RENATO CONTESSOTTO

**Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de
minérios de níquel da mina de Santa Rita - BA, em apoio à
geometalurgia**

**São Paulo
2017**

RENATO CONTESSOTTO

**Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de
minérios de níquel da mina de Santa Rita - BA, em apoio à
geometalurgia**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

**São Paulo
2017**

RENATO CONTESSOTTO

**Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de
minérios de níquel da mina de Santa Rita - BA, em apoio à
geometalurgia**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Mineral.

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

**São Paulo
2017**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Contessotto, Renato

Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de minérios de níquel da mina de Santa Rita - BA, em apoio à geometalurgia / R. Contessotto - versão corr. -- São Paulo, 2017.

213 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Caracterização Tecnológica de Minérios 2.Difração por Raios X
3.Estatística aplicada 4.MINERAÇÃO DE MINERAIS METÁLICOS
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Prof^o Dr. Henrique Kahn, por todos esses anos de ensinamentos e amizade, e a empresa Mineração Mirabela por permitir a realização deste estudo.

Em especial a M.Sc. Juliana Livi Antoniassi pela ajuda nas análises de difração de raios X ao M.Sc. Daniel Uliana pelos ensinamentos na análise automatizada de imagens por microscopia eletrônica de varredura, a Prof^a Dra. Carina Ulsen pelos ensinamentos sobre a estruturação de um texto acadêmico na qualificação desta dissertação e ao Sr. Gabriel Pato pelas discussões e ensinamentos de estatística multivariada. Aos alunos da UNIFAL-MG, Rafael Cunha e Ronaldo Fulgêncio, pela ajuda no processamento dos dados de MLA.

A toda equipe técnica da Mineração Mirabela e do Laboratório de Caracterização Tecnológica – POLI/USP pela ajuda na amostragem e preparação de amostras.

Aos meus familiares, amigos e a Bárbara Viera Neto pelo companheirismo, amor e amizade.

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste estudo, meus sinceros agradecimentos.

*Nosso conhecimento só pode ser
finito, enquanto nossa ignorância
deve necessariamente ser infinita.*
(Karl Popper)

RESUMO

A Mina de Santa Rita, situada no complexo máfico-ultramáfico Fazenda Mirabela, é uma intrusão máfica-ultramáfica, mineralizada a sulfetos de níquel e cobre, situada no sudeste do Estado da Bahia, município de Itagibá. Esse depósito é composto por rochas de idade Paleoproterozóica, metamorfizadas em fácies granulito. Os sulfetos de níquel e cobre ocorrem disseminados e, preferencialmente, associados a harzburgitos, olivina ortopiroxenitos e ortopiroxenitos. O minério é composto por uma grande variedade de Mg-silicatos, sendo que o níquel ocorre essencialmente como pentlandita nos peridotitos, além de se apresentar como elemento menor em silicatos e espinélios em rochas mais máficas. Informações de processo demonstram a impossibilidade de se estabelecer uma correlação robusta entre a composição química do minério e seu comportamento na etapa de beneficiamento mineral. Desta forma, o conhecimento da variabilidade mineralógica no depósito é de fundamental importância para o planejamento de lavra e processamento mineral. Mais de 300 amostras do plano de mineração de curto prazo (2013-2017) relativas a intervalos de furos de sondagem considerados no estudo de viabilidade econômica (período de 1985-2004) foram agrupadas em domínios mineralógicos, utilizando a análise estatística multivariada de dados de difração de raios X (DRX-AEM). Dezesete domínios mineralógicos inicialmente definidos são essencialmente diferenciados com base na presença e conteúdos relativos dos principais minerais de ganga: serpentina, olivina e piroxênio. Amostras representativas dos principais domínios mineralógicos, pré-definidos por DRX-AEM, foram submetidas a estudos de caracterização mineralógica de detalhe por análise de imagens (MEV-MLA). Os resultados indicam que os grupos com composições mais peridotíticas e/ou carbonáticas, com maiores conteúdos de serpentina, apresentam menor tempo de moagem para atingir P_{95} igual a 0,15 mm; maior alteração dos grãos de pentlandita; maior parcela de total de níquel associado a silicatos; menor grau de liberação dos sulfetos; e maior quantidade de sulfetos abaixo de 10 μm , em relação aos grupos de composição mais piroxenítica.

Palavras chaves: *domínios mineralógicos, difratometria de raios X, estatística multivariada, caracterização de minérios, minério de níquel, geometalurgia, mina Santa Rita.*

ABSTRACT

The Santa Rita mine, located in the mafic-ultramafic complex Fazenda Mirabela, is a mafic-ultramafic intrusion mineralized to nickel and copper sulphides located in the southeast of Bahia state, Itagibá municipality. The nickel sulphide deposit comprises a portion of a mafic-ultramafic layered complex under granulite metamorphism facies. Disseminated Ni and Cu sulphides form a stratiform body parallel to the lithostratigraphic contacts extending upwards essentially from the harzburgite unit and through the olivine orthopyroxenite unit. The nickel content is mainly associated to pentlandite in peridotitic rocks but also enriched in silicates and spinels in mafic rocks (dunites). Industrial plant benchmark data have shown the unfeasibility of establishing a strong relation between the ore chemical composition and its behavior in the mineral beneficiation process. Therefore, the knowledge of the mineralogical variability in the deposit is crucial for mine planning and mineral/metallurgical processing. More than 300 samples from drill core samples from the feasibility studies (period of 1985-2004) included in the short-term mining plan (2013-2017) were clustered into geological domains applying multivariate statistical analysis (MSA) of X-ray diffraction data (XRD). Results discriminated seventeen initial mineralogical domains considering the content of major gangue minerals: serpentine, olivine and pyroxene. Representative samples of the main mineralogical domains pre-defined by XRD-MSA ore-types were later subject to sieve size analysis followed by detailed mineralogical studies by automated SEM image analysis (MLA). The results indicate that groups with more peridotite and / or carbonatic compositions, with higher content of serpentine, have less time of grinding to reach P_{95} equal to 0,15 mm; high level of pentlandite alteration; greater portion of nickel associated into silicates; lower sulphides liberation degree; and a higher amount of sulphides below 10 μm ; in relation to the most pyroxenic composition groups.

Key words: *mineralogical domains, X-ray diffraction, multivariate statistical analysis, process mineralogy, nickel ore, geometallurgy, Santa Rita mine.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização do estudo	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Procedimentos experimentais	3
1.4	Relevância	4
1.5	Estrutura da dissertação	4
2	REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1	Minério de níquel.....	6
2.2	Intrusão Fazenda Mirabela e mina de Santa Rita	8
2.2.1	Geologia Regional	8
2.2.2	Intrusão Fazenda Mirabela	9
2.2.3	Mineralogia.....	11
2.2.3.1	Sulfetos.....	11
2.2.3.2	Química mineral.....	13
2.2.4	Beneficiamento mineral	14
2.2.5	Tipos de minério / domínios geometalúrgicos	15
2.3	Caracterização tecnológica.....	15
2.3.1	Técnicas analíticas empregadas em estudos de caracterização	16
2.3.1.1	Difratometria de raios X (DRX).....	16
2.3.1.2	Mineralogia quantitativa automatizada	18
2.4	Geometalurgia	20
2.4.1	Modelo geometalúrgico	21
2.4.2	Benefícios.....	22
2.4.3	Amostragem e estimativa de variáveis geometalúrgicas.....	23
2.5	Análise estatística multivariada (AEM)	24
2.5.1	Análise por agrupamento (cluster analysis)	24
2.5.2	Análise de componentes principais (PCA).....	28
2.5.3	Software X'Pert Highscore Plus na análise por agrupamento e PCA	31
3	DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS MINERALÓGICOS (1ª ETAPA)	34
3.1	Procedimento experimental – 1ª etapa (E ₁)	34
3.1.1	Amostras estudadas na E ₁	34
3.1.2	Procedimentos da análise por DRX + AEM da 1ª Etapa	37
3.2	Resultados e discussões – 1ª etapa (E ₁).....	39

4	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE DETALHE (2ª ETAPA).....	45
4.1	Procedimento experimental - 2ª etapa	45
4.1.1	Amostras estudadas e procedimentos da análise DRX+AEM na E ₂	45
4.1.2	Procedimentos para caracterização mineralógica de detalhe	51
4.2	Resultados e discussões – 2ª etapa.....	53
4.2.1	Análise estatística multivariada (AEM) dos difratogramas de raios X.....	53
4.2.2	Amostras compostas para estudos de detalhe	62
4.2.2.1	<i>Tempo de moagem e análise granulométrica.....</i>	<i>63</i>
4.2.3	Caracterização mineralógica de detalhe.....	66
4.2.3.1	<i>Composição mineralógica.....</i>	<i>66</i>
4.2.3.2	<i>Características texturais da pentlandita</i>	<i>69</i>
4.2.3.3	<i>Associações minerais</i>	<i>78</i>
4.2.3.4	<i>Distribuição granulométrica dos minerais de interesse</i>	<i>83</i>
4.2.3.5	<i>Distribuição de Ni, Cu, S.....</i>	<i>87</i>
4.2.4	Sumário dos resultados	89
5	DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS	91
5.1	Em relação aos resultados obtidos nesse estudo	91
5.2	Em relação aos métodos empregados nesse estudo.....	96
6	CONCLUSÕES.....	98
7	TRABALHOS FUTUROS	99
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

APÊNDICE 1 – Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

APÊNDICE 2 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

APÊNDICE 3 – Difratogramas médios dos domínios mineralógicos

APÊNDICE 4 – Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz

APÊNDICE 5 – Composição químicas dos minerais (base para banco de dados MLA)

APÊNDICE 6 – Resultados MLA

APÊNDICE 7 – Composição química calculada por fração a partir do MLA (% em massa)

APÊNDICE 8 – Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do estudo

A mineração é um termo que abrange todas atividades econômicas que extraem substâncias portadoras de elementos de interesse, ou algum material (e.g brita, argilas), em sua grande maioria na forma de minerais, objetivando concentrá-los e modifica-los para as demandas da humanidade. Portanto, pode-se considerar três perguntas inerentes a esta atividade: onde estão estes materiais/elementos, de que forma concentrá-los e como modificá-los?

Ao longo da história, estas perguntas foram investigadas, gerando áreas de conhecimento, atualmente denominadas de prospecção/exploração (onde e como é o minério?), extração/exploração (de que forma concentrá-lo?) e a atividade industrial (como modificá-lo). Dentro dessas grandes áreas, existem inúmeras outras menores dedicando-se a responder as mais variadas questões.

Considerando a grande área da prospecção/exploração, a caracterização tecnológica de matérias-primas minerais é a área do conhecimento que estuda minérios e recursos minerais, através da determinação de características físicas e/ou químicas que influencia sua recuperação nas etapas de beneficiamento (SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; KAHN et al., 2008; NEUMANN et al., 2004).

A caracterização é uma área de interface, pois ela abastece de informações a próxima grande área do conhecimento da extração/exploração. Por exemplo, a caracterização informa se o elemento de interesse está em um mineral com propriedades magnéticas, para então o processamento mineral escolher, dimensionar e otimizar a operação unitária de concentração: que máquina utilizar, qual tamanho, qual a capacidade de produção, qual o custo de implementação e os custos operacionais.

Em regras gerais, uma mina comumente apresenta milhões de toneladas de material a ser explotado; esta exploração ocorrerá ao longo de muitas décadas a depender da sua economicidade. Assim, as pessoas envolvidas em um empreendimento mineiro lidam com o seguinte problema: como estudar as variações nas características de milhões de toneladas de um material, afim de prever seu comportamento nas etapas de concentração, maximizando recuperações e minimizando os riscos do negócio.

Uma das abordagens atuais para solução deste problema é a determinação de tipos de minério/domínios geometalúrgicos: segmenta-se o depósito em materiais espacialmente correlacionáveis com características geológicas semelhantes, que reflitam no comportamento do processamento mineral (LAMBERG, 2011). Assim, é preciso definir os critérios/parâmetros para serem considerados na classificação do material.

Comumente, estes critérios/parâmetros são definidos com base nos dados de descrição geológica de testemunhos de sondagens da etapa de exploração, e suas respectivas análises químicas. Porém, qualquer tentativa de discretização de eventos naturais, no caso processos geológicos relacionados à gênese de depósitos, mostra-se uma tarefa complexa. Prever as possíveis variações geológicas locais com base nas análises de teores e na descrição visual do geólogo, apresentam-se muitas vezes como um método sem a sensibilidade necessária para discriminar as heterogeneidades do material.

Considerando o acima exposto, este estudo utilizou a difratometria de raios X (DRX) associada à análise estatística multivariada dos dados (AEM - análise por agrupamento e análise de componentes principais), como uma ferramenta auxiliar ao modelo geometalúrgico, definindo os grupos de semelhança mineralógica do minério da mina de Santa Rita (aqui denominados de domínios mineralógicos), considerando uma porção do depósito planejada para lavra entre 2013 e 2017.

A difratometria de raios X é uma das principais técnicas de caracterização mineralógica, com destacada importância no setor mineral. Conjugada com análises químicas quantitativas, pode ser rotineiramente utilizada em auxílio à exploração, ao planejamento de lavra (blendagens) e ao controle de processos do beneficiamento (KÖNIG; GOBBO, 2009; ANTONIASSI et al., 2011; SHIMIZU et al., 2012).

O recurso estatístico da análise multivariada dos dados, aplicada a difratogramas de raios X, corresponde a uma ferramenta de classificação de materiais geológicos através da associação de diferentes amostras em grupos de similaridade mineralógica (MACCHIAROLA et al., 2007).

Uma vez definidos os domínios mineralógicos, suas características de associações mineralógicas, liberação mineral e partição de elementos de interesse podem ser avaliadas com elevada robustez através das técnicas de análise de imagens automatizadas de microscopia eletrônica, conjugada a microanálise por EDS (FANDRICH et al., 2007; KAHN et al., 2002; PETRUK, 1989; SUTHERLAND;

GOTTLIEB, 1991). Essas informações podem ser utilizadas nas interpretações do comportamento potencial desses domínios frente às etapas de concentração mineral, e, portanto, ser uma fonte de dados geometalúrgicos.

Em uma mina, o que se processa, concentra e descarta são minerais. A hematita será cominuída e não o teor de ferro; a calcopirita será flotada e não o teor de cobre. Portanto, é essencial analisar um depósito com dados de natureza mineralógica.

A Mina de Santa Rita, situada no complexo máfico-ultramáfico Fazenda Mirabela, é uma intrusão magmática acamadada de idade Paleoproterozóica mineralizada a sulfetos de níquel e cobre, situada no sudeste do Estado da Bahia, município de Itagibá. Seus tipos de minério/domínios geometalúrgicos foram definidos em seu estudo de viabilidade econômica (*feasibility studies*) e são, atualmente, nominados de dunito/serpentinó (S), harzburgitos (H), olivina-ortopiroxenito (O) e ortopiroxenito (P) (MIRABELA, 2007). Estudos recentes de caracterização tecnológica, realizados no Laboratório de Caracterização Tecnológica POLI/USP (não publicados) têm demonstrado que, particularmente no caso da mina Santa Rita, não é possível estabelecer uma correlação adequada entre os atuais tipos de minério e o comportamento desses na etapa de beneficiamento.

1.2 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo classificar os domínios mineralógicos da mina de Santa Rita, na região do depósito planejada para lavra de 2013 a 2017, seguido de estudos mineralógicos de detalhe dos principais domínios.

1.3 Procedimentos experimentais

Para atingir os objetivos propostos, o presente estudo foi dividido em duas etapas (E):

- E₁ → Definição dos domínios mineralógicos (grupos) por análise estatística multivariada de difratogramas de raios X
- E₂ → Estudos de caracterização mineralógica detalhada dos principais domínios por análise automatizada de imagens (MEV-MLA)

Optou-se por detalhar os procedimentos experimentais por capítulo referente aos resultados de cada etapa, ao invés de condensá-los em um capítulo único. Parte dos procedimentos definidos na segunda etapa dependiam dos resultados da primeira etapa. Assim, expor os procedimentos da segunda etapa, antes dos resultados da primeira, inverteria a lógica dos acontecimentos.

1.4 Relevância

Na literatura, são escassos os estudos publicados envolvendo DRX associada à análise estatística multivariada. Destacam-se os trabalhos König e Gobbo (2009) para controle de processo de minério de ferro, Antoniassi et al. (2011) na exploração de minérios de bauxita e Shimizu et al. (2012) para a definição de tipos de minérios em uma mina de cobre. Portanto, este trabalho é pioneiro na aplicação deste método a um depósito de níquel e cobre sulfetado associados a uma intrusão máfica-ultramáfica acamadada.

Do ponto de vista prático, o presente estudo, iniciado em 2012, contribuirá para o plano de aproveitamento econômico da mina de Santa Rita, através do aprimoramento do conhecimento das características do minério e de sua variabilidade mineralógica no depósito, relevantes para fins de processo e eventuais comportamentos diferenciados na etapa de concentração.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está segmentada por capítulos como segue:

- 1) INTRODUÇÃO: buscou-se contextualizar o leitor para o tema abordado; os objetivos e os métodos aplicados para alcançá-los; a relevância do estudo; e como esse documento foi estruturado.
- 2) REVISÃO DA LITERATURA: buscou-se dar uma base teórica ao leitor dos principais tópicos desse estudo, para o entendimento dos resultados e discussões apresentados a seguir.
- 3) DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS MINERALÓGICOS (1ª ETAPA): exposição dos procedimentos experimentais, resultados e discussões na definição dos domínios mineralógicos.

- 4) CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE DETALHE (2ª ETAPA): exposição dos procedimentos experimentais, resultados e discussões das amostras de minério representativa dos principais domínios mineralógicos.
- 5) DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS: os resultados das duas etapas anteriores foram integrados em uma discussão, visando atingir os objetivos do estudo.
- 6) CONCLUSÕES: quais as conclusões desse estudo.
- 7) TRABALHOS FUTUROS: sugestão de estudos podem ser realizados no futuro, considerando o que foi exposto nesse trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Minério de níquel

Níquel (Ni) é um elemento de transição que possui características de propriedades metálicas tanto de elementos ferrosos como não-ferrosos. Ele é encontrado na natureza na forma de um elemento siderófilo (associado com ferro) e como um elemento calcófilo (associado com enxofre). As mais expressivas minas de níquel estão alocadas em dois tipos de depósitos, descrito a seguir, sendo o primeiro tipo o mais expressivo quanto à produção mundial (CORNWALL, 1966):

- lateríticos, onde os principais minerais de minério são uma limonita niquelífera $[(\text{Fe}, \text{Ni})\text{O}(\text{OH})]$ e a garnerita (um silicato hidratado de níquel);
- magmáticos, onde há mineralização por sulfetos de níquel, predominantemente na forma de pentlandita $[(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8]$.

O raio iônico do níquel bivalente é similar ao do ferro e magnésio, permitindo assim a substituição entre estes três elementos na estrutura cristalina de alguns óxidos e silicatos (CORNWALL, op. cit.). Assim, depósitos de níquel sulfetado são comumente associados com rochas ricas em minerais ferro-magnesianos, denominadas de rochas ultramáfica. Estas rochas podem ser encontradas tanto na forma plutônica como vulcânica. Muitos depósitos de níquel sulfetado ocorrem em grandes profundidades, enquanto os de origem laterítica são formadas na superfície pela alteração das rochas ultramáfica (ROBB, 2005)

Segundo a USGS (2016), cerca de 65% do níquel consumido no mundo ocidental é usado para fabricar aço inoxidável austenítico. Outros 12% vão para superligas (por exemplo, Inconel 600) ou ligas não ferrosas. Ambas as famílias de ligas são amplamente utilizadas devido à sua resistência à corrosão. A indústria aeroespacial é um dos principais consumidores de superligas à base de níquel. As lâminas de turbina, os discos e outras peças críticas dos motores a jato são fabricados a partir dessas superligas. Os restantes (23%) do consumo são divididos entre baterias recarregáveis, catalisadores e outros produtos químicos, de fundição e revestimento. Os principais produtos químicos comerciais são o carbonato (NiCO_3), cloreto (NiCl_2), óxido divalente (NiO) e sulfato (NiSO_4) de níquel.

O processo para tratamento e extração do minério de níquel sulfetado pode ser dividido em três etapas, segundo Goonan (2009): concentração, refino e fundição. A etapa de concentração ocorre através da flotação de sulfetos com coletores a base de xantatos. Já para o minério laterítico, a via de processamento pode ser hidro e/ou pirometalúrgica, a depender do tipo de minério pela relação magnésio/ferro (minério garnerítico ou limonítico). Minérios limoníticos são tratados por hidrometalurgia (os métodos mais comuns são o “*pressure acid leach process*” e “*ammonia leach process*”), enquanto os garneríticos com pirometalurgia, preferencialmente.

A Figura 1 mostra a variação do preço do minério de níquel nos últimos nove anos. Nota-se que em 2008 houve uma acentuada queda do preço do minério de níquel atingindo valores de aproximadamente US\$ 9.000/tonelada, com sua recuperação em 2009, até atingir cerca de US\$ 30.000/tonelada em 2010. Porém, a partir de 2010 o preço da tonelada voltou a cair substancialmente atingindo seu valor mais baixo em 2016, sendo comercializado abaixo de 8.000/tonelada.

Figura 1 – Variação do preço do minério de níquel nos últimos nove anos para contratos tipo “cash buyer”

Fonte: London Metal Exchange (LME)

2.2 Intrusão Fazenda Mirabela e mina de Santa Rita

2.2.1 Geologia Regional

A intrusão máfica-ultramáfica Fazenda Mirabela encontra-se na região sul-sudeste do Cráton do São Francisco (CSF). Barbosa e Sabaté (2004) definem a segmentação desta região em bloco Gavião, bloco Jequié, bloco Serrinha e o cinturão orogenético Itabuna-Salvador-Curaçá - Figura 2.

Figura 2 - Mapa geológico da porção sul-sudeste do Cráton São Francisco com destaque para os terrenos geotectônicos definidos por Barbosa e Sabaté (2004) e a intrusão fazenda Mirabela

Fonte: Lazzarin (2011) modificado de Barbosa et al. (2003)

O bloco Gavião possui porções graníticas, granodioríticas e migmatíticas de crosta continental, associadas com remanescentes de tonalitos-trondhjemitos-granodioritos (TTGs) de 3,4 G.a e *greenstonebelts* Arqueanos. Já o bloco Jequié é

formado por granulitos e migmatitos supracrustais, intrudidos por plútons charnockíticos, enquanto o bloco Serrinha apresenta ortognaisses e migmatitos embasando *greenstonebelts* Paleoproterozóicos. Por fim, o cinturão orogenético Itabuna-Salvador-Curaçá originou-se da colisão dos blocos Serrinha e Gavião (2,15 – 2,05 G.a) e é composto de uma suíte plutônica cálcio-alcalina de baixo teor de potássio, intercalada com basaltos e gabros de fundo oceânico e/ou bacias de retro-arco, bem como metassedimentos (BARBOSA et al., 2003; BARBOSA; SABATÉ, 2004).

Dentro deste contexto geotectônico, a intrusão máfica-ultramáfica Fazenda Mirabela ocorreu nos núcleos de estruturas antiformais da margem oeste do cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá. Esta intrusão foi então metamorfozizada em fáceis granulito durante a transpressão final da parte sul do cinturão orogenético entre 2,08 - 2,06 G.a. (BARBOSA; SABATÉ, 2004).

2.2.2 Intrusão Fazenda Mirabela

A intrusão Fazenda Mirabela é um corpo com 4,2 Km de comprimento por 2,5km de largura, composto de rochas ígneas cumuláticas máficas-ultramáficas, em uma área de aproximadamente 7 km². Sua forma assemelha-se a uma canoa (do inglês: *boat-shaped layered intrusion*). Apesar de suas rochas encaixantes apresentarem alto grau de deformação, a intrusão não mostra evidências deformacionais: as texturas ígneas estão perfeitamente preservadas (BARNES et al., 2011).

Litoestratigraficamente apresenta uma sequência fracionada, reconhecendo-se duas zonas: a) zona ultramáfica inferior (a oeste da intrusão), composta de dunitos, harzburgitos e piroxênitos (olivina-ortopiroxênitos e ortopiroxênitos); e b) zona máfica superior (porção leste), composta de gabronoritos, variando composicionalmente até augita noritos.

A porção mineralizada com sulfetos disseminados foi denominada de Santa Rita e ocorre em toda extensão da intrusão dentro da camada de harzburgitos, olivina ortopiroxênitos e ortopiroxênitos - Figura 3, Figura 4 e Figura 5 .

Figura 3 – Mapa geológico do corpo intrusivo Fazenda Mirabela

Fonte: Cunha e Ferreira (1992)

Figura 4 – Seção vertical na área da mina de Santa Rita, corpo Fazenda Mirabela.

Fonte: Cunha e Ferreira (1992)

Figura 5 – Testemunhos de sondagem exemplificando a variação litológica do depósito com destaque em vermelho para o intervalo mineralizado em sulfetos

Fonte: modificado de Cunha e Ferreira (1992)

2.2.3 Mineralogia

A ordem de fracionamento mineral no depósito foi definida como: olivina → (Crespinélio) → ortopiroxênio → clinopiroxênio → plagioclásio → (magnetita /ilmenita), refletindo a litoestratigrafia estabelecida (BARNES et al., 2011). Segundo Mirabela (2007), a mineralização de sulfetos apresenta forte controle litoestratigráfico, concentrada nos peridotitos e piroxenitos. Tem uma natureza primária disseminada, resultante da acumulação de líquido sulfetados na fase cumulática dos silicatos. Os principais sulfetos são a pentlandita, calcopirita, pirita e pirrotita.

2.2.3.1 Sulfetos

Os sulfetos mais abundantes normalmente possuem granulação fina, ocorrendo também como agregados de tamanho não superior a 0,5 mm ou 1 mm. Os grãos compostos de sulfuretos ricos em Ni são comumente alongados e com dimensões de até 1-2 mm. Os sulfetos menos abundantes incluem mackinawita, milerita, pirita, cubanita, bornita e calcossita.

Uma descrição detalhada da morfologia dos sulfetos de acordo com as litologias presentes no depósito é apresentada a seguir de acordo com Mirabela (op. cit.):

- **Serpentinito/Dunito:** os sulfetos ocorrem na granulação de 50-300 μm , intensamente associados com magnetita e serpentina; também ocorrem como inclusões (<1-15 μm) na serpentina. O principal mineral de níquel é a pentlandita $[(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8]$, contudo vestígios de calcopirita e calcosita (Cu_2S) também ocorrem como inclusões na olivina. Purvis (2006) estudou 49 amostras de dunito e obteve uma média de 0,38% de Ni (acima de um grau de corte de 0,3%), mas apenas 0,12% de Ni estava presente em sulfetos, o que significa que o dunito em média não constitui minério (predomina Ni em olivina - serpentina).
- **Peridotitos (Harzburgito):** os sulfetos ocorrem principalmente na forma de pentlandita e calcopirita com granulação de 30-400 μm , intercalados com cristais reliquias de olivina. Também ocorrem como grãos disseminados (5-60 μm) na serpentina. Os grãos de pentlandita são comumente intersectados por micro veios de serpentina e magnetita. Além disso, a serpentina forma bordas contínuas (até 10 μm de largura) ao longo dos limites dos grãos de pentlandita.
- **Olivina ortopiroxenito:** os sulfetos ocorrem como agregados com granulação de 100-1.500 μm em associações com silicatos (predominantemente piroxênios). Os sulfetos também mostram associação com Cr-espinélio. O principal mineral de Ni é a pentlandita $[(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8]$, enquanto a violarita (FeNi_2S_4) é uma fase rara que ocorre ao longo dos planos de clivagem da pentlandita e de micro fraturas. A pentlandita ocorre como parte dos aglomerados de sulfetos intersticiais aos piroxênios; esses aglomerados são compostos por pentlandita, calcopirita, pirrotita e pirita. Enquanto os contatos entre os sulfetos são tipicamente simples, com limites de grão retos. Outros sulfetos observados como constituintes menores incluem bornita (Cu_5FeS_4), galena (PbS), mackinawita $[(\text{Fe}, \text{Ni})_{1+x}\text{S}]$ e marcasita (FeS_2).
- **Piroxenito:** os sulfetos ocorrem como aglomerados de pentlandita, calcopirita e pirita. A pentlandita também é encontrada como grãos não aglomerados (<100 μm) inclusa nos piroxênios. A pirita geralmente forma um padrão de intercrescimento complexo com pentlandita. Milerita ocorre

tipicamente como inclusões na pentlandita e como agregados irregulares de grãos finos (até 120 μm).

2.2.3.2 Química mineral

A química mineral da intrusão Fazenda Mirabela foi estudada por Fróes (1993) e Purvis (2005) e as principais observações desses autores são resumidas a seguir:

- **Olivina/Serpentina:** a composição de olivina a partir dos cumulos de olivina para os peridotitos é notavelmente homogênea. A olivina é relativamente rica em ferro (9,9-11,5% de Fe, Fo_{84-86}) com 0,3-0,32% de Ni (como Ni_2SiO_4). A composição da serpentina possui 0,25-0,28% de Ni (como $\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), com Ni menos abundante em serpentina rica em ferro (8,6% Fe) do que em serpentina rica em Mg (4-5% Fe).
- **Ortopiroxênio:** os ortopiroxênios apresentam uma grande variação na sua composição. Os teores de MgO variam de 32% em nas rochas ultramáficas a 27% em nas rochas leucogabronoríticas. Os conteúdos de Al_2O_3 são muito constantes; nas rochas ultramáficas cerca de 2,0% em massa diminuindo para 1,5% nos gabronoritos. O CaO varia amplamente mesmo para diferentes grãos dentro da mesma amostra, enquanto que o teor de TiO_2 apresenta uma faixa estreita entre 1,0-1,6% em massa.
- **Clinopiroxênio:** os clinopiroxênios exibem uma ampla faixa composicional. Os teores de MgO variam de 18% em massa nos piroxênitos a 14,5% em massa nos leucogabronoritos. O CaO aumenta progressivamente nos peridotitos e piroxênitos (~ 21,0% em peso) para os gabronoritos (~ 24,0% em peso). Os valores de NiO variam desde 0,02% em massa (0,016% de Ni) nos gabronoritos até um máximo de 0,26% em massa (0,20% de Ni) no bronzitito.
- **Cr-espinélios:** entre os espinélios tem-se 25-45% na forma de cromita, 6-12% como magnetita e 43-65% como Cr-espinélio. As relações Cr/Fe diminuem de 1,43 nos serpentinitos para 1,12 em peridotitos. A relação $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ varia de 0,18-0,60 nos olivina ortopiroxênitos, para 0,61 nos

ortopiroxenitos. Estes espinélios possuem 200-900 ppm de Ni (580 ± 230 ppm), com 200 ppm de Ni na magnetita.

2.2.4 Beneficiamento mineral

Segundo Santos Júnior e Delboni Júnior (2016), o processamento do minério da mina Santa Rita (Figura 6) inicia-se com o desmonte da rocha por explosivos. O minério é então transportado por caminhões para dois britadores primários, um cônico e um de mandíbulas, em uma taxa média de alimentação de 1300 t/h. O produto da britagem primária é transportado por correia transportadora para uma pilha pulmão com capacidade de 67 kt.

Figura 6 – Esquema simplificado do circuito de beneficiamento da Mina Santa Rita

Fonte: Santos Júnior e Delboni Júnior (2016)

O material da pilha é transportado por correias até o circuito de moagem, que é composto de um moinho tipo SAG (*Semi-Autogenous Grinding*), dois britadores cônicos secundários e dois moinhos de bolas. O produto da moagem é bombeado para um estágio de deslamagem com P_{80} de $125\mu\text{m}$, que inclui três hidrociclones projetados para a remoção de material fibroso (serpentinhas) concentrados na fração mais fina.

Após a deslamagem, o material é bombeado para o circuito de concentração por flotação direta dos sulfetos de níquel e cobre, com as etapas *rougher*, *scavenger*, *cleaner* e *recleaner*, utilizando-se de coletores a base de xantatos. A recuperação metalúrgica da planta varia de acordo com as características mineralógicas do minério, principalmente quanto à partição de níquel em silicatos. A recuperação global média de níquel é de 58% e o concentrado final possui teores de níquel variando entre 13% a 15%.

Toda a água do circuito é reutilizada; o rejeito é reportado à barragem e o concentrado é filtrado e despachado via caminhões ao porto de Ilhéus – BA, onde 100% da produção é exportada via navios, majoritariamente, para Finlândia (MIRABELA, 2015).

2.2.5 Tipos de minério / domínios geometalúrgicos

Os domínios geometalúrgicos da Mina Santa Rita foram definidos nos estudos de viabilidade econômica (MIRABELA, 2007). De acordo com esse documento, os quatro domínios geológicos, dunito/serpentinítico (S), harzburgitos (H), olivina-ortopiroxenito (O) e ortopiroxenito (P), possuem características similares de processo e, portanto, também são classificados como domínios geometalúrgicos / tipos de minério.

As variáveis avaliadas para justificar esta classificação foram os teores de Ni, Cu, Co, MgO; a razão dos teores de S/Ni; RQD (*Rock Quality Designation*). Uma vez definidos os domínios, estes foram submetidos a ensaios de flotação direta de sulfetos em escala de bancada (MIRABELA, op. cit.).

Os domínios P e O possuem os maiores teores de Ni, presente majoritariamente na forma de sulfetos e, portanto, apresentam os maiores valores de recuperação de Ni em ensaios de flotação. Os domínios H e S possuem a partição do níquel dividida quase equitativamente entre sulfetos e a ganga silicática e, comparativamente, possuem baixos teores de Ni e elevados teores de MgO. Consequentemente, apresentam baixa recuperação de Ni nos ensaios de flotação.

2.3 Caracterização tecnológica

Segundo Sant'Agostino e Kahn (1997) a caracterização tecnológica é uma expressão aplicada num sentido amplo para o estudo de minérios e recursos minerais para os quais se vislumbra aproveitamento econômico, abordando também, de forma bastante criteriosa, as diversas etapas da caracterização, compreendendo, por exemplo, o processo de descrição e quantificação da composição mineralógica, tamanho e forma dos grãos, associações minerais e grau de liberação de um material.

A determinação destes parâmetros é fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, pois fornece informações sobre o potencial de recuperação do material, além de predizer a resposta do material frente aos

processos de beneficiamento (NEUMANN et al., 2004). Estes estudos também podem ser empregados para avaliar problemas no processamento já implantado.

2.3.1 Técnicas analíticas empregadas em estudos de caracterização

A seguir, somente as principais técnicas utilizadas nesse estudo serão abordadas em detalhe.

2.3.1.1 Difratometria de raios X (DRX)

A difração de raios X teve seu início em 1912 com a descoberta de que cristais difratam raios X refletindo sua estrutura cristalina, por Von Laue (CULLITY, 1978), estando relacionada a um fenômeno de interação entre a radiação incidente e os elétrons que compõem os átomos do material analisado (CULLITY, 1978; FULTZ; HOWE, 2007).

Os raios X mudam sua trajetória após atingir a amostra, mantendo, porém, seu comprimento de onda – espalhamento elástico. Cada elétron que compõem a amostra se torna uma nova fonte de emissão de raios X. Se os átomos da amostra estiverem arranjos de forma sistemática, como em estruturas cristalinas de minerais, as fases das ondas da radiação difratadas ocorrem de forma periódica, gerando assim uma interação construtiva.

Desta forma, o fenômeno de difração de raio X é observado para diferentes ângulos (θ) do raio incidente, desde que seu comprimento de onda (λ) seja da mesma ordem de magnitude que a distância entre os átomos na estrutura cristalina do material analisado (d), seguindo a lei de Bragg descrita pela equação 1 e ilustrada na Figura 7, onde: “ n ” é um inteiro que assegura interferência construtiva (CULLITY 1978; FULTZ; HOWE 2007).

No caso dos minerais, o parâmetro “ d ” é a distância interplanar da estrutura cristalina e pode ser representada pelos índices de Miller (hkl) para cada ângulo de medição ($2\theta_{hkl}$). Portanto, os ângulos θ oriundos da difração de raios X são relacionados com as dimensões das células unitárias e as orientações interatômicas dos planos “ hkl ” de um material cristalino (REYNOLDS, 1989).

Figura 7 – Ilustração do fenômeno de difração de acordo com a lei de Bragg

$$n * \lambda = 2 * d * \text{sen } \theta \text{ (eq. 1)}$$

Fonte: extraída e modificada de Fultz e Howe (2007)

Os minerais possuem estrutura cristalina com configuração única quanto à disposição dos planos e a densidade de átomos para cada posição específica dos sítios cristalográficos. Portanto, cada mineral possui um único padrão de difração, permitindo suas identificações pela posição angular e intensidades relativas dos raios X difratados (CULLITY, 1978).

Identificação de fases cristalinas por DRX

O difratômetro apresenta como resultado o difratograma que é um gráfico de intensidade de raios X que chegam ao detector (contagens por segundo) pelo ângulo da posição do raio incidente (2θ). Cada pico neste gráfico, com suas respectivas intensidades, representam um plano cristalino, representado pelos índices de Miller hkl – Figura 8.

A identificação de fases cristalinas por DRX é realizada pela comparação entre o difratograma da amostra e padrões de referência, disponíveis em um banco de dados. O centro internacional de dados de difração (ICDD - *International Center for Diffraction Data*) é a instituição responsável por padronizar e regular um banco de dados que reúne padrões de diversas fases cristalinas.

Figura 8 – Exemplo de difratograma de uma amostra de sílica sintética policristalina

Fonte: extraída e modificada de Fultz e Howe (2007)

Atualmente, existem alguns softwares comerciais disponíveis que realizam a comparação entre os picos mais intensos, de cada possível fase cristalina analisada, com os picos das fases padrões, oriundas do banco de dados da ICDD. Desta forma, cada pico difratado possui um *score/penalty*, de acordo com a presença/ausência de um plano cristalino (posição dos picos) e a intensidade de uma fase mineral proposta pelo software (ANTONIASSI, 2010). O usuário pode então analisar cada fase proposta de acordo com seu *score* e aceita-la ou não.

2.3.1.2 Mineralogia quantitativa automatizada

Ferramentas de mineralogia quantitativa automatizada através da conjugação de técnicas de análise de imagens e microscopia eletrônica de varredura e microanálise por EDS evoluíram de forma muito significativa nos últimos vinte anos, possibilitando gerar dados estatísticos substancialmente mais robustos (FANDRICH et al., 2007; KAHN et al., 2002; PETRUK, 1989; SUTHERLAND; GOTTLIEB, 1991).

As imagens mais utilizadas são as de microscopia eletrônica de varredura ou óptica por luz refletida. Nas imagens provenientes de microscopia óptica, o parâmetro utilizado para a discriminação dos minerais é a sua cor - espectro de refletância. No caso do MEV são utilizadas imagens de elétrons retroespalhados (BSE) associadas com microanálises por EDS. Nas imagens de BSE, o tom de cinza de cada pixel é proporcional ao número atômico médio daquele ponto. Em alguns casos essa distinção é suficiente para a discriminação dos minerais presentes; nos casos em que

minerais possuem número atômicos médios muito semelhantes (calcopirita e esfalerita, por exemplo) e os tons de cinza não são distinguíveis entre si a identificação é baseada, essencialmente, em análises qualitativas pontuais ou em áreas por EDS (FANDRICH et al., op.cit; NEUMANN et al., op. cit.).

Após a identificação dos minerais, o sistema atribui valores numéricos para distintas propriedades das imagens, tais como comprimento, largura, área, perímetro, arredondamento e esfericidade, fornecendo informações como proporção mineralógica, distribuição granulométrica, distribuição de elementos de interesse, forma dos grãos, além de associações entre distintas fases: associações minerais e grau de liberação mineral, dentre outras (FANDRICH et al., op.cit; NEUMANN et al., op. cit.).

Atualmente, há uma série de sistemas de análise de imagens automatizadas comerciais para operação em MEV, dentro os quais se podem destacar: QEMSCAN, MLA (*Mineral Liberation Analyser*) (ambos da marca FEI), TIMA (marca Tescan), INCAMineral (marca Oxford) e Mineralogic Mining & Mineralogic Reservoir (marca Zeiss).

O sistema MLA, utilizado nesse estudo, consiste em um software que controla os detectores de espectrômetro de energia dispersiva (EDS) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV), adquirindo imagens e espectros de EDS de raios X de forma automatizada. Tipicamente cerca de 40 a 100 imagens/frames (contendo 4.000 a 10.000 partículas) são adquiridas para cada seção polida/amostra. Posteriormente, um processamento *off-line* das imagens das partículas e respectivos dados de raios X geram mapas digitais dos minerais e são calculadas as proporções em massa, associações minerais e grau de liberação, dentre outros parâmetros (GU, 2003).

Quanto ao funcionamento do MLA, este combina a análise de imagens por elétrons retroespalhados (BSE) e espectros de raios X característicos. O uso de imagens por BSE para análise de grãos tem a vantagem de apresentar uma resolução substancialmente superior que a obtida por raios X, cerca de algumas dezenas de nanômetros (a depender do equipamento e magnificação) versus alguns micrômetros, além de ser muito mais rápido (GU, op. cit.).

Fandrich et al. (2007) listou os vários modos de coleta do MLA, que são utilizados em diferentes tipos de matérias a depender do objetivo do estudo e das características das amostras. Os modos de medição mais comumente utilizados são descritos abaixo, sendo o modo XBSE o aplicado neste estudo:

1. *Standart BSE liberation analysis* (BSE): é o modo de medição mais básico de análise de liberação do MLA, onde uma série de imagens são coletadas *on-line* e depois processadas *off-line* para produzir dados de liberação. Este modo de medição baseia-se unicamente nos diferentes tons de cinza da imagem de BSE.
2. *Extended BSE liberation analysis* (XBSE): neste modo de medição cada imagem de BSE é coletada e segmentada para delinear contornos de grãos minerais e, em seguida, cada grão mineral é analisado por raios X.
3. *Ford analysis or grain-based X-ray mapping* (GXMAP): trata-se de um método de mapeamento seletivo. Emprega mapeamento de raios X segundo uma grade de pontos para as fases que não podem ser segmentadas por diferentes tons de cinza da imagem de BSE. O operador seleciona os grãos onde haverá mapeamento por meio de um intervalo no histograma da imagem de BSE ou por um determinado espectro de raios X.
4. *Sparse phase liberation analysis* (SPL): este modo de medição busca as imagens de BSE com partículas contendo a fase de interesse, usando para isto a faixa da escala de tom de cinza da fase de interesse; em seguida executa uma análise XBSE sobre a partícula.
5. *X-ray modal analysis* (XMOD): este modo de medição só produz dados de mineralogia modal. Neste método, uma grade de pontos é definida pelo operador e para cada ponto da grade (sobre as partículas) é coletado um espectro de raios. O método XMOD também pode ser implementado para o modo *linescan*, que produz dados a partir do tradicional modo de medição por intercepto linear (espaçamento entre pontos da direção “x” é de 1 *pixel*). Nesse método a imagem BSE é utilizada somente para diferenciar as partículas do *background* (resina).

2.4 Geometalurgia

A área interdisciplinar conhecida como geometalurgia conecta três áreas da indústria mineral: geologia, lavra e processamento mineral. Ela envolve o entendimento e mensuração das propriedades do minério relevantes para sua lavra e processamento. Segundo Lamberg (2001), a geometalurgia considera informações

geológicas e metalúrgicas para criar um modelo de previsão tridimensional do depósito no processamento mineral. Coward et al. (2009) vai além e inclui como variáveis geometalúrgicas qualquer propriedade do material que influencie positiva ou negativamente no empreendimento mineiro.

2.4.1 Modelo geometalúrgico

Geólogos possuem tradição na criação de modelos tridimensionais do corpo de minério com as variações dos teores e a definição dos contatos litológicos. A ideia do modelo geometalúrgico é somar ao modelo geológico parâmetros quantitativos relevantes para o processamento mineral. Estas novas informações serão utilizadas para a otimização da produção (LUND; LAMBERG, 2014; BATTERHAM et al, 1992).

Uma rápida evolução nos modelos geometalúrgicos tem ocorrido nas últimas duas décadas. Uma das importantes contribuições para esta evolução está relacionada ao desenvolvimento de análises mineralógicas automatizadas (GOTTLIEB et al., 2000), que permitiu um estudo detalhado, rápido e estatisticamente robusto das características mineralógicas do material a ser explotado.

O conhecimento das características mineralógicas é fundamental no processamento mineral (NEUMANN et al., 2004; PETRUK, 2000; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997). Por isso, comumente a geometalurgia é confundida como uma caracterização tecnológica de minérios. Porém, estas áreas diferenciam-se no que se refere à espacialidade: geometalurgia necessariamente precisa possuir um estudo relacionado à distribuição tridimensional no depósito das variáveis que influenciaram na lavra e no processo, já a caracterização não se preocupa com essa questão.

Recentemente, houve uma tentativa de aumentar a abrangência do termo geometalurgia, considerando variáveis de natureza sustentável no modelo de blocos geometalúrgico, como a quantidade de emissão de CO₂ e consumo de água (LUND; LAMBERG, 2014).

A implementação do modelo geometalúrgico deve ser o mais cedo possível, preferencialmente na etapa de avaliação de recursos e reservas de uma jazida. A caracterização tecnológica do minério deve ser realizada com ferramentas rápidas, de baixo custo e práticas e, acima de tudo, que possam ser aplicadas rotineiramente (LUND; LAMBERG, 2014). Porém, este é o grande desafio: encontrar técnicas e métodos que atendam esses requisitos.

Alguns programas industriais geometalúrgicos vêm sendo aplicados atualmente. Seus passos podem ser divididos, de acordo com Dobby et al. (2004) e Lamberg (2011) e Lund e Lamberg (2014), como:

- 1) coleta de dados geológicos através da descrição de testemunhos de sondagem, medindo as propriedades mecânicas das rochas, seus parâmetros petrofísicos e análises químicas;
- 2) um programa de amostragem do minério para ensaios de processamento mineral, onde os dados geológicos são utilizados na identificação de possíveis tipos de minério;
- 3) ensaios em escala de laboratório para extrair parâmetros que serão utilizados no modelo do processamento mineral (comumente chamado de teste de variabilidade);
- 4) validação dos tipos de minério definidos pelos parâmetros geológicos da primeira etapa com base nos dados ensaios de processamento mineral. Assim, definindo os domínios geometalúrgicos/tipos de minério;
- 5) desenvolvimento de relações matemáticas na estimativa de importantes parâmetros metalúrgicos com os dados geológicos/químicos da primeira etapa;
- 6) desenvolvimento do modelo blocos geometalúrgicos, utilizando as variáveis que influenciam no processamento mineral, definidas na etapa três.
- 7) simulação da planta de processamento de cada domínio geometalúrgico;
- 8) calibração de todos os modelos com base nos dados de operações físicas existentes (planta piloto ou e/ou planta de beneficiamento industrial).

2.4.2 Benefícios

Uma vez estabelecido o modelo geometalúrgicos, este pode ser utilizado, de acordo com Coward et al. (2009) e Lund e Lamberg (2014), para o aprimoramento de:

- otimização do processamento mineral, porque é possível sintonizar o processo de acordo com as características da amostra de alimentação;
- planejamento de lavra a médio e curto prazo com a seleção de blocos para possíveis blendagens;

- planejamento da lavra e processo a longo prazo, portanto melhor alocação de capital e melhores condições de avaliar mudanças para novas tecnologias;
- redução de riscos, considerando os preços das *commodities*, pode adequar a produção, considerando diversos cenários econômicos; e portanto
- previsão de receitas e despesas a curto, médio e longo prazo.

2.4.3 Amostragem e estimativa de variáveis geometalúrgicas

Os problemas nos modelos geometalúrgicos estão normalmente relacionados com uma amostragem inadequada: informações erradas coletadas dos testemunhos de sondagem e número reduzido de amostras nos testes de variabilidade (problemas de representatividade estatística). Esta questão levanta um dilema: como selecionar amostras representativas de toda variabilidade do material no depósito, em termos de comportamento metalúrgico, se esse comportamento só pode ser estudado após o término dos testes para qual essas amostras foram selecionadas (LUND; LAMBERG, 2014).

Segundo Lamberg (2011) há duas formas de seleção de amostras para uma abordagem geometalúrgica: a) com base em ensaios de processamento mineral; e b) com base na mineralogia. A abordagem com base em ensaios de processamento mineral considera testes em escala de laboratório que visam medir diretamente a recuperação metalúrgica do material. Alguns exemplos desses tipos de testes são *GeM Comminution Index test*, o *JK Mineral Separability Indicator test* e o teste em tubo Davis (LUND; LAMBERG, 2014; NIIRANEN; BÖHM, 2012; LAMBERG, 2011). Já a abordagem mineralógica, considera somente parâmetros minerais, como mineralogia modal, texturas minerais, associação mineral, tamanhos de grãos minerais e suas relações com a liberação, para construir o modelo geometalúrgico (nessa abordagem consideram-se os parâmetros mineralógicos quantitativos para se prever a resposta no processamento mineral).

Outro problema relacionado ao modelo de blocos geometalúrgico é a estimativa dos valores das variáveis geometalúrgicas em blocos não amostrados. Dunham e Vann (2007), demonstraram que a aplicação de modelos clássicos de estimativa linear média (como krigagem) não apresenta bons resultados. Muitas dessas variáveis são

claramente não aditivas (por exemplo, a alteração de algum mineral) e, portanto, seus modelamentos precisam ser baseados em variáveis aditivas (COWARD et al., 2009).

2.5 Análise estatística multivariada (AEM)

A análise multivariada é um ramo da estatística que trata das análises de múltiplas medidas de variáveis de um ou mais indivíduos (COOLEY; LOHNES, 1971). A seguir, serão detalhadas a análise por agrupamento (*cluster analysis*) e a análise de componentes principais (PCA), ambas utilizadas neste estudo.

2.5.1 Análise por agrupamento (*cluster analysis*)

A técnica de análise por agrupamento (*cluster analysis*) é um recurso estatístico que facilita a análise de grande quantidade de dados, visando à classificação em grupos por semelhança e dissimilaridades (MOITA NETO; MOITA, 1998). O objetivo desta análise é: dado um número n de amostras, descritas por um conjunto de variáveis p , é necessário um esquema de agrupamento, onde todos os indivíduos pertencentes a este grupo sejam similares entre si (MANLY, 1994).

Muitos algoritmos são utilizados na análise por agrupamento, aqui a atenção será dada para os métodos de agrupamento hierárquicos.

Os métodos hierárquicos começam com o cálculo da matriz de distâncias entre as amostras. A medida das distâncias consiste em considerar os valores de um conjunto de variáveis p ($X_1, X_2, \dots, X_p$) para n amostras e compará-las entre si, transformando cada valor atribuído a variável como uma posição (ponto) no espaço. O número de dimensões do espaço é igual ao número de variáveis p analisadas. A Tabela 1 e a Figura 9 ilustram o descrito acima para três variáveis.

A distância Euclidiana (equação 2) é uma das formas mais simples para cálculo de distância entre pontos no espaço. Existem diversas outras maneiras de efetuar este cálculo que podem ser consultadas nos trabalhos de Cooley e Lohnes (1971), Manly (1994) e Everitt et al., (2010).

Tabela 1 – Pontos utilizados na construção do gráfico Figura 9

Amostra (n=2)	Variáveis (p=3)		
	X_1	X_2	X_3
1 (i=1)	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}
2 (j= 2)	X_{j1}	X_{j2}	X_{j3}

Figura 9 – Distância Euclidiana entre objetos i e j, com p = 3 variáveis

Fonte: Manly (1994)

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \text{ (eq. 2)}$$

Uma vez definida a matriz de distância, inicia-se o processo de agrupamento. Primeiramente, todas amostras são consideradas como um grupo composto de apenas um indivíduo; grupos considerados “próximos” são então aglomerados, formando um novo grupo. Existem várias formas de definir “próximos” (métodos de agrupamento), as três mais comuns são: vizinho mais próximos (*nearest neighbours*), vizinho mais distante (*furthest neighbour*) e média dos grupos (*group average*) (MANLY, 1994).

A Tabela 2 traz um exemplo de uma matriz de distâncias para cinco amostras, extraída de Manly (op. cit.).

Tabela 2 – Exemplo de matriz de distâncias para cinco amostras

	1	2	3	4	5
1	-				
2	2	-			
3	6	5	-		
4	10	9	4	-	
5	9	8	5	3	-

Fonte: Manly (1994)

Se considerado o método de agrupamento pelo vizinho mais próximo (*nearest neighbours*), os grupos surgirão assim que o valor mais próximo da distância entre qualquer indivíduo pertencente a outro grupo for atingido. No caso dos dados apresentados na Tabela 2, inicialmente tem-se cinco grupos com apenas um indivíduo cada. Assim que atingirmos o valor de distância dois, pode-se considerar as amostras 1 e 2 como pertencentes ao mesmo grupo (1, 2); ao atingir o valor de distância três, um novo grupo se formará com as amostras 5 e 4, e assim sucessivamente, como demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de agrupamento pelo método do vizinho mais próximo, destacando em negrito a formação de novos grupos

Distância	Grupos
0	1, 2, 3, 4, 5
2	(1, 2) , 3, 4, 5
3	(1, 2) , 3, (4, 5)
4	(1, 2) , (3, 4, 5)
5	(1, 2, 3, 4, 5)

Fonte: traduzido de Manly (1994)

Analisando os mesmos dados pelo método de agrupamento vizinho mais distante, a ordem de formação dos grupos continuará a mesma, porém em diferentes distâncias - Tabela 7.

Tabela 4 – Exemplo de agrupamento pelo método do vizinho mais distante, destacando em negrito a formação de novos grupos

Distância	Grupos
0	1, 2, 3, 4, 5
2	(1, 2) , 3, 4, 5
3	(1, 2) , 3, (4, 5)
5	(1, 2) , (3, 4, 5)
10	(1, 2, 3, 4, 5)

Fonte: traduzido de Manly (1994)

A amostra 3 só se agrupará com as amostras 4 e 5, quando o valor de distância de cinco é atingido. Este é o valor mais distante (*furthest neighbour*) comparando as distâncias entre a amostra 3-4 e 3-5 apresentados na matriz da Tabela 2.

Utilizando do método de agrupamento pela média dos grupos, os novos grupos se formarão nas distâncias apresentadas pela Tabela 10.

Tabela 5 – Exemplo de agrupamento pelo método da média dos grupos, destacando em negrito a formação de novos grupos

Distância	Grupos
0	1, 2, 3, 4, 5
2	(1, 2) , 3, 4, 5
3	(1, 2) , 3, (4, 5)
4,5	(1, 2) , (3, 4, 5)
7,8	(1, 2, 3, 4, 5)

Fonte: traduzido de Manly (1994)

Neste método, os grupos serão formados se a média das distâncias entre os elementos que compõem os dois grupos (*group average*) for atingida. Por exemplo, os grupos (1, 2) e (3, 4, 5) se unem a distância de 7,8, pois a média das distâncias entre as amostras 1 e 2 comparadas com 3, 4 e 5 é igual à 7,8.,

Os métodos de agrupamento hierárquicos são apresentados graficamente através do dendrograma. Neste tipo de gráfico, plota-se as amostras em função dos valores de distâncias, indicando pela união de linhas, quando as amostras compõem um novo grupo a partir daquela distância. Os exemplos apresentados na Tabela 3, Tabela 4 e na Tabela 5 são ilustrados pelos respectivos dendrograma da Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de dendrograma baseados nos dados da Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 pelos métodos de aglomeração a) vizinho mais próximo, b) vizinho mais distante e c) média dos grupos, respectivamente

Fonte: traduzido e modificado de Manly (1994)

A leitura do dendrograma permite reconhecer quais amostras possuem maiores semelhanças entre si e quais são mais distintas. As amostras mais próximas terão suas correspondentes linhas unificadas a uma menor distância, ocorrendo o inverso para as amostras mais distintas. No exemplo dos dendrogramas da Figura 10, a

amostra 1 e 2 são as mais similares entre si quando comparadas com as demais amostras. Já a amostras 3 é mais similar se comparada as amostras 4 e 5 em relação as amostras 1 e 2.

É importante ressaltar que existem diversos algoritmos utilizados na análise por agrupamento, entretanto não há um consenso sobre qual seria o melhor entre as opções disponíveis. Diferentes algoritmos não necessariamente geram resultados idênticos para um mesmo grupo de amostras e, portanto, existe um forte componente subjetivo na sua escolha (MANLY, 1994).

2.5.2 *Análise de componentes principais (PCA)*

A técnica de análise de componentes principais (PCA) foi descrita inicialmente por Karl Pearson (1901). O objetivo desta análise é considerar um conjunto de variáveis $\mathbf{p}$ ($\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_p$) correlacionáveis e encontrar combinações, entre estas variáveis, que produzam novos índices $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_p$ linearmente descorrelacionáveis, denominados de componentes principais (COOLEY; LOHNES, 1971, MANLY, 1994).

Em termos práticos, a PCA permite que se explique a variância do conjunto de variáveis $\mathbf{p}$, por um número reduzido de índices $\mathbf{Z}$. Por exemplo, um conjunto de 20 ou 30 variáveis originais podem ter suas variâncias representadas por dois ou três componentes principais (MANLY, 1994).

A descrição dos procedimentos para o cálculo dos PC's foi baseada no trabalho de Manly (1994) e será apresentada de maneira matematicamente simplificada, sem demonstrações e derivações. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de Cooley e Lohnes (1971).

O PCA começa pela transformação dos dados das variáveis $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_p$, de forma que suas médias sejam zero e variâncias unitárias. Posteriormente calcula-se a matriz de covariância $\mathbf{C}$ entre os conjuntos de variáveis $\mathbf{p}$ – equação 3, Figura 11.

$$c_{jk} = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j) * (x_{ik} - \bar{x}_k) / (n - 1) \text{ (eq. 3)}$$

Figura 11 – Matriz de covariância $\mathbf{C}$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{p1} & \cdots & c_{pp} \end{pmatrix}$$

Após o cálculo da matriz **C**, encontra-se uma combinação linear do conjunto de variáveis **p**, descritas por índices adotados **Z_i** (equação 4).

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \\
 Z_2 &= a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \\
 &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 Z_p &= a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p
 \end{aligned} \quad (\text{eq.4})$$

Para que a variância de **Z_i**, $\text{var}(\mathbf{Z}_i)$, seja máxima é preciso que a soma dos quadrados das constantes **a_{ip}** seja igual a 1 (equação 5).

$$\begin{aligned}
 a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{1p}^2 &= 1 \\
 a_{21}^2 + a_{22}^2 + \dots + a_{2p}^2 &= 1 \\
 &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{ip}^2 &= 1
 \end{aligned} \quad (\text{eq.5})$$

Uma importante propriedade da PCA é que a soma das variâncias dos índices **Z** é igual à soma dos autovalores (*eigenvalues*, **λ**) da matriz de covariância **C** (equação 6).

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p = c_{11} + c_{22} + \dots + c_{pp} \quad (\text{eq. 6})$$

Assim, haverá **p** valores de **λ**, que, se ordenados em ordem crescente $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$, correspondem ao principal componente 1 (**PC₁**), **PC₂**, **PC₃** ... **PC_p** (equação 4). Para cada valor de **λ_p**, existe um autovetor (*Eigenvector* – **v**) correspondente, onde **v_i** = **a_{ip}** (constantes da equação 5). Portanto, é preciso calcular os autovalores e autovetores da matriz **C**.

Qualquer matriz pode ser escrita na forma de um sistema de equações. A matriz de correlação **C** pode então ser escrita como mostra as equações 7.

$$\begin{aligned}
 c_{11}v_1 + c_{12}v_2 + \cdots + c_{1p}v_p &= \lambda v_1 \\
 c_{21}v_1 + c_{22}v_2 + \cdots + c_{2p}v_p &= \lambda v_2 \\
 \vdots & \\
 c_{p1}v_1 + c_{p2}v_2 + \cdots + c_{pp}v_p &= \lambda v_p
 \end{aligned} \quad (\text{eq.7})$$

Estas equações podem ser reescritas na forma matricial – equação 8.

$$Cv = \lambda v \quad (\text{eq. 8})$$

Ou, igualando a equação 8 a zero (equação 9).

$$(C - \lambda I)v = 0 \quad (\text{eq. 9})$$

Onde, **I** é uma matriz $p \times p$ identidade, **0** é $p \times 1$ vetor zero, λ é o autovalor de **C**, e **v** o autovetor de **C**. A equação 9 possui raízes para valores particulares de autovalores (λ) da matriz **C**. Para cada autovalor λ_i , haverá um respectivo autovetor (**v**) composto pelos valores dos v_i , onde a igualdade da equação 8 é garantida.

Em resumo, c_{ii} é a variância de X_i e λ_i é a variância de Z_i , isto significa que a soma das variâncias dos componentes principais é a soma das variâncias das variáveis originais. Portanto, alguns principais componentes (PC's) podem descrevem quase toda a variância dos dados originais (MANLY, 1994).

Os PC's podem ser então calculados para cada amostra e, com os valores do principal componente 1, 2 e 3, se plota um gráfico tridimensional para visualização dos dados – Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de gráfico 3D com amostras agrupadas segundo as cores

Fonte: próprio autor

2.5.3 Software X'Pert Highscore Plus na análise por agrupamento e PCA

O software comercial X'Pert Highscore Plus foi utilizado no presente estudo. Neste subitem serão apresentados os métodos utilizados neste software, para a análise por agrupamento e PCA. As informações são baseadas no manual do programa (PANALYTICAL, 2008).

No caso do referido software, pode-se separar os dados de um difratograma entre a) dados do perfil ou leitura (*profile/scan data*) e b) dados dos picos (*peak data*).

Tanto a análise por agrupamento, quanto o PCA, utilizam-se da comparação entre difratogramas. Todos os tipos de dados de um difratograma (dados de pico, dados de perfil ou ambos) são reduzidos em uma curva de distribuição normal $u_i(\mathbf{x})$. Esta abordagem é diferente de outros softwares comerciais análogos, que comparam os dados diretamente após algumas normalizações.

A curva de distribuição normal ou curva de Gauss-Moivre-Laplace é um modelo matemático que descreve vários fenômenos (BITTENCOURT; VIALI, 2006) - equação 10, onde, μ é a média da amostra e σ o seu desvio padrão

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\}, \text{ para } x \in \mathbb{R}; \mu \in \mathbb{R}; \sigma > 0 \text{ (eq. 10)}$$

Após esta conversão, as curvas de probabilidade (Gaussianas) $u_i(\mathbf{x})$ são comparadas através de uma figura de mérito (*figure of merit* – FOM). No caso do software X'Pert Highscore Plus, a equação 11 é aplicada.

$$FOM_{(i,j)} = \frac{\sum 1 - [u_i^2(x) + u_j^2(x) - 2 * u_i^2(x) * u_j^2(x)]}{n} \quad (\text{eq. 11})$$

Se as amostras são semelhantes, o valor da FOM será próximo à 1 (ou 100%). Quando um difratograma é comparado com ele mesmo o resultado da FOM não é igual a 1, devido a imprecisões computacionais dos cálculos.

Análise por agrupamento

O software X'Pert Highscore Plus utiliza-se de vários algoritmos para realizar a análise por agrupamento. Inicialmente todas as amostras são comparadas entre si, como descrito acima. Após o cálculo das FOM (equação 13), uma matriz de correlação $\mathbf{p}$ é apresentada. Esta matriz sumariza os resultados da comparação individual de um par de difratogramas. Sua diagonal representa a comparação das amostras com elas mesmas e somente metade de seus dados são relevantes, uma vez que a amostra A comparada com a B possui o mesmo resultado da amostra B comparada com a A ($\mathbf{p}$ é uma matriz simétrica).

Para realizar a análise por agrupamento, a matriz $\mathbf{p}$ é convertida em uma matriz de distâncias euclidianas $\mathbf{d}$, através da equação 2, com a mesma dimensão: $\mathbf{d} = (1 - \mathbf{p})$. Após esta transformação, o método de agrupamento hierárquico é aplicado. O software permite a escolha do método de agrupamento. Então os resultados são apresentados na forma de um dendrograma. Os principais parâmetros que determinam os critérios de agrupamento são:

- medida da distância: cálculo da distância euclidiana entre as amostras (equação 2);
- método de agrupamento: tipo de algoritmo utilizado para agrupamento das amostras, por exemplo o método dos vizinhos mais próximos.

Análise dos componentes principais

A análise dos componentes principais é realizada separadamente e independentemente da análise por agrupamento, como um método de visualização e

juízo da qualidade do agrupamento. Esta análise depende principalmente dos parâmetros de comparação:

- fonte de dados: dados do perfil (profile/scan data), e dados dos picos (peak data);
- escolha da figura de mérito – FOM;
- limiar (threshold): intensidade relativa da curva de probabilidade $u_i(\mathbf{x})$, onde apenas valores acima deste limiar serão considerados na comparação das amostras. Valores baixos de limiar (threshold) considerarão picos menos proeminentes do difratograma (próximos ao valor de background) na comparação, sendo o oposto para valores altos.

3 DEFINIÇÃO DOS DOMÍNIOS MINERALÓGICOS (1ª ETAPA)

3.1 Procedimento experimental – 1ª etapa (E₁)

3.1.1 Amostras estudadas na E₁

Foram amostrados testemunhos de sondagens de campanha de pesquisa geológica disponíveis em arquivos da Mirabela Mineração Ltda. (empresa que atualmente explora o depósito).

Os furos contidos em cada uma das seções foram visualizados tridimensionalmente no software Surpac 6.2, concomitantemente com as superfícies da cava de 2013 e da cava planejada para 2017, além do sólido de mineralização em sulfetos, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Ilustração esquemática da definição das seções e seleção de furos para amostragem

Foram definidas dezessete seções E-W, espaçadas em cerca de 100 m, visando abranger uma ampla distribuição espacial ao longo do depósito, considerando a posição georeferenciada de furos de sondagens disponíveis na superfície do plano de aproveitamento de médio prazo (1 a 5 anos – 2013/2017) da mina de Santa Rita.

A Tabela 6 mostra a relação dos furos amostrados por seção, bem como número de amostras coletadas em cada furo. Uma análise das distribuições dos furos permite observar que a porção sul do depósito está mais bem representada em relação à porção central e norte.

Os litotipos geológicos coletados foram classificados macroscopicamente pelos geólogos na descrição dos testemunhos de sondagem entre harzburgito, dunito, ortopiroxenito, olivina piroxenito, veios e outros (websterita, diques e gabro). O número de amostras coletadas por cada litotipo está exposto na Figura 14.

Tabela 6 – Relação dos furos de sondagens e das amostras coletadas

Porção do depósito	Seção	Furos	Nº de amostras coletadas compostas (5 em 5 m)	Intervalo amostrado (m)
Norte	1	MBS-249 (RE)	6	30
	2	MBS-278	11	55
	2	MBS-288 (RE)	6	30
	2	MBS-318	6	30
	3	MBS-464 (RE)	9	45
	4	MBS-501 (RE)	6	30
Central	5	MBS-165 (RE)	11	54
	6	MBS-133	9	43
	6	MBS-134	14	68
	7	MBS-155 (RE)	2	11
	8	MBS-542 (RE)	17	77
	9	MBS-140	7	35
	9	MBS-141	15	78
Sul	10	MBS-123	8	43
	10	MBS-196	14	70
	10	MBS-275 (RE)	12	59
	11	MBS-280	10	35
	11	MBS-587 (RE)	6	30
	11	MBS-593	8	42
	12	MBS-188	3	16
	12	MBS-345 (RE)	2	11
	12	MBS-415	10	46
	13	MBS-146	14	60
	13	MBS-147	7	37
	14	MBS-149	7	35
	14	MBS-150	17	87
	14	MBS-199 (RE)	11	55
	15	MBS-204	16	85
TOTAL		28	264	1297

Figura 14 – Classificação geológica dos litotipos amostrados (total de 264 amostras)

A amostragem foi efetuada em intervalos específicos, selecionando-se 2 ou 3 furos por seção, respeitando os contatos litológicos e visando englobar todas as

litologias presentes no depósito; todos os furos selecionados continham intervalos mineralizados de sulfetos entre os limites da cava.

Pesquisas geológicas de exploração realizadas anteriormente no depósito, amostraram os furos de sondagem, metro a metro, para a realização de análises químicas. Os arquivos dessas amostras, na forma de “polpa” já cominuída (abaixo de 150 μm), correspondente a cada intervalo, estavam armazenados na litoteca da mina e foram disponibilizados para este estudo.

Desta forma, foi efetuado um planejamento de composição de amostras de testemunhos de sondagens considerando intervalos de 5 em 5 metros, respeitando-se eventuais variações litológicas (adequação do intervalo amostrado). Ou seja, os intervalos dos testemunhos, amostrados inicialmente metro a metro, foram compostos gerando uma única amostra a cada intervalo de 5 metros de sondagem, exceto onde verificou-se variações litológicas do minério, onde o intervalo amostral foi reduzido ou aumentado em no máximo 2 metros. Optou-se por essa composição, levando-se em consideração que a mina é explotada em bancadas de 5 em 5 metros.

Após a composição destes intervalos, cada amostra resultante foi devidamente homogeneizada. A Figura 15 ilustra o procedimento inicial adotado para a amostragem dos furos de sondagem da mina de Santa Rita.

A opção por se realizar o estudo com amostras de furos de sondagens levou em consideração os seguintes aspectos:

- ampla distribuição de furos de sondagem no depósito;
- dificuldades de coleta de grande número de amostras nas frentes de lavra;
- análise por DRX + estatística multivariada baseada essencialmente nas proporções de minerais de ganga (o conteúdo dos minerais de interesse – sulfetos – situa-se próximo ou abaixo do limite de detecção da técnica de difração de raios X).

Figura 15 – Procedimento de amostragem inicial dos furos de sondagem da mina Santa Rita, utilizados na E₁

3.1.2 Procedimentos da análise por DRX + AEM da 1ª Etapa

Todas as 264 amostras compostas foram submetidas ao seguinte procedimento e analisadas no LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica da EPUSP:

- homogeneização e retirada de alíquotas representativas de aproximadamente 15 g para a realização da coleta de difratograma de raios X;
- pulverização das alíquotas em moinho planetário, em condições controladas, seguida de montagem de amostras em suportes adequados para análises por difração de raios X;
- obtenção dos difratogramas de raios X das amostras utilizando difratômetro X'Pert Pro, marca PANalytical com tubo de Cu e detector sensível à posição (PSD - X'Celerator). As condições de coleta adotadas foram: tubo de Cu, 45 kV e 40 mA, monocromador no feixe difratado; fenda automática e máscara

de 10 mm; faixa de ângulo de coleta de 2,5 a 70°, passo de 0,02°; tempo de 50 s por passo, totalizando 26 minutos por difratograma.

- análise por agrupamento dos difratogramas através do software *X'Pert Highscore Plus* considerando posição e intensidade dos picos difratados (conteúdo dos minerais presentes sem a necessidade de identificação de fases); os principais parâmetros empregados são apresentados na Tabela 7. Estes resultados são apresentados graficamente na forma de dendrograma e gráfico da análise de componente principal (PCA).

Tabela 7 - Principais parâmetros da análise por agrupamento (software *High Score*) para as amostras da 1ª etapa

Tratamento	Remoção do <i>background</i>
Fonte de dados	Perfil + Picos
Figura de mérito	Pos. + Int. dos picos
Threshold (Limiar)	30%
Condições do Agrupamento	
Medida de distância	Euclidiana
Método de agrupamento	Média das distâncias
Cut-off para definição de clusters	119,0

- obtenção do difratograma médio de cada grupo, seguida de interpretação por comparação com o banco de dados PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007) e análise mineralógica semiquantitativa feita pelo método de RIR - Ratio Intensity Reference utilizando estruturas cristalinas do banco de dados ICSD - Inorganic Crystal Structures Database de 2007.

3.2 Resultados e discussões – 1ª etapa (E₁)

Com as condições de análise empregadas foram definidos 14 grupos distintos de amostras conforme ilustrado no dendrograma da Figura 16. A seta verde, na Figura 16, indica o valor de *cut-off*, onde cada cruzamento entre a linha de *cut-off* (azul tracejada) com as linhas do dendrograma (em vermelho) representa um grupo.

Figura 16 - Dendrograma indicando o agrupamento das amostras em 14 grupos distintos

No dendrograma encontram-se indicados os grupos definidos por diferentes cores, bem como as amostras inseridas em cada grupo, apontando semelhanças e dissimilaridades entre as mesmas. A diferenciação entre os grupos se fez, essencialmente, com base na presença e conteúdo relativo dos principais constituintes das amostras: serpentina, olivina e piroxênio. Uma comparação dos difratogramas das diversas amostras contidas em cada grupo está no Apêndice 1.

A Figura 17 apresenta o gráfico 3D da análise por componente principal (PC) sob diferentes ângulos de visão.

Figura 17 - Distribuição espacial dos agrupamentos de principal (PC1 a PC3), sob diferentes ângulos de visão com as setas indicando o aumento dos teores dos minerais

Legenda dos grupos: 1 = azul; 2 = verde escuro; 3 = preto; 4 = verde; 5 = roxo; 6 = ciano; 7 = laranja; 8 = magenta; 9 = rosa claro; 10 = cinza; 11 = bege; 12 = marrom; 13 = azul claro; 14 = vermelho (outliers).

No Apêndice 2 é apresentada a relação de amostras com seus respectivos agrupamentos e parâmetros da análise do componente principal - valores de PC1 a PC10.

A análise das amostras médias (amostras consideradas mais representativas do grupo) de cada um dos 14 grupos definidos permitiu a identificação da assembleia mineralógica presente, conforme apresentado na Tabela 8.

As amostras são compostas essencialmente por serpentina (essencialmente lizardita), olivina (forsterita), piroxênio (ortopiroxênio - enstatita e, secundariamente, clinopiroxênio - diopsídio), além de estarem presentes anfibólio (tremolita/pargasita e antofilita), feldspato potássico, plagioclásio, filossilicatos (mica, clorita/vermiculita e talco), quartzo e, subordinadamente, magnesita e pentlandita.

Tabela 8 – Minerais identificados por difração de raios X nas amostras estudadas

Mineral	Fórmula química teórica
serpentina (lizardita)	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
olivina (forsterita)	Mg_2SiO_4
piroxênio	
ortopiroxênio - enstatita	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$
clinopiroxênio - diopsídio	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
anfibólio	
tremolita?	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ / $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
antofilita	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
feldspato	
K-feldspato	KAlSi_3O_8
plagioclásio	$(\text{Na, Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$
outros filossilicatos	
mica	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3,\text{Al})\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$
vermiculita	$(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
clorita	$(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_6(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
quartzo	SiO_2
magnesita	MgCO_3
pentlandita	$(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$

A estimativa semi-quantitativa da composição mineralógica média em cada grupo de amostras, obtida pelo método de RIR por difração de raios X, é apresentada na Tabela 9.

As amostras inseridas nos denominados grupos 1, 6 e 7 são caracterizadas pelos elevados conteúdos de olivina e diferenciam-se principalmente pelas menores proporções de serpentina e enstatita associadas. Dentre esses grupos, o 7 representa as amostras que apresentam, em média, as maiores quantidades de serpentina.

As amostras inseridas nos grupos 2, 4, 5, 8, 9 e 10 são preferencialmente compostas por enstatita, com variações em relação aos menores constituintes: serpentina, olivina, mica, anfibólio, plagioclásio, entre outros. Destaca-se que o grupo 8 é o mais representativo dentre o universo amostrado, englobando um total da ordem de 100 amostras, e apresenta, em média, as proporções mais elevadas de enstatita dentre as amostras.

O grupo 11 também contempla amostras ricas em serpentina e praticamente isentas de olivina e piroxênio, sendo destacadas as quantidades de outros filossilicatos (~25%) e de magnesita (~10%) contidas. No grupo 12 são significativos os conteúdos de enstatita e diopsídio (~35% cada).

Tabela 9 – Estimativa mineral média em cada grupo definido (% RIR; semiquantitativo)

Tabela 6 - Estimativa mineral média em cada grupo definidos (% RIR, semiquantitativo)															
Mineral	% Estimativa / grupo														
	7	1	6	2	4	10	8	5	9	12	3	11	13	14*	14**
serpentina	25	10	20	10	5	5			<5			20	<5	20	5
olivina	50	55	40	30	25	20									15
piroxênio	20	25	30	50	50	65	80	65	55	70	40		10	55	25
anfibólio	<5	10	5	5	10	5	5	10	15	10	15	20	<5	15	5
feldspato		<5	<5		5		10	10	10	10	20	15	50		20
outros filossilic.	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	10	10	10	10	25	5	10	<5
quartzo								<5	10		15	10	30		25
magnesita	<5		<5	<5	<5	<5			<5			10			5
pentlandita		<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5						<5	
Nº de amostras inseridas no grupo	29	16	36	11	10	18	100	22	9	3	4	2	2	1	1

Nota: Grupo 14 é composto por amostras diferentes das demais (*outliers*) -> * = amostra MBS-165 360175-360179; ** = amostra MBS-188 364747-364752.

No grupo 13 foram inseridas amostras com elevadas proporções de quartzo e feldspatos e, no grupo 3, estão amostras com quartzo, enstatita, anfibólio e mica.

Por fim, dentre as amostras diferentes das demais (*outliers*; “grupo 14”), a MBS-165 360175-360179 é composta basicamente por serpentina e enstatita, enquanto que a MBS-188 364747-364752 apresenta proporções significativas de enstatita, olivina, plagioclásio e quartzo.

A técnica de difração de raios X permitiu a detecção apenas de pentlandita como mineral típico portador de níquel, e em pequenas proporções nos grupos de amostras definidos (<5% - próximo ao limite de detecção da técnica); calcopirita e outros eventuais sulfetos de cobre não foram passíveis de identificação.

Na Figura 18 são apresentadas comparações entre os difratogramas médios de cada grupo, possibilitando a visualização das principais diferenças mineralógicas detectadas entre os mesmos, preferencialmente em relação as suas proporções relativas.

O valor de *cut-off* é o valor de dissimilaridade expresso no eixo x do dendrograma. Quanto maior este valor, mais distintos são os grupos entre si. Se, hipoteticamente, no mesmo dendrograma da Figura 16, fosse escolhido um valor maior de *cut-off*, ter-se-ia um menor número de grupos, porém com amostras mais distintas pertencentes a um mesmo grupo.

Figura 18 – Comparação dos difratogramas médios de cada grupo

Principais constituintes: Liz = lizardita; Ol = olivina; En = enstatita; An = anfibólio; Ab = albita; K-f = feldspato potássico; M = mica; Cl = clorita.

Assim, a escolha do valor de *cut-off* é uma tarefa complexa. Existem formas estatísticas de cálculo para o valor de *cut-off*, porém ele precisa ter um significado físico. Para este estudo, optou-se pela adoção de um valor de *cut-off* definido visualmente, com base na observação do gráfico 3D da análise por componente principal (PCA), justificado pela mineralogia.

Como salientado anteriormente na revisão bibliográfica, o gráfico 3D da PCA é uma forma de visualização do agrupamento (uma forma de visualização da matriz de correlação). Amostras são representadas como pontos no gráfico 3D; aquelas mineralogicamente semelhantes possuirão posições mais próximas e o inverso para as amostras mais distintas.

No gráfico 3D da PCA, a distância entre os pontos (amostras) não sofrerá mudanças com valores diferentes de *cut-off*, ela se alteraria se houvesse mudanças no método de comparação, (distância euclidiana, o inverso distância, entre outros) ou no valor de *threshold* (limiar).

Portanto, variando-se o valor de *cut-off*, somente o número de grupos é que sofrerá alterações: amostras pertencentes a dois grupos, poderão, por exemplo, serem classificadas como de um mesmo grupo.

Como se pode observar na Figura 17, há uma variação gradual na presença de serpentina, forsterita (olivina) e enstatita (piroxênio), representada por uma seta no

gráfico. A outra possível distinção dos grupos de amostras está relacionada a presença de filossilicatos (micas principalmente), carbonatos e feldspatos.

A distribuição dos pontos no gráfico 3D do PCA e o dendrograma, mostram que não há uma segmentação das amostras em famílias bem distintas: não há uma distinção clara entre os grupos. Se assim houvesse, ter-se-ia famílias de pontos agrupadas, porém separadas espacialmente no gráfico. O que se observa nas amostras desse estudo é que elas possuem uma relação contínua de mudança, exceto na direção do PC3, indicando a presença do filossilicatos (micas principalmente), carbonatos e feldspatos.

4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE DETALHE (2ª ETAPA)

4.1 Procedimento experimental - 2ª etapa

4.1.1 Amostras estudadas e procedimentos da análise DRX+AEM na E₂

As 264 amostras, coletadas na 1ª etapa do estudo, possuíam suas posições no depósito conhecidas (georeferenciadas), possibilitando sua correlação espacial (Figura 19) e com o modelo geológico.

Figura 19 – Visualização inferior da mina de Santa Rita com a porção dos furos amostrados; cada cor representa um domínio mineralógico e, em marrom, a superfície da cava em 2011 e os furos de sondagem

Fonte: próprio autor

Amostras representativas dos principais domínios mineralógicos, definidos na primeira etapa do estudo (E₁), seriam objeto de uma segunda campanha de amostragem, diretamente da mina, para os estudos de caracterização mineralógica detalhada (E₂). Entretanto, devido a problemas de acessibilidade na mina, foram disponibilizadas somente 55 amostras de pó de perfuratriz, gerados na perfuração de furos para detonação, com intervalos de 5 metros, em agosto de 2014.

O pó gerado na perfuração foi quarteado (quarteador Jones) e alíquotas de aproximadamente 300g – 400g, abaixo de 3 mm, foram enviadas para os estudos de caracterização detalhada (2ª etapa desse estudo) - Figura 20.

Figura 20 – A) Sonda em operação; B) Quarteamento do pó gerado na perfuração; C) Alíquotas ensacadas e enviadas para análises de acompanhamento de lavra e estudos de caracterização

Fonte: próprio autor

É importante ressaltar que as amostras oriundas dos testemunhos de sondagem da 1ª etapa não foram utilizadas na 2ª etapa de estudo, pois poderiam apresentar os sulfetos parcialmente alterados, devido ao armazenamento prolongado em um ambiente oxidante (atmosfera), mascarando suas características naturais.

Todas as 55 amostras de pó de perfuratriz foram submetidas aos mesmos procedimentos descritos para a 1ª etapa em termos de preparação e obtenção dos difratogramas.

A análise por agrupamento considerou juntamente os 319 difratogramas (264 amostras dos furos de sondagem da exploração e 55 amostras de pó de perfuratriz da frente de lavra), sendo que os parâmetros de comparação ora empregados na análise são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Principais parâmetros da análise por agrupamento (software *High Score*) para as amostras da 1ª e 2ª etapas de amostragem

Tratamento	Remoção do <i>background</i>
Fonte de dados	Perfil + Picos
Figura de mérito	Pos. + Int. dos picos
Threshold (Limiar)	10%
Condições do Agrupamento	
Medida de distância	Euclidiana
Método de agrupamento	Média das distâncias
Cut-off para definição de clusters	119,0

O conjunto de 319 amostras (264 amostras da exploração e 55 amostras de pó de perfuratriz) foi classificado em termos de semelhança de composição mineralógica, através da análise estatística multivariada de seus difratogramas, retratando num primeiro nível preferencialmente as variações no conteúdo relativo dos maiores constituintes: serpentina, olivina e piroxênio.

A Tabela 11 mostra em que grupos definidos na 1ª Etapa as amostras de pó de perfuratriz foram incorporadas. É importante ressaltar que a numeração dos grupos foi modificada por características do software utilizado: assim o grupo referido como 5 na 1ª etapa, não é o mesmo da 2ª Etapa.

Tabela 11 – Amostras de pó de perfuratriz agrupadas nos domínios mineralógicos definidos na 1ª Etapa do estudo

	Grupo/Domínio mineralógico																
	5	10	2	11	8	14	3	16	6	13	1	15	12	4	9	7	17*
Nº de amostras furos de sonda	20	10	10	32	40	5	122	11	33	6	8	4	2	2	6	3	5
Nº de amostras pó perfuratriz	-	1	-	1	7	2	15	7	4	6	-	-	1	2	6	-	3

Nota: * = amostras diferentes entre si (outliers).

Nota-se que muitos grupos não possuíam amostras de pó de perfuratriz disponíveis para estudos mineralógicos de detalhe por MEV-MLA. Optou-se, então, por compor as amostras de pó de perfuratriz. Para tal, uma análise DRX/RIR e a posição das amostras no diagrama de PCA (Figura 21) foram consideradas.

A composição proposta é exposta na Tabela 12, assim como o número de amostras candidatas a composição. Como a estimativa dos teores por DRX/RIR possui uma imprecisão associada a este método ($\pm 5\%$ de variação nos teores),

optou-se por agrupar as amostras por semelhança mineralógica, considerando a imprecisão do método.

Tabela 12 – Composição mineralógica média dos grupos de domínios mineralógicos compostos para estudos de caracterização mineralógica detalhada (% RIR; semiquantitativo)

Mineral	% Estimativa / grupo																
	5	10	2	11	8	14	3	16	6	13	1	15	12	4	9	7	17*
serpentina	25	25	15	20	10	10	<5	<5	<5	<5			25	10	<5	<5	
olivina	50	45	45	50	35	40	10	5	5	5				10			
piroxênio	20	20	35	25	50	45	75	80	85	85	65	60	5	20		10	
anfibólio	5	10	5	<5	<5	5	5	5	5	<5	10	10	10	<5	<5	<5	
feldspato				5		<5	5	5	<5	5	15	25	5	15	65	45	
outros filossilic.	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	5	<5	5	30	15	10	10	
quartzo							<5	<5	<5		5		10	15	10		
carbonatos	<5	<5		<5	<5	<5					<5		15	15	15	35	
pentlandita	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5							
Nº de amostras furos de sonda	20	10	10	32	40	5	122	11	33	6	8	4	2	2	6	3	5
Nº de amostras pó perfuratriz	-	1	-	1	7	2	15	7	4	6	-	-	1	2	6	-	3
Nº de amostras candidatas a composição	2				9		15	17			-		3		6		

Nota: * = amostras diferentes entre si (outliers).

	OPS = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%
	POS = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%
	PO = Piroxênio/ com olivina = 10%
	P = Piroxênio/ com olivina = 5%
	PAF = Piroxênio/anfibólio/feldspato
	CS = Minério carbonático com serpentina >5%
	C = Minério carbonático

A nomenclatura adotada considerou a ordem de abundância dos minerais. Por exemplo, o grupo olivina/piroxênio/ com serpentina >10% (OPS) possui a olivina como mineral mais abundante, seguida do piroxênio e serpentina. Para facilitar na escrita, os nomes foram condensados em siglas, sendo cada letra representante das iniciais dos minerais (O = olivina, P = piroxênio, S = serpentina, A = anfibólio e C = carbonatos).

Para a validação da forma de composição proposta e da representatividade das amostras candidatas à composição, os difratogramas das mesmas foram comparados com os difratogramas médios de cada cluster representativo dos litotipos (Apêndice 3; exceto para o grupo POS, composto apenas por amostras do grupo 3), sendo possível observar a significativa similaridade dos difratogramas.

Análises químicas sem padrões por fluorescência de raio X também foram realizadas em todas as amostras de pó de perfuratriz, sendo os resultados apresentados no Apêndice 4.

Figura 21 - Distribuição espacial dos agrupamentos segundo a análise de componente principal (PC1 a PC3), sob diferentes ângulos de visão com destaque para as amostras de pó de perfuratriz (esferas maiores)

Legenda dos grupos: 1 = azul escuro; 2 = azul claro; 3 = magenta; 4 = bege; 5 = laranja; 6 = roxo; 7 = vermelho claro; 8 = verde; 9 = preto; 10 = azul; 11 = ciano; 12 = amarelo; 13 = cinza; 14 = verde escuro; 15 = rosa; 16 = marrom; 17 = vermelho (outliers).

As amostras representativas dos grupos compostas para estudos possuem composição química relativamente semelhante entre si, preferencialmente em relação aos elementos maiores Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 e CaO . Todavia, aquelas representativas do grupo CS apresentam maiores discrepâncias de composição química, corroborando com as variedades mineralógicas evidenciadas pela comparação dos difratogramas. Estas observações demonstram a necessidade de subdivisão das amostras do grupo CS.

Nesta composição considerou-se também a massa disponível das contrapartes dos pós de perfuratriz e o conteúdo de níquel e enxofre (Apêndice 4). Amostras com teores de níquel inferiores a 0,35% e/ou enxofre menor que 0,10% foram desconsideradas para composição por apresentarem baixo teor de sulfetos (teores inferiores ao *cut-off* da mina).

É importante ressaltar que o grupo PAF não possui nenhuma amostra de pó de perfuratriz das 55 enviadas; as amostras do grupo C não possuíam os critérios químicos para serem amostradas; e o grupo OPS possui somente uma amostra de pó

de perfuratriz para ser caracterizada pertencente ao grupo 10, considerando as premissas expostas (%Ni > 0,35 e/ou %S > 0,1).

A Tabela 13 apresenta as amostras de pó de perfuratriz que efetivamente foram compostas para os estudos de 2ª etapa; considerando o exposto, as amostras para estudo da 2ª etapa são:

- OPS = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%
 - POS = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%
 - PO = Piroxênio/ com olivina = 10%
 - P = Piroxênio/ com olivina = 5%
 - Minério com ganga tipo A - micáceo
 - Minério com ganga tipo B - carbonático
 - Minério com ganga tipo C - feldspático/micáceo
 - Outlier
- } Minério carbonático com serpentina >5% (CS)

Tabela 13 – Composição da contraparte das amostras de pós de perfuratriz para os estudos de caracterização tecnológica de detalhe

Amostra	Grupos	ID amostras Pó de perfuratriz
OPS	10	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013435
POS	8	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010691
	8	1012641
	8	1012642
	8	1012643
	8	1013508
	8	RC_100_0067 PCT 1016170
	14	RC_100_0070 PCT 10160063
PO	14	RC_100_0067 PCT 1016167
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008649
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008646
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008643
	3	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008756
	3	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008759
	3	1012640
P	3	1012934
	16	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008640
	16	1012936
	16	RC_100_0073 PCT 1016200
	16	RC_100_0073 PCT 1016203
	6	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008763
	6	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008766
	13	RC_100_0067 PCT 1016169
	13	RC_100_0070 PCT 10160064
CS	13	RC_100_0070 PCT 10160065
	13	RC_100_0073 PCT 1016202
	12	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010692 - A
Out	4	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013434 - B
	4	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010688 - C
Out	17	RC_100_0073 PCT 1016204

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

4.1.2 Procedimentos para caracterização mineralógica de detalhe

As amostras compostas foram submetidas ao seguinte procedimento e analisadas no LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica da EPUSP:

- retirada de 1/32 da massa da amostra tal qual para análises químicas quantitativas, por fluorescência de raios X, em pastilhas fundidas com determinações de Ni, Cu, S, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO.
- retirada de 1/32 da massa da amostra tal qual para análise mineralógica por difração de raios X (DRX) e posterior análise por agrupamento, com as mesmas condições descritas na Tabela 10;
- peneiramento a úmido do restante da massa na abertura de 0,15 mm;
- o material retido em 0,15 mm foi moído em moinho planetário por quatro minutos seguido de peneiramento em 0,15 mm e remoagem do retido em tempo suplementar de 4 minutos, repetindo as etapas de moagem e moagem até assegurar $P_{95} = 0,15$ mm (equivalente a granulometria de moagem industrial);
- o passante em 0,15 mm e o material moído foram homogeneizados e submetidos a peneiramento à úmido em peneiras com abertura de 0,105 mm, 0,053 mm e 0,020 mm, seguindo-se amostragem para análises químicas efetuadas pelo LCT e preparação de seções polidas transversais para análise ao MEV-MLA e microscopia óptica de luz refletida também no LCT.

O estudo mineralógico das frações granulométricas acima de 0,020 mm foi efetuado de forma automatizada, em seções polidas, utilizando o software MLA - Mineral Liberation Analyser (MLA - FEI) versão 3.1 acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 650 FEG (FEI), e sistema de microanálise por EDS Esprit (Bruker).

As análises mineralógicas realizadas consideraram tanto o contraste de número atômico (imagens de elétrons retroespalhados) como a composição química de cada fase (espectros de raios X característicos por EDS; modo XBSE). Após a coleta das imagens e espectros de raios X, as fases foram classificadas, seguidas de desaglomeração manual de partículas e agrupamento das fases minerais. A

composição química das fases individualizadas e consideradas no banco de dados do MLA é apresentada no Apêndice 5.

Especificamente em relação à pentlandita foram observadas feições de alteração constituídas por mais de uma fase mineral que se apresentava como um espectro misto entre a pentlandita e a fase alterada, não possibilitando uma classificação adequada pelo sistema MLA na resolução adotada. Assim, optou-se por um tratamento adicional de imagem pelo histograma de tons de cinza (*backscattering overlay* – uma função de tratamento das imagens do software MLA) para a discriminação conjunta das fases de alteração associadas à pentlandita (violarita e óxido de ferro) que foram agrupadas como pentlandita oxidada.

É importante ressaltar que essas limitações foram impostas pela configuração da coleta ao MEV-MLA e não pela capacidade do equipamento utilizado. Se a resolução requerida pela textura da alteração da pentlandita fosse adotada, cada seção polida (fração de uma das amostras) levaria cerca de seis horas para ser coletada considerando um número mínimo de cinco mil partículas analisadas por seção – representatividade estatística.

As imagens digitais obtidas (MLA/XBSE + overlay) foram então processadas obtendo-se as seguintes informações: composição mineralógica; composição química calculada; distribuição de Ni e Cu nas fases presentes; distribuição granulométrica de pentlandita + pentlandita oxidada, calcopirita e sulfetos; associações e liberação da pentlandita + pentlandita oxidada, calcopirita e sulfetos.

A composição química de elementos/óxidos é calculada considerando a massa específica e composição de cada um dos minerais presentes na amostra; já as respectivas distribuições são obtidas a partir da contribuição de cada mineral na somatória dos teores destes elementos/óxidos.

Adicionalmente, para observação e documentação das texturas dos minerais de minério seções polidas do material acima de 0,20 mm foram observadas em microscópio óptico de luz refletida Leica DMR e ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 650 FEG (FEI), com sistema de microanálise por EDS Esprit (Bruker) acoplado.

4.2 Resultados e discussões – 2ª etapa

4.2.1 Análise estatística multivariada (AEM) dos difratogramas de raios X

Com as condições analíticas empregadas foram definidos 17 grupos distintos de amostras conforme ilustrado no dendrograma da Figura 22.

Figura 22 - Dendrograma indicando o agrupamento das amostras em 17 grupos de cluster distintos

A Figura 23 apresenta o gráfico 3D da análise por componente principal (PCA) sob diferentes ângulos de visão.

Figura 23 - Distribuição espacial dos agrupamentos segundo a análise de componente principal (PC1 a PC3), sob diferentes ângulos de visão com as setas indicando o aumento dos teores dos minerais

Legenda dos grupos: 1 = azul escuro; 2 = azul claro; 3 = magenta; 4 = bege; 5 = laranja; 6 = roxo; 7 = vermelho claro; 8 = verde; 9 = preto; 10 = azul; 11 = ciano; 12 = amarelo; 13 = cinza; 14 = verde escuro; 15 = rosa; 16 = marrom; 17 = vermelho (outliers).

No Apêndice 2 é apresentada a relação de amostras com seus respectivos agrupamentos e parâmetros da análise do componente principal (valores de PC1 a PC10).

A análise das amostras médias de cada um dos 17 grupos de cluster definidos permitiu a identificação da assembleia mineralógica presente, conforme apresentado na Tabela 14.

As amostras são compostas essencialmente por serpentina (essencialmente lizardita), olivina (forsterita), piroxênio (ortopiroxênio - enstatita e, secundariamente, clinopiroxênio - diopsídio), além de estarem presentes anfibólio (tremolita/pargasita e antofilita), feldspato potássico, plagioclásio, filossilicatos (mica, clorita/vermiculita e talco), quartzo e, subordinadamente, carbonatos (magnesita e dolomita) e pentlandita.

Tabela 14 – Minerais identificados por difração de raios X nas amostras estudadas

Mineral	Fórmula química teórica
serpentina (lizardita)	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
olivina (forsterita)	Mg_2SiO_4
piroxênio	
ortopiroxênio - enstatita	$Mg_2Si_2O_6$
clinopiroxênio - diopsídio	$CaMgSi_2O_6$
anfibólio	
tremolita?	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$ / $NaCa_2(Mg,Fe)_4AlSi_6Al_2O_{22}(OH)_2$
antofilita	$Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$
feldspato	
K-feldspato	$KAlSi_3O_8$
plagioclásio	$(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$
outros filossilicatos	
mica	$KMg_3(Si_3, Al)O_{10}(F, OH)_2$
vermiculita	$(Mg, Fe^{2+}, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
clorita	$(Mg, Fe^{2+}, Al)_6(Al, Si)_4O_{10}(OH)_8$
talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
quartzo	SiO_2
carbonato	
magnesita	$MgCO_3$
dolomita	$CaMg(CO_3)_2$
pentlandita	$(Fe, Ni)_9S_8$

A estimativa semi-quantitativa da composição mineralógica média em cada grupo de amostras, obtida pelo método de RIR por difração de raios X, é apresentada na Tabela 15. Esses resultados serão posteriormente discutidos considerando a tendência de similaridade dos grupos observada na análise do componente principal - PCA (Figura 23).

As amostras inseridas nos denominados grupos 2, 5 e 10 são caracterizadas pelos elevados conteúdos de olivina e diferenciam-se principalmente pelas proporções de serpentina e enstatita associadas; a amostra MBS-141 355255-355259, inserida no grupo 17 (*outliers*), apresenta composição relativamente semelhante. Os grupos 8, 11 e 14 também apresentam elevadas proporções de olivina, porém com quantidades de enstatita preferencialmente superiores as de serpentina.

Tabela 15 – Estimativa mineral média em cada grupo definido na DRX-AEM (% RIR; semi-quantitativo)

Outliers (Grupo 17, composto por 5 amostras diferentes das demais):

Mineral	% Estimativa / grupo															
	5	10	2	11	8	14	3	16	6	13	1	15	12	4	9	7
serpentina	25	25	15	20	10	10	<5	<5	<5	<5			25	10	<5	<5
olivina	50	45	45	50	35	40	10	5	5	5				10		
piroxênio	20	20	35	25	50	45	75	80	85	85	65	60	5	20		10
anfibólio	5	10	5	<5	<5	5	5	5	5	<5	10	10	10	<5	<5	<5
feldspato				5		<5	5	5	<5	5	15	25	5	15	65	45
outros filossilic.	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	5	<5	5	30	15	10	10
quartzo							<5	<5	<5		5		10	15	10	
carbonatos	<5	<5		<5	<5	<5					<5		15	15	15	35
pentlandita	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5						
Nº de amostras	20	10	10	32	40	5	122	11	33	6	8	4	2	2	6	3

Outliers (Grupo 17, composto por 5 amostras diferentes das demais):

Mineral	% Estimativa / grupo				
	MBS-134 354155-354156	MBS-141 355255-355259	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013433	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010689	RC_100_0073 PCT 1016204
serpentina	10	25		<5	
olivina		40			
piroxênio	10	25			90
anfibólio	20	10		<5	
feldspato	30		10	75	<5
outros filossilic.	5	<5	15	5	5
quartzo	10		5	10	
carbonatos	15		70	5	
pentlandita		<5			

As amostras inseridas nos grupos 3, 6, 13 e 16 são basicamente compostas por enstatita, com variações em relação aos menores constituintes: olivina, anfibólio, plagioclásio, mica, entre outros. Destaca-se que o grupo 3 é o mais representativo dentre o universo amostrado, englobando um total da ordem de 122 amostras, e apresenta, em média, ~75% de enstatita e ~10% de olivina.

Nos grupos 1 e 15 são significativos os conteúdos de enstatita e diopsídio (respectivamente 40-45% e 20% na média de cada grupo). O grupo 12 também contempla amostras ricas em serpentina e praticamente isentas de olivina e piroxênio, sendo destacadas as quantidades de outros filossilicatos (~30%; preferencialmente clorita e, secundariamente, mica e talco) e de magnesita (~15%) contidas.

Nas amostras inseridas nos grupos 4, 7 e 9 destacam-se os conteúdos de carbonatos presentes, com predominância de dolomita. O primeiro é ainda composto por proporções intermediárias de enstatita, serpentina, olivina, plagioclásio, quartzo, mica e talco, enquanto que nos grupos 7 e 9 são elevadas as proporções de feldspatos (plagioclásio e/ou K-feldspato).

No grupo 17 foram inseridas as amostras diferentes das demais (outliers), sendo que a MBS-134 354155-354156 mostra elevado conteúdo de plagioclásio (30%) e de anfibólio (20%), a amostra SEC 8431120 (RC_130 366) 1013433 é composta principalmente por carbonatos (40% dolomita e 30% magnesita), a SEC 8430620 (RC_130 219) 1010689 é tipicamente composta por feldspatos (60% plagioclásio e 15% K-feldspato) e a amostra RC_100_0073 PCT 1016204 por enstatita.

A técnica de difração de raios X permitiu a detecção apenas de pentlandita em pequenas proporções como mineral típico portador de níquel (<5% - próximo ao limite de detecção da técnica); calcopirita e outros eventuais sulfetos de cobre não foram passíveis de identificação por DRX.

Na Figura 24 e Figura 25 são apresentadas comparações entre os difratogramas médios de cada grupo, possibilitando a visualização das principais diferenças mineralógicas detectadas entre os mesmos, preferencialmente em relação as suas proporções relativas.

Figura 24 – Comparação dos difratogramas inseridos no grupo 17 (amostras diferentes das demais)

Principais constituintes: Liz = lizardita; OL = olivina; En = enstatita; An = anfíbólio; Qz = quartzo; T = talco; M = mica; K-feld = feldspato potássico; Ab = plagioclásio; alb? = albita; D = dolomita; Mag = Magnesita; V = vermiculita; Cl = clorita.

Figura 25 – Comparação dos difratogramas médios de cada grupo determinado (grupo 1 ao 16)

Principais constituintes: Liz = lizardita; Ol = olivina; En = enstatita; An = anfibólio; Qz = quartzo; T = talco; M = mica; K-feld = feldspato potássico; Ab = plagioclásio; albita?; D = dolomita; Mag = Magnesita; V = vermiculita; Cl = clorita.

A distribuição especificamente das 55 amostras de pó de perfuratriz incorporadas aos agrupamentos é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição mineralógica média dos grupos de domínios mineralógicos, segundo o agrupamento definido (% RIR; semiquantitativo), relacionando as amostras de pó de perfuratriz por grupo

Mineral	% Estimativa / grupo															
	5	10	2	11	8	14	3	16	6	13	1	15	12	4	9	7 17*
serpentina	25	25	15	20	10	10	<5	<5	<5	<5			25	10	<5	<5
olivina	50	45	45	50	35	40	10	5	5	5				10		
piroxênio	20	20	35	25	50	45	75	80	85	85	65	60	5	20		10
anfíbólio	5	10	5	<5	<5	5	5	5	5	<5	10	10	10	<5	<5	<5
feldspato				5		<5	5	5	<5	5	15	25	5	15	65	45
outros filossilic.	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	5	<5	5	30	15	10	10
quartzo							<5	<5	<5		5		10	15	10	
carbonatos	<5	<5		<5	<5	<5					<5		15	15	15	35
pentlandita	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5						
Nº de amostras furos de sonda	20	10	10	32	40	5	122	11	33	6	8	4	2	2	6	3 5
Nº de amostras pó perfuratriz	-	1	-	1	7	2	15	7	4	6	-	-	1	2	6	- 3

Nota: * = amostras diferentes entre si (*outliers*); estimativa mineral informada na Tabela 15

A maior parte delas (32 amostras; ~60% do total) está relacionada aos grupos caracterizados por elevados conteúdos de enstatita: grupos 3, 6, 13 e 16, contendo respectivamente, 15, 4, 6 e 7 de amostras de pó de perfuratriz.

Outras 11 amostras (~20% do total) são relacionadas aos grupos tipicamente compostos por elevadas proporções de olivina, enstatita e serpentina (grupos 8, 10, 11 e 14). Os agrupamentos 4, 9 e 12, caracterizados pelas elevadas proporções de carbonatos presentes, são representados preferencialmente por amostras de pó de perfuratriz. Por fim, 3 amostras foram definidas como *outliers* (diferentes das demais), sendo a SEC 8431120 (RC_130 366) 1013433 composta principalmente por carbonatos, a SEC 8430620 (RC_130 219) 1010689 por feldspatos e a amostra RC_100_0073 PCT 1016204 por enstatita. Não foram observadas amostras de pó de perfuratriz com composição tipicamente similar aos agrupamentos 1, 2, 5, 7 e 15.

A Figura 26 destaca a distribuição das amostras de pó de perfuratriz no gráfico 3D da análise por componente principal (PCA), enquanto que a descrição/identificação das mesmas, associada aos respectivos agrupamentos, é apresentada no Apêndice 2.

Figura 26 - Distribuição espacial dos agrupamentos segundo a análise de componente principal, com destaque para as amostras de pó de perfuratriz

A análise do gráfico 3D do PCA para as amostras de testemunho de sondagens mais as 55 amostras de pó de perfuratriz possibilita o mesmo tipo de interpretação que os resultados da 1ª etapa: há uma variação gradual na presença de serpentina, forsterita (olivina) e enstatita (piroxênio) e a uma clara distinção dos grupos de amostras que possuem conteúdo expressivo de filossilicatos, carbonatos e feldspatos.

Na análise deste agrupamento houve uma mudança no valor de *threshold* (limiar) para 10%. Na 1ª etapa do estudo o valor de *threshold* utilizado foi de 30%. A Figura 27 compara os gráficos 3D de PCA com os diferentes *thresholds*.

Com base na observação dos gráficos, nota-se uma clara mudança na distribuição dos pontos (amostras). O gráfico com *threshold* de 30% possuía uma maior aglutinação entre as amostras do mesmo grupo (mesma cor dos pontos) e uma maior diferença entre as distâncias intergrupos. Já quando utilizamos o *threshold* de 10% a dispersão dos pontos aumentou e houve uma maior sobreposição nas interfaces entre os grupos.

Figura 27 - Comparação entre os gráficos 3D de PCA com diferentes valores de *threshold*

Assim como o valor de *cut-off*, o valor de *threshold* é selecionado por critérios visuais do dendrograma e do gráfico 3D do PCA. Não há cálculo estatístico para seleção deste valor. Mais uma vez, encontra-se a dificuldade de selecionar um valor que reflita um significado físico. Assim, optou-se por variar este valor na análise das amostras de testemunho de sondagem somadas as 55 amostras de pó de perfuratriz, para um valor menor, onde pequenas variações seriam consideradas.

Usando o mesmo valor de *cut-off* (119,0) o número de grupos aumentou de 14 para 17. A comparação entre as amostras agrupadas nas condições da 1ª etapa com a da 2ª etapa, mostrou que há uma pequena variação, mas, de forma geral, as amostras permaneceram nos mesmos grupos.

Poder-se-ia assumir um valor maior de *threshold* ou de *cut-off*, para o agrupamento das amostras, tanto na 1ª quanto na 2ª etapa, resultando em um número menor de grupos: somente os principais picos seriam considerados na comparação dos difratogramas. Porém, como se trata de um depósito onde a mineralogia é relativamente simples e com variações nas proporções minerais de olivina, serpentina, clino e orto-piroxênios, o agrupamento poderia tender a uma simplificação

exacerbada, talvez se igualando a sensibilidade de uma classificação visual na descrição das amostras de testemunhos de sondagens aplicada na operação da mina.

Prezou-se por elevar o nível de discretização da análise multivariada dos difratogramas de raios X ao máximo. Acredita-se que, mesmo sem a presença dos picos das fases menores (concentração abaixo de 5%), devido ao limite de detecção por DRX, estes influenciam no perfil do difratograma (pequenas variações nas linhas próximas ao valor de background e a largura a meia altura dos picos). Assim, os grupos definidos por DRX-AEM na 1ª e 2ª Etapa foram mantidos como tal para respeitar o critério de máxima discretização.

4.2.2 Amostras compostas para estudos de detalhe

As amostras de pó de perfuratriz consideradas nas composições de amostras para os estudos caracterização de detalhe são apresentados no Apêndice 4. A seguir, na Tabela 17, são apresentadas amostras compostas e seus respectivos teores.

Tabela 17 – Teores dosados dos principais elementos das amostras tal qual das amostras estudadas

Amostra	Teores (% massa)						
	Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO
OPS	0,88	0,19	0,04	9,86	1,20	34,6	34,0
POS	0,57	0,11	0,03	9,18	0,93	43,8	29,3
PO	0,47	0,11	0,03	9,25	0,86	47,6	27,2
P	0,44	0,09	0,03	9,37	0,67	49,1	27,2
Ganga A	0,42	0,06	0,03	7,21	0,52	38,5	28,5
Ganga B	0,51	0,10	0,03	7,22	0,67	31,2	27,9
Ganga C	0,35	0,04	0,06	8,17	0,38	46,8	22,9
Out	0,49	0,12	0,01	8,25	1,06	51,3	26,4

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

A amostra OPS possui os maiores teores de Ni, Cu, S, Fe e MgO. Os teores de Ni estão na faixa de 0,4-0,5% nas amostras, exceto para o OPS com 0,88% e na Ganga C, com 0,35%. O maior teor de SiO₂ está na amostra Out (51,3%) e o menor na amostra Ganga B (31,2%). De maneira geral, pode-se separar as amostras em dois grupos mais a amostra Out: 1) OPS, POS, PO e P, com os teores de Ni, Cu, S, MgO decrescendo do OPS para o P com o aumento do teor de SiO₂ no sentido inverso – do P para OPS; 2) Ganga A, B e C não possuem nenhuma tendência de aumento ou diminuição de teores entre si, mas quando comparadas ao primeiro grupo, pode-

se dizer que elas possuem teores menores de Fe e S; a amostra Out possui teores similares ao primeiro grupo acima citado com maior conteúdo de SiO₂.

4.2.2.1 Tempo de moagem e análise granulométrica

As amostras compostas foram peneiradas a úmido na peneira de abertura de 0,15 mm. O material retido em 0,15 mm foi moído em moinho planetário por quatro minutos seguido de peneiramento em 0,15 mm e remoagem do retido em tempo suplementar de 4 minutos, repetindo as etapas de moagem e peneiramento até assegurar $P_{95} = 0,15$ mm (equivalente a granulometria de moagem industrial). A Tabela 18 apresenta o tempo de moagem em moinho planetário por amostras composta, assegurando $P_{95} = 0,15$ mm.

Tabela 18 –Tempo de moagem em moinho planetário para $P_{95} = 0,15$ mm

	Amostras							
	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
Nº de ciclos (4 mim)	1	3	3	4	1	1	2	4
Tempo total (mim)	4	12	12	16	4	4	8	16

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

As amostras OPS, Ganga A e B necessitam apenas de um ciclo de 4 minutos, no moinho planetário, para atingir $P_{95} = 0,15$ mm; a Ganga C necessita de 2 ciclos em um total de 8 minutos; já as amostras POS e PO necessitam de três ciclos cada, totalizando 12 minutos; e as amostras Out e P possuem a maior resistência a moagem, necessitando de 16 minutos (4 ciclos), para atingir a especificação de tamanho desejada.

A distribuição em massa, de níquel, cobre e enxofre está exposta na Tabela 19 e as respectivas curvas de curva de distribuição granulométrica acumulada abaixo são apresentadas na Figura 28.

No que se refere a distribuição em massa, pode-se agrupar as amostras em:

- maior conteúdo de finos - Ganga A e Ganga B, com cerca de 40% da distribuição em massa menor que 0,020 mm;
- intermediárias - OPS, POS, PO, e Ganga C, com o OPS levemente mais fino; e
- menor conteúdos de finos – P e Out, com curvas muito semelhantes.

Aproximadamente de 40%-50% do níquel contido nas amostras está no intervalo -0,105+0,020 mm. A distribuição do níquel entre as amostras varia no intervalo acima de 0,105 mm e abaixo de 0,020 mm. As amostras PO e OPS possuem 23% e 19% no níquel acima de 0,105 mm, respectivamente, enquanto as Gangas A e B concentram 46% e 41% do níquel abaixo de 0,020 mm.

Destaca-se que a amostra Out possui as curvas de distribuição mais distintas das demais, com uma concentração de níquel, cobre e enxofre nas frações mais finas. Entre as gangas, a Ganga C concentra esses elementos nas frações mais grossas.

Tabela 19 – Distribuição em massa, de Ni, Cu e S das amostras estudadas

Massa

Fração (mm)	% massa							
	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
+0,105	20,0	20,1	21,6	25,6	13,8	16,0	16,2	26,8
-0,105+0,053	29,3	31,9	32,3	33,3	24,1	23,0	33,2	31,9
-0,053+0,020	21,6	24,8	22,0	23,4	21,9	22,0	25,4	23,7
-0,020	29,1	23,2	24,1	17,7	40,2	39,0	25,2	17,6

Níquel

Fração (mm)	Distribuição de Ni (%)							
	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
+0,105	19	16	23	14	13	15	13	14
-0,105+0,053	27	24	21	24	20	23	27	16
-0,053+0,020	23	27	21	29	22	20	23	28
-0,020	31	33	36	33	46	41	36	42

Cobre

Fração (mm)	Distribuição de Cu (%)							
	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
+0,105	14	13	19	8	13	15	14	8
-0,105+0,053	22	19	14	18	20	23	29	10
-0,053+0,020	22	25	19	25	26	21	27	25
-0,020	42	44	47	49	41	41	30	57

Enxofre

Fração (mm)	Distribuição de S (%)							
	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
+0,105	21	18	22	12	13	19	15	9
-0,105+0,053	29	24	17	24	24	23	28	15
-0,053+0,020	23	28	23	33	21	23	25	29
-0,020	27	30	37	32	42	35	31	47

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Figura 28 – Curvas de distribuição granulométrica acumulada abaixo (massa Ni, Cu e S)

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

4.2.3 Caracterização mineralógica de detalhe

Neste subitem serão apresentados e discutidos de forma condensada e comparativa os resultados das amostras objeto de estudos mineralógicos de detalhe por MEV-MLA. O Apêndice 6 traz em detalhe e, separado por frações, os resultados condensados a seguir. O Apêndice 7 traz a química calculada a partir da mineralogia quantificada por MLA.

4.2.3.1 Composição mineralógica

A Tabela 20 e a Tabela 21, respectivamente, mostram a composição mineralógica das amostras OPS, POS, PO, P, Ganga A, Ganga B, Ganga C e Out, bem como o total de sulfetos e a proporção entre eles por amostras. A Figura 29 e a Figura 30 ilustram os conteúdos da Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 20 – Composição mineralógica das amostras estudadas (total - % em massa)

Minerais	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
olivina	37,8	18,5	9,99	8,78	2,58	3,11	11,8	0,14
serpentina	37,8	16,1	3,88	5,03	36,8	42,2	24,2	0,30
ortopiroxênio	6,49	49,5	72,6	69,7	38,7	13,2	27,2	85,7
clinopiroxênio	1,77	3,86	6,11	5,45	0,67	1,00	1,06	7,18
anfíbólio	2,00	2,42	1,79	4,50	1,81	1,64	2,92	0,64
outros silicatos	0,78	1,78	2,20	1,76	3,44	8,16	19,8	2,56
espinélio-Cr	3,38	1,47	0,78	1,34	1,30	3,92	1,09	0,27
óxido-Fe	2,14	0,39	0,34	0,47	0,24	1,45	0,71	0,56
mica	0,25	1,24	0,30	0,35	6,88	0,11	8,33	0,23
carbonatos	3,11	1,72	0,37	0,54	4,87	22,2	1,55	0,08
outros	0,29	0,24	0,12	0,14	0,84	0,29	0,13	0,04
Sulfetos								
pentlandita	1,67	1,37	0,80	0,90	0,68	0,69	0,48	1,18
pentl_oxid	1,71	0,31	0,10	0,20	0,30	0,64	0,26	0,18
calcopirita	0,25	0,35	0,19	0,23	0,19	0,24	0,11	0,29
pirita	0,48	0,58	0,34	0,29	0,61	1,04	0,28	0,53
pirrotita	0,04	0,15	0,11	0,26	0,01	0,01	0,02	0,13
arsenopirita	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
sulfetos_FeCoNi	0,09	0,02	<0,01	0,01	0,02	0,12	0,02	0,01
Pentl+Pentl oxid.	3,38	1,67	0,90	1,10	0,97	1,33	0,74	1,36

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier; **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

Tabela 21 - Composição mineralógica das amostras estudadas mineralógicos (total - % em massa): total de sulfetos e a porcentagem relativa entre eles

Minerais	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
% sulfetos	4,2	2,8	1,5	1,9	1,8	2,7	1,2	2,3
	% relativa entre os sulfetos (normalizado a 100%)							
pentlandita	39,3	49,2	51,6	47,2	37,4	25,1	40,8	50,9
pentl_oxid	40,5	11,1	6,40	10,7	16,3	23,6	22,6	7,55
calcopirita	5,78	12,6	12,0	12,3	10,5	8,66	9,22	12,6
pirita	11,4	21,0	22,0	15,5	33,4	38,0	23,9	23,0
pirrotita	0,99	5,28	7,03	13,8	0,39	0,28	1,47	5,49
arsenopirita	0,00	0,07	0,56	0,13	0,76	0,10	0,00	0,13
sulfetos_FeCoNi	2,07	0,74	0,23	0,33	1,30	4,28	1,72	0,22

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier;

A amostra OPS possui o maior conteúdo de pentlandita, pentlandita oxidada e sulfetos, corroborando com seus maiores teores de Ni, Cu e S, quando comparada com as demais amostras.

Considerando as amostras OPS, POS, PO e P, há uma diminuição nos teores de olivina, serpentina e sulfetos das amostras OPS e POS para PO e P e, nesta mesma ordem, um aumento nos teores de piroxênio. A amostra Ganga B destaca-se pelo alto conteúdo de carbonatos (22%), enquanto a amostra Ganga A e B pela alta nos teores de mica e outros silicatos (predominantemente feldspatos). A amostra Out possui a maior concentração de piroxênios, aliada à quase ausência de olivina e serpentina.

Estas observações corroboram as interpretações propostas para distribuição dos pontos (amostras) nos gráficos 3D do PCA gerados: as amostras se diferenciam basicamente pelo conteúdo de olivina, serpentina, piroxênios, carbonatos e outros silicatos (predominantemente feldspatos). Sendo as amostras OPS, POS, PO e P diferenciadas pelos conteúdos de olivina, serpentina e piroxênios; e as amostras Ganga A, B e C por apresentarem maiores concentrações de carbonatos e/ou micas e/ou outros silicatos/feldspatos.

O termo pentlandita oxidada refere-se às formas de alteração da superfície da pentlandita (textura de alteração). Não existem partículas de pentlandita oxidada livres e elas estão quase em sua totalidade associadas à pentlandita. Esta relação será discutida e explicada posteriormente no item 4.2.3.2.

Figura 29 - Composição mineralógica das amostras OPS, POS, PO e P (% em massa)

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, corindon.

% relativa entre os sulfetos

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%

Figura 30 - Composição mineralógica das amostras de Ganga A, B, C e Outlier (% em massa)

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

% relativa entre os sulfetos

4.2.3.2 Características texturais da pentlandita

Uma investigação da textura da pentlandita foi realizada nas oito amostras estudadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), com auxílio de um sistema de microanálise de EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy), assim como ao

microscópio óptico. Observou-se que as amostras OPS e as Gangas A, B e C, possuem partículas com grãos de pentlandita alterados, como ilustra a Figura 31.

Figura 31 – Imagem de MEV-BSE da pentlandita mostrando sua textura de alteração

Fonte: amostra OPS

A partícula da Figura 31 apresenta regiões com diferentes tons de cinza. Como o detector utilizado na captura dessa imagem foi o de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* – BSE), que detecta variações composicionais: as regiões onde há tons de cinza mais escuros possuem átomos de elementos mais leves em sua composição em relação as regiões em tons de cinza mais claros.

A Figura 32 traz um mapeamento elementar por EDS da mesma partícula acima. O mapeamento por EDS mostra em falsa cor a concentração de cada elemento presente na partícula. Nota-se que as regiões com tons de cinza mais escuros são aquelas onde há uma concentração de ferro e oxigênio e a ausência de níquel e enxofre.

Figura 32 – Mapeamento elemental por MEV-EDS da textura de alteração da pentlandita

Fonte: amostra OPS

A Figura 33 mostra análise pontual por EDS de uma região da partícula de pentlandita descrita acima, para quantificar a composição das áreas com diferentes tons de cinza.

Figura 33 – Imagem de BSE da pentlandita com um zoom em uma região para quantificar por EDS a composição das áreas com diferentes tons de cinza (áreas/pontos verdes)

Fonte: amostra OPS

Ponto/ Área	Teores (%)			
	Ni	S	Fe	O
1	40,7	33,9	25,4	
2	40,9	33,8	25,4	
3	37,3	43,0	19,7	
4	40,9	42,5	16,6	
5			64,8	35,2
6			64,1	35,9

Considerando os resultados apresentados na Figura 31, Figura 32 e Figura 33, pode-se sugerir a pentlandita sofreu uma alteração parcial, transformando-a inicialmente e, posteriormente, em um óxido de ferro (magnetita?), sendo esta alteração condicionada pela direção de partição (111) da pentlandita. Desta forma, o tom de cinza mais claro corresponde a pentlandita, o tom de cinza intermediário a violarita e o mais escuro ao óxido de ferro.

Também foram observados grãos de pentlandita sem alteração, como mostra a Figura 34 - imagem de BSE com uma análise pontual de EDS. Nota-se também que sua composição não apresenta variações expressivas.

Figura 34 – Imagem de pentlandita não alterada com a quantificação de sua composição, nas áreas verdes assinaladas, por análise pontual de EDS

Fonte: amostra P

Ponto/ Área	Teores (%)		
	Ni	S	Fe
1	37,6	31,0	31,3
2	37,4	31,3	31,3

Tanto a feição de alteração da pentlandita acima citada, como o conteúdo de finos presente nas amostras estudadas estão relacionados à mineralogia do minério ou domínios anteriormente definidos. Amostras relativas a rochas de composição mais peridotítica (OPS) e com maior presença de carbonatos (Gangas A, B e C) são aquelas que apresentam maiores intensidades de alteração da pentlandita, conteúdo de finos e de níquel associado a silicatos; nas amostras de composição mais piroxeníticas (PO e P), a pentlandita apresenta baixo nível de alteração para violarita e pouca ou nenhuma associação com óxidos de ferro.

Desta forma, buscou-se individualizar as proporções de pentlandita e pentlandita oxidada (violarita + óxidos de ferro) utilizando-se do MEV-MLA. Mesmo tendo-se que as fases envolvidas na alteração da pentlandita são a violarita e óxidos de ferro, optou-se por classificá-las ao MLA somente como pentlandita oxidada. Isto deve-se ao fato de que a magnificação utilizada na análise implicava em tamanho de pixel que resultava em espectros de EDS mistos sem possibilidade de discriminação.

A avaliação do conteúdo da pentlandita oxidada nas amostras estudadas (Tabela 20) mostra que há um aumento relativo dessa fase nas amostras OPS e nas

Gangas A, B e C. Para uma visualização desta textura, imagens de MEV-MLA em BSE e classificadas por falsa cor são apresentadas no Apêndice 8. A Figura 35 ilustra outros exemplos de mapeamento elementar por MEV-EDS da textura de alteração da pentlandita. Já as Figura 33 e Figura 34 mostram exemplos de textura da pentlandita e outros sulfetos ao microscópio óptico de luz refletida .

No processo de beneficiamento da mina Santa Rita utiliza-se a flotação de sulfetos como a operação unitária de concentração. Uma vez alterada a superfície da pentlandita, pode deixar de atuar adequadamente como sulfeto na flotação mesmo com emprego de bissulfeto para a sulfetação da superfície de minerais de interesse. Como o coletor utilizado associa-se a sulfetos, partículas com alto grau de oxidação não serão adequadamente recuperadas na flotação, ocasionando perda na recuperação de Ni. Assim, o conteúdo de pentlandita oxidada é a característica mais relevante da amostra em termos de processo, analisando somente a mineralogia modal. Cabe destacar, então, que a amostra OPS possui uma quantidade expressiva, em relação as demais amostras (1,71%), de pentlandita oxidada, representando 40% do total de sulfetos desta amostra.

Figura 35 – Outros exemplos de mapeamento elemental por MEV-EDS da textura de alteração da pentlandita

Obs: No mapeamento elemental por EDS, **laranja escuro** = pentlandita, **laranja claro** = violarita, **rosa escuro** = óxido de ferro, **rosa claro** = anquerita e **azul ciano** = serpentina. **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C);

Figura 36 – Exemplos de textura da pentlandita e outros sulfetos ao microscópio óptico de luz refletida – amostras OPS, Ganga A, B e C

Amostra	Pentlandita	Outros sulfetos
OPS
Ganga A
Ganga B
Ganga C

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); imagens com nicois paralelos.

Figura 37 - Exemplos de textura da pentlandita e outros sulfetos ao microscópio óptico de luz refletida – amostras POS, PO, P e Out

Amostra	Pentlandita	Outros sulfetos
POS
PO
P
Out

Obs: **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina = 10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **Out** = Outlier

4.2.3.3 Associações minerais

A Tabela 22 e a Figura 38 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas com três ou mais fases (≥ 3), para o total +0,020 mm em se considerando as condições de cominuição empregadas.

Em todas amostras a porcentagem em massa de partículas livres de pentlandita + pentlandita oxidada não ultrapassa 50% e pode-se segmentar as amostras em:

- a) OPS, Ganga A, B e C com a porcentagem em massa de partículas livres variando de 19-28% e o restante associado predominantemente com serpentina.
- b) POS, PO, P e Out com a porcentagem em massa de partículas livres variando de 43-48% e o restante associado predominantemente com ortopiroxênio.

Destaca-se que as amostras PO e Out possuem uma significativa associação de pentlandita + pentlandita oxidada com pirita e as OPS e Ganga B com óxido de ferro.

Não se considerou avaliar a liberação da pentlandita separadamente da pentlandita oxidada, por serem fases intrinsecamente relacionadas em uma textura que seria inviável uma separação física por cominuição.

Tabela 22 - Porcentagem de partículas livres e associadas de pentlandita + pentlandita oxidada para o total +0,020 mm

Associação	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
Livre (%)	22	46	43	48	19	16	28	46
Mistas em binárias (%)	40	30	41	30	28	38	36	42
Mistas ≥ 3 fases (%)	38	24	16	22	53	46	36	12
Distribuição em binárias (%)								
calcopirita	0,5	0,5	0,4	0,1	0,2	0,6	2,3	0,6
pirita	2,0	4,0	12	4,1	0,3	0,7	1,1	10
pirrotita	0,1	0,4	4,8	0,1			<0,1	0,3
sulfetos_FeCoNi	1,6	0,2		0,1		1,7	0,6	
ortopiroxênio	0,5	8,8	14	18	3,8	2,0	2,2	25
clinopiroxênio	0,1	0,2	0,8	1,4	<0,1	<0,1	1,4	3,4
anfíbólio	0,6	0,5	0,2	1,0	0,8	<0,1	0,1	0,1
olivina	3,0	2,6	1,7	2,7	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
serpentina	16	8,1	3,2	1,5	20	11	18	<0,1
outros silicatos	<0,1	<0,1	0,7	0,1	<0,1	1,5	1,6	0,6
espinélio-Cr	0,2	0,7	0,1	<0,1	0,5	0,1	<0,1	0,2
óxido-Fe	12	2,4	1,1	0,1	1,1	10	<0,1	1,2
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		1,1	<0,1
calcita	2,8	1,1	2,3	0,9	1,9	10	7,2	
outros	<0,1	<0,1			<0,1	<0,1		
Distribuição ≥ 3 fases (%)								
calcopirita	0,8	1,0	0,2	0,2	1,9	1,5	0,7	0,4
pirita	1,4	3,2	2,4	2,7	7,4	2,4	3,4	2,0
pirrotita	0,4	1,4	1,6	0,7	0,3		0,7	0,3
sulfetos_FeCoNi	1,1	0,2			1,5	2,1	0,6	0,1
ortopiroxênio	0,9	4,8	5,2	7,6	5,9	2,2	4,7	6,1
clinopiroxênio	0,2	0,4	0,6	2,0	<0,1	0,2	0,2	0,7
anfíbólio	1,3	2,0	0,4	0,3	2,2	0,9	1,6	1,3
olivina	3,8	2,2	1,4	1,9	0,1	0,7	0,9	<0,1
serpentina	13	6,7	1,5	1,8	19	13	9,4	0,2
outros silicatos	<0,1	0,1	0,5	0,8	0,4	0,7	0,6	0,6
espinélio-Cr	1,3	<0,1	0,1	0,4	1,0	1,3	2,7	0,1
óxido-Fe	11	1,0	0,4	1,5	1,3	8,8	4,0	0,7
mica	<0,1	0,1	0,3	<0,1	1,5	<0,1	0,4	<0,1
calcita	2,7	1,0	1,1	1,8	11	11,9	5,8	<0,1
outros	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,4	

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon. **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Figura 38 - Porcentagem de partículas associadas da pentlandita + pentlandita oxidada para o total +0,020 mm

A Tabela 23 e a Figura 39 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas com três ou mais fases (≥ 3) para o total +0,020 mm.

Para as condições de cominuição empregadas se verifica que as partículas livres de calcopirita representam menos de 40%, com exceção para as amostras P e Out com valores de 57% e 60%, respectivamente.

Tabela 23 - Porcentagem de partículas livres e associadas de calcopirita para o total +0,020mm

Associação	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
Livres (%)	18	34	40	57	26	18	27	60
Mista em binárias (%)	18	36	31	26	52	24	50	29
Mista ≥ 3 fases (%)	64	30	29	17	23	58	23	11
Distribuição em binárias (%)								
pentl. + pentl. ox.	3,0	1,9	3,6	<0,1	10	1,1	2,8	0,7
pirita	3,7	6,2	1,6	1,4		0,7	<0,1	1,2
pirrotita	0,6	1,2	<0,1	1,0				
ortopiroxênio	0,3	14	21	16	10	1,9	31	31
clinopiroxênio	0,7	1,4	3,7	0,3		0,1		1,0
anfíbólio	<0,1	1,1	0,5	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
olivina	0,2	0,1	<0,1	7,1	0,1	0,3		<0,1
serpentina	4,0	8,6	0,1		28	9,8	1,4	<0,1
outros silicatos	<0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7	<0,1	<0,1
espinélio-Cr	0,6	0,1	0,2			1,5	0,1	
óxido-Fe	4,4	0,9			2,1	0,3		<0,1
mica		<0,1	<0,1	0,1	<0,1		6,7	
calcita	0,1	0,5	0,3	0,3	0,1	7,4	7,5	
outros					<0,1	<0,1		
Distribuição ≥ 3 fases (%)								
pentl. + pentl. ox.	11,1	5,1	1,0	2,6	6,0	11,6	4,6	2,2
esfalerita							<0,1	
pirita	1,1	1,3	1,9	1,8	1,8	1,0	0,3	4,2
pirrotita	0,8	1,3	1,8	3,1	<0,1		<0,1	1,5
sulfetos_FeCoNi	0,2	<0,1			0,5	0,2	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	4,1	6,5	9,4	4,0	4,9	4,0	1,6	8,6
clinopiroxênio	1,6	2,6	1,2	1,6	<0,1	0,6	<0,1	1,7
anfíbólio	3,6	0,5	1,3	1,2	1,6	1,8	0,2	1,9
olivina	2,9	1,1	3,4	0,1	<0,1	0,1	0,3	
serpentina	22	8,2	5,5	1,7	4,6	16	1,6	<0,1
outros silicatos	<0,1	0,2	0,9	0,3	<0,1	0,3	0,2	0,1
espinélio-Cr	1,9	<0,1	0,3	0,1	0,2	2,2		0,1
óxido-Fe	13	2,2	0,4	0,3	0,6	5,4	1,5	1,9
mica	<0,1	0,2	<0,1	0,1	0,2	<0,1	4,5	0,1
calcita	2,5	0,2	1,9	0,1	2,0	15	8,3	<0,1
outros	<0,1	0,3	0,3	0,1	<0,1	0,3	<0,1	

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon. **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Figura 39 - Porcentagem de partículas associadas da calcopirita para o total +0,020 mm

A Tabela 24 e a Figura 41 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação do total de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas com três ou mais fases (≥ 3) para o total +0,020 mm. Para as condições de cominuição empregadas se verifica que as partículas livres de sulfetos representam cerca de 24 a 37% para as amostras OPS e Ganga A, B e C, com valores de 54% a 61% para as demais.

Figura 40 - Porcentagem de partículas associadas aos sulfetos para o total +0,020 mm

Tabela 24 - Porcentagem de partículas livres e associadas dos sulfetos para o total +0,020mm

Associação	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
Livres (%)	29	50	57	54	24	28	37	61
Mistos em binárias (%)	39	34	30	33	42	36	36	32
Mistos ≥ 3 fases (%)	33	16	13	13	33	36	27	7
Distribuição em binárias (%)								
ortopiroxênio	0,6	9,8	15	22	9,2	2,6	5,8	24
clinopiroxênio	0,1	0,6	1,7	2,1	<0,1	0,1	1,0	2,7
anfibólio	0,5	0,8	0,6	0,8	0,4	<0,1	0,1	1,3
olivina	3,0	2,0	1,6	2,9	<0,1	0,1	0,3	<0,1
serpentina	17	15	4,7	2,0	26	12	17	0,1
espinélio-Cr	0,2	0,4	0,1	<0,1	0,2	0,4	<0,1	0,1
óxido-Fe	15	2,8	2,0	0,8	2,3	8,1	2,8	1,3
mica	<0,1	0,4	<0,1	1,2	<0,1		1,4	<0,1
carbonatos	2,6	1,3	4,1	0,5	4,3	12	6,6	0,1
outros silicatos	<0,1	0,5	0,4	0,3	<0,1	1,4	1,0	1,1
outros	<0,1	<0,1			<0,1	<0,1		
Distribuição ≥ 3 fases (%)								
ortopiroxênio	11	5,1	1,0	2,6	6,0	12	4,6	2,2
clinopiroxênio							<0,1	
anfibólio	1,1	1,3	1,9	1,8	1,8	1,0	0,3	4,2
olivina	0,8	1,3	1,8	3,1	<0,1		<0,1	1,5
serpentina	0,2	<0,1			0,5	0,2	<0,1	<0,1
espinélio-Cr	4,1	6,5	9,4	4,0	4,9	4,0	1,6	8,6
óxido-Fe	1,6	2,6	1,2	1,6	<0,1	0,6	<0,1	1,7
mica	3,6	0,5	1,3	1,2	1,6	1,8	0,2	1,9
carbonatos	2,9	1,1	3,4	0,1	<0,1	0,1	0,3	
outros silicatos	22	8,2	5,5	1,7	4,6	16	1,6	<0,1
outros	<0,1	0,2	0,9	0,3	<0,1	0,3	0,2	0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon. **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

4.2.3.4 Distribuição granulométrica dos minerais de interesse

A distribuição granulométrica da pentlandita + pentlandita oxidada é apresentada na forma de curvas de distribuição acumulada no passante (Figura 41), considerando o diâmetro de elipse equivalente (EED) de cada grão (grão mineral independentemente de este ocorrer na forma livre ou mista) e a Tabela 25 traz os valores dos diâmetros d10, d50 e d90 das curvas de distribuição granulométrica.

Figura 41 – Distribuição granulométrica acumulada no passante da *pentlandita* e *pentlandita + pentlandita oxidada* (% em massa) para o total +0,020 mm

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Tabela 25 – Diâmetros d_{10} , d_{50} e d_{90} da curva de distribuição granulométrica da pentlandita, pentlandita + pentlandita oxidada para o total +0,020 mm

Amostras	Diâmetros (μm – EED)		
	d_{10}	d_{50}	d_{90}
OPS	4	30	70
POS	7	25	70
PO	7	25	58
P	9	28	75
Ganga A	3	15	40
Ganga B	4	23	52
Ganga C	4	22	49
Out	7	20	50

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

As curvas de distribuição granulométrica da pentlandita+pentlandita oxidada são similares para as amostras OPS, POS, PO, P e Out. Abaixo de aproximadamente 20μm, a amostra OPS apresenta-se mais fina em relação as demais, enquanto acima desse valor, a amostra Out torna-se mais fina. Comparando as Gangas, tem-se a Ganga B e C com curvas semelhantes e a Ganga A mais fina entre as amostras de gangas.

A distribuição granulométrica da calcopirita é apresentada na forma de curvas de distribuição acumulada no passante (Figura 42), considerando o diâmetro de elipse equivalente (EED) de cada grão e a Tabela 26 traz os valores dos diâmetros d10, d50 e d90 das curvas de distribuição granulométrica.

Figura 42 – Distribuição granulométrica acumulada no passante da calcopirita (% em massa) para o total +0,020 mm

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Tabela 26 – Diâmetros d₁₀, d₅₀ e d₉₀ da curva de distribuição granulométrica da calcopirita para o total +0,020 mm

Amostras	Diâmetros (μm – EED)		
	d10	d50	d90
OPS	4	20	55
POS	7	25	63
PO	5	25	72
P	7	38	100
Ganga A	7	28	58
Ganga B	4	17	60
Ganga C	7	25	80
Out	6	19	28

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Entre as amostras OPS, POS, PO, P e Out, as amostras possuem curvas semelhantes até cerca de 20μm. Acima desse valor, as amostras OPS e Out apresentam a calcopirita em granulação mais fina, enquanto a amostra P mais grossa.

As amostras de Ganga A e C possuem curvas similares, enquanto a Ganga B possui a granulação da calcopirita mais fina em relação as demais.

A distribuição granulométrica dos sulfetos é apresenta na forma de curvas de distribuição acumulada (Figura 43), considerando o diâmetro de elipse equivalente (EED) de cada grão (grão mineral independentemente de este ocorrer na forma livre ou mista) e a Tabela 26 traz o d10, d50 e d90 das curvas de distribuição granulométrica.

Figura 43 – Distribuição granulométrica acumulada no passante dos sulfetos (% em massa), para o total +0,020 mm

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Tabela 27 – Diâmetros d₁₀, d₅₀ e d₉₀ da curva de distribuição granulométrica dos sulfetos para o total +0,020 mm

Amostras	Diâmetros (µm – EED)		
	d10	d50	d90
OPS	4	31	70
POS	10	30	75
PO	9	29	60
P	10	30	80
Ganga A	4	22	70
Ganga B	4	21	60
Ganga C	4	23	70
Out	9	22	52

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

As curvas de distribuição granulométrica dos sulfetos são similares para as amostras OPS, POS, PO, P e Out. Abaixo de 20µm, o OPS apresenta-se mais fino em relação as demais amostras. Acima desse valor, o Out possui uma granulação mais fina para os sulfetos. A Ganga A, B e C possuem curvas semelhantes. Nota-se que a curva de distribuição granulométrica dos sulfetos é muito similar a curva da pentlandita+pentlandita-oxidada.

4.2.3.5 Distribuição de Ni, Cu, S

A Tabela 28 e a Figura 44 apresentam a distribuição de Ni dentre as fases portadoras desse elemento para as amostras estudadas. A partição do níquel nos minerais acompanha a tendência citada por Mirabela (2007), Fróes (1993) e Purvis (2005).

Tabela 28 – Estimativa da distribuição de Ni (%) – total +0,020 mm

Mineral	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
pentlandita	43	72	76	78	53	41	43	89
pentl_oxid	30	9	9	5	13	23	16	7
pirita	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
sulfetos_FeCoNi	3	1	1	<1	2	9	2	<1
ortopiroxênio	<1	2	4	4	2	1	2	4
olivina	12	9	7	9	2	2	12	<1
serpentina	11	7	4	3	27	25	24	<1
espinelio-Cr	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Pentl + Pentl. Ox.	74	81	85	83	66	64	59	95
Silicatos	23	18	14	16	31	27	38	4

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier. FeCoNiS = Sulfeto de níquel cobalto e ferro

As amostras possuem cerca de 60-80% do total de Ni contido na forma de pentlandita+pentlandita oxidada. A amostra OPS possui a maior parcela do Ni presente na forma de pentlandita oxidada e a amostra Out a menor. O conteúdo de Ni na forma de pentlandita oxidada é uma parcela do Ni que não necessariamente é passível de ser recuperado. É necessária uma avaliação do potencial de recuperação das partículas quando estas apresentam variados conteúdos de pentlandita oxidada.

Figura 44 - Estimativa da distribuição de Ni (%) – total +0,020 mm

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier. FeCoNiS = Sulfeto de níquel cobalto e ferro

Já grande parte do conteúdo de Ni associado aos silicatos (olivina e piroxênios) não é passível de ser recuperado. As amostras Ganga A, B e C, destacam-se das demais por possuir aproximadamente 25% do conteúdo de Ni associado à serpentina.

A Tabela 29 e a Figura 45 apresentam a distribuição de Cu dentre as fases portadoras desse elemento por amostra; praticamente todo Cu está presente na forma de calcopirita.

Tabela 29 – Estimativa da distribuição de Cu (%)

Mineral	OPS	POS	PO	P	Ganga A	Ganga B	Ganga C	Out
calcopirita	100	99	99	96	100	100	96	98
calcossita-covellita		1	1	4			4	2

Figura 45 - Estimativa da distribuição de Cu (%)

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

4.2.4 Sumário dos resultados

A Tabela 30 traz o sumário dos resultados relativo as amostras estudadas.

Tabela 30 – Sumários dos resultados de caracterização mineralógica de detalhe

	OPS	POS	PO	P	Out	Ganga A	Ganga B	Ganga C
Teores (%)								
Ni	0,88	0,57	0,47	0,44	0,49	0,42	0,51	0,35
Ni _{Sulf} *	0,67	0,47	0,40	0,37	0,47	0,29	0,37	0,21
Cu	0,19	0,11	0,11	0,09	0,12	0,06	0,10	0,04
Fe	9,86	9,18	9,25	9,37	8,25	7,21	7,22	8,17
S	1,20	0,93	0,86	0,67	1,06	0,52	0,67	0,38
SiO ₂	34,6	43,8	47,6	49,1	51,3	38,5	31,2	46,8
MgO	34,0	29,3	27,2	27,2	26,4	28,5	27,9	22,9
Granulometria (% massa)								
Fração (mm)								
+0,105	20,0	20,1	21,6	25,6	26,8	13,8	16,0	16,2
-0,105+0,053	29,3	31,9	32,3	33,3	31,9	24,1	23,0	33,2
-0,053+0,020	21,6	24,8	22,0	23,4	23,7	21,9	22,0	25,4
-0,020	29,1	23,2	24,1	17,7	17,6	40,2	39,0	25,2
Tempo de moagem (min) para P₉₅ = 0,15 mm	4	12	12	16	16	4	4	8
Comp. mineralógica								
olivina	37,8	18,5	9,99	8,78	0,14	2,58	3,11	11,8
serpentina	37,8	16,1	3,88	5,03	0,30	36,8	42,2	24,2
ortopiroxênio	6,49	49,5	72,6	69,7	85,7	38,7	13,2	27,2
clinopiroxênio	1,77	3,86	6,11	5,45	7,18	0,67	1,00	1,06
outros silicatos	0,78	1,78	2,20	1,76	2,56	3,44	8,16	19,8
espinélio-Cr	3,38	1,47	0,78	1,34	0,27	1,30	3,92	1,09
óxido-Fe	2,14	0,39	0,34	0,47	0,56	0,24	1,45	0,71
mica	0,25	1,24	0,30	0,35	0,23	6,88	0,11	8,33
carbonatos	3,11	1,72	0,37	0,54	0,08	4,87	22,2	1,55
Total de sulfetos	4,2	2,8	1,5	1,9	2,3	1,8	2,7	1,2
Sulfetos de Ni								
Pentlandita (ptl)	1,67	1,37	0,80	0,90	1,18	0,68	0,69	0,48
pentl_oxid	1,71	0,31	0,10	0,20	0,18	0,30	0,64	0,26
pentl+pentl oxid.	3,38	1,67	0,90	1,10	1,36	0,97	1,33	0,74
relação ptl/ptl ox.	0,98	4,42	8,00	4,50	6,56	2,27	1,08	1,85
Distribuição. Ni (%)								
pentlandita	43	72	76	78	89	53	41	43
pentlandita oxidada	30	9	9	5	7	13	23	16
sulfetos_FeCoNi	3	1	1	<1	<1	2	9	2
olivina	12	9	7	9	<1	2	2	12
serpentina	11	7	4	3	<1	27	25	24
ortopiroxênio	<1	2	4	4	4	2	1	2
outros	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
pentl + pentl. oxidada	74	81	85	83	95	66	64	59
Sulfetos	76	82	86	83	96	68	73	61
Silicatos	23	18	14	16	4	31	27	38
Assoc. minerais								
Pentl+Pentl oxidada								
Livre (%)	22	46	43	48	46	19	16	28
Mista em binárias (%)	40	30	41	30	42	28	38	36
Mista ≥ 3 (%)	38	24	16	22	12	53	46	36
Sulfetos								
Livre (%)	29	50	57	54	61	24	28	37
Mistos em binárias (%)	39	34	30	33	32	42	36	36
Mistos ≥ 3 (%)	33	16	13	13	7	33	36	27
Diâmetro grãos (EED)								
Pentl+Pentl oxid.								
d10	4	7	7	9	7	3	4	4
d50	30	25	25	28	20	15	23	22
d90	70	70	58	75	50	40	52	49
Sulfetos								
d10	4	10	9	10	9	4	4	4
d50	31	30	29	30	22	22	21	23
d90	70	75	60	80	52	70	60	70
% sulfetos < 10µm	17	10	10	10	10	20	20	19

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier. * % Ni presente na forma de sulfetos calculado a partir da distribuição do níquel por MEV-MLA.

5 DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS

5.1 Em relação aos resultados obtidos nesse estudo

No caso da mina Santa Rita, a difratometria de raios X (DRX), associada à análise estatística multivariada (AEM) dos difratogramas DRX-AEM, permitiu segmentar mineralogicamente a área relativa ao plano de lavra de 2013-2017 inicialmente em 17 domínios mineralógicos com diferenças no conteúdo dos principais minerais: serpentina, olivina e piroxênio, além das regiões de minério ricas em gangas micáceas, feldspáticas e carbonáticas.

Com base em semelhanças mineralógicas, critérios químicos, e disponibilidade, oito amostras foram objeto de estudos detalhados de caracterização, sendo:

- OPS: como representante dos domínios onde há uma composição harzburgítica (peridotito/serpentinó) com elevado teor de serpentina;
- POS: como representante dos grupos de composição harzburgítica (peridotito/serpentinó), porém em uma transição para uma composição mais piroxenítica, com conteúdo expressivo de serpentina;
- PO: como representante somente do grupo 3 (DRX-AEM), com composição piroxenítica, presença de olivina e com pouca serpentina; destaca-se que um número expressivo de amostras foi agrupado nesse conjunto (137 amostras das 319 totais - 43%) de forma que se optou por distingui-lo como uma amostra separada para estudo;
- P: como representante dos domínios com composição piroxenítica, com a baixa presença de olivina e com pouca serpentina;
- Ganga A: como representante das amostras de minério associados a uma ganga carbonática (grupo 12) e alto conteúdo de serpentina e mica;
- Ganga B: como representante das amostras de minério associados a uma ganga carbonática;
- Ganga C: como representante das amostras de minério associados a uma ganga com alto teor de feldspato e mica;

- Out: como representante das amostras que não foram agrupadas em nenhum grupo. Porém, o Grupo 17 dos *outliers*, possui membros com composições mineralógicas muito heterogêneas. A amostra Out refere-se somente à uma amostra (RC_100_0073 PCT 1016204), que basicamente configura-se mineralogicamente como representante do litotipo ortopiroxenito.

Os resultados gerados na segunda etapa do estudo (caracterização mineralógica de detalhe) propiciaram um melhor entendimento das características de cada amostra estudada. Assim, considerando-se novamente os domínios geometalúrgicos da Mina Santa Rita (Mirabela, op. cit.), pode-se relacionar os domínios geometalúrgicos pré-definidos com as amostras estudadas como: peridotitos (Harzburgito - H) → amostras OPS e POS; olivina ortopiroxenito (O) → com as amostras PO e P; ortopiroxenito (P) → amostra Out. O minério com a presença de gangas micáceas, carbonáticas e feldspáticas (Gangas A, B e C, respectivamente) não possuem domínios geometalúrgicos definidos por Mirabela (op. cit.).

Em relação a química das amostras, pode-se separar as amostras em dois grupos mais a amostra Out:

- A. OPS, POS, PO e P, com os teores de Ni, Cu, S, MgO decrescendo do OPS para o P com o aumento do teor de SiO₂ no sentido inverso – do P para OPS;
- B. Ganga A, B e C não possuem nenhuma tendência de aumento ou diminuição de teores entre si, mas quando comparadas ao primeiro grupo, pode-se dizer que elas possuem teores menores de Fe e S.

A amostra Out possui teores similares ao primeiro grupo acima citado, porém com maior conteúdo de SiO₂.

Em relação ao tempo de moagem para obtenção de produtos com *topsizes* com P₉₅ abaixo de 0,15 mm verificou-se marcantes diferenças em relação ao comportamento das amostras no procedimento de moagem empregado por meio de moinho planetário. As amostras OPS, Ganga A e B necessitaram apenas de um ciclo de 4 minutos; a Ganga C necessitaram de 2 ciclos em um total de 8 minutos; já as amostras POS e PO empregou-se três ciclos de moagem, totalizando 12 minutos e as

amostras Out e P possuem a maior resistência a moagem, necessitando de 16 minutos (4 ciclos).

Em relação à distribuição em massa e de níquel, destaca-se que aproximadamente de 40-50% do níquel contido nas amostras está contido no intervalo $-0,105+0,020$ mm. A distribuição do níquel entre as amostras varia no intervalo acima de 0,105 mm e abaixo de 0,020 mm. As amostras PO e OPS possuem, respectivamente, 23% e 19% do níquel acima de 0,105 mm, enquanto as Gangas A e B contém 46% e 41% do níquel abaixo de 0,020 mm.

Mineralogicamente, no grupo “A” a amostra OPS possui o maior conteúdo de pentlandita, pentlandita oxidada e sulfetos, corroborando com seus maiores teores de Ni, Cu e S, quando comparada com as demais; há uma diminuição nos teores de olivina, serpentina e sulfetos da amostra OPS para as amostras POS, PO e P;. No grupo “B” a amostra Ganga B destaca-se pelo alto conteúdo de carbonatos (22%), enquanto a amostra Ganga A e B pela alta nos teores de mica e outros silicatos (predominantemente feldspatos). A amostra Out possui o maior conteúdo de piroxênios, aliada a traços de olivina e serpentina ($< 0,5\%$).

A avaliação do conteúdo da pentlandita oxidada nas amostras estudadas mostra que há um aumento relativo dessa fase nas amostras OPS e nas Gangas A, B e C, em relação as demais amostras.

Os estudos das associações minerais mostraram que em todas amostras a porcentagem em massa de partículas livres de pentlandita + pentlandita oxidada não ultrapassa 50% para as condições de moagem empregadas. As amostras OPS, Ganga A, B e C apresentam a porcentagem de partículas livres variando de 19-28% estando as partículas mistas associadas predominantemente à serpentina. As amostras POS, PO, P e Out possuem a porcentagem de partículas livres variando de 43-48% estando as mistas associadas predominantemente a ortopiroxênio.

Em relação à distribuição (partição) do níquel, se verifica que as amostras possuem cerca de 60-95% do total de Ni contido na forma de pentlandita+pentlandita oxidada e havendo um aumento da parcela de níquel em silicatos para as amostras OPS, Gangas A, B e C em relação as demais amostras (de 25 a 40% do Ni contido).

As curvas de distribuição granulométrica dos sulfetos são similares para as amostras OPS, POS, PO, P e Out. Abaixo de $20\mu\text{m}$, o OPS apresenta-se mais fino em relação as demais amostras. Acima desse valor, o Out possui uma granulação mais grossa para os sulfetos. A Ganga A, B e C possuem curvas semelhantes.

Em relação ao processamento mineral, pode-se pontuar algumas características avaliadas nas amostras estudadas na 2ª etapa que podem ter influência na etapa de processamento mineral:

- **alteração da pentlandita:** pode diminuir significativamente a flotabilidade da pentlandita, pela presença de violarita e óxidos de ferro (pentlandita oxidada) intercrescidos, mais marcadamente nos litotipos de composição mais peridotítica e quando da presença de carbonatos.
- **distribuição granulométrica de sulfetos:** particularmente de partículas com dimensões inferiores a 10 μm , acarretando também em perdas de recuperação dada a menor seletividade de flotação da pentlandita para partículas nesta faixa de tamanho.
- **distribuição do níquel nos silicatos:** uma vez que o beneficiamento da mina Santa Rita concentra unicamente sulfetos; a parcela de Ni em silicatos não é passível de ser recuperada.
- **liberação e associações da pentlandita e dos sulfetos:** partículas mistas possuem menor potencial de recuperação na flotação e se flotadas podem deduzir o teor de sulfetos no concentrado final e carrear elementos indesejáveis ao concentrado, a depender de suas associações minerais.

Assim, observa-se que amostras OPS, Ganga A, B e C apresentaram maior grau de alteração da pentlandita; maior quantidade de sulfetos abaixo de 10 μm (cerca de 50% superior as outras amostras); maior conteúdo de níquel associado a silicatos; e menor porcentagem de partículas livres de sulfetos e de pentlandita em relação às demais.

Com os dados sumarizados (Tabela 30), observou-se

- uma relação entre a porcentagem de partículas livres de pentlandita + pentlandita oxidada e o conteúdo de serpentina nos domínios mineralógicos estudados, como mostra o gráfico da Figura 46;
- uma relação entre o tempo de moagem para $P_{95} = 0,15 \text{ mm}$ pela porcentagem de pentlandita + pentlandita oxidada livres (Figura 48).

Figura 46 – Gráfico mostrando a relação entre a porcentagem de serpentina vs. liberação da pentlandita + pentlandita oxidada

Figura 47 – Gráfico mostrando a relação entre o tempo de moagem para $P_{95} = 0,15$ mm vs. liberação da pentlandita + pentlandita oxidada

A relação observada na Figura 46 pode indicar que eventos geológicos posteriores ao magmatismo alteraram as feições texturais da pentlandita. Porém é preciso buscar o melhor entendimento ou causa da relação observada entre conteúdo de serpentina e o grau de liberação de pentlandita + pentlandita oxidada.

Já a relação entre o tempo de moagem para atingir $P_{95} = 0,15$ mm e a porcentagem de partículas livres de pentlandita+pentlandita oxidada indica que as amostras OPS, Ganga A, B e C possuem maior facilidade de moagem, porém menor grau de liberação. Assim, é preciso estudar melhor as relações entre as características

do material que influenciarão na etapa de moagem e, principalmente, quais serão as características da pentlandita após esta etapa: *é possível atingir uma maior liberação da pentlandita sem a geração excessiva de finos?*

Não foi possível estabelecer nenhuma outra relação linear entre as características mineralógicas analisadas e os teores dosados de forma satisfatória ($R^2 > 0,85$ e significado físico), muito embora algumas tendências tenham sido observadas.

5.2 Em relação aos métodos empregados nesse estudo

Uma das grandes vantagens da difratometria de raios X (DRX), associada à análise estatística multivariada (AEM) dos difratogramas, é que um número elevado de amostras pode ser analisado sem a necessidade de interpretação de todos os difratogramas. Das 319 amostras (264 amostras da exploração e 55 amostras de pó de perfuratriz) foram interpretadas somente aquelas classificadas como mais representativas da composição média de cada grupo (um total de 17 difratogramas). Isto, aliado à visualização dos dados no gráfico 3D por análise de componente principal (PCA) e do dendrograma, permite uma avaliação da similaridade entre as amostras e do agrupamento definido.

Considerando-se os domínios geometalúrgicos da Mina Santa Rita, definidos por Mirabela (2007), com base na classificação de rochas ultramáficas da IUGS (*International Union of Geological Sciences*), pode-se observar que não são contempladas rochas de composição intermediária entre os membros compostos por olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio. Por exemplo, uma rocha classificada como um harzburgito, pode possuir de 41 a 89 % de olivina em sua composição.

Outro problema encontrado na classificação de Mirabela (op. cit.) refere-se à não observância de possíveis alterações (serpentinização) das rochas. Apesar deste estudo caracterizar petrograficamente cada litotipo, observando a serpentinização nos dunitos e harzburgitos, este parâmetro não foi considerado de forma relativa (não foram estabelecidos critérios para mensurar o grau de serpentinização).

Somado ao referido acima, a classificação dos domínios mineralógicos da Mina de Santa Rita foi inicialmente baseada na classificação visual das rochas em testemunhos de sondagem e no mapeamento da mina. Obviamente, esta classificação depende da área exposta para análise e é suscetível a vieses

interpretativos. Adiciona-se que a dificuldade de se determinar visualmente a proporção de minerais não apresenta a sensibilidade necessária quanto a avaliação dos conteúdos relativos de olivina, serpentina, ortopiroxênio e clinopiroxênio para a classificação litológica das rochas do depósito e que a presença de minerais acessórios, particularmente carbonatos, pode ser relevante frente ao comportamento na etapa de concentração.

A difratometria de raios X (DRX), associada à análise estatística multivariada (AEM) dos difratogramas, pode ser utilizada como uma fonte de informação da variabilidade mineralógica do depósito, segmentando este em porções ou grupos onde a composição mineralógica das amostras é semelhante. Esta abordagem pode ser utilizada como fonte de dados mineralógicos para o modelo geometalúrgico da mina e possui a sensibilidade necessária para detectar variações mineralógicas de um depósito composto por rochas ultramáficas peridotíticas e piroxeníticas.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados desse estudo é possível concluir que a região do depósito relativa ao planejamento de lavra do período 2013-2017 pode ser inicialmente classificada em 17 domínios mineralógicos com base no conteúdo dos principais minerais de ganga (serpentina, olivina, piroxênio), além da presença de gangas micáceas, feldspáticas e carbonáticas.

Estudos mineralógicos de detalhe dos principais domínios mineralógicos indicam que os grupos com composições mais peridotíticas e/ou carbonáticas, com maiores conteúdos de serpentina, apresentam menor tempo de moagem para atingir P_{95} igual a 0,15 mm, maior alteração dos grãos de pentlandita, maior parcela de total de níquel associado a silicatos, menor grau de liberação dos sulfetos e maior quantidade de sulfetos abaixo de 10 μm , em relação aos grupos de composição mais piroxenítica.

7 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados desse estudo pode se elencar como sugestões de trabalhos futuros:

- 1) complementar os estudos de caracterização de detalhe de amostras representativas dos 17 domínios mineralógicos inicialmente definidos, e reavaliar a classificação de DRX-AEM;
- 2) dentre os domínios mais importantes, realizar teste de variabilidade das características químicas e mineralógicas (mineralogia modal, associações, texturas de alteração e partição dos elementos de interesse) nas amostras pertencentes a um mesmo grupo definido por DRX-AEM;
- 3) realizar testes em escala de bancada ou em planta piloto de cada domínio mineralógico para se avaliar comportamentos diferenciais frente ao processamento mineral e, posteriormente, reclassificá-los como tipos de minério / domínios geometalúrgicos.
- 4) avaliar as relações entre desempenho de processo com as características dos tipos de minério / domínios geometalúrgicos (item 3 acima).
- 5) avaliar a existência de possíveis controles geológicos relacionados às feições texturais da pentlandita (alteração e tamanho de grãos) e buscar o entendimento ou causa da relação observada entre conteúdo de serpentina e o grau de liberação de pentlandita + pentlandita oxidada.
- 6) avaliar eventual controle geológico de materiais com presença de carbonatos (controle tectônico/estrutural relacionado ao metamorfismo?)
- 7) definir outros parâmetros físicos do minério, como índice de moabilidade e quantidade de finos gerados e procurar associar estes parâmetros, somados às características mineralógicas e de associações minerais, com o desempenho em ensaios de flotação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIASSI, J. L. **A Difração de Raios x com o Método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas**. 2010. 111 p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ANTONIASSI, J. L.; KAHN, H.; ULSEN, C.; TASSINARI, M. M. M. L. Prediction of mineral processing behavior of bauxite ores by XRD cluster analysis. In: **10th ICAM - International Congress for Applied Mineralogy**, Trondheim: 10th ICAM Proceedings, 2011. p. 9-16.

BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P.; MARINHO, M.M. O Cráton de São Francisco na Bahia: uma síntese. **Rev. Bras. Geoc.**, n. 33 (1). p. 3-6, 2003.

BARBOSA, J.S.F.; SABATÉ, P. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, Holanda, n. 133, p. 1-47, 2004.

BARNES, S. J.; OSBORNE, G. A.; COOK, D.; BARNES, L.; MAIER, W. D.; GODEL, B. The Santa Rita Nickel Sulfide Deposit in the Fazenda Mirabela Intrusion, Bahia, Brazil: Geology, Sulfide Geochemistry, and Genesis. **Economic Geology**, v. 106, p. 1083-1110. 2011.

BITTENCOURT, H. R.; VIALI, L. Contribuições para o ensino da distribuição normal ou curva de Gauss em cursos de graduação. In: **III Seminário Internacional de Pesquisa em Educação Matemática**, Brasil, São Paulo, Águas de Lindóia, 11-14 de outubro, 2006. p.1-16.

BATTERHAM, R.J.; GRANT, R.M.; MOODIE, J.P. 1992. A perspective on Process mineralogy and Mineral processing. In: **First International Conference on Modern Process Mineralogy and Mineral Processing**, Beijing: Proceedings, 1992. p. 3-12.

COOLEY, W. W.; LOHNES, P. R. **Multivariate data analysis**. New York : J. Wiley and Sons Inc., 1971. 364 p.

CORNWALL, H. R. **Nickel deposit of north america**. Washington: U.S. Geological Survey bulletin 1223, 1966. 62 p.

COWARD, S.; VANN, J.; DUNHAM, S.; STEWART, M. The primary-response framework for geometallurgical variables. In: **Seventh International Mining Geology Conference**, Perth, 2009. p. 109-113.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**. New York: Addison-Wesley publishing company Inc, 1978. 514 p.

CUNHA, J. C. & FERREIRA, R. J.B. Complexo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela (CFM): Geologia e mineralização. In: **CONGR. BRAS. GEOL.**, 37, São Paulo, Bol. Res. Exp., SBG/SP, v. 2, 1992. p.158-159.

DOBBY, G.; BENNETT, C.; BULLED, D.; KOSICK, X. Geometallurgical modelling – The new approach to plant design and production forecasting/planning, and Mine/Mill Optimization. In: **36th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors**, Ottawa, 2004, paper No.15.

DUNHAM, S.; VANN, J. Geometallurgy, geostatistics and project value – Does your block model tell you what you need to know?, In: **Project Evaluation 2007**, Melbourne, 2007. p 189-196.

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Cluster analysis**. New York: John Wiley, Probability and Statistics, 2010. 346 p.

FANDRICH R., GU Y., BURROWS D., MOELLER K. 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. **Int. J. Miner. Process**, n. 84, p. 310–320, 2007.

FRÓES, R.J.B. **Petrology, geochemistry and Cu-Ni-PGE Mineralisation of the Fazenda Mirabela Complex, State of Bahia, Brazil**. 1993. Dissertação (mestrado não publicado), Universidade de Toronto, Toronto, 1993.

FULTZ, B., HOWE, J. **Transmission electron microscopy and diffractometry of materials**. Berlin: Springer, 2007. 758 p.

GOONAN, T.G. Nickel recycling in the United States in 2004, In: SIBLEY, S.F.(ed.), **Flow studies for recycling metal commodities in the United States**: U.S. Geological Survey Circular 1195, 2009. 100 p.

GOTTLIEB, P.; WILKIE, G.; SUTHERLAND, D.; HO-TUN, E.; SUTHERS, S.; PERERA, K.; JENKINS, B.; SPENCER, S.; BUTCHER, A.; RAYNER, J. Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineral Applications. **JoM**, v. 52(4), p. 24-25. 2000.

GU, Y. Automated scanning electron microscope based liberation analysis. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 2, p. 33-41, 2003.

JENKINS, R. SNYDER, R.L. **Introduction to x-ray powder diffractometry**. New York: John Wiley, Chemical Analysis, v. 138, 1969. 403 p.

JONES M. **Applied Mineralogy, a quantitative approach**. London: Graham and Trotman, 1987. 259p.

KAHN H., D'AGOSTINO L.Z., BRUMATTI M., TASSINARI M.M.M.L., ULIANA, D., ULSEN, C. Mineralogia quantitativa através de análise de imagens automatizada conjugada a MEV/EDS: Estudos de caso aplicados a minérios de fosfato e ouro. In: **44º Congresso Brasileiro de Geologia**, Curitiba, PR. Anais, 2008. p. 669-675.

KAHN H., MANO E.S., TASSINARI M.M.M.L. Image analysis coupled with a SEM-EDS applied to the characterization of a partially weathered Zn-Pb ore. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 1, n.1, p 1-9, 2002.

KÖNIG, U.; GOBBO, L. Modern X-Ray Diffraction Techniques as a Fast Industrial Analysis Method for Iron Ores – From Exploration to Process Control. In: **Iron Ore Conference**, Perth, Austrália, 27-29 Julho, 2009. p. 121-128.

LAMBERG, P. Particles – the bridge between geology and metallurgy. In: **Conference in Mineral Engineering**, Proceedings, Luleå, Suécia, 8–9 Fevereiro, 2011. p. 1–16.

LAZARIN, F. A. **Geologia, petrologia e estudos isotópicos dos depósitos de níquel-cobre sulfetados santa rita e peri-peri**. 2011. 191 p. Dissertação (mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

LONDON METAL EXCHANGE, 2013. Disponível em: <http://www.lme.com/metals/non-ferrous/nickel/#tab2>>. Acesso em: 22 de novembro de 2016.

LUND, L; LAMBERG, P. Geometallurgy – A tool for better resource efficiency. **European geologist magazine**, v. 37, p 39-43. 2014.

MACCHIAROLA K., KOENIG U., GOBBO L., CAMPBELL I., Mc'DONALD A.M., CIRELLI J. 2007. Modern X-ray Diffraction Techniques for Exploration and Analysis of Ore Bodies. In :**7th Int. Conference on Mineral Exploration**, Ottawa. Unpublished.

MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods: a primer**. New York: CRC Press, 1994. 224 p.

MIRABELA. **Bank Feasibility Study**. Austrália: Mirabela Nickel Ltda., 2007 (não publicado).

MIRABELA. <http://www.mirabela.com.au>. Visitado em 17/01/2015.

MOITA NETO J. M., MOITA G.C. **Uma Introdução à Análise Exploratória de Dados Multivariados**. São Paulo: Química Nova, 1998. 469 p.

NEUMAN R., SCHNEIDER C.L., NETO A.A. Caracterização tecnológica de minérios. In: Luz A.B., Sampaio J.A., Almeida S.L.M. **Tratamento de Minérios**, Rio de Janeiro -CETEM, 2004. p. 55-109.

NIIRANEN, K.; BÖHM, A. A systematic characterization of the ore body for mineral processing at Kiirunavaara iron ore mine operated by LKAB, Northern Sweden. In: **XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC)**, New Delhi, India. 2012, p. 3855-3864.

PANALYTICAL. **User Manual X'Pert Highscore Plus**. Netherlands: Panalytical Inc., 2008 (não publicado).

PETRUK, W. **Short course on image analysis applied to mineral and earth sciences**. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 1989. 268 p.

PETRUK, W. **Applied mineralogy in the mining industry**. Ottawa: Elsevier, 2000. 268 p.

PURVIS, A.C. **Mineralogical Report No. 8815 for Mirabela Nickel Limited**. Pontifex and Associates, 2005 (não publicado).

PURVIS, A.C. **Mineralogical Report No. 8907 for Mirabela Nickel Limited**. Pontifex and Associates, 2006 (não publicado).

REYNOLDS JR., R.C. Principles of powder diffraction. In: BISH, D.L; POST, J.E. (Ed.). **Modern powder diffraction**. Washington: Mineralogy Society of America, Reviews in Mineralogy, v. 20, 1989. p. 19-43.

ROBB, L. **Introduction to ore-forming processes**. Oxford: Blackwell publishing, 2005. 373p.

SANT'AGOSTINO L.M., KAHN H. Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. BT/PMI/069, 1997. p. 29.

SANTOS JÚNIOR, L. T., DELBONI JÚNIOR, H. Modelling and simulation of the Santa Rita mine milling circuit. **Rem: Rev. Esc. Minas**, v. 69, n. 2, p. 207-201, 2016.

SHIMIZU, V. K.; KAHN, H.; ANTONIASSI, J. L.; ULSEN, C. Copper ore type definition from Sossego mine using x-ray diffraction and cluster analysis technique. **REM. Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 561-566, 2012.

SUTHERLAND D.N., GOTTLIEB P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. **Minerals Engineering**, v. 4, n.7-11, p.753-762, 1991.

USGS - United States Geological Survey, 2016. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/> Acesso em: 22 de novembro de 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

APÊNDICE 2 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

APÊNDICE 3 – Difratogramas médios dos domínios mineralógicos

APÊNDICE 4 – Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz

APÊNDICE 5 – Composição químicas dos minerais (base para banco de dados MLA)

APÊNDICE 6 – Resultados MLA

APÊNDICE 7 – Composição química calculada por fração a partir do MLA (% em massa)

APÊNDICE 8 – Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 48 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 1 (total de 8 amostras)

Figura 49 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 2 (total de 10 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 50 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 3 (total de 122 amostras)

Figura 51 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 4 (total de 2 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 52 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 5 (total de 20 amostras)

Figura 53 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 6 (total de 33 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 54 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 7 (total de 3 amostras)

Figura 55 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 8 (total de 40 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 56 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 9 (total de 6 amostras)

Figura 57 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 10 (total de 10 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 58 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 11 (total de 32 amostras)

Figura 59 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 12 (total de 2 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 60 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 13 (total de 6 amostras)

Figura 61 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 14 (total de 5 amostras)

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 62 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 15 (total de 4 amostras)

Figura 63 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 16 (total de 11 amostras).

APÊNDICE 1

Comparativo entre os difratogramas dispostos em cada grupo

Figura 64 - Comparativo entre os difratogramas das amostras do grupo 17 (total de 5 amostras diferentes entre si)

APÊNDICE 2

Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

Tabela 31 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PCA

ID	GRUPO	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
MBS-150 357164-357168	1	-9,88	25,60	0,73	4,33	1,25	1,03	-3,44	0,26	-0,14	0,46
MBS-199 366898-366903	1	-5,43	20,70	1,61	-0,22	0,86	0,77	-1,63	2,44	-0,50	-0,06
MBS-199 366909-366913	1	-8,03	24,64	0,13	-0,51	-0,12	-0,44	-2,61	1,72	-0,01	-0,83
MBS-204 367846-367851	1	-5,49	2,56	14,67	1,08	1,04	-0,19	-2,72	-2,25	1,28	2,64
MBS-204 367857-367861	1	-10,70	-0,92	10,34	3,34	-1,42	-1,09	0,09	-2,80	0,64	-1,82
MBS-204 367862-367866	1	-16,67	-11,53	4,14	2,26	-1,16	-2,69	-1,50	-2,95	0,86	0,10
MBS-204 367914-367918	1	14,40	-2,45	-2,80	-4,20	-1,62	-0,10	1,81	0,27	2,50	2,36
MBS-587 626406-626410	1	-13,44	-6,53	-4,02	-4,23	-2,14	0,40	-3,60	-0,51	0,11	0,83
MBS-134 354126-354129	2	-10,92	5,99	-1,35	2,28	-3,71	4,55	-4,75	-0,52	1,84	0,46
MBS-165 360175-360179	2	-15,45	9,76	2,82	5,60	-0,78	1,20	1,86	0,04	-1,21	-1,27
MBS-196 366145-366151	2	-9,59	6,76	-4,63	1,31	0,79	1,78	-2,19	-2,05	2,15	-2,22
MBS-249 376488-376492	2	14,87	0,40	-2,72	-5,08	-2,59	-1,59	1,33	1,83	1,85	1,16
MBS-278 381230-381234	2	13,54	-3,40	-4,12	-4,59	-1,21	-0,54	1,69	-0,02	3,51	1,47
MBS-278 381238-381243	2	0,09	-13,50	-1,98	-2,89	0,89	-0,05	2,00	-2,25	1,88	2,11
MBS-288 384073-384075	2	0,48	10,47	2,76	-2,15	1,09	1,49	-2,58	2,85	-3,38	0,74
MBS-288 384086-384088	2	3,92	8,01	2,59	-3,23	-1,03	1,64	-2,51	3,08	-2,31	0,39
MBS-318 388513-388518	2	-15,32	27,36	4,99	-3,03	1,70	3,89	-0,74	0,64	-1,39	-1,32
MBS-601 608886-608891	2	10,56	0,92	-1,05	0,39	-0,34	0,13	-0,20	-0,47	-2,09	-1,61
MBS-155 358454-358459	3	7,32	-0,88	-2,28	2,20	0,64	-0,76	-0,23	-0,04	0,97	0,71
MBS-275 381313-381317	3	14,01	-4,35	2,19	0,06	-2,85	-1,67	0,18	1,28	-0,83	1,30
MBS-275 381334-381338	3	15,65	-6,30	1,49	0,66	-1,99	-1,68	1,94	0,82	-0,77	0,04
MBS-275 381339-381343	3	15,18	-6,73	2,11	-0,22	-2,57	-1,41	1,51	0,81	-0,74	0,49
MBS-275 381344-381348	3	14,28	-9,86	4,54	-0,82	-1,75	0,88	2,88	0,48	-0,95	-0,27
MBS-275 381349-381354	3	11,87	-4,23	4,17	-0,19	-1,36	1,07	2,48	0,46	-0,90	-0,05
MBS-275 381355-381359	3	7,27	5,08	0,90	0,27	2,34	-1,56	2,88	1,53	-1,33	0,79
MBS-275 381360-381364	3	10,61	-2,15	1,46	0,05	-1,15	-1,00	1,54	1,09	-0,54	0,77
MBS-275 381365-381368	3	13,56	-10,43	1,11	0,62	-2,15	-0,40	1,20	0,40	0,30	0,47
MBS-345 360665-390668	3	11,42	-1,08	0,93	0,84	0,37	-2,05	1,86	0,92	-1,50	0,06
MBS-345 360669-390675	3	4,54	-4,63	8,22	1,47	0,85	4,30	2,13	0,85	-1,35	-0,03
MBS-123 352212-352216	3	9,54	2,33	1,17	2,61	-1,18	-1,93	-0,80	-0,02	0,12	-0,17
MBS-123 352217-352222	3	11,28	-2,39	2,49	1,88	3,22	0,59	2,54	0,35	-1,24	-0,36
MBS-123 352223-352228	3	14,52	-13,38	3,46	0,61	-1,59	0,03	2,17	-0,29	-0,45	-1,23
MBS-123 352229-352233	3	9,34	-1,40	2,16	2,09	1,63	0,20	2,46	-0,14	-0,75	-1,15
MBS-415 400526-400530	3	9,22	5,34	0,49	2,02	2,35	-1,39	0,98	0,69	-0,73	0,43
MBS-415 400531-400535	3	6,89	3,88	1,19	2,54	-3,37	-0,37	-2,61	0,79	0,20	0,34
MBS-415 400536-400540	3	11,31	-3,03	2,53	1,52	-4,37	-0,51	-0,93	0,29	0,16	-0,20
MBS-415 400541-400545	3	5,77	-3,28	5,12	1,20	0,78	2,88	2,98	0,09	-1,25	-1,30
MBS-415 400546-400551	3	8,88	-0,92	2,49	1,28	1,15	0,59	1,78	0,50	-0,88	-1,03
MBS-415 400552-400556	3	9,10	-3,76	4,63	-0,86	2,14	1,44	3,02	-0,08	-1,20	-1,11
MBS-415 400557-400560	3	13,00	-1,56	0,63	0,74	0,16	-2,76	0,91	0,82	-0,42	1,24
MBS-415 400561-400564	3	6,32	-0,80	-2,55	2,81	0,95	-0,06	0,07	-0,64	1,28	-0,13
MBS-415 400565-400568	3	13,73	-4,15	0,58	2,23	-1,36	-1,28	-0,75	0,03	0,87	0,94
MBS-141 355197-355202	3	11,49	-6,44	3,15	2,80	1,43	1,43	1,37	-0,18	-0,03	0,26
MBS-141 355103-355207	3	17,76	-6,85	1,71	1,92	-1,09	-1,33	-0,65	0,10	0,44	0,14
MBS-141 355108-355212	3	7,06	6,17	0,08	3,88	3,26	-1,59	0,86	-1,03	0,14	-0,54
MBS-141 355113-355217	3	15,51	-5,69	2,31	0,96	-2,84	-1,47	-1,43	-0,28	0,73	-0,48
MBS-141 355224-355228	3	9,09	-2,36	1,46	3,30	-2,17	0,69	-2,38	-0,08	0,67	0,47
MBS-146 356273-356277	3	18,34	-5,67	1,95	0,22	-0,68	-1,82	-0,43	-0,26	0,97	-0,36
MBS-146 356283-356287	3	8,21	7,35	-0,44	1,66	0,84	-2,26	-0,19	-1,29	1,51	-1,26
MBS-146 356288-356292	3	9,58	6,70	-1,00	3,03	2,60	-2,58	-0,91	-0,36	0,81	-1,00
MBS-146 356293-356297	3	11,43	1,51	1,64	2,98	-0,12	-1,04	-2,13	0,69	-0,28	-0,24
MBS-146 356298-356303	3	11,86	4,97	-1,97	1,16	2,71	-2,85	0,76	-0,81	1,37	-1,87
MBS-146 356304-356308	3	14,53	-5,18	2,87	1,81	-2,20	-0,31	-1,91	-0,14	0,51	-0,46
MBS-146 356309-356312	3	14,03	-1,10	0,87	2,44	0,50	-1,10	-1,96	0,66	0,52	-0,35
MBS-146 356313-356315	3	14,84	-2,58	2,14	2,48	-0,03	-1,48	-0,88	0,28	-0,04	0,03
MBS-150 357148-357153	3	8,84	4,99	0,79	1,72	4,23	-1,88	-0,17	0,84	-0,50	1,00
MBS-150 357154-357158	3	17,82	-8,45	3,60	0,87	0,06	-0,63	-1,43	0,78	-0,26	0,69
MBS-150 357159-357163	3	7,29	6,93	1,17	2,84	2,94	-1,42	-0,88	0,43	-1,07	0,43
MBS-150 357169-357174	3	8,29	5,16	2,04	1,58	0,58	-1,63	-1,32	0,54	-0,49	0,29
MBS-150 357180-357184	3	10,95	1,52	1,77	1,89	1,80	-0,55	-0,61	0,96	-0,75	0,49
MBS-150 357185-357189	3	6,89	6,10	2,32	1,99	-1,32	0,31	-4,10	1,28	-0,22	0,66
MBS-150 357190-357194	3	13,01	0,21	3,09	0,87	-0,57	-0,57	-1,64	1,41	-0,42	0,19
MBS-150 357195-357199	3	13,29	-1,51	2,42	2,71	0,84	-0,38	-1,64	1,23	-0,98	0,72
MBS-150 357201-357205	3	13,30	1,12	0,11	2,74	3,10	-2,20	-0,64	0,13	0,03	0,01
MBS-150 357206-357210	3	5,77	8,29	1,17	3,25	-1,09	-0,58	-4,05	0,19	0,92	0,31
MBS-150 357216-357221	3	9,55	6,36	-0,75	3,24	3,53	-1,91	-0,43	-0,17	0,02	0,02
MBS-150 357222-357226	3	6,35	4,20	1,98	2,25	4,32	-0,43	-0,91	1,01	-0,82	1,16
MBS-165 360134-360138	3	8,13	6,68	-0,42	3,50	1,57	-1,99	-1,20	-0,69	0,84	-0,65
MBS-165 360150-360154	3	10,45	3,03	0,05	2,61	-0,17	-2,04	-2,10	-0,42	1,28	-0,69
MBS-165 360155-360159	3	8,12	4,60	1,24	1,79	-1,59	-1,13	-1,58	-0,46	0,82	-0,81
MBS-165 360160-360164	3	10,72	-3,72	1,56	3,41	-0,07	0,62	-1,37	-0,62	0,80	0,65
MBS-165 360165-360169	3	12,73	-7,08	1,42	1,95	-2,33	0,99	-1,69	-0,69	1,72	-0,36
MBS-165 360171-360174	3	2,75	-0,47	-3,37	3,30	3,21	1,34	-0,67	-1,29	1,94	-0,34
MBS-140 355872-355876	3	13,50	-10,84	4,61	1,14	0,06	2,34	0,74	-0,85	0,39	-1,36

APÊNDICE 2

Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

Tabela 30 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PCA (continuação)

ID	GRUPO	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
MBS-140 355877-355881	3	9,51	-0,39	1,08	-2,30	4,10	0,74	1,40	-0,14	1,24	-2,20
MBS-147 356735-356741	3	8,57	4,05	-0,05	4,33	3,93	-0,25	0,53	-0,54	0,14	-0,73
MBS-147 356746-356752	3	10,83	1,65	0,64	2,28	0,59	-0,58	-0,70	-0,70	0,90	-0,38
MBS-147 356758-356762	3	7,56	-0,32	2,25	3,63	3,64	2,15	0,49	-0,67	-0,57	-0,54
MBS-149 356943-356946	3	14,94	-10,37	1,40	-2,02	-1,11	0,82	0,01	0,70	1,89	-0,85
MBS-149 356952-356956	3	11,09	-3,20	2,73	-1,12	-2,60	1,14	-1,08	0,99	0,41	-1,28
MBS-149 356961-356965	3	13,15	-8,32	-1,00	1,33	1,78	1,09	0,36	-0,46	1,09	-0,80
MBS-149 356966-356971	3	17,96	-11,52	2,49	0,06	-0,89	0,95	-0,01	0,32	0,66	-0,41
MBS-149 356972-356978	3	9,62	4,34	-0,69	-1,08	-0,28	-1,74	0,50	-0,06	2,39	-1,28
MBS-196 366152-366156	3	16,51	-4,96	-0,29	-0,34	-0,48	-1,96	0,04	-0,22	2,70	-1,54
MBS-196 366178-366182	3	18,20	-4,65	0,99	-0,70	-1,85	-2,09	-1,02	0,25	1,88	-0,86
MBS-196 366183-366187	3	16,00	-5,05	1,20	-1,41	-3,04	-1,55	-0,94	0,09	2,64	-1,12
MBS-196 366188-366192	3	10,23	2,66	1,12	-1,71	-4,53	-1,57	-1,74	0,00	2,94	-1,71
MBS-196 366193-366197	3	5,22	7,62	1,23	-1,87	-5,22	-1,63	-2,59	-0,04	3,71	-1,62
MBS-196 366204-366208	3	12,63	1,40	2,10	-3,63	0,66	-1,48	2,29	0,57	1,49	-2,44
MBS-196 366213-366215	3	17,06	-4,20	1,34	-1,85	-3,18	-1,85	-0,77	0,50	2,51	-1,26
MBS-199 366887-366892	3	5,81	4,51	3,68	-3,27	0,41	-0,39	-1,84	2,80	-0,67	0,71
MBS-199 366893-366897	3	14,54	-3,16	4,08	-3,97	0,04	-0,79	-0,59	2,72	-0,09	-0,14
MBS-199 366904-366908	3	11,02	4,60	0,62	-6,63	0,05	-3,05	1,02	2,68	2,92	-1,41
MBS-199 366914-366918	3	10,65	5,55	0,20	-2,99	0,36	-2,62	-0,36	2,15	1,05	-1,00
MBS-199 366919-366924	3	14,41	2,79	0,78	-1,16	0,93	-2,95	-0,42	1,51	1,01	0,05
MBS-199 366925-366929	3	16,63	-4,24	2,63	-1,59	-2,82	-1,50	-1,56	0,95	1,22	-0,44
MBS-199 366930-366934	3	9,87	7,34	-0,93	1,24	2,66	-2,40	0,24	0,23	0,34	-0,37
MBS-204 367841-367845	3	-5,71	3,54	13,94	-0,11	1,45	-0,87	-3,01	-1,67	1,59	1,92
MBS-204 367867-367872	3	-7,51	-4,65	8,38	-5,97	1,63	0,33	1,75	-1,58	2,21	-3,52
MBS-204 367873-367877	3	-12,26	7,04	5,73	-13,43	2,14	1,99	1,55	2,73	4,40	-5,21
MBS-204 367878-367882	3	-2,36	-10,94	8,62	0,93	1,61	1,23	1,07	-2,54	-0,49	-0,21
MBS-204 367888-367892	3	-25,15	5,01	9,15	-0,57	-3,08	-1,57	1,92	-3,58	-0,04	-1,63
MBS-204 367898-367903	3	15,63	-1,74	-3,50	-5,73	-2,51	-0,58	1,58	1,61	2,56	1,58
MBS-204 367904-367908	3	9,64	0,80	-2,91	-0,35	1,56	0,17	2,34	-1,47	1,30	1,87
MBS-204 367909-367913	3	9,24	1,77	-2,46	0,61	1,77	0,92	1,75	-1,21	1,09	2,35
MBS-278 381164-381167	3	6,57	11,22	-3,63	-3,43	1,04	-1,13	2,63	2,18	1,22	1,43
MBS-278 381171-381175	3	4,52	10,18	-3,92	0,33	2,87	0,21	1,58	-0,39	1,33	2,39
MBS-278 381176-381181	3	10,21	7,50	-3,72	-1,72	0,07	-2,34	1,16	0,67	1,20	1,36
MBS-278 381182-381185	3	17,38	-6,17	0,51	-2,97	-2,13	0,08	1,51	-0,03	1,08	1,01
MBS-278 381186-381190	3	13,87	1,69	-2,16	-1,99	0,10	-1,27	2,07	0,44	0,70	0,83
MBS-278 381191-381192	3	8,05	9,43	-2,28	-1,20	-0,65	-1,52	0,20	0,89	0,69	1,92
MBS-280 381682-381686	3	1,30	-16,14	-2,46	-2,59	0,00	-0,44	0,63	-2,19	1,75	1,77
MBS-280 381690-381692	3	-2,67	2,56	11,77	-2,59	0,96	-0,72	-0,87	-3,76	1,89	5,45
MBS-280 381693-381695	3	-5,39	2,47	12,57	-0,73	0,27	-1,53	-0,63	-5,85	1,53	6,77
MBS-288 384032-384038	3	-7,93	16,47	4,14	-1,15	5,71	-1,56	-2,36	0,95	-1,14	2,91
MBS-464 603378-603380	3	11,79	4,31	-1,18	-1,30	1,66	-0,73	0,73	1,62	-3,05	-0,25
MBS-542 616112-616116	3	-10,41	-1,94	-6,25	-2,86	0,52	2,09	-3,17	0,86	-0,03	0,43
MBS-542 616129-616131	3	11,72	4,24	-1,92	1,58	-1,79	-0,42	-0,39	-0,51	-1,45	-2,57
MBS-542 616154-616157	3	-1,41	-18,07	-2,03	-2,18	-1,05	-0,26	-0,76	-1,06	-1,25	-0,52
MBS-587 626411-626415	3	-20,10	2,37	-6,71	-3,09	1,37	0,19	-3,12	-0,82	0,71	0,46
MBS-587 626437-626440	3	-9,21	-6,71	-2,17	-2,51	1,93	1,81	-1,67	0,27	-1,24	0,33
MBS-593 628701-628705	3	-24,99	8,16	-4,56	-2,40	0,71	0,37	-2,25	-0,86	-0,11	0,35
MBS-593 628706-628711	3	10,69	-5,77	-4,21	1,20	-0,09	1,79	-0,97	-2,26	-0,26	-1,44
MBS-593 628717-628723	3	-3,17	-16,56	-1,45	-1,68	0,77	-0,77	-1,68	-1,34	-1,93	0,00
MBS-593 628729	3	-0,31	-11,61	-2,68	-0,80	0,63	1,05	-1,90	-1,31	-1,04	-0,77
SEC 8430080 (RC_095 129) 1008649	3	4,70	14,89	-4,59	2,37	-1,85	0,78	0,49	-1,73	-0,82	-1,41
SEC 8430080 (RC_095 129) 1008653	3	14,55	-0,44	-0,30	1,36	-2,15	1,36	-0,54	-0,34	-2,61	-0,84
SEC 8430080 (RC_095 129) 1008646	3	-1,81	11,54	-5,20	3,03	0,65	2,98	-0,13	-2,36	0,54	-1,28
SEC 8430080 (RC_095 129) 1008643	3	-0,29	13,63	-5,08	3,15	1,36	2,29	0,39	-1,95	-0,07	-1,26
SEC 8430080 (RC_095 132) 1008756	3	-1,02	-17,48	-1,78	-1,22	2,78	-1,33	0,57	-0,66	-2,37	-0,82
SEC 8430080 (RC_095 132) 1008759	3	-2,77	-13,82	-4,10	-1,15	2,90	-0,72	0,73	-1,27	-1,64	-1,08
SEC 8430080 (RC_095 132) 1008769	3	-22,30	1,36	-1,47	-0,44	2,15	-3,11	0,51	-1,63	-1,72	-1,60
1012934	3	-5,10	-15,28	-2,62	-1,84	-0,10	-0,39	-1,29	-0,40	-1,31	-0,67
1012935	3	-8,68	-8,96	-4,81	-1,58	3,09	-1,05	-0,51	-0,63	-1,28	-0,60
1012937	3	-16,16	-10,92	0,09	-2,50	-1,97	-2,78	-1,30	-1,91	-1,77	-0,48
1012722	3	-7,99	17,31	3,44	-1,39	2,66	3,70	3,14	0,01	-1,63	-1,70
1012723	3	5,97	2,08	5,91	-3,93	-1,90	3,71	2,68	-0,91	-1,27	-1,58
1012725	3	9,71	11,12	-2,92	1,07	-1,95	0,99	2,49	-0,97	-1,91	-0,85
1012640	3	11,54	7,62	-2,59	3,04	-1,95	0,67	-0,10	-1,42	-1,58	-0,22
RC_100_0067 PCT 1016168	3	6,80	-7,69	-4,62	-2,83	1,28	2,69	1,60	-0,95	0,14	1,75
SEC 8431120 (RC_130 366) 1013434	4	-14,22	-12,21	-0,38	-2,90	-2,78	-3,49	-0,98	-2,23	-2,17	-0,21
SEC 8430620 (RC_130 219) 1010688	4	-14,55	8,21	-6,22	1,07	1,87	2,95	-2,68	-1,63	0,70	-1,15
MBS-133 353953-353957	5	-22,11	-1,96	-2,74	1,77	1,68	-0,87	0,45	2,02	0,36	-0,06
MBS-133 353962-353964	5	-29,02	4,54	-1,41	1,12	-1,04	-0,81	0,86	1,24	0,69	-0,50
MBS-133 353976-353980	5	-29,45	0,78	2,60	1,84	-5,12	0,80	1,21	2,36	0,53	0,04
MBS-133 353986-353990	5	-26,42	2,16	0,40	3,63	-1,28	0,98	1,49	2,25	-0,37	-0,52
MBS-133 353991-353996	5	-26,56	3,97	-0,69	2,64	-1,68	0,15	1,34	1,57	0,03	-0,19
MBS-134 354133-354137	5	-29,45	3,64	-1,24	1,54	-0,83	-0,67	1,34	1,52	1,03	0,05

APÊNDICE 2

Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

Tabela 30 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PCA (continuação)

ID	GRUPO	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
MBS-134 354138-354143	5	-29,73	-3,43	0,94	-0,08	-1,98	0,76	0,38	2,08	2,05	0,07
MBS-134 354174-354178	5	-20,18	1,09	-2,26	4,30	-2,47	1,10	-1,39	1,21	0,36	-0,22
MBS-141 355249-355254	5	-17,48	-1,39	-3,80	2,93	1,41	0,66	-0,02	1,57	1,16	0,93
MBS-188 364753-364757	5	-18,74	-0,58	-3,91	3,00	4,41	0,11	0,92	-0,03	0,86	-0,49
MBS-140 355903-355908	5	-26,83	-0,44	0,81	1,20	-0,18	-1,10	0,55	0,40	0,82	-0,96
MBS-140 355909-355913	5	-27,60	-3,41	2,94	2,38	-3,61	0,01	-0,32	0,46	0,74	0,27
MBS-140 355914-355917	5	-31,93	7,93	-0,32	1,30	0,84	-0,96	1,72	-0,24	0,73	-0,48
MBS-280 381735-381737	5	2,33	7,20	3,14	-1,83	5,89	-1,04	-0,65	1,53	-2,44	2,32
MBS-464 603418-603423	5	-14,76	5,33	-3,95	-1,71	3,42	3,14	-2,38	0,32	0,30	2,13
MBS-464 603424-603428	5	10,75	2,17	0,32	-0,25	-1,42	-0,25	-0,34	0,01	-2,46	-1,45
MBS-464 603429-603434	5	0,69	6,31	6,84	-7,12	1,69	-1,31	-2,26	1,13	-0,61	0,69
MBS-501 608889-608896	5	13,41	-1,78	-3,24	-0,37	-1,12	0,46	0,84	-0,21	-1,60	-2,23
MBS-501 608897-608902	5	11,83	-7,72	-0,23	-1,35	1,47	1,76	-0,94	0,49	-1,76	-0,02
MBS-542 616161-616163	5	-15,54	-8,92	-1,28	-1,95	1,43	-4,47	0,41	-2,05	-2,18	0,00
RC_100_0067 PCT 1016166	6	-4,60	10,81	-7,53	-0,75	3,44	3,23	3,10	-1,36	1,10	1,65
MBS-275 381318-381323	6	0,51	11,41	-1,26	-0,23	1,18	-2,78	3,94	0,50	-0,35	0,24
MBS-275 381324-381328	6	3,17	11,93	-2,05	2,02	2,18	-3,15	1,76	0,55	-0,36	0,03
MBS-275 381329-381333	6	2,61	8,76	0,51	1,43	-2,21	-1,41	-0,93	0,74	-0,26	0,30
MBS-141 355218-355223	6	3,35	8,58	0,30	4,15	1,74	-0,84	-0,18	-1,06	0,41	0,42
MBS-146 356278-356282	6	-1,75	18,41	0,09	3,04	-0,15	-0,73	-3,11	-0,07	0,56	-0,85
MBS-150 357175-357179	6	5,86	8,76	0,40	3,30	3,44	-0,98	-1,06	0,87	-0,54	0,30
MBS-150 357211-357215	6	2,22	13,25	0,49	3,42	1,31	-0,78	-2,94	0,61	-0,16	0,36
MBS-150 357227-357231	6	3,99	8,76	1,25	4,21	0,38	-0,41	-2,70	-0,11	0,65	0,33
MBS-150 357232-357235	6	0,09	10,82	2,48	3,80	-2,33	1,44	-4,85	0,11	0,37	0,13
MBS-165 360139-360143	6	4,36	10,30	-0,28	1,91	-0,35	-1,43	-1,39	-0,78	1,32	-0,89
MBS-165 360144-360148	6	6,02	9,04	-0,37	2,07	1,14	-2,08	0,23	-0,98	1,58	-0,27
MBS-147 356730-356734	6	4,72	10,55	-0,39	4,08	2,55	-0,29	-0,13	-0,03	0,14	-0,12
MBS-147 356753-356757	6	4,04	7,68	-2,07	3,51	3,74	0,46	-0,50	-0,75	1,21	-0,07
MBS-196 366157-366161	6	-0,68	17,41	-1,24	1,33	-1,29	-1,18	-2,73	-0,09	2,59	-0,87
MBS-196 366162-366166	6	4,68	12,36	-1,30	1,21	0,25	-2,20	-1,34	0,26	1,90	-0,57
MBS-196 366167-366172	6	8,76	9,22	-2,43	-0,26	1,02	-3,81	0,69	-0,15	2,74	-1,45
MBS-196 366173-366177	6	-2,43	18,62	-0,77	-0,03	-0,98	-1,73	-1,13	-0,73	2,30	-1,39
MBS-196 366198-366203	6	8,58	8,99	-1,58	-0,74	-0,39	-3,28	-0,91	0,74	2,42	-1,66
MBS-196 366209-366212	6	2,30	16,74	-1,68	-0,61	0,70	-2,45	0,09	0,93	1,74	-1,26
MBS-199 366935-366939	6	7,54	10,20	-0,24	0,17	1,66	-1,97	-1,14	1,67	0,14	-0,62
MBS-199 366940-366942	6	8,30	9,84	-1,02	-1,18	2,88	-2,73	0,24	1,82	0,96	-0,43
MBS-204 367893-367897	6	6,56	8,68	-4,33	-6,53	-1,14	-0,54	0,86	2,56	2,88	1,66
MBS-280 381687-381689	6	-9,83	-4,89	-3,68	-1,00	3,48	-1,85	2,75	-3,04	1,39	1,24
MBS-542 616107-616111	6	-23,11	6,20	-6,14	-3,32	-0,20	1,11	-2,57	-0,37	0,61	-0,28
MBS-542 616117-616119	6	-17,80	0,50	-5,14	-4,07	-2,62	0,97	-3,26	-0,63	0,78	0,38
MBS-542 616132-616136	6	4,27	13,48	-4,57	2,49	-0,89	-1,16	0,64	-1,56	-0,56	-2,21
MBS-542 616137-616142	6	8,99	2,71	-1,21	0,27	-7,38	1,16	-2,03	-0,69	-0,43	-2,36
MBS-542 616158-616160	6	-11,40	-13,26	-0,30	-2,43	-0,28	-2,38	-1,23	-1,34	-2,56	0,54
MBS-593 628712-628716	6	-2,84	-8,97	-2,76	-0,50	-1,31	1,88	-3,88	-0,89	-0,35	-0,10
SEC 8430080 (RC_095 132) 1008763	6	14,37	-1,74	-1,24	1,23	-5,59	1,96	-0,18	-2,54	-1,04	-1,17
SEC 8430080 (RC_095 132) 1008766	6	2,12	7,05	-6,12	2,56	3,26	2,58	0,43	-1,58	-0,25	-0,91
1012938	6	-4,59	-12,25	-0,23	-0,76	3,50	-0,94	0,37	-0,75	-2,51	-1,02
MBS-146 356316-356319	7	-9,02	7,89	12,47	-6,64	4,63	5,01	0,30	-0,11	3,31	-4,62
MBS-146 356321-356324	7	-14,42	8,00	13,19	-6,76	4,82	4,34	0,85	0,32	3,67	-5,37
MBS-188 364747-364752	7	-11,35	4,29	3,55	-4,16	5,93	1,97	2,59	-1,25	3,50	-4,89
MBS-155 358450-358465	8	8,56	-14,93	-2,59	1,00	-0,34	0,85	-0,50	0,49	0,58	0,68
MBS-275 381369-381372	8	9,57	-10,21	1,14	0,89	-0,22	0,10	0,62	0,95	-0,90	0,17
MBS-123 352234-352238	8	9,21	-13,55	-2,16	2,00	0,09	1,10	-1,02	0,34	0,96	1,11
MBS-123 352239-352243	8	0,43	-19,16	-2,21	2,13	-0,42	0,08	0,42	1,32	0,78	0,40
MBS-415 400569-400572	8	6,91	-16,77	-2,82	2,15	0,15	1,19	-0,11	0,33	1,32	0,18
MBS-133 353981-353985	8	-4,66	-18,05	-2,55	2,64	0,01	-0,67	0,54	2,53	0,49	0,35
MBS-134 354168-354173	8	-3,04	-15,77	-3,34	1,42	0,24	-0,21	-0,31	0,86	1,60	-0,21
MBS-141 355229-355233	8	0,16	-14,01	0,46	4,24	-1,01	2,88	-0,98	0,84	1,43	0,73
MBS-146 356329-356331	8	5,37	-10,84	-1,47	1,39	-0,28	2,46	-1,73	-0,84	1,77	-1,16
MBS-165 360185-360188	8	5,26	-12,10	0,29	3,72	0,93	2,75	-0,85	0,19	0,49	0,33
MBS-140 355892-355896	8	-4,55	-12,88	-4,50	1,83	3,14	-0,87	0,67	-0,68	1,17	-1,08
MBS-147 356742-356745	8	-1,55	-11,29	0,23	4,85	2,90	2,27	-0,36	-0,75	0,53	-0,31
MBS-147 356763-356767	8	7,69	-9,38	2,95	2,57	1,06	3,48	-0,29	-0,98	0,38	-0,70
MBS-149 356947-356951	8	9,06	-11,07	1,02	0,35	-0,10	2,74	-0,28	-0,28	0,69	-0,79
MBS-149 356957-356960	8	6,90	-11,36	1,62	1,58	3,30	3,34	-0,04	-0,42	-0,24	-0,99
MBS-249 376462-376466	8	11,40	-8,99	-2,76	-2,42	0,93	1,58	1,32	-0,94	2,23	2,16
MBS-249 376467-376472	8	-3,12	14,80	-1,55	-5,13	-4,63	2,27	-2,20	1,31	2,85	1,91
MBS-249 376483-376487	8	12,34	-5,36	-3,60	-3,14	-0,44	-0,41	0,91	-0,07	2,19	0,44
MBS-280 381708-381712	8	-2,81	0,84	12,33	-1,60	0,50	-0,70	-0,81	-4,60	1,68	6,00
MBS-280 381713-381717	8	-3,23	-2,33	9,74	2,74	-0,58	1,59	2,08	-5,40	0,38	2,88
MBS-288 384039-384040	8	-6,50	16,35	3,71	-2,16	5,94	-0,87	-1,96	1,65	-1,47	2,57
MBS-288 384076-384080	8	12,01	-0,72	2,33	-3,83	1,12	-0,01	-0,89	2,29	-3,19	0,67
MBS-318 388492-388496	8	2,53	13,56	-1,27	-2,84	1,95	-1,01	-0,34	2,66	-2,69	-0,62
MBS-464 603381-603385	8	1,36	-15,04	-0,08	-2,32	1,47	2,37	-1,84	0,05	-1,08	2,05
MBS-464 603402-603406	8	3,55	-8,60	0,11	-0,31	4,90	2,71	-1,10	-0,34	-0,80	1,59

APÊNDICE 2

Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

Tabela 30 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PCA (continuação)

ID	GRUPO	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
MBS-464 603409-603413	8	-7,53	3,18	-4,87	-0,60	5,55	2,76	-0,55	0,20	0,04	1,56
MBS-542 616143-616147	8	14,57	-3,35	-3,04	-0,89	-1,68	-0,07	-0,05	-0,47	-0,94	-1,75
MBS-542 616148-616153	8	-0,58	-15,07	-4,18	-1,80	-0,16	-1,30	0,21	-1,36	-1,13	-1,58
MBS-542 616164-616168	8	-16,83	-4,63	-0,60	-0,84	1,82	-4,42	1,50	-2,19	-2,54	-0,73
MBS-542 616182-616186	8	-15,13	1,87	-6,57	-3,49	-0,26	2,03	-3,55	0,51	0,71	0,29
MBS-542 616187-616189	8	-3,74	-10,96	-5,36	-4,00	-0,88	1,30	-2,61	0,09	-0,18	0,89
MBS-593 628724-628726	8	-12,83	-11,33	0,10	-1,84	0,35	-3,45	-0,65	-1,92	-2,08	0,05
MBS-593 628734-628737	8	-15,75	-5,92	-3,83	-2,06	0,29	-1,50	-0,15	-0,74	-1,28	-1,24
SEC 8430620 (RC_130 219) 1010690	8	-27,02	0,78	0,06	-2,41	-2,29	-2,55	0,37	-3,25	-1,17	-0,53
SEC 8430620 (RC_130 219) 1010691	8	-20,70	-7,74	1,66	-2,67	-2,35	-3,68	-0,67	-3,07	-2,32	0,24
1012641	8	18,35	-0,90	-1,28	1,05	-3,97	1,03	-0,45	-1,42	-2,10	-0,09
1012642	8	10,15	9,56	-1,97	0,39	-5,31	1,15	1,43	-1,53	-2,10	-1,05
1012643	8	12,72	2,16	-1,70	1,71	-2,89	1,67	1,22	-1,50	-1,97	-1,31
1013508	8	-1,06	-16,25	-1,79	-1,85	1,10	0,43	-0,52	-0,03	-1,87	-1,10
RC_100_0067 PCT 1016170	8	1,05	-10,42	-4,39	-3,81	0,63	2,11	0,88	-0,95	0,76	1,60
SEC 8431120 (RC_130 366) 1013430	9	-28,66	5,58	-3,34	-1,94	0,68	-2,78	0,73	-2,83	-0,67	-1,03
SEC 8431120 (RC_130 366) 1013432	9	-31,96	5,97	1,85	-2,87	-4,87	-1,28	-0,15	-3,19	-1,34	-0,71
1013504	9	7,15	9,77	-2,70	2,11	0,77	1,64	0,78	-1,49	-1,19	-0,33
1013505	9	10,35	-1,88	-3,64	0,20	-2,11	3,38	0,29	-2,23	-1,04	-0,78
1013506	9	4,57	-17,29	-0,04	-0,90	0,57	2,43	-0,34	-1,02	-1,20	-1,00
1013507	9	9,88	-6,04	-2,00	2,01	2,32	2,44	-1,20	-1,20	-1,47	-0,62
MBS-133 353958-353961	10	-24,93	-7,60	0,83	0,97	-0,70	-0,96	1,28	2,41	1,75	0,57
MBS-134 354115-354119	10	-22,83	-6,94	0,82	0,93	-3,06	-0,20	0,58	2,30	1,34	0,08
MBS-134 354158-354162	10	-16,44	-6,98	2,09	1,85	-1,68	-0,70	2,57	2,72	0,03	-0,24
MBS-134 354163-354167	10	-21,74	-5,99	2,09	1,92	-2,84	-0,10	2,81	3,14	-0,05	0,30
MBS-141 355260-355264	10	-23,29	-5,02	5,67	3,43	-2,79	0,39	3,79	3,95	0,27	1,83
MBS-141 355265-355269	10	-22,40	-10,07	2,87	2,39	-1,96	0,75	2,50	4,96	0,33	2,16
MBS-141 355271-355275	10	-25,34	-5,16	1,42	3,27	-2,61	0,86	1,69	4,32	0,58	1,08
MBS-188 364758-364763	10	-20,19	-11,54	1,97	3,48	-0,25	-0,38	0,30	1,43	0,11	0,43
MBS-140 355897-355902	10	-22,93	-4,68	0,04	0,49	-1,87	-0,60	-0,10	0,46	0,43	-0,67
SEC 8431120 (RC_130 366) 1013435	10	-11,32	-8,56	-4,02	-2,64	1,97	-1,36	-0,20	-1,10	-1,06	-0,10
MBS-123 352244-352248	11	-9,94	-13,92	-3,26	3,07	1,27	-0,83	0,92	2,43	0,39	0,22
MBS-123 352249-352255	11	-11,64	-13,57	2,35	0,04	0,31	-0,78	1,33	2,78	-0,84	-0,23
MBS-133 353965-353969	11	-11,29	-13,98	-1,04	3,07	-0,85	-1,79	0,80	1,47	1,01	-0,40
MBS-133 353971-353975	11	-13,64	-11,72	-0,89	3,29	-1,37	-0,71	1,37	2,57	-0,29	0,07
MBS-134 354110-354114	11	-15,40	-11,70	-1,11	2,66	-1,48	-1,10	1,32	2,30	0,21	-0,30
MBS-134 354121-354125	11	-7,98	-15,77	-2,59	2,19	-0,24	-1,27	0,73	1,65	0,70	-0,25
MBS-134 354130-354132	11	-13,56	-9,46	-2,14	2,20	-1,03	1,00	-0,48	1,69	0,90	0,26
MBS-134 354144-354148	11	-15,01	-10,10	-2,74	3,14	0,57	-1,80	1,13	1,92	0,80	-0,28
MBS-134 354149-354154	11	-16,99	-14,50	-0,20	2,29	-1,46	-1,02	1,66	3,55	0,74	0,45
MBS-141 355234-355238	11	-14,12	-10,34	-0,63	3,76	-2,03	1,72	-0,47	2,38	0,88	0,65
MBS-141 355239-355243	11	-14,83	-14,23	-1,39	2,48	-1,37	0,10	1,04	2,96	0,82	0,67
MBS-141 355244-355248	11	-13,07	-8,42	-4,04	3,64	1,83	-0,23	0,89	1,84	1,14	0,44
MBS-146 356325-356328	11	-7,40	-16,27	-1,19	2,78	1,01	-0,04	1,45	1,25	0,23	-0,36
MBS-146 356332-356333	11	-10,58	-13,91	-1,08	1,94	-0,87	1,93	-0,95	1,32	0,98	0,28
MBS-278 381226-381229	11	14,47	-3,23	0,24	-0,90	-1,42	-1,09	0,46	-0,53	0,71	2,13
MBS-278 381235-381237	11	2,80	-10,42	-5,36	-2,62	2,05	-0,25	2,08	-2,05	2,59	0,88
MBS-280 381718-381724	11	7,37	-12,18	1,04	-1,52	0,47	2,62	1,01	-1,93	0,60	1,22
MBS-280 381725-381729	11	6,47	5,70	1,84	-2,47	2,98	-0,75	-1,16	2,61	-3,23	1,03
MBS-280 381730-381734	11	-5,02	17,45	1,82	-3,37	2,46	0,52	-1,47	3,23	-2,91	0,06
MBS-288 384081-384085	11	11,30	2,79	0,75	-3,93	2,29	-0,81	-0,95	3,41	-3,45	0,00
MBS-318 388497-388502	11	6,12	3,71	3,73	-4,87	-1,51	0,76	-2,02	2,79	-3,01	0,16
MBS-318 388503-388507	11	9,36	1,57	3,90	-3,33	-0,74	1,43	-1,51	2,37	-2,89	0,74
MBS-318 388508-388512	11	14,11	-0,30	0,75	-2,92	0,30	-0,28	0,15	2,55	-3,60	-0,84
MBS-464 603407-603408	11	-3,14	-3,18	-0,58	-1,20	1,64	4,02	-2,68	0,49	-0,81	1,87
MBS-464 603414-603417	11	-4,79	-8,74	-1,27	-2,55	1,16	3,06	-2,85	0,36	-0,72	2,47
MBS-501 608875-608879	11	3,85	5,09	2,32	-1,04	-4,42	2,19	-1,74	0,12	-2,14	-2,14
MBS-501 608880-608885	11	13,76	3,14	-2,33	0,92	0,74	-0,89	0,71	0,41	-2,44	-1,78
MBS-501 608903-608906	11	-13,18	-5,42	-1,26	-3,50	-2,33	2,69	-2,77	0,43	-0,85	0,11
MBS-542 616169-616173	11	-21,76	1,85	-0,12	-0,66	2,64	-4,00	1,41	-2,43	-1,70	0,12
MBS-542 616174-616178	11	7,79	1,46	-5,02	-0,64	-0,44	1,27	0,74	-0,99	-0,55	-1,48
MBS-542 616179-616181	11	-3,18	-16,23	-3,58	-3,68	1,30	-0,09	-1,37	-0,26	-0,87	0,83
1012644	11	16,25	1,20	-1,65	0,29	-4,92	2,12	0,97	-1,21	-2,13	-0,90
MBS-318 388492-388498	12	11,59	2,67	1,22	-4,60	1,42	-0,79	-0,94	2,89	-3,26	-0,17
SEC 8430620 (RC_130 219) 1010692	12	6,42	12,54	-4,58	3,19	-2,18	0,51	1,13	-2,50	-0,74	-1,95
RC_100_0067 PCT 1016169	13	4,31	19,79	-4,95	0,80	-1,69	0,06	3,26	-1,19	-0,94	1,51
RC_100_0070 PCT 10160064	13	2,75	21,53	-2,85	-1,73	-2,71	0,31	4,32	-0,23	-1,55	1,74
RC_100_0070 PCT 10160065	13	-1,84	23,39	-4,01	-0,02	-0,94	1,51	1,94	-0,70	-0,45	2,24
RC_100_0070 PCT 10160066	13	2,63	20,79	-3,48	-0,76	-0,69	0,77	3,44	-0,05	-1,00	2,04
RC_100_0073 PCT 1016201	13	1,61	20,16	-3,47	-0,03	-3,14	0,63	3,05	-0,79	-0,81	1,45
RC_100_0073 PCT 1016202	13	-2,47	25,67	-0,63	-2,80	-8,46	2,20	2,22	-0,85	-0,99	1,79

APÊNDICE 2

Relação de amostras por grupo e parâmetros PC

Tabela 30 – Relação de amostras por grupo e parâmetros PCA (continuação)

ID	GRUPO	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5	PCA 6	PCA 7	PCA 8	PCA 9	PCA 10
MBS-165 360180-360184	14	-5,95	1,58	1,03	4,66	3,78	3,66	1,09	-0,03	-0,55	0,02
MBS-249 376473-376477	14	5,02	9,49	-3,46	0,09	2,31	0,56	1,61	-0,33	0,95	2,46
MBS-249 376478-376482	14	9,73	1,25	-4,14	-2,08	2,44	0,39	2,21	-0,25	1,62	2,39
RC_100_0070 PCT 10160063	14	-5,39	-0,79	-6,85	-2,76	1,14	2,79	0,77	-1,47	1,20	1,04
RC_100_0067 PCT 1016167	14	-9,00	4,66	-7,00	-1,95	2,84	2,24	1,58	-1,45	1,79	1,44
MBS-204 367852-367856	15	-14,63	13,24	10,33	5,48	0,91	-0,26	-1,24	-2,36	0,26	0,69
MBS-204 367883-367887	15	1,53	-13,31	6,10	1,45	0,43	0,70	2,75	-2,87	-1,06	-0,97
MBS-204 367919-367926	15	7,53	-3,61	-0,20	-2,61	-3,58	2,69	-0,73	-0,47	1,89	1,31
MBS-278 381168-381169	15	13,25	-7,03	4,42	-2,21	0,42	2,38	2,03	-0,94	-0,27	1,06
MBS-587 626416-626421	16	-17,67	2,15	6,11	-2,79	-2,96	-2,72	1,28	-3,54	-2,72	-1,43
MBS-587 626427-626431	16	-5,48	-15,95	-1,51	-4,15	0,69	-0,43	-1,86	-0,28	-1,83	1,14
MBS-587 626432-626436	16	-11,41	-10,45	0,42	-3,75	-0,67	-1,31	-2,37	-1,00	-2,07	1,48
MBS-593 628695-628699	16	-9,28	-6,60	-5,86	-2,33	2,50	0,96	-1,39	-0,03	-1,08	-0,36
SEC 8430080 (RC_095 129) 1008640	16	13,37	3,62	-2,32	2,09	-1,17	0,77	-0,25	-0,50	-2,14	-0,75
1012936	16	-18,26	-8,11	0,38	-2,35	-2,78	-2,52	-1,32	-1,74	-2,14	-0,73
1012721	16	-1,15	-17,76	2,54	-1,32	1,69	-0,16	0,19	-0,63	-2,00	-1,00
1012724	16	7,33	10,15	-1,29	1,36	-2,26	1,51	0,87	-0,69	-1,74	-0,57
RC_100_0070 PCT 10160067	16	7,74	10,61	-3,58	-1,65	-3,58	1,46	3,49	-1,89	-0,17	2,23
RC_100_0073 PCT 1016200	16	8,49	13,34	-2,63	-1,76	-4,35	1,23	3,66	-0,51	-1,70	1,34
RC_100_0073 PCT 1016203	16	10,11	12,10	-2,88	-1,47	-5,92	0,69	3,00	-1,38	-1,12	2,05
MBS-141 355255-355259	17	-36,85	16,89	-0,58	3,23	-2,77	1,81	0,06	1,52	-0,29	-0,64
MBS-134 354155-354156	17	-24,32	6,73	11,57	2,29	-1,84	2,16	5,21	2,63	-0,35	1,07
SEC 8431120 (RC_130 366) 1013433	17	-32,60	9,41	-1,75	-2,09	-0,79	-2,31	0,39	-2,93	-0,74	-1,32
SEC 8430620 (RC_130 219) 1010689	17	-25,53	-0,37	-3,74	-2,25	-0,05	-2,20	-0,99	-2,62	-0,88	-0,59
RC_100_0073 PCT 1016204	17	-9,50	32,90	-2,40	-0,48	-2,73	1,44	2,28	-0,02	-0,77	1,83

Amostra representativa do cluster	Amostras mais distantes	Amostras de pó de perfuratriz
-----------------------------------	-------------------------	-------------------------------

APÊNDICE 3

Difratogramas médios dos domínios mineralógicos

OPS

Figura 65 – Comparação dos difratogramas médios de cada grupo agrupados como OPS

POS

Figura 66 – Comparação dos difratogramas médios de cada cluster agrupados como POS

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Liz = lizardita; Ol = olivina; En = enstatita; An = anfibólio; Qz = quartzo; T = talco; M = mica; K-feld = feldspato potássico; Ab = plagioclásio; alb?; D = dolomita; Mag = Magnesita; V = vermiculita; Cl = clorita

APÊNDICE 3

Difratogramas médios dos domínios mineralógicos

PO

Figura 67 – Comparação dos difratogramas médios de cada cluster agrupados como PO

P

Figura 68 – Comparação dos difratogramas médios de cada cluster agrupados como P

PAF

Figura 69 – Comparação dos difratogramas médios de cada cluster agrupados como PAF

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **Out** = Outlier.

Liz = lizardita; Ol = olivina; En = enstatita; An = anfibólio; Qz = quartzo; T = talco; M = mica; K-feld = feldspato potássico; Ab = plagioclásio; albita?; D = dolomita; Mag = Magnesita; V = vermiculita; Cl = clorita.

APÊNDICE 4

Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz

Tabela 32 – Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz. Em verde as amostras selecionadas para composição (amostras não seriam consideradas se %Ni < 0,35 e/ou %S < 0,10)

Grupo Caracterização	Grupo Cluster	ID	Elementos (%)									Ni/S	SiO ₂ /MgO
			Ni	Cu	S	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	PF		
OPS	10	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013435	1,18	0,259	1,04	17,2	29,7	36,4	0,815	1,38	10,1	1,13	0,81
	11	1012644	0,466	0,030	0,093	16,7	35,0	36,9	1,22	1,49	6,57	3,79	0,95
POS	8	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010691	0,627	0,140	0,421	15,6	39,8	30,3	2,65	1,96	6,09	1,49	1,32
	8	1012641	0,663	0,128	0,561	16,8	37,0	35,7	1,58	1,94	3,86	1,18	1,04
	8	1012642	1,67	0,344	1,63	18,9	33,8	35,0	1,11	1,39	4,62	1,02	0,97
	8	1012643	1,48	0,295	1,48	18,7	34,1	35,2	1,10	1,37	4,68	1,00	0,97
	8	1013508	1,25	0,348	1,38	15,9	35,9	29,0	1,92	4,44	8,19	0,91	1,24
	8	RC_100_0067 PCT 1016170	0,777	0,174	0,521	18,4	34,7	35,9	1,24	1,67	4,88	1,49	0,97
	8	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010690	0,327	0,027	0,095	14,3	40,3	28,0	4,72	2,17	6,48	3,44	1,44
	14	RC_100_0070 PCT 10160063	0,800	0,126	0,541	18,4	36,2	36,0	1,43	1,75	3,10	1,48	1,01
	14	RC_100_0067 PCT 1016167	0,487	0,035	0,237	18,0	36,6	35,9	1,31	1,91	3,89	2,05	1,02
PO	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008649	0,417	0,076	0,279	16,0	43,6	29,2	3,22	3,19	1,89	1,49	1,50
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008646	0,367	0,065	0,220	15,3	44,3	29,8	3,21	3,13	1,43	1,67	1,49
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008643	0,696	0,200	0,723	16,6	43,6	29,9	2,90	2,99	0,36	0,96	1,46
	3	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008756	0,845	0,220	0,978	16,7	40,8	29,7	2,74	2,89	3,04	0,86	1,37
	3	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008759	0,732	0,229	0,727	17,3	39,7	31,2	2,33	2,61	3,12	1,01	1,27
	3	1012640	0,499	0,098	0,381	15,2	43,9	32,1	2,36	2,65	1,00	1,31	1,37
	3	1012934	0,638	0,225	0,676	16,0	42,4	31,3	2,09	2,17	2,47	0,94	1,35
	3	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008769	0,345	0,060	0,217	16,3	43,7	30,4	2,97	3,23	0,62	1,59	1,44
	3	1012935	0,322	0,054	0,231	14,8	47,5	29,3	2,86	2,63	0,19	1,39	1,62
	3	1012937	0,261	0,035	0,129	12,2	49,8	24,4	5,55	2,78	1,43	2,02	2,04
	3	1012722	0,283	0,062	0,231	13,8	47,6	27,2	3,73	2,93	1,68	1,23	1,75
	3	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008653	0,341	0,044	0,161	15,6	44,4	30,3	3,22	3,19	0,52	2,12	1,47
	3	1012723	0,218	0,025	0,093	13,8	48,6	28,2	3,44	2,82	0,54	2,34	1,72
	3	1012725	0,255	0,039	0,146	14,2	47,6	30,0	2,74	2,90	0,28	1,75	1,59
	3	RC_100_0067 PCT 1016168	0,459	0,021	0,100	17,8	39,0	34,1	1,84	2,28	2,55	4,37	1,14

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **C** = Minério carbonático **Out** = Outlier.

APÊNDICE 4

Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz

Tabela 32 (Continuação) – Análises químicas semi-quantitativas das amostras de contraparte dos pós de perfuratriz. Em verde as amostras selecionadas para composição (amostras não seriam consideradas se %Ni < 0,35 e/ou %S < 0,10)

Grupo Caracterização	Grupo Cluster	ID	Elementos (%)									Ni/S SiO2/MgO	
			Ni	Cu	S	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	PF		
P	16	SEC 8430080 (RC_095 129) 1008640	0,849	0,226	1,02	17,7	42,9	28,4	2,87	3,14	0,79	0,83	1,51
	16	1012936	0,427	0,092	0,362	15,1	46,8	29,6	2,61	2,64	0,49	1,18	1,58
	16	RC_100_0073 PCT 1016200	0,347	0,083	0,301	15,0	47,1	27,2	3,48	2,99	1,53	1,15	1,73
	16	RC_100_0073 PCT 1016203	0,430	0,101	0,516	15,8	46,1	27,9	3,27	3,28	0,62	0,83	1,65
	16	1012721	0,297	0,043	0,169	14,7	47,1	29,8	2,85	2,94	0,19	1,76	1,58
	16	1012724	0,293	0,052	0,185	14,6	47,4	29,8	2,86	2,78	0,12	1,58	1,59
	16	RC_100_0070 PCT 10160067	0,335	0,023	0,126	17,5	43,3	31,2	2,48	2,86	GF	2,66	1,39
	13	RC_100_0067 PCT 1016169	0,522	0,110	0,526	15,7	46,0	28,7	3,03	3,15	0,21	0,99	1,60
	13	RC_100_0070 PCT 10160064	0,506	0,120	0,502	16,3	45,7	28,2	3,06	3,31	0,17	1,01	1,62
	13	RC_100_0070 PCT 10160065	0,577	0,112	0,543	16,8	44,3	29,8	2,75	3,07	GF	1,06	1,49
	13	RC_100_0070 PCT 10160066	0,313	0,035	0,121	15,9	45,3	29,4	2,69	3,10	1,04	2,59	1,54
	13	RC_100_0073 PCT 1016201	0,311	0,053	0,234	16,0	46,4	28,6	2,82	3,10	0,64	1,33	1,62
	13	RC_100_0073 PCT 1016202	0,358	0,061	0,269	15,819	46,46	28,37	3,08	3,27	0,47	1,14	1,63
	6	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008763	0,776	0,168	0,755	16,9	42,8	29,7	2,94	2,96	0,90	1,03	1,44
	6	SEC 8430080 (RC_095 132) 1008766	0,356	0,052	0,192	15,6	44,8	29,5	3,14	3,50	0,66	1,70	1,52
	6	RC_100_0067 PCT 1016166	0,426	0,018	0,093	17,7	38,6	34,6	1,60	2,02	3,05	4,58	1,11
	6	1012938	0,261	0,015	0,091	14,9	45,3	31,8	2,41	2,80	0,70	2,87	1,42
CS	12	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010692	0,595	0,083	0,384	12,6	33,6	30,9	3,01	1,47	14,8	1,5	1,09
	4	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013434	0,727	0,159	0,464	13,2	24,6	28,1	0,585	6,95	23,3	1,6	0,88
	4	SEC 8430620 (RC_130 219) 1010688	0,406	0,041	0,239	13,5	42,7	25,0	5,30	1,42	7,09	1,70	1,70
C	9	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013430	0,020	0,043	0,061	19,4	40,4	8,01	12,4	8,63	4,61	0,33	5,05
	9	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013432	0,013	0,042	0,055	20,0	40,0	7,28	12,2	9,16	4,52	0,24	5,50
	9	1013504	0,026	0,051	0,063	19,3	39,8	7,87	12,1	8,81	3,39	0,41	5,06
	9	1013505	0,030	0,050	0,104	19,8	40,2	6,57	12,5	10,3	3,40	0,29	6,12
	9	1013506	0,040	0,043	0,231	19,6	40,0	7,42	12,1	9,15	4,81	0,17	5,40
	9	1013507	0,050	0,312	0,847	14,8	30,6	23,5	2,12	7,92	17,1	1,3	1,30
Out	17	SEC 8431120 (RC_130 366) 1013433	0,553	0,132	0,092	14,0	23,4	22,9	2,59	9,57	23,9	2,5	1,02
	17	SEC 8431120 (RC_130 219) 1010689	0,492	0,073	0,093	13,7	43,8	21,1	5,84	1,35	7,79	1,45	2,08
	17	RC_100_0073 PCT 1016204	0,795	0,220	0,993	17,0	44,8	27,7	3,11	3,39	GF	0,80	1,62

Obs: **OPS** = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%; **POS** = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%; **PO** = Piroxênio/ com olivina = 10%; **P** = Piroxênio/ com olivina = 5%; **CS** = Minério carbonático com serpentina >5% (separado em Ganga A, B e C); **C** = Minério carbonático **Out** = Outlier.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Amostras

As seguintes amostras foram objeto de análises mineralógicas e associações minerais através do sistema MLA – *Mineral Liberation Analyser*:

- OPS = Olivina/piroxênio/ com serpentina >10%
- POS = Piroxênio/olivina/ com serpentina =10%
- PO = Piroxênio/ com olivina = 10%
- P = Piroxênio/ com olivina = 5%
- Minério com ganga tipo A - micáceo
- Minério com ganga tipo B - carbonático
- Minério com ganga tipo C - feldspático/micáceo
- Outlier

} Minério carbonático com
serpentina >5% (CS)

Classificação granulométrica

As distribuições de teores por frações granulométricas estão expostas da Tabela 33 a Tabela 40, para as amostras OPS, POS, PO, P, Ganga A, Ganga B, Ganga C e Out, respectivamente.

Tabela 33 – Distribuição de teores por fração granulométrica – OPS

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	20,0	0,83	0,13	0,05	10,15	1,27	35,2	35,8	0,65	18,9	13,8	21,2
-0.105+0.053	29,3	0,82	0,14	0,04	10,23	1,18	35,5	34,9	0,69	27,4	21,9	28,9
-0.053+0.020	21,6	0,92	0,19	0,04	10,18	1,29	34,5	33,4	0,72	22,6	22,2	23,2
-0.020	29,1	0,94	0,27	0,04	9,04	1,10	33,3	32,2	0,85	31,1	42,2	26,7
Total calculado	100,0	0,88	0,19	0,04	9,86	1,20	34,6	34,0	0,73	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,88	0,19	0,03	9,80	1,41	35,9	34,5				

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 34 – Distribuição de teores por fração granulométrica - POS

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	20,1	0,40	0,06	<0,001	9,38	0,64	46,6	30,2	0,63	16,0	12,6	18,4
-0.105+0.053	31,9	0,38	0,06	0,05	9,83	0,52	45,3	29,9	0,72	23,9	18,7	24,0
-0.053+0.020	24,8	0,54	0,10	0,02	9,16	0,79	44,1	29,9	0,69	26,9	24,7	28,1
-0.020	23,2	0,72	0,19	0,05	9,39	0,89	41,4	27,2	0,81	33,2	44,0	29,6
Total calculado	100,0	0,50	0,10	0,03	9,47	0,70	44,4	29,3	0,72	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,57	0,11	0,03	9,18	0,93	43,8	29,3	0,61			

Tabela 35 – Distribuição de teores por fração granulométrica – PO

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	21,6	0,43	0,08	0,02	12,02	0,54	47,4	25,4	0,79	22,6	19,3	22,4
-0.105+0.053	32,3	0,27	0,04	0,04	10,83	0,28	48,9	26,4	0,94	21,1	14,4	17,5
-0.053+0.020	22,0	0,38	0,08	0,01	8,73	0,56	48,9	28,4	0,69	20,6	18,8	23,5
-0.020	24,1	0,60	0,17	0,04	9,14	0,79	46,1	26,9	0,76	35,6	47,4	36,6
Total calculado	100,0	0,41	0,09	0,03	10,22	0,52	47,9	26,8	0,78	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,47	0,11	0,03	9,25	0,86	47,6	27,2	0,55			

Tabela 36 – Distribuição de teores por fração granulométrica - P

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	25,6	0,21	0,02	0,03	8,45	0,25	51,5	29,3	0,85	14,0	8,1	11,6
-0.105+0.053	33,3	0,28	0,04	0,02	8,33	0,39	50,7	29,2	0,71	23,7	17,7	23,6
-0.053+0.020	23,4	0,49	0,08	<0,001	8,74	0,77	48,6	27,8	0,63	29,4	24,9	32,8
-0.020	17,7	0,72	0,22	0,04	9,63	1,00	45,7	25,5	0,72	33,0	49,2	32,0
Total calculado	100,0	0,39	0,08	0,02	8,69	0,55	49,5	28,2	0,70	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,44	0,09	0,03	9,37	0,67	49,1	27,2	0,66			

Tabela 37 – Distribuição de teores por fração granulométrica - Ganga A

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	13,8	0,36	0,06	<0,001	8,02	0,27	39,6	27,4	1,33	12,6	13,2	13,3
-0.105+0.053	24,1	0,32	0,06	0,03	6,87	0,28	40,0	30,1	1,15	19,6	20,1	23,9
-0.053+0.020	21,9	0,39	0,08	<0,001	7,33	0,27	39,8	29,4	1,45	21,7	25,7	21,0
-0.020	40,2	0,45	0,07	0,02	7,12	0,29	39,4	29,3	1,55	46,1	40,9	41,8
Total calculado	100,0	0,39	0,07	0,02	7,23	0,28	39,7	29,3	1,40	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,42	0,06	0,03	7,21	0,52	38,5	28,5	0,82			

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 38 – Distribuição de teores por fração granulométrica - Ganga B

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	16,0	0,52	0,11	0,01	7,58	0,51	32,8	28,6	1,02	15,2	15,1	19,3
-0.105+0.053	23,0	0,55	0,11	0,02	8,09	0,42	32,5	27,8	1,31	23,2	23,2	22,8
-0.053+0.020	22,0	0,50	0,11	0,02	7,10	0,43	32,2	27,8	1,16	20,2	20,8	22,6
-0.020	39,0	0,58	0,12	<0,001	7,51	0,38	29,7	27,0	1,52	41,4	40,8	35,3
Total calculado	100,0	0,55	0,11	0,01	7,56	0,42	31,4	27,6	1,29	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,51	0,10	0,03	7,22	0,67	31,2	27,9	0,77			

Tabela 39 – Distribuição de teores por fração granulométrica - Ganga C

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	16,2	0,26	0,03	0,05	7,83	0,29	49,4	21,8	0,90	13,4	13,6	15,1
-0.105+0.053	33,2	0,26	0,03	0,03	7,46	0,27	48,9	23,7	0,98	27,5	29,3	28,3
-0.053+0.020	25,4	0,29	0,04	0,03	7,67	0,32	47,4	24,5	0,93	23,3	26,8	25,4
-0.020	25,2	0,45	0,04	0,03	8,02	0,39	44,6	24,0	1,17	35,8	30,4	31,1
Total calculado	100,0	0,32	0,04	0,03	7,71	0,32	47,5	23,7	1,01	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,35	0,04	0,06	8,17	0,38	46,8	22,9	0,92			

Tabela 40 – Distribuição de teores por fração granulométrica - Outlier

Fração	% massa	Teores (%)								Distribuição (%)		
		Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	Ni/S	Ni	Cu	S
+0.105	26,8	0,23	0,04	<0,001	9,70	0,26	52,5	26,2	0,88	14,2	8,5	9,4
-0.105+0.053	31,9	0,21	0,03	0,03	9,19	0,35	52,3	26,4	0,62	16,0	9,9	14,9
-0.053+0.020	23,7	0,50	0,12	0,04	8,53	0,89	50,2	26,1	0,56	27,7	24,9	28,7
-0.020	17,6	1,02	0,36	0,02	8,70	1,98	47,4	23,9	0,52	42,1	56,7	47,1
Total calculado	100,0	0,43	0,11	0,02	9,09	0,74	51,0	25,8	0,58	100,0	100,0	100,0
Total dosado		0,49	0,12	0,01	8,25	1,06	51,3	26,4	0,46			

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Composição mineralógica

Os resultados de composição mineralógica são apresentados da Tabela 41 a Tabela 48, para as amostras OPS, POS, PO, P, Ganga A, Ganga B, Ganga C e Outlier, respectivamente.

Tabela 41 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – OPS

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	20,0	29,3	21,6	29,1
pentlandita	1,7	1,6	1,4	1,8	1,8
pentl_oxid	1,7	1,5	1,8	1,8	1,7
calcopirita	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
esfalerita	<0,1	<0,1	-	-	-
pirita	0,5	0,3	0,4	0,4	0,7
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	-	-	-	-	-
Sulf_FeCoNi	0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
ortopiroxênio	6,5	5,8	5,8	6,5	7,7
clinopiroxênio	1,8	1,9	1,8	2,0	1,5
anfibólio	2,0	1,2	1,6	2,7	2,4
olivina	37,8	49,5	46,5	34,1	23,7
serpentina	37,8	29,5	31,8	40,8	47,3
outros silicatos	0,8	0,3	0,8	0,9	1,0
espinelio-Cr	3,4	4,0	4,4	3,3	2,0
óxido-Fe	2,1	1,8	1,3	2,3	3,0
mica	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4
carbonatos	3,1	1,9	1,7	2,5	5,7
outros	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 42 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – POS

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	20,1	31,9	24,8	23,2
pentlandita	1,4	0,7	0,9	1,6	2,3
pentl_oxid	0,3	0,2	<0,1	0,4	0,6
calcopirita	0,3	<0,1	0,3	0,3	0,6
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1
pirita	0,6	0,3	0,3	0,7	1,1
pirrotita	<0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	-	-	<0,1
sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	0,0	0,0	<0,1
ortopiroxênio	49,5	57,4	49,8	46,5	45,5
clinopiroxênio	3,9	3,8	3,5	4,2	4,0
anfibólio	2,4	1,2	1,7	3,1	3,8
olivina	18,5	21,2	23,1	17,2	11,1
serpentina	16,1	10,4	14,4	18,4	20,9
outros silicatos	1,8	1,2	1,4	2,0	2,5
espinelio-Cr	1,5	1,0	1,5	2,0	1,3
óxido-Fe	0,4	0,1	0,2	0,4	0,8
mica	1,2	0,8	0,9	1,3	2,1
carbonatos	1,7	1,1	1,5	1,5	2,8
outros	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 43 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – PO

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	25,6	33,3	23,4	17,7
pentlandita	0,8	0,3	0,4	1,3	1,5
pentl_oxid	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,3
calcopirita	0,2	<0,1	0,1	0,2	0,5
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	-	0,0
pirita	0,3	0,1	0,3	0,4	0,7
pirrotita	0,1	<0,1	0,1	0,1	0,2
arsenopirita	<0,1	<0,1	-	-	<0,1
sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	72,6	80,9	73,5	68,1	64,6
clinopiroxênio	6,1	5,0	5,8	7,2	7,0
anfíbólio	1,8	0,5	1,2	2,5	3,7
olivina	10,0	8,9	11,6	10,9	7,5
serpentina	3,9	1,9	3,2	4,6	7,1
outros silicatos	2,2	1,4	2,1	2,4	3,1
espinelio-Cr	0,8	0,5	0,8	0,8	1,2
óxido-Fe	0,3	0,2	0,2	0,3	0,8
mica	0,3	0,1	0,1	0,5	0,7
carbonatos	0,4	0,2	0,3	0,4	0,8
outros	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,2

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 44 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – P

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	21,6	32,3	22,0	24,1
pentlandita	0,9	0,3	0,5	0,8	2,0
pentl_oxid	0,2	<0,1	0,2	0,2	0,4
calcopirita	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	-	-	-	<0,1
pirita	0,3	0,1	0,1	0,4	0,5
pirrotita	0,3	<0,1	0,3	0,2	0,4
arsenopirita	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1
Sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	69,7	77,9	72,6	65,2	62,7
clinopiroxênio	5,4	4,3	5,3	6,8	5,5
anfíbólio	4,5	2,2	3,4	5,8	6,9
olivina	8,8	7,8	9,5	10,2	7,3
serpentina	5,0	3,7	4,2	5,5	6,8
outros silicatos	1,8	1,3	1,5	1,7	2,6
espinelio-Cr	1,3	1,0	1,2	1,3	1,8
óxido-Fe	0,5	0,3	0,3	0,6	0,8
mica	0,4	0,2	0,2	0,5	0,6
carbonatos	0,5	0,3	0,3	0,5	1,1
outros	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 45 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – Ganga A

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	13,8	24,1	21,9	40,2
pentlandita	0,7	0,4	0,5	0,7	0,9
pentl_oxid	0,3	0,4	0,2	0,2	0,4
calcopirita	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
calco-covelita	-	-	-	-	-
esfalerita	<0,1	<0,1	-	-	-
pirita	0,6	0,5	0,3	0,5	0,9
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1
arsenopirita	<0,1	-	-	-	<0,1
sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	38,7	32,3	35,3	37,2	43,8
clinopiroxênio	0,7	0,4	0,8	1,0	0,6
anfíbólio	1,8	1,2	1,5	2,3	2,0
olivina	2,6	2,2	2,4	2,1	3,1
serpentina	36,8	41,6	39,7	39,2	32,2
outros silicatos	3,4	4,0	4,0	3,2	3,0
espinelio-Cr	1,3	1,3	1,6	1,5	1,1
óxido-Fe	0,2	<0,1	0,1	0,1	0,4
mica	6,9	10,7	8,0	6,5	5,1
carbonatos	4,9	3,9	4,4	4,2	5,9
outros	0,8	1,0	1,1	1,0	0,6

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 46 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – Ganga B

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	13,8	24,1	21,9	40,2
pentlandita	0,7	0,6	0,7	0,9	0,7
pentl_oxid	0,6	0,7	0,5	0,7	0,7
calcopirita	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	-	-
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	-	-
pirita	1,0	0,6	0,6	0,8	1,6
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	-	-	-	<0,1
Sulf_FeCoNi	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
ortopiroxênio	13,2	11,3	11,9	12,4	15,2
clinopiroxênio	1,0	1,1	1,1	1,0	0,9
anfíbólio	1,6	0,9	1,1	2,0	2,0
olivina	3,1	3,8	4,4	2,9	2,2
serpentina	42,2	44,7	43,4	45,0	38,8
outros silicatos	8,2	12,1	10,4	8,1	5,3
espinelio-Cr	3,9	4,6	5,9	4,5	2,2
óxido-Fe	1,4	1,2	1,2	1,3	1,8
mica	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
carbonatos	22,2	17,8	18,2	19,7	27,7
outros	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 47 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – Ganga C

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	16,2	33,2	25,4	25,2
pentlandita	0,5	0,2	0,2	0,3	1,1
pentl_oxid	0,3	0,1	0,2	0,4	0,3
calcopirita	0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,2
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
pirita	0,3	0,3	0,1	0,3	0,4
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	0,0	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	-	-	-
Sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	27,2	25,1	25,4	27,1	31,3
clinopiroxênio	1,1	0,9	0,9	1,2	1,2
anfíbólio	2,9	1,3	2,0	3,1	5,0
olivina	11,8	15,2	14,6	10,7	7,1
serpentina	24,2	19,6	22,8	26,7	26,4
feldspatos	19,8	23,8	22,8	19,1	14,1
espinelio-Cr	1,1	1,0	1,1	1,5	0,8
óxido-Fe	0,7	0,5	0,7	0,7	0,8
mica	8,3	10,6	7,7	7,2	8,8
carbonatos	1,5	1,2	1,2	1,4	2,3
outros	0,1	<0,1	0,1	0,2	<0,1

Obs: carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon, quartzo.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 48 – Composição mineralógica por fração (% em massa) – Outlier

Fração (mm)	Total	+0,105	+0,105-0,053	-0,053+0,020	-0,020
% massa	100	26,8	31,9	23,7	17,6
pentlandita	1,2	0,2	0,3	1,8	3,5
pentl_oxid	0,2	<0,1	<0,1	0,4	0,4
calcopirita	0,3	<0,1	0,1	0,3	1,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	-	0,0
esfalerita	-	-	-	-	-
pirita	0,5	0,1	0,2	0,8	1,6
pirrotita	0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,3
arsenopirita	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1
Sulf_FeCoNi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	85,7	92,7	89,4	80,8	74,7
clinopiroxênio	7,2	4,8	6,5	9,4	9,0
anfibólio	0,6	0,2	0,3	0,7	1,9
olivina	0,1	0,2	<0,1	0,1	0,1
serpentina	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
outros silicatos	2,6	0,9	2,1	3,6	4,5
espinelio-Cr	0,3	0,1	0,2	0,3	0,6
óxido-Fe	0,6	0,2	0,4	0,8	1,2
mica	0,2	<0,1	0,1	0,3	0,7
carbonatos	<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,2
outros	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,1

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

Características das associações minerais

Pentlandita + Pentlandita Oxidada

OPS

A Tabela 49 e a Figura 70 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra OPS.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 49 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - OPS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	70	20	29	22
Livres(%)	22	11	21	32
Mista em binárias (%)	40	34	45	37
Mista em ternárias (%)	38	54	34	31
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,5	0,9	0,6	0,2
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	2,0	0,9	3,7	0,8
pirrotita	0,1	<0,1	<0,1	0,3
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	1,6	0,4	3,0	0,8
ortopiroxênio	0,5	0,6	0,4	0,7
clinopiroxênio	0,1	<0,1	<0,1	0,2
anfibólio	0,6	0,4	0,6	0,6
olivina	3,0	1,2	2,3	5,2
serpentina	16	7,1	17	22
outros silicatos	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
espinélio-Cr	0,2	0,5	0,1	<0,1
óxido-Fe	12	21	13	4,5
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	2,8	1,5	3,9	2,5
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	0,8	1,7	0,6	0,4
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	1,4	1,3	1,6	1,2
pirrotita	0,4	0,8	0,6	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	1,1	0,4	1,3	1,5
ortopiroxênio	0,9	1,3	0,3	1,2
clinopiroxênio	0,2	0,3	0,2	0,3
anfibólio	1,3	1,3	0,8	1,8
olivina	3,8	3,3	3,2	5,0
serpentina	13	18	12,1	11,1
outros silicatos	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
espinélio-Cr	1,3	3,0	1,0	0,4
óxido-Fe	11	18	9,3	6,3
mica	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
calcita	2,7	4,0	3,0	1,4
outros	0,1	<0,1	0,1	0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 70 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra OPS

POS

A Tabela 50 e a Figura 71 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de POS.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 50 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - POS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	77	20	32	25
Livres (%)	46	37	45	50
Mistas em binárias (%)	30	39	31	26
Mistas em ternárias (%)	24	25	24	24
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,5	1,1	<0,1	0,7
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	4,0	9,6	4,5	1,7
pirrotita	0,4	1,2	0,3	0,3
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	0,2	<0,1	<0,1	0,4
ortopiroxênio	8,8	7,7	6,7	11
clinopiroxênio	0,2	0,4	0,3	0,1
anfibólio	0,5	0,5	<0,1	0,8
olivina	2,6	2,0	3,1	2,5
serpentina	8,1	8,8	9,4	7,0
outros silicatos	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
espinelio-Cr	0,7	0,1	2,1	<0,1
óxido-Fe	2,4	2,3	4,3	1,3
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	1,1	4,6	<0,1	0,6
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	1,0	0,6	1,1	1,0
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	3,2	3,2	3,0	3,4
pirrotita	1,4	2,0	2,7	0,3
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	0,2	0,1	0,5	0,1
ortopiroxênio	4,8	4,2	5,8	4,4
clinopiroxênio	0,4	1,0	0,5	0,2
anfibólio	2,0	1,6	1,2	2,6
olivina	2,2	2,2	2,1	2,3
serpentina	6,7	6,1	4,7	8,1
outros silicatos	0,1	0,2	<0,1	<0,1
espinelio-Cr	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
óxido-Fe	1,0	1,1	0,6	1,1
mica	0,1	0,2	0,1	0,1
calcita	1,0	1,6	1,8	0,2
Outros	<0,1	0,2	<0,1	<0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 71 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra POS

PO

A Tabela 51 e Figura 72 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de PO.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 51 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - PO

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	76	22	32	22
Livres (%)	43	23	35	58
Mistas em binárias (%)	41	49	50	30
Mistas em ternárias (%)	16	28	15	12
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,4	2,6	<0,1	<0,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	12	11	18	6,0
pirrotita	4,8	3,1	10,0	0,6
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	14,3	18,2	15,2	12,0
clinopiroxênio	0,8	0,3	0,1	1,8
anfíbólio	0,2	0,8	0,2	0,1
olivina	1,7	0,2	0,4	3,4
serpentina	3,2	6,0	2,5	2,7
outros silicatos	0,7	0,4	1,5	<0,1
espinélio-Cr	0,1	0,3	0,1	<0,1
óxido-Fe	1,1	3,5	<0,1	1,2
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	2,3	2,6	2,2	2,3
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	0,2	0,3	0,3	0,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	2,4	7,7	1,4	1,4
pirrotita	1,6	3,6	2,1	0,2
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	5,2	9,8	4,2	4,4
clinopiroxênio	0,6	1,5	0,6	0,3
anfíbólio	0,4	0,6	0,2	0,6
olivina	1,4	0,8	1,4	1,7
serpentina	1,5	2,4	1,5	1,3
outros silicatos	0,5	0,6	0,6	0,3
espinélio-Cr	0,1	0,2	<0,1	0,1
óxido-Fe	0,4	0,2	0,7	0,3
mica	0,3	0,1	<0,1	0,6
calcita	1,1	0,3	2,3	0,2
outros	<0,1	0,2	<0,1	<0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 72 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra PO

P

A Tabela 52 e a Figura 73 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra P.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 52 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - P

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	26	33	23
Livres(%)	48	37	63	44
Mistas em binárias (%)	30	32	19	35
Mistas em ternárias (%)	22	31	18	21
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,1	<0,1	0,4	<0,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	4,1	8,2	3,4	3,4
pirrotita	0,1	<0,1	<0,1	0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	0,1	<0,1	<0,1	0,1
ortopiroxênio	18,1	13,2	7,2	23,9
clinopiroxênio	1,4	0,9	3,6	0,5
anfibólio	1,0	2,3	0,2	1,1
olivina	2,7	0,1	0,2	4,4
serpentina	1,5	6,9	0,6	0,7
outros silicatos	0,1	0,6	<0,1	0,1
espinelio-Cr	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
óxido-Fe	0,1	<0,1	<0,1	0,2
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	0,9	<0,1	3,3	<0,1
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	0,2	0,3	0,2	0,2
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	2,7	7,1	3,3	1,4
pirrotita	0,7	0,3	0,5	0,8
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	7,6	6,3	6,0	8,6
clinopiroxênio	2,0	1,3	3,1	1,7
anfibólio	0,3	0,9	0,3	0,2
olivina	1,9	1,3	0,4	2,6
serpentina	1,8	7,0	1,2	0,9
outros silicatos	0,8	<0,1	<0,1	1,3
espinelio-Cr	0,4	2,6	0,1	0,1
óxido-Fe	1,5	2,8	0,1	1,7
mica	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
calcita	1,8	0,9	2,3	1,8
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 73 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra P

Ganga A

A Tabela 53 e a Figura 74 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga A.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 53 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga A

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	60	14	24	22
Livres(%)	19	15	13	24
Mistas em binárias (%)	28	24	26	32
Mistas em ternárias (%)	53	61	61	43
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,2	<0,1	0,3	0,2
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	0,3	0,3	<0,1	0,6
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
ortopiroxênio	3,8	5,5	4,2	2,5
clinopiroxênio	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
anfíbólio	0,8	3,3	<0,1	<0,1
olivina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
serpentina	19,7	11,2	16,2	26,8
outros silicatos	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
espinelio-Cr	0,5	<0,1	<0,1	1,0
óxido-Fe	1,1	<0,1	3,1	<0,1
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	1,9	3,3	1,9	1,1
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	1,9	5,0	1,4	0,6
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	7,4	6,0	13,0	3,9
pirrotita	0,3	1,4	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	1,5	0,5	3,4	0,5
ortopiroxênio	5,9	11,0	5,4	3,8
clinopiroxênio	<0,1	0,2	<0,1	<0,1
anfíbólio	2,2	0,5	0,8	4,3
olivina	0,1	0,2	0,1	0,1
serpentina	19,2	20,2	20,8	17,4
outros silicatos	0,4	<0,1	<0,1	0,8
espinelio-Cr	1,0	0,1	0,9	1,5
óxido-Fe	1,3	2,6	0,6	1,1
mica	1,5	0,2	2,3	1,6
calcita	10,5	13,4	12,6	7,5
outros	<0,1	<0,1	<0,1	0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 74 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra Ganga A

Ganga B

A Tabela 54 e a Figura 75 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga B.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 54 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga B

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	61	16	23	22
Livres(%)	16	12	6	27
Mistas em binárias (%)	38	27	48	38
Mistas em ternárias (%)	46	61	46	36
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,6	1,2	0,9	<0,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	0,7	1,4	1,2	0,1
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	1,7	0,7	1,3	2,5
ortopiroxênio	2,0	0,5	1,8	3,0
clinopiroxênio	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
anfibólio	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
olivina	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
serpentina	11,0	6,8	9,5	14,6
outros silicatos	1,5	2,7	1,6	0,8
espinelio-Cr	0,1	0,1	0,1	<0,1
óxido-Fe	10,2	2,2	21,5	6,0
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	10,4	11,0	9,8	10,5
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	1,5	2,1	1,3	1,2
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	2,4	2,3	1,7	3,0
pirrotita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	2,1	2,5	2,8	1,3
ortopiroxênio	2,2	2,5	3,2	1,3
clinopiroxênio	0,2	0,2	0,1	0,3
anfibólio	0,9	0,8	1,3	0,7
olivina	0,7	1,1	0,9	0,2
serpentina	12,7	16,1	11,6	11,6
outros silicatos	0,7	0,2	0,6	1,1
espinelio-Cr	1,3	2,1	2,0	0,2
óxido-Fe	8,8	15,1	10,2	4,1
mica	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
calcita	11,9	16,3	10,4	10,5
outros	0,1	<0,1	<0,1	0,2

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 75 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra Ganga B

Ganga C

A Tabela 55 e a Figura 76 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga C.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 55 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga C

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	75	16	33	25
Livres(%)	28	0	22	42
Mistas em binárias (%)	36	36	36	36
Mistas em ternárias (%)	36	64	43	23
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	2,3	<0,1	<0,1	4,7
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	1,1	0,3	2,8	<0,1
pirrotita	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	0,6	<0,1	<0,1	1,3
ortopiroxênio	2,2	3,3	3,1	1,2
clinopiroxênio	1,4	<0,1	<0,1	2,8
anfíbólio	0,1	<0,1	<0,1	0,3
olivina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
serpentina	17,9	15,4	21,5	15,9
outros silicatos	1,6	1,1	0,4	2,7
espinelio-Cr	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
óxido-Fe	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
mica	1,1	<0,1	<0,1	2,3
calcita	7,2	15,6	7,9	4,2
outros	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	0,7	2,5	0,8	<0,1
calco-covelita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
esfalerita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
pirita	3,4	2,5	2,3	4,5
pirrotita	0,7	0,1	1,8	<0,1
arsenopirita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
FeNiCoS	0,6	0,4	<0,1	1,2
ortopiroxênio	4,7	8,3	6,9	1,9
clinopiroxênio	0,2	1,3	0,1	<0,1
anfíbólio	1,6	1,0	2,9	0,7
olivina	0,9	0,9	0,4	1,3
serpentina	9,4	23,0	12,1	3,3
outros silicatos	0,6	0,3	1,1	0,4
espinelio-Cr	2,7	0,2	1,6	4,3
óxido-Fe	4,0	4,1	4,5	3,6
mica	0,4	1,2	0,5	0,1
calcita	5,8	18,3	6,5	1,6
outros	0,4	<0,1	1,0	<0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 76 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra Ganga C

Outlier

A Tabela 56 e a Figura 77 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Outlier.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 56 - Formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada - Outlier

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	27	32	24
Livres(%)	46	35	32	50
Mistas em binárias (%)	42	54	50	39
Mistas em ternárias (%)	12	11	18	11
Distribuição - binárias (%)				
calcopirita	0,6	0,0	0,0	0,8
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	10,4	32,1	22,5	5,3
pirrotita	0,3	0,0	0,9	0,2
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	25,2	19,8	18,0	27,2
clinopiroxênio	3,4	1,4	1,0	4,1
anfíbólio	0,1	0,0	0,1	0,1
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,0	0,1	0,2	0,0
outros silicatos	0,6	0,0	0,0	0,8
espinelio-Cr	0,2	0,5	0,0	0,1
óxido-Fe	1,2	0,0	7,8	0,2
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
calcopirita	0,4	0,4	0,1	0,4
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	2,0	0,3	2,3	2,2
pirrotita	0,3	0,6	0,5	0,2
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,1	0,5	0,0	0,0
ortopiroxênio	6,1	6,7	11,3	5,1
clinopiroxênio	0,7	1,1	1,6	0,5
anfíbólio	1,3	0,0	0,2	1,7
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,2	1,1	0,2	0,0
outros silicatos	0,6	0,1	0,6	0,7
espinelio-Cr	0,1	0,0	0,0	0,1
óxido-Fe	0,7	0,4	0,9	0,7
mica	0,0	0,0	0,1	0,0
calcita	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 77 - Distribuição das formas de associação da pentlandita + pentlandita oxidada na amostra Outlier

Através do processamento das imagens digitais (MLA) é possível determinar a distribuição do mineral de interesse segundo a sua fração em área (em relação à área total das partículas) ou em perímetro exposto (parcela do mineral exposta no perímetro das partículas). As curvas de espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada são apresentadas da Figura 78 a Figura 85, para frações em área e em perímetro exposto, de acordo com suas respectivas faixas granulométricas

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 78 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - OPS

Figura 79 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - POS

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 80 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - PO

Figura 81 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - P

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 82 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga A

Figura 83 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga B

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 84 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - Ganga C

Figura 85 – Espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada - Outlier

Calcopirita

OPS

A Tabela 57 e a Figura 86 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de OPS.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 57 - Formas de associação de calcopirita - OPS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	70	20	29	22
Livre (%)	18	-	24	33
Mista em binárias (%)	18	10	12	33
Mista em ternárias (%)	64	90	64	35
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	3,0	1,6	0,9	7,0
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	3,7	0,7	0,0	11,5
pirrotita	0,6	0,0	1,8	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	0,3	0,7	0,0	0,1
clinopiroxênio	0,7	0,1	0,4	1,6
anfíbólio	0,0	0,0	0,0	0,0
olivina	0,2	0,1	0,0	0,6
serpentina	4,0	0,8	0,7	11,3
outros silicatos	0,0	0,0	0,0	0,0
espinelio-Cr	0,6	0,3	1,5	0,0
óxido-Fe	4,4	6,0	6,3	0,4
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	0,1	0,1	0,1	0,2
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	11,1	15,5	10,6	6,6
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,1	0,0	0,0	3,4
pirrotita	0,8	1,7	0,7	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,2	0,1	0,1	0,3
ortopiroxênio	4,1	5,4	3,7	3,2
clinopiroxênio	1,6	1,3	3,2	0,2
anfíbólio	3,6	4,6	5,5	0,1
olivina	2,9	2,4	5,2	0,7
serpentina	21,9	32,3	27,2	3,8
outros silicatos	0,0	0,0	0,0	0,0
espinelio-Cr	1,9	1,8	3,6	0,2
óxido-Fe	12,6	22,0	3,7	11,6
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	2,5	2,3	0,8	4,8
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 86 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra de OPS

POS

A Tabela 58 e a Figura 87 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de POS.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 58 - Formas de associação de calcopirita - POS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	77	20	32	25
Livre(%)	34	18	46	26
Mista em binárias (%)	36	37	24	50
Mista em ternárias (%)	30	45	29	24
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	1,9	12,8	0,0	0,4
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	6,2	10,2	10,2	0,2
pirrotita	1,2	0,1	0,0	2,9
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	13,7	6,7	8,6	22,1
clinopiroxênio	1,4	0,7	1,7	1,3
anfibólio	1,1	4,0	1,2	0,0
olivina	0,1	0,1	0,1	0,0
serpentina	8,6	1,4	1,0	20,0
outros silicatos	0,2	0,0	0,0	0,4
espinélio-Cr	0,1	0,5	0,2	0,0
óxido-Fe	0,9	0,0	0,0	2,4
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	0,5	0,3	1,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	5,1	6,9	5,8	3,6
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,3	2,5	2,0	0,1
pirrotita	1,3	0,7	1,0	1,8
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	6,5	10,4	8,5	2,8
clinopiroxênio	2,6	2,6	0,3	5,4
anfibólio	0,5	2,8	0,1	0,2
olivina	1,1	0,2	0,6	2,0
serpentina	8,2	17,8	5,5	8,0
outros silicatos	0,2	0,5	0,3	0,0
espinélio-Cr	0,0	0,2	0,0	0,0
óxido-Fe	2,2	0,0	4,6	0,0
mica	0,2	0,5	0,1	0,2
calcita	0,2	0,3	0,0	0,3
outros	0,3	0,1	0,5	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e ankerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 87 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra de POS

PO

A Tabela 59 e Figura 88 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de PO.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 59 - Formas de associação de calcopirita - PO

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	76	22	32	22
Livre(%)	40	23	34	54
Mista em binárias (%)	31	46	34	19
Mista em ternárias (%)	29	31	31	27
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	3,6	13,2	0,2	0,0
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,6	1,0	4,2	0,1
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	20,6	22,5	23,4	17,5
clinopiroxênio	3,7	7,1	5,1	0,6
anfibólio	0,5	0,6	0,9	0,2
olivina	0,0	0,1	0,0	0,0
serpentina	0,1	0,1	0,1	0,1
outros silicatos	0,1	0,1	0,2	0,0
espinelio-Cr	0,2	0,2	0,4	0,0
óxido-Fe	0,0	0,0	0,0	0,0
mica	0,0	0,0	0,0	0,1
calcita	0,3	1,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	1,0	1,5	1,4	0,4
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,9	0,9	1,9	2,5
pirrotita	1,8	1,0	5,1	0,1
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	9,4	9,5	14,4	5,8
clinopiroxênio	1,2	2,5	1,3	0,2
anfibólio	1,3	1,2	1,9	0,9
olivina	3,4	3,8	0,1	5,4
serpentina	5,5	8,3	3,9	5,0
outros silicatos	0,9	0,2	0,3	1,7
espinelio-Cr	0,3	0,1	0,9	0,0
óxido-Fe	0,4	0,8	0,0	0,5
mica	0,0	0,0	0,0	0,1
calcita	1,9	0,2	0,1	4,3
outros	0,3	1,1	0,0	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 88 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra de PO

P

A Tabela 34 e a Figura 20 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de P.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 60 - Formas de associação de calcopirita - P

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	26	33	23
Livre(%)	57	30	40	79
Mista em binária (%)	26	37	45	5
Mista em ternária (%)	17	33	15	16
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	0,0	0,1	0,0	0,0
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,4	0,0	0,0	3,1
pirrotita	1,0	0,0	2,1	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	15,8	31,3	27,3	1,6
clinopiroxênio	0,3	1,7	0,1	0,2
anfibólio	0,0	0,1	0,0	0,0
olivina	7,1	0,0	15,5	0,0
serpentina	0,0	0,0	0,0	0,0
outros silicatos	0,1	0,7	0,0	0,0
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,0	0,0
óxido-Fe	0,0	0,0	0,0	0,0
mica	0,1	0,1	0,1	0,1
calcita	0,3	3,4	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	2,6	3,5	3,3	1,7
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,8	1,6	3,0	0,6
pirrotita	3,1	0,0	0,2	6,6
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	4,0	15,1	1,6	4,4
clinopiroxênio	1,6	4,3	2,1	0,5
anfibólio	1,2	1,9	1,6	0,7
olivina	0,1	0,5	0,0	0,1
serpentina	1,7	2,2	2,4	0,9
outros silicatos	0,3	2,1	0,0	0,3
espinelio-Cr	0,1	0,8	0,0	0,2
óxido-Fe	0,3	0,0	0,6	0,1
mica	0,1	0,0	0,1	0,0
calcita	0,1	1,0	0,0	0,0
outros	0,1	0,0	0,2	0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 89 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra de P

Ganga A

A Tabela 61 e a Figura 90 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga A.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 61 - Formas de associação de Calcopirita - Ganga A

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	60	14	24	22
Livre(%)	26	11	15	39
Mista em binárias (%)	52	37	61	51
Mista em ternárias (%)	23	51	24	10
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	10,4	0,0	20,7	7,2
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	10,4	13,5	9,0	10,1
clinopiroxênio	0,0	0,0	0,0	0,0
anfíbólio	0,0	0,0	0,0	0,0
olivina	0,1	0,0	0,3	0,0
serpentina	28,4	12,1	30,6	33,4
outros silicatos	0,1	0,5	0,0	0,0
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,0	0,0
óxido-Fe	2,1	11,1	0,0	0,0
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	0,1	0,1	0,2	0,0
outros	0,0	0,1	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	6,0	18,8	4,2	2,2
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,8	8,2	0,5	0,2
pirrotita	0,0	0,2	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,5	0,0	1,4	0,0
ortopiroxênio	4,9	10,4	7,0	1,2
clinopiroxênio	0,0	0,0	0,1	0,0
anfíbólio	1,6	0,2	0,9	2,6
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	4,6	7,6	6,2	2,4
outros silicatos	0,0	0,0	0,0	0,0
espinelio-Cr	0,2	0,8	0,1	0,0
óxido-Fe	0,6	2,9	0,1	0,1
mica	0,2	0,0	0,3	0,3
calcita	2,0	2,1	3,0	1,3
outros	0,0	0,0	0,1	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 90 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra Ganga A

Ganga B

A Tabela 62 e a Figura 91 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga B.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 62 - Formas de associação de calcopirita - Ganga B

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	61	16	23	22
Livre(%)	18	-	31	18
Mista em binárias (%)	24	27	11	37
Mista em ternárias (%)	58	73	58	45
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	1,1	1,4	1,1	0,9
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	0,7	2,4	0,0	0,0
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	1,9	4,3	1,2	0,6
clinopiroxênio	0,1	0,3	0,0	0,0
anfibólio	0,0	0,0	0,0	0,1
olivina	0,3	0,9	0,0	0,0
serpentina	9,8	13,9	1,9	15,4
outros silicatos	0,7	1,4	0,6	0,2
espinelio-Cr	1,5	1,1	0,5	3,3
óxido-Fe	0,3	0,0	0,0	0,9
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	7,4	1,2	5,2	16,2
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	11,6	11,3	13,0	10,3
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,0	1,4	1,0	0,4
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,2	0,0	0,5	0,0
ortopiroxênio	4,0	9,0	2,8	0,6
clinopiroxênio	0,6	0,7	0,3	0,9
anfibólio	1,8	1,6	1,3	2,7
olivina	0,1	0,3	0,1	0,0
serpentina	15,9	17,2	17,3	13,1
outros silicatos	0,3	0,7	0,1	0,2
espinelio-Cr	2,2	3,7	1,3	1,7
óxido-Fe	5,4	7,5	3,2	6,0
mica	0,0	0,1	0,0	0,0
calcita	14,8	19,6	16,1	8,8
outros	0,3	0,0	0,8	0,1

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 91 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra Ganga B

Ganga C

A Tabela 63 e a Figura 92 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga C.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 63 - Formas de associação de calcopirita - Ganga C

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	75	16	33	25
Livre(%)	27	63	17	22
Mista em binária (%)	50	8	41	74
Mista em ternária (%)	23	29	41	4
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	2,8	0,0	0,0	6,7
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	0,0	0,2	0,0	0,0
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	31,0	3,2	39,5	34,4
clinopiroxênio	0,0	0,0	0,0	0,0
anfibólio	0,1	0,5	0,0	0,0
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	1,4	4,2	1,6	0,0
outros silicatos	0,0	0,0	0,0	0,0
espinelio-Cr	0,1	0,0	0,3	0,0
óxido-Fe	0,0	0,0	0,0	0,0
mica	6,7	0,1	0,0	15,6
calcita	7,5	0,1	0,0	17,6
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	4,6	5,3	7,9	1,2
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	0,3	0,1	0,3	0,4
pirrotita	0,0	0,0	0,1	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	1,6	3,0	1,7	0,9
clinopiroxênio	0,0	0,1	0,0	0,0
anfibólio	0,2	0,4	0,3	0,0
olivina	0,3	0,3	0,6	0,0
serpentina	1,6	3,2	2,5	0,1
outros silicatos	0,2	0,3	0,4	0,0
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,0	0,0
óxido-Fe	1,5	1,1	2,5	0,7
mica	4,5	2,4	10,0	0,1
calcita	8,3	12,8	14,9	0,3
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 92 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra Ganga C

Out

A Tabela 64 e a Figura 93 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de calcopirita (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Out.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Tabela 64 - Formas de associação de calcopirita - Outlier

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	27	32	24
Livre(%)	43	-	-	60
Mista em binárias (%)	34	59	44	29
Mista em ternárias (%)	22	41	56	11
Distribuição - binárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	0,7	0,0	0,0	1,0
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	1,2	0,7	0,4	1,4
pirrotita	0,0	0,0	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	31,2	55,4	42,0	25,2
clinopiroxênio	1,0	2,6	1,2	0,8
anfibólio	0,0	0,0	0,0	0,0
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,0	0,0	0,0	0,0
outros silicatos	0,0	0,1	0,2	0,0
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,0	0,0
óxido-Fe	0,0	0,0	0,0	0,0
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
calcita	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
pentl. + pentl. ox.	2,2	4,9	1,5	2,1
calco-covelita	0,0	0,0	0,0	0,0
esfalerita	0,0	0,0	0,0	0,0
pirita	4,2	1,9	13,4	2,2
pirrotita	1,5	15,7	0,0	0,0
arsenopirita	0,0	0,0	0,0	0,0
FeNiCoS	0,0	0,0	0,0	0,0
ortopiroxênio	8,6	14,4	30,6	2,3
clinopiroxênio	1,7	2,8	3,0	1,2
anfibólio	1,9	0,3	7,3	0,7
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,0	0,0	0,0	0,0
outros silicatos	0,1	0,3	0,1	0,1
espinelio-Cr	0,1	0,0	0,0	0,1
óxido-Fe	1,9	0,7	0,1	2,6
mica	0,1	0,0	0,0	0,1
calcita	0,0	0,2	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 93 - Distribuição das formas de associação de calcopirita na amostra Outlier

As curvas de espectro de liberação da pentlandita + pentlandita oxidada são apresentadas da Figura 94 a Figura 101, para frações em área e em perímetro exposto, de acordo com suas respectivas faixas granulométricas

Figura 94 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra OPS

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 95 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra POS

Figura 96 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra PO

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 97 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra P

Figura 98 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra Ganga A

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 99 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra Ganga B

Figura 100 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra Ganga C

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 101 – Espectro de liberação de calcopirita na amostra Outlier

Sulfetos

OPS

A Tabela 39 e Figura 33 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de OPS.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 65 – Formas de associação de sulfetos - OPS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	70	20	29	22
Livres(%)	29	16	30	37
Mistos em binárias (%)	39	37	41	36
Mistos em ternárias (%)	33	46	28	27
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	0,6	0,6	0,3	0,9
clinopiroxênio	0,1	0,0	0,1	0,2
anfibólio	0,5	0,3	0,6	0,5
olivina	3,0	1,1	3,0	4,5
serpentina	17,0	9,4	17,7	22,4
espinelio-Cr	0,2	0,5	0,2	0,0
óxido-Fe	14,7	24,4	15,9	5,5
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	2,6	1,2	3,7	2,3
outros silicatos	0,0	0,0	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	1,1	1,8	0,5	1,2
clinopiroxênio	0,4	0,3	0,3	0,7
anfibólio	1,3	1,5	1,0	1,5
olivina	3,9	3,4	3,5	4,8
serpentina	12,5	18,0	11,1	9,8
espinelio-Cr	1,4	3,0	1,1	0,6
óxido-Fe	9,1	14,3	8,0	6,1
mica	0,1	0,1	0,0	0,0
carbonatos	2,6	3,7	2,6	1,6
outros silicatos	0,0	0,1	0,0	0,1
outros	0,1	0,0	0,1	0,1

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 102 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra OPS

POS

A Tabela 66 e Figura 103 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra POS.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 66 – Formas de associação de sulfetos - POS

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	77	20	32	25
Livres(%)	50	52	51	50
Mistos em binárias (%)	34	32	34	34
Mistos em ternárias (%)	16	16	14	17
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	9,8	7,0	8,8	11,6
clinopiroxênio	0,6	0,3	0,6	0,7
anfibólio	0,8	0,7	0,9	0,8
olivina	2,0	2,4	1,8	2,0
serpentina	15,1	15,3	14,9	15,1
espinelio-Cr	0,4	0,2	1,2	0,0
óxido-Fe	2,8	2,5	3,7	2,2
mica	0,4	0,0	0,0	0,8
carbonatos	1,3	3,8	1,4	0,4
outros silicatos	0,5	0,0	1,2	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	4,7	4,9	5,2	4,2
clinopiroxênio	0,5	0,9	0,6	0,3
anfibólio	1,3	1,5	0,5	1,8
olivina	1,8	1,1	1,6	2,2
serpentina	5,3	4,9	3,5	6,7
espinelio-Cr	0,1	0,1	0,1	0,0
óxido-Fe	1,1	0,9	1,4	0,9
mica	0,2	0,6	0,1	0,1
carbonatos	0,7	0,7	1,1	0,5
outros silicatos	0,2	0,6	0,1	0,1
outros	0,1	0,1	0,1	0,0

Obs: **outros silicatos** = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; **carbonatos** = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; **outros** = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 103 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra POS

PO

A Tabela 67 e Figura 104 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm, para a amostra PO.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 67 – Formas de associação de sulfetos - PO

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	76	22	32	22
Livres(%)	57	47	58	61
Mistos em binárias (%)	30	37	30	27
Mistos em ternárias (%)	13	16	13	12
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	14,8	24,9	12,4	13,3
clinopiroxênio	1,7	3,7	1,1	1,5
anfibólio	0,6	0,6	0,3	0,9
olivina	1,6	0,1	1,0	2,7
serpentina	4,7	3,8	4,4	5,4
espinelio-Cr	0,1	0,2	0,1	0,1
óxido-Fe	2,0	1,9	3,1	1,0
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	4,1	1,6	6,5	2,6
outros silicatos	0,4	0,2	0,9	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	5,7	6,4	6,0	5,1
clinopiroxênio	0,6	1,4	0,7	0,3
anfibólio	0,4	0,7	0,4	0,4
olivina	1,1	1,5	0,9	1,2
serpentina	2,3	4,0	1,9	2,2
espinelio-Cr	0,2	0,2	0,1	0,2
óxido-Fe	0,9	0,6	0,6	1,2
mica	0,2	0,0	0,2	0,4
carbonatos	0,8	0,6	1,2	0,5
outros silicatos	0,5	0,5	0,4	0,6
outros	0,1	0,4	0,1	0,0

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 104 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra PO

P

A Tabela 68 e Figura 105 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra P.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 68 – Formas de associação de sulfetos - P

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	26	33	23
Livres(%)	54	51	60	50
Mistos em binárias (%)	33	28	29	36
Mistos em ternárias (%)	13	21	10	13
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	22,2	19,0	17,6	25,9
clinopiroxênio	2,1	1,0	5,2	0,4
anfibólio	0,8	1,5	0,1	1,1
olivina	2,9	0,1	2,4	3,9
serpentina	2,0	1,3	2,3	1,9
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,1	0,0
óxido-Fe	0,8	4,5	0,1	0,3
mica	1,2	0,0	0,1	2,2
carbonatos	0,5	0,2	1,5	0,0
outros silicatos	0,3	0,5	0,0	0,5
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	5,3	5,6	4,7	5,7
clinopiroxênio	1,1	1,3	0,6	1,3
anfibólio	0,4	1,4	0,4	0,2
olivina	1,1	1,5	0,3	1,5
serpentina	1,9	6,5	2,0	0,8
espinelio-Cr	0,3	1,7	0,1	0,1
óxido-Fe	1,1	0,9	0,7	1,5
mica	0,2	0,1	0,3	0,1
carbonatos	1,3	1,7	1,2	1,3
outros silicatos	0,5	0,2	0,0	0,8
outros	0,1	0,0	0,0	0,1

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 105 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra P

Ganga A

A Tabela 69 e Figura 106 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm para a amostra de Ganga A.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 69 – Formas de associação de Sulfetos - Ganga A

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	60	14	24	22
Livres(%)	24	22	16	32
Mistos em binárias (%)	42	44	46	39
Mistos em ternárias (%)	33	34	39	29
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	9,2	15,0	11,3	4,3
clinopiroxênio	0,0	0,0	0,0	0,0
anfibólio	0,4	1,8	0,0	0,0
olivina	0,0	0,0	0,1	0,0
serpentina	26,0	19,3	23,9	31,2
espinelio-Cr	0,2	0,0	0,0	0,6
óxido-Fe	2,3	4,7	3,5	0,0
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	4,3	3,2	6,9	2,9
outros silicatos	0,0	0,1	0,0	0,0
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	6,4	7,1	8,9	4,2
clinopiroxênio	0,1	0,1	0,1	0,2
anfibólio	1,6	0,3	0,7	2,9
olivina	0,1	0,1	0,1	0,1
serpentina	14,4	14,6	16,6	12,6
espinelio-Cr	0,8	0,3	0,8	1,1
óxido-Fe	1,5	2,0	1,0	1,7
mica	1,9	0,1	4,3	1,0
carbonatos	6,3	9,5	6,3	4,5
outros silicatos	0,2	0,0	0,0	0,5
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 106 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra Ganga A

Ganga B

A Tabela 70 e Figura 107 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm, na amostra de Ganga B.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 70 – Formas de associação de Sulfetos - Ganga B

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	61	16	23	22
Livres(%)	28	18	25	36
Mistos em binárias (%)	36	33	40	34
Mistos em ternárias (%)	36	48	35	30
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	2,6	1,9	2,6	2,9
clinopiroxênio	0,1	0,1	0,1	0,1
anfibólio	0,0	0,0	0,0	0,0
olivina	0,1	0,2	0,1	0,0
serpentina	11,9	9,5	12,5	12,8
espinelio-Cr	0,4	0,3	0,4	0,5
óxido-Fe	8,1	6,2	12,4	5,7
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	11,5	12,6	10,7	11,6
outros silicatos	1,4	2,6	1,3	0,9
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	3,0	3,9	3,4	2,2
clinopiroxênio	0,3	0,4	0,2	0,3
anfibólio	1,0	1,4	1,1	0,8
olivina	0,6	0,8	0,9	0,2
serpentina	12,7	16,3	11,3	11,7
espinelio-Cr	1,3	2,1	1,8	0,4
óxido-Fe	5,8	8,9	7,1	2,9
mica	0,1	0,1	0,0	0,1
carbonatos	10,0	13,7	8,7	8,8
outros silicatos	1,3	0,6	0,8	2,1
outros	0,1	0,0	0,1	0,2

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 107 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra Ganga B

Ganga C

A Tabela 71 e Figura 108 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm, na amostra de Ganga C.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 71 – Formas de associação de sulfetos - Ganga C

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	75	16	33	25
Livres(%)	37	38	24	45
Mistos em binárias (%)	36	28	38	37
Mistos em ternárias (%)	27	33	38	18
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	5,8	3,0	9,2	4,6
clinopiroxênio	1,0	1,0	0,0	1,7
anfibólio	0,1	0,1	0,0	0,2
olivina	0,3	0,1	0,8	0,0
serpentina	16,7	13,9	17,9	17,0
espinelio-Cr	0,0	0,0	0,1	0,0
óxido-Fe	2,8	0,5	1,7	4,4
mica	1,4	0,0	0,0	2,8
carbonatos	6,6	9,3	7,9	4,6
outros silicatos	1,0	0,6	0,3	1,6
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	4,2	5,5	6,7	2,0
clinopiroxênio	0,1	0,3	0,1	0,0
anfibólio	1,9	0,7	2,2	2,1
olivina	0,8	1,1	0,5	0,9
serpentina	8,4	11,8	13,0	3,9
espinelio-Cr	2,1	0,1	1,9	2,9
óxido-Fe	2,5	3,4	3,7	1,4
mica	0,9	0,9	2,0	0,2
carbonatos	5,6	9,2	6,7	3,6
outros silicatos	0,5	0,3	0,8	0,3
outros	0,3	0,0	0,7	0,2

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 108 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra Ganga C

Out

A Tabela 72 e Figura 109 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação de sulfetos (% em massa), entre livre e misto em partículas binárias (2 fases) ou misto em partículas ternárias (3 ou mais fases minerais), para as frações granulométricas acima de 0,020 mm, na amostra de Out.

APÊNDICE 6
Resultados MLA

Tabela 72 – Formas de associação de sulfetos - Outlier

Fração (mm)	Total +0,020	-0,15+0,105	-0,105+0,053	-0,053+0,020
% massa	82	27	32	24
Livres(%)	60	65	48	61
Mistos em binárias (%)	31	26	33	32
Mistos em ternárias (%)	9	9	19	7
Distribuição - binárias (%)				
ortopiroxênio	24,4	23,2	26,2	24,1
clinopiroxênio	2,7	1,2	0,9	3,4
anfibólio	1,3	0,0	0,1	1,8
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,1	1,1	0,1	0,0
espinelio-Cr	0,1	0,4	0,0	0,1
óxido-Fe	1,3	0,1	5,0	0,6
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	0,1	0,0	0,8	0,0
outros silicatos	1,1	0,2	0,1	1,5
outros	0,0	0,0	0,0	0,0
Distribuição - ternárias (%)				
ortopiroxênio	5,5	6,6	13,5	3,5
clinopiroxênio	0,7	1,2	1,5	0,5
anfibólio	1,2	0,1	2,2	1,1
olivina	0,0	0,0	0,0	0,0
serpentina	0,1	0,1	0,4	0,0
espinelio-Cr	0,1	0,0	0,0	0,1
óxido-Fe	1,1	0,9	0,9	1,2
mica	0,0	0,0	0,0	0,0
carbonatos	0,0	0,0	0,0	0,0
outros silicatos	0,4	0,1	0,4	0,4
outros	0,0	0,0	0,0	0,0

Obs: outros silicatos = quartzo, feldspato potássico e plagioclásio; carbonatos = calcita, dolomita, magnesita e anquerita; outros = clorita, espinélio-Cr, óxido-Fe, ilmenita, apatita, coríndon.

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 109 - Distribuição das formas de associação de sulfetos na amostra Outlier

As curvas de espectro de sulfetos são apresentadas da Figura 110 a Figura 117, para frações em área e em perímetro exposto, de acordo com suas respectivas faixas granulométricas

Figura 110 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra OPS

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 111 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra POS

Figura 112 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra PO

Figura 113 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra P

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 114 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra Ganga A

Figura 115 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra Ganga B

Figura 116 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra Ganga C

APÊNDICE 6

Resultados MLA

Figura 117 – Espectro de liberação de sulfetos na amostra Outlier

APÊNDICE 7

Composição química calculada por fração a partir do MLA (% em massa)

OPS

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	20,0	0,94	0,06	0,03	11,4	0,91	36,3	35,5
-0.105+0.053	29,3	0,95	0,04	0,03	11,1	0,91	36,6	34,9
-0.053+0.020	21,6	1,03	0,05	0,03	10,9	0,98	36,0	33,1
-0.020	29,1	0,96	0,11	0,03	10,6	1,07	34,5	32,3
Total calculado	100,0	0,97	0,07	0,03	11,0	0,97	35,8	33,9
Total dosado		0,88	0,19	0,03	9,80	1,41	35,9	34,5

POS

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	20,1	0,37	0,04	0,01	8,63	0,5	46,6	31,3
-0.105+0.053	31,9	0,44	0,08	0,00	8,74	0,61	45,3	31,5
-0.053+0.020	24,8	0,71	0,09	0,01	9,01	1,04	44,3	29,7
-0.020	23,2	0,98	0,17	0,01	9,29	1,59	43,2	28,2
Total calculado	100,0	0,62	0,09	0,01	8,92	0,92	44,8	30,2
Total dosado		0,57	0,11	0,03	9,18	0,93	43,8	29,3

PO

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	21,6	0,17	0,04	0,00	8,10	0,24	50,1	29,0
-0.105+0.053	32,3	0,25	0,03	0,00	8,32	0,4	49,4	28,8
-0.053+0.020	22,0	0,36	0,06	0,00	8,55	0,63	48,5	28,1
-0.020	24,1	0,80	0,15	0,01	9,06	1,26	47,1	26,7
Total calculado	100,0	0,39	0,06	0,00	8,51	0,62	48,8	28,2
Total dosado		0,47	0,11	0,03	9,25	0,86	47,6	27,2

P

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	25,6	0,15	0,01	0,00	8,01	0,16	50,9	29,4
-0.105+0.053	33,3	0,21	0,04	0,00	8,29	0,37	50,0	29,2
-0.053+0.020	23,4	0,54	0,05	0,00	8,52	0,75	49,0	28,3
-0.020	17,7	0,61	0,13	0,00	8,95	1,06	47,9	27,0
Total calculado	100,0	0,34	0,05	0,00	8,39	0,53	49,6	28,7
Total dosado		0,44	0,09	0,03	9,37	0,67	49,1	27,2

APÊNDICE 7

Composição química calculada por fração a partir do MLA (% em massa)

Ganga A

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
-0.21+0.105	13,8	0,31	0,04	0,01	6,99	0,43	41,6	28,6
-0.105+0.053	24,1	0,31	0,04	0,01	6,95	0,35	41,9	28,6
-0.053+0.020	21,9	0,39	0,07	0,01	7,16	0,5	41,9	28,6
-0.020	40,2	0,43	0,05	0,00	7,53	0,74	42,0	28,6
Total calculado	100,0	0,38	0,05	0,01	7,24	0,55	41,9	28,6
Total dosado		0,42	0,06	0,03	7,21	0,52	38,5	28,5

Ganga B

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	16,0	0,44	0,06	0,02	6,97	0,57	37,6	25,2
-0.105+0.053	23,0	0,45	0,05	0,03	7,24	0,56	36,2	25,4
-0.053+0.020	22,0	0,53	0,04	0,02	7,20	0,69	34,5	25,9
-0.020	39,0	0,48	0,08	0,06	7,13	0,92	30,4	26,6
Total calculado	100,0	0,48	0,06	0,04	7,15	0,73	33,8	25,9
Total dosado		0,51	0,10	0,03	7,22	0,67	31,2	27,9

Ganga C

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	16,2	0,19	0,02	0,00	6,40	0,25	51,1	24,1
-0.105+0.053	33,2	0,22	0,02	0,00	6,49	0,17	50,5	24,5
-0.053+0.020	25,4	0,28	0,03	0,00	6,80	0,36	48,8	24,7
-0.020	25,2	0,43	0,05	0,02	6,89	0,53	47,3	25,5
Total calculado	100,0	0,28	0,03	0,01	6,66	0,32	49,4	24,7
Total dosado		0,35	0,04	0,06	8,17	0,38	46,8	22,9

Outlier

Fração	% massa	Ni	Cu	Co	Teores (%)		SiO ₂	MgO
					Fe	S		
+0.105	26,8	0,11	0,01	0,00	7,76	0,15	52,3	28,3
-0.105+0.053	31,9	0,11	0,02	0,00	7,88	0,21	52,3	27,5
-0.053+0.020	23,7	0,69	0,09	0,00	8,96	1,21	50,5	25,6
-0.020	17,6	1,25	0,28	0,01	10,1	2,36	48,5	24,1
Total calculado	100,0	0,45	0,08	0,00	8,49	0,81	51,2	26,7
Total dosado		0,49	0,12	0,01	8,25	1,06	51,3	26,4

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

OPS +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

POS + 0,015 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

PO +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

P +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

Ganga A +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

Ganga B +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

Ganga C +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros

APÊNDICE 8

Imagens das fases discriminadas ao MLA com destaque para pentlandita

Out +0,105 mm

pentlandita	pentl_oxid	calcopirita
calco-covelita	esfalerita	pirita
pirrotita	arsenopirita	FeCoNiS
ortopirox	clinopirox	anfibolio
olivina	serpentina	mica
carbonatos	outros silicatos	outros