

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

CRISTIAN RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE DS MINERAIS OPACOS POR EBSD DO VALE DO CURAÇÁ/BA-
UMA ABORDAGEM GEOMETALÚRGICA**

CURITIBA
2024

CRISTIAN RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE DOS MINERAIS OPACOS POR EBSD DO VALE DO CURAÇÁ/BA-
UMA ABORDAGEM GEOMETALÚRGICA**

Trabalho de Conclusão de curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Paraná como
requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Geologia

Orientadora: Prof^a.Dr^a. Ariadne Borgo

CURITIBA

2024

Dedicatória

A minha mãe e ao meu pai

*“Tivemos momentos difíceis, não tinha casa pra morar
o cair é do homem, mas o alevantar é Deus”*

Emicida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal do Paraná, essa instituição tão prestigiada, por possibilitar que o filho de um segurança e de uma zeladora, cria do Cajuru, de origem carioca, pudesse alcançar este momento tão célebre, concluir o curso de Geologia. Universidade essa, que mesmo passando por um processo claro de sucateamento, continua oferecendo um ensino de superior da mais alta qualidade para todos. Obrigado por permitir que o meu sonho fosse palpável. A sensação de adentrar naquelas salas, no restaurante universitário e nos laboratórios pela primeira vez, nunca serão apagados do meu coração.

Ao departamento de Geologia, deixo minha mais sincera gratidão por todo o suporte ao longo desses anos. Aos caros docentes, que ao longo desses anos compartilharam não só conhecimento, mas trocaram vivências e conselhos, agradeço a cada um de vocês

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ariadne Borgo, por toda a orientação no período de elaboração deste trabalho, porém, agradeço também pelas conversas e pelas orientações sobre a vida e, acima de qualquer coisa, obrigado por acreditar em mim quando ninguém mais fazia o mesmo, obrigado por tudo.

Aos meus grandes amigos que eu tive a oportunidade de conhecer na geologia vocês vão estar comigo para sempre, Daniel Carminatti (Dani), Angela Rodizes (Angel), Gabriel Sereneski (Serene) e Marcello Zanella (Zanella), Celeste Bertassoni (Cel), me faltam palavras para agradeço vocês por cada risada, cada palhaça ou cada momento compartilhado nesses anos, foi incrível compartilhar momentos bons e ruins com vocês.

Faço um destaque à minha equipe do mapeamento de graduação a Equipe X, Milena Coraleski (Fernanda) e Arthur Ortiz (Ortiz/Tito). Os momentos que vivemos durante a graduação, e com toda certeza, o período do mapa de graduação ficarão guardados no meu coração. Vocês são irmãos que a graduação me deu. Obrigado por todos os conselhos, risadas, abraços e momentos que nós tivemos.

A minha amada família, minha mãe Shirley, mulher guerreira e batalhadora, que sempre se esforçou ao máximo para cuidar, me amar e que me ensinou a importância e o valor da família. Obrigado por tudo que a senhora fez por mim minha mãe. Agradeço ao meu pai Eric, por todos os ensinamentos, pelo exemplo de que nunca é tarde demais para estudar e por me mostrar que nós construímos o nosso

próprio destino, independentemente de onde viemos, obrigado meu pai. Aos meus avós Athayde (Seu Zica) e Maria Lúcia (*in memoriam*), obrigado pelo carinho e incentivo, espero que a senhora esteja orgulhosa aí de cima vó.

À minha parceira de vida, meu amor, minha eterna namorada, Etienne Kawany. Meu bem, obrigado por estar ao meu lado sempre. Por me amar, me incentivar e ser o meu ombro amigo, mesmo quando eu achava que nada daria certo, você sempre me apoiou e me incentivou a superar as adversidades.

Agradeço aos meus professores do ensino médio, que diziam que eu não serviria nem para ser lixeiro, ou que eu nunca conseguiria ser alguém na vida. De certa forma, esse trabalho aqui é para vocês também, por que, as palavras de vocês me serviram de combustível para que conseguisse provar que vocês estavam errados.

RESUMO

A Província Cuprífera do Vale do Curaçá é constituída por uma sequência litoestratigráficas de rochas com alto grau metamórfico. As mineralizações de cobre ocorrem como lentes alongadas e associadas a corpos máficos (noritos-piroxeníticos e anfibolíticos). Esses corpos possuem dimensões variadas e contêm mineralizações com sulfetos de cobre. Devido à complexidade de ocorrência da mineralização e como ela pode impactar no processo de beneficiamento, é essencial destacar a geometalurgia como uma ferramenta essencial na otimização dos processos de beneficiamento. Essa área envolve a caracterização tecnológica, por meio do estudo detalhado das rochas mineralizadas, minério e ganga, com base em suas propriedades físicas e mineralógicas. A caracterização será focada nos óxidos e sulfetos associados à mineralização e envolverá o emprego da petrografia e microscopia eletrônica de Varredura com diferentes detectores acoplados. Por meio da análise petrográfica é possível definir alguns parâmetros, como identificação das fases minerais presentes, dimensionamento destas fases, caracterização das texturas dos sulfetos e óxidos e a relação com os minerais de ganga, o que impacta no grau de liberação mineral e a estimativa da moda da mineralização. Os minerais metálicos que constituem as paragêneses da mineralização primária e secundária possuem características tecnológicas distintas, especialmente no que diz respeito ao grau de liberação mineral e a proporção Cu:Fe, devendo ser avaliados em conjunto com os respectivos minerais de ganga para otimizar a recuperação do cobre no processo de beneficiamento. Deste modo, este trabalho objetiva realizar a caracterização tecnológica das fases minerais metálicas, minério e ganga, do depósito de cobre da mina Pilar. Foram analisadas 7 amostras com litotipos distintos, onde foram caracterizadas petrograficamente além das técnicas analíticas empregadas (MEV-EBSD). Observou-se um cenário favorável para o processo de exploração e beneficiamento para as amostras de ortopiroxênitos e as brechas hidrotermalizadas. Já os flogopititos demonstraram limitações operacionais, o que compromete a viabilidade metalúrgica.

Palavras-chave: Vale do Curaçá; Mina do Pilar; Minério de cobre; Geometalurgia; Beneficiamento mineral;

ABSTRACT

The Curaçá Valley Copper Province consists of a lithostratigraphic sequence of rocks with a high metamorphic grade. Copper mineralization occurs as elongated lenses associated with mafic bodies (norite-pyroxenitic and amphibolitic). These bodies vary in size and contain copper sulfide mineralization. Due to the complexity of the mineralization and its potential impact on beneficiation processes, it is essential to highlight geometallurgy as a critical tool for optimizing mineral processing. This field involves technological characterization through a detailed study of mineralized rocks, ore, and gangue, based on their physical and mineralogical properties. The characterization focuses on the oxides and sulfides associated with the mineralization, employing petrography and scanning electron microscopy (MEV) with various attached detectors. Petrographic analysis allows the determination of parameters such as the identification of mineral phases, sizing of these phases, characterization of sulfide and oxide textures, and their relationship with gangue minerals. These factors directly influence the degree of mineral liberation and the estimation of the mineralization mode. The metallic minerals constituting the primary and secondary mineralization parageneses exhibit distinct technological characteristics, particularly concerning the degree of mineral liberation and the Cu:Fe ratio. These characteristics must be evaluated alongside the associated gangue minerals to optimize copper recovery during beneficiation. This study aims to conduct the technological characterization of metallic mineral phases, ore, and gangue from the copper deposit of the Pilar Mine. Seven samples with distinct lithotypes were analyzed petrographically and through advanced analytical techniques (MEV-EBSD). The results indicate a favorable scenario for exploitation and beneficiation processes in the orthopyroxenite and hydrothermally altered breccia samples. Conversely, the phlogopitites displayed operational limitations, compromising their metallurgical viability.

Keywords: Curaçá Valley; Pilar Mine; Copper ore; Geometallurgy; Mineral beneficiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa Geológico do segmento norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (OIS). Fonte: Teixeira et al, (2010).....	15
Figura 2 - Diagrama de evolução paragenética para as amostras da Mina da Caraíba. Fonte: Garcia (2013).	18
Figura 3 - Modelo do desenvolvimento da Geometalugia. Adaptado de Lund (2013).	19
Figura 4- Fluxograma do processo de beneficiamento desenvolvido na mina Caraíba. Fonte: Barreto (2020).	21
Figura 5 - Politriz semiautomática MiniMet™ 1000 da marca Buehler disponível no CME/UFPR. Fonte: O autor, 2024.....	23
Figura 6 - Esquema de instalação da tela fosforescente (TF) e da câmera de baixa luminosidade (CBL) junto à amostra por 70°.São indicadas também as lentes de controle na coluna de elétrons. Fonte: Morales,2007.....	25
Figura 7 - Diagrama esquemático do sistema ótico de luz refletida. Fonte: Machado (2017).....	26
Figura 8- Figura A) representação da lâmina AM 01 MSB; Figura B) representação da lâmina Am01 MSB, com divisão dos 28 setores. Fonte: O autor, 2024.	28
Figura 9 - Representação da setorização da lâmina, com destaque para o setor A. A imagem A') representa um setor rico em piroxênio e ortopiroxênio, onde é possível observar em luz refletida, que os sulfetos possuem granulometria que varia entre 0,03mm a 0,2mm. Na imagem B'), é possível observar a ocorrência de intercrescimento da calcopirita+magnetita. Fonte: O autor, 2024.	30
Figura 10- Representação da setorização adotada para o Setor B. Nas figuras A e B, é possível observar a baixa concentração de sulfetos, porém o predomínio de magnetita ao longo deste setor. Fonte: O autor, 2024.	31
Figura 10 - Representação do setor A. Na imagem A', é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos na forma de textura intercumulus, juntamente com a ocorrência do intercrescimento calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.....	32
Figura 11 - Esquema da setorização adotada. A imagem A' representa a forma de ocorrência dos sulfetos, onde a calcopirita se encontra na forma de textura intercumulus. É possível observar que há o intercrescimento entre a calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.	33

- Figura 12** - Esquema de setorização adotada. As imagens A' e B' representam a fase primária dos sulfetos (textura intercumulus. Fonte: O autor, 2024.34
- Figura 13**- Esquema da setorização adotada. A imagem A' representa a fase primária dos sulfetos (textura intercumulus). Na figura B' é possível observar a forma de ocorrência da fase secundária, definida pelo intercrescimento entre a calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.35
- Figura 15** - Esquema da setorização adotada. Na imagem A' é possível observar a forma de ocorrência disseminada da calcopirita, juntamente com o intercrescimento entre a magnetita+calcopirita; No setor B' é possível observar que a calcopirita ocorre de forma irregular e disseminada. Fonte: O autor, 2024.37
- Figura 16**- Esquema adotado para classificação dos setores. No setor A', é possível observar que há um empobrecimento de concentração dos sulfetos; No setor B' é possível observar a ocorrência dos cristais de magnetita, com granulometria que varia entre 0,5mm a 0,8mm. Fonte: O autor, 2024.38
- Figura 17** - Esquema da setorização adotada. Na imagem A', é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos na lâmina; na imagem B', é possível observar a forma de ocorrência do intercrescimento entre a calcopirita+magnetita. Fonte: O autor,2024.39
- Figura 18** - Esquema da setortização adotada. Na imagem A', é possível observar que há ausência de sulfetos; Na imagem B', é possível observar a ocorrência de magnetita. Fonte: O autor, 2024.....40
- Figura 19** - Esquema da setorização adotada para classificação da lâmina. No setor A é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos que ocorrem na forma de textura intercumulus, porém é possível observar o intercrescimento entre a calcopirita+magnetita. Na Figura B', é possível observar que a ocorrência dos sulfetos no flogopitito é disseminada. Fonte: O autor, 2024.41
- Figura 20** - Esquema da setorização adotada para classificação da lâmina. No setor B, é possível observar uma mineralização maciça de calcopirita, onde a o envolvimento da ganga pelo minério. Fonte: O autor, 2024.42
- Figura 21** - Legenda: Mapa de fases minerais (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-V1. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl/); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro (Ccpy). Fonte: O autor, 2024.43

Figura 22 - Legenda: Mapa de fases minerais (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-01. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro. Fonte: O autor, 2024.....	44
Figura 23 - Legenda: Mapa de fases minerais (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-11. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro. Fonte: O autor, 2024.....	45
Figura 24 - Classificação Geométrica e características de Liberação Mineral. Fonte: Adaptado de Craig & Vaughan, 1984.....	46
Figura 25 - A esquerda quadro com fotomicrografias dos ortopiroxenitos, representado a textura intercumulus, e a direita a textura de intertravamento simples, com margens retilíneas, de acordo com Craig & Vaughan, 1984	47
Figura 26 - A esquerda fotomicrografia representativa da textura disseminada e intersticial, nos flogopititos e a direita a textura de intertravamento simples, de acordo com Craig & Vaughan, 1984.	48
Figura 27 - esquerda fotomicrografia em luz transmitida mostrando fragmentos de ortopiroxênitos envoltos por minério; ao centro fotomicrografia da mesma porção da lâmina, em luz refletida; e a direita a textura de intertravamento do tipo em atol, de acordo com Craig & Vaughan, 1984	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação das amostras e método analítico empregado (LR – petrografia em luz refletida). Fonte: O autor, 2024.....	27
Tabela 2 - Caracterização petrográfica e identificação da mineralogia das lâminas. Fonte: O Autor, 2024.....	29
Tabela 3 - Tabela da granulometria analisada nos sulfetos+magnetita. Fonte, O Autor, 2024.	46
Tabela 4 - Granulometria da ganga analisada. Fonte: O Autor, 2024.....	50
Tabela 5 - Distribuição modal dos Sulfetos + magnetita. Fonte: O autor, 2024.	51

LISTA DE SIGLAS

BA	Bahia
Cu	Cobre
CCpy	Calcopirita
MGT	Magnetita
BNT	Bornita
Py	Pirita
Tlc	Talco
Bt	Biotita
Cpx	Clinopiroxênio
MOR	Microscópio Ótico de Luz Refletida
IOCG	<i>Iron Oxide Copper-Gold</i>
OIS	Orógeno Itabuna-Salvador
OISC	Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá
TTG	Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	12
1.2	HIPÓTESE	13
1.3.	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	14
2.1.1	GEOLOGIA LOCAL	15
2.1.2	MINERALIZAÇÃO	17
2.2	GEOMETALURGIA	18
2.2.1	BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO	19
2.2.2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	21
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	22
3.1.2	EMBUTIMENTO E POLIMENTO	22
3.2	ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION- EBSD	23
3.3	MICROSCOPIA ÓTICA DE LUZ REFLETIDA.....	25
4	RESULTADOS	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	29
1.2	MEV- EBSD.....	42
5.	DISCUSSÃO	45
5.1	ANÁLISE TEXTURAL.....	45
5.2	COMPOSIÇÃO MODAL	50
6	CONCLUSÃO	54
8	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A Província Cuprífera do Vale do Curaçá é constituída por uma sequência litoestratigráficas de rochas com alto grau metamórfico (Teixeira et al, 2010). As mineralizações de cobre ocorrem como lentes alongadas e associadas a corpos máficos (noritos-piroxeníticos e anfibolíticos). Esses corpos possuem dimensões variadas e contêm mineralizações com sulfetos de cobre (calcopirita e bornita) (Sampaio *et al.*, 2002; Teixeira *et al.*, 2010).

O minério do depósito é constituído por calcopirita e outros sulfetos de cobre que ocorrem em menor proporção, dentre os quais destaca-se a bornita. Os maiores teores são observados e fraturas e brechas preenchidas por sulfetos maciços. No entanto, observa-se minério primário disseminado nestes litotipos gerando uma associação entre sulfetos de duas fases de mineralização distintas (Teixeira *et al.*, 2010).

Devido à complexidade de ocorrência da mineralização e como ela pode impactar no processo de beneficiamento, é essencial destacar a geometalurgia como uma ferramenta essencial na otimização dos processos de beneficiamento. Essa área envolve a caracterização tecnológica, por meio do estudo detalhado das rochas mineralizadas, minério e ganga, com base em suas propriedades físicas e mineralógicas (Contessoto, 2017). Essa compreensão é fundamental, pois influencia diretamente nas etapas subsequentes de recuperação desses recursos.

A caracterização tecnológica do minério a ser realizada neste estudo será focada nos óxidos e sulfetos associados à mineralização na Mina do Pilar, no Vale do Curaçá. A caracterização envolverá o emprego da petrografia e microscopia eletrônica de Varredura com diferentes detectores acoplados. Por meio da análise petrográfica é possível definir alguns parâmetros, como identificação das fases minerais presentes, dimensionamento destas fases, caracterização das texturas dos sulfetos e óxidos e a relação com os minerais de ganga, o que impacta no grau de liberação mineral e a estimativa da moda da mineralização, conforme descrito por Petruk (2000).

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Os múltiplos eventos de metamorfismo, deformação, magmatismo e hidrotermalismo que ocorreram no Vale do Curaçá, transformaram os litotipos e

ficaram registrados na trama estrutural e textural dos minerais, além das modificações mineralógicas observadas. Essa sucessão de eventos, que se traduz pela diversidade paragenética, impacta nos diferentes litotipos, em especial nas rochas mineralizadas da Mina do Pilar, onde se concentram as rochas deste estudo.

Essas paragêneses apresentam características tecnológicas distintas e influenciam na eficiência do processo de beneficiamento do minério. Spoladore (2023) avaliou o impacto dos minerais silicáticos da ganga no beneficiamento, mas estudos direcionados aos óxidos e sulfetos são escassos. Assim, a caracterização tecnológica destas fases minerais é fundamental para aprimorar o beneficiamento, visando maximizar a recuperação dos metais pelos processos metalúrgicos.

1.2 HIPÓTESE

Os minerais metálicos que constituem as paragêneses da mineralização primária e secundária possuem características tecnológicas distintas, especialmente no que diz respeito ao grau de liberação mineral e a proporção Cu:Fe, devendo ser avaliados em conjunto com os respectivos minerais de ganga para otimizar a recuperação do cobre no processo de beneficiamento.

1.3. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é fazer a caracterização tecnológica das fases minerais metálicas, minério e ganga, do depósito de cobre da mina Pilar, no Vale do Curaçá.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Compreender as relações texturais e mineralógica dos minerais opacos nas diferentes paragêneses identificadas na Mina Pilar.
- 2) Avaliar e quantificar a distribuição das fases minerais, distribuição das frações granulométricas e o grau de liberação mineral.
- 3) Analisar o impacto das diferentes fases portadoras de cobre no beneficiamento mineral considerando a relação Cu-Fe, obtida com base na proporção de magnetita e sulfetos de cobre.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área da pesquisa está situada na porção nordeste do Cráton São Francisco (CSF), compreendendo a porção setentrional do Orógeno Salvador Itabuna-Salvador-Curaçá (OISC). Conforme Alkmin (2004), a colisão entre os blocos Gavião, Jequié e Serrinha deu origem a um cinturão rochoso caracterizado por granulitos metamorfizados e deformados.

Segundo Garcia (2018), o Vale do Curaçá é constituído por três unidades mapeáveis: Complexo Caraíba, Complexo Tanque-Novo Ipirá e Suíte São José do Jacuípe (Figura 1). O Complexo Caraíba é composto por unidades ígneas bimodais metamorfizadas em fácies granulito, com TTG's, nos quais os granitos representam porções félsicas e as lentes compostas por gabros-dioritos, indicam as porções máficas.

O Complexo Tanque-Novo Ipirá representa uma sequência vulcanossedimentar, metamorfizada em fácies anfíbolito alto a granulito, desenvolvida entre o Arqueano e Paleoproterozoico. Os litotipos encontrados são gnaisses aluminosos, quartzitos e rochas calciossilicáticas (Kosin *et al.*, 2003; Garcia, 2019).

Por fim, a Suíte São José do Jacuípe é composta por rochas máficas a ultramáficas, principalmente biotita ou hornblenda noritos, gabronoritos, com níveis cumuláticos, com leucogabros subordinados. (Garcia, 2019).

O Complexo Caraíba e Tanque Novo-Ipirá, foram intrudidos por corpos máficos-ultramáficos, com dimensões variadas, ao longo do Vale do Curaçá. Esses corpos apresentam mineralizações de cobre sulfetado, sendo os principais minérios a calcopirita e a bornita. Esses corpos máficos-ultramáficos representam cumalatos ultramáficos (piroxenitos) e cumalatos máficos (melanoritos, noritos e gabro-noritos), além de raros leucogranitos (Teixeira, 2010).

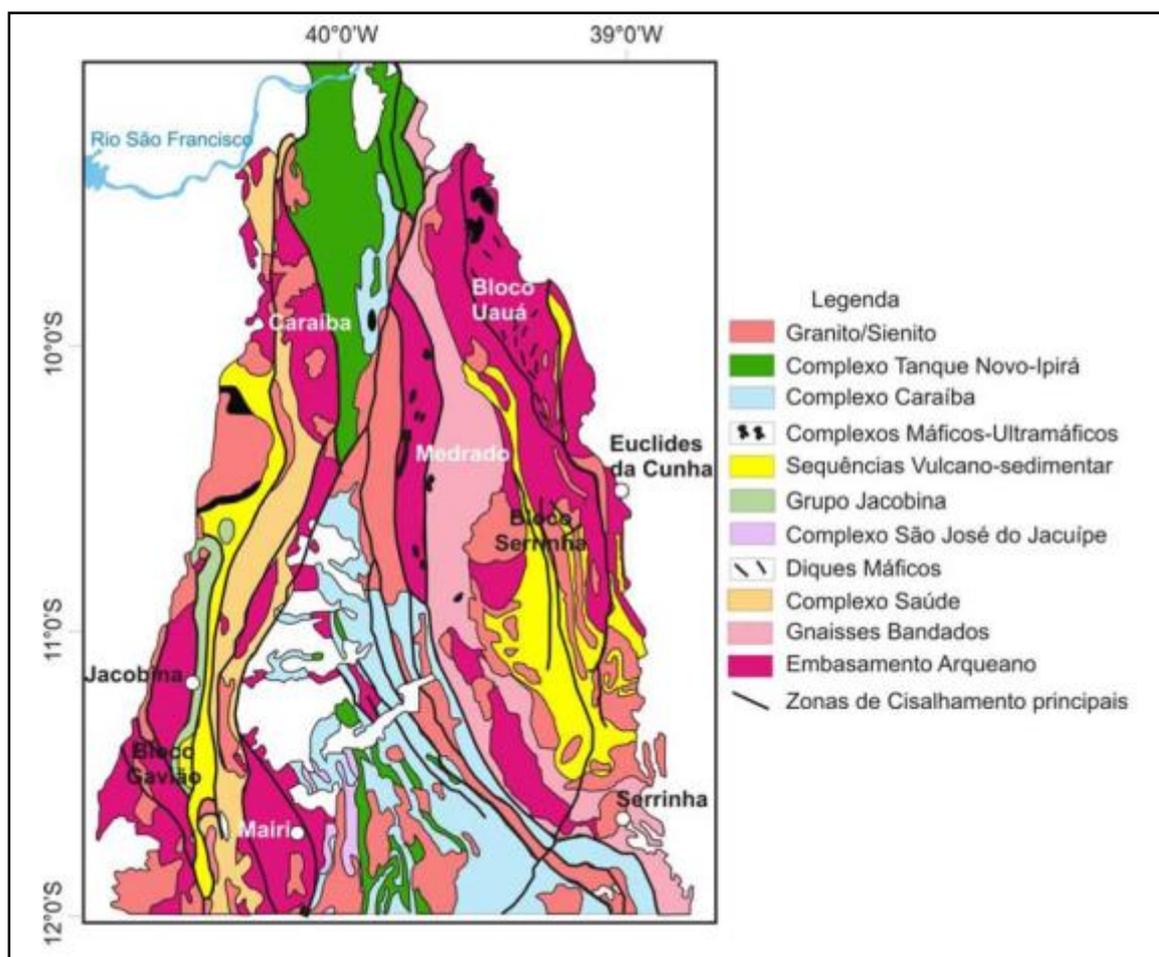


Figura 1- Mapa Geológico do segmento norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (OIS). Fonte: Teixeira et al, (2010).

2.1.1 GEOLOGIA LOCAL

As rochas contempladas neste estudo correspondem aos corpos máficos-ultramáficos cumuláticos e mineralizados em cobre (Teixeira *et al.*, 2010), que são intrusivos nos Complexos Caraíba e Tanque Novo-Ipirá. Castro (2022) e Spoladore (2023), caracterizaram os litotipos mineralizados e estéreis da Mina do Pilar, tendo sido identificados: ortopiroxenitos, ortopiroxenitos pervasivamente hidrotermalizados, flogopititos e brechas hidrotermalizadas. Esses litotipos serão detalhados a seguir.

O ortopiroxenito (AM 09) é a amostra mais representativa do protólito que hospeda a mineralização primária de cobre. De acordo com Spoladore (2023), é composta de 50% de ferrossilita, 30% de magnetita e 20% de andesina, com traços de clinopiroxênio cálcico, flogopita, calcopirita, talco/serpentina, carbonatos e Ortopiroxênio. Esta rocha apresenta uma textura granoblástica, com contatos poligonizados e feições cumuláticas do protólito, indicando um histórico complexo de

cristalização e recristalização que preserva características do protólito e as as fases minerais hidrotermais acrescidas (Spoladore, 2023).

O ortopiroxenito (AM 11 MSB), de acordo com Spoladore (2023), caracteriza-se por uma composição de 40% de enstatita, 30% de calcopirita, 15% de labradorita e 15% de flogopita, exibindo uma textura equigranular e granoblástica. A textura granoblástica, com grãos aproximadamente do mesmo tamanho e com contatos poligonizados, sugere recristalização, em função do grau metamórfico em fácies granulito (Kosin et al, 2003; Teixeira *et al.*, 2010)

Os ortopiroxenito (AM 01A MSB e AM 01B MSB) são rochas máficas-ultramáficas hidrotermalizadas. Conforme descrito por Spoladore (2023), a amostra AM 01A MSB apresenta uma composição mineralógica distinta, contendo 35% de calcopirita, 25% de ortopiroxênio, 15% de filossilicatos, 10% de enstatita, 10% de andesina e 5% de bornita, com traços de carbonato e clorita. Esta amostra exibe uma textura inequigranular, caracterizada por cristais grossos de calcopirita e bornita, enquanto o ortopiroxênio e filossilicatos ocorrem em granulação fina (Spoladore, 2023).

A amostra AM 01B MSB é similar a AM 01A MSB, mas com menor concentração de sulfetos, contém 30% de clinopiroxênios cálcicos, 25% de ortopiroxênio, 10% de calcopirita, 10% de enstatita, 10% de carbonatos, 10% de filossilicatos e 5% de bornita. Esta amostra também apresenta uma textura inequigranular, mas com granulação que varia de fina a média. (Spoladore, 2023).

A brecha hidrotermalizada (AM V1), apresenta textura inequigranular e vênulas de calcopirita envolvendo enstatita. Possui bolsões mineralizados contendo cristais de calcopirita e pirita de granulação grossa, além de uma textura granoblástica relíquia composta predominantemente por flogopita e enstatita. De acordo com Spoladore (2023), as vênulas de calcopirita envolvendo cristais de enstatita indicam um processo de brechamento assistido por fluidos.

As amostras de flogopititos (AM V4A e V4B) são classificadas como flogopitito e apresentam uma textura inequigranular grossa. A composição mineralógica inclui 60% de flogopita, associada a apatita e zircão de granulação fina a média. A associação de flogopita com apatita e zircão sugere um ambiente de formação enriquecido em fósforo e elementos incompatíveis, favorecendo a cristalização desses minerais acessórios (Spoladore, 2023).

2.1.2 MINERALIZAÇÃO

Os estudos anteriores para caracterização das mineralizações de cobre no Vale do Curaçá indicam uma origem primária relacionadas a um magmatismo máfico-ultramáfico (Lindenmayer, 1982; Delgado, 1981; Teixeira *et al.*, 2010; Garcia *et al.*; 2013; Castro, 2022). Posteriormente foi proposto por Teixeira *et al.* (2010) e corroborado por Garcia (2013), um modelo metalogenético do tipo IOCG (*Iron Oxid-Copper-Gold*) para a mineralização secundária no Vale. A proposição deste modelo é baseada no zoneamento hidrotermal similar aos dos sistemas IOGC, o que ressalta a importância da remobilização do cobre por processos hidrotermais.

Na região ocorrem dois tipos de mineralizações (**Figura 2**): (i) mineralização primária ou mineralização principal, que consiste em sulfetos de cobre, com predomínio da paragênese calcopirita + bornita \pm covelita \pm pirita \pm pirrotita \pm petlandita (Garcia, 2013), sendo que o sulfeto ocorre acompanhado sempre pela magnetita. Por vezes, a concentração percentual de magnetita se equipara ou supera o percentual de sulfetos (Teixeira, 2010); (ii) mineralização secundária ou mineralização tardia, (Teixeira *et al.*, 2010). Associado a estes minerais observa-se calcita, quartzo, clorita, sericita e clinopiroxênio (Garcia, 2013; Spoladore, 2023).

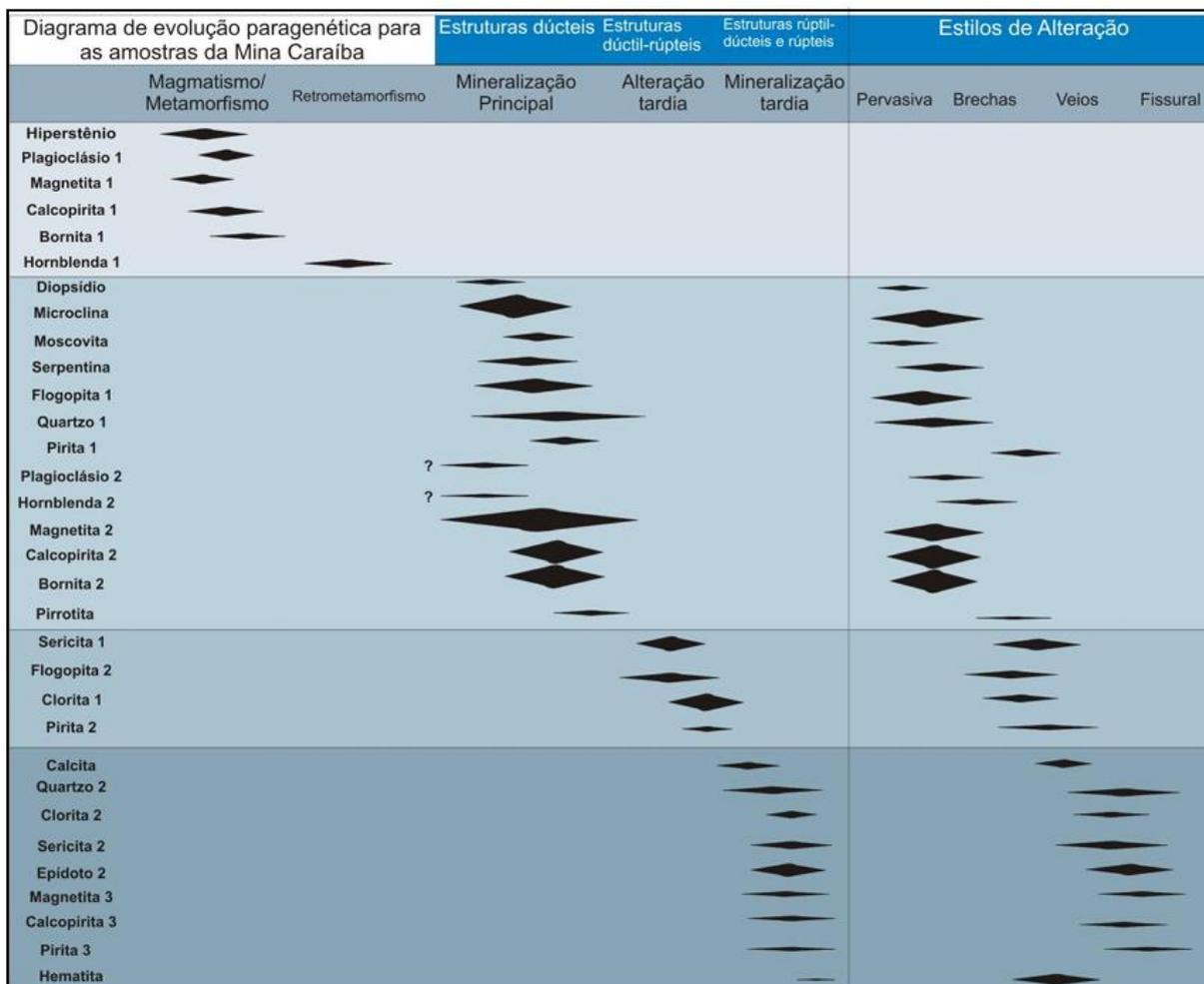


Figura 2 - Diagrama de evolução paragenética para as amostras da Mina da Caraíba. Fonte: Garcia (2013).

2.2 GEOMETALURGIA

Em um depósito mineral, há um conjunto de parâmetros a serem considerados para verificar as rotas metalúrgicas e as diferentes etapas de beneficiamento mineral, que vão além dos parâmetros usados no seu dimensionamento, limitados a volume e teor, na maioria dos casos.

É de extrema relevância a realização de ensaios tecnológicos que auxiliem no processo de caracterização do minério e na compreensão do impacto destes parâmetros nas diferentes etapas do beneficiamento do minério. Parâmetros como variação de teores, da mineralogia do minério e da ganga, relação entre as fases minerais, variação na coesão dos litotipos, presença de minerais deletérios, distribuição granulométrica e grau de liberação do minério possibilitam a previsão no

comportamento metalúrgico dos diferentes tipos de minérios, enquanto maximiza o processo do beneficiamento (Magalhães *et al.*, 2019).

Sendo assim, essa abordagem deve ser multidisciplinar e relacionar a geologia ao planejamento da mina e ao processamento mineral, no planejamento do processo de beneficiamento do minério (Ribeiro, 2008; Lamberg, 2011).

A Figura 3, exibe um fluxograma esquemático de um modelo geometalúrgico, e ilustra como o desenvolvimento dessas atividades é condicionado a uma série de etapas. A primeira etapa, a qual será abordada nesse trabalho consiste na identificação da assembleia mineralógica, quantificação dos elementos mineral-minério, texturas, e a relação entre minerais e o minério.

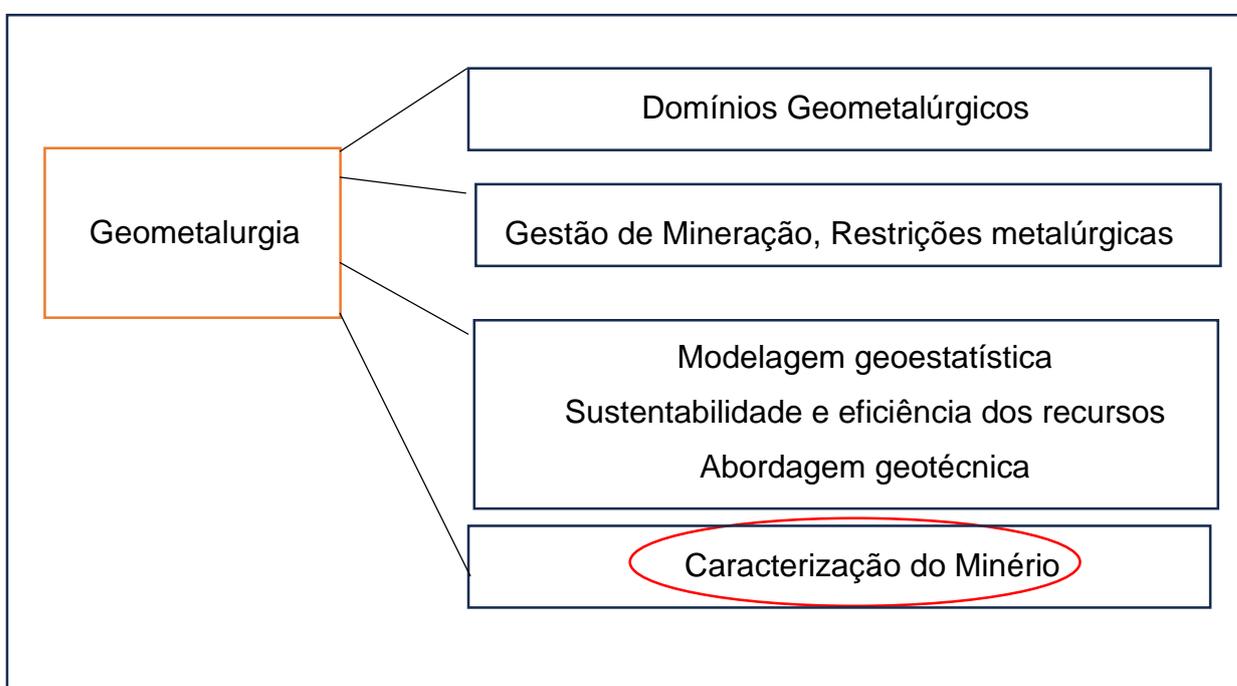


Figura 3 - Modelo do desenvolvimento da Geometalurgia. Adaptado de Lund (2013).

2.2.1 BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO

Os processos geometalúrgicos integram conhecimentos geológicos e metalúrgicos para criar modelos baseados em estudos mineralógicos. Esses modelos analisam tanto as assembleias minerais quanto as características texturais, com o objetivo de determinar os processos metalúrgicos mais eficazes para o beneficiamento. Essa abordagem visa estimar com precisão os teores e a taxa de recuperação (Parian *et al.*, 2015) do produto final do beneficiamento mineral.

Depósitos máficos-ultramáficos de níquel e cobre necessitam de informações detalhadas sobre os minerais de ganga e sua granulação (Kirjavainen & Heiskanen, 2007). Caracterizar precisamente a ganga é fundamental, pois minerais como micas, talco e serpentina podem impactar na recuperação da planta e nas etapas de moagem do minério, afetando a produtividade e a eficácia geral do processo (Figueira *et al.*, 2010; Ndlovu *et al.*, 2013).

A **Figura 4** representa o processo de beneficiamento do minério no Vale do Curaçá. O minério gerado pela mina subterrânea, após o processo de britagem realizado em subsolo é transportado por correias transportadoras e *shafts* até a pilha pulmão, que é uma etapa que antecede a etapa de rebitagem, juntando-se ao minério que é proveniente das minas a céu aberto.

O minério é rebitado e empilhado no pátio de homogeneização ou segue diretamente para os silos que alimentam as fases de moagem/classificação. Após o processo de moagem/classificação, é realizado a flotação que como resultado gera um concentrado de aproximadamente 35% de teor médio de cobre. Por fim, há o processo de espessamento, filtragem e armazenamento desse concentrado, que se destina a pilha do concentrado final (Barreto, 2020).

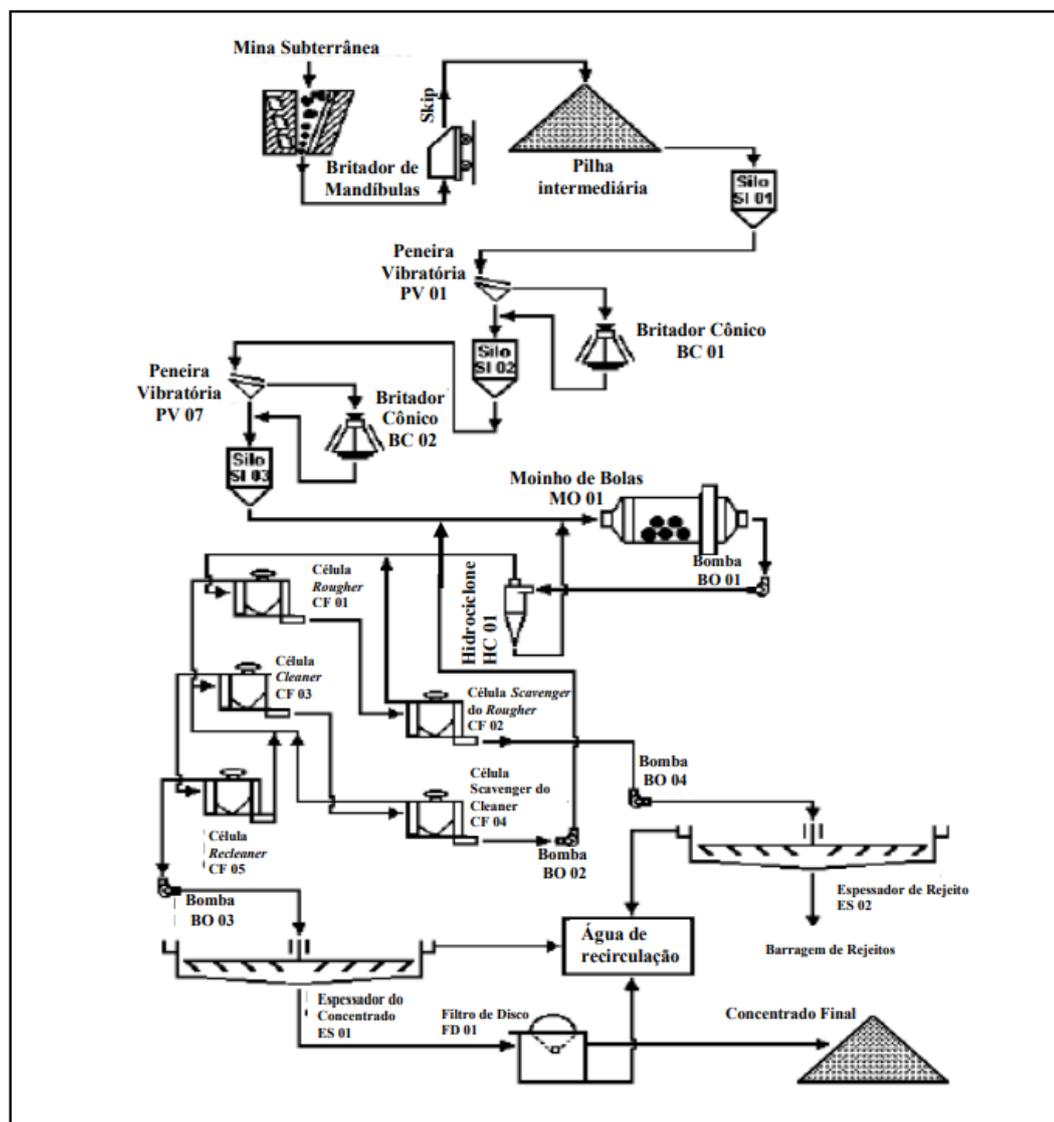


Figura 4- Fluxograma do processo de beneficiamento desenvolvido na mina Caraíba. Fonte: Barreto (2020).

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

O processo de caracterização tecnológica do minério compreende o processo de descrição e quantificação da composição mineralógica, tamanho e forma dos grãos, associações minerais, grau de liberação, composição química, entre outros. Quando há a determinação dos parâmetros citados acima, o aproveitamento do recurso mineral é otimizado, fornecendo dados essenciais para a previsibilidade e constância dos processos de beneficiamento (Neumann; Schneider; Neto, 2004).

A caracterização tecnológica pode ser aplicada em dois momentos distintos da caracterização de uma jazida: na definição da viabilidade e métodos de exploração da

jazida e na definição das totas metalúrgicas para beneficiamento/ processamento do minério.

O primeiro momento é essencial para a quantificação dos recursos minerais e está atrelado à obtenção de parâmetros geomecânicos (Sant' Agostino *et al.*, 1997).

Porém, quando se analisa a viabilidade da implantação de uma mina, o processo de caracterização tecnológica exerce um papel fundamental na determinação de características mineralógicas dos corpos de minério e na definição do comportamento do minério durante o processo de beneficiamento.

Esse processo de caracterização tecnológica deve ser o mais completo possível e compreende a integração de dados da exploração mineral, do processamento do minério, caracterização dos rejeitos, entre outros (Sant' Agostino *et al.*, 1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para que o desenvolvimento da técnica do EBSD alcance resultados precisos, é necessário que haja o preparo adequado das amostras. As seções precisam apresentar boa condutividade elétrica e uma superfície plana, bem polida e livre de imperfeições.

Foram selecionadas 3 amostras de minério de cobre da Mina do Pilar. Essas amostras possuem mineralogia variada.

3.1.2 EMBUTIMENTO E POLIMENTO

No Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR, as amostras foram posicionadas em suportes de acrílico com formato quadrangular, medindo 2,0 cm de aresta e 0,3 cm de altura. Posteriormente, foram embutidas a vácuo em moldes cilíndricos de acrílico, com 4,0 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura, utilizando uma mistura de resina epóxi e grafite na proporção de 1:1,5, ambos os materiais da marca Buehler.

Após o embutimento, as superfícies das amostras foram desbastadas e polidas. O polimento consistiu em duas etapas: polimento mecânico e polimento químico. O polimento mecânico foi realizado em um pano sintético com pasta diamantada nas

granulometrias de 9, 6, 3, 1 e 0,25 μm , com duração aproximada de 30 minutos para cada passo, em uma politriz semiautomática LaboPol-30 (Struers). Já o polimento químico foi realizado em pano sintético, utilizando uma solução abrasiva de sílica coloidal, por cerca de 1 hora e 30 minutos, em uma politriz de baixa rotação MiniMet 1000 (Buehler) (Figura 5).



Figura 5 - Politriz semiautomática MiniMetTM 1000 da marca Buehler disponível no CME/UFPR.
Fonte: O autor, 2024.

Todo o processo de preparo das amostras foi conduzido nas dependências do CME, sob a supervisão das técnicas de laboratório Flávia Afonso e Luana Tiemi.

3.2 ELECTRON BACKSCATTER DIFRACTION- EBSD

O uso da técnica de difração de elétrons retroespalhados (*electron back-scattered diffraction* - EBSD), acoplado a um microscópio eletrônico de varredura (MEV), possibilita o mapeamento da orientação cristalográfica dos minerais e das microestruturas dos grãos (Randle, 1992).

Dados sobre a rede cristalina de minerais dentro de microestruturas só eram obtidos a partir da magnificação com o uso de microscópio óptico, com o auxílio da Platina Universal. Porém, com o desenvolvimento da técnica do EBSD, foi possível

entender os fenômenos que são controlados pelas microtexturas dos minerais (Morales, 2007).

Os elétrons gerados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), são espalhados de forma aleatória na superfície da amostra, a qual está em um ângulo de 70° inclinado em relação horizontal. Os elétrons retroespalhados que escapam de superfície de análise são projetadas em uma tela de fósforo (**Figura 6**), gerando padrões de Kikuchi, que indicam a simetria da estrutura cristalina dos minerais difratados, tendo como base as distâncias interplanares da estrutura e nos ângulos entre os planos cristalinos do material.

O EBSD permite identificar fases minerais, estruturas de deformação local, assim como orientações preferenciais dos cristais (Morales, 2007; Schulz *et al.*, 2023). A qualidade dos dados obtidos, depende primeiramente do preparo da amostra. De acordo Dedavid (2007), a boa indexação dos padrões cristalográficos requer que a amostra disponha de em uma superfície lisa, sem quaisquer defeitos de preparação, para que o processo de difração da onda ondulatória dos elétrons incidentes não seja prejudicado.

Quando os minerais analisados não apresentam uma boa condução elétrica é necessário metalizar a superfície da amostra, otimizando e melhorando a qualidade dos dados obtidos (Duarte *et al.*, 2003).

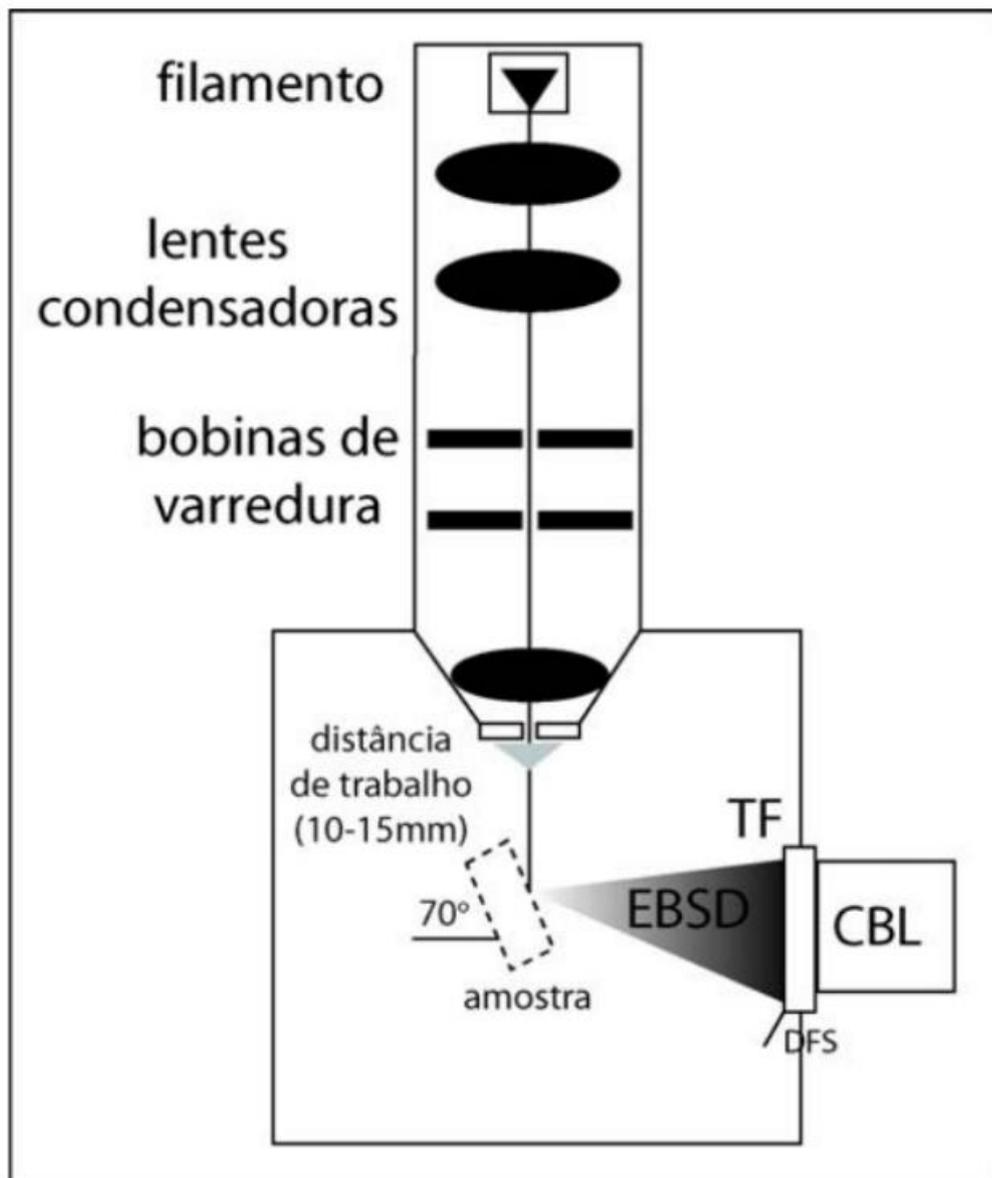


Figura 6 - Esquema de instalação da tela fosforescente (TF) e da câmera de baixa luminosidade (CBL) junto à amostra por 70°. São indicadas também as lentes de controle na coluna de elétrons. Fonte: Morales, 2007.

3.3 MICROSCOPIA ÓTICA DE LUZ REFLETIDA

A microscopia ótica de luz refletida projeta a luz para baixo incidindo na superfície do mineral analisado e permitindo observar as diferentes propriedades óticas das fases dos minerais opacos, que devem estar polidas.

Quando o feixe de luz incide na amostra analisada, em um microscópio de luz refletida, a luz é refletida pela superfície dos minerais. Essa reflexão ocorre devido à interação da luz com os elétrons na superfície dos minerais, o que faz a luz ser redirecionada para o sistema ótico do microscópio. As diferentes propriedades de

reflexão, como intensidade e cor, proporcionam o contraste necessário para a formação da imagem. Essas propriedades dependem da composição química e da estrutura cristalina dos minerais, permitindo a identificação e análise detalhada da amostra. A Figura 7 é um diagrama esquemático e ilustra como ocorre a incidência da luz sobre a amostra.

Por meio da microscopia de luz refletida, é possível observar características texturais e morfológicas dos minerais analisados. Para determinar a composição mineralógica, é feita uma análise modal a qual é validada através de uma média da composição mineralógica da lâmina delgada. (Tavares, 2022).

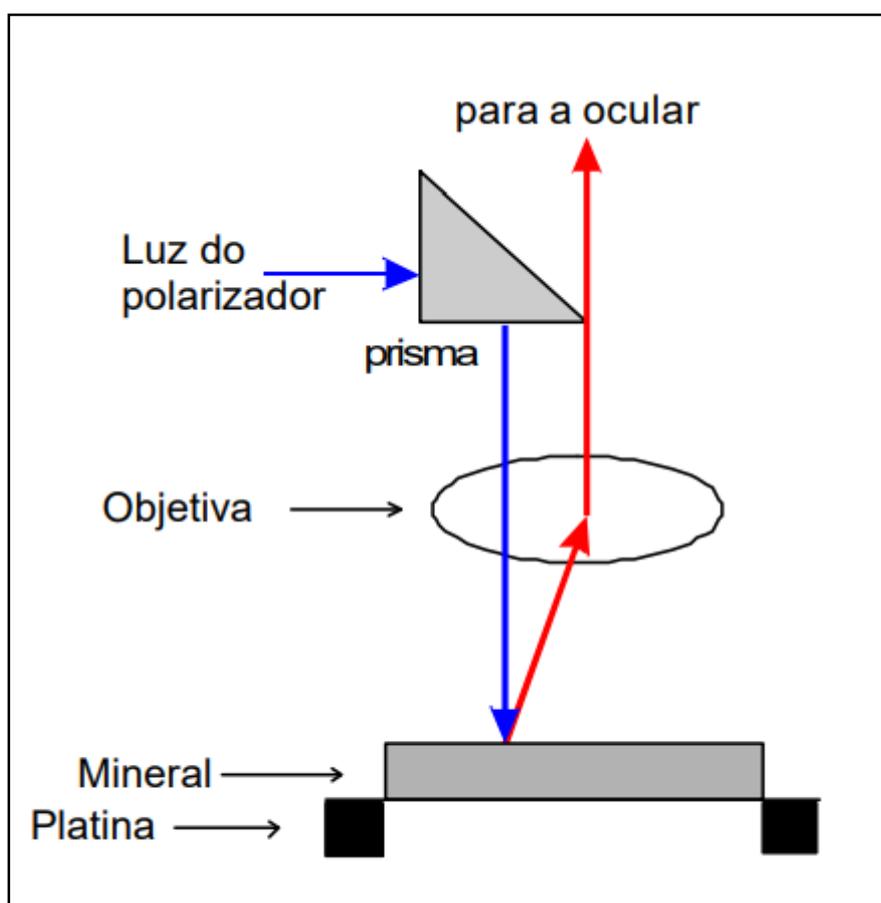


Figura 7 - Diagrama esquemático do sistema óptico de luz refletida. Fonte: Machado (2017).

Para elaboração do trabalho foram utilizadas de 7 lâminas petrográficas delgado-polidas e as respectivas amostras macroscópicas, que pertencem ao acervo da orientadora, as quais foram descritas no Laboratório de pesquisas em microscopia (LAPEM) do Departamento de Geologia (DGEOL), da UFPR.

Para as descrições microscópicas foi usado um Microscópio óptico de Luz Leica DM2500p, que dispõem de sistema de luz transmitida e refletida no mesmo equipamento. As capturas foram realizadas no LAPEM, e no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas- ILAMIR posteriormente tratadas no *software* Leica V.4. As amostras e lâminas usadas foram as mesmas utilizadas no trabalho de Castro (2022) e Spoladore (2023).

Tabela 1 - Identificação das amostras e método analítico empregado (LR – petrografia em luz refletida). Fonte: O autor, 2024.

Amostras	Método Analítico
AM11 MSB	LR, MEV-EBSD
V4- A	LR
V4-B	LR
AM-09	LR
AM- 01 AMSB	LR, MEV-EBSD
AM-01 BMSB	LR
V1	LR, MEV-EBSD

Para realizar as análises foram definidos critérios baseados na necessidade de entender a relação minério/ganga no depósito. Foram analisadas: a mineralogia, as texturas dos opacos, presença e tipos de intercrescimento entre os opacos (i.e., sulfetos de cobre e magnetita) e a ganga, avaliada a granulometria e distribuição modal dessas granulometrias para os opacos e a ganga.

Para otimizar e tornar menos subjetiva a análise, as lâminas foram setorizadas em 28 setores (Figura 8) com uso de uma malha quadrada, com dimensão de aproximadamente 0,5 mm, para as arestas destes setores. Esses setores foram usados para as etapas de análise textural, granulométrica e para a estimativa da porcentagem das fases minerais presentes na amostra.

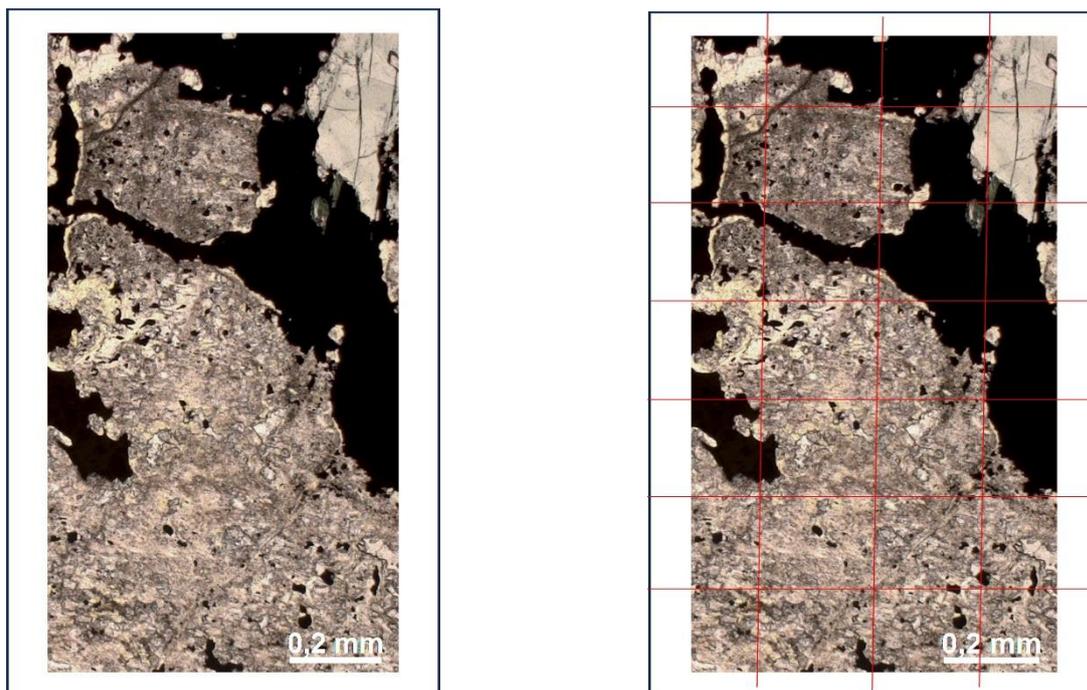


Figura 8- Figura A) representação da lâmina AM 01 MSB; Figura B) representação da lâmina Am01 MSB, com divisão dos 28 setores. Fonte: O autor, 2024.

Primeiramente, a análise textural foi conduzida para identificar e descrever a disposição e as relações entre os diferentes minerais presentes em cada setor, com ênfase na caracterização da textura dos opacos. Em seguida, a análise granulométrica foi realizada para determinar a distribuição do tamanho dos grãos em cada setor, utilizando o programa Leica, que possibilita a medição dos tamanhos dos cristais. A partir da estimativa modal dos cristais, foi elaborado uma tabela para sumarização da variação granulométrica em cada uma das lâminas.

Os dados coletados nessas análises estão compilados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

A seguir serão descritas as informações coletadas por meio da análise petrográfica, em que se caracterizou a mineralogia, textura e o tipo do minério (se primário, magmático, ou secundário, hidrotermal). A **Tabela 2** mostra uma sumarização dos dados analisados em lâmina.

Tabela 2 - Caracterização petrográfica e identificação da mineralogia das lâminas. Fonte: O Autor, 2024.

Litotipo	ID da Amostra	Minerais opacos	Minerais Transparentes	Textura Predominante	Tipo de Minério
Ortopiroxenito	AM 09	Calcopirita, Bornita e Magnetita	Piroxênio, Filossilicatos e Plagioclásios.	Intercumulus	Primário
Ortopiroxenito	AM 11 MSB	Calcopirita e pirita	Filossilicatos, Piroxênios e Plagioclásios.	Intercumulus	Primário
Clinopiroxenito Pervasivamente Hidrotermalizado	AM 01 AMSB	Calcopirita e pirita	Clinopiroxênio, Filossilicatos e Piroxênios	Intercumulus	Primário e secundário
Clinopiroxenito Hidrotermalizado	AM 01 BMSB	Calcopirita e pirita	Clinopiroxênio, Ortopiroxênio, Filossilicatos e Zircão.	Intercumulus	Primário e secundário?
Flogopitito/Piroxenito Intercalado	V4-A	Calcopirita e magnetita	Flogopita, Piroxênio e Plagioclásios	Intersticial e disseminada	Secundário
Flogopitito/Piroxenito Intercalado	V4-B	Calcopirita e magnetita	Flogopita, Piroxênio e Plagioclásios	Intersticial e disseminada	Secundário
Brecha	V1	Calcopirita e magnetita	Filossilicatos e Piroxênios	Maciça e disseminada	Secundário

Ortopiroxenito com textura intercumulus (AM 09 MSB)

Trata-se de um ortopiroxenito constituído por Enstatia (40%), clinopiroxênio (30%), andesina (10%), magnetita (5-10%), calcopirita (10%), além de traços de flogopita, bornita, talco e serpentina. A magnetita e os sulfetos de cobre apresentam textura intercumulus e predominam nas porções mais ricas em piroxênio. Esta

distribuição irregular dos cristais de piroxênio e plagioclásio na amostra, justificou a divisão da lâmina em dois setores, para fins de caracterização e quantificação das fases: no setor A, predomina o piroxênio, a magnetita e a calcopirita, que ocorre na forma de textura intercumulus, sendo uma fase de mineralização primária. Essa fase possui uma granulometria que varia entre 0,2mm a 1,1mm, conforme se observa na **Figura 9**.

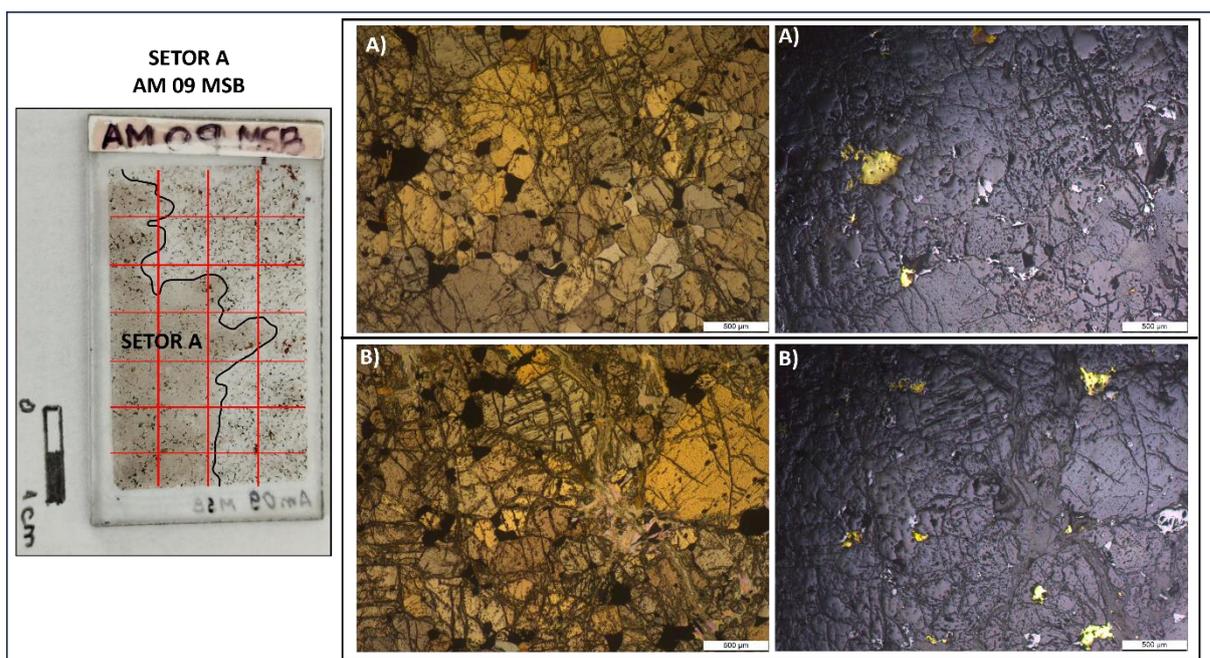


Figura 9 - Representação da setorização da lâmina, com destaque para o setor A. A imagem A') representa um setor rico em piroxênio e ortopiroxênio, onde é possível observar em luz refletida, que os sulfetos possuem granulometria que varia entre 0,03mm a 0,2mm. Na imagem B'), é possível observar a ocorrência de intercrescimento da calcopirita+magnetita. Fonte: O autor, 2024.

Ao analisar o setor A foi possível observar que os sulfetos quando ocorrem associados aos inossilicatos apresentam-se com textura disseminada. Com relação a granulometria, se comparado a granulometria encontrada no setor B, a granulometria do Setor A é maior. Foi observado uma segunda fase textural, que foi classificada como intercrescimento. Esse intercrescimento é caracterizado pela presença de calcopirita+magnetita, tendo granulometria entre 0,03mm a 0,2mm (Figura 9).

O setor B, é marcado pela baixa concentração de sulfetos, porém há alta concentração de magnetita, sendo observado uma segunda fase textural, que foi classificada como intercrescimento. Essa fase de intercrescimento ocorre entre a calcopirita+magnetita, como ilustrado na Figura 10. Essa fase de intercrescimento

possui granulometria de 0,01mm a 0,08mm. Nota-se a ocorrência de inclusões de calcopirita no piroxênio.

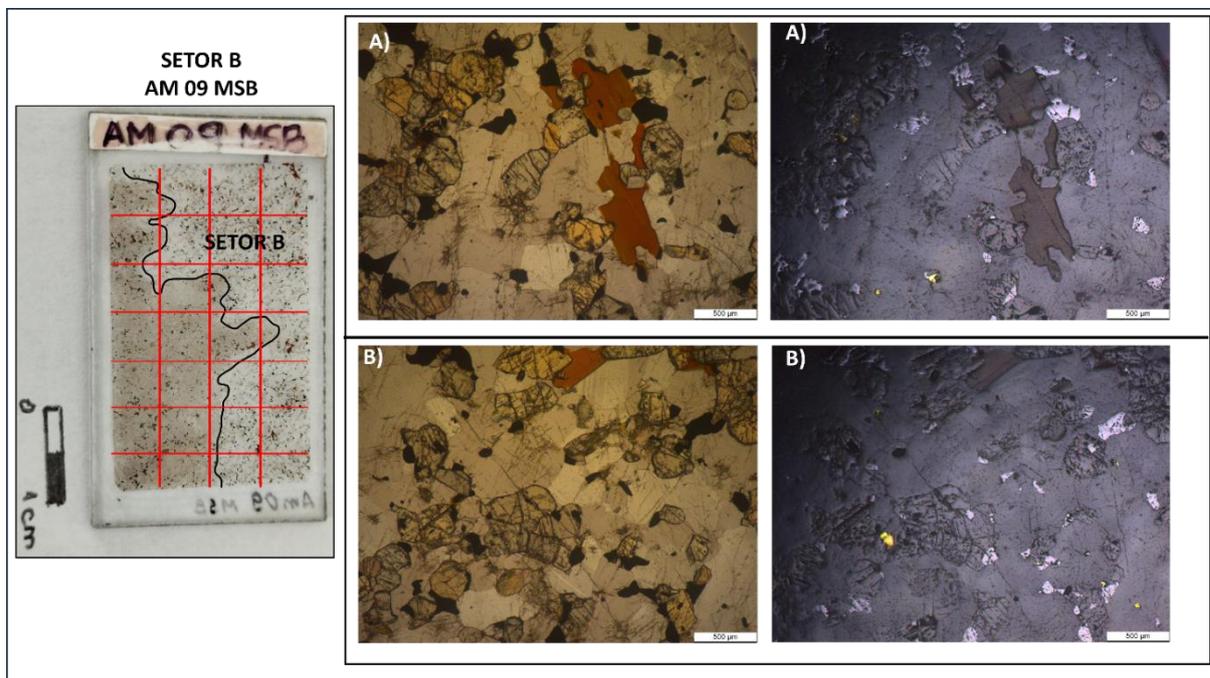


Figura 10- Representação da setorização adotada para o Setor B. Nas figuras A e B, é possível observar a baixa concentração de sulfetos, porém o predomínio de magnetita ao longo deste setor. Fonte: O autor, 2024.

Piroxenito Hidrotermalizado (AM 01AMSB)

Trata-se de um clinopiroxenito hidrotermalizado, composto por clinopiroxênio (35%), filossilicatos: talco, serpentina, epidoto e carbonato (25%), calcopirita (20%), ortopiroxênio (10%) e pirita (10%), além de traços de bornita. Os sulfetos de cobre ocorrem com textura disseminada, na forma de textura intercumulus, aqui classificada como uma fase textural primária, caracterizada pela ocorrência de calcopirita+pirita+bornita.

A concentração dos sulfetos ocorre com maior predominância nas porções ricas em piroxênio, porém há o predomínio de matriz fina composta filossilicatos, calcopirita e pirita (Figura 10).

É possível observar que a primeira fase textural, classificada como textura intercumulus, tem sua granulometria variando entre 0,8mm a 1,1mm. Mesmo tendo essa granulometria grosseira, ao longo do setor, em algumas porções, os sulfetos ocorrem disseminados. A segunda fase textural observada nesse setor, foi o

intercrescimento entre a calcopirita+pirita, que possui granulometria de 0,02mm a 0,12mm.

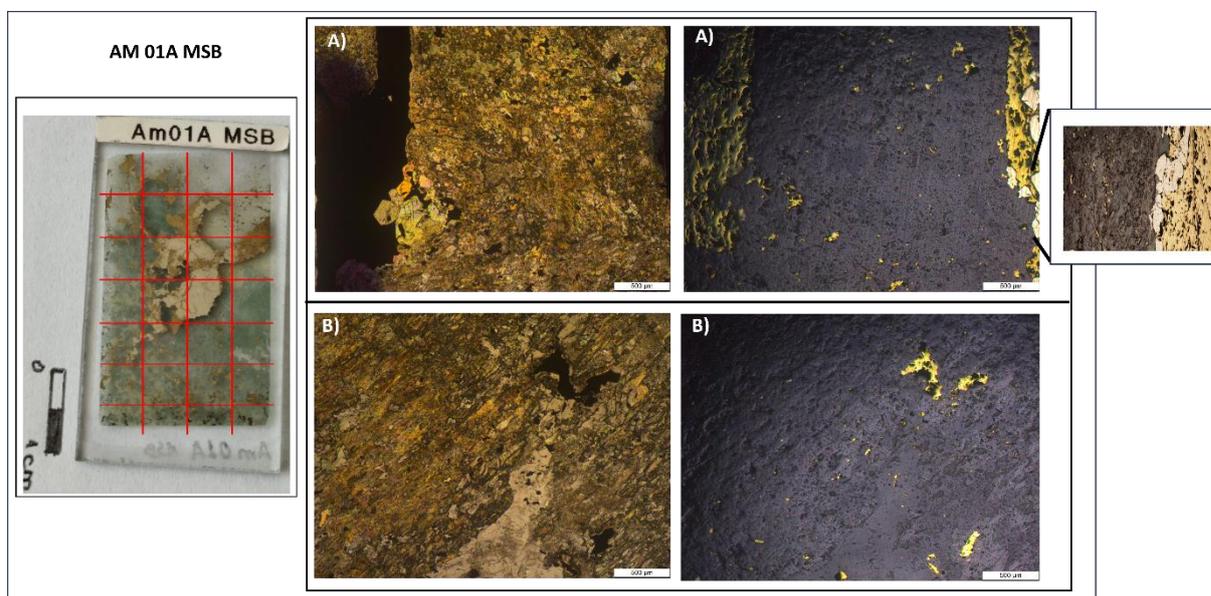


Figura 10 - Representação do setor A. Na imagem A', é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos na forma de textura intercumulus, juntamente com a ocorrência do intercrescimento calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.

Foi observado também, que ocorre a predominância de enstatita e clinopiroxênio, tendo ocorrência de calcopirita e pirita, conforme se observa na **Figura 11**, tendo o enriquecimento de sulfetos. A fase primária da mineralização, tem sua ocorrência associada a fase primária textural na forma de textura intercumulus, de forma disseminada, onde a granulometria varia entre 0,1mm a 1,7mm. A fase textural secundária é definida por uma fase maciça dos sulfetos, que estão intercrescidos. O intercrescimento ocorre entre a calcopirita+pirita, tendo sua granulometria variando entre 0,04mm a 0,10mm.

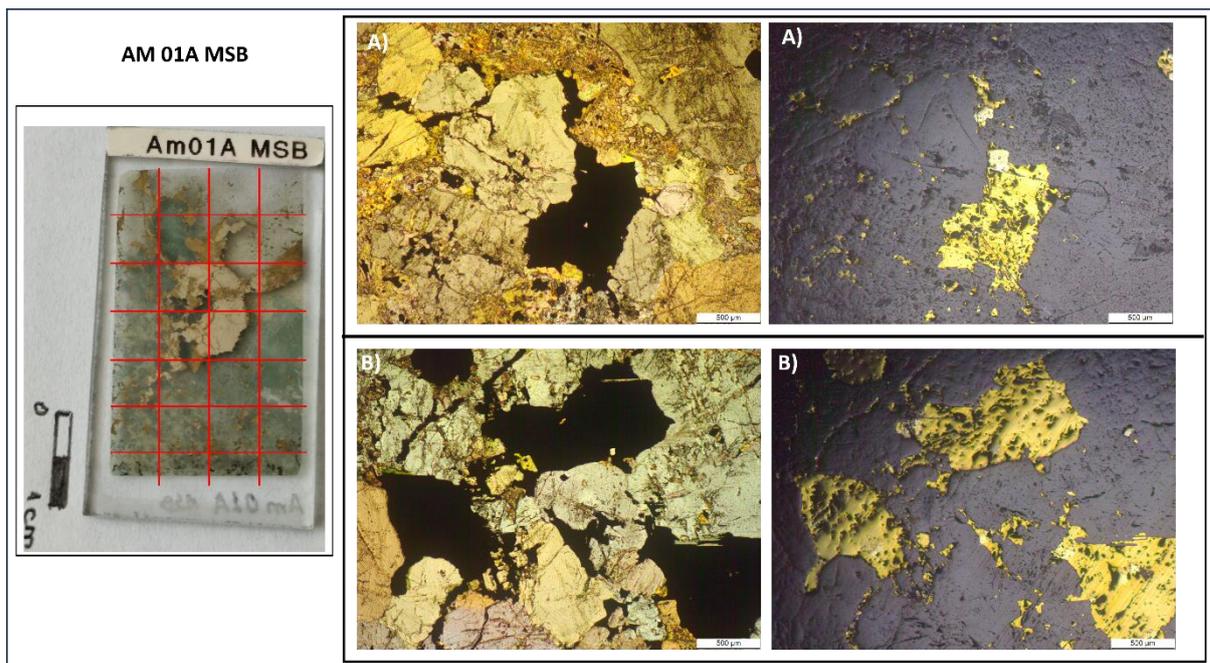


Figura 11 - Esquema da setorização adotada. A imagem A' representa a forma de ocorrência dos sulfetos, onde a calcopirita se encontra na forma de textura intercumulus. É possível observar que há o intercrescimento entre a calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.

Ortopiroxenito (AM 11 MSB)

Refere-se a amostra classificada como um ortopiroxenito. É composta por enstatita (40%), calcopirita (20%), flogopita (15%), labradorita (15%), magnetita (5%), bornita (3-5%) tendo em algumas porções com traço de bornita. A mineralização é associada a fase secundária calcopirita+magnetita, ocorrendo de forma disseminada. A fase textural observada é primária, classificada como textura intercumulus, além de ocorrerem na forma intercrescimento entre calcopirita+pirita. A magnetita ocorre como traço e intercrescida com a calcopirita.

Devido a homogeneidade da lâmina, não foi necessária a setorização da lâmina.

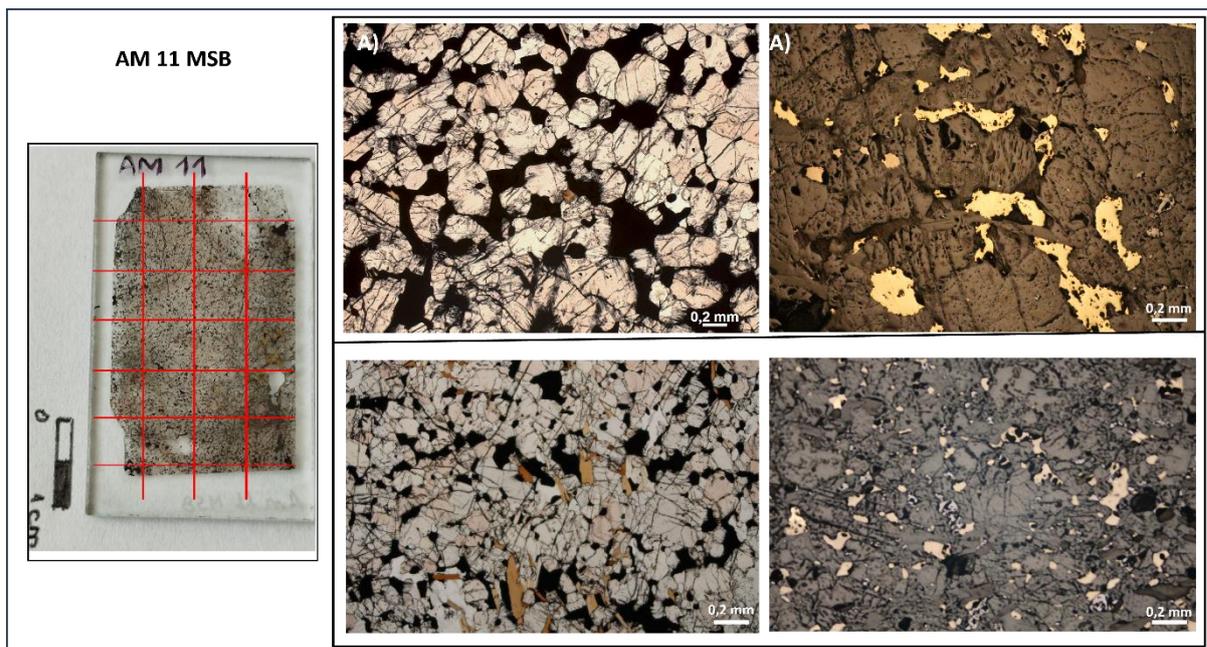


Figura 12 - Esquema de setorização adotada. As imagens A' e B' representam a fase proimária dos sulfetos (textura intercumulus. Fonte: O autor, 2024.

Clinopiroxenito Hidrotermalizado com Textura Intercumulus (AM01 BMSB)

Refere-se a um clinopiroxenito pervasivamente hidrotermalizado constituído por clinopiroxênio (35%), enstatita (20%), filossilicatos: talco, serpentina, epídoto e carbonato (20%), calcopirita (20%) e pirita (5%). A forma de ocorrência dos sulfetos é na forma de textura intercumulus, tendo uma maior concentração nos setores ricos em piroxênios. Devido a essa irregularidade na distribuição da paragênese, foi uma setorização ao longo da lâmina. No setor A, há o predomínio de ortopiroxênio e clinopiroxênio, tendo o sulfeto na fase primária, classificada como textura intercumulus (Figura 13). Essa textura tem sua granulometria variando entre 0,03mm a 0,8mm. Observou uma fase secundária, que pode ser classificada como uma fase maciça, e que possui feição de intercrescimento entre sulfetos, onde a granulometria varia entre 0,13mm a 0,5mm

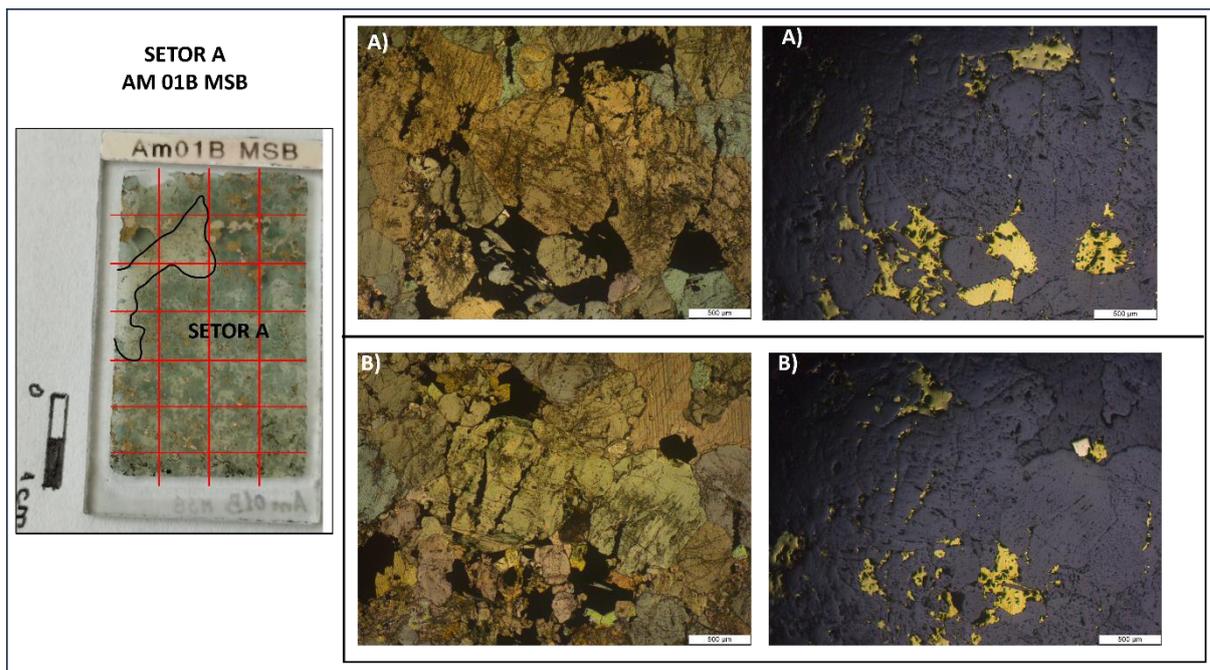


Figura 13- Esquema da setorização adotada. A imagem A' representa a fase primária dos sulfetos (textura intercumulus). Na figura B' é possível observar a forma de ocorrência da fase secundária, definida pelo intercrescimento entre a calcopirita+pirita. Fonte: O autor, 2024.

No setor B, foi observado o predomínio de filossilicatos, porém com baixa concentração de ortopiroxênio. Os sulfetos ocorrem na forma primária de textura intercumulus, porém, apresentam uma granulometria variando entre 0,015mm a 1,6mm. Além disso, foi observado uma segunda fase caracterizada pelo intercrescimento entre a calcopirita+pirita, com granulometria variando entre 0,1mm a 0,3mm.

Quando há uma maior concentração de enstatita, há uma maior concentração de calcopirita, com uma distribuição espaçada entre e com cristais maiores (~0,5mm).

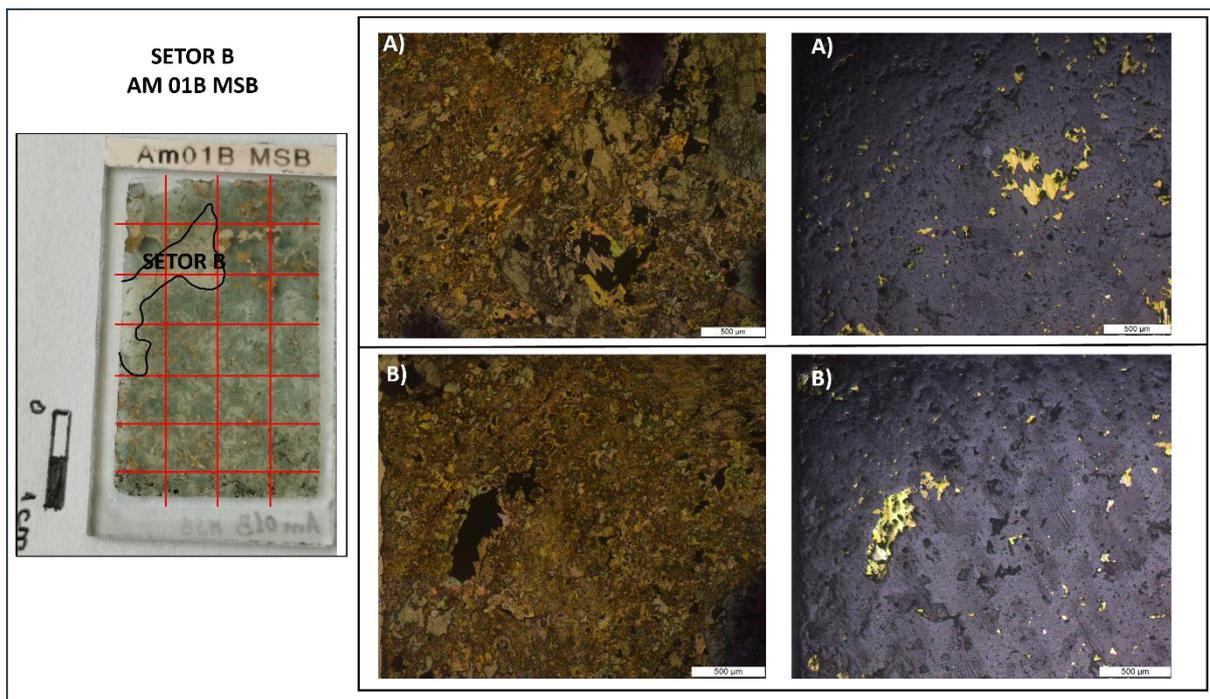


Figura 14- Esquema da setorização adotada. Na imagem A' é possível observar que o setor é rico em filossilicatos, e devido a esse enriquecimento há uma baixa na concentração de sulfetos; Na imagem B' é possível observar a segunda fase, caracterizada pelo intercrescimento entre a calcopirita +pirita. Fonte: O autor, 2024.

Flogopitito/Piroxenito Intercalado (AMV4-A)

A amostra refere-se a um flogopitito, composto por flogopita (60%), enstatita (30%), magnetita (5%), calcopirita (1-3 %) e bornita que foi descrita como traço. A forma de ocorrência dos sulfetos nos flogopititos é definida como uma textura disseminada com os cristais distribuídos de forma intersticial, entre os cristais de flogopita. Seguindo o padrão de descrição, foi feita uma divisão da lâmina, com o setor A rico em filossilicatos (em geral flogopita, porém foram outros filossilicatos como a serpentina). Esse setor tem baixo teor de calcopirita (em geral o setor apresenta teor traço). Esses sulfetos ocorrem na forma de textura disseminada (Figura 15), tendo uma variação na granulometria de 0,015mm a 0,6mm. Já a fase secundária classificada como uma textura maciça dos sulfetos que estão intercrescidos, tem granulometria que varia 0,09 a 0,4mm, sendo composto por magnetita+calcopirita.

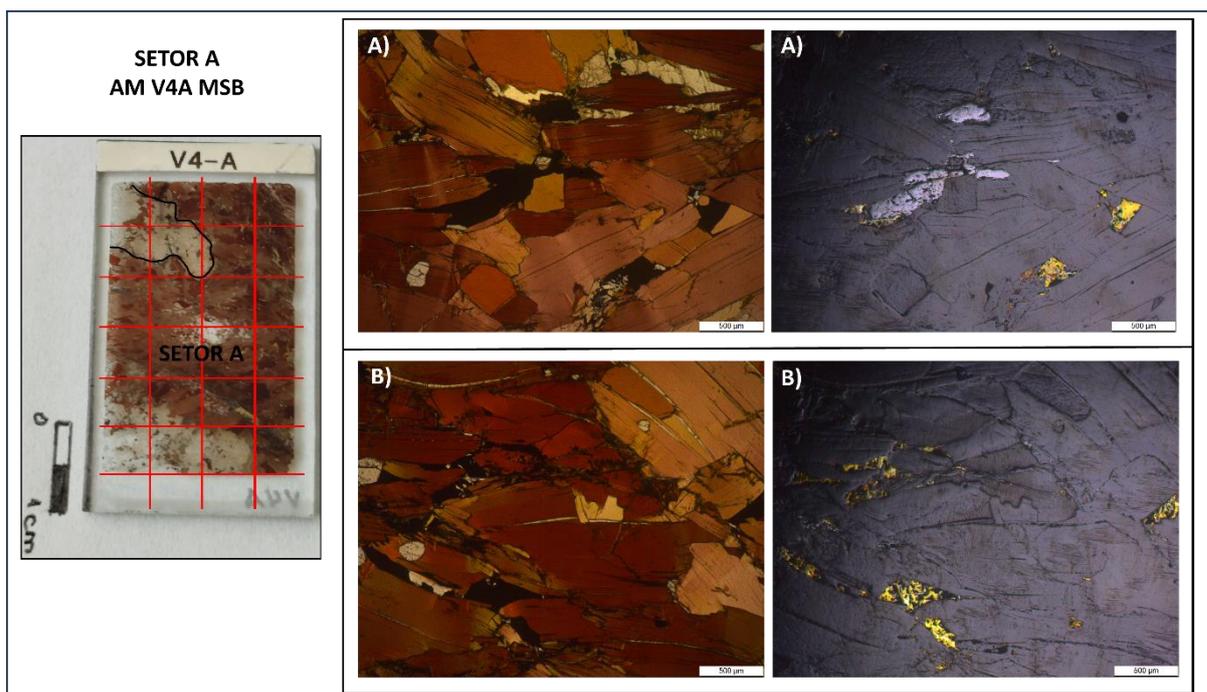


Figura 15 - Esquema da setorização adotada. Na imagem A' é possível observar a forma de ocorrência disseminada da calcopirita, juntamente com o intercrescimento entre a magnetita+calcopirita; No setor B' é possível observar que a calcopirita ocorre de forma irregular e disseminada. Fonte: O autor, 2024.

No setor B, há o predomínio de plagioclásio, não foi observado uma grande concentração de calcopirita no setor B, ela ocorre na forma de traço, e quando há sua ocorrência, ela está relacionada a uma textura disseminada (com granulometria que varia entre 0,02mm a 0,07mm. Porém a magnetita ocorre na forma de textura intercumulus, e com maior distribuição ao longo do setor (40%).

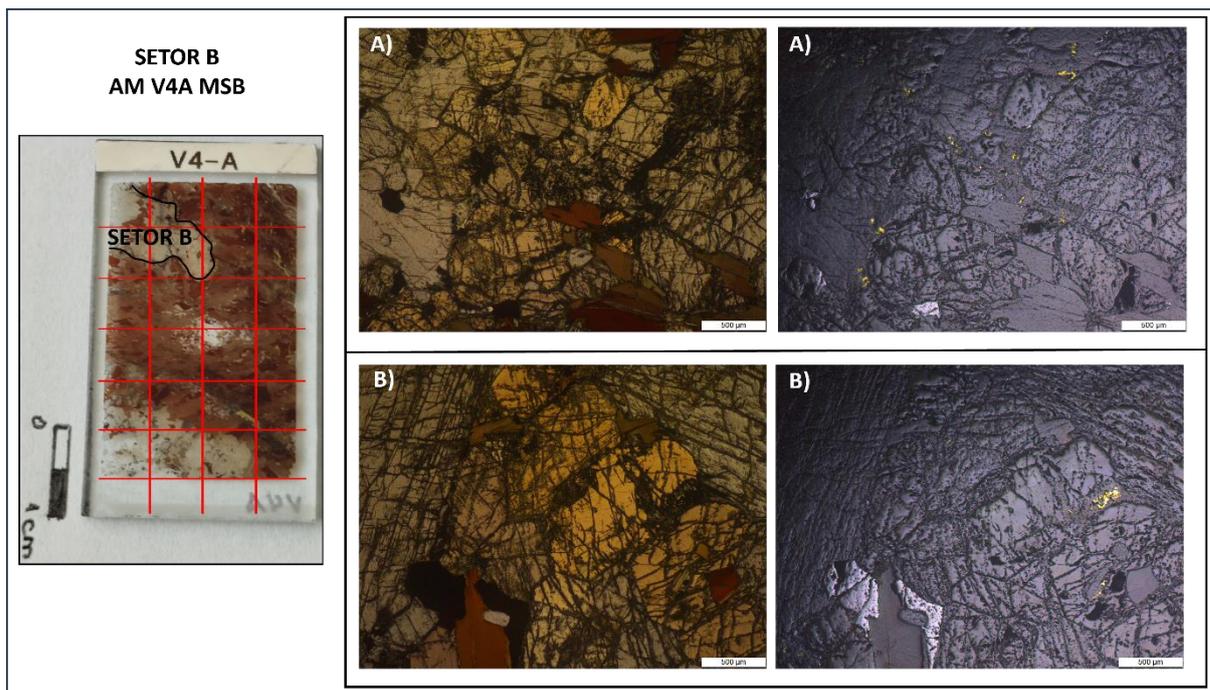


Figura 16- Esquema adotado para classificação dos setores. No setor A', é possível observar que há um empobrecimento de concentração dos sulfetos; No setor B' é possível observar a ocorrência dos cristais de magnetita, com granulometria que varia entre 0,5mm a 0,8mm. Fonte: O autor, 2024.

Do ponto de vista da granulometria, os sulfetos ocorrem em algumas porções na forma de textura intersticial disseminada, com granulometria de 0,015 mm a ~ 0,6mm. A magnetita ocorre como traço, porém nas porções em que está presente observa-se que esta ocorre intercrescida com a calcopirita.

Flogopitito/ Piroxenito Intercalado AM-V4 B

A amostra refere-se a um flogopitito, composto por flogopita (30%), piroxênio (45%), plagioclásio (20%), calcopirita (5-10%), magnetita (3-5%) e bornita que foi descrita como traço. A forma de ocorrência dos sulfetos nos flogopititos é definida como uma textura disseminada com os cristais distribuídos de forma intersticial, entre os cristais de flogopita.

Devido a variação da concentração entre flogopita e piroxênio, a lâmina foi dividida em setor A e B. O setor A é rico em filossilicatos, (95%), onde a ocorrência de sulfetos é na forma disseminada, classificado como fase primária (Figura 17), com granulometria que varia entre 0,01mm a 0,8mm. É possível observar que há o intercrescimento entre a calcopirita+magnetita.

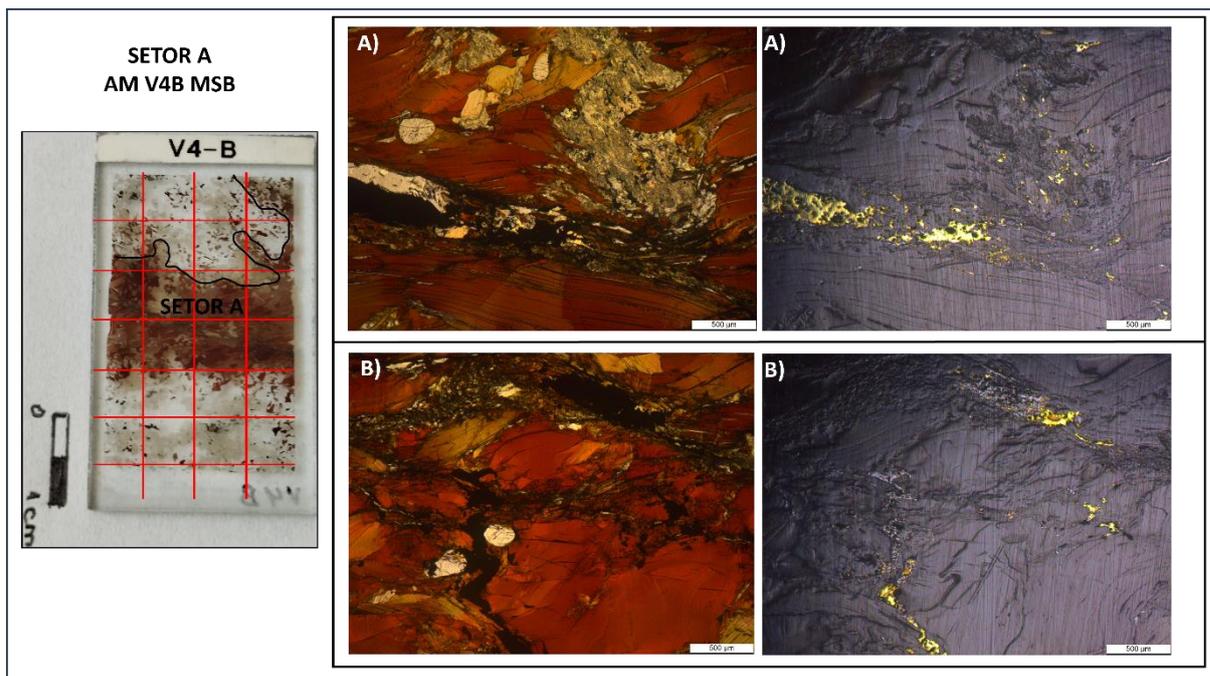


Figura 17 - Esquema da setorização adotada. Na imagem A', é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos na lâmina; na imagem B', é possível observar a forma de ocorrência do intercrescimento entre a calcopirita+magnetita. Fonte: O autor,2024.

No setor B, há o predomínio de piroxênio e plagioclásio. Como observado em lâminas anteriores, quando há o predomínio do plagioclásio, há baixa ou nenhuma concentração de sulfetos, havendo a ocorrência de magnetita, com granulometria que varia entre 0,04 a 0,15mm.

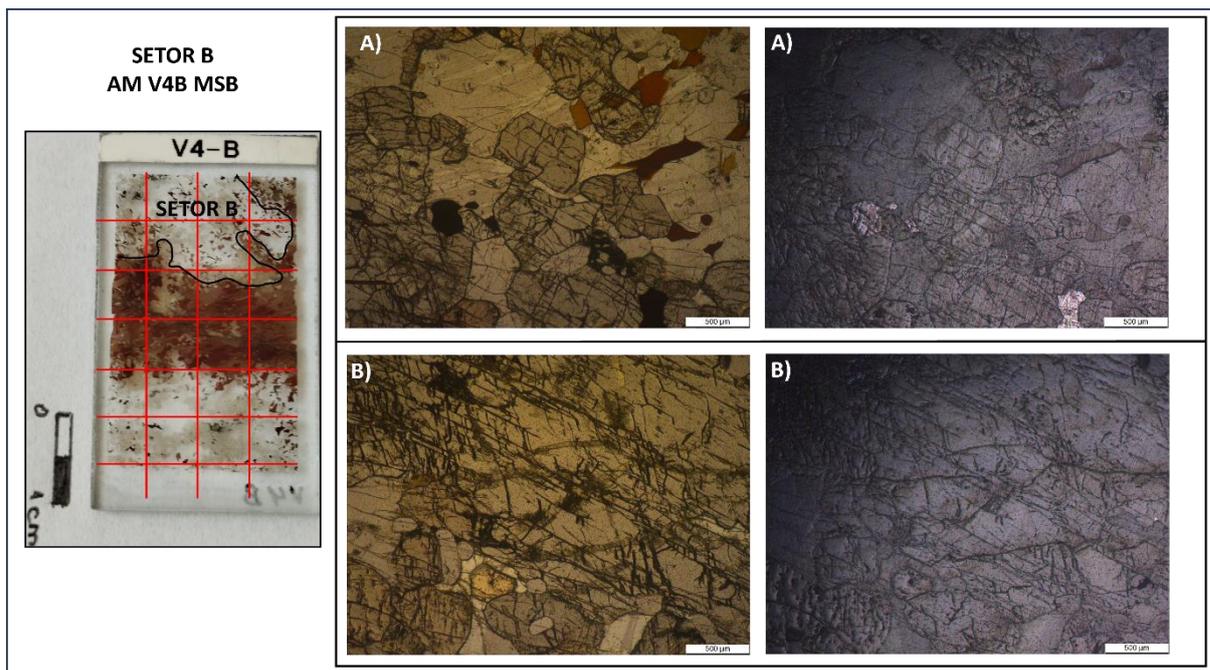


Figura 18 - Esquema da setortização adotada. Na imagem A', é possível observar que há ausência de sulfetos; Na imagem B', é possível observar a ocorrência de magnetita. Fonte: O autor, 2024.

Brecha Hidrotermalizada (AM V1)

A amostra é uma brecha hidrotermalizada composta por pirita (50%) flogopita (20%), ortopiroxênio (30%). É possível observar porções de minério maciço que cimentam a rocha brechada. Os sulfetos apresentam uma granulação grossa e granulometria que varia entre 0,8mm a 3,0mm. Diferente das outras lâminas analisadas, nesta lâmina é possível observar que a mineralização ocorre envolvendo a ganga. O setor A, rico em filossilicatos, os sulfetos ocorrem com textura disseminada e de forma intersticial, similar ao que se observou nas amostras de flogopitito. Observa-se que a magnetita e a calcopirita ocorrem intercrescidas.

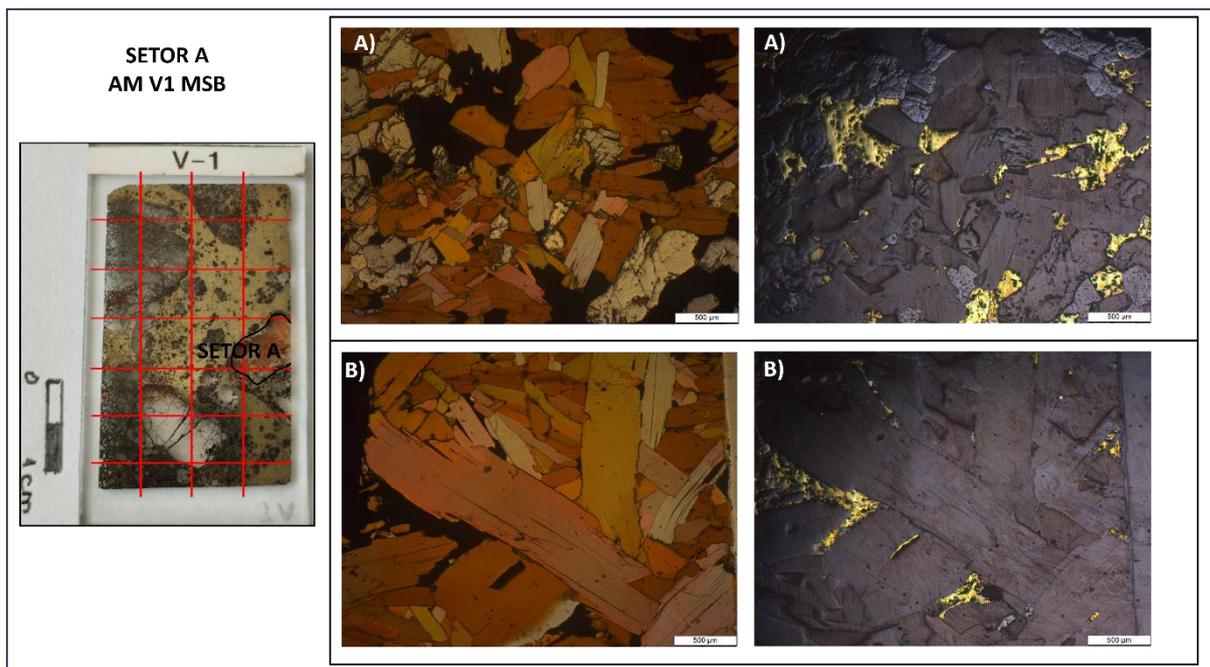


Figura 19 - Esquema da setorização adotada para classificação da lâmina. No setor A é possível observar a forma de ocorrência dos sulfetos que ocorrem na forma de textura intercumulus, porém é possível observar o intercrescimento entre a calcopirita+magnetita. Na Figura B', é possível observar que a ocorrência dos sulfetos no flogopitito é disseminada. Fonte: O autor, 2024.

No setor B, refere-se a um setor rico em fragmentos do piroxenito, onde os sulfetos envolvem a ganga. É possível observar que os sulfeto nessa lâmina ocorre como um bolsão mineralizado com cristais de calcopirita.

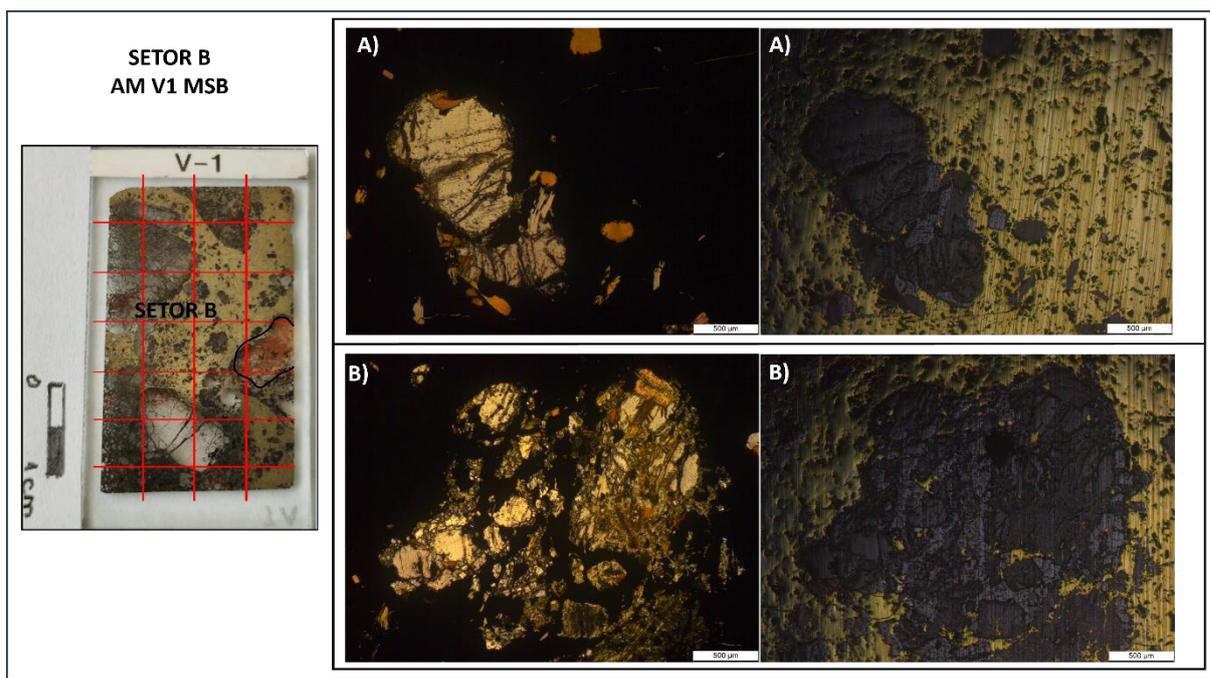


Figura 20 - Esquema da setorização adotada para classificação da lâmina. No setor B, é possível observar uma mineralização maciça de calcopirita, onde a o envolvimento da ganga pelo minério. Fonte: O autor, 2024.

4.2 MEV- EBSD

Foram analisados os 3 litotipos principais: ortopiroxenito, flogopitito e a brecha. A Figura 21 apresenta o mapa de fases mineralógicas (*All Phases Map*) da amostra AM-V1, que ilustra a distribuição e as associações mineralógicas, permitindo identificar os minerais presentes e sua interação textural, sendo os principais: clinopiroxênio (Cpx, em vermelho), clorita (Chl, em verde), talco (Tlc, em amarelo), plagioclásio/feldspato (Pl/F, em azul escuro), magnetita (Mag, em magenta) e calcopirita (Ccpy, em azul claro).

Nas brechas, os sulfetos ocorrem de forma disseminada, conforme evidenciado pelo mapeamento químico e mineralógico. A análise textural revela contatos abruptos entre os sulfetos e os minerais hospedeiros. A calcopirita (Ccpy), concentrada em áreas específicas dentro da matriz, apresenta uma relação preferencial com clinopiroxênios e, em menor grau, com clorita. Essa distribuição pontual é reforçada pela assinatura composicional e pela ausência de halos de alteração ao seu redor, sugerindo que a mineralização de sulfetos ocorreu de forma tardia, sem intercorrências significativas de dissolução ou recristalização.

O talco (Tlc) e a clorita (Chl), identificados em amarelo e verde, respectivamente, representam produtos de alteração hidrotermal em condições de baixa temperatura. A textura intersticial desses minerais sugere que sua formação está relacionada a processos de hidratação do clinopiroxênio, possivelmente em ambientes ricos em fluídos silicáticos.

Os minerais opacos, como magnetita (Mgt), apresentam-se em associação espacial próxima aos sulfetos, sugerindo um controle redox durante a formação mineralógica. Essa associação é consistente com a evolução química do sistema, onde fases ricas em ferro se cristalizam em equilíbrio com os sulfetos.

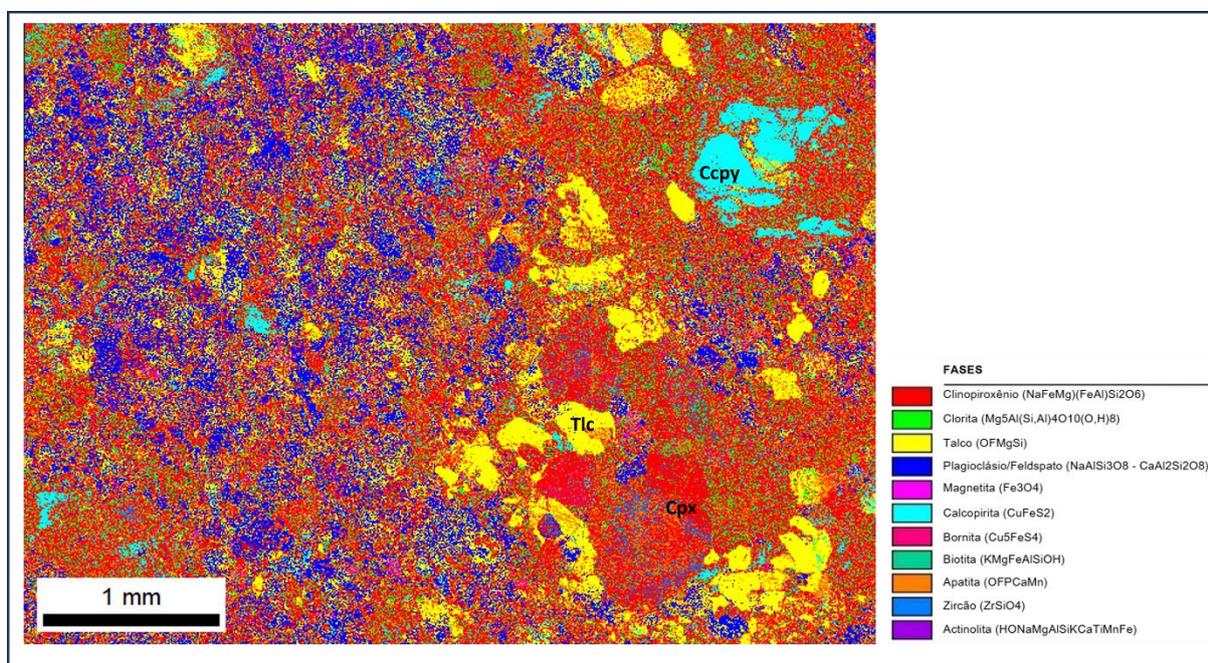


Figura 21 - Legenda: Mapa de fases mineralógicas (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-V1. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro (Ccpy). Fonte: O autor, 2024.

A **Figura 22** apresenta o mapeamento de fases mineralógicas da amostra Am 01, evidenciando que a matriz da amostra é composta predominantemente por clinopiroxênio (Cpx), identificado em vermelho. Os cristais de Cpx possuem granulometria relativamente maior em comparação às outras fases mineralógicas, sugerindo sua cristalização como um dos principais constituintes magmáticos primários.

Os contatos entre os grãos de clinopiroxênio são bem definidos. Os sulfetos, representados pela calcopirita (Ccpy, em azul claro), ocorrem de forma disseminada ao longo da matriz, com uma associação preferencial aos cristais de clinopiroxênio. O

mapeamento revela a presença de fases secundárias, como clorita (Chl, em verde) e talco (Tlc, em amarelo), distribuídas intersticialmente à matriz de clinopiroxênio. A associação espacial entre os sulfetos e os minerais opacos, como magnetita (Mag, em magenta), reforça a hipótese de um ambiente redox controlado durante a evolução geológica do sistema.

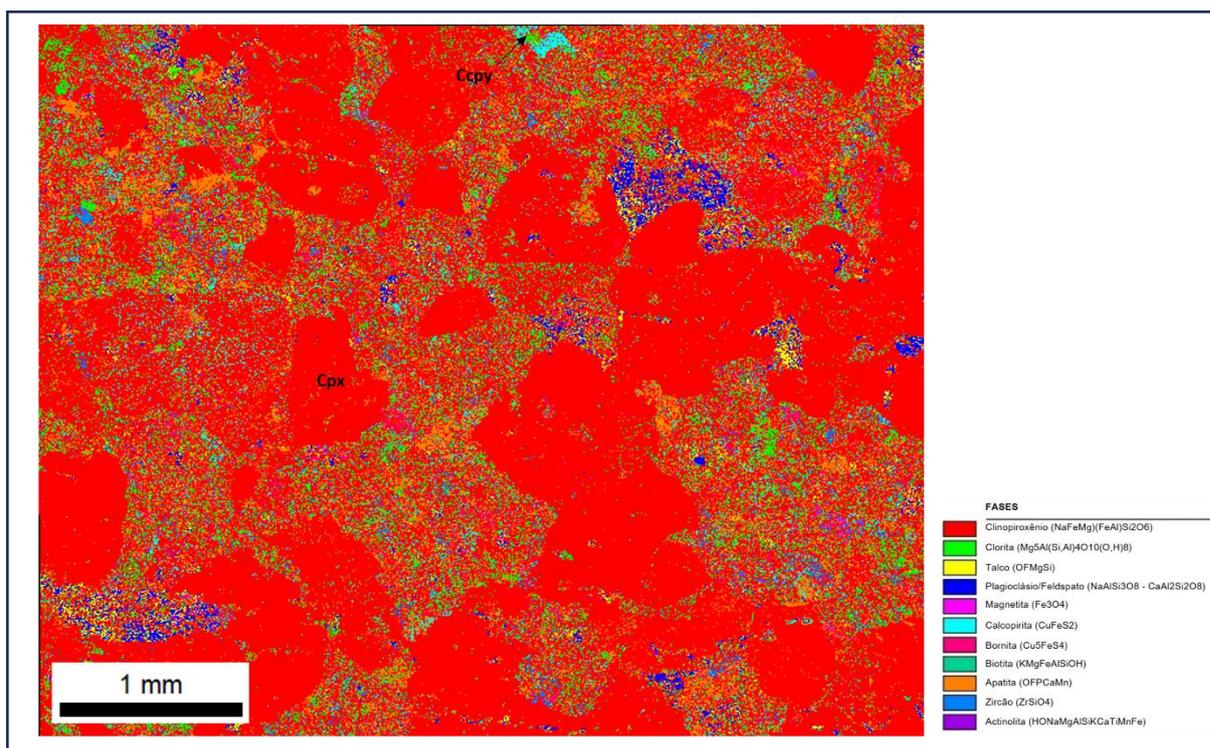


Figura 22 - Legenda: Mapa de fases minerais (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-01. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro. Fonte: O autor, 2024.

A amostra AM-11 é composta por uma alta concentração de clorita (Chl), como evidenciado na análise mineralógica por MEV-EBSD. Os sulfetos presentes na amostra, incluindo calcopirita (Cpy) e bornita (Bn), ocorrem de forma disseminada, porém em algumas porções a ocorrência é na forma maciça, o que por sua vez, indica uma distribuição heterogênea.

Já os sulfetos apresentam uma granulometria que varia entre 0,040 mm e 0,60 mm, o que sugere um potencial de mobilização dos fluidos hidrotermais responsáveis pela mineralização. Quando comparado com as outras amostras analisadas, a AM-11 possui maior concentração de sulfetos e uma granulometria superior.

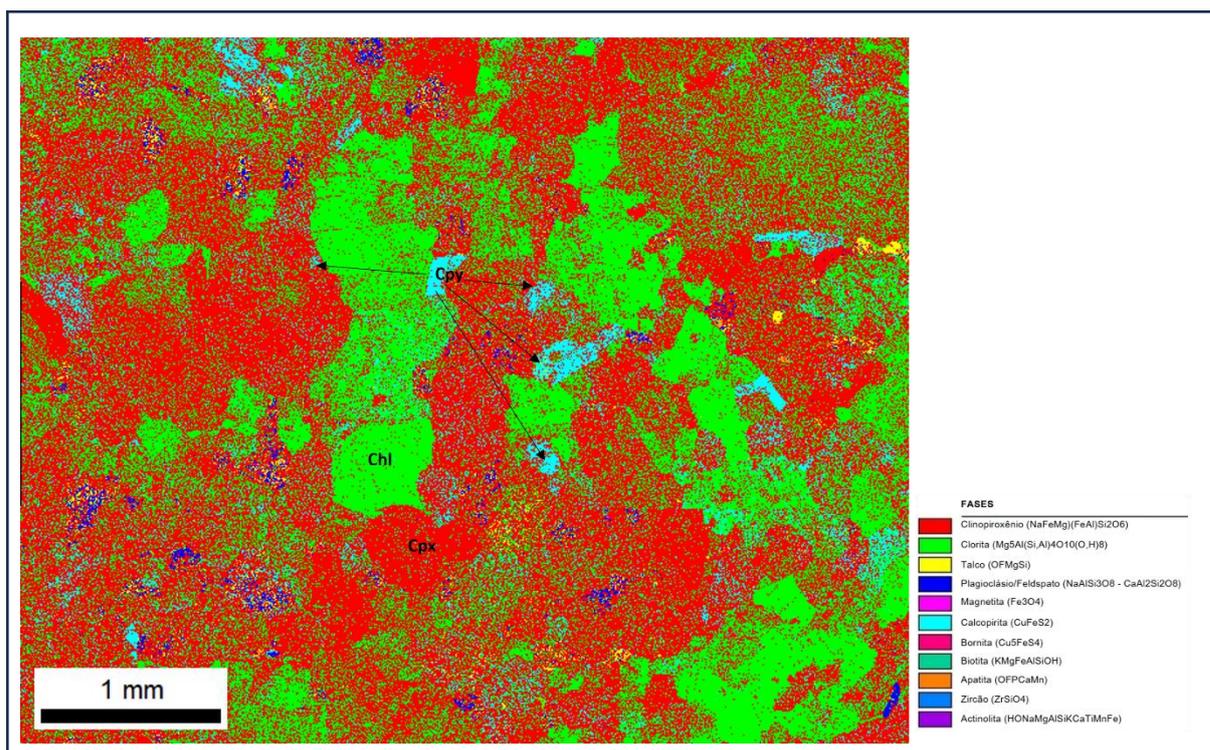


Figura 23 - Legenda: Mapa de fases minerais (all phases map) por MEV-EBSD da amostra AM-11. Código das cores: Vermelho: clinopiroxênio (Cpx); Verde: clorita (Chl); Amarelo: talco (Tlc); Azul escuro: plagioclásio/feldspato (Pl); Magenta: magnetita (Mag); Azul claro. Fonte: O autor, 2024.

5. DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE TEXTURAL

Nas amostras de ortopiroxênitos analisadas, observou-se que a textura predominante é a intercumulus, identificada por Castro (2022) e Spoladore (2023) como associada ao minério primário, e resultante da cristalização do magma máfico-ultramáfico. A textura intercumulus é marcada por junções tríplices, na qual três cristais diferentes se encontram em um único ponto, criando uma rede de interconexões minerais, com limites entre os minerais retilíneos. A **Tabela 3** - Tabela da granulometria analisada nos sulfetos+magnetita. Fonte, O Autor, 2024. **Tabela 3** é uma representação da média da granulometria dos sulfetos analisados em lâmina ao microscópio petrográfico, com auxílio do *software* de captura de imagem que permite medir diretamente o tamanho dos minerais.

Tabela 3 - Tabela da granulometria analisada nos sulfetos+magnetita. Fonte, O Autor, 2024.

ID Amostra	Granulometria Magnetita (mm)	Granulometria Calcopirita (mm)	Granulometria Bornita (mm)	Granulometria Pirita (μ)
AM11 MSB	0.050 – 1,214	0.040 -0.60		0.030 – 1750
V4- A	0.120 – 0.500	-	-	-
V4-B	0.115 – 0.300	0.050 – 0.27	-	-
AM-09	0.010 – 0.040	0.012 -0.12	-	-
AM- 01 AMSB	-	0.020 – 2000	-	-
AM-01 BMSB	-	0.015 -0.290	-	-
V1	0.135 – 0.600	0.150 - 1750	-	-

Para fins geometalúrgicos, a textura textura intercúmulus pode ser interpretada como uma textura de intertravamento simples (Figura 24), conforme definido por Craig & Vaughan (1984). Esta textura se caracteriza pelas margens retilíneas e pelo tamanho similar dos minerais.

TEXTURA	DIAGRAMA	Liberção/Ex. Minérios	TEXTURA	DIAGRAMA	Liberção/Ex. Minérios
Intertravamento simples, equigranularidade, margens retilíneas		Liberção razoável, ocorrência em depósitos ortomagmáticos, alto grau de metamorfismo e recristalização do minério.	Textura disseminada, fases finamente dispersas.		Liberção completa quase impossível, ocorrência por exsolução, Au e Arsenopirita, substituem Pirita/Esfalerita
Intertravamento simples, interpenetração negligenciável, margem curvilínea		Liberção razoável, ocorrência em depósitos de recristalização simultânea do minério.	Intertravamento tipo "atol", arcos intergranulares, envelopamento de partículas		Liberção difícil, mas possível, ex ocorrência: filme de hematita revestindo Au, e Calcocita na Pirita
Intertravamento médio, aspecto "manchado"		Liberção razoável, ocorrência em zonas de metassomatismo ativo (substituição partículas)	Camadas concêntricas, intertravamento tipo "teia"		Liberção razoável/difícil, ocorrência em depósitos de Fe, Mn e Al
Quase ausência de intertravamento, textura do tipo "Myrmekitic".		Liberção quase impossível, ocorrência incomum, processos de metassomatismo e exsolução.	Planar/Lamelar, intertravamento tipo "sandwich"		Liberção razoável/fácil, exemplos de ocorrência ilmenita/magnetita, hematita/magnetita
			Reticular, intertravamento do tipo "rede"		Liberção razoável, ocorrência em associações minerais como bornita/calcopirita, hematita/ilmenita/magnetita

Figura 24 - Classificação Geométrica e características de Liberação Mineral. Fonte: Adaptado de Craig & Vaughan, 1984.

Na **Figura 25** é possível comparar a textura intercumulática do minério no ortopiroxênio e a textura de intertravamento simples, para classificação da liberação mineral. Este tipo de textura ocorre quando os cristais de diferentes minerais se interligam de maneira complexa, formando um arranjo denso e entrelaçado

(Gonçalves, 2017). Essa textura é uma característica comum em ambientes geológicos de alta temperatura e pressão, na qual a recristalização desempenha um papel significativo na textura e no tipo de contato entre os minerais (Passchier & Trouw, 2005).

Quando se analisa as características de liberação mineral proposta por Craig & Vaughan, os ortopiroxenitos analisados são caracterizados por terem um processo de liberação mineral razoável, isso se dá não somente pelos sulfetos estarem envolvidos pela ganga, mas como pela sua granulometria e por sua ocorrência associada a magnetita.

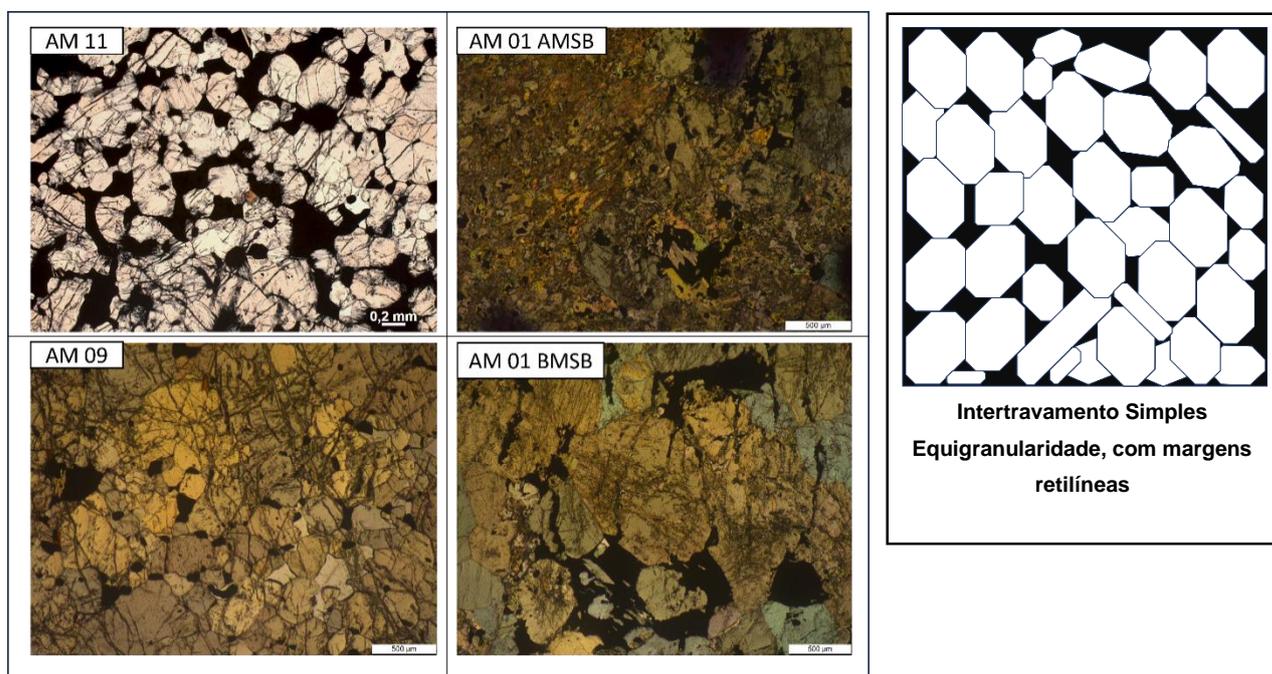


Figura 25 - A esquerda quadro com fotomicrografias dos ortopiroxenitos, representado a textura intercumulus, e a direita a textura de intertravamento simples, com margens retilíneas, de acordo com Craig & Vaughan, 1984

Nos flogopititos, observa-se que os sulfetos ocorrem com uma textura disseminada nos interstícios da flogopita. Neste caso o contorno dos cristais é curvilíneo, conforme se observa na figura

Figura 26. De acordo com a classificação geometalúrgica de Craig e Vaughan (1984) essa textura se classifica como intertravamento simples, definido pela interpenetração negligenciável e margens curvilíneas dos minerais.

O processo de liberação mineral dos flogopititos pode ser classificado como razoável (Craig & Vaughan, 1984), porém há algumas problemáticas quando analisados do ponto de vista industrial. Os sulfetos que ocorrem nos flogopititos tem

com uma granulometria fina, sendo observado durante o processo de moagem. A flogopita, um mineral da família das micas, apresenta uma estrutura lamelar que pode atuar como uma matriz para a disseminação dos sulfetos (Craig & Vaughan, 1984).

A textura disseminada indica que os sulfetos não se encontram concentrados em uma fase específica, mas sim distribuídos de maneira uniforme na rocha. E também como a fração granulométrica dos sulfetos é pequena, a problemática na operação pela moagem das micas torna o processo muitas vezes inviável.

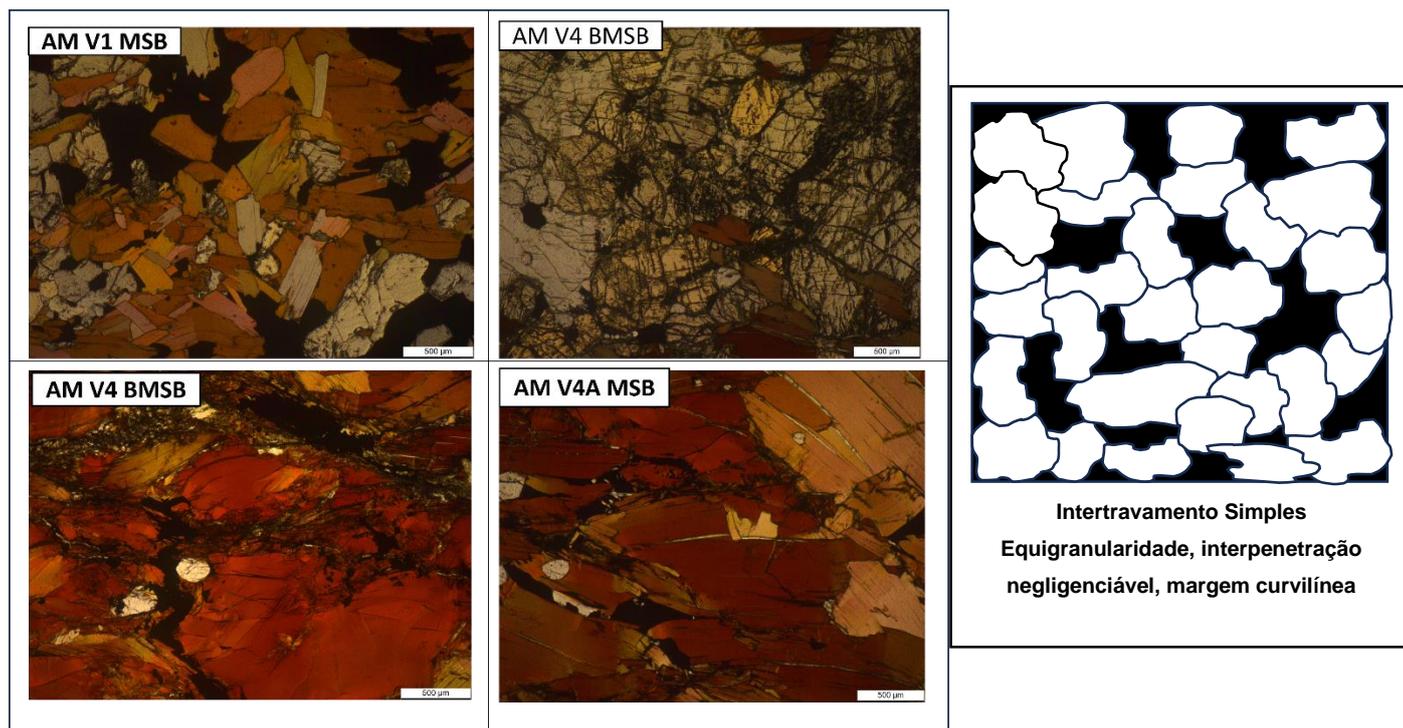


Figura 26 - A esquerda fotomicrografia representativa da textura disseminada e intersticial, nos flogopititos e a direita a textura de intertravamento simples, de acordo com Craig & Vaughan, 1984.

Na Brecha Hidrotermalizada (V1) verifica-se que o minério ocorre como a matriz de uma brecha e que os fragmentos são de piroxenito e flogopitito, em menor proporção. Ao considerarmos a classificação geometalúrgica de Craig & Vaughan (1984), vemos que essa textura (Figura 28) se assemelha a textura de intertravamento do tipo em atol (Figura 24), definida pela formação de arcos intergranulares e envelopamento das partículas. No entanto, diferente do proposto pelos autores em que o minério é envolto pela ganga, nas brechas analisadas é o sulfeto que forma o envoltório envolvendo a ganga.

Diferente do que é proposto por Craig & Vaughan (1984), quando analisamos, a classificação de intertravamento do tipo atol proposta por Craig e Vaughan pode subestimar a simplicidade do processo de liberação mineral em depósitos onde a

ganga envolve o minério. A interação entre a calcopirita e a ganga, que não resulta em um entrelaçamento complexo, permite um beneficiamento direto e eficiente.

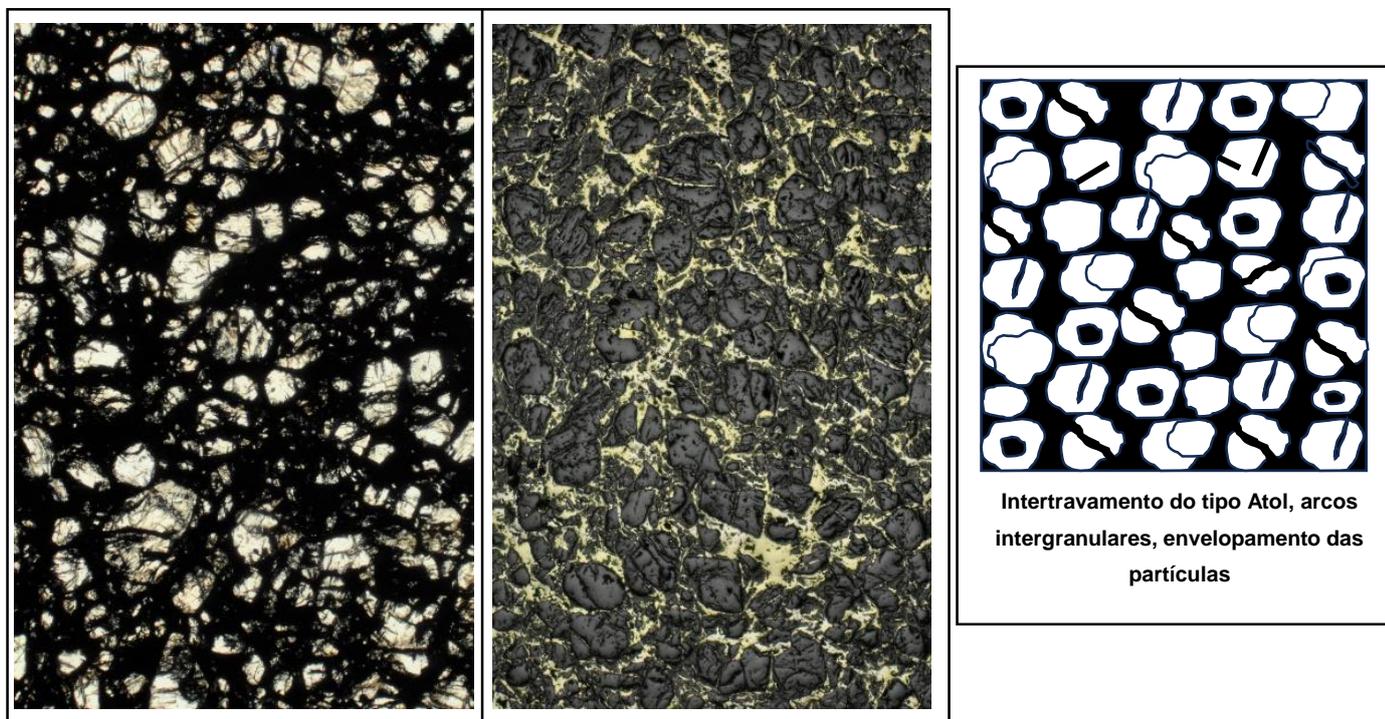


Figura 27 - esquerda fotomicrografia em luz transmitida mostrando fragmentos de ortopiroxênitos envoltos por minério; ao centro fotomicrografia da mesma porção da lâmina, em luz refletida; e a direita a textura de intertravamento do tipo em atol, de acordo com Craig & Vaughan, 1984

A interpretação das texturas minerais e a análise de liberação dos grãos são usadas na elaboração de modelos geológicos. Essas interpretações estão diretamente relacionadas ao processo de cominuição, a primeira etapa do beneficiamento de minérios, que visa liberar as partículas de minerais de minério da ganga, porém é necessário conhecer a granulometria, as texturas e os intercrescimentos minerais.

A britagem ou moagem inadequada pode resultar na perda de minerais valiosos, descartados como rejeito. Por outro lado, uma fragmentação excessiva desperdiça energia e gera finos que prejudicam o processo de beneficiamento. Devido a necessidade de caracterizar não somente o minério, mas toda a mineralogia da área de estudo. A Tabela 4 ilustra a granulometria da ganga.

Tabela 4 - Granulometria da ganga analisada. Fonte: O Autor, 2024.

ID Amostra	Granulometria Ortopiroxênio	Granulometria Clinopiroxênio	Granulometria Flogopita	Outros
AM11 MSB	70 – 680	-	30 - 530	Ausente
V4- A	150 – 1500	-	200- 2050	Ausente
V4-B	160 – 1000	-	200 - 1800	5%
AM-09	90 – 700	-	-	-
AM- 01 AMSB	90 – 2400	300- 1500	-	-
AM-01 BMSB	200 – 1200	300 - 1600	-	-
V1	-	-	150 - 1300	5%

Ao abordar os processos de liberação dos grãos do minério, é preciso estabelecer uma classificação baseada na geometria dos intercrescimentos e intertravamentos dos grãos e partículas das texturas.

Outro aspecto textural analisado foi o intercrescimento, observado entre calcopirita e magnetita, calcopirita e pirita, além da combinação tripla entre calcopirita, pirita e magnetita. Esse intercrescimento pode impactar significativamente a eficiência da planta de beneficiamento, dificultando a separação dos minerais durante os processos de moagem e flotação.

A presença dessas associações complexas exige ajustes nos parâmetros operacionais e pode aumentar o consumo de reagentes, reduzindo a recuperação e a pureza do concentrado final.

5.2 COMPOSIÇÃO MODAL

A caracterização modal das amostras foi realizada com o objetivo de quantificar a distribuição dos sulfetos e minerais de ganga nas lâminas analisadas, considerando também a variação granulométrica observada.

Conforme Arroyo Ortiz (2014), a análise detalhada da composição mineralógica e química das amostras provenientes de uma mina ou depósito mineral são essenciais para prever o comportamento metalúrgico do material, já que minerais de mesma composição química podem apresentar respostas distintas devido a diferenças em hábito ou textura.

Os resultados obtidos, apresentados nas Tabelas 5 e 6, indicam a distribuição modal dos minerais de interesse e da ganga nas diferentes amostras estudadas. A **Tabela 5** apresenta a distribuição modal dos sulfetos e da magnetita, indicando que os sulfetos ocorrem de forma disseminada, geralmente com granulometria menor do que a ganga.

Entre os sulfetos identificados, a calcopirita destaca-se como o principal mineral de interesse, com concentrações que alcançam até 85% em algumas amostras (V1). Outros sulfetos, como pirita e bornita, aparecem em proporções menores ou estão ausentes em várias amostras. Já a magnetita ocorre em traços ou concentrações moderadas, frequentemente associada aos sulfetos ou dispersa na matriz mineralógica.

Tabela 5 - Distribuição modal dos Sulfetos + magnetita. Fonte: O autor, 2024.

ID Amostra	Magnetita %	Calcopirita	Bornita	Pirita
AM11 MSB	Traço	1 - 3%	Ausente	3-5%
V4- A	Traço	Ausente	Ausente	Traço
V4-B	Traço	Traço -1%	Ausente	Traço
AM-09	3 – 5%	Traço- 1%	Traço	Ausente
AM- 01 AMSB	Ausente	3 – 5%	Traço	Ausente
AM-01 BMSB	Ausente	3 – 10%	Traço	Ausente
V1	1%	85%	Ausente	Ausente

A **Tabela 6** complementa essa análise, destacando a composição modal da ganga, com predomínio de minerais máficos como ortopiroxênio, clinopiroxênio e flogopita. Em algumas amostras, como AM-09, observa-se uma predominância quase total de ortopiroxênio (90–95%), enquanto em outras, como V4-A e V4-B, a flogopita predomina, compondo até 95% da amostra.

Tabela 6 - Distribuição modal da ganga. Fonte: O autor, 2024.

ID Amostra	Ortopiroxênio	Clinopiroxênio	Flogopita
AM11 MSB	10 - 30%	Ausente	3 – 5%
V4- A	5%	Ausente	90- 95%
V4-B	5 – 20%	Ausente	75%
AM-09	90 – 95%	Ausente	Ausente
AM- 01 AMSB	5 – 10%	40 – 60%	Ausente
AM-01 BMSB	20 – 40%	10 – 40%	-
V1	Ausente	-	10%

Essa caracterização permite correlacionar características intrínsecas do minério, como a dureza e a granulometria, às etapas específicas do beneficiamento, o que constitui o fundamento da caracterização geometalúrgica. Essa abordagem, como indicado por Gonçalves (2016), é indispensável para ajustar e otimizar operações unitárias, garantindo maior eficiência, redução de perdas e maximização da recuperação de minerais valiosos.

A granulometria distinta entre sulfetos e ganga impacta diretamente as etapas de cominuição e flotação. A liberação eficiente dos minerais de interesse depende de ajustes no processo de beneficiamento, considerando fatores como a textura e a associação mineralógica (Craig & Vaghan, 1984). Essa integração entre dados químicos, mineralógicos e metalúrgicos reforça a necessidade de uma abordagem geometalúrgica detalhada para viabilizar operações mais eficientes e sustentáveis, especialmente em depósitos com características mineralógicas tão diversas quanto as estudadas.

Sendo assim, as três litologias analisadas na área de estudo: ortopiroxenito, flogopitito e brechas, apresentam características distintas em relação à mineralização, que influenciam diretamente sua viabilidade metalúrgica e os processos de beneficiamento.

Nos ortopiroxenitos, os sulfetos ocorrem em duas formas principais: disseminada e maciça, com granulometria variada conforme descrito anteriormente. Essa distribuição granulométrica, associada à forma intercumulus dos sulfetos, favorece a eficiência das etapas de beneficiamento, como moagem, flotação e peneiramento. A paragénese mineralógica identificada sob o enfoque geometalúrgico indica que os

ortopiroxenitos possuem propriedades que facilitam a liberação dos minerais de interesse durante a moagem, aumentando a recuperação nas etapas subsequentes. Esses fatores tornam os ortopiroxenitos altamente viáveis para exploração e processamento metalúrgico (Craig & Vaghan, 1984).

A brecha, apresenta-se predominantemente com mineralização na forma maciça, porém com porções disseminadas. A forma maciça, associada a uma granulometria favorável, contribui para maior eficiência nos processos de beneficiamento, similar ao que é observado nos ortopiroxenitos. A estrutura das brechas, caracterizada por zonas de alta concentração de sulfetos, mostra uma excelente favorabilidade metalúrgica, facilitando tanto a moagem quanto as etapas de separação física (Craig & Vaghan, 1984).

Por sua vez, os flogopititos apresentam características que comprometem sua viabilidade metalúrgica. Nessa litologia, os sulfetos ocorrem em baixa concentração, exclusivamente na forma disseminada, e possuem granulometria reduzida quando comparados às outras litologias. A flogopita, um mineral de hábito placóide, apresenta desafios adicionais devido às suas propriedades físicas, que dificultam o processo de liberação dos sulfetos durante a moagem.

Além disso, a presença de partículas finas e a natureza lamelar da flogopita aumentam os riscos de entupimento nas peneiras durante o peneiramento, prejudicando a eficiência do processo. Essas características também interferem negativamente na flotação, reduzindo a recuperação dos minerais de interesse. Assim, os flogopititos não são considerados viáveis para beneficiamento metalúrgico, devido à baixa concentração de sulfetos e aos entraves operacionais associados às suas propriedades físicas (Craig & Vaghan, 1984).

Quando analisadas de forma comparativa, as três litologias evidenciam comportamentos distintos quanto à viabilidade dos processos de beneficiamento. Enquanto os ortopiroxenitos e as brechas se destacam por sua favorabilidade, os flogopititos demonstram limitações, reforçando a necessidade de uma seleção criteriosa das litologias para maximizar a eficiência e a viabilidade econômica da operação mineral.

6 CONCLUSÃO

A caracterização geometalúrgica realizada para as diferentes litologias da área de estudo permitiu uma compreensão detalhada das características mineralógicas e granulométricas das amostras analisadas, fundamentais para a otimização dos processos de beneficiamento.

A análise dos ortopiroxenitos e das brechas revelou um cenário favorável para as operações metalúrgicas, com mineralização de sulfetos em estruturas e formas que facilitam sua liberação durante as etapas de moagem e flotação. A granulometria adequada e a associação mineralógica dos sulfetos nesses materiais favorecem a eficiência das operações unitárias, resultando em maior recuperação dos minerais valiosos e redução de perdas no processamento.

Por outro lado, os flogopititos demonstraram limitações operacionais, como a baixa concentração de sulfetos e dificuldades na liberação devido às características físicas da flogopita, o que compromete sua viabilidade metalúrgica.

Esses resultados destacam a importância de uma abordagem geometalúrgica detalhada, que correlaciona as propriedades intrínsecas dos materiais com as exigências dos processos de beneficiamento. A caracterização geometalúrgica não apenas orienta o planejamento das operações, mas também contribui para a redução de custos e o aumento da eficiência, possibilitando uma exploração mineral mais sustentável e economicamente viável.

A seleção criteriosa das litologias e a adaptação dos processos de beneficiamento, considerando as variações granulométricas e mineralógicas, são fundamentais para garantir o sucesso das operações e a maximização da recuperação dos minerais de interesse.

Considerando futuros estudos relacionados à temática abordada neste trabalho, recomenda-se realizar uma seleção de amostras de litologias mais favoráveis ao processo de exploração e beneficiamento, como os ortopiroxenitos e as brechas, dada a sua superioridade em termos de eficiência metalúrgica. Essas litologias apresentam características que facilitam as etapas de moagem, flotação e peneiramento, promovendo maior recuperação dos minerais valiosos.

Para os flogopititos, que apresentam dificuldades operacionais devido à baixa concentração de sulfetos e às características da flogopita, sugere-se uma reavaliação das práticas de beneficiamento. Essa reavaliação pode incluir o desenvolvimento de

novas abordagens tecnológicas, como alterações nas etapas de moagem e flotação, ou a separação das litologias mais viáveis para otimizar a recuperação.

Além disso, é importante realizar estudos contínuos de caracterização geometalúrgica para monitorar e ajustar os processos de beneficiamento conforme as variações das amostras. Essa prática permitirá a adaptação dos métodos de processamento às mudanças nas características do minério, garantindo maior controle e eficiência operacional. Também se recomenda integrar as informações mineralógicas, granulométricas e operacionais em modelos geometalúrgicos que possam prever o comportamento do minério nas etapas de beneficiamento. A utilização dessas modelagens é fundamental para antecipar problemas operacionais e otimizar as estratégias de processamento.

8 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M. de. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais*, v. 1, n. 1981, p. 1-10, 1981.
- CONTESSOTTO, Renato. Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de minérios de níquel da mina de Santa Rita-BA, em apoio à geometalurgia. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CRAIG, J. R.; VAUGHAN, D. J. Ore mineral textures. *Ore microscopy and ore petrography*, p. 120-163, 1994.
- DUARTE, L.C.; Juchem, P.L.; Pulz, G.M.; Brum, T.M.M.; Chodur, N.L.; Liccardo, A.; Fischer, A.C.; Acauan, R.B. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: Exemplos Brasileiros. *Pesquisas em Geociências (UFRGS. Impresso)*, Porto Alegre, v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003.
- Dedavid, A.B.; Gomes, C.I.; Machado, G. Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras - materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. *IDEIA-PUCRS*, Porto Alegre, p. 60, 2007.
- DELGADO, I.M. et al. Cobre no Vale do Rio Curaçá, Estado da Bahia. *Série Geologia*, n. 20, Seção Geologia Econômica, n. 3, Brasília: DNPM, 1981.
- GARCIA, Pedro Maciel de Paula. A Província Cuprífera do Nordeste Meridional: Evolução dos Processos e Modelos Metalogenéticos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 2018. 320 pp.
- KOSIN, M. et al. Geologia do segmento norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá e Guia de Excursão. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 33 (Suplemento), p. 15-26, mar. 2003.
- LINDENMAYER, Z.G. Evolução geológica do vale do rio Curaçá e dos corpos máfico-ultramáficos mineralizados a cobre. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 1982. 140 p.

- LUND, Cecilia. Mineralogical, chemical and textural characterisation of the Malmberget iron ore deposit for a geometallurgical model. 2013. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet.
- MAGALHÃES, M.; LEMOS, M.; MOREIRA, V.; PEREIRA, M.; SOUZA, T.; VIEIRA, M. Aplicação da geometalurgia para aumento da recuperação de ouro–Santa Bárbara, MG.
- MANTILLA, Edgar Rodo. Avaliação da liberação mineral por análise de imagens digitais obtidas em microscópio ótico de luz refletida. 2013.
- MORALES, Luiz Fernando Grafulha; HINRICHS, Ruth; FERNANDES, Luís Alberto D.Ávila. A técnica de difração de elétrons retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. *Pesquisas em Geociências*, v. 34, n. 1 (jan./jun.), p. 19-34, 2007.
- PASSCHIER C.W., TROUW R.A.J. 2005. *Microtectonics*. 2ed, Berlin: Springer. 366p.
- PERES, A.E.C. et al. Métodos de concentração. In: VALADÃO, G.E.S. (Org.); ARAUJO, A.C. (Org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-139.
- PETRUK, W. *Applied mineralogy in the mining industry*. 1. ed. Elsevier, Ottawa, 2000. 268 p.
- PRIOR, D.J.; Boyle, A.P.; Brenker, F.; Cheadle, M.C.; Day, A.; Lopez, G.; Potts, G.J.; Reddy, S.; Spiess, R.; Timms, N.; Trimby, P.; Wheeler, J.; Zetterstrom, L. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, v. 84, p. 1741-1759, 1999.
- PORPHÍRIO, N.H. et al. *Tratamento de Minérios*. 5. ed. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2010. p. 57-59.
- SANT'AGOSTINO, Lília Mascarenhas; KAHN, Henrique. *Metodologia para caracterização tecnológica de matérias primas minerais*. 1997.
- SILVA, A.T. *Tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Edições Engenharia, 1973. v. 4 apud VALADÃO, G.E.S. (Org.); ARAUJO, A.C. (Org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. p. 234.
- TEIXEIRA, Léo Rodrigues. *O complexo Caraíba e a suíte São José do Jacuípe no cinturão Salvador-Curaçá (Bahia, Brasil): petrologia, geoquímica e potencial metalogenético*. 1997. Tese de Doutorado.

TEIXEIRA, J.B.G. et al. Depósitos de Cobre da região do Vale do Rio Curaçá Bahia.
In: BRITO, R.S.C. de; SILVA, M.G. da; KUYUMIJAN, R.M. Modelos de Depósitos
de Cobre no Brasil e sua resposta ao intemperismo. São Paulo, CPRM, 2010.