné é composto por duas formações, da base para o topo, Palmital e a Casa Forte. A Formação Palmital é de ambiente marinho, portanto é representada por metaturbiditos e metarenitos. A Formação Casa Forte já é uma associação não-marinha, com metarenitos e metaconglomerados em um ambiente de bacia *foreland* (Baltazar & Zucchetti 2007).

Idades máximas de deposição para as rochas metassedimentares do Grupo Nova Lima situam-se no intervalo entre 2790 e 2750 Ma (Dopico *et al.* 2017) e a população de zircão detrítico mais jovem do Grupo Maquiné indica uma idade de 2730 ± 18 Ma (Moreira *et al.* 2016).

As coberturas plataformais sedimentares são de idade paleoproterozóica, englobando o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. O Supergrupo Minas possui sedimentos continentais e marinhos, estando disposto de maneira discordante sobre o Supergrupo Rio das Velhas (Madureira *et al.* 2021). A estratigrafia do Supergrupo Minas é representada, da base para o topo, por metaconglomerados e metarenitos gradando para metapelitos do Grupo Caraça, formação ferrífera bandada do tipo Lago Superior e metacarbonatos do Grupo Itabira, sedimentos deltáicos e de água rasa do Grupo Piracicaba e por metapelitos, metarenitos e metaconglomerados do Grupo Sabará (Alkmim & Marshak 1998, Baltazar & Zucchetti 2007, Alkmim & Martins- Neto 2012). (Figura 2.2).

O Grupo Tamanduá foi formalmente excluído da base do Supergrupo Minas e correlacionado ao Supergrupo Espinhaço de idade paleo-mesoproterozóica por Dutra *et al.* (2020). Do ponto de vista geocronológico, o Supergrupo Minas apresenta idades máxima de deposição entre 2600 e 2100 Ma (Alkmim & Marshak 1998, Nunes 2016, Dopico *et al.* 2017).

O Grupo Itacolomi é uma sucessão de metarenitos, metaconglomerados e metapelitos que recobrem o Supergrupo Minas ao longo de uma discordância regional (Figura 2.2) (Dorr II 1969, Alkmim & Martins-Neto 2012). As fontes possíveis para as rochas desta unidade são o Complexo Mantiqueira (2119 ± 16 a 2084 ± 13 Ma, Noce *et al.* 2007), a Suíte Ritópolis – Alto Maranhão (2130

Ma, Seixas *et al.* 2013), o Batólito Serrinha – Tiradentes (2227 ± 22 a 2204 ± 11 Ma, Ávila *et al.* 2014, Teixeira *et al.* 2015) e o Complexo Juiz de Fora (2041 ± 7 a 2137 ± 19 Ma, Noce *et al.* 2007).

2.2.2 Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero

Baltazar & Zucchetti (2007) propõem uma evolução tectônica do QF que engloba três eventos deformacionais e quatro grupos de estruturas (D1, D2, D3 e D4) (Tabela 2.1). O grupo D1 (2749 Ma-2670 Ma) possui um transporte tectônico de N para S, strike para E, dip para N, com vergência para S, plunge para ENE, com a foliação S1 sendo planoaxial subparalela ao acamamento S0 (355/65). O D2 (~2700 Ma) possui transporte tectônico de NE para SW, strike para NE, foliação plano axial S2 é definida por S0/S1, sendo esta a foliação milonítica (060/35). O D3 (2100 Ma – 1900 Ma) advém de um evento extensional (Transamazônico) que foi responsável pelo soerguimento do embasamento, nucleação de sinclinais regionais e início da deposição do Supergrupo Minas. O D4 (650 Ma – 500Ma) advém de um evento compressivo (Brasiliano) com transporte tectônico E para W, foliação milonítica e plano axial S4, estiramento e lineação mineral mergulhando para ESE.

Tabela 2.1 - Síntese da evolução do QF, baseado em Baltazar & Zucchetti (2007).

Baltazar e Zucchetti (2007)		
Idade (Ma)	Evento Tectônico	Regime Tectônico e Estruturas
650-500	D4	- Transporte tectônico E para W; - Foliação milonítica e plano-axial S4; - Estiramento e lineação mineral mergulhando em direção a ESE
2100 e 1900	D3	- Nucleação de sinclinas regionais e início da deposição do Supergrupo Minas; - Soerguimento do embasamento granito-gnáissico como metamorphic core complexes, com falhas normais ao redor desses complexos
~2700	D2	- Transporte tectônico de NE para SW; - Foliação plano-axial S2 (060/35-Foliação milonítica)
2749-2670	D1	- Transporte tectônico de N para S; - Foliação S1 plano-axial subparalela ao acamamento S0 (355/65)

Chemale Jr *et al.* (1994) sugerem dois eventos deformacionais, sendo um de idade paleoproterozóica e o outro compressivo e associado ao Pan Africano/Brasiliano (Tabela 2.2). No Tansamazônico ocorreu a formação das cúpulas arqueanas de granito-gnaiss e nucleação dos sinclinais do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas. Entre essas cúpulas, há zonas de cisalhamento extensional dúctil-rúptil desenvolvidas. De forma mais descritiva, a ordem dos acontecimentos dos fatos

seria a geração de granitos-gnaisses (compressivo), fase inicial do *greenstone belt* Rio das Velhas (extensional), magmatismo ácido a intermediário com deformação (Orogenia Rio das Velhas), deposição do Supergrupo Minas (rifte inicial), remobilização das rochas arqueanas (soerguimento dos TTG's e formação sinclinais regionais), intrusão de diques máficos (rifteamento Mesoproterozóico do Cráton São Francisco e Orogenia Brasileira), intrusão de diques básicos.

Tabela 2.2 - Síntese da evolução do QF, baseado em Chemale Jr. *et al.* (1994).

Chemale Jr. et al. (1994)		
Idade (Ma)	Evento Tectônico	Regime Tectônico e Estruturas
<130	Intrusão de diques básicos e bacias sedimentares	- Extensão durante o drifte dos continentes sul americano e africano
650 a 500	Deformação e metamorfismo das rochas pré-existentes	- Tectônica compressiva formando <i>fold-thrust belt</i> (Orogenia Brasileira)
1200 a 900	Intrusão de diques máficos	- Extensão durante a abertura do proto-oceano Brasileiro/Pan-Africano
1700 a 1500		- Extensão associada ao rifteamento Mesoproterozóico do Cráton São Francisco
2600 a 2000	Remobilização isotópica de rochas arqueanas	- Extensão tectônica que gerou o soerguimento dos TTG's e formação dos sinclinais regionais
<2703 a >2060	Deposição do Supergrupo Minas	- Fase inicial do rifte seguido de depósito plataformar
2780 a 2703	Magmatismo ácido a intermediário associado com deformação	- Compressão com deformação strike-slip dominante, produzindo uma lineação mineral sub-horizontal, com foliação vertical N-S (Orogenia Rio das Velhas)
>2880	Fase inicial do <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas	- Tectônica extensional com geração de komatiitos e tholeiitos
>2920	Geração de terrenos granito-gnáissicos	- Tectônica compressiva com arranjo estrutural complexo

Alkmim & Marshak (1998) postulam que há quatro eventos deformacionais, sendo o D1 compressivo (orogenia Transamazônica) gerando dobramentos para NW, zonas de cisalhamento sem forte foliação, construção do terreno *greenstone belt* (Supergrupo Rio das Velhas), deposição do Grupo Carajás e Tamanduá, formação da bacia Minas (Tabela 2.3). No evento DC ocorreu o colapso extensional do Orogênio Transamazônico, o soerguimento dos complexos cristalinos e formação de domos e quilhas. O evento DE seria a abertura da bacia do rifte Espinhaço e também a intrusão de diques. Já o evento D2 seria a geração de cinturões de empurrão e dobramentos com vergência para W, e o Evento Brasileiro.

Segundo Endo *et al* (2019a) há uma nova subdivisão das unidades Paleoproterozóicas do Quadrilátero Ferrífero, essas mudanças ocorrem no Supergrupo Minas e Estrada Real. O Supergrupo Estrada Real é composto pelos grupos Sabará e Itacolomi, e nesse modelo esses dois grupos se encontram interligados no Pico Itacolomi.

Tabela 2.3 - Síntese da evolução do QF, baseado em Alkmim e Marshak (1998).

Alkmim e Marshak (1998)		
Idade (Ma)	Evento Tectônico	Regime Tectônico e Estruturas
700 a 450	D2	- Evento Brasileiro de regime compressivo; - Geração de cinturões de empurrão e dobras com vergência para W.
1750	DE	- Intrusão de diques; - Abertura da bacia ensiálica do rifte Espinhaço
2095	DC	- Colapso extensional do orógeno Transamazônico; - Soerguimento dos complexos cristalinos e formação da atual conjuntura em domos e quilhas
2100	D1	- Evento Transamazônico responsável por empurrões e dobramentos para NW, formando extensas zonas de cisalhamento
~ 2600 a		- Formação da bacia Minas e plataforma continental;
2400		- Evento extensivo gerando a deposição dos grupos Caraça e Tamanduá
2700 a		- Construção do terreno <i>greenstone</i> . Supergrupo Rio das Velhas sendo depositado ou colocado tectonicamente
2800		

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE: GEOLOGIA DA MINA CUIABÁ

3.1 HISTÓRICO

A Mina Cuiabá, objeto de estudo desta monografia, é considerada a maior mina de ouro subterrânea em operação no Brasil. Este é um dos motivos pelo qual ela é objeto de estudo de diversos trabalhos, como Barbosa *et al.* (2011), Cota *et al.* (2011), Trópia *et al.* (2013), Padula *et al.* (2016), Pimenta *et al.* (2017) e Vitorino *et al.* (2017).

Os primeiros trabalhos que ocorreram na mina datam de 1740, com a exploração portuguesa (Ribeiro *et al.* 2007). Em 1877, a mina foi comprada pela empresa inglesa St. John Del Rey Mining Co. que a operou até 1910. Durante os 30 anos seguintes ocorreu exploração esporádica, já que estava em curso a Segunda Guerra Mundial. Somente em 1977 foram reiniciados os trabalhos na mina, que foi comprada pela Mineração Morro Velho S.A. Com o reinício das atividades, o nível 3 foi totalmente desenvolvido e mapeado com detalhe (Vial *et al.* 1980) e em 1985 ocorreu o início da lavra. Os anos seguintes foram marcados por um desenvolvimento e também foram aplicadas tecnologias modernas e intensa mecanização, como por exemplo o *shaft* (ou elevador), que alcançaria até o nível 11 (Barbosa *et al.* 2011). Em 1998 a empresa AngloGold Ashanti Brasil Mineração Ltda. (AGABM) incorporou a Mina Cuiabá, sendo responsável pelas suas operações até os dias atuais. A partir da incorporação do projeto Córrego do Sítio, em 2010, a AGABM se torna AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração Ltda. Atualmente, a Mina Cuiabá possui rampas de acesso em 21 níveis e com uma profundidade que ultrapassa os 1.400 metros.

3.2 MINERALIZAÇÃO DO OURO

Ribeiro-Rodrigues (1998) classifica os depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero em quatro grupos, considerando a idade e a natureza da rocha hospedeira:

-Depósitos hospedados em rochas granito-gnáissicas arqueanas do complexo metamórfico, compostos por veios de quartzo auríferos discordantes;

-Depósitos hospedados no greenstone belt Rio das Velhas relacionados às zonas de cisalhamento e veios de quartzo;

-Depósitos hospedados em rochas metassedimentares proterozóicas;

-Depósitos hospedados em aluviões (placers e paleoplacers) e em lateritas de idade cenozóica.

De acordo com Vial *et al.* (2007), há dois grupos de estilo de mineralização no QF: (i) grupo A,

hospedado no *greenstone belt* Rio das Velhas e, (ii) hospedado no Grupo Caraça, base do Supergrupo Minas, de idade paleoproterozóica.

Em relação ao *greenstone belt* Rio das Velhas, há seis tipos de mineralização, sendo uma delas associadas às BIF's, com alternância de carbonato e sulfeto, principalmente pirita, pirrotita e arsenopirita. Esse tipo de mineralização está presente nas minas de Lamego, Cuiabá e Carrapato de Cima. Há aquela mineralização associada à lapa seca (carbonatos), em que há corpos maciços de sulfetos com veios de quartzo. Há ainda o ouro associado com veios de quartzo, geralmente em zonas de alteração hidrotermal. Há o padrão de vênulas de quartzo com sulfeto disseminado. O outro estilo seria o ouro associado a anfibólito, onde o minério é composto por uma alternância de camadas de sulfetos e anfibólio. E, por fim, o ouro associado a sulfetos maciços disseminados (Vial *et al.* 2007). Não há uma litologia hospedeira preferida para os depósitos de ouro. O que se observa é que as formações ferríferas funcionam como uma espécie de armadilha química onde há precipitação de ouro e sulfetos.

A mineralização na Mina Cuiabá é associada a um intenso dobramento e/ou cisalhamento. A tendência observada é que o minério segue extensionalmente o down-plunge, e a lineação L2 segue o plunge, sendo a lineação resultado da interseção de S1 e S2 (plano axial) subparalela ao eixo da grande dobra (Vial *et al.* 2007).

Com relação às alterações hidrotermais do QF, têm-se carbonatação seguida de silicificação e sericitização (Vial *et al.* 2007). A variação do estilo da alteração hidrotermal reflete principalmente a composição da rocha hospedeira. Sendo assim, a silicificação é melhor desenvolvida em rochas máficas, enquanto que a sericitização e a carbonatação ocorrem em rochas máficas e metassedimentares.

Segundo Vieira *et al.* (1988), as alterações hidrotermais estão associadas às zonas de cisalhamento dúcteis, paralela ao acamamento, relativa ao evento D1 de deformação. Elas estão dispostas em torno do corpo mineralizado formando zonas concêntricas representadas por: zonas de sericitização (zona interna), carbonatação (zona intermediária) e cloritização (zona externa). Essas zonas se diferem do metamorfismo regional por terem recebido maior aporte de K, CO₂ e H₂O. A entrada de fluidos na zona de cisalhamento ocorreu em duas etapas distintas, sendo elas: o primeiro pulso ocorre a percolação de fluidos aquosos pobres em CO₂, contemporaneamente à deformação desenvolvendo clorita e carbonato; no segundo pulso ocorreu um fluido rico em CO₂, caracterizado pela formação de carbonatos nas zonas da cloritização, rotação dos poiquiloblastos na zona de carbonatação e recristalização total de poiquiloblastos nas zonas de sericitização.

Em relação aos modelos genéticos, alguns autores podem ser citados, tais como Graton & Bjorge (1929) e Tolbert (1962). Estes autores apresentam um modelo hidrotermal com fluidos derivados de

corpos graníticos. Ladeira *et al.* (1980) e Vial *et al.* (1980) defendem um modelo singenético exalativo. Guimarães & Vieira (1988) acreditam em um modelo epigenético com fluidos relacionados ao metamorfismo regional e deformação. Vieira *et al.* (1988) definem as zonas de transcorrência vertical do primeiro evento como zonas de aporte anômalas de CO₂ durante o metamorfismo regional. O ouro seria transportado através de tiosulfetos que se desestabilizam em presença de minerais de ferro, variação de pH e fugacidade de oxigênio. O resultado deste processo seria a cristalização dos sulfetos e do ouro, concomitantemente a partir da substituição de minerais ricos em ferro presente na rocha hospedeira. O segundo evento teria remobilizado os sulfetos para a zona de charneira. De acordo com o autor supracitado, o aumento crescentado teor do ouro, à medida que se adentra as zonas de alteração, é bastante controlado pelo arcabouço estrutural.

3.3 GEOLOGIA DA MINA CUIABÁ

A Mina Cuiabá está inserida em uma região afetada por dobras e empurrões com vergência para noroeste. Vial *et al.* (2007) estabelece, da base para o topo, a seguinte sequência: rochas metavulcânicas básicas a intermediária com intercalações de filitografitoso (XG), sobrepondo tufos félsicos (X2) intercalado com filitos grafitosos, seguidos por formação ferrífera bandada (BIF), sobrepostas por tufos félsicos alternados com metassedimentos pelítico carbonosos.

Vieira *et al.* (1988) reinterpreta os tufos félsicos X2 como produtos de alteração hidrotermal de rochas vulcânicas (X2), e descreve novos tufitos félsicos (Xs). Dessa forma, a estratigrafia da mina, segundo este autor, seria da base para o topo: metabasaltos e metandesitos com intercalações de níveis pelíticos carbonosos (X1), formação ferrífera bandada (BIF), sotopostas por metabasaltos (MBA), metatufitos félsicos alternado com metapelitos carbonosos (X1). As rochas máficas, quando se aproximam da formação ferrífera bandada, sofrem alteração hidrotermal e são classificadas como filitos ricos em clorita (MANX), carbonatos (X2CL) e sericita (X2). Essas litologias definem as zonas de alteração concêntricas, paralelas ao acamamento. Todas as rochas citadas foram metamorfizadas em fácies xisto verde.

Os metabasaltos são a base da Mina Cuiabá, e a espessura não pode ser avaliada já que o seu limite inferior aflora. Trata-se de rochas verde escura, de aspecto maciço, foliação incipiente e com possível textura ígnea preservada (por exemplo, *pillow lava*). Nos horizontes com textura reliquiar, podem ser identificadas paleo-cavidades inter e intra-pilow preenchidas por carbonato e quartzo (Hargreaves *et al.* 1979). Vieira (1992) descreve, com base em dados geoquímicos, um enriquecimento em ferro no topo da camada, e isso se dá, segundo o autor, por ocorrerem dois tipos diferentes de rochas: o topo seria rico em metabasalto e a base em metandesitos. Em contrapartida, Toledo (1997) acredita que diante do contexto de alteração hidrotermal presente na Mina Cuiabá, os dados geoquímicos devem ser tratados com extrema parcimônia. Este autor defende que os baixos teores de ferro no topo podem

ser produtos da alteração submarina de basaltos tholeiíticos, já que as composições mineralógicas, estruturas primárias e texturas não definem a rocha como um metandesito. Ademais, somente basaltos poderiam formar *pillow lavas* pouco espessas e contínuas devido à viscosidade baixa.

Em relação as zonas de alteração hidrotermal, Toledo (1997) propõe que a zona de cloritização é enriquecida em clorita, carbonato e quartzo, com empobrecimento de plagioclásio, tremolita/actinolita e epidoto. A passagem para a zona de carbonatação é marcada por uma maior deformação; em termos da composição mineralógica ocorre o surgimento de sericita e aumento de carbonato (Fe-carbonato), com uma diminuição de clorita e plagioclásio. A zona de sericitização possui minerais como sericita, carbonatos, quartzo e sulfetos, há uma grande quantidade de veios e vênulas quartzo- carbonáticas concordante com a foliação milonítica (Fernandes *et.al.*2017)

As faixas de alteração são gradacionais e de difícil individualização no campo. Informalmente elas são denominadas como metabasalto xistoso (MANX) correspondendo à zona de cloritização, sericita-plagioclásio-quartzo-carbonato (X2CL) sendo a zona de carbonatação e quartzo- sericita carbonato – filito (X2) correspondendo à zona de sericitização.

Com relação às formações ferríferas bandadas, elas ocorrem em uma camada contínua, intercalada com os derrames metabasálticos, com uma estrutura bandada alternando entre bandas quartzosas e bandas compostas por minerais de ferro, sendo estes sulfetos de ferro e/ou carbonatos. A BIF é dividida em três tipos, sendo a estéril escura, estéril clara e sulfetada. A estéril escura possui baixos teores de ouro, com alternância de bandas brancas compostas por quartzo e carbonatos subordinadamente, negras constituídas por quartzo, carbonatos de ferro (ankerita e siderita) e material carbonoso; e a ocre que possui carbonatos de ferro (siderita e ankerita) e calcita.

A BIF estéril clara é caracterizada pela alternância de bandas brancas e ocre com composições similares a da estéril escura, porém sem as bandas negras de material carbonoso. A BIF sulfetada possui alternância de bandas amarelas, brancas e /ou negras. As bandas amarelas possuem composição de sulfetos de ferro e carbonatos, as brancas são compostas por quartzo, e um pouco de carbonato de ferro adquirindo tonalidade bege, as bandas negras constituem-se de quartzo, carbonato e material carbonoso. A BIF sulfetada é a litologia principal da Mina Cuiabá, já que a mineralização é hospedada nela. O filito carbonoso capeia a formação ferrífera bandada, é de coloração negra, granulação muito fina e ao tato sujam as mãos. Eles estão intensamente dobrados e cisalhados, podendo estar extremamente sulfetado (armadilhas químicas). Clorita-quartzo-carbonato-sericita-filito (X1) possui coloração cinza a negra e bandamento composicional marcado pela alternância entre bandas quartzo-carbonáticas e sericito-carbonosas. O plagioclásio-clorita-sericita-carbonato-quartzo- filito possui camadas verdes acinzentadas maciças com quartzo e plagioclásio visível a olho nu, que gradam para níveis pelíticos

carbonosos. Essa litologia representa um depósito turbidítico, de composição rica em quartzo, plagioclásio, sericita, clorita e carbonatos (Toledo, 1997). A Figura 3.1 exemplifica essa estratigrafia.

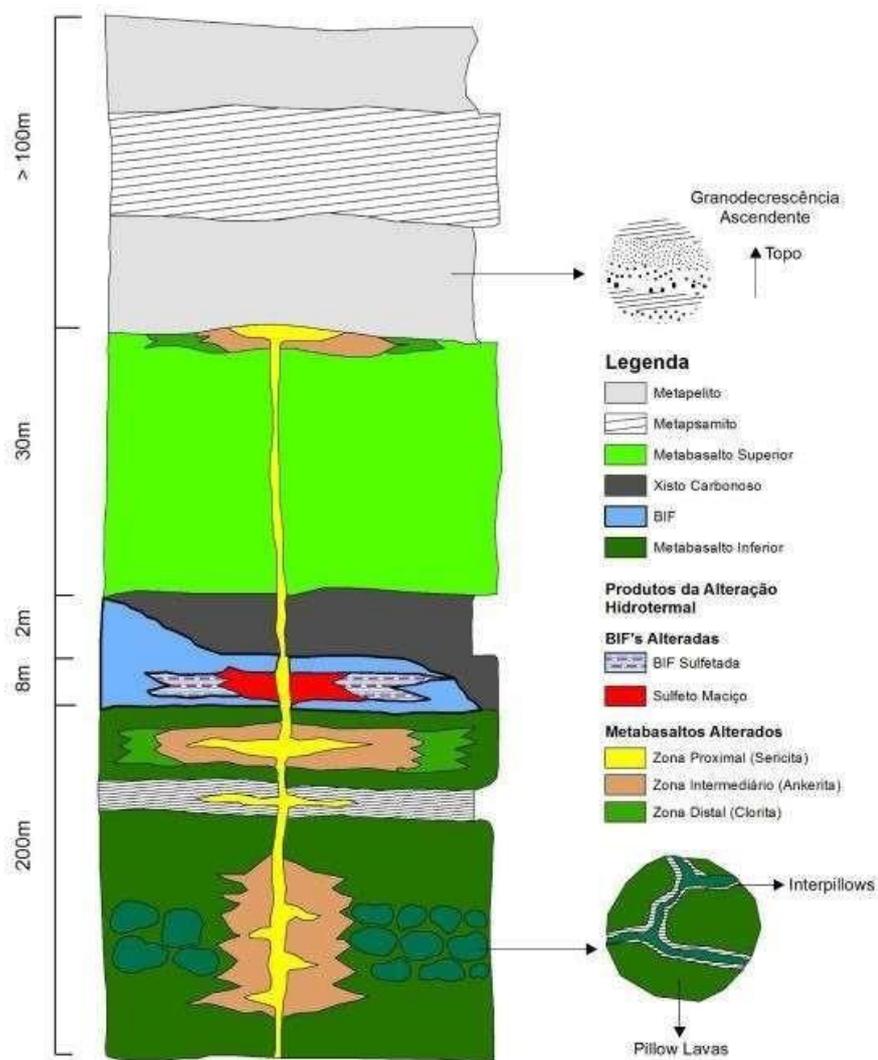


Figura 3.1 - Coluna estratigráfica da Mina Cuiabá (Fernandes *et al.*, 2017).

Segundo Vieira (1991), Toledo (1997) e Barbosa (2011), a Mina Cuiabá seria uma megadobra anticlinal fechada, cilíndrica em bainha, como mostra a Figura 3.2. De acordo com Fernandes (2017), a hipótese de dobra em bainha pode ser questionada devido à ausência de dobras tubulares, eixo de dobra e foliação mergulhando para ESE, existência de padrões de interferência do tipo 3 definido por Ramsay (1967), presença de estruturas primárias como *pillow lavas* corroborando uma baixa deformação nas rochas.

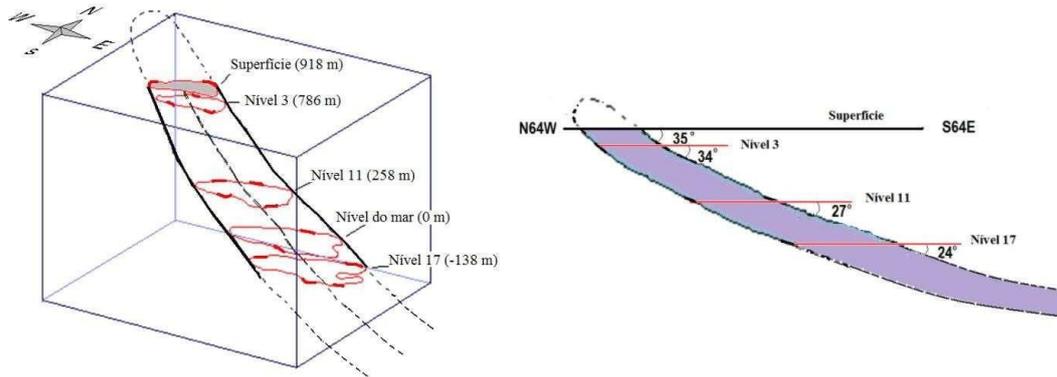


Figura 3.2 - Representação da dobra tubular que contém os corpos mineralizados do depósito Cuiabá (Barbosa, 2011).

Ainda de acordo com Fernandes (2017), o modelo de evolução estrutural teria a influência de três fases principais, D1, D2 e D3. A fase D1 teria o afundamento da dobra reclinada para ESE, vorticidade S e transporte tectônico SW para NE. A fase D2 seria coaxial a D1, gerando dobras reclinadas mergulhando para ESSE, com vorticidade Z e transporte tectônico NE para SW. A fase D3 teria dobras suaves mergulhando para S e plano axial para E, com transporte tectônico de E para W. A Figura 3.3 sintetiza esse modelo estrutural.

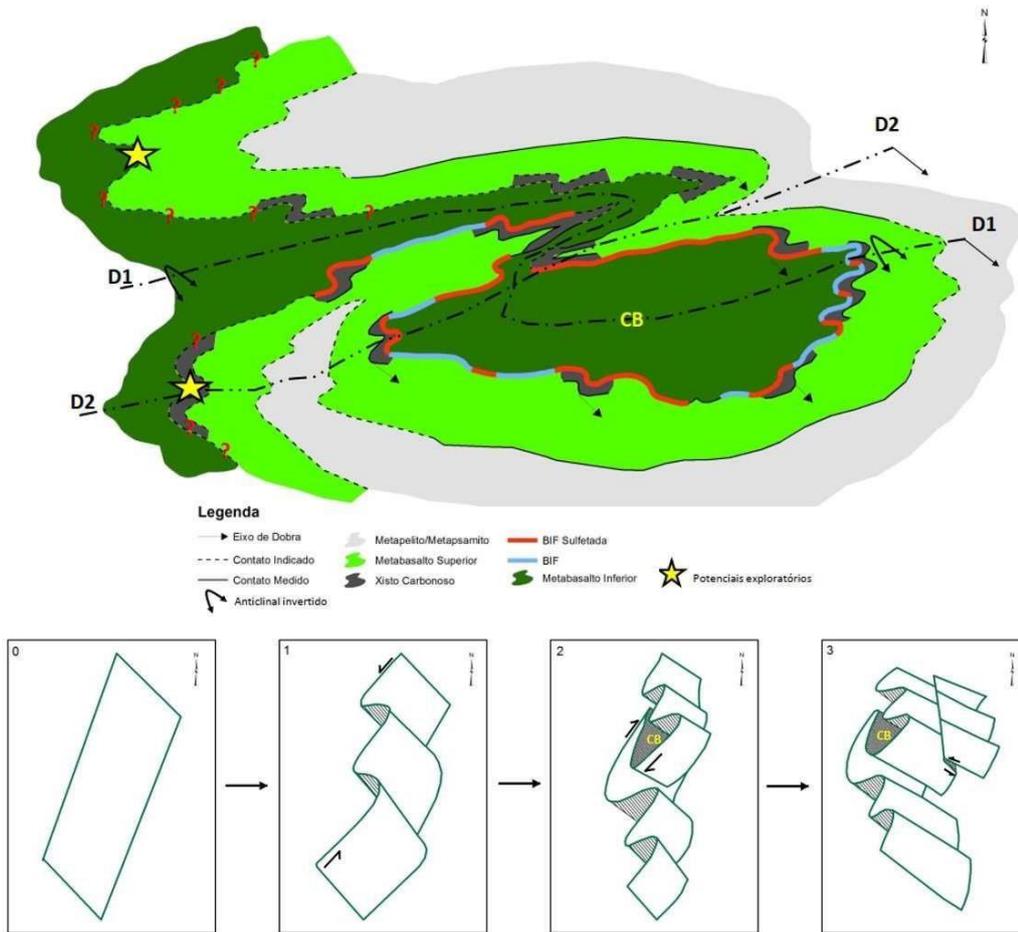


Figura 3.3 - Mapa da Mina Cuiabá e respectiva interpretação e modelo estrutural (Fernandes *et al.*, 2017).

Os corpos mineralizados da Mina Cuiabá são caracterizados por sulfetos maciços, bandados e disseminados na formação ferrífera bandada, e também em veios e pequenas vênulas de quartzo nas zonas sericitizadas com presença de sulfeto disseminado. Os corpos principais, dentre os mineralizados (Figura 3.4), são: Fonte Grande Sul (FGS) e Serrotinho (SER), alvos deste TCC, além de Galinheiro (GAL) e Balanção (BAL). Outros corpos menores são: Galinheiro Extensão, Surucucu, Canta Galo e Dom Domingo (Vitorino *et al.* 2017).

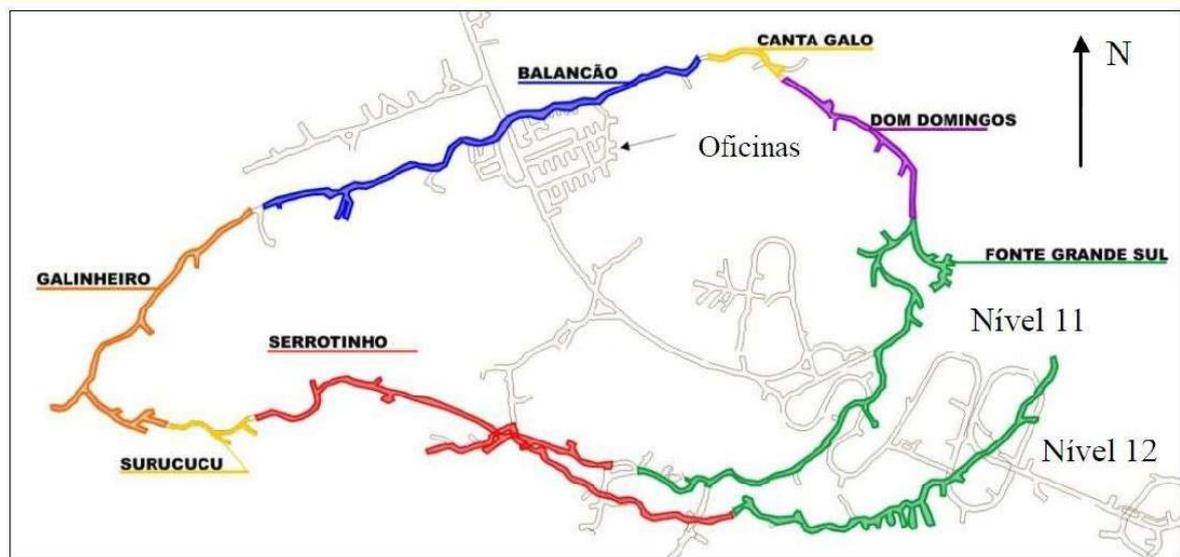


Figura 3.4 - Seção em planta do nível 11, discriminando os corpos de minério (Tropia, 2013).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO MACRO E MICROSCÓPICA DAS AMOSTRAS E ESTUDO DOS SULFETOS

As amostras estudadas neste TCC e evidenciadas na Tabela 1.1 focaram predominantemente em formações ferríferas bandadas (BIF's) portadoras de sulfetos (\pm Au). Foram estudadas 4 amostras provenientes dos corpos Fonte Grande Sul e Serrotinho, como explicitado na Figura 4.1.

Seção Inclinada *Down-Plunge* (visada para ESE)

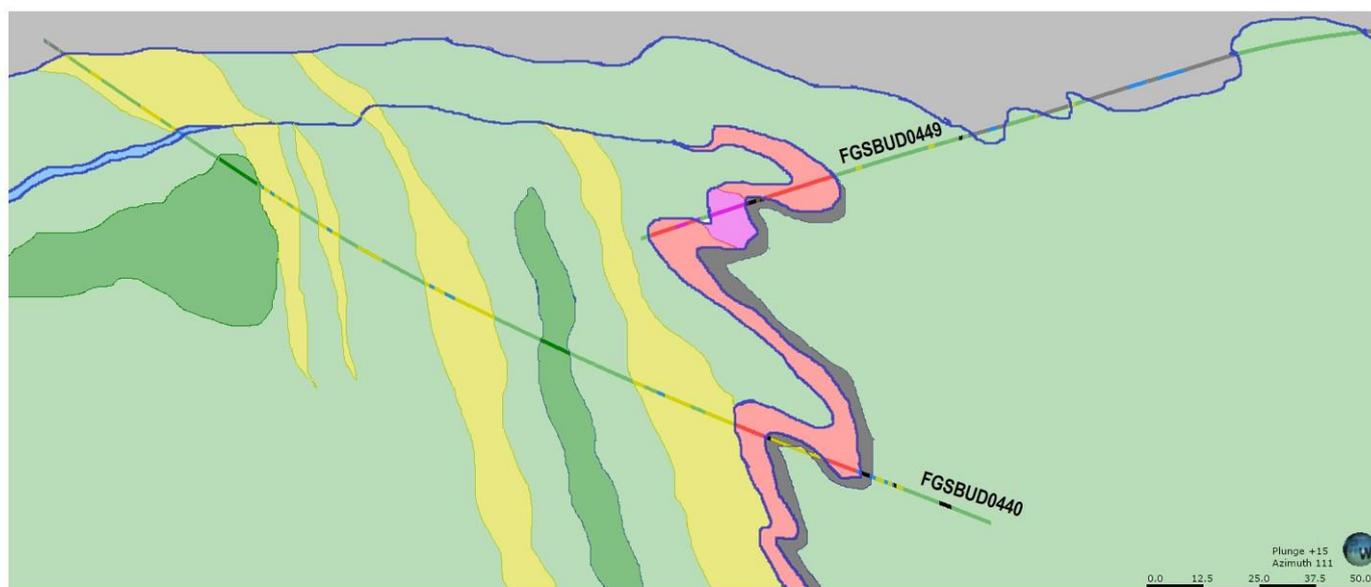


Figura 4.1 – Perfil geológico dos furos FGSBUD0440 e furos FGSBUD0449 de onde as amostras deste estudo foram coletadas.

De uma maneira geral, são rochas leucocráticas com alternância de bandas centimétricas de quartzo + carbonatos e bandas sulfetadas (Figura 4.2). A descrição microscópica evidencia esta alternância de bandas (Figura 4.3), mostrando que as porções granoblásticas, de granulação média a fina, são compostas por 25% de carbonato, 15% de quartzo e 5% de clorita (com sericita subordinada);

enquanto que as demais bandas são compostas por 55% de minerais opacos, que em ordem decrescente de abundância são formados por pirita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita e esfalerita (Figura 4.4). Os sulfetos mostram hábito subédrico a euédrico. Quartzo pode apresentar-se com feições de deformação, especialmente com extinção ondulante.

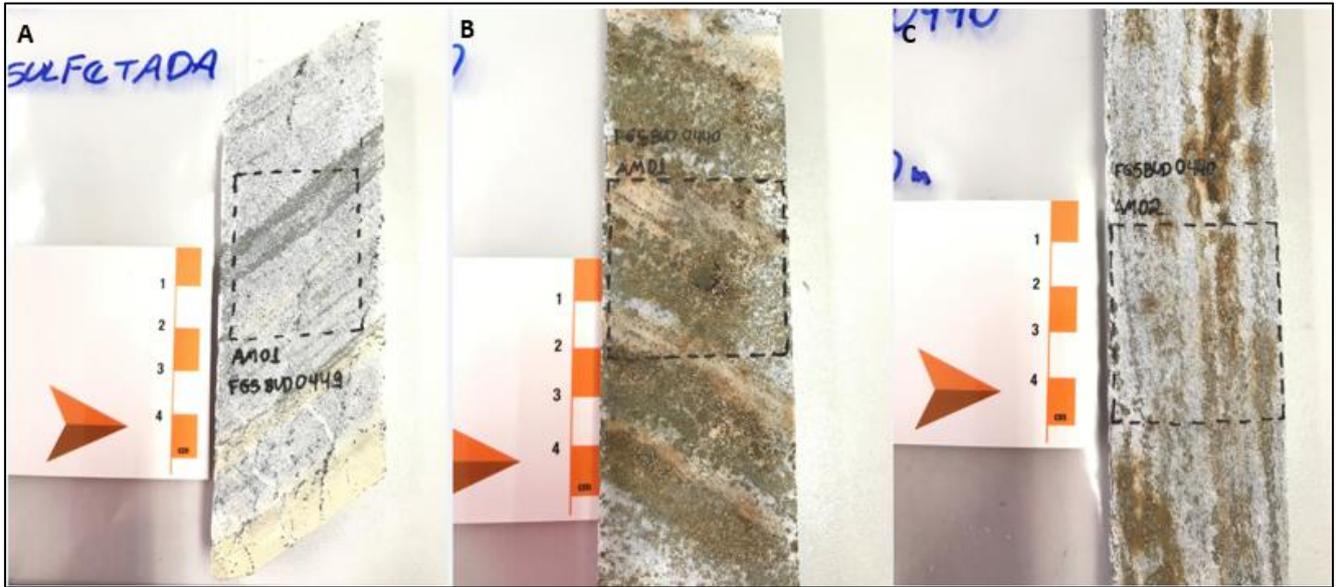


Figura 4.2 – Foto das amostras de formação ferrífera bandada estudadas neste TCC, representando a ganga contendo carbonato e quartzo (coloração cinza a branca) e a parte mineralizada demarcada por sulfetos euédricos a subédricos. A) Amostra 01 do furo FGSBUD0449. B) Amostra 01 do furo FGSBUD0440. C) Amostra 02 do furo FGSBUD0440.

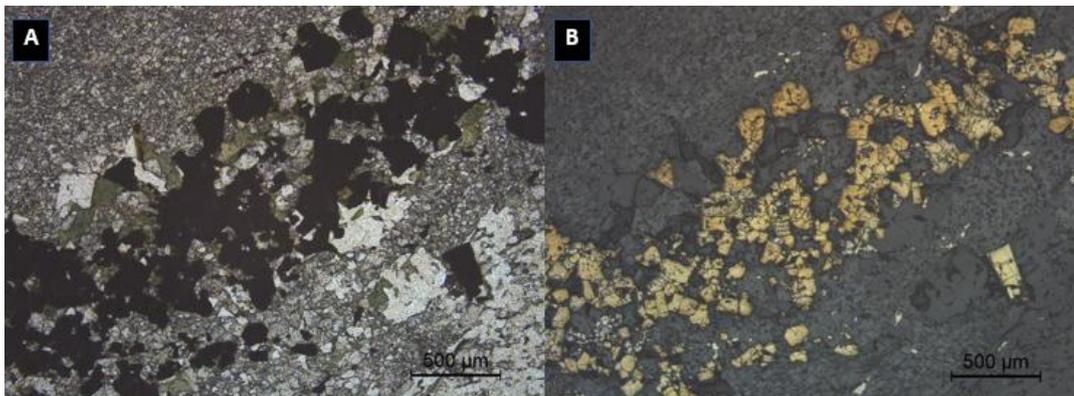


Figura 4.3 – Fotomicrografias da formação ferrífera bandada (BIF) contendo bandas carbonáticas e quartzosas (ganga), e bandas sulfetadas. A) imagem com luz transmitida. B) imagem com luz refletida.

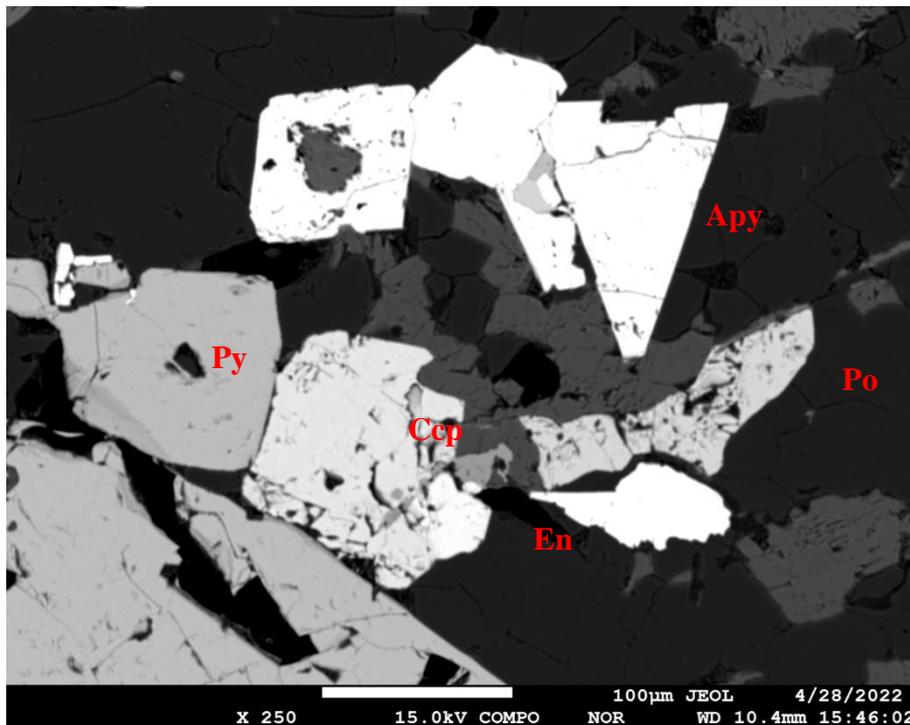


Figura 4.4 – Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando a associação dos principais sulfetos presentes na formação ferrífera bandada (amostra 0449-02): pirita (Py) + pirrotita (Po) + arsenopirita (Apy) + calcopirita (Ccp) + esfalerita (En).

A descrição de cada sulfeto, sintetizada a seguir, é baseada na proporção modal, granulação, morfologia dos grãos e presença de inclusões.

4.1.1 PIRITA

A pirita (fórmula ideal FeS_2) é a mais abundante de todos os sulfetos na rocha em estudo. As principais características ópticas são a fraca clivagem (001), a isotropia à luz refletida com o sistema cúbico de cristalização e a coloração amarelada (Craig & Vaughan, 1990; Deer *et al.* 1992).

Os cristais de pirita (Figura 4.5) perfazem entre 60% e 70% do volume total dos sulfetos presentes nas amostras, apresentam hábito subédrico a euédrico, granulação variável entre 10mm e 500mm e inclusões de silicatos, arsenopirita (Figura 4.6) e pirrotita. Em determinadas porções, a pirita associa-se à arsenopirita, à pirrotita e à calcopirita (Figuras 4.4 à 4.6). Os minerais transparentes associados são quartzo, carbonato e clorita.

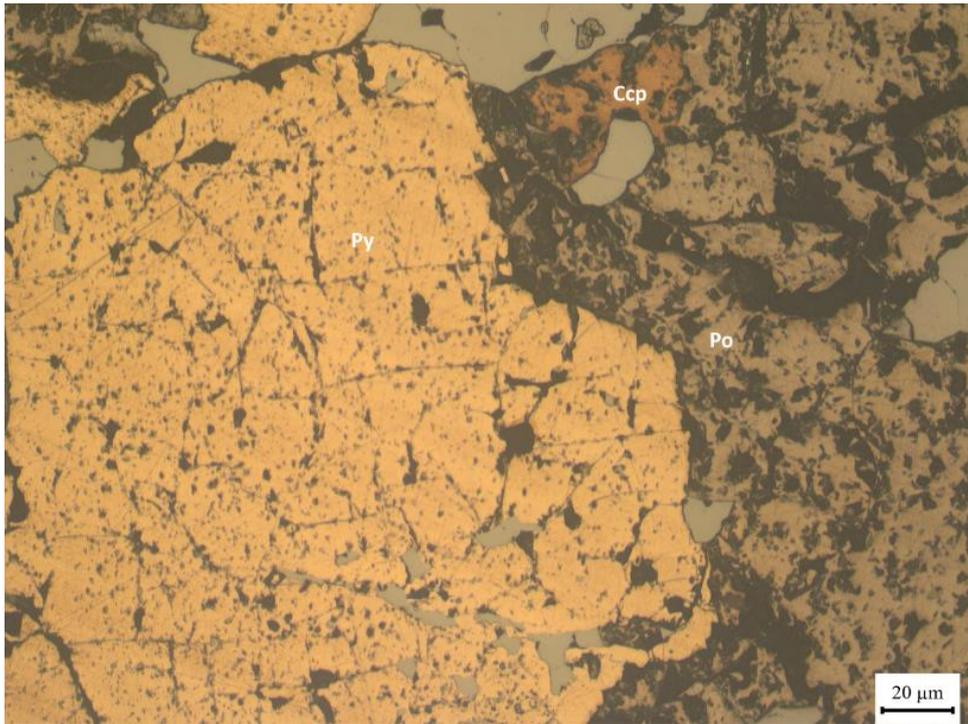


Figura 4.5 – Fotomicrografia com luz refletida mostrando os principais sulfetos da amostra FGSBUD0449 pirita (Py), pirrotita (Po) e calcopirita (Ccp).

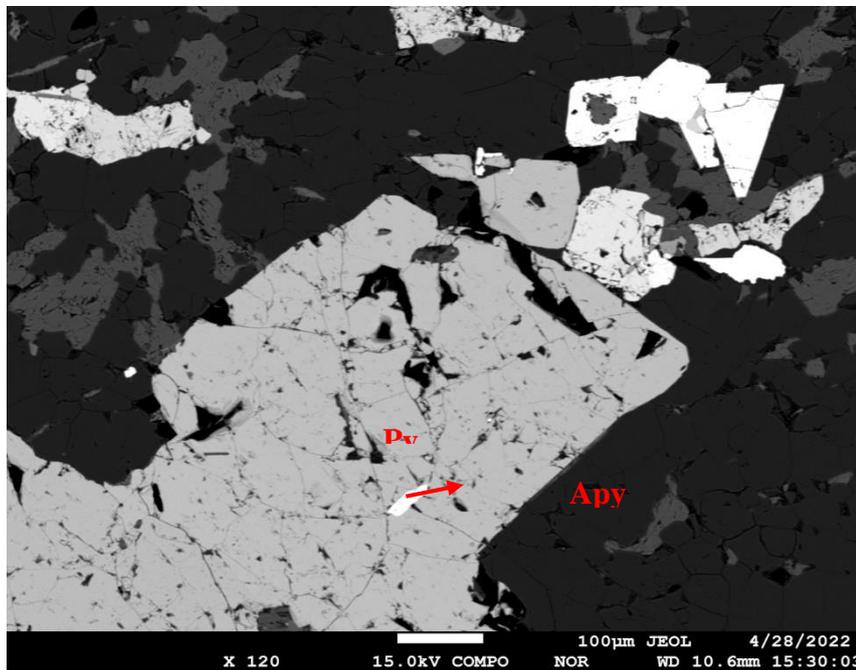


Figura 4.6 – Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) evidenciando pirita (Py) com inclusão de arsenopirita (Apy) (amostra 0449-02).

4.1.2 PIRROTITA

A pirrotita (cuja composição simplificada é $Fe_{1-x}S$, com $0 \leq x \leq 0,2$) é o segundo sulfeto mais abundante na BIF estudada e as principais características microscópicas são a ausência de clivagem, a anisotropia à luz refletida e a cor rosada a marrom-amarelada (Craig & Vaughan, 1990; Deer *et al.* 1992). A depender da temperatura e porcentagem atômica do ferro, cristaliza-se segundo dois sistemas principais: monoclinico e hexagonal. (Figueiredo, 2000).

Os cristais da pirrotita perfazem entre 15% e 20% da moda de sulfetos, apresentam hábito euédrico a subédrico, granulação variável entre 30 e 600 μ m (Figuras 4.4 e 4.7). Em determinadas porções, a pirrotita associa-se à pirita e, subordinadamente, à calcopirita e à arsenopirita (Figura 4.8).

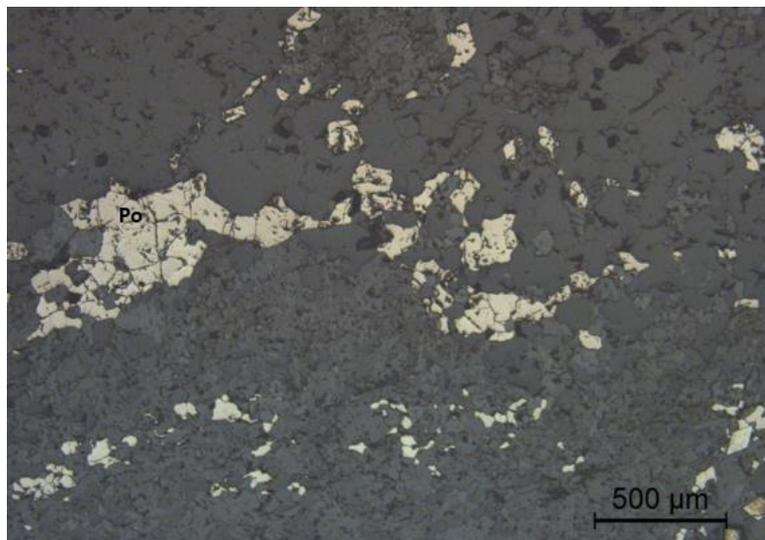


Figura 4.7 – Fotomicrografia em luz refletida ressaltando a pirrotita (Po) na amostra FGSBUD0440.

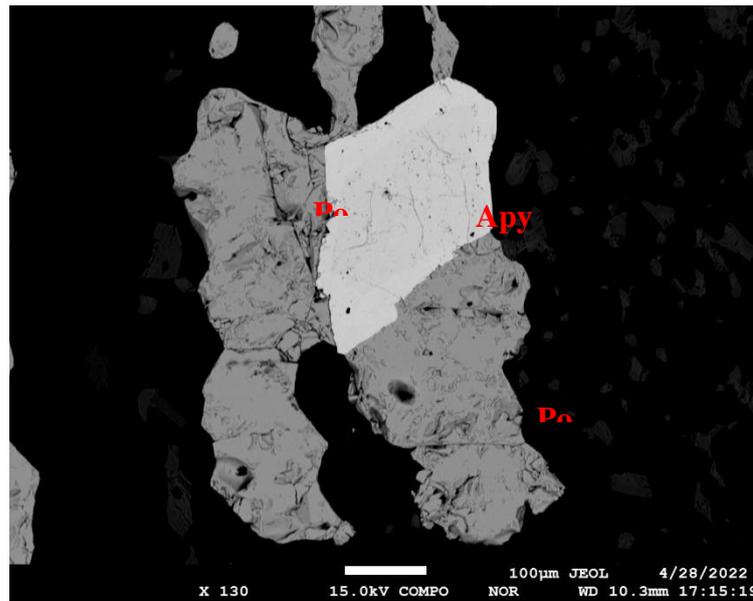


Figura 4.8 – Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) evidenciando pirita (Py) com inclusão de arsenopirita (Apy) (amostra 0449-02).

4.1.1 ARSENOPIRITA

A arsenopirita (fórmula ideal FeAsS) possui forte anisotropia, dureza alta, cor branca-creme, com duas direções de clivagem sendo uma distinta (101) e outra descontínua (010). É um dos guias prospectivos de Au mais importante para os geólogos da Mina Cuiabá, daí sua importância nas amostras.

Nas amostras estudadas, os cristais de arsenopirita apresentam hábito euédrico a subédrico, granulação variável entre 5mm e 40 mm, com uma proporção modal entre 10% e 15% (Figuras 4.4, 4.8 e 4.9). Muitas vezes elas aparecem como inclusões na pirita (Figuras 4.6 e 4.9) ou associadas com pirrotita (Figura 4.8).

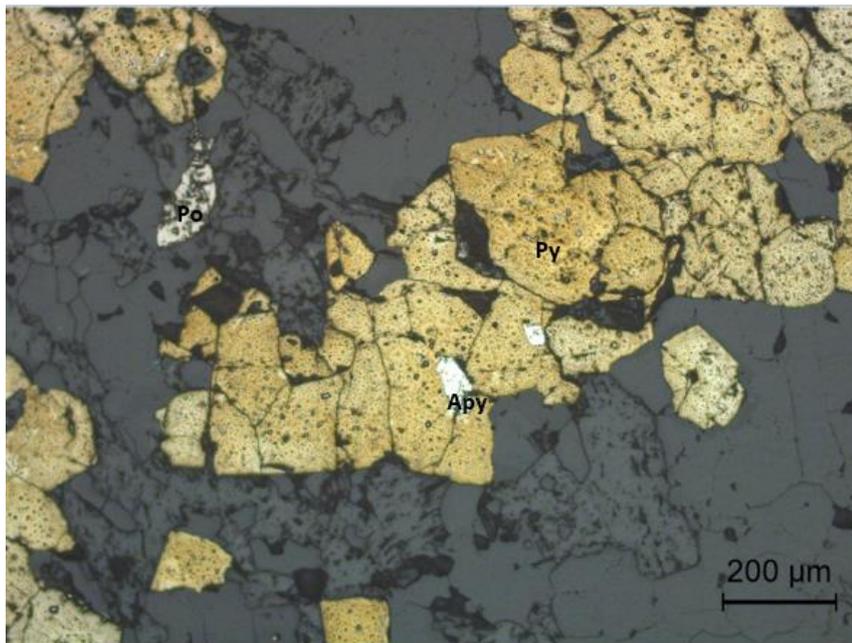


Figura 4.9 – Imagem com luz refletida com os principais sulfetos da amostra FGSBUD0440: pirita (Py), pirrotita (Po) e arsenopirita (Apy). Ressalta-se que a arsenopirita está inclusa na pirita.

4.1.2 CALCOPIRITA

A calcopirita (fórmula ideal CuFeS_2) deriva da estrutura da esfalerita, sendo possível substituição do zinco pelo ferro e cobre (Craig & Vaughan, 1990). As principais propriedades microscópicas são a anisotropia à luz refletida (sistema tetragonal de cristalização), clivagens (011) e (111) indistintas e coloração amarelo ouro (Deer *et al.* 1992).

Este sulfeto apresenta uma proporção modal entre 1% a 2% nas lâminas descritas em relação aos minerais opacos, hábito predominantemente subédrico e granulação média de 20mm (Figuras 4.4 e 4.10). Ocorre, na maioria das vezes, nas bordas de pirita e pirrotita (Figura 4.11). Em um campo da amostra 0449-02, foi encontrada uma inclusão de silicato na calcopirita, provavelmente clorita (Figura 4.11).

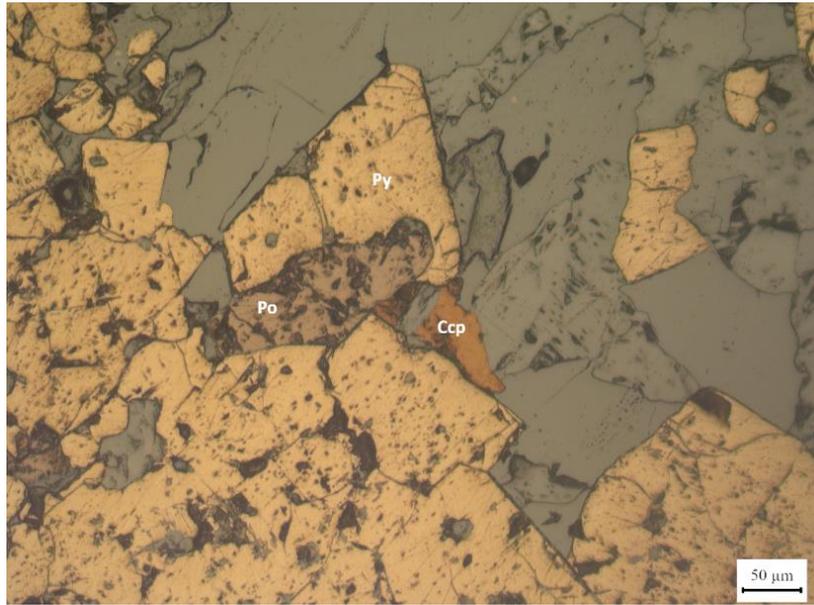


Figura 4.10 – Imagem com luz refletida com os principais sulfetos da amostra FGSBUD0449: pirita (Py), pirrotita (Po), calcopirita (Ccp).

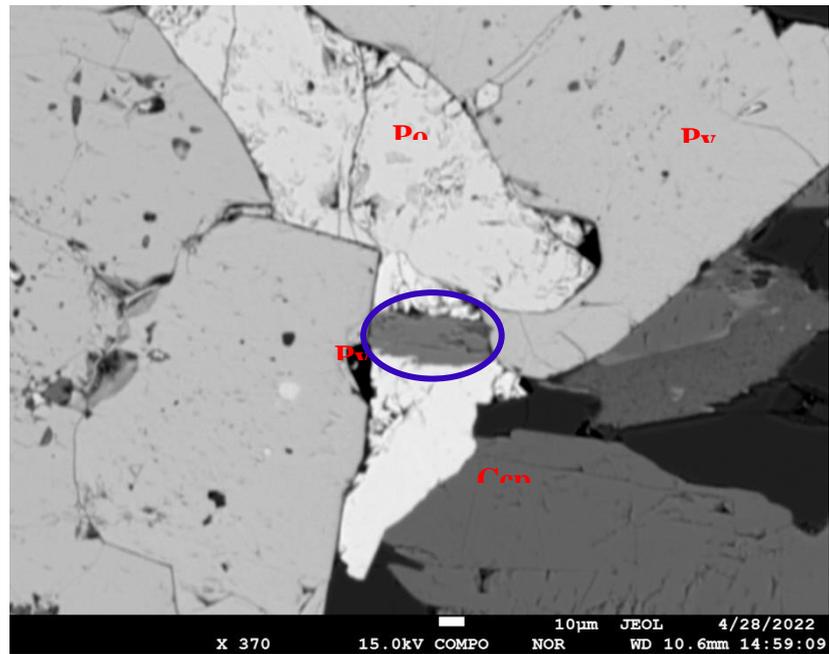


Figura 4.11 – Imagem de elétrons retroespalhados (BSE) evidenciando calcopirita (Ccp) associada com pirita (Py) + pirrotita (Po). Em azul está ressaltada uma inclusão de silicato, provavelmente clorita (amostra 0449-02).

4.1.3 ESFALERITA

A esfalerita (fórmula ideal ZnS) cristaliza-se no sistema cúbico e as principais propriedades ópticas são a clivagem (011) perfeita, a isotropia à luz refletida e a cor marrom (Deer *et al.* 1992).

Esse sulfeto apresenta em uma proporção modal de 1% na formação ferrífera bandada, hábito subédrico e granulação média de 10mm (Figura 4.12). Ela foi encontrada na amostra 0449-02 durante as análises químicas por EDS na microsonda eletrônica e está intimamente associada à calcopirita (Figura 4.4), estando crescida na borda deste mineral.

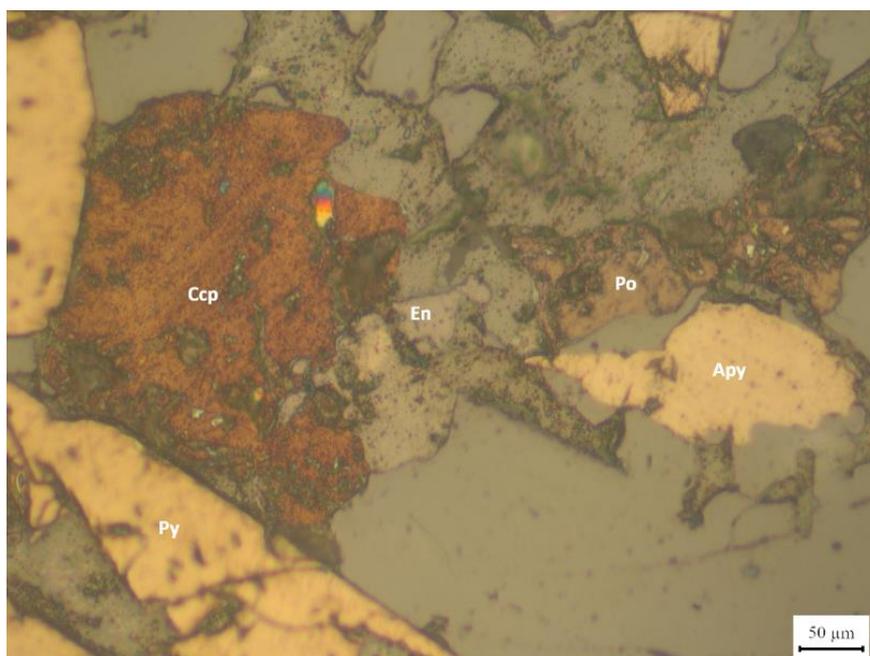


Figura 4.12 – Imagem com luz refletida com esfalerita (En), calcopirita (Ccp), arsenopirita (Apy), pirrotita (Po) e pirita (Py) da amostra FGDBUD0449.

4.2 QUÍMICA MINERAL DE SULFETOS

O estudo de química dos minerais opacos deste TCC foi baseado em análises qualitativas por EDS, em microsonda eletrônica, como descrito no item 1.5.3.2. Os principais sulfetos analisados foram pirita, pirrotita, arsenopirita, calcopirita e esfalerita, segundo perfis que incluíam em média de cinco a oito pontos ao longo de todo cristal, com o propósito de caracterizar núcleo e borda dos cristais. Todas as tabelas analíticas encontram-se ao longo do texto e foram construídos diagramas binários para enfatizar a distribuição de determinados elementos. Mapas químicos qualitativos de raios-x foram confeccionados visando ressaltar a, distribuição de elementos ao longo dos grãos, sua homogeneidade química etc.

4.2.1 Pirita

A distribuição dos elementos maiores está bastante homogênea nas piritas (Figura 4.13), sendo o teor de ferro compreendido no intervalo entre 50.16% e 51.6%, e o enxofre entre 47.4% e 49.1%. Dentre os elementos traços, o Pb e o Ni são os que mais se destacam, e variam respectivamente, entre 0.42% a 1.02% e 0.04% a 0.39%. Outros elementos como a prata, arsênio e cobalto também estão presentes na composição da pirita, porém com valores reduzidos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Resultados de análise de química mineral em cristais de pirita presentes na BIF (n.d. = não determinado).

Amostra	0449-02_campo 1_bec 1					
	1	2	3	4	5	6
Cristal						
Posição	borda	núcleo	núcleo	núcleo	borda	borda
Fe	51.13	51.04	50.75	51.85	51.25	50.16
Pb	nd	0.66	1.02	nd	nd	0.62
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.07	0.14	nd	0.03	nd	0.12
S	48.49	47.47	47.61	47.88	47.88	48.3
Co	0.03	0.22	0.12	nd	nd	nd
Ni	0.04	0.23	0.25	0.24	0.3	0.32
Cu	nd	nd	0.2	nd	nd	0.4
Zn	nd	nd	nd	nd	nd	nd
As	0.23	0.24	0.05	nd	nd	0.08
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0449-02_campo 1_bec 2		0449-02 campo 2 bec 1							
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8
Cristal										
Posição	borda	borda	borda	núcleo	núcleo	borda	borda	borda	núcleo	borda
Fe	50.76	50.7	50.87	51.1	50.64	50.1	51.07	50.87	50.93	50.91
Pb	0.43	0.84	nd	nd	nd	nd	0.44	0.42	nd	0.97
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	nd	0.19	0.07	nd	0.07	nd	nd	0.23	nd	nd
S	48.01	48.12	48.37	48	48.9	49.1	48.44	48.09	48.36	47.62
Co	0.3	nd	0.15	0.09	0.25	0.18	0.05	nd	nd	nd
Ni	0.37	nd	0.39	0.27	0.13	0.5	nd	nd	nd	nd
Cu	nd	0.15	0.39	0.27	0.13	0.5	nd	0.36	0.25	0.37
Zn	nd	nd	0.03	0.26	nd	0.08	nd	0.01	0.02	0.01
As	0.13	nd	0.12	0.09	0.01	0.04	nd	nd	nd	nd
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0449-01 campo 1 bec 3					
Cristal	1	2	3	4	5	11
Posição	borda	intermediária	núcleo	intermediária	borda	borda
Fe	51.45	51.1	51.84	51.05	51.21	53.54
Pb	nd	nd	nd	0.37	nd	0.94
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	nd	nd	0.11	0.14	0.07	0.08
S	47.4	48.14	47.82	48.11	48.23	43.64
Co	0.13	0.28	0.16	nd	0.06	nd
Ni	0.29	0.14	nd	0.13	0.32	0.26
Cu	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Zn	nd	nd	nd	nd	nd	nd
As	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0449-01 campo 1 bec 1				0449-01 campo 2 bec 02							
	1	2	3	4	9	10	11	12	13	14	15	
Posição	núcleo	borda	núcleo	núcleo	intermediária	borda	borda	intermediária	núcleo	intermediária	borda	
Fe	51.31	51.26	49.87	51.25	51.05	51.41	51.66	51.59	51.19	51.6	51.44	
Pb	nd	nd	nd	nd	nd	0.72	nd	0.6	0.2	nd	nd	
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Ag	nd	nd	nd	0.38	0.18	0.06	nd	nd	0.06	0.2	nd	
S	48.23	48.12	46.84	47.89	47.97	47.58	48	47.69	48.01	47.45	47.97	
Co	0.16	nd	0.22	0.06	0.08	0.04	nd	nd	0.07	0.41	0.18	
Ni	0.09	0.4	0.29	0.16	0.27	0.14	0.19	0	0.05	nd	nd	
Cu	0.08	0.22	0.16	0.14	0.19	0	0.05	nd	nd	nd	0.07	
Zn	nd	nd	0.27	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
As	0.13	nd	0.07	0.12	0.27	0.06	0.11	nd	0.15	nd	0.15	
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	

Amostra	0449-01 campo 2 bec 01			
Cristal	4	5	6	7
Posição	borda	intermediário	intermediário	intermediário
Fe	51.45	51.19	52.03	51.47
Pb	0.18	nd	nd	nd
Au	nd	nd	nd	nd
Ag	nd	0.25	0.38	0.19
S	47.04	47.33	47.33	47.47
Co	0.02	nd	0.04	0.41
Ni	0.24	0.08	0.16	0.38
Cu	0.34	0.06	nd	nd
Zn	nd	nd	nd	0.14
As	0.47	0.56	0.24	0.03
Hg	nd	nd	nd	nd

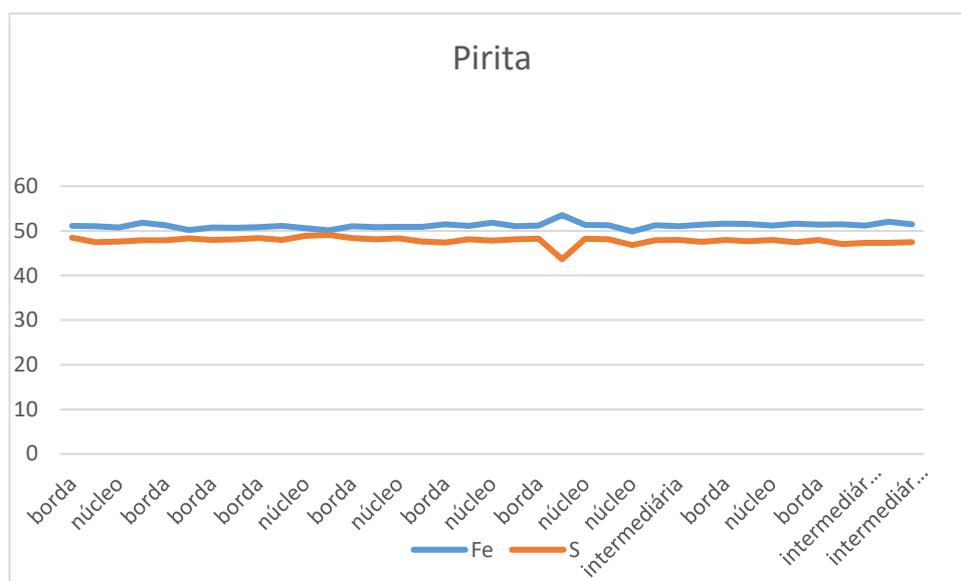


Figura 4.13 – Distribuição dos elementos Fe e S em cristais de pirita presentes nas formações ferríferas estudadas, evidenciando o padrão homogêneo.

4.2.2 PIRROTITA

Na pirrotita, a distribuição dos elementos maiores encontra-se homogênea (Figura 4.14), com os valores de Fe compreendido no intervalo entre 63.7% e 65.59% e do S entre 33.27% e 35.17%. Dentre os elementos traços, o Pb que varia entre 0.27% a 1.39%, e o Ni com porcentagens entre 0.01% e 0.45%. Outros elementos como a prata, arsênio e cobalto também estão presentes na composição da pirrotita, porém com valores reduzidos (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Resultados de análise de química mineral em cristais de pirrotita presentes na BIF (n.d. = não determinado).

Amostra	0449-02_campo 1_bec 1		0449-02_campo 1_bec 2		0449-02 campo 2 bec 01			0449-01 campo 1 bec 03
	8	9	10	9	10	11	10	
Posição	borda	núcleo	núcleo	borda	borda	núcleo	borda	
Fe	64.35	64.3	64.11	64.24	63.7	64.15	67.29	
Pb	0.27	1.09	0.35	1.39	0.61	0.98	1.04	
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Ag	nd	0.05	0.28	nd	0.16	0.24	0.03	
S	35.17	34.28	34.96	33.83	34.52	34.01	31.17	
Co	nd	0.11	nd	nd	nd	nd	0.25	
Ni	0.18	nd	0.31	0.29	0.55	0.35	nd	
Cu	nd	0.16	nd	0.06	0.36	0.05	nd	
Zn	nd	nd	nd	nd	0.07	0.15	nd	
As	0.03	nd	nd	0.19	0.03	0.06	nd	
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	

Amostra	0440-02 campo 1 bec 1								
Cristal	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Posição	borda	intermediário	núcleo	borda	borda	borda	núcleo	borda	núcleo
Fe	65.28	65.03	64.65	64.61	64.61	64.62	64.69	64.73	65.16
Pb	0.58	0.35	1.15	0.69	1.02	0.9	1	0.51	0.42
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.09	0.18	nd	0.04	0.14	0.07	nd	0.17	nd
S	33.75	34.05	33.68	34.15	33.96	34.4	33.75	34.02	34.05
Co	0.14	0	nd	0.11	0.04	nd	0.15	nd	nd
Ni	0.15	0.23	0.3	0.39	0.01	0.01	nd	0.32	0.14
Cu	nd	0.13	nd	nd	nd	nd	0.13	0.08	0.22
Zn	nd	nd	nd	nd	0.23	nd	0.28	0.09	nd
As	nd	0.03	0.23	nd	nd	nd	nd	0.08	0.01
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0440-02 campo 2 bec 1							
Cristal	9	10	11	12	13	14	15	16
Posição	intermediário	intermediário	borda	borda	intermediário	núcleo	intermediário	borda
Fe	64.79	64.18	64.66	64.36	65.22	65.59	64.56	64.56
Pb	1.1	0.76	1.28	1.14	0.79	0.91	0.68	1.91
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.14	0.06	0.02	0.02	0.02	0.07	nd	nd
S	33.48	34.12	33.5	33.6	33.45	33.07	34.04	33.27
Co	0.2	0.18	nd	0.1	0.12	nd	0.12	0.19
Ni	0.18	0.51	0.33	0.44	0.18	0.15	0.45	0.04
Cu	nd	nd	nd	0.17	nd	nd	0.06	nd
Zn	nd	0.15	nd	nd	nd	nd	0.1	nd
As	0.11	0.03	0.14	0.16	0.23	0.2	nd	0.04
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

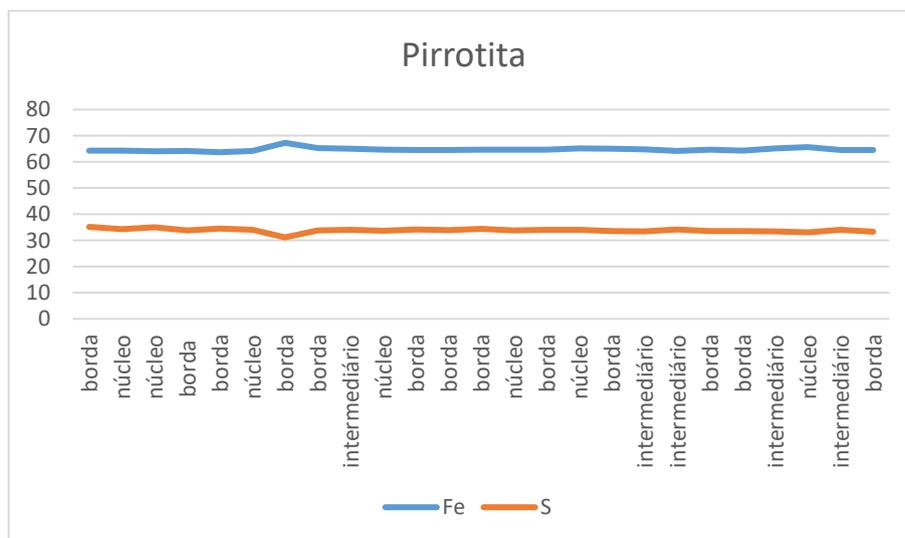


Figura 4.14 - Distribuição dos elementos Fe e S em cristais de pirrotita presentes na BIF.

4.2.3 ARSENOPIRITA

Os cristais de arsenopirita analisados possuem composição que variam entre 35.96% e 42.19% de Fe; 17.29% e 20.79% de S, e de 36.59% a 45.27% de As. Os elementos como Pb, Ni e Cu são considerados contaminantes traços (Tabela 4.3; Figura 4.15).

Tabela 4.3 - Resultados de análise de química mineral em cristais de arsenopirita presentes na BIF (n.d. = não determinado).

Amostra	0449-01_campo 1_bec 1					0449-01 campo 2 bec 2					
Cristal	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6
Posição	núcleo	núcleo	núcleo	borda	borda	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	núcleo	borda
Fe	37.39	37.83	37.66	36.56	37.9	36.87	37.76	36.99	37.31	37.96	37.6
Pb	nd	nd	nd	nd	nd	0.41	0.98	0.76	0.47	nd	0.49
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.17	nd	nd	0.07	nd	nd	0.33	0.07	0.26	0.35	nd
S	19.25	20.79	18.92	19.08	20.76	18.66	20.21	18.55	18.79	17.29	19.01
Co	0.15	0.05	nd	0.02	nd	0.05	nd	nd	nd	0.1	0.08
Ni	0.03	0.02	nd	0.34	0.15	0.24	0.15	0.11	nd	nd	0.04
Cu	nd	0.17	0.21	nd	nd	0.25	0.05	0.1	0.32	0.01	0.12
Zn	nd	nd	0.18	0.41	nd	0.07	0.35	nd	0.21	nd	nd
As	43.01	41.14	43.02	43.53	41.19	43.47	40.18	43.43	42.65	44.38	42.65
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0449-01 campo 2 bec 1				0440-01 campo 2 bec 1						
Cristal	2	3	8	9	1	2	3	4	5	6	7
Posição	borda	núcleo	núcleo	núcleo	borda	borda	borda	borda	borda	núcleo	borda
Fe	38.42	42.19	37.08	35.96	36.99	36.15	36.84	36.19	36.89	37.38	37.4
Pb	0.46	nd	0.18	nd	1.26	70	0.46	0.5	0.52	1.06	nd
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.09	0.25	0.02	nd	nd	0.12	nd	0.34	0.08	nd	0.06
S	20.39	19.73	19.01	19.21	17.76	18.12	17.58	17.5	18.25	19.07	19.38
Co	0.08	nd	nd	nd	nd	0.04	0.22	nd	nd	0	nd
Ni	0.22	0.15	0.18	nd	0.2	0.09	nd	0.2	0.09	0.03	0.1
Cu	nd	0.17	nd	0.46	0.04	nd	nd	nd	nd	nd	0.03
Zn	nd	nd	nd	0.14	0.02	0.71	0.14	nd	0.02	0.09	nd
As	40.44	36.59	42.68	43.34	43.73	44.06	44.75	45.27	44.15	42.36	43.04
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Amostra	0449-02 campo 1 bec 1					0449-02 campo 1 bec 02		
Cristal	12	13	14	15	16	3	4	6
Posição	borda	borda	borda	borda	núcleo	borda	borda	núcleo
Fe	37.79	37.74	36.69	36.02	35.96	36.79	36.68	37.72
Pb	0.6	0.73	0.81	1.2	2.16	1.55	0.46	1.27
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	0.11	nd	nd	nd	0.08	nd	0.15	nd

S	20.36	19.43	17.78	17.53	17.6	17.74	19.6	20.07
Co	nd	nd	nd	0.33	nd	0.13	nd	0.03
Ni	0.01	0.11	0.17	0.18	0.18	0.21	0.08	nd
Cu	0.31	nd	0.02	nd	nd	nd	0.08	nd
Zn	nd	nd	0.12	0.11	nd	nd	0.23	nd
As	40.82	41.99	44.39	44.64	44.01	43.58	42.72	40.91
Hg	nd							

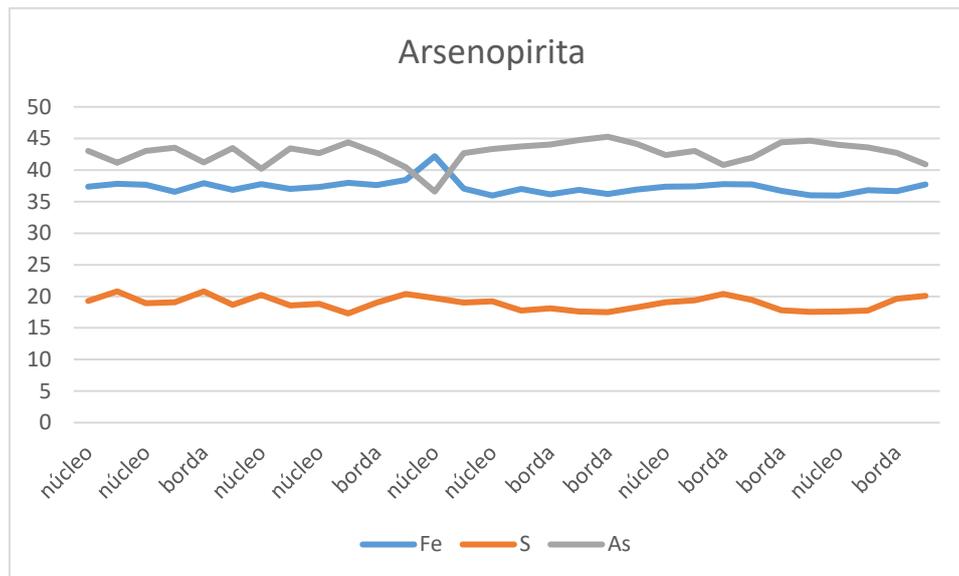


Figura 4.15- Distribuição dos elementos Fe, S e As em cristais de arsenopirita presentes na BIF.

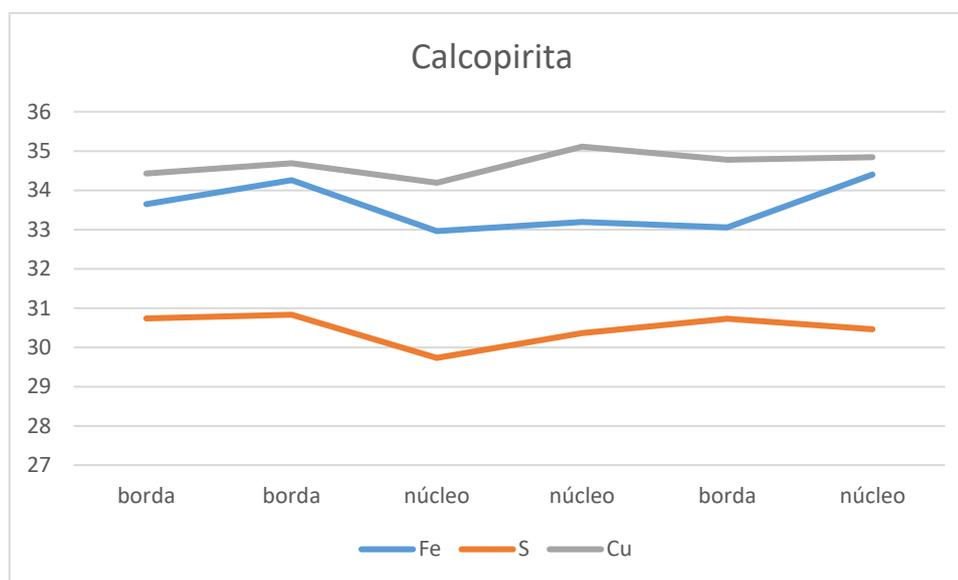
4.2.4 CALCOPIRITA

Os cristais de calcopirita analisados possuem composição de Fe que variam entre 33.05% e 34.26%, em relação ao S entre 29.73% e 30.83%, e o Cu variando entre 34.19% a 35.11%. Os elementos como As, Zn são considerados contaminantes traços (Tabela 4.4; Figura 4.16). Esse mineral é considerado acessório, pois perfaz 2% da rocha estudada.

Tabela 4.4 - Resultados de análise de química mineral em cristais de calcopirita presentes na BIF (n.d. = não determinado).

Amostra	0449-02_campo 1_ bec 1			0449-02 campo 1 bec 2		0449-02 campo 2 bec 1
	7	9	10	7	8	12
Posição	borda	borda	núcleo	núcleo	borda	núcleo
Fe	33.65	34.26	32.96	33.19	33.05	34.4
Pb	1.11	nd	1.79	1.17	0.8	nd
Au	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ag	nd	0.04	nd	0.02	nd	nd
S	30.74	30.83	29.73	30.36	30.73	30.46

Co	nd	0.15	nd	nd	nd	0.05
Ni	nd	0.15	nd	0.11	0.18	nd
Cu	34.43	34.69	34.19	35.11	34.78	34.84
Zn	nd	nd	nd	nd	0.26	0.25
As	0.02	nd	0.22	0.04	0.2	nd
Hg	nd	nd	nd	nd	nd	nd

**Figura 4.16** - Distribuição dos elementos Fe, S e Cu em cristais de calcopirita presentes na BIF.

4.2.5 ESFALERITA

Os cristais de esfalerita possuem composição de Fe que variam entre 5.01% e 5.51%, em relação ao S entre 29.73% e 25.96%, e o Zn variando entre 54.92% a 63.21%. Os elementos como Pb, As, Co são considerados contaminantes traços (Tabela 4.5; Figura 4.17). Esse mineral é considerado acessório, pois perfaz até 1% da rocha estudada.

Tabela 4.5 - Resultados de análise de química mineral em cristais de esfalerita presentes na BIF (n.d. = não determinado).

Amostra	0449-02_campo 1_bec 1	0449-02 campo 1 bec 2
Cristal	11	5
Posição	borda	núcleo
Fe	5.51	5.01
Pb	1.36	1.11
Au	nd	nd
Ag	0.04	nd
S	29.73	25.96
Co	0.03	0.05
Ni	nd	0.13
Cu	nd	nd
Zn	63.21	54.92
As	0.13	0.23
Hg	nd	nd

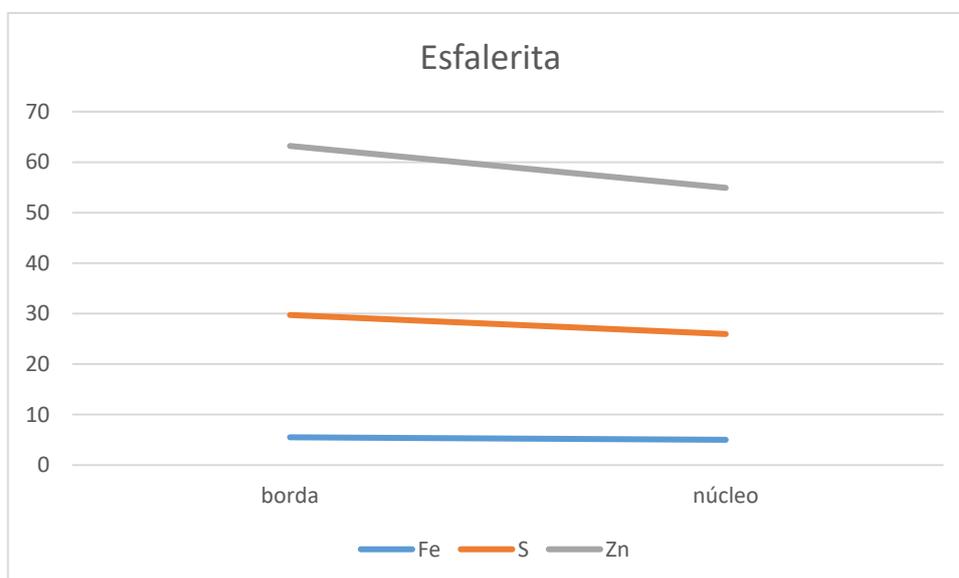


Figura 4.17 - Distribuição dos elementos Fe, S e Zn em cristal de esfalerita presente na BIF.

Em relação aos mapas químicos (Figuras 4.18 a 4.20), fica claro o padrão de distribuição homogêneo dos principais elementos de cada sulfeto, bem como a relação estreita entre alguns deles, como por exemplo, pirita – calcopirita – pirrotita. Outra questão interessante é que foi identificada esfalerita no minério da Mina Cuiabá, durante as análises microquímicas, especialmente ressaltadas pelo mapa químico de detalhe da amostra FGSBUD0449 (Figura 4.19).

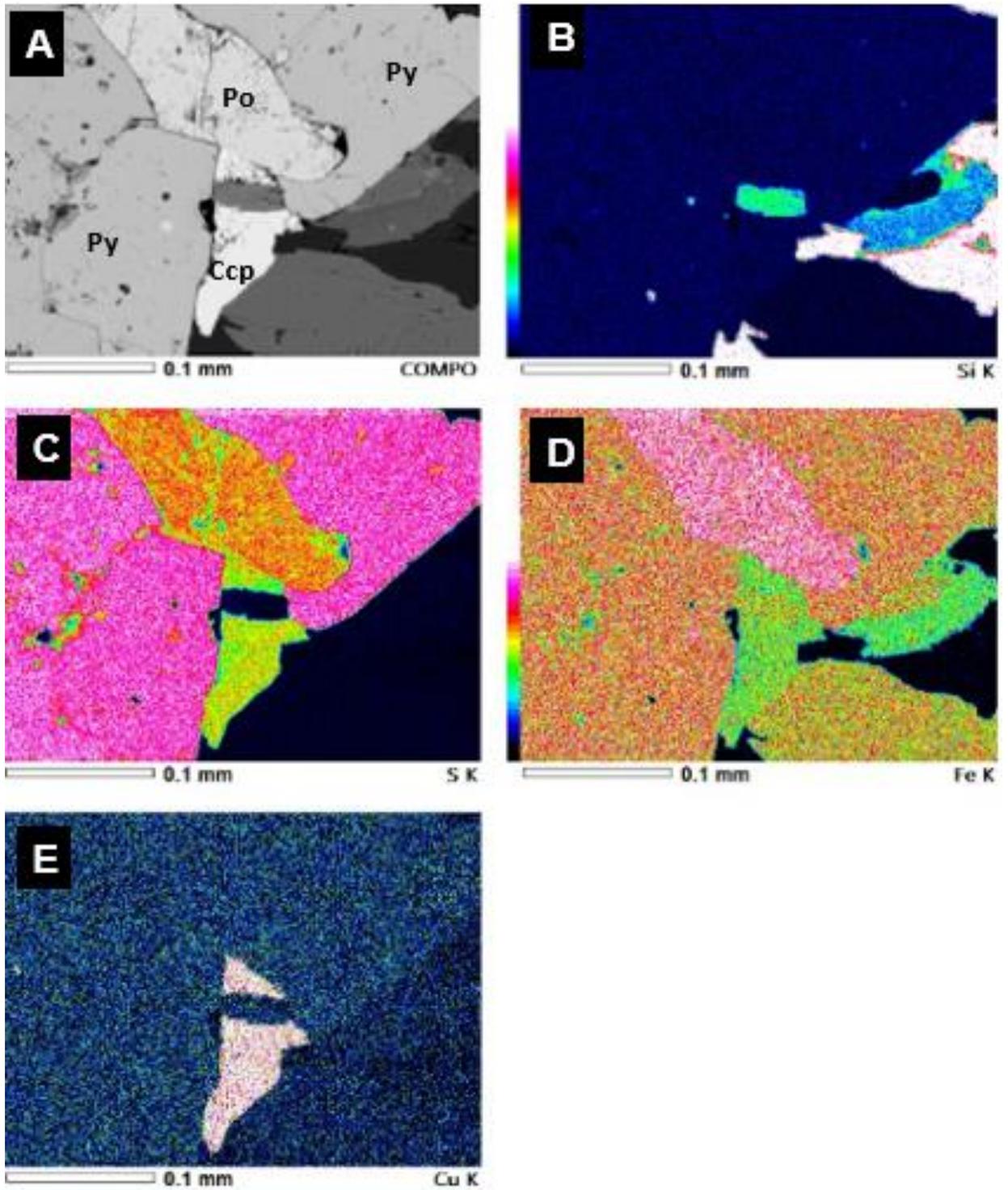


Figura 4.18 - Mapa geoquímico qualitativo que mostra a variação dos elementos Fe, Si, S e Cu na amostra FGSBUD0449 Po= pirrotita, Py=pirita e Ccp=calcopirita.

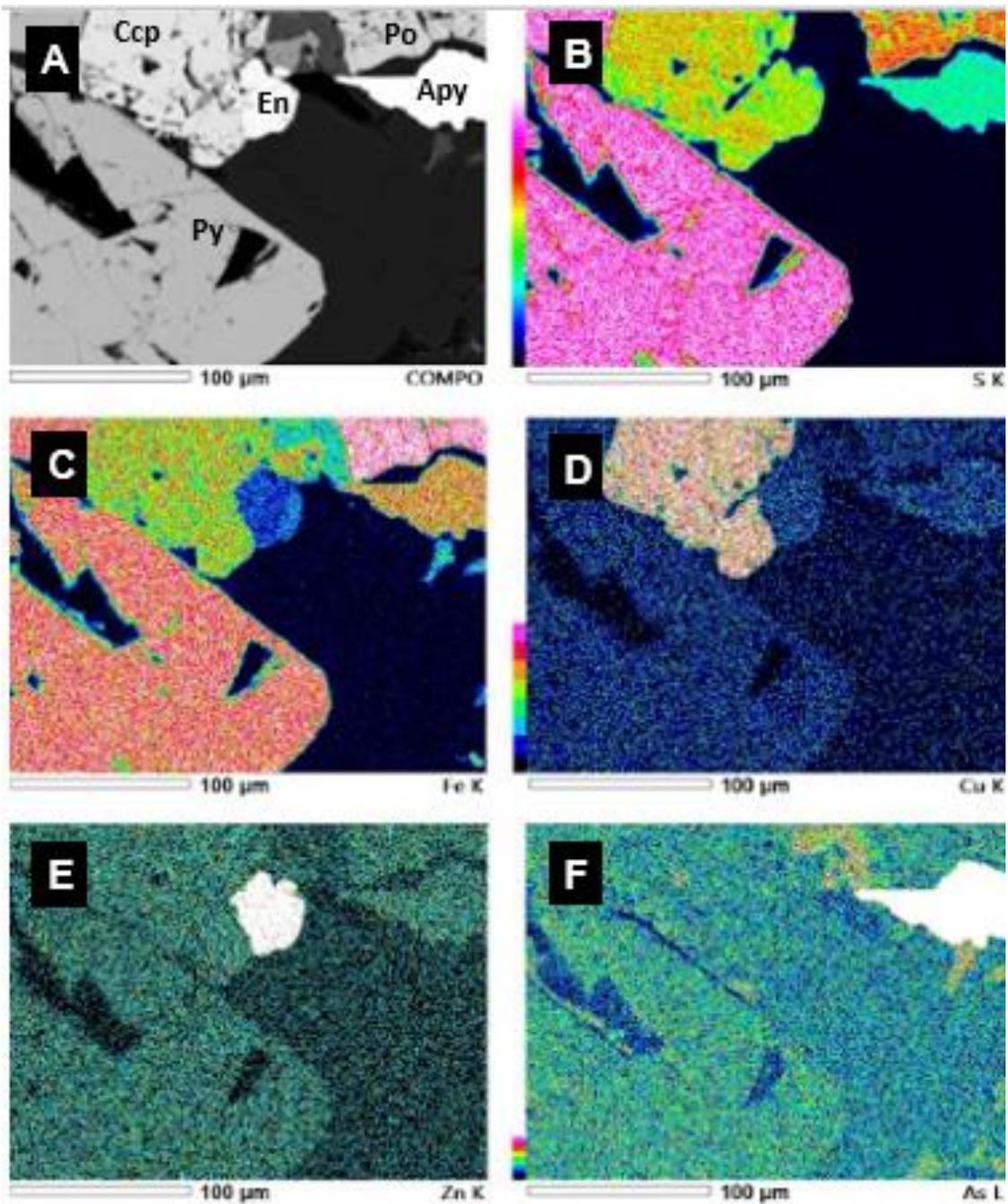


Figura 4.19 - Mapa geoquímico qualitativo que mostra a variação dos elementos Fe, S, Cu, Zn e As na amostra FGSBUD0449 Po= pirrotita, Py=pirita, Ccp=calcopirita, Apy=arsenopirita e En=esfalerita.

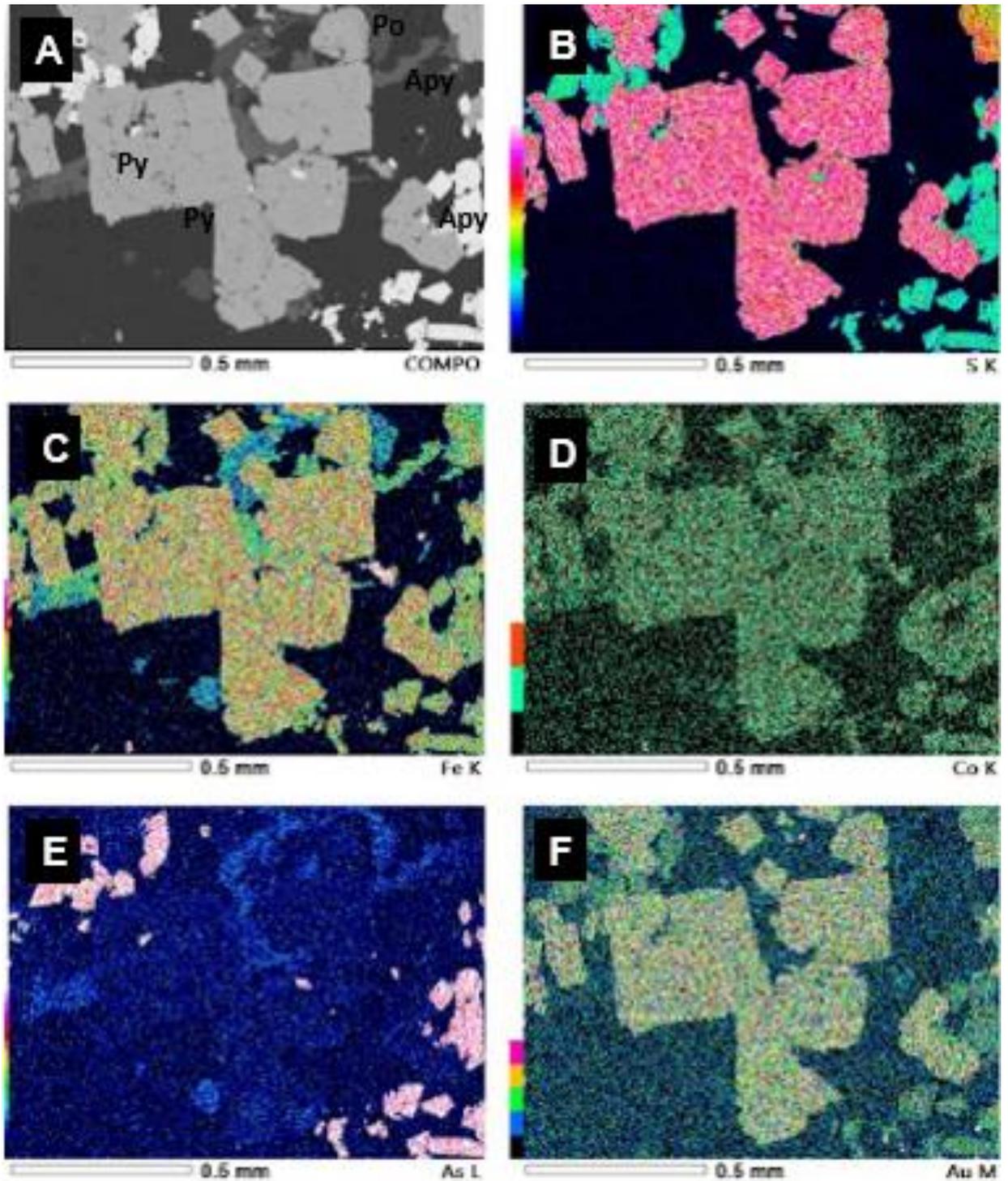


Figura 4.20 - Mapa geoquímico qualitativo que mostra a variação dos elementos Fe, Co, As e Au na amostra FGSBUD0440 Po= pirrotita, Py=pirita, Ccp=calcopirita e Apy=arsenopirita.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo verificar a composição petrográfica e química e respectiva qualidade do minério dos corpos Fonte Grande Sul e Serrotinho em um furo de sonda. A descrição petrográfica microscópica revelaram, em grande parte, as mesmas informações que os geólogos da mina descrevem nas amostras de mão dos furos de sonda. Em ordem decrescente de abundância, ocorrem pirita, pirrotita, arsenopirita, com calcopirita e esfalerita subordinadas. Esfalerita, aliás, foi descrita e quimicamente caracterizada no minério da Mina Cuiabá, fato que não é usual. De acordo com informações da geologia da mina, esfalerita é mais comum nos veios de quartzo. Trata-se de grãos diminutos, frequentemente associados com calcopirita e pirrotita. A ganga é representada majoritariamente por quartzo, carbonato e clorita.

Em relação à análise química dos sulfetos, de acordo com os elementos maiores (Fe, S, As, Zn e Cu) há uma distribuição homogênea ao longo dos grãos. O que varia é a distribuição dos elementos traços (Ni, Pb, Co, As, Cu, Ag, Pb, Zn). O Pb e Ni são os elementos traços com maior distribuição no minério, e o As, quando não é elemento maior como na arsenopirita, ainda pode estar presente e quantidades a serem consideradas. Ag também foi detectada em alguns pontos. Au não foi detectado por: (i) estar ausente nas amostras a partir das quais foram confeccionadas as lâminas para análises ou, (ii) o teor está abaixo do limite de detecção do método utilizado.

A Mina Cuiabá já foi alvo de diversos estudos com relação à sulfetação *versus* hidrotermalismo. Um dos mais recentes e importantes, o de Kresse *et al.* (2018), buscou entender a evolução dos fluidos hidrotermais a partir da análise de isótopos de S e de química mineral dos principais sulfetos relacionados ao depósito de ouro orogênico da Mina Cuiabá. Nesse trabalho, os autores caracterizam 5 gerações de pirita com base na análise textural dos cristais, assim subdivididas: (i) *pirita 1*, esponjosa e singenética, presente somente nos xistos carbonosos da mina e não relatada neste TCC; (ii) *pirita 2*, porosa; (iii) *pirita 3*, mais límpida (lisa) e associada à uma fase principal; (iv) *pirita 4*, mais límpida (lisa) e isolada e, (v) *pirita 5*, sobrecrescida nos estágios hidrotermais finais. As piritas 2 e 3 estão associadas à todos os litotipos da mina, incluindo os xistos carbonosos, BIF e rochas metavulcânicas, enquanto que os tipos 4 e 5 associam-se somente às formações ferríferas. Por não ter sido o objetivo principal deste TCC e pela pequena quantidade de amostras analisadas – num total de 4 – não foi realizada esta classificação dos grãos. Pela análise textural das nossas amostras, as piritas foram classificadas como euédricas e subédricas, predominantemente límpidas e lisas. Entretanto, não conseguimos distinguir entre as gerações 3 à 5, por exemplo. Kresse *et al.* (2018) também realizaram um importante estudo mineral de pirita, pirrotita e arsenopirita provenientes dos xistos carbonosos e

formações ferríferas da mina, utilizando o sistema WDS da microsonda eletrônica e laser ablation. Por serem métodos mais robustos, os autores conseguiram avançar na caracterização microquímica dos sulfetos. Neste TCC, percebemos que, à semelhança do trabalho de Kresse *et al.* (2018), os sulfetos incorporam elementos traços na estrutura cristalina – Co, Ni, As, Ag, Pb e Cu podem ser destacados. Gráficos como Co x Ni que indicam filiação têm sido cada vez mais comuns nos estudos calcográficos, especialmente em se tratando de sulfetos provenientes de amostras de pelito carbonáceo. De acordo com Gregory *et al.* (2015, a, b; *in* Kresse *et al.* 2018), piratas hidrotermais apresentam teores de Co superiores a 400 ppm, gerando taxas Co/Ni maiores do que 1; enquanto piratas singenéticas possui < 100 ppm de Co, apresentando Co/Ni < 1. Neste TCC não foi feita a análise do gráfico Co x Ni porque as amostras analisadas para microquímica foram as de formação ferrífera bandada.

Finalizando as discussões do TCC, podemos sugerir algumas hipóteses (Figura 5.1) para explicar o motivo da aparente mudança da qualidade do minério nos níveis mais profundos da Mina Cuiabá, deixando clara a ressalva de que trabalhos futuros e mais robustos com relação à amostragem mais detalhada e à análise petrográfica e microquímica comparativa com os níveis mais rasos da mina devem ser realizados.

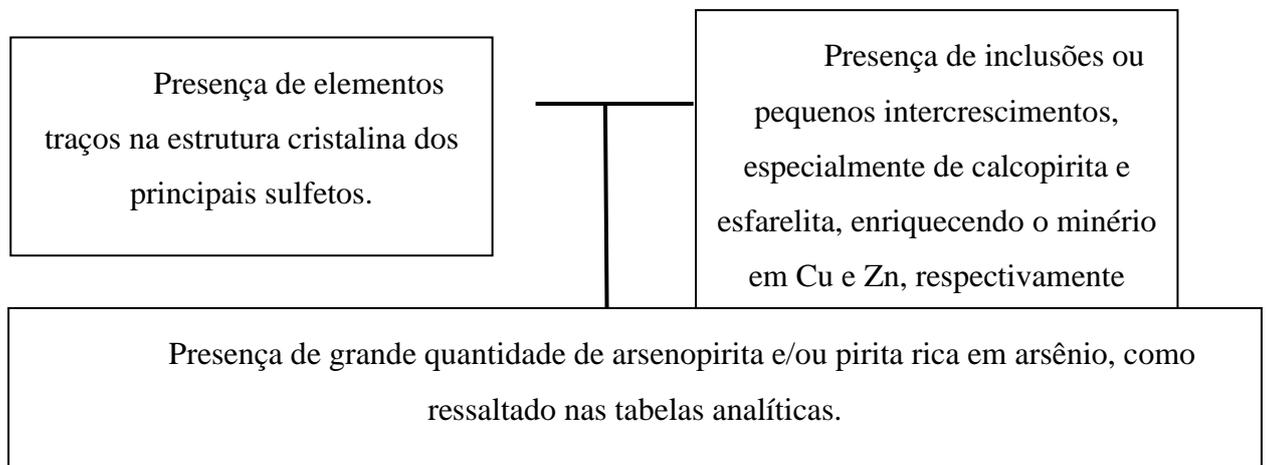


Figura 5.1 – Organograma final com a sugestão das três principais hipóteses para a mudança qualitativa do minério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F. & Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region. Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90 (1-2):29-58.
- Alkmim F.F. & Martins-Neto, M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33, 127–139.
- Almeida F. F. M. 1977. O Craton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 7 (4): 349- 364.
- Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U., & Kawashita, K. 1973. The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In *The South Atlantic* (pp. 411-446). Springer, Boston, MA.
- Ávila C.A., Teixeira W., Bongiolo E.M., Dussin I.A., Vieira T.A.T. 2014. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the Southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 243:221-251.
- Baltazar O.F. & Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 1–2.
- Chemale Jr., F., Rosiére, C. A. & Endo, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 65, 25–54.
- Craig, J. R., & Vaughan, D. J. 1990. Compositional and textural variations of the major iron and base-metal sulphide minerals. In *Sulphide deposits—their origin and processing* (pp. 1-16). Springer, Dordrecht.
- Dopico C.I.M., Lana C.C., Moreira H.S., Cassino L.F., Alkmim F.F. 2017. U–Pb ages and Hf-isotope data of detrital zircons from the late-Neoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. *Precambrian Research*, 291:143-161.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper 614 –A, 110 p.
- Dutra, L. F., Dias, S. P., Martins, M., Lana, C., Batista, A. C., & Tavares, T. D. 2020. Detrital zircon records of the Paleo-Mesoproterozoic rift-sag Tamanduá Group in its type-section, Northern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 50.
- Endo I., Machado R., Galbiatti H.F., Rossi D.Q., Zapparoli A. de C., Delgado C.E.R., Castro P. de T.A., Oliveira M.M.F. de. 2020. Estratigrafia e evolução estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.* (Org. Castro P. de T.A, Endo I., Gandini A.L.) Belo Horizonte : 3i Editora, 70-113.

- Farina, F., Albert, C., Dopico, C. M., Gil, C. A., Moreira, H., Hippertt, J. P., Lana, C. 2016. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 4-21.
- Galindo, K. B. T., Lins, C. M. M. S., Amorim, A. L., do Nascimento Guimarães, L. J., de Souza, D. B., & Nunes, C. F. 2016. Estudo Experimental das Tensões e Deformações de uma Rocha Carbonática Sintética Durante a Dissolução Química.
- Graton, L. C., & Bjorge, G. N. 1929. Geology of Morro Velho Mine. Unpubl. Private Report. St. John del Rey Mining Company. Mineração Morro Velho.
- Howie, R. A., Zussman, J., & Deer, W. 1992. An introduction to the rock-forming minerals (p. 696). London, UK: Longman.
- Kresse, C., Lobato, L. M., Hagemann, S. G., & e Silva, R. C. F. 2018. Sulfur isotope and metal variations in sulfides in the BIF-hosted orogenic Cuiabá gold deposit, Brazil: Implications for the hydrothermal fluid evolution. *Ore Geology Reviews*, 98, 1-27.
- Kuchenbecker, M., Babinski, M., Pedrosa-Soares, A. C., Lopes-Silva, L., & Pimenta, F. 2016. Chemostratigraphy of the lower Bambuí Group, southwestern São Francisco Craton, Brazil: insights on Gondwana
- Ladeira E. A. 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Unpubl. PhD thesis, University of Western Ontario, London, 272 pp.
- Leal, L. R. B., Teixeira, W., Cunha, J. C., Leal, A. B. D. M., Macambira, M. J. B., & Rosa, M. D. L. D. S. 2000. Isotopic signatures of paleoproterozoic granitoids of the Gavião block and implications for the evolution of the São Francisco craton, Bahia, Brazil.
- Lobato L. M., Ribeiro-Rodrigues L. C., Vieira F. W. R. 2001. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of the gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*. 36: 249-277.
- Lobato L. M., Ribeiro-Rodrigues L. C., Zucchetti M., Noce C. M., Baltazar O. F., Pinto C. S. C. P. 2001. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic and structure setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36: 228-248.
- Lobato, L. M., Santos, J. O. S., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., & Noce, C. M. 2007. U–Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32(3-4), 674-680

- Silva, C. G. B., 2022, Caracterização petrográfica e de química mineral do minério em níveis inferiores dos corpos ...
- Lobato, L. M., Santos, J. O. S., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., & Noce, C. M. 2007. U–Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32(3-4), 674-680.
- Lobato, L. M., Vieira, F. W. D. R., Rebeiro-Rodrigues, L. C., Pereira, L. M. M., De Menezes, M. G., Junqueira, P. A., & Pereira, S. L. M. 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralizations associated with the Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero: Part I, description of selected gold deposits. *Brazilian Journal of Geology*, 28(3), 339-354.
- Madureira, R. D. S., Martins, M., Queiroga, G., Lana, C., Dutra, L. F., & Alkmim, A. R. 2021. Depositional setting and U-Pb detrital record of rift-related deposits in the Moeda Formation (Minas Supergroup) at the Gandarela and Ouro Fino synclines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 51.
- Marshak S. & Alkmim F.F. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics* 8: 555-571.
- Mesquita, M. J., de Fátima Bitencourt, M., Nardi, L. S., Picanço, J., Chemale Jr, F., & de Almeida Pimenta, V. 2017. Rhyacian A-type tholeiitic granites in southern Brazil: Geochemistry, U–Pb zircon ages and Nd model ages. *Lithos*, 277, 92-108.
- Moreira, H., Lana, C., & Nalini Jr, H. A. 2016. The detrital zircon record of an Archaean convergent basin in the Southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 275, 84-99.
- P. A., & Pereira, S. L. M. 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralizations associated with the Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero: Part I, description of selected gold deposits. *Brazilian Journal of Geology*, 28(3), 339-354.
- Padula, R. C., Ashanti, A., & de Figueiredo, R. P. 2016. Determinação de um Fator de Correlação a Partir da Classificação do Maciço Rochoso na Mina de Cuiabá (Sabará, Minas Gerais). *Paleoenvironments. Brazilian Journal of Geology*, 46, 145-162.
- Queiroz Y. da S., et al. Queiroga G., Moraes R., Fernandes V.M.T., Medeiros-Júnior E., Jordt-Evangelista H., Schulz B., Schmiedel J., Martins M., Castro M.P de, Lana C. 2019. Pseudosection modeling and U-Pb geochronology on Piranga schists: role of Brasiliano Orogeny in the Southeastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 49(3): 1-11.
- Ramsay, J. G., & Huber, M. I. (1987). *Modern structural geology. Folds and Fractures*, 2, 309-700.
- Ribeiro Tropaia, I., & Peluci de Figueiredo, R. 2015. Análise das tensões in situ na Mina Cuiabá–Sabará–Minas Gerais–Brasil. In *Integrating Innovations of Rock Mechanics* (pp. 35-42). IOS Press.

- Ribeiro-Rodrigues, L. C., de Oliveira, C. G., & Friedrich, G. 2007. The Archean BIF-hosted Cuiabá Gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32(3-4), 543-570.
- Roncato Júnior, J. G., Lobato, L. M., Lima, L. C., Porto, C. G., & Silva, R. C. F. 2015. Metaturbidite-hosted gold deposits, Córrego do Sítio lineament, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 5-22.
- Seixas L.A.R., Bardintzeff J.M., Stevenson R., Bonin B. 2013. Petrology of the high- Mg tonalites and dioritic enclaves of the ca. 2130 Ma Alto Maranhão suite: evidence for a major juvenile crustal addition event during the Rhyacian orogenesis, Mineiro Belt, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 238:18-41
- Teixeira W., Ávila C.A., Dussin I.A., Corrêa Neto A.V., Bongioiolo E.M., Santos J.O., Barbosa N.S. 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 Research*, 256:148-169
- Teixeira, A. S., Ferreira Filho, C. F., Della Giustina, M. E. S., Araújo, S. M., & da Silva, H. H. A. B. 2015. Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: evidence for a PGE-mineralized magmatic suite in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 116-138.
- Tolbert, G. E. (1962). Geology of the Raposos Gold Mine, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 59(5), 775-798.
- Vial, D. S., DeWitt, E., Lobato, L. M., & Thorman, C. H. 2007. The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32(3-4), 511-542.
- Vieira F.W.R. 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In: E.A. Ladeira (ed.) *Brazil Gold'91: The economics, geology, geochemistry and genesis of gold deposits*. Balkema, Rotterdam, p. 319-325.
- Vitorino, A. L. A. 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.
- Vitorino, A. L., e Silva, R. C. F., & Lobato, L. M. 2020. Shear-zone-related gold mineralization in quartz-carbonate veins from metamafic rocks of the BIF-hosted world-class Cuiabá deposit, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Vein classification and structural control. *Ore Geology Reviews*, 103789.
- Whitney, D. L. & Evans, B. W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*.
- Zucchetti M. & Baltazar O.F. (eds.). 1996. Projeto Rio das Velhas—Texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000. 2nd ed. Departamento Nacional da Produção Mineral/CPRM—Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, Brasil, 122 p.

Silva, C. G. B., 2022, Caracterização petrográfica e de química mineral do minério em níveis inferiores dos corpos ...

Zucchetti M. 1998. Geoquímica dos Metabasaltos do Grupo Nova Lima, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Dissertação de Mestrado, 97 p.

Zucchetti, M., Lobato, L. M., & Baltazar, O. F. (2000). Volcanic and volcanoclastic features in archean rocks and their tectonic environments, Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, MG–Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 30(3), 388-392.
