VIVIANE KOTANI SHIMIZU

**CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIOS DE
COBRE DA MINA DO SOSSEGO - REGIÃO DE CARAJÁS**

São Paulo

2012

VIVIANE KOTANI SHIMIZU

**CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIOS DE
COBRE DA MINA DO SOSSEGO - REGIÃO DE CARAJÁS**

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

São Paulo

2012

VIVIANE KOTANI SHIMIZU

**CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIOS DE
COBRE DA MINA DO SOSSEGO - REGIÃO DE CARAJÁS**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mineral.

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

São Paulo

2012

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

São Paulo, 22 de agosto de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Shimizu,Viviane Kotani

**Classificação e caracterização de tipos de minério de cobre da Mina do Sossego – Região de Carajás.
121 p.**

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

1. Análise por agrupamento 2. Caracterização tecnológica-3. Mina do Sossego I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todas as pessoas que trabalharam no LCT – Laboratório de Caracterização da EPUSP na época em que desenvolvi este trabalho.

Em especial agradeço a Juliana, quem mais me ajudou neste projeto na parte de difração de raios X e análise por agrupamento, e ao Daniel por seus ensinamentos na parte de caracterização tecnológica automatizada. Aos pesquisadores: Manuela, Carina, Mariane, Liz, André, Giuliana e Freud por tantas outras contribuições e ensinamentos.

Agradeço àqueles que me ajudaram na preparação das amostras, um trabalho extenso que demandou muitas mãos: Erílio e Carlos na britagem, moagem e quarteamento, Rafão na moagem de bolas e peneiramento, Vavá na preparação de seções polidas, Rose na montagem para difração de raios X, e em especial ao meu querido amigo Rafael Franca, que participou de quase todas estas etapas e foi sempre uma ótima companhia.

Aos amigos, na época também estagiários do LCT, Lucas e Renata, por todos os momentos agradáveis que passamos juntos.

À VALE, por possibilitar a realização deste estudo.

À EPE – Empresa de Pesquisa Energética, por permitir a continuidade deste trabalho, mais especificamente ao Diretor Elson Ronaldo Nunes e Reneu Rodrigues Silva.

Ao Paulo, por seu companheirismo, amor e paciência.

Aos meus pais, Sérgio e Terezinha e às minhas irmãs, Elaine e Carina, por todo apoio, carinho e confiança.

Em especial agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Henrique Kahn por seus ensinamentos e incentivos.

Muito obrigada a todos!

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	I
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VII
ÍNDICE	VIII
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI

ANEXOS

Anexo 1 – Relação das amostras estudadas

Anexo 2 – Difractogramas das amostras mais representativas de cada grupo

Anexo 3 - Composição química das fases minerais – banco de dados MLA

Anexo 4 - Composições químicas dosadas (FRX) e calculadas (MLA)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	pag.
Figura 1 – Localização da Província Mineral de Carajás no Cráton Amazônico (modificado de GRAINGER et al., 2008).	4
Figura 2 – Mapa geológico da Província Mineral de Carajás (obtido de MONTEIRO et al., 2008a)	10
Figura 3 – (a) Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego e (b) distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermal (modificado da Vale, obtido de MONTEIRO et al., 2008b)	12
Figura 4 – Perfil esquemático mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal nos corpos Sequeirinho e Sossego (MONTEIRO et al., 2008, obtido em AUGUSTO et al., 2008)	13
Figura 5 – Etapas do beneficiamento do minério (fluxograma cedido pela Vale).....	16
Figura 6 - Geometria que descreve o fenômeno de difração (Lei de Bragg).....	18
Figura 7 – Definições gráficas de proximidade de métodos aglomerativos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2006).	22
Figura 8 – Dendograma - representação gráfica de um agrupamento.....	22
Figura 9 – Processamento para análise mineralógica quantitativa automatizada (obtida de FANDRICH et al., 2007)	27
Figura 10 – Método B utilizado para composição das amostras (BERGERMAN, 2009)	28
Figura 11 – Contraparte de testemunhos de sondagens, amostras tais quais.....	29
Figura 12 – Fluxograma das atividades realizadas	30
Figura 13 – Equipamentos utilizados para cominuição inicial da amostra	31
Figura 14 – Amostra antes e depois da primeira etapa de cominuição e homogeneização	32
Figura 15 – Equipamentos utilizados na coleta por difração de raios X	33

Figura 16 – Equipamentos utilizados na etapa de caracterização tecnológica	36
Figura 17 – Procedimentos da análise mineralógica quantitativa automatizada	38
Figura 18 – Foto panorâmica da cava de Sequeirinho (foto maio 2010).....	40
Figura 19 – Foto panorâmica da cava de Sossego (foto maio 2010).....	40
Figura 20 – Dendograma indicando o agrupamento das amostras.....	42
Figura 21 – Distribuição espacial dos agrupamentos de amostras segundo análise de componente principal (PCA), sob diferentes pontos de visada – 7 e 4 grupos.	43
Figura 22 – Comparativo entre os difratogramas	45
Figura 23 - Comparação entre difratogramas mais representativos de cada grupo	46
Figura 24 – Teores de Cu nos grupos definidos (% massa)	47
Figura 25 – Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação <i>rougher</i> e <i>cleaner</i>	52
Figura 26 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração.....	60
Figura 27 – Espectro de liberação da calcopirita em área – <i>cluster A</i>	62
Figura 28 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – <i>cluster</i> <i>A</i>	62
Figura 29 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu- <i>cluster</i> <i>A</i> , total acima de 0,010mm	63
Figura 30 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – <i>cluster D</i>	70
Figura 31 – Espectro de liberação da calcopirita em área – <i>cluster D</i>	72
Figura 32 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – <i>cluster</i> <i>D</i>	72
Figura 33 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - <i>cluster</i> <i>D</i> , total acima de 0,010mm.....	73

Figura 34 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – <i>cluster B</i>	80
Figura 35 – Espectro de liberação da calcopirita em área – <i>cluster B</i>	82
Figura 36 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – <i>cluster B</i>	82
Figura 37 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - <i>cluster B</i> , total acima de 0,010mm	83
Figura 38 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – <i>cluster C</i>	90
Figura 39 - Espectro de liberação da calcopirita em área – <i>cluster C</i>	92
Figura 40 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – <i>cluster C</i> , total acima de 0,010mm	92
Figura 41 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - <i>cluster C</i> , total acima de 0,010mm	93
Figura 42 – Comparação mineralógica	96
Figura 43 – Espectros de liberação da calcopirita em área – total deslamado	97
Figura 44 – Espectros de liberação da calcopirita em perímetro exposto – total deslamado	98
Figura 45 – Espectros de liberação da calcopirita em perímetro exposto – frações +0,21 mm.....	98
Figura 46 – Curvas de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu.....	99
Figura 47 – Comparações entre as composições químicas obtidas por MLA e FRX	100

LISTA DE TABELAS

	pag.
Tabela 1 – Distribuição espacial do agrupamento nos corpos Sequeirinho e Sossego.....	44
Tabela 2 – Distribuição dos tipos litológicos nos grupos	48
Tabela 3 – Análises químicas das amostras cabeças (% em massa).....	50
Tabela 4 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação rougher e cleaner.....	53
Tabela 5 – Resultados de análise granuloquímica – <i>cluster A</i>	54
Tabela 6 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) - <i>cluster A</i>	55
Tabela 7 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores – <i>cluster A</i>	57
Tabela 8 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)	61
Tabela 9 – Grau de liberação da calcopirita - <i>cluster A</i>	63
Tabela 10 – Resultados de análise granuloquímica – <i>cluster D</i>	64
Tabela 11 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – <i>cluster D</i>	65
Tabela 12 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores – <i>cluster D</i>	67
Tabela 13 - Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)	71
Tabela 14 – Grau de liberação da calcopirita - <i>cluster D</i>	73
Tabela 15 – Resultados de análise granuloquímica – <i>cluster B</i>	74
Tabela 16 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – <i>cluster B</i>	75
Tabela 17 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – <i>cluster B</i>	77
Tabela 18 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa).....	81

Tabela 19 – Grau de liberação da calcopirita - <i>cluster B</i>	83
Tabela 20 – Resultados de análise granuloquímica – <i>cluster C</i>	84
Tabela 21 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – <i>cluster C</i>	85
Tabela 22 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – <i>cluster C</i>	87
Tabela 23 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa).....	91
Tabela 24 – Grau de liberação da calcopirita - <i>cluster C</i>	93
Tabela 25 – Sumário dos resultados da caracterização tecnológica.....	94
Tabela 26 – Sumário dos resultados da caracterização tecnológica.....	96

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

	pag.
Fotomicrografia 1 – MO, <i>cluster</i> A, fração -0,21+0,15 mm.....	58
Fotomicrografia 2 – MO, <i>cluster</i> A, fração -0,21+0,15 mm.....	58
Fotomicrografia 3 – MEV, <i>cluster</i> A, fração -0,21+0,15 mm.....	59
Fotomicrografia 4 – MEV, <i>cluster</i> A, fração -0,21+0,15 mm.....	59
Fotomicrografia 5 – MO, <i>cluster</i> D, fração -0,21+0,15 mm.....	68
Fotomicrografia 6 – MO, <i>cluster</i> D, fração -0,21+0,15 mm.....	68
Fotomicrografia 7 – MEV, <i>cluster</i> D, fração -0,21+0,15 mm.....	69
Fotomicrografia 8 – MEV, <i>cluster</i> D, fração -0,21+0,15 mm.....	69
Fotomicrografia 9 – MO, <i>cluster</i> B, fração -0,21+0,15 mm.....	78
Fotomicrografia 10 – MO, <i>cluster</i> B, fração -0,21+0,15 mm.....	78
Fotomicrografia 11 – MEV, <i>cluster</i> B, fração -0,21+0,15 mm.....	79
Fotomicrografia 12 – MEV, <i>cluster</i> B, fração -0,21+0,15 mm.....	79
Fotomicrografia 13 – MO, <i>cluster</i> C, fração -0,21+0,15 mm.....	88
Fotomicrografia 14 – MO, <i>cluster</i> C, fração -0,21+0,15 mm.....	88
Fotomicrografia 15 – MEV, <i>cluster</i> C, fração -0,21+0,15 mm.....	89
Fotomicrografia 16 – MEV, <i>cluster</i> C, fração -0,21+0,15 mm.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQ	Análise química
BSE	Elétrons retroespalhados (<i>backscattered electrons</i>)
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectrômetro por dispersão de energia (<i>energy dispersive spectrometer</i>)
FRX	Fluorescência de raios X
IOCG	<i>Iron Oxide Copper Gold</i>
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
LR	Luz refletida
MEV	Microscópio/microscopia eletrônico(a) de varredura
MLA	<i>Mineral Liberation Analyser</i> (software)
MO	Microscopia óptica
PAN-ICSD	PANalytical Inorganic Crystal Structure Database
PF	Perda ao fogo
PSD	Detector sensível à posição (<i>position sensitive detector</i>)
RIR	<i>Reference Intensity Ratio</i>
SDD	<i>Silicon drift detector</i>
SE	Elétrons secundários (<i>secondary electrons</i>)

ÍNDICE

	pag.
1 APRESENTAÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 RELEVÂNCIA DO PROJETO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS	4
2.1.1 <i>Considerações sobre os depósitos IOCG</i>	4
2.1.2 <i>Geologia da Província Mineral de Carajás</i>	7
2.1.3 <i>Geologia do depósito de Sossego</i>	10
2.1.4 <i>Principais tipos litológicos</i>	14
2.1.5 <i>Beneficiamento do minério da mina de Sossego</i>	15
2.2 TÉCNICAS ANALÍTICAS	17
2.2.1 <i>Difração de raios X</i>	17
2.2.2 <i>Análise por agrupamento (cluster analysis) com base em difração de raios X</i>	20
2.2.3 <i>Caracterização tecnológica</i>	23
2.2.4 <i>Mineralogia quantitativa automatizada por análise de imagens</i>	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS	29
3.2.1 <i>Primeira etapa de cominuição e homogeneização</i>	31
3.2.2 <i>Difração de raios X e análise por agrupamento</i>	32
3.2.3 <i>Caracterização tecnológica</i>	34
3.2.4 <i>Procedimentos da análise de imagem</i>	37

3.2.5	<i>Atividade de campo</i>	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	ANÁLISE POR AGRUPAMENTO	41
4.1.1	<i>Relação agrupamento com a geologia da Mina do Sossego</i>	48
4.2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	50
4.2.1	<i>Composição química das amostras estudadas</i>	50
4.2.2	<i>Distribuição granulométrica das amostras estudadas</i>	52
4.2.3	<i>Cluster A – Sequeirinho</i>	54
4.2.4	<i>Cluster D - Sequeirinho</i>	64
4.2.5	<i>Cluster B - Sossego</i>	74
4.2.6	<i>Cluster C - Sossego</i>	84
4.2.7	<i>Sumário dos resultados de caracterização tecnológica e discussão</i>	94
4.2.8	<i>Validação dos resultados de MLA</i>	99
5	CONCLUSÕES	101
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS COMPLEMENTARES	104
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ANEXOS

Anexo 1 – Relação das amostras estudadas

Anexo 2 – Difrátogramas de raios X das amostras mais representativas de cada grupo

Anexo 3 - Composição química das fases minerais – banco de dados MLA

Anexo 4 - Composições químicas dosadas (FRX) e calculadas (MLA)

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a classificação de cerca de 110 amostras de minério da Mina do Sossego com base nas ferramentas de difração de raios X e análise estatística por agrupamento (*cluster analysis*). A comparação, baseada na posição e intensidade dos picos difratados, permitiu a distinção dos tipos de minérios, sendo que as diferenças entre os grupos referem-se às proporções dos principais minerais constituintes: quartzo, feldspato, actinolita, óxidos de ferro, mica e clorita. Observou-se forte correlação do agrupamento com a origem das amostras. Esta relação deve-se aos diferentes tipos e intensidades das alterações hidrotermais atuantes em cada corpo, que refletem na mineralogia e, conseqüentemente, nos difratogramas de raios X das amostras.

Complementando o trabalho, foram conduzidos estudos de caracterização tecnológica em amostras compostas dos tipos identificados, os quais permitiram definir a composição mineralógica das amostras e outros parâmetros relevantes ao beneficiamento. Vários são os minerais de ganga: quartzo, plagioclásio, feldspato, anfíbólio, magnetita, apatita, epídoto, clorita, escapolita, micas e calcita. A calcopirita é praticamente o único mineral de minério, e ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. Com exceção da pirita, os demais sulfetos (calcocita, siegenita e milerita) ocorrem como traços. As curvas de liberação da calcopirita demonstram que as amostras do corpo Sossego possuem maior grau de liberação do que as de Sequeirinho.

A metodologia para classificação de amostras mostrou-se bastante eficiente, possibilitando a análise de grande número de amostras, de forma objetiva e com resultado satisfatório, tendo-se verificado não só distinções mineralógicas entre estes como também características distintas frente ao processo de concentração.

ABSTRACT

This work presents the classification of approximately 110 copper ore samples from Sossego Mine using cluster analysis and X-ray diffraction technique. The comparison based on the position and intensity of the diffracted peaks allowed the distinction the major ore types differentiated by the proportion of major minerals: quartz, feldspar, actinolite, iron oxides, mica and chlorite. There was a strong correlation between the grouping and the location of the samples in Sequeirinho and Sossego orebodies. This relationship is due to different types and intensities of hydrothermal alteration prevailing in each body, which reflect the mineralogy and thus the X-ray diffractograms of samples.

In addition, technological characterization studies on composed samples from the defined ore types were carried out based in order to gather mineralogical composition and other relevant parameters for mineral processing. There are several gangue minerals, including: quartz, plagioclase, feldspar, amphibole, magnetite, apatite, epidote, chlorite, scapolite, mica and calcite. Chalcopyrite is essentially the only valuable mineral. It occurs both as microcrystals included in other minerals such as larger crystals. Excepting pyrite, other sulfides (chalcocite, millerite and siegenite) occur as traces. Chalcopyrite liberation curves indicate that samples from Sossego have higher liberation degree than those from Sequeirinho.

The proposed method for classification of ore samples proved to be very efficient. It enables the analysis of large numbers of samples in a short time with a satisfactory result allowing distinctions of the ore types regarding to their mineralogical composition as well as parameters for mineral processing.

1 APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

A Mina do Sossego, localizada na Província Mineral de Carajás no Estado do Pará, é a segunda maior reserva de cobre brasileira e contribui atualmente com cerca de 55% da produção nacional de concentrado de cobre (dados referentes a 2010 – RIBEIRO 2011). O início da exploração deu-se em 2004 e representou um marco importante para a indústria de cobre, por ser a primeira dentre vários depósitos em desenvolvimento na região a entrar em operação.

Os depósitos de Igarapé Bahia, Alemão, Cristalino, Gameleira e Alvo 118 encontram-se atualmente em desenvolvimento, e o de Salobo, recém iniciou sua operação. Todos estes depósitos, incluindo Sossego, são de porte internacional e classificados como do tipo IOCG (*iron oxide copper gold*).

São características importantes destes depósitos o forte controle estrutural, alterações hidrotermais expressivas, abundância de óxidos de ferro apresentando baixo teor de Ti (magnetita e/ou hematita), mineralização de cobre com ou sem ouro associado, assinatura geoquímica distinta (elementos terras raras, Co, Ag, $\pm$ U, P), entre outras.

A Província Mineral de Carajás está no rol dos principais distritos metalogenéticos IOCG em termos econômicos (WILLIAMS et al., 2005). Os depósitos desta região, apesar de geneticamente relacionados, possuem diferentes assembléias minerais e minerais de interesse econômico, a depender da composição das rochas hospedeiras e dos fluidos mineralizantes (MONTEIRO et al. 2008a). Possuem elevada complexidade mineralógica resultante da superimposição das alterações hidrotermais e forte controle estrutural, condições que contribuem para a elevada complexidade geológica e, conseqüentemente, dificultam a classificação de amostras.

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso para avaliar o método de classificação de amostras de minério com base nas técnicas de difração de raios X e análise estatística por agrupamento (*cluster analysis*). A comparação, baseada na

posição e intensidade dos picos difratados, equivale à comparação entre as principais fases minerais das amostras.

Escolheu-se o caso de Sossego devido a diversos fatores: importância econômica (tanto em relação ao depósito em si quanto em relação a província metalogenética), complexidade geológica favorável para a proposta (ampla variabilidade mineralógica) e “disponibilidade” de material para estudo (material cedido pela Vale). Foram classificadas cerca de 110 amostras de minério, correspondentes a trechos de testemunhos de sondagens de frentes de lavras antigas.

Ambas as técnicas analíticas são amplamente utilizadas no setor mineral. A difração de raios X, geralmente associada com análises químicas, é utilizada em diversas etapas de um evento mineiro: em auxílio à exploração, lavra (blendagens), processos de beneficiamento (associação mineral), além de estudos de gênese e controles de mineralização (ANTONIASSI et al. 2008). A análise por agrupamento é muito utilizada quando se busca encontrar algum padrão de correlação entre objetos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2006).

Esta abordagem é recente nas áreas de geociências e tecnologia mineral e é possível através de um recurso existente em softwares atuais, que permite a classificação de dezenas a centenas de amostras em minutos, sem a necessidade da identificação das fases presentes, diminuindo drasticamente o tempo e facilitando a análise dos dados (MACCHIAROLA K. et al. 2007).

Para complementar o trabalho foram conduzidos estudos de caracterização tecnológica em amostras compostas dos tipos identificados. Por meio de análise de imagens conjugada à microscopia eletrônica de varredura, obtiveram-se informações referentes aos minerais de minério (identificação, proporção, espectro de liberação e partição do elemento de interesse) e de ganga (quantificação e formas de associação com o mineral de minério).

1.2 Objetivos

Este trabalho visou avaliar a aplicabilidade da ferramenta de análise por agrupamento (*cluster analysis*) aliada à técnica difração de raios X para classificação de amostras para o caso da Mina do Sossego.

A caracterização tecnológica dos grupos de minérios objetivou o levantamento de informações das principais características dos litotipos definidos.

1.3 Relevância do projeto

A metodologia utilizada neste projeto possui grande potencial para aplicação na indústria mineira.

O método de difratometria de raios X tem atualmente importante papel no setor mineral, devido à simplicidade, a rapidez das análises e a confiabilidade dos resultados. Aliada à ferramenta de análise por agrupamento (*cluster analysis*), recurso existente em softwares atuais, é possível comparar de dezenas a milhares de difratogramas de raios X em alguns minutos, sem necessidade de tratamento prévio ou identificação das fases presentes.

É possível, desta forma, a criação de um banco de dados considerável com amostras representativas do universo amostral. O procedimento pode constituir-se em uma prática rotineira em projetos de exploração ou no auxílio a exploração mineral e estudos de viabilidade econômica para uma melhor avaliação da variabilidade do depósito e definição de amostras para ensaios de processamento mineral / metalúrgicos.

O caso de Sossego é interessante tanto do ponto de vista geológico como econômico, sendo representativo de importante classe de depósitos, cuja complexidade geológica (variabilidade mineralógica e forte controle estrutural) é favorável para o estudo proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos geológicos

A mina do Sossego está localizada na Província Mineral de Carajás, na região de Canaã dos Carajás, sudeste do Pará (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Província Mineral de Carajás no Cráton Amazônico (modificado de GRAINGER et al., 2008).

O Estado do Pará abriga a maior parte das reservas brasileiras de cobre (83% segundo estudo de RODRIGUES; HEIDER, 2009). Muito dos depósitos, incluindo Sossego, Salobo, Corpo 118, Cristalino, Alemão são do tipo óxido de Fe-Cu-Au (sigla em inglês IOCG, *iron oxide copper gold*).

Estão descritas, a seguir, as principais características desta classe de depósitos, além de informações sobre a Província Mineral de Carajás e do depósito de Sossego.

2.1.1 Considerações sobre os depósitos IOCG

Ainda não há consenso sobre as características dos sistemas e os processos geológicos que formam os depósitos em questão, uma vez que esta classe foi definida na década de 90 a partir das descobertas de Olympic Dam, La Candelaria,

Starra, Osborne, Ernest-Henry e Alemão, o que é considerado recente (WILLIAMS et al., 2005).

Por abranger uma grande diversidade de depósitos, nenhum modelo simples pode capturar adequadamente a diversidade dos sistemas que estão incluídas nesta família (BARTON; JOHNSON, 2004).

De um modo geral, as principais características dos depósitos IOCG incluem: mineralização de cobre com ou sem ouro, controle estrutural proeminente (veios hidrotermais, brechas e outras estruturas característica de substituição) e magnetita e/ou hematita abundante aliada(s) a baixo conteúdo de Ti (WILLIAMS et al., 2005, BARTON; JOHNSON, 2004).

Outras características comuns que podem não estar presentes em todos os casos incluem: suíte distinta de elementos menores incluindo várias combinações de F, P, Co, Ni, As, Mo, Ag, Ba, ETRL, e U, alteração pervasiva rica em álcalis (WILLIAMS et al., 2005, BARTON; JOHNSON, 2004).

São considerados como expressão metassomática de um evento de alteração crustal de larga escala, implantado em bacia sedimentar ou vulcanossedimentar. Estão associados com grandes descontinuidades regionais e intensa atividade magmática que permitiram intensa mobilização dos elementos (COX; SINGER, 2007; WILLIAMS et al., 2005; SKIRROW, 2004; GRAINGER et al., 2008).

O faturamento hidráulico, o metassomatismo e a intensa atividade hidrotermal são os responsáveis pelas estruturas dos minérios. Estes tendem a possuir forma cônica, com mineralização em brechas, falhas e fraturas (BIONDI, 2003). As permeabilidades destas estruturas são fatores determinantes na tonelagem do depósito, o que explica a associação dos mesmos com importantes zonas de cisalhamento (COX; SINGER, 2007).

As intrusões podem ser de diferentes composições, variando amplamente entre os depósitos, desde rochas máficas como gabros e dioritos até monzonitos tonalitos, dacitos e granodioritos (COX; SINGER, 2007; WILLIAMS et al., 2005; SKIRROW, 2004; GRAINGER et al., 2008).

Os principais distritos metalogenéticos IOCG em termos econômicos, segundo Williams et. al. (2005), estão na Austrália (*Gawler Craton e Cloncurry District*), Brasil (Província de Carajás), Chile e Peru (*Chilean Iron Belt*).

Os depósitos possuem ampla distribuição temporal (do Paleoproterozóico ao Mioceno) e tonelagem (de 3,8 bilhões de toneladas de Olympic Dam até 470 milhões de toneladas de La Candelaria no Chile) (COX; SINGER, 2007).

Apresentam, geralmente, alterações sódica (albita), sódica-cálcica (albita-oligoclásio) e potássica (biotita e K-feldspato) mais intensas e as alterações sericítica e clorítica (com quartzo acessório) menos volumosas, ocorrendo nas proximidades da mineralização (COX; SINGER, 2007; BARTON; JOHNSON, 2004). A mineralogia e geoquímica gerada pelos sistemas de alteração hidrotermal, entretanto, varia entre os depósitos, já que depende da composição das rochas hospedeiras e dos fluidos mineralizantes (SKIRROW, 2004; BARTON; JOHNSON, 1996).

Os depósitos podem apresentar zonamento vertical de regiões ricas em albita e magnetita, mais profundas, para assembléias com mais sílica, feldspato potássico e sericita em porções mais superiores. Com relação aos sulfetos de Cu e Fe, observa-se a ocorrência de pirita em profundidade, calcopirita nas zonas mais próximas à superfície e bornita e calcocita em posições intermediárias (BIONDI, 2003).

A calcopirita e a pirita são as espécies minerais sulfetadas mais abundantes e sempre presentes; os outros sulfetos podem ser formados devido à ação de agentes intempéricos. No processo de alteração supérgena ocorre a dissolução dos sulfetos primários e a mobilização do Cu e do Fe na solução; o cobre é então precipitado na forma de vários minerais secundários, os quais são reflexos da composição da água e do pH e Eh ao longo do perfil de alteração (GUILBERT; PARK, 2007).

Em regiões redutoras (hipógenas) do perfil de alteração, o cobre substitui o ferro de sulfetos preexistentes (pirita e calcopirita) formando sulfetos mais ricos em Cu, como calcocita (Cu_2S), covelita (CuS), bornita (Cu_5FeS_4) e digenita (Cu_9S_5). Já em regiões mais oxidantes (mais superficiais), outros minerais de cobre podem ser formados. Estes são composicionalmente e mineralogicamente mais complexos e incluem carbonatos (malaquita e azurita), silicatos (crisocola), óxidos (cuprita),

fosfatos (libethinita), sulfatos (brochantita, antlerita, calcantita), arsenatos (enargita), além de fases de óxi-hidróxidos (GUILBERT; PARK, 2007).

A extensão das zonas lixiviadas e enriquecidas e a natureza dos minerais formados depende da proporção de sulfetos primários na rocha e a acidez da solução percolada (GUILBERT; PARK, 2007).

Com relação aos depósitos IOCG brasileiros, uma comparação entre os mesmos é apresentada por Monteiro et al. (2008a). Para a autora e colaboradores, estes depósitos são similares quanto às (i) rochas hospedeiras variáveis (diferentes litotipos das unidades do Supergrupo Itacaiúnas); (ii) associação com zonas de cisalhamento bem como intrusões de diferentes composições; (iii) intensa alteração hidrotermal, desde inicial sódica, passando pela potássica até a mineralização dos sulfetos; (iv) amplo intervalo de temperaturas de homogeneização (100-570°C) e salinidades (0 a 69% eq. peso NaCl) em inclusões fluidas em minerais do minério, indicando a mistura de fluidos de origens diversas (MONTEIRO et al., 2008a). Para Augusto et al. (2008), além dessas características, os depósitos apresentam enriquecimentos em ETRL, P, Ni, Co e, em alguns casos, Ag, Mo, U, Th, Y, Pd, Zn, Te e Sn. Os depósitos diferem quanto às assembléias de alteração hidrotermal e os minerais de interesse econômico (calcopirita–calcocita-bornita no Salobo; calcopirita± calcocita–digenita-covelita no Igarapé Bahia e calcopirita-pirita nos depósitos de Sossego, Cristalino e Alvo 118) (MONTEIRO et al., 2008b; AUGUSTO et al., 2008).

2.1.2 Geologia da Província Mineral de Carajás

A região de Carajás abriga uma das maiores províncias minerais do mundo, apresentando jazidas de ferro, manganês, níquel, cobre, ouro, estanho, bauxita e caulim. Está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico e é constituída por dois compartimentos tectônicos: o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas a norte e o terreno granito-*greenstone* Rio Maria a sul.

No compartimento Rio Maria, sequências vulcanossedimentares do tipo *greenstone belts* agrupadas no Supergrupo Andorinhas ocorrem como faixas anastomosadas envolvendo corpos granitóides e complexos máficos-ultramáficos. São rochas vulcânicas máficas-ultramáficas e félsicas, intercaladas com formação

ferrífera bandada e sedimentos clásticos e vulcanoclásticos. Os complexos intrusivos máfico-ultramáficos apresentam diferenciação magmática com composições que gradam de peridotitos e dunitos para gabros e anortositos. Os granitóides intrusivos apresentam composição granodiorítica a trondhjemítica e idade de aproximadamente 2,9Ga (DOCEGEO, 1988).

No Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas a norte, onde se encontra o depósito de Sossego, o embasamento arqueano é representado por gnaisses e granulitos dos Complexos Xingu (2,8 Ga, MACHADO et al., 1991) e Pium (~3,0 Ga, RODRIGUES; LAFON; SCHELLER, 1992; PIDGEON; MACAMBIRA; LAFON, 2000).

Sequências metavulcanossedimentares e sedimentares sobrejacentes aos complexos citados foram reunidas no Supergrupo Itacaiúnas, que inclui os grupos Grão do Pará, Igarapé-Salobo, Igarapé-Pojuca, Igarapé-Bahia e Buritirama (DOCEGEO, 1988). Estas unidades hospedam grande quantidade de depósitos minerais, dentre eles os depósitos de cobre e ouro de Salobo, Igarapé-Bahia, Sossego, Alvo 118 e Cristalino.

Os litotipos do Supergrupo Itacaiúnas compreendem metassedimentos detríticos, químicos e vulcanoclásticos, rochas metavulcânicas félsicas a máficas, além de formações ferríferas. Apresentam metamorfismo variando desde a fácies xisto-verde inferior (Grupos Igarapé Bahia e Grão do Pará) até anfibolito superior (Igarapé Pojuca e Igarapé Salobo), com deformação variando desde rochas com estruturas primárias preservadas até rochas com estruturas completamente obliteradas (DOCEGEO, 1988; GALARZA; MACAMBIRA; MOURA, 2003).

Sobreposto ao Supergrupo Andorinhas ocorre um pacote de rochas sedimentares terrígenas e marinhas, pouco metamorfasadas, dominadas por quartzoarenitos e pelitos da Formação Rio Fresco ou Águas Claras (NOGUEIRA 1995).

Vários eventos intrusivos de idade arqueana e paleoproterozóica afetam o Supergrupo Itacaiúnas e a Formação Águas Claras/Rio Fresco. Informações geocronológicas apontam para três intervalos magmáticos: dois no Arqueano e um no Paleoproterozóico (idades aproximadas de 2,76 Ga, 2,57 Ga e 1,88 Ga respectivamente). Vários autores apontam para a importância dos dois últimos eventos magmáticos na geração dos sistemas magmático-hidrotermais geradores dos depósitos tipo IOCG (MONTEIRO et al., 2008b).

Dentre as intrusões arqueanas citam-se os granitóides Estrela, Plaquê, Planalto, Serra do Rabo, Cristalino, Velho Salobo e Itacaiúnas, com idades entre 2,76 e 2,56 Ga e composição alcalina e metaluminosa (NEVES, 2006). Os episódios intrusivos paleoproterozóicos (~1,88 Ga) são representados pelos granitóides Serra dos Carajás, Cigano, Pojuca, Young Salobo, Musa, Jamon, Breves, Velho e Guilherme, de composição alcalina e subalcalina e características químicas e tectônicas de granitos tipo A (NEVES, 2006; AUGUSTO et al., 2008). Ainda ocorrem intrusões máficas-ultramáficas como os Complexos Luanga, Vermelho, Onça, Jacaré e Jacarezinho.

O quadro estrutural da região pode ser dividido segundo Pinheiro & Holdsworth (2000) em dois domínios, um de rochas de alto grau metamórfico, formadas em regime dúctil de alta temperatura, sob domínio da Zona de Cisalhamento Itacaiúnas, na qual encontram-se os gnaisses e granulitos do embasamento (Complexo Xingu e Pium), granitóides sintectônicos e algumas rochas supracrustais de alto grau (rochas vulcano-sedimentares do Grupo Igarapé Salobo; 2,76 Ga). O outro domínio é representado por rochas vulcânicas e sedimentares de baixo a muito baixo grau metamórfico, em discordância sobre as rochas do embasamento e posteriores ao evento tectônico de alta temperatura (rochas dos Grupos Igarapé-Pojuca, Grão do Pará e da Formação Águas Claras).

As grandes falhas transcorrentes E-W que cortam as rochas do Supergrupo Itacaiúnas e da Formação Águas Claras compõem a Zona de Cisalhamento Itacaiúnas que é formada pelos sistemas transcorrentes Cinzento e Carajás. O sistema Transcorrente Carajás, no qual se insere o depósito de Sossego, é marcado por uma estrutura sigmoidal e é atravessada longitudinalmente pela Falha Carajás, de direção geral WNW-ESE, que representa a estrutura mais proeminente do sistema. O fraturamento das rochas ao longo desta falha permitiu a circulação dos fluidos responsáveis pela mineralização Cu e Au (PINHEIRO; HOLDSWORTH, 2000).

A Figura 2 apresenta o mapa geológico da Província Mineral de Carajás com a localização dos principais depósitos minerais existentes.

Figura 2 – Mapa geológico da Província Mineral de Carajás (obtido de MONTEIRO et al., 2008a)

2.1.3 Geologia do depósito de Sossego

Como já citado, a Mina do Sossego está localizada ao longo Zona de Cisalhamento Itacaiúnas, a qual define o contato entre as unidades metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas e gnaisses e migmatitos do Complexo Xingu. Ocorrem também no depósito diferentes corpos ígneos como granito, gabro e rocha metavulcânica félsica, alongados e concordantes com a estrutura regional, também afetados pelo hidrotermalismo de 2,2 Ga (MARSCHICK; LEIVEILLE, 2001).

A zona de cisalhamento em escala regional é cortada por falhas transcorrentes de direção N a NW, estruturas que na região do Sossego possuem

direção EW a NE-SW e que delineiam as zonas mineralizadas, já que o intenso fraturamento permitiu a circulação dos fluidos hidrotermais.

Na Mina do Sossego, a mineralização está disposta em cinco corpos: Pista, Sequeirinho, Baiano, Sossego e Curral, sendo os mais importantes Sequeirinho e Sossego. A mineralogia destes corpos difere fortemente entre si devido ao tipo de rocha hospedeira e também do tipo e intensidade das alterações hidrotermais predominantes em cada depósito. Estas características estão ilustradas na Figura 3 e na Figura 4.

O corpo Sequeirinho está hospedado em granito, gabro e rochas metavulcânicas félsica, enquanto que as hospedeiras do corpo Sossego são granito, granito granofírico e rocha metavulcânica félsica.

Nos corpos mais a oeste, no caso Pista, Sequeirinho e Baiano, as alterações iniciais sódica e sódica-cálcica são bem desenvolvidas; já nos corpos Sossego e Curral estas alterações são pouco desenvolvidas ou quase ausentes, predominando as alterações potássica e clorítica (MONTEIRO et al., 2008a).

A alteração sódica é caracterizada pela albitização em veios e fraturas enquanto que a alteração sódica-cálcica, dominada pela actinolita e albita, substitui a assembléia anterior e está associada a corpos maciços de magnetita-(apatita) e zonas constituídas de actinolita (actinolititos) na qual a alteração foi mais intensa (MONTEIRO et al., 2008a, MONTEIRO et al., 2008b).

As alterações potássica e clorítica são mais tardias. A primeira é caracterizada pela presença de biotita, feldspato potássico, magnetita e quartzo e está associada espacialmente às zonas mineralizadas. A cloritização forma zonas ricas em clorita associada à calcita e epídoto (MONTEIRO et al., 2008a; MONTEIRO et al., 2008b).

Figura 3 – (a) Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego e (b) distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermal (modificado da Vale, obtido de MONTEIRO et al., 2008b)

Figura 4 – Perfil esquemático mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal nos corpos Sequeirinho e Sossego (MONTEIRO et al., 2008, obtido em AUGUSTO et al., 2008)

A mineralização compreende um estágio tardio do sistema hidrotermal e é representada por sulfetos, principalmente calcopirita e, em menores quantidades, pirita, siegenita ((Ni,Co)₃S₄), milerita (NiS) e vaesita (NiS₂). Mais raramente, aparecem pirrotita, esfalerita, melonita, hessita, molibdenita e ouro nativo, na forma de pequenas inclusões na calcopirita (MONTEIRO et al., 2008a).

A calcopirita (principal mineral de minério) ocorre tanto na forma de maciça a semi-maciça, quanto disseminada, em vênulas, fraturas e stringers (*stockwork*), bolsões, brechas e zonas de substituição da rocha hospedeira. Também ocorre intercrescida com pirita, magnetita e/ou silicatos, podendo apresentar inclusões de magnetita e pirita (MONTEIRO et al., 2008a).

O minério do corpo Sequeirinho apresenta, em geral, aspecto brechóide; os sulfetos estão dispersos na matriz, os clastos são de actinolita, magnetita, apatita e alanita e os fragmentos são de actinolitos e magnetitos (MONTEIRO et al., 2008a). A proporção de calcopirita é muito maior do que a de siegenita e pirita (NEVES, 2006).

O minério do corpo Sossego ocorre na forma de veios e brechas. As brechas possuem clastos angulosos a arredondados, principalmente derivados de rochas

graníticas, dispersos em matriz composta por calcopirita, magnetita, apatita, clorita e em menores quantidades muscovita, quartzo, actinolita e siegenita. O ultimo estágio do sistema hidrotermal é a alteração hidrolítica, representada pela assembléia muscovita-hematita-quarto-clorita-calcita, presente no corpo Sossego (MONTEIRO et al., 2008a; NEVES, 2006).

2.1.4 Principais tipos litológicos

As descrições das litologias apresentadas a seguir são baseadas em estudos petrográficos expostos em Neves (2006) e nos trabalhos de Monteiro et al. (2008a e 2008b).

As rochas félsicas estão incluídas nos litotipos granito (**GRA**), granito graniférico (**GRF**) e metavulcânicas ácidas (**MVA**). Nas três variedades a albitização, silicificação, epidotização e cloritização foram os processos hidrotermais mais atuantes.

Os granitos, **GRA**, são em geral maciços e localmente foliados e milonitizados. São constituídos de albita, quartzo, anfibólio, epidoto, clorita, calcita e feldspato potássico, tendo como minerais acessórios, titanita, alanita, zircão, apatita, magnetita, hematita e sulfetos. Os granitos granofíricos (**GRF**) possuem composição semelhante aos granitos, diferindo dos demais pela textura mais fina dos cristais.

A variedade metavulcânica ácida, **MVA**, possui fenocristais de quartzo e plagioclásio dispostos em matriz constituída de albita, epidoto, actinolita, magnetita, titanita e calcopirita.

Na brecha tipo Sossego, **BHT**, os clastos são derivados essencialmente de rochas graníticas e a matriz é composta por calcopirita, magnetita, apatita, clorita e em menores quantidades muscovita, quartzo, actinolita e siegenita.

O grupo de rochas máficas é representado por diabásios-gabros (**GBA**), actinolitos (**ACT**) e magnetititos (**MAG**). Os principais processos de alteração hidrotermal reconhecidos nessas rochas são escapolitização, anfibolitização e albitização.

O tipo **GBA** é constituído principalmente por escapolita, albita, actinolita, hastingsita, epidoto, feldspato potássico e clorita, em menor quantidade, quartzo, titanita, biotita e magnetita.

Os **ACT** representam um caso mais extremo da alteração hidrotermal das rochas máficas, em que grande parte dos minerais preexistentes foi transformada em actinolita. Os actinolitos apresentam grandes cristais de actinolita intercrescida com magnetita e contém bolsões ricos em apatita.

Os magnetitos, **MAG**, são rochas maciças, de coloração escura, caracterizadas por quantidades de magnetita superiores a 50%. Possuem, além da magnetita, calcopirita, actinolita, hastingsita, quartzo, epidoto, apatita e proporções subordinadas de albita, calcita, clorita, titanita, ilmenita e pirita.

Na brecha tipo Sequeirinho, **BSE**, os clastos são de actinolita, magnetita, apatita e alanita e os fragmentos são de actinolitos e magnetitos. A calcopirita é predominante sobre a siegenita e pirita.

2.1.5 Beneficiamento do minério da mina de Sossego

Em estudos de caracterização tecnológica de matérias-primas minerais, o levantamento de informações acerca do processo de beneficiamento do minério em é uma etapa importante, conforme discutido mais adiante.

Na mina do Sossego, após a lavra do minério e a britagem primária realizada nas proximidades do corpo mineralizado, o minério segue para a usina, onde passa por processos de moagem e concentração. As etapas de beneficiamento estão descritas abaixo e ilustradas na Figura 5.

Na usina de beneficiamento, a etapa de moagem inicia-se no moinho SAG (semi-autógeno), no qual a redução do material é realizada pela ação do próprio minério combinada com esferas de aço. A classificação da descarga do SAG é realizada por duas peneiras vibratórias. O material retido nas peneiras (acima de 13 mm) é conduzido ao circuito de rebitagem em britadores cônicos, retornando ao moinho SAG; o material passante é bombeado para o circuito de classificação - ciclonagem (BERGERMAN, 2009).

Figura 5 – Etapas do beneficiamento do minério (fluxograma cedido pela Vale)

A fração grossa do ciclone (*underflow*) alimenta o moinho de bolas. A descarga do moinho de bolas retorna para a ciclonagem (circuito reverso), cujo *overflow* (produto com P_{80} de 0,21 mm e 35% de sólidos) alimenta o circuito de flotação.

A flotação é composta por três etapas: *rougher*, *cleaner* e *scavenger-cleaner*. A primeira etapa de flotação é a flotação *rougher*. Neste processo, o rejeito é descartado por gravidade para a barragem de rejeitos e o concentrado, coletado pela espuma, é bombeado para alimentar nova etapa de ciclonagem.

O *underflow* dos ciclones alimenta dois moinhos verticais, que operam com bolas de aço, em circuito fechado com a ciclonagem. O *overflow* (material com P_{80} da ordem de 44 μ m) é submetido à flotação *cleaner* (BERGERMAN, 2009).

O material flotado das colunas de flotação *cleaner* é o concentrado final. O rejeito das colunas permanece no circuito e alimenta a flotação *scavenger cleaner*, cujo concentrado se junta ao concentrado *rougher* (BERGERMAN, 2009).

É importante ressaltar que este processo apresenta elevada recuperação de cobre: partículas mistas com minerais portadores de cobre são concentradas nos estágios *rougher* e *scavenger cleaner* de flotação, moinhos verticais promovem a

liberação dos minerais de minério que são concentrados no ciclo de flotação e remoagem pela espuma das colunas cleaner (REIS, 2004). Segundo Bergeman (2009), o circuito de flotação possui recuperação de cobre em torno de 93%, podendo atingir picos de 98% em situações ótimas; o concentrado rougher apresenta teor de cobre variando entre 13 e 17% com recuperação metalúrgica entre 94 a 96%.

O concentrado final é espessado, filtrado e encaminhado para estocagem na planta antes de ser transportado até o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira em São Luís, Maranhão, pela Estrada de Ferro de Carajás, onde é embarcado para o mercado brasileiro e mundial. A parcela destinada ao mercado nacional é refinada na usina de Caraíba Metais S.A. na Bahia (RODRIGUES; HEIDER, 2009).

2.2 Técnicas analíticas

A seguir é apresentada a revisão bibliográfica acerca dos métodos utilizados neste projeto: difração de raios X, análise por agrupamento (*cluster analysis*), caracterização tecnológica e técnica de mineralogia quantitativa automatizada por análise de imagens.

2.2.1 Difração de raios X

A técnica de difração de raios X apresenta inúmeras aplicações em diversos campos do conhecimento, sendo a identificação de fases cristalinas através de comparação com base de dados uma das mais empregadas.

Uma parcela dos raios X, ao atingir a superfície do material, sofre espalhamento elástico sem perda de energia (dispersão ou espalhamento coerente). Caso os átomos que geram o espalhamento estejam arranjados sistematicamente, como numa estrutura cristalina, a interação das ondas eletromagnéticas com os átomos pode gerar uma interferência construtiva ou destrutiva. O fenômeno de difração dos raios X irá ocorrer quando a interação for construtiva, segundo a geometria descrita pela lei de Bragg (Figura 6, equação 1), que estabelece a relação entre o ângulo de incidência dos raios X θ , “a distância entre os planos que a originaram “d” e o comprimento de onda da radiação incidente (λ) (BISH; POST, 1989).

Figura 6 - Geometria que descreve o fenômeno de difração (Lei de Bragg)

Lei de Bragg: $n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$, onde (equação 1)

λ : comprimento de onda da radiação incidente,

n : número inteiro (ordem de difração)

d : distância interplanar para o conjunto de planos hkl (índice de Miller) da estrutura cristalina

θ : ângulo de incidência dos raios X

A intensidade do feixe difratado é dependente, dentre outros fatores, do número de elétrons presentes no plano da estrutura cristalina do mineral. Assim, cada plano cristalino, representado por uma posição angular θ no difratograma, terá uma intensidade difratada distinta. Os compostos cristalinos são identificados através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados, por seu padrão difratométrico característico.

A identificação dos minerais é realizada a partir da comparação do difratograma coletado com fichas catalogadas de minerais presentes em bancos de dados disponíveis.

A seguir, serão descritos brevemente os principais aspectos da técnica de estudo de materiais policristalinos, denominado método de difração de pó (*powder diffraction*).

O difratômetro de raios X é composto basicamente por um sistema de geração dos raios X, um sistema de filtros e fendas e um sistema de detecção. A geração é dada em tubos de raios X, os feixes gerados são colimados por filtros e fendas e incidem sobre a amostra. A interação com a amostra gera feixes difratados, que também são filtrados e captados pelo detector. De maneira simplificada pode-se dizer que os parâmetros instrumentais que influenciam no resultado da análise são: tubo gerador (tipo de ânodo, intensidade e foco), filtros (filtro $k\beta$ ou monocromador), fendas (configuração) e detector utilizados.

Para uma boa análise é necessário que o difratograma coletado possua resolução adequada para o resultado esperado (quantitativo x qualitativo), que é função dos instrumentos utilizados, parâmetros de coleta, preparação da amostra, além das características intrínsecas do material que se analisa.

As condições de coleta devem ser definidas de acordo com as características do material e o tipo de análise. Dentre alguns parâmetros de coleta estão: radiação empregada (tipo de ânodo e intensidade do feixe), espectro de varredura da amostra (ângulo 2θ inicial e final), modo da varredura (contínuo ou por passo), tamanho e tempo do passo e o tempo total de coleta (função das demais variáveis).

A amostragem, neste método, é de grande importância. Já que o fenômeno de difração só ocorrerá quando o cristal estiver adequadamente orientado (Lei de Bragg). Para atingir a estatística adequada, o tamanho dos cristais deve ser menor do que 30 μm (para análises qualitativas) e entre 5-10 μm para análises quantitativas. *Spinner* é um acessório que permite a rotação da amostra, melhora a estatística dos cristais orientados.

Dentre os métodos de quantificação de fases pode-se citar: método do padrão interno, de adição, *matrix-flushing* e Rietveld. As análises quantitativas requerem maior precisão, ou seja, é necessário um elevado número de contagens. Atualmente, com o advento de sensores sensíveis à posição (PSD), o tempo de aquisição dos difratogramas diminuiu drasticamente, possibilitando o uso desta ferramenta em situações onde o tempo de coleta é crítico, como em controles de

processo (MACCHIAROLA et al., 2007). Os PSD permitem a coleta simultânea de alguns graus do feixe difratado, o que também possibilita melhora na resolução do difratograma com o aumento do número de contagens, sem comprometimento do tempo de coleta.

Além da identificação e quantificação das fases minerais, a difração de raios X possui diversas outras aplicações, como cálculo das dimensões da cela unitária (definir os parâmetros cristalográficos da estrutura de um mineral), determinação da cristalinidade de um material, avaliação de tamanho de cristalitos, análises sob atmosfera controlada, orientação de cristais ou textura, análise de tensão residual e espessura de filmes finos.

2.2.2 Análise por agrupamento (cluster analysis) com base em difração de raios X

A técnica de análise por agrupamento (*cluster analysis*) é um recurso estatístico que facilita a análise de grande quantidade de dados, estabelecendo relações de semelhança e dissimilaridades entre as amostras. Tem como objetivo classificar parâmetros em grupos de forma que os parâmetros pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com relação às variáveis (características) escolhidas e os parâmetros em grupos diferentes sejam heterogêneos (MINGOTI, 2005).

Diferentemente de outros procedimentos estatísticos, o método de análise por agrupamento é utilizado quando não há uma hipótese a priori, e a comparação entre amostras encontra-se em fase inicial. Pode ser utilizado em diversos campos do conhecimento, sempre que se quer encontrar algum padrão de correlação entre objetos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2006).

Nesta técnica, cada amostra é definida, através de um tratamento matemático, como um ponto no espaço multidimensional descrito pelas variáveis escolhidas no estudo. Sendo as amostras descritas como pontos no espaço, é possível calcular a distância entre todos os outros pontos, o que equivale a calcular as semelhanças/dissimilaridades entre elas (MOITA NETO; MOITA, 1998).

Existem várias maneiras de calcular a distância entre dois pontos e cabe ao interessado escolher aquela que melhor se aplica ao caso em questão. A mais conhecida e utilizada é a distância euclidiana, que corresponde ao sentido trivial de

distância no plano. Entre outros métodos estão: distância euclidiana quadrática ou absoluta, Manhattan, Chebychev, etc. (MOITA NETO; MOITA, op.cit.).

A partir das distâncias calculadas constrói-se uma matriz de proximidade que descreve todas as distâncias entre amostras. A matriz é então utilizada para realizar o agrupamento das amostras.

As técnicas de agrupamento podem ser classificadas em dois grupos: hierárquicas e não-hierárquicas. As técnicas hierárquicas são utilizadas na maioria das vezes em análise exploratória dos dados, com intuito de identificar possíveis agrupamentos e valor provável do número de grupos. Para as técnicas não hierárquicas é preciso que o número de grupos seja pré-especificado pelo pesquisador (MINGOTI, 2005).

No método de agrupamento hierárquico os objetos podem ser tratados inicialmente como subgrupos unitários, que são agrupados a cada passo em novos subgrupos, até que apenas um grupo permanece, ou podem ser tratados inicialmente como um único grupo, que se desagrupa a cada passo (MOITA NETO; MOITA, op.cit.). A escolha do número final de grupos é subjetiva; o propósito é encontrar um número de grupos que esteja associado à partição natural dos elementos que estão sendo comparados (MINGOTI, 2005). Neste método, uma vez que um grupo é formado, ele não pode mais ser dividido, somente combinado com outros *clusters* (NORUSIS, 2010).

Existem diversos métodos de aglomerar matematicamente os objetos; No método de ligação simples (*single linkage*) a similaridade entre dois conjuntos de dados é definida pelos dois elementos mais próximos entre si (distância entre vizinhos mais próximos), enquanto que no método de ligação completa (*complete linkage*) pelos elementos menos semelhantes; No método da média das distâncias (*average linkage*), a semelhança entre dois subgrupos é a média das distâncias entre todos os pares de dados; No método do centróide (*centroid method*) a semelhança é dada pelos vetores médios (MINGOTI, 2005). Diferenças entre estes métodos podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 – Definições gráficas de proximidade de métodos aglomerativos (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2006).

O dendograma é a representação visual que ilustra o agrupamento realizado (Figura 8). Nela, objetos são representados como nós e os passos do agrupamento pela junção dos ramos no dendograma. O comprimento do ramo indica a distância entre os subgrupos quando estão unidos. Desta maneira, duas amostras próximas devem ter também valores semelhantes para as variáveis medidas, portanto, quanto maior a proximidade entre as medidas relativas às amostras, maior a similaridade entre elas. O dendograma hierarquiza esta similaridade de modo que se pode ter uma visão bidimensional da similaridade ou dissimilaridade de todo o conjunto de amostras em estudo (MOITA NETO; MOITA, op.cit.).

Figura 8 – Dendograma - representação gráfica de um agrupamento.

No caso da análise grupal por difratogramas de raios X, o emprego do *software* X'Pert Highscore Plus (PANalytical) permite a comparação de vários espectros sem o prévio tratamento dos mesmos ou identificação das fases cristalinas presentes (MACCHIAROLA et al., 2007).

O procedimento de classificação pode considerar a posição de picos difratados como também as respectivas intensidades difratadas, sendo que os agrupamentos resultantes retratam não só variações de assembléias mineralógicas, mas também a proporção dos minerais presentes.

O agrupamento é realizado pelo método hierárquico aglomerativo, sendo possível escolher entre diversas medidas de distâncias e modos de ligação disponíveis no software.

Posteriormente é possível ainda, a identificação dos espectros mais representativos de cada grupo e os espectros que não se encaixam em nenhuma classe entre outras opções (MACCHIAROLA et al., op.cit.).

O software também permite a análise do resultado do agrupamento a partir da ferramenta de análise estatística de componentes principais (*principal component analysis* - *PCA*). Nesta técnica as variáveis originais são reescritas em novas variáveis denominadas componentes principais. Esta transformação busca reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados, condensando as informações nos primeiros componentes principais (MOITA NETO; MOITA, 1998). No caso o software possibilita comparar as amostras dos diferentes grupos em função de seus três primeiros principais componentes num gráfico 3D. Em um agrupamento adequado as amostras de mesmo grupo devem ocupar posições próximas no gráfico 3D, ou seja, são descritas por PCAs semelhantes.

2.2.3 Caracterização tecnológica

A caracterização tecnológica compreende o processo de descrição e quantificação da composição mineralógica, tamanho e forma dos grãos, associações minerais, grau de liberação, composição química, entre outros, 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; SCHNEIDER; NETO, 2004). Os estudos também podem ser empregados para auxiliar na solução de problemas de um processamento já implantado.

As técnicas tradicionais de caracterização tecnológica compreendem processos relativamente lentos e trabalhosos, que envolvem análises granulométricas e químicas, separações minerais, difração de raios X, conjugadas à quantificação mineralógica, microscopia óptica (MO) ou eletrônica de varredura MEV (KAHN et al., 2008). Muitos trabalhos descrevem procedimentos adotados nesse tipo de estudo, já que estes variam de acordo com o tipo de minério e com os objetivos da caracterização (PETRUK, 2000; JONES, 1987; SANT'AGOSTINO; KAHN, 1997; NEUMANN; SCHNEIDER; NETO, 2004; entre outros).

De maneira geral, a caracterização é realizada em etapas. Neumann, Schneider e Neto (2004) descrevem quatro estágios, sendo, o primeiro de fracionamento da amostra, que engloba separações granulométricas, separações por densidade, por susceptibilidade magnética, entre outros. O segundo estágio é o de identificação das fases minerais, para a qual existem diversas técnicas analíticas, como a difração de raios X, microscopia ótica e eletrônica de varredura, entre outras. A terceira etapa visa à quantificação e distribuição das fases existentes nos grupos fracionados (distribuição por faixa granulométrica, densitária, magnética, etc) e a última visa à determinação do grau de liberação do mineral de interesse.

A determinação do grau de liberação dos minerais de interesse é uma informação importante para o beneficiamento do minério, já que a granulação ideal da moagem implicará em redução de custos de uma sobremoagem e recuperação ótima do mineral de interesse (PETRUK, op.cit.).

Sant'Agostino e Kahn (1997) apresentam uma descrição detalhada da metodologia para a caracterização de matérias-primas, descrevendo ainda, a importância do levantamento de informações sobre o bem mineral em questão, dos processos de beneficiamento e especificações a que se destina o bem mineral, na determinação dos critérios de abordagem, metas e procedimentos.

Estudos de casos de caracterização de diferentes materiais, bem como o de mineralizações de sulfetos de metais base são apresentados em Petruk (2000). Em relação à caracterização de minérios de cobre, Petruk (op. cit.) destaca a importância da quantificação mineralógica dos minerais portadores de cobre, face às diferentes respostas destes minerais ao processo de flotação; alguns minerais de minério, como a valleriita, são dificilmente separados no processo de flotação, e

outros facilmente flotáveis, como a bornita e a calcopirita (BULATOVIC, 2007). Além disso, a proporção destes minerais pode indicar o máximo teor de Cu recuperável (HENLEY, 1983).

Estudos de caracterização tecnológica em produtos de beneficiamento também são de grande relevância em alguns casos. Lastra (2007) descreve um exemplo em que a determinação do grau de liberação dos minerais de minério (diferentes sulfetos de cobre) e da pirita no concentrado permitiu modificações no processo de concentração. No caso, o elevado teor de cobre do concentrado, relacionado com a presença de minerais secundários, mais ricos em Cu, mascarava a baixa eficiência do processo de concentração. Havia alta proporção de pirita no concentrado, mineral de efeito negativo no processamento, que estava relacionada a problemas de liberação.

Atualmente, a caracterização de materiais geológicos conta com ferramentas mais modernas de quantificação mineralógica automatizada, na qual são utilizadas técnicas de análise de imagens integradas a microscopia eletrônica de varredura e microanálise por EDS. Esta técnica é discutida a seguir.

2.2.4 Mineralogia quantitativa automatizada por análise de imagens

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 20 anos possibilitando hoje gerar dados estatísticos substancialmente mais robustos. (PETRUK, 1989; SUTHERLAND; GOTTLIEB, 1991; KAHN ; MANO; TASSINARI, 2002; FANDRICH et al., 2007).

Sistemas comerciais, tais como MLA e QEM-SCAN, permitem obter em curto espaço de tempo enorme quantidade de dados mineralógicos e texturais, como composições mineralógica e química, distribuição elementar, espectros de liberação, distribuição de partículas mistas, dentre outros.

Os procedimentos de análise de imagens envolvem aquisição e tratamento adequado da imagem, segmentação das fases, identificação dos minerais, deaglomeração das partículas (para determinações do grau de liberação), manipulação dos dados e interpretação dos resultados (PETRUK, 1989).

As imagens mais utilizadas são as de microscopia eletrônica de varredura ou óptica por luz refletida. Nas imagens provenientes de microscopia óptica (LR) os parâmetros utilizados para a discriminação dos minerais são a sua cor e reflectância. 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 atômico muito semelhante (caso da calcopirita e esfalerita, por exemplo) e os tons de cinza não são distinguíveis entre si, a identificação é baseada em espectros de EDS (NEUMANN; SCHNEIDER; NETO, 2004; FANDRICH et al., op.cit.).

As imagens digitais são obtidas a partir de seções polidas ou delgadas de material desagregado. A preparação das seções polidas requer cuidados como amostragem adequada, utilização de resina específica (epóxi), bom polimento, distribuição aleatória dos minerais na seção, entre outros. As imagens devem possuir alta resolução e baixo ruído para apropriada identificação e quantificação dos minerais. (FANDRICH et al., op.cit.; SUTHERLAND, GOTTLIEB, op.cit.).

No processamento das imagens, duas importantes funções do *software* MLA são: deaglomeração de partículas e segmentação de fases. A deaglomeração consiste em separar partículas que se tocam afim evitar resultados de liberação enviesados; o *software* possui um sistema automatizado que detecta partículas aglomeradas e separa-as com base em parâmetros predefinidos pelo operador. Na segmentação de fases, o *software* delimita áreas onde o nível de cinza da imagem de BSE é homogêneo e corresponde a um só mineral (FANDRICH et al., op.cit.).

O mineral correspondente a cada área é identificado com base em espectros de EDS podem ser coletados de diversas maneiras: um ponto ou área escaneada para cada área homogênea ou como um mapeamento parcial ou total da seção quando há minerais com tons de cinza semelhantes; nestes últimos casos a coleta demora muito mais tempo (FANDRICH et al., op.cit.).

Os processamentos descritos estão ilustrados na Figura 9.

a) partículas deaglomeradas ; b) segmentação em tons de cinza homogêneos ; c) pontos de coleta de EDS em cada área segmentada ; d) partícula após classificação (comparação com o banco de dados)

Figura 9 – Processamento para análise mineralógica quantitativa automatizada (obtida de FANDRICH et al., 2007)

O banco de dados utilizado para comparação dos espectros de EDS é específico para cada conjunto de amostras, de modo a refletir as mesmas condições de coleta e características químicas das mesmas. O banco de dados deve ser criado antes das aquisições das imagens e a envolve a coleta de espectros EDS de alta resolução de cada mineral presente na amostra (FANDRICH et al., op.cit.).

Inúmeras informações sobre a amostra processada podem ser obtidas ao final do trabalho, como proporção mineralógica, distribuição granulométrica, grau de liberação mineral, associações minerais, distribuição de elementos de interesse, forma dos grãos, entre outras (NEUMANN; SCHNEIDER; NETO, 2004; FANDRICH et al., op.cit.).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As amostras utilizadas neste trabalho foram cedidas pela Vale e correspondem à contra-parte de amostras de testemunhos de sondagem utilizadas no estudo sobre geometalurgia de moagem realizado por BERGERMAN (2009).

Segundo Bergerman (op.cit.), as amostras são referentes aos planos de lavra dos anos de 2007 e 2008, para avaliação da variabilidade do minério nas cavas de Sequeirinho e Sossego.

As amostras possuíam cerca de 10 kg cada e foram compostas a partir de diversos fragmentos ao longo de 10 m de furo de sonda. A Figura 10 ilustra o método, denominado “B”, utilizado para a composição das mesmas segundo BERGERMAN, (op.cit.). A contra-parte deste material foi objeto de estudo deste trabalho (amostras com cerca de 3,5 a 4 kg).

Figura 10 – Método B utilizado para composição das amostras (BERGERMAN, 2009)

A relação das 110 amostras recebidas é apresentada no Anexo 1; fotos de algumas amostras tal como foram enviadas ao laboratório são ilustradas na Figura 11.

Figura 11 – Contraparte de testemunhos de sondagens, amostras tais quais

3.2 Procedimentos adotados

As análises laboratoriais foram desenvolvidas nas dependências do Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT, do Departamento de Engenharia de Minas e do Petróleo da Escola Politécnica da USP, o qual conta com procedimentos e capacitação laboratoriais (infraestrutura e pessoal) adequados à realização do projeto.

As atividades realizadas podem ser subdivididas em três etapas, conforme apresentado no fluxograma da Figura 12.

A primeira etapa envolveu cominuição e homogeneização das amostras tais quais e visou à obtenção de alíquotas representativas para os trabalhos subseqüentes.

A segunda etapa compreendeu os procedimentos de preparação das amostras para a análise de difração de raios X e a classificação pela ferramenta de análise por agrupamento.

Figura 12 – Fluxograma das atividades realizadas

Na terceira etapa, as alíquotas reservadas para a caracterização tecnológica foram juntadas em função do resultado do agrupamento para compor as amostras representativas dos tipos definidos; os procedimentos relativos aos estudos de caracterização tecnológica foram efetuados nestas amostras compostas. Todos os procedimentos estão detalhados a seguir.

3.2.1 Primeira etapa de cominuição e homogeneização

Inicialmente, o material recebido passou por uma etapa de cominuição e homogeneização, na qual foram utilizados dois britadores de mandíbulas com diferentes aberturas e um britador de rolos (Figura 13). O material obtido foi amostrado utilizando um amostrador tipo Jones, visando à redução da massa para duas alíquotas com cerca de 1/16 do total inicial (cerca de 200 a 250 g), cada qual destinada a uma etapa do projeto.

Figura 13 – Equipamentos utilizados para cominuição inicial da amostra

Figura 14 – Amostra antes e depois da primeira etapa de cominuição e homogeneização

3.2.2 Difração de raios X e análise por agrupamento

A alíquota destinada à difração de raios X sofreu diversos processos de cominuição e redução de massa até atingir aproximadamente 30 g e granulometria abaixo de 40 μm (material pulverizado), condição necessária para a análise de difração de raios X.

A moagem no moinho de discos visou à homogeneização do material para a retirada de uma alíquota de 30 g. Estas alíquotas foram pulverizadas em moinho planetário Pulverizette 5, marca Fritsch, de forma a se ter granulometria inferior a 40 μm . Para tal, utilizaram-se panelas e bolas de aço (volume 100 ml, rotação com intensidade 7 e tempo de duração de 10 minutos).

O material pulverizado foi prensado manualmente em suportes específicos para material em pó (*back loading*) e então encaminhadas ao equipamento X'Pert Pro, marca PANalytical com tubo de Cu e detector sensível à posição (PSD - X'Celerator), para a análise de difração de raios X.

Moinho de discos

Moinho planetário Pulverizette 5, marca Fritsch

Suporte para prensagem manual de amostra para análise de DRX

Difratômetro de raios X - X'Pert MPD, marca PANalytical

Figura 15 – Equipamentos utilizados na coleta por difração de raios X

As condições de coleta adotadas foram:

- Tubo de Cu, 45 kV e 40 mA, filtro de Ni no feixe difratado;
- Fenda incidente fixa de 1/2 e máscara de 15 mm;
- Rotação de 30 rpm (*spinner*);
- Faixa de ângulo de 3 a 70°, passo de 0,02°;
- Tempo de 10s por passo, totalizando 5 minutos por difratograma.

Os difratogramas obtidos foram agrupados em *clusters* pelo *software* X'Pert Highscore Plus, considerando posição e intensidade dos picos difratados (conteúdo dos minerais sem a necessidade da identificação das fases presentes).

Os principais parâmetros utilizados no agrupamento das amostras foram:

- Parâmetros de comparação:
 - dados de origem considerados: picos + perfil
 - tipo de comparação (*FOM type*): posição
 - limiar de comparação (*compare threshold*): 40%
- Parâmetros de agrupamento (*clustering*):
 - medida de distância (*distance measure*): euclidiana
 - método de ligação (*linkage method*): average linkage
- *Cut-off* para definição de *clusters*: 87

3.2.3 Caracterização tecnológica

Após definidos os grupos de minérios, deu-se início à etapa de caracterização tecnológica dos mesmos. As alíquotas destinadas a esta etapa foram compostas proporcionalmente, formando os quatro grupos de minério, denominados *clusters* A, B, C e D.

A preparação destas quatro amostras iniciou-se com o quarteamento, visando a redução de massa e a retirada de material para arquivo. As alíquotas, com cerca de 700 a 900 g foram submetidas à moagem controlada em britador de rolos e moinho de bolas.

Após a cominuição, seguiu-se uma etapa de peneiramento a úmido, na qual se utilizou as peneiras 0,30 mm (48# Tyler), 0,21 mm (65# Tyler), 0,15 mm (100# Tyler), 0,074 mm (200# Tyler), 0,037 mm (400# Tyler) e 0,020 mm (635#). O produto abaixo de 0,020 mm foi reclassificado através de *ciclosizer*, sendo dividido em duas frações: -0,020+0,010 mm (ciclos 1 a 5 composto) e -0,010 mm (*overflow*).

Todos os produtos obtidos, bem como a amostra cabeça, foram enviados para análise química para análise semiquantitativa por fluorescência de raios X.

Foram confeccionadas seções polidas para todos os produtos obtidos, com exceção do material menor que 10 μm . As seções polidas foram cuidadosamente preparadas, de modo a garantir a representatividade da amostra. Inicialmente, os produtos da separação granulométrica foram quarteados em amostrador tipo Jones, visando a retirada de alíquotas com cerca de 5-10 g. Este material foi reamostrado em micro-amostrador rotativo (Microscal MSR). Para as frações acima de 0,020 mm as seções foram do tipo monocamada (o material granulado é fixado em fita dupla face de modo a formar apenas uma camada de grãos) com resina epóxi (Epofix - Struers) específicas para a análise mineralógica quantitativa automatizada; para material abaixo de 0,020 mm optou-se por seções transversais.

Os estudos mineralógicos detalhados das formas de ocorrência e associações dos minerais de Cu, incluindo grau de liberação por fração granulométrica e partição do elemento útil, foram efetuados de forma automatizada em seções polidas utilizando *software* Mineral Liberation Analyser (FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 600 FEG (FEI) e espectrômetro por dispersão de energia (EDS) Quantax 4030 com *software* Esprit (Bruker). Os procedimentos adotados nesta análise são detalhados adiante.

Adicionalmente, para observação e documentação das texturas dos minerais de minério em foram confeccionadas seções polidas de material granulado acima de 0,30 mm. As seções polidas, com material embutido em resina epóxi, foram observadas em microscópio óptico de luz refletida Leica DMR.

Moinho de bolas

Peneiras

Amostrador tipo Jones

Amostrador rotativo – Microscal MSR

Microscópio eletrônico de varredura
Quanta 600 FEG, FEI

Figura 16 – Equipamentos utilizados na etapa de caracterização tecnológica

3.2.4 Procedimentos da análise de imagem

Os procedimentos da análise mineralógica quantitativa automatizada são apresentados no fluxograma da Figura 17 e podem ser resumidos nas etapas:

- coleta das imagens de BSE e espectros de raios x (EDS);
- identificação das fases minerais e criação de um banco de dados preliminar;
- classificação das imagens a partir da comparação com o banco de dados preliminar;
- tratamento das imagens;
- identificação dos minerais e criação do banco de dados final;
- reclassificação das imagens;
- extração das informações;
- aferição dos resultados;
- tratamento dos dados.

Figura 17 – Procedimentos da análise mineralógica quantitativa automatizada

Na etapa de coleta foram definidos os parâmetros para a aquisição das imagens, os quais: condições de brilho e contraste para uma boa discriminação dos tons de cinza, número de partículas a serem coletadas, resolução e magnificação das imagens, condições de coleta dos raios X por EDS (número de contagens por ponto, distribuição dos pontos), entre outros parâmetros.

A criação de um banco de dados foi realizada em dois momentos distintos; em primeira instância, foram identificadas todas as variações de espectro presentes nas amostras, sem que fossem atribuídos nomes definitivos aos minerais. Posteriormente, as fases foram devidamente identificadas e agrupadas com base em informações obtidas a partir de análises por difração de raios X e por análises quantitativas pontuais em microscópio eletrônico de varredura/EDS.

Análises mineralógicas por difração de raios X de produtos de separações minerais foram realizadas para facilitar a identificação dos minerais presentes. Em todas as amostras tomou-se uma alíquota da fração -0,074+0,037 mm para separação em líquido denso na sensidade de 2,96 g/cm³ (tetra-bromo-etano)

seguido de separação magnética do material afundado em equipamento Frantz de barreiras em intensidades de corrente de 0,0 e 0,3 A. Para identificação das fases cristalinas utilizou-se o banco de dados PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007).

A composição elementar de alguns dos minerais presentes foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura (modelo Stereoscan 440, marca Leo), com emprego de detector de dispersão de energia (EDS) INCA, marca Oxford, com detector SDD (*silicon drift detector*) Inca X-act.

Minerais traços como sulfetos secundários foram identificados a partir dos espectros de EDS das partículas mapeadas.

O tratamento de imagens englobou diversas atividades, sendo a principal a deaglomeração de partículas. Neste procedimento, partículas contendo o mineral de interesse em contato com outras partículas foram ser separadas automaticamente e manualmente porque influenciariam no resultado de liberação. Neste projeto, a deaglomeração foi realizada unicamente para as partículas portadoras de sulfetos.

Ainda no tratamento de imagens existe um passo de exclusão de partículas não identificadas ou desconhecidas e de partículas com tamanho incompatível com o intervalo granulométrico da seção. Em ambos casos, a exclusão não deve influenciar no resultado, ou seja, o número de partículas excluídas deve ser muito baixo. Neste projeto as partículas não identificadas representavam menos de 0,2% do total.

Depois de terminados os tratamentos das imagens, seguiram-se as etapas de extração e análise dos dados. Para aferição dos resultados compara-se a análise química obtida do MLA com a análise química tradicional. Caso haja divergências significativas, retoma-se ao banco de dados (segunda instância) para verificar as composições químicas dos minerais utilizadas e respectivas densidades.

3.2.5 Atividade de campo

Foi realizada uma visita técnica à mina do Sossego no dia 06 de maio de 2010, na qual se teve a oportunidade de conhecer as cavas de Sequeirinho e Sossego (Figura 18 e Figura 19) e as instalações da usina de beneficiamento.

As informações geológicas contribuíram para um melhor entendimento das características dos minérios, distribuição espacial e relações de contato. A visita às instalações da usina de beneficiamento foi uma oportunidade importante para o aprendizado.

Figura 18 – Foto panorâmica da cava de Sequeirinho (foto maio 2010)

Figura 19 – Foto panorâmica da cava de Sossego (foto maio 2010)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise por agrupamento

A análise por agrupamento por difração de raios X considerou dois resultados distintos no que se refere ao critério de seleção adotado (*cut-off*), expresso no dendograma da Figura 20. Uma alternativa considera 4 classes e a outra, mais detalhada, 7 grupos. Para ambos os processamentos adotou-se a medida de distância Euclidiana e o método de linkagem por média, que considerou nos agrupamentos a posição dos picos (ver materiais e métodos).

O dendograma da Figura 20 é a principal maneira de visualizar os agrupamentos realizados. Nele as distâncias entre as amostras refletem as semelhanças entre as mesmas e os ramos os passos do agrupamento. Os traços pontilhados verticais indicam os cortes adotados nos dois processamentos, que definem os grupos finais de cada agrupamento. Nesta mesma figura, o sinal de *** depois da identificação da amostra aponta para a amostra mais representativa de cada grupo (identificada automaticamente pelo software), e o sinal de + para a mais distinta.

A partir do dendograma pode-se compreender as diferenças entre os dois critérios adotados. No agrupamento com quatro classes de minério, as amostras dos grupos 1 e 2 são reunidas no *cluster* A, as dos grupos 3 e 4 no *cluster* B e as dos grupos 6 e 7 no *cluster* D.

Outra maneira de verificar a qualidade do agrupamento é através da análise por principal componente (PCA - *principal component analysis*). A técnica independe da análise por agrupamento, sendo utilizada como complemento para análise do conjunto de dados.

Para o conjunto de amostras, os três primeiros componentes principais descrevem cerca de 85% das informações. O posicionamento das amostras em função destas variáveis, sob diferentes pontos de visada, é apresentado na Figura 21. Nota-se que os grupos ocupam regiões distintas do cubo (em perspectiva 3D), indicando que o agrupamento foi satisfatório.

Figura 20 – Dendrograma indicando o agrupamento das amostras.

Nota: Análise por principal componente do agrupamento relativo a sete amostras

Legenda: rosa (cluster 1), laranja (cluster 2), azul claro (cluster 3), azul escuro (cluster 4), verde (cluster 5), cinza (cluster 6) e vermelho (cluster 7).

Nota: Análise por principal componente do agrupamento relativo a sete amostras

Legenda: azul (cluster A), verde (cluster B), vermelho (cluster C) e cinza (cluster D).

Figura 21 – Distribuição espacial dos agrupamentos de amostras segundo análise de componente principal (PCA), sob diferentes pontos de visada – 7 e 4 grupos.

A distribuição das amostras de cada grupo nos corpos Sequeirinho e Sossego é apresentada na Tabela 1. Nota-se boa correlação do agrupamento com a origem das amostras: os *clusters* 1, 2, 6 e 7 (A e D) são compostos majoritariamente por amostras do corpo Sequeirinho enquanto que os *clusters* 3 e 5 (B e C) de amostras do corpo Sossego. O *cluster* 4 reúne amostras de ambos corpos. Algumas amostras não possuem informações sobre procedência.

Tabela 1 – Distribuição espacial do agrupamento nos corpos Sequeirinho e Sossego

	Número de amostras			Total
	Sequeirinho	Sossego	Sem identificação	
<i>Cluster 1</i>	15	0	1	16
<i>Cluster 2</i>	3	0	0	3
<i>Cluster 3</i>	2	19	2	23
<i>Cluster 4</i>	6	11	1	18
<i>Cluster 5</i>	0	11	2	13
<i>Cluster 6</i>	8	0	7	15
<i>Cluster 7</i>	18	2	2	22

Outra maneira de se analisar a qualidade do agrupamento é verificar as semelhanças entre os difratogramas de cada grupo. Na Figura 22 é apresentado um comparativo entre todos os difratogramas de raios X das amostras estudadas, classificados quanto ao grupo ao qual pertencem e com a identificação das principais fases minerais.

O padrão difratométrico de cada *cluster* pode ser visualizado também na Figura 23, a partir dos difratogramas das amostras mais representativas de cada grupo, identificadas automaticamente pelo software. As interpretações dos DRXs destas amostras encontram-se no anexo 2.

Devido à dificuldade para estimar a proporção de fases minerais com estruturas cristalinas semelhantes em amostras complexas a partir da difração de raios X, alguns minerais como albita e feldspato potássico são apresentados como única fase (Alb-Kfs), bem como magnetita e hematita (Mag-Hem) e biotita e muscovita (Bt-Ms).

Legenda: Qtz = quartzo, Ab-Kfs = albita-feldspato potássico, Act = actinolita, Mag-Hem = magnetita-hematita, Chl = clorita, Bt-Ms = biotita- muscovita.

Figura 22 – Comparativo entre os difratogramas

Legenda: Qtz = quartzo, Ab-Kfs = albita-feldspato potássico, Act = actinolita, Mag-Hem = magnetita-hematita, Chl = clorita, Bt-Ms = biotita- muscovita, Cal = calcita, Ep = epídoto.

Figura 23 - Comparação entre difratogramas mais representativos de cada grupo

Analisando os padrões difratométricos dos grupos, verifica-se que as amostras dos *clusters* 1 e 2 (A) possuem em comum elevada proporção de actinolita e menor conteúdo de quartzo e feldspato, sendo que as do grupo 1 possuem pico de magnetita-hematita, ausente no grupo 2.

As amostras dos grupos 3, 4 (B) e 5 (C) são mais ricas em quartzo. O *cluster* 5 (C) se diferencia por apresentar menor proporção de feldspato em relação às demais. Os *clusters* 3 e 4 (B) distinguem-se em relação à proporção de quartzo e actinolita.

As amostras dos *clusters* 6 e 7 (D) contém actinolita, quartzo e feldspato, sendo o grupo 6 distinto do grupo 7 em relação às proporções de mica e clorita.

Variações nas proporções minerais entre amostras de mesmo grupo (diferenças nas intensidades dos picos) são compatíveis com a gênese do depósito, de evolução hidrotermal.

A distribuição dos teores de Cu das amostras de cada grupo é apresentada na Figura 24. Verifica-se uma tendência de algumas amostras dos grupos A e C possuírem teores de Cu mais elevados que as demais.

Figura 24 – Teores de Cu nos grupos definidos (% massa)

Quanto à distribuição dos litotipos nos grupos, apresentada na Tabela 2, não é possível estabelecer uma correlação imediata. Pode-se dizer de maneira grosseira que o grupo A, pertencente ao corpo Sequeirinho, é composto por rochas máficas GBA (gabro), ACT (actinolitos) e MAG (magnetitos), além do tipo BSE (brecha tipo Sequeirinho). Já o grupo D, referente ao mesmo corpo de minério, é composto tanto por rochas máficas como por rochas granitóides, como GRF (granófiro), GRA (granito) e MVA (metavulcânica félsica).

Os grupos B e C, referentes às amostras do corpo Sossego, são compostos por rochas predominantemente félsicas (GRF, GRA e MVA) além do tipo BHT (brecha heterolítica), descrita somente para o corpo Sossego.

Tabela 2 – Distribuição dos tipos litológicos nos grupos

	Litotipos								TOTAL
	GBA	ACT	MAG	BSE	GRF	GRA	MVA	BHT	
	gabro	actinolítico	magnetítico	brecha Sequeirinho	granito granofírico	granito	metavulcânica félsica	brecha heterolítica	
<i>Cluster A</i>	2	6	7	2	0	0	0	0	17
<i>Cluster B</i>	1	3	0	0	17	3	1	14	39
<i>Cluster C</i>	0	0	0	0	7	0	0	4	11
<i>Cluster D</i>	4	13	0	1	2	4	7	0	31

Nota: algumas amostras não possuem classificação litológica e não foram incluídas na tabela

4.1.1 Relação agrupamento com a geologia da Mina do Sossego

Existem algumas dificuldades para estabelecer relações diretas entre o agrupamento e a geologia da Mina do Sossego, parte delas deve-se à indiferenciação das proporções de albita/feldspato potássico, magnetita/hematita e biotita/muscovita, outra parte deve-se a própria complexidade mineralógica, estruturação do depósito (superposição dos estágios de alteração hidrotermal) e dificuldades da equipe de geologia de campo na classificação dos litotipos a partir de testemunhos de sondagens.

A partir da análise dos resultados, apresentada a seguir, pode-se dizer que o agrupamento refletiu os diferentes ambientes geológicos de formação, agrupando as amostras de acordo com a(s) alteração(ões) hidrotermal(is) predominante(s).

As relações a seguir se baseiam nas interpretações sobre a distribuição regional dos estágios de alteração hidrotermal apontadas por Monteiro *et.al.* (2008 - vide item 2.1.3 e Figura 3), informações de localização e principais fases minerais constituintes dos grupos (padrão difratométrico dos *clusters*):

- As amostras do *cluster* 1 e 2 (A) são provenientes do corpo Sequeirinho. As principais fases minerais, actinolita e magnetita¹, são características de regiões onde a alteração sódica-cálcica foi mais intensa e houve a formação de corpos de actinolitos e magnetitos.
- Os *clusters* 6 e 7 (D) também são compostos majoritariamente por amostras do corpo Sequeirinho, entretanto as principais fases minerais são actinolita e feldspato (no caso albita), também características dos estágios de alteração sódica-cálcica e sódica. Possivelmente a proporção de clorita no *cluster* 7 deve-se à maior influência de alteração clorítica e a de mica no *cluster* 6 pode representar influência tanto alteração potássica (biotita) quanto hidrolítica (muscovita).
- Os *clusters* 3 e 5 (parte do B e C) englobam amostras do corpo Sossego. No *cluster* 5, a associação de quartzo, mica, óxido de ferro (possivelmente hematita), clorita e calcita caracteriza a assembléia de alteração hidrolítica. O *cluster* 3, composto por elevada proporção de quartzo, clorita e feldspatos, pode representar amostras sob maior influência da alteração clorítica.
- Provavelmente as amostras do *cluster* 4 (parte do B) representam litotipos formados em ambiente transicional, sob influência de diversas alterações hidrotermais e por isso reúne amostras de ambos corpos.

¹ Amostra com elevada proporção de magnetita, observável em imã de mão.

4.2 Caracterização tecnológica

As informações obtidas não apontam para diferenças substanciais entre os dois resultados de agrupamentos (quatro e sete *clusters*). Por este motivo e considerando o escopo deste projeto, os estudos de caracterização tecnológica apresentados a seguir foram conduzidos com base no resultado relativo a quatro grupos de amostras. Os resultados serão apresentados na seguinte ordem: “*cluster A*”, “*cluster D*” (referentes ao corpo Sequeirinho) e “*cluster B*” e “*cluster C*” (corpo Sossego).

4.2.1 Composição química das amostras estudadas

Foram efetuadas análises químicas semi-quantitativas por fluorescência de raios X para todas as amostras cabeças (tais quais). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Análises químicas das amostras cabeças (% em massa)

Elemento/ Composto	Teor (% em massa)			
	Sequeirinho		Sossego	
	<i>Cluster A</i>	<i>Cluster D</i>	<i>Cluster B</i>	<i>Cluster C</i>
Cu	2,09	0,92	0,66	1,23
S	2,26	1,01	0,69	1,30
SiO ₂	38,7	55,7	62,8	49,3
Fe ₂ O ₃	27,5	12,2	9,94	18,5
Al ₂ O ₃	5,69	9,92	9,12	6,26
CaO	8,49	6,00	4,55	6,73
MgO	5,71	4,07	2,52	4,60
Na ₂ O	1,58	3,69	2,87	0,82
K ₂ O	0,44	1,03	1,60	1,34
TiO ₂	0,42	0,51	0,45	0,40
P ₂ O ₅	3,85	1,42	0,96	1,37
PF	1,63	2,49	3,38	7,34
Total	98,4	99,0	99,5	99,2

Observa-se a partir dos dados apresentados, que o teor de Cu nas amostras varia de 0,66 e 2,09%, sendo o *cluster* A aquele com mais alto teor, seguido do *cluster* C, com 1,23% e do *cluster* D (0,92%). O teor de S encontra-se entre 0,69 e 2,26% com ocorrência proporcional à do Cu.

Em todos os *clusters* a sílica é predominante. Entretanto, a proporção de SiO₂ varia amplamente entre as amostras: o *cluster* A é o mais pobre com 38,7% de SiO₂, seguido do *cluster* C (49,3%), do D (55,7%) e por fim do B, com 62,8%.

O Fe₂O₃ é o segundo composto mais abundante, com teores entre 9,94% (*cluster* B) e 27,5% (*cluster* A). A ocorrência segue padrão oposto ao da sílica: as amostras mais ricas em SiO₂ possuem teores mais baixos de Fe₂O₃.

O teor de Al₂O₃ nas amostras situa-se entre 5,69 e 9,92%; os *cluster* com teores de Al₂O₃ próximos a 9-10% são aqueles com teor de SiO₂ mais elevado (B e D). O teor de CaO está compreendido entre 4,55 e 8,49%.

O MgO apresenta-se de modo semelhante ao do Fe₂O₃: as amostras mais ricas em MgO são aquelas com mais Fe₂O₃. Os valores de MgO situam-se entre 2,52 e 5,71%.

Quanto ao teor de P₂O₅, verifica-se que a amostra A possui teor bem mais elevado, com 3,85% do total; nos outros *clusters* permanece entre 0,96% (B) e 1,42% (D).

Em resumo, tem-se que o *cluster* A é o que possui os menores teores de SiO₂ (38,7%) e Al₂O₃ (5,69%) e os maiores teores de Fe₂O₃ (27,5%), MgO (5,71%) e CaO (8,49%), além de P₂O₅ elevado. O *cluster* B é o oposto, apresentando os maiores teores de SiO₂ (62,8%) e Al₂O₃ (9,94%) e os menores teores de Fe₂O₃ (9,94%), MgO (2,52%) e CaO (4,55%), além de Na₂O e K₂O (1,57%) elevado. Os *clusters* C e D possuem composição intermediária entre as amostras A e B, sendo o *cluster* C mais próximo do A e o *cluster* D, mais próximo do B.

4.2.2 Distribuição granulométrica das amostras estudadas

A moagem realizada em laboratório em moinho de bolas visou à geração de produtos com distribuição granulométrica semelhante à da alimentação da flotação *rougher* da usina de beneficiamento.

Os resultados das moagens, bem como as distribuições granulométricas das alimentações da flotação *rougher* e *cleaner* são apresentados a seguir, na Figura 25 e Tabela 4.

Figura 25 – Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação *rougher* e *cleaner*.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação rougher e cleaner.

Abertura (mm)	% em massa acumulada abaixo					Alim. routher	Alim. cleaner
	Cluster A	Cluster D	Cluster B	Cluster C			
0,21 mm	85	81	85	83	86	99	
0,149 mm	69	66	67	69	77	97	
0,074 mm	47	44	47	45	55	90	
0,037 mm	28	28	28	27	37	74	
0,020 mm	19	19	21	19	28		
0,010 mm	10	11	12	10	22		

Para as condições de moagem empregadas, cerca de 80 a 85% em massa das amostras possui granulação abaixo de 0,21 mm. As frações abaixo de 0,020 mm representam 19 a 21% do total.

A distribuição granulométrica aproximada da alimentação da flotação *rougher*, descrita em BERGERMAN (2009), indica que 86% do material está abaixo de 0,21 mm, sendo que a fração abaixo de 0,020 mm corresponde a aproximadamente 28% do total.

Já a distribuição granulométrica da alimentação flotação *cleaner*, última etapa de flotação do circuito de beneficiamento, possui 99% em massa abaixo de 0,21 mm e 74% abaixo de 0,037 mm.

É importante ressaltar que os resultados de caracterização tecnológica apresentados por fração granulométrica, a seguir, referem-se às condições de moagem empregadas neste trabalho. Assim, os resultados apresentados não podem ser empregados diretamente para análises de produtos de moagem da usina de beneficiamento, sendo necessários ajustes que reflitam a diferença entre as moagens do laboratório e a da usina (com maior conteúdo de finos).

4.2.3 Cluster A – Sequeirinho

4.2.3.1 Análise granuloquímica

A distribuição granulométrica da amostra cominuída e a composição química (teores dosados) por fração granulométrica para o *cluster* A é exposta na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de análise granuloquímica – *cluster* A

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (% em massa)													Distribuição no ensaio (%)					
			Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	
+0,210	15,4	15,4	1,18	1,44	44,2	23,2	6,59	8,17	6,02	2,07	0,51	0,43	3,23	1,66	9,7	10,5	17,2	13,9	17,3	14,8	
-0,210+0,150	15,1	30,6	1,48	1,82	40,4	26,3	6,07	8,43	5,75	1,83	0,44	0,43	4,00	1,58	12,0	13,0	15,5	15,4	15,6	15,0	
-0,150+0,074	22,8	53,4	1,76	2,19	38,4	27,7	5,55	8,63	5,75	1,72	0,37	0,37	4,57	1,52	21,4	23,6	22,1	24,5	21,6	23,1	
-0,074+0,037	18,8	72,2	2,24	2,63	36,6	28,4	5,06	8,80	5,85	1,40	0,39	0,39	4,49	2,04	22,5	23,4	17,4	20,7	16,2	19,4	
-0,037+0,020	9,16	81,3	2,63	3,08	36,3	27,2	5,37	8,34	6,13	1,33	0,44	0,35	4,27	2,66	12,9	13,4	8,4	9,6	8,4	9,0	
Under +0,010	8,64	90,0	2,61	2,06	37,7	26,6	5,54	8,92	6,36	1,30	0,40	0,36	4,89	1,88	12,1	8,4	8,2	8,9	8,1	9,0	
Over	10,0	100,0	1,77	1,60	44,6	17,9	7,47	8,31	7,45	1,85	0,60	0,37	3,80	3,03	9,5	7,6	11,3	7,0	12,8	9,8	
Total calc.	100		1,87	2,11	39,6	25,8	5,87	8,53	6,07	1,67	0,44	0,39	4,19	1,93	100	100	100	100	100	100	
Total dos.	100		2,09	2,26	38,7	27,5	5,69	8,49	5,71	1,58	0,44	0,42	3,85	1,63							

A análise granulométrica indica que cerca de 15,4% em massa estão retidos em 0,21 m e aproximadamente 18,7% estão abaixo de 0,020 mm para as condições de moagem empregadas.

Os teores de Cu variam de 1,18 a 2,63%, aumentando progressivamente até o intervalo +0,020 mm, a partir do qual decresce novamente. Os teores de S situam-se entre 1,44 e 3,08%, apresentando ocorrência semelhante ao cobre. Os teores de SiO₂ variam de 36,3 a 44,6%, enquanto que os de Fe₂O₃ de 23,2 e 28,4%. Em menores proporções, ocorrem teores médio de CaO ao redor de 8-9%, Al₂O₃ entre 5,06 e 7,47% e MgO entre 5,75 a 7,45%. Além de 3-4% de P₂O₅ e 1-2% de Na₂O.

4.2.3.2 Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA)

A composição mineralógica do *Cluster* A para as frações acima de 0,010 mm, apresentada na Tabela 6, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV.

Tabela 6 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) - *cluster A*

Mineral	Fração (mm) - % em massa						Total
	+0,210	-0,210 +0,150	-0,150 +0,074	-0,074 +0,037	-0,037 +0,020	-0,020 +0,010	
calcopirita	3,6	4,4	4,9	5,9	8,6	9,3	5,6
pirita	0,5	0,4	0,4	0,6	0,3	0,4	0,5
outros sulfetos*	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
anfibólio	33	30	28	30	29	36	31
magnetita	18	23	26	25	25	19	23
plagioclásio	12	11	9	8	7	7	9
apatita	6	7	8	8	8	8	8
quartzo	6	6	6	5	4	4	5
epídoto	6	6	5	4	4	3	5
clorita	4	4	4	5	7	6	5
escapolita	4	3	3	2	2	2	3
mica	2	2	2	2	3	3	2
k-feldspato	1	1	1	1	0,9	0,9	1
outros	2	2	2	2	2	2	2

Nota: outros sulfetos = calcocita, milerita e siegenita, anfibólio = actinolita ±hastingsita; plagioclásio = albita ±plagioclásio sódico com cálcio, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, outros = piroxênio + calcita + titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.*

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o *cluster A* é composto predominantemente por anfibólio (31%) e magnetita (23%), além de plagioclásio (9%), apatita (8%), quartzo (5%), epídoto (5%) e clorita (5%). Em menores proporções estão presentes escapolita (3%) e micas (2%). Os minerais acessórios (inferiores a 1%) são: piroxênio, calcita, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita.

Os conteúdos de calcopirita variam de 3,6 a 9,3%, elevando-se progressivamente em direção aos finos. A pirita representa cerca de 0,5% da amostra, variando de 0,3 a 0,6%. Os outros sulfetos são calcocita, milerita e siegenita, que juntos perfazem menos de 0,1% do total.

O anfibólio predominante é a actinolita, podendo ocorrer a hastingsita também; os conteúdos variam de 29 a 33%. As proporções de magnetita situam-se entre 18 e 26%, com tendência de aumento nas frações intermediárias. A albita é o

plagioclásio predominante com conteúdos que variam de 7 a 12%, diminuindo em direção às frações mais finas.

A apatita situa-se entre 6 e 8%, o quartzo entre 4-6%, o epídoto entre 3-6% e a clorita entre 4-7%. A escapolita varia de 2-4% e a mica de 2-4%.

Os difratogramas interpretados de amostras representativas deste *cluster* são apresentados no anexo 2. Os teores médios considerados para as composições dos minerais presentes e respectivas massas específicas são expostos no anexo 3 (banco de dados do MLA), bem como a comparação entre as composições químicas dosadas por FRX e as calculadas a partir do MLA, indicando elevadas correlações e validando os resultados da análise de imagens (anexo 4).

4.2.3.3 *Partição do Cu e S*

As distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores é apresentada na Tabela 7.

No *cluster* A, o cobre está presente quase que em sua totalidade na forma de calcopirita (99,5%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita. O enxofre está presente em sua maioria na calcopirita (89%) e na pirita (10%); nos demais minerais portadores (calcocita, milerita e siegenita) perfaz cerca de 1% do total presente na amostra.

Tabela 7 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores – *cluster A*

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,210	99,3	0,8	-	-	-
	-0,210+0,150	99,9	0,1	-	-	-
	-0,150 +0,074	100	-	-	-	-
	-0,074 +0,037	98,8	1,2	-	-	-
	-0,037 +0,020	99,7	0,3	-	-	-
	-0,020 +0,010	99,7	0,3	-	-	-
	Total +0,010	99,5	0,5	-	-	-
S	+0,210	82,7	0,2	16,1	0,2	0,8
	-0,210+0,150	86,6	-	12,4	0,8	0,3
	-0,150 +0,074	87,9	-	11,5	-	0,6
	-0,074 +0,037	86,6	0,3	12,8	0,3	-
	-0,037 +0,020	93,1	0,1	5,6	0,6	0,6
	-0,020 +0,010	92,6	0,1	6,8	0,2	0,4
	Total +0,10	88,4	0,1	10,8	0,3	0,4

4.2.3.4 Caracterização da calcopirita

Os principais aspectos texturais da calcopirita observados sob microscopia óptica de luz refletida, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 1 e na Fotomicrografia 2.

Na primeira imagem é apresentado um aspecto geral da fração 0,21+0,15 mm, onde nota-se a presença dos minerais opacos: essencialmente magnetita (cinza claro) e calcopirita (levemente amarelado).

A calcopirita ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. Detalhes destas texturas podem ser mais bem observados na Fotomicrografia 2.

Os mesmos aspectos texturais podem ser observados na Fotomicrografia 3 e na Fotomicrografia 4, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Fotomicrografia 1 – MO, *cluster A*, fração -0,21+0,15 mm.

Aspecto geral da amostra *Cluster A*. Os minerais opacos são essencialmente magnetita e calcopirita. A calcopirita ocorre muitas vezes como pequenas inclusões nos minerais de ganga

Fotomicrografia 2 – MO, *cluster A*, fração -0,21+0,15 mm.

Detalhe de algumas partículas: (a), (c) e (d) calcopirita e magnetita na forma de pequenas inclusões nos demais minerais de ganga; (b) cristal maior de calcopirita.

Fotomicrografia 3 – MEV, *cluster A*, fração -0,21+0,15 mm.

Minúsculos cristais de calcopirita inclusos em minerais de ganga na partícula maior ao centro.

Fotomicrografia 4 – MEV, *cluster A*, fração -0,21+0,15 mm.

Detalhe de partícula composta majoritariamente por calcopirita (tom mais claro da imagem).

4.2.3.5 Características da calcopirita

A caracterização das principais associações da calcopirita foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura MEV/EDS aliada ao sistema de análise de imagens *Mineral Liberation Analyser (MLA)*.

A Figura 26 e a Tabela 8 apresentam um sumário das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre partículas livres (>95% do mineral de interesse), mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e mistas em partículas ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm.

A calcopirita apresenta liberação global de 74%, aumentando de 33 a 92% conforme diminui a granulação. Abaixo de 0,037 mm, quando atinge liberação de 90%, as associações binárias perfazem 8% da fração, enquanto que as ternárias cerca de 1%. Nas partículas binárias, as associações mais frequentes são com anfibólios, apatita, clorita e magnetita.

Figura 26 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica - cluster A

Tabela 8 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre			Mista em binárias			Mista em ternárias		
+0,210	33			26			41		
-0,210+0,150	52			20			27		
-0,150 +0,074	71			15			14		
-0,074 +0,037	86			10			4		
-0,037 +0,020	90			8			1		
-0,020 +0,010	92			8			0,6		
Total +0,010	74			14			12		

Associações da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	anfibólio	apatita	clorita	mag.	pirita	epidoto	plagioc.	outros*	Total
+0,210	6	6	3	2	5	1	1	2	26
-0,210+0,150	5	5	4	2	2	2	tr	1	20
-0,150 +0,074	3	3	3	1	1	1	1	1	15
-0,074 +0,037	2	1	3	2	1	1	tr	1	10
-0,037 +0,020	1	1	2	2	tr	tr	tr	1	8
-0,020 +0,010	3	1	1	2	tr	1	tr	1	8
Total +0,010	3	3	2	2	1	1	tr	1	14

Associações da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	anfibólio	apatita	clorita	mag.	pirita	epidoto	plagioc.	outros*	Total
+0,210	9	6	3	1	4	4	4	7	41
-0,210+0,150	7	4	2	1	4	3	3	4	27
-0,150 +0,074	3	2	2	tr	2	1	1	3	14
-0,074 +0,037	1	tr	tr	-	1	1	1	1	4
-0,037 +0,020	tr	-	tr	tr	tr	tr	-	tr	1
-0,020 +0,010	tr	-	tr	tr	-	-	tr	tr	0,6
Total +0,010	3	2	2	1	tr	1	1	2	12

Notas: 1. abreviaturas: mag = magnetita; plagioc = plagioclásio

2. (*) = outros minerais presentes

3. tr = fases com até 0,5% em massa

A partir das imagens digitais (MLA) calcula-se a fração de mineral útil para cada partícula, bem como a sua respectiva área ou perímetro exposto. O processamento desses dados permite determinar a distribuição em frequência do mineral de interesse segundo sua área ou superfície nas partículas. As curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula) são apresentadas respectivamente na Figura 27 e na Figura 28.

Figura 27 – Espectro de liberação da calcopirita em área – *cluster A*

Figura 28 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – *cluster A*

A Tabela 9 apresenta os valores de liberação considerando como partícula liberada aquelas com no mínimo 85%, 90%, 95% e 100% de calcopirita (valores extraídos da curva de espectro de liberação do total +0,010 mm, em termos de porcentagem em área e em superfície exposta).

Tabela 9 – Grau de liberação da calcopirita - *cluster A*

Fração de mineral útil na partícula (%)	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação da calcopirita (% em área)	78	76	74	65
Grau de liberação da calcopirita (% em perímetro exposto)	77	74	72	66

4.2.3.6 Curvas de distribuição versus teores de Cu

A curva de distribuição acumulada (recuperação potencial base 2D) *versus* teor de Cu (obtida nos estudos de MLA) para o material acumulado acima de 0,10 mm, no intervalo considerado, é apresentada na Figura 29. Os estudos mostram que, teoricamente, para as condições de cominuição empregadas um teor entre 13 e 17% de Cu (valores típicos dos produtos da etapa *rougher* segundo Bergeman 2009), seria possível recuperar mais de 99% do total de Cu já na granulometria de moagem da etapa *rougher* de flotação.

Figura 29 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu- *cluster A*, total acima de 0,010mm

4.2.4 Cluster D - Sequeirinho

4.2.4.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição granulométrica da amostra cominuída e a composição química (teores dosados) por fração granulométrica para o *cluster* D é exposta na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de análise granuloquímica – *cluster* D

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (% em massa)													Distribuição no ensaio (%)					
			Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	
+0,210	19,1	19,1	0,48	0,56	59,9	9,5	10,7	5,32	3,98	4,12	1,12	0,53	0,90	1,96	10,2	11,1	20,5	15,3	20,3	17,0	
-0,210+0,150	14,8	33,9	0,61	0,72	58,0	10,6	10,4	5,59	3,98	4,02	1,07	0,53	1,16	2,30	10,1	11,1	15,4	13,2	15,4	13,8	
-0,150+0,074	21,8	55,7	0,84	0,99	56,0	11,8	9,98	6,11	4,08	3,81	1,00	0,52	1,67	2,18	20,5	22,5	21,9	21,6	21,6	22,3	
-0,074+0,037	15,9	71,5	1,23	1,36	53,2	13,5	9,44	6,43	4,28	3,50	0,92	0,47	1,93	2,61	21,8	22,6	15,1	18,0	14,9	17,1	
-0,037+0,020	9,4	81,0	1,39	1,59	52,0	13,8	9,21	6,52	4,77	3,31	0,91	0,47	1,90	2,86	14,7	15,7	8,8	10,9	8,6	10,3	
Under +0,010	8,0	89,0	1,40	1,02	52,1	15,1	9,05	6,89	4,77	3,24	0,92	0,49	2,14	1,87	12,6	8,6	7,5	10,2	7,2	9,3	
Over	11,0	100,0	0,82	0,73	54,6	11,7	10,9	5,53	5,03	3,64	1,27	0,46	1,52	2,80	10,2	8,4	10,8	10,8	12,0	10,2	
Total calc.	100		0,92	0,98	55,6	12,0	10,0	6,02	4,31	3,72	1,02	0,50	1,57	2,34	100	100	100	100	100	100	
Total dos.	100		0,92	1,01	55,7	12,2	9,92	6,00	4,07	3,69	1,03	0,51	1,42	2,49							

A análise granulométrica do *cluster* D indica que cerca de 19% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 19% constituem material abaixo de 0,020 mm, para as condições de moagem empregadas.

Os teores de Cu variam de 0,48 a 1,40%, sendo mais elevados no intervalo - 0,074+0,010 mm. Observa-se um aumento dos teores com o decréscimo na granulometria, exceto no overflow. O teor de S encontra-se entre 0,56 e 1,59%, aumentando progressivamente até o intervalo +0,020 mm, a partir do qual ocorre decréscimo.

Os teores de SiO₂ variam de 50,1 a 59,2%; os teores de Fe₂O₃ entre 9,4 e 14,8% e os de Al₂O₃, entre 8,83 e 10,7%. Ainda permanecem 5-6% de CaO, 4-5% de MgO e 3-4% de Na₂O. Além de P₂O₅ (1,5%), K₂O (1%), Cl (0,5%) e TiO₂ (0,5%).

4.2.4.2 Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA)

A composição mineralógica do *cluster* D para as frações acima de 0,010 mm, exposta na Tabela 11, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV.

Tabela 11 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – *cluster* D

Minerais	Fração (mm) - % em massa						Total
	+0,210	-0,210 +0,150	-0,150 +0,074	-0,074 +0,037	-0,037 +0,020	-0,020 +0,010	
calcopirita	1,2	1,7	2,3	3,5	4,4	4,9	2,6
pirita	0,1	0,2	0,4	0,2	0	0,2	0,2
outros sulfetos	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
plagioclásio	30	29	26	25	20	19	26
anfíbólio	21	21	22	22	26	28	23
quartzo	12	12	11	11	9	9	11
escapolita	9	9	8	7	8	6	8
epidoto	6	6	6	6	5	4	6
magnetita	3	5	6	6	8	7	5
k-feldspato	5	5	5	5	4	3	5
clorita	4	5	5	5	7	7	5
mica	3	3	3	3	4	4	3
apatita	2	2	3	3	4	4	3
outros	2	2	3	3	3	3	3

Nota: outros sulfetos = calcocita, milerita e siegenita, anfíbólio = actinolita ±hastingsita; plagioclásio = albita ±plagioclásio sódico com cálcio, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, outros = carbonatos + piroxênio + titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o *cluster* D é composto predominantemente por plagioclásio (26%), anfíbólio (23%) e quartzo (11%), além de escapolita (8%), epidoto (6%), magnetita (5%), K-feldspato (5%) e clorita (5%). Em menor quantidade estão presentes mica e apatita. Os minerais acessórios (inferiores a 1%) são: piroxênio, calcita, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita

Os conteúdos de calcopirita variam de 1,2 a 4,9%, elevando-se progressivamente em direção aos finos. A pirita representa cerca de 0,2% da

amostra, variando de 0 a 0,4%. Os outros sulfetos (calcocita, milerita e siegenita) perfazem menos de 0,1% do total.

A albita é o plagioclásio predominante, variando de 30 a 19% em direção às frações mais finas. O anfibólio segue tendência contrária, aumentando de 21 a 28% em direção aos finos; a actinolita é o anfibólio predominante, ocorrendo secundariamente a hastingsita.

O quartzo, a escapolita, o epídoto e o K-feldspato decrescem em direção aos finos, variando de 9 a 12% (quartzo), 6 a 9% (escapolita), 4 a 6% (epídoto) e 3 a 5% (K-feldspato). A magnetita, clorita (Fe-clinocloro), mica (biotita/flogopita e muscovita) e apatita seguem tendência oposta, aumentando em direção aos finos.

Os difratogramas interpretados de amostras representativas deste *cluster* são apresentados no anexo 2. Os teores médios considerados para as composições dos minerais presentes e respectivas massas específicas são expostos nos anexos 3 (banco de dados do MLA), bem como a comparação entre as composições químicas dosadas por FRX e as calculadas a partir do MLA, indicando elevadas correlações e validando os resultados da análise de imagens (anexo 4).

4.2.4.3 Partição do Cu e S

As distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores é apresentada na Tabela 12.

No *cluster* D, o cobre está presente quase que em sua totalidade na forma de calcopirita (98,7%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita (1,4%). O enxofre está presente em sua maioria na calcopirita (88,3%) e na pirita (10,8%). O conteúdo de enxofre nos demais minerais portadores (calcocita, milerita e siegenita) perfaz cerca de 1% do total presente na amostra.

Tabela 12 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores – *cluster D*

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,210	92,5	7,5	-	-	-
	-0,210+0,150	99,5	0,6	-	-	-
	-0,150 +0,074	99,9	0,1	-	-	-
	-0,074 +0,037	100	-	-	-	-
	-0,037 +0,020	98,2	1,8	-	-	-
	-0,020 +0,010	98,9	1,1	-	-	-
	Total +0,010	98,6	1,4	-	-	-
S	+0,210	84,3	1,7	13,9	-	0,1
	-0,210+0,150	85,9	0,1	13,5	0,3	0,1
	-0,150 +0,074	77,5	-	21,2	0,9	0,4
	-0,074 +0,037	91,6	-	7,6	0,4	0,4
	-0,037 +0,020	99,3	0,5	0,1	-	0,2
	-0,020 +0,010	93,6	0,3	5,7	0,2	0,2
	Total +0,10	88,3	0,3	10,8	0,4	0,3

4.2.4.4 Caracterização da calcopirita

Os principais aspectos texturais da calcopirita observados sob microscopia óptica de luz refletida, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 5 e na Fotomicrografia 6.

Na primeira imagem é apresentado um aspecto geral da fração 0,21+0,15 mm, onde nota-se a presença dos minerais opacos: essencialmente magnetita (cinza claro) e calcopirita (levemente amarelado).

A calcopirita ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. Detalhes destas texturas podem ser mais bem observados na Fotomicrografia 6.

Os mesmos aspectos texturais podem ser observados na Fotomicrografia 7 e na Fotomicrografia 8, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Fotomicrografia 5 – MO, *cluster* D, fração -0,21+0,15 mm.

Aspecto geral da amostra *Cluster* D. Os minerais opacos são essencialmente magnetita, calcopirita e pirita. A calcopirita ocorre muitas vezes como pequenas inclusões nos minerais de ganga

Fotomicrografia 6 – MO, *cluster* D, fração -0,21+0,15 mm.

Detalhe das partículas com calcopirita: (a), (b) e (d) calcopirita disseminada, como pequenas inclusões nos demais minerais de ganga e (c) calcopirita na forma de

Fotomicrografia 7 – MEV, *cluster* D, fração -0,21+0,15 mm.

Aspecto textural da calcopirita: minúsculo cristal de calcopirita e sua associação com a ganga.

Fotomicrografia 8 – MEV, *cluster* D, fração -0,21+0,15 mm.

Formas de ocorrência da calcopirita.

4.2.4.5 Características da calcopirita

A caracterização das principais associações da calcopirita foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura MEV/EDS aliada ao sistema de análise de imagens *Mineral Liberation Analyser (MLA)*.

A Figura 30 e a Tabela 13 apresentam um sumário das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre partículas livres (>95% do mineral de interesse), mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e mistas em partículas ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm.

Figura 30 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – *cluster D*

A calcopirita apresenta liberação global de 73%, variando de 27 a 95% nas frações, aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,037 mm, quando atinge liberação acima de 90%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 4-6% da fração, enquanto que as ternárias correspondem a cerca de 1%. Nas partículas binárias, as associações mais frequentes são com clorita, anfibólio, plagioclásio, apatita, entre outros.

Tabela 13 - Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livres			Mista em binárias			Mista em ternárias		
+0,210	27			24			50		
-0,210+0,150	40			27			32		
-0,150 +0,074	62			20			18		
-0,074 +0,037	85			11			4		
-0,037 +0,020	93			6			1		
-0,020 +0,010	95			4			1		
Total +0,010	73			14			14		

Associações da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	anfib.	plagioc	apatita	pirita	quartzo	epidoto	outros*	Total
+0,210	3	4	4	3	1	2	3	4	24
-0,210+0,150	7	4	7	1	1	1	1	4	27
-0,150 +0,074	4	3	2	4	4	1	1	2	20
-0,074 +0,037	3	2	1	2	tr	tr	tr	2	11
-0,037 +0,020	1	1	1	tr	-	tr	1	2	6
-0,020 +0,010	1	1	1	-	tr	tr	tr	1	4
Total +0,010	3	2	2	2	1	1	1	2	14

Associações da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	anfib.	plagioc	apatita	pirita	quartzo	epidoto	outros*	Total
+0,210	6	8	13	4	tr	5	6	8	50
-0,210+0,150	4	7	7	3	tr	3	3	7	32
-0,150 +0,074	1	3	3	1	1	2	1	6	18
-0,074 +0,037	1	1	1	tr	-	tr	tr	1	4
-0,037 +0,020	tr	tr	tr	tr	-	tr	tr	1	1
-0,020 +0,010	tr	tr	tr	tr	tr	-	tr	tr	1
Total +0,010	2	2	3	1	tr	1	1	3	14

Notas: 1. abreviaturas: anfib = anfibólio; plagioc = plagioclásio

2. (*) = outros minerais presentes

3. tr = fases com até 0,5% em massa

A partir das imagens digitais (MLA) calcula-se a fração de mineral útil para cada partícula, bem como a sua respectiva área ou perímetro exposto. O processamento desses dados permite determinar a distribuição em frequência do mineral de interesse segundo sua área ou superfície nas partículas. As curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em área e em

“superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula). são apresentadas respectivamente na Figura 31 e na Figura 32.

Figura 31 – Espectro de liberação da calcopirita em área – *cluster D*

Figura 32 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – *cluster D*

A Tabela 14 apresenta os valores de liberação considerando como partícula liberada aquelas com no mínimo 85%, 90%, 95% e 100% de calcopirita (valores extraídos das curvas de espectro de liberação do total deslamado, em termos de porcentagem em área e em superfície exposta).

Tabela 14 – Grau de liberação da calcopirita - *cluster D*

Fração de mineral útil na partícula (%)	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação da calcopirita (% em área)	76	74	72	65
Grau de liberação da calcopirita (% em perímetro exposto)	74	72	70	65

4.2.4.6 Curvas de distribuição versus teores de cobre

A curva de distribuição acumulada *versus* teor de Cu (obtida nos estudos de MLA) para o material acumulado acima de 0,10 mm, no intervalo considerado, é apresentada na Figura 33. Os estudos mostram que, teoricamente, nas condições de moagem empregadas para um teor entre 13 e 17% de Cu (valores típicos dos produtos da etapa *rougher* segundo Bergeman 2009), seria possível recuperar cerca de 97-98% do total de Cu já na granulometria de moagem da etapa *rougher* de flotação.

Figura 33 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - *cluster D*, total acima de 0,010mm

4.2.5 Cluster B - Sossego

4.2.5.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores por fração granulométrica para o *cluster* B é exposta na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados de análise granuloquímica – *cluster* B

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (% em massa)													Distribuição no ensaio (%)					
			Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	
+0,210	15,4	15,4	0,37	0,40	67,5	7,40	9,64	2,96	2,20	3,32	1,74	0,45	0,64	3,00	8,4	8,6	16,5	12,1	16,2	10,2	
-0,210+0,150	17,2	32,6	0,55	0,64	65,5	8,19	9,30	3,57	2,32	3,14	1,69	0,43	0,88	3,42	13,7	15,2	17,9	15,0	17,5	13,7	
-0,150+0,074	20,7	53,4	0,75	0,85	64,9	8,95	9,23	4,30	2,46	3,06	1,65	0,40	1,18	1,71	22,8	24,5	21,4	19,7	20,9	19,9	
-0,074+0,037	18,3	71,7	0,86	0,99	61,0	9,97	8,64	4,88	2,70	2,73	1,46	0,43	1,21	4,54	23,1	25,1	17,8	19,4	17,3	20,0	
-0,037+0,020	7,0	78,7	1,05	1,14	58,2	11,4	8,45	5,40	2,91	2,47	1,40	0,42	1,25	5,33	10,7	11,0	6,4	8,5	6,4	8,4	
Under +0,010	9,1	87,8	0,93	0,66	60,0	12,2	8,22	6,13	2,81	2,45	1,35	0,45	1,46	2,94	12,3	8,3	8,7	11,8	8,1	12,4	
Over	12,3	100,0	0,50	0,42	58,1	10,4	10,1	5,60	3,57	2,82	1,70	0,43	0,98	4,88	8,9	7,2	11,3	13,5	13,5	15,3	
Total calc.	100		0,70	0,74	63,0	9,44	9,12	4,48	2,63	2,92	1,59	0,43	1,07	3,46	100	100	100	100	100	100	
Total dos.	100		0,66	0,69	62,8	9,94	9,12	4,55	2,52	2,87	1,60	0,45	0,96	3,38							

A análise granulométrica do *cluster* B indica que cerca de 15% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 21% constituem material abaixo de 0,020 mm, para as condições de moagem empregadas.

Os teores de Cu variam de 0,37 até 1,05%, com tendência de aumento em direção aos finos, com exceção do overflow. O teor de S encontra-se entre 0,40 e 1,14% com tendência semelhante ao do cobre.

A sílica representa cerca de 63% da amostra, variando de 58,1 a 67,5% nas frações (com tendência de diminuição para os finos). O Fe₂O₃ constitui por volta 10% da amostra, variando de 7,4 até 12,2%, com tendência de aumento para os finos. O teor de Al₂O₃ situa-se entre 8,22 e 10,1%, representando 9% da amostra. O teor médio calculado de CaO é 4,5% e o de MgO 2,6%. Ainda permanecem cerca de 3% de Na₂O, 1,5% K₂O, 0,4% de TiO₂ e 1% P₂O₅,

4.2.5.2 Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA)

A composição mineralógica do *cluster* B para as frações acima de 0,010 mm, exposta na Tabela 16, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV.

Tabela 16 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – *cluster* B

Minerais	Fração (mm) - % em massa						Total +0,010
	+0,210	-0,210 +0,150	-0,150 +0,074	-0,074 +0,037	-0,037 +0,020	-0,020 +0,010	
calcopirita	0,9	1,8	2,1	2,7	3,5	3,1	2,2
pirita	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1
outros sulfetos	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
quartzo	34	33	32	32	27	26	31
plagioclásio	28	27	26	24	21	22	25
k-feldspato	11	11	10	9	8	8	10
clorita	8	9	10	11	13	13	10
anfíbólio	4	5	5	5	5	7	5
magnetita	3	2	4	4	6	4	4
carbonato	3	3	4	5	7	7	4
mica	3	3	3	3	3	3	3
apatita	1	1	2	2	2	3	2
epídoto	1	1	1	1	1	1	1
outros	2	2	2	2	3	2	2

Nota: outros sulfetos = calcocita, milerita e siegenita, anfíbólio = actinolita ±hastingsita; plagioclásio = albita ±plagioclásio sódico com cálcio, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, carbonato = calcita ±anquerita, outros = piroxênio +escapolita +titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o *cluster* B é composto predominantemente por quartzo (31%) e feldspatos (25% de plagioclásio e 10% de K-feldspato), com menores proporções de clorita (10%), anfibólios (5%; principalmente actinolita), magnetita (4%), carbonatos (4%, calcita ±anquerita), mica (3%) apatita (2%), e epídoto (1%). Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) são: piroxênio, escapolita, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita.

Os conteúdos de calcopirita variam de 1 a 3%, elevando-se progressivamente em direção aos finos; a pirita representa cerca de 0,1% da amostra, enquanto que os outros sulfetos (calcocita, milerita e siegenita) perfazem menos de 0,1% do total.

O conteúdo de quartzo está compreendido entre 26 e 34%, com tendência a diminuir em direção aos finos. A proporção de plagioclásio (principalmente albita e secundariamente plagioclásio sódico com cálcio) situa-se entre 21 a 28% e o K-feldspato entre 8 e 11%; ambos diminuem progressivamente em direção às frações mais finas.

As proporções de clorita (Fe-clinocloro), anfibólio (actinolita e secundariamente hastingsita), magnetita, carbonato (calcita, além de anquerita) e apatita aumentam em direção aos finos, variando de 8 a 13% (clorita), 4 a 7% (anfibólio), 3 a 6% (magnetita) e 3 a 7% (carbonato) e 1 a 3% (apatita). A quantidade de mica (biotita/flogopita e muscovita) e epidoto permanece constante nas frações: 3 e 1% respectivamente.

Os difratogramas interpretados de amostras representativas deste *cluster* são apresentados no anexo 2. Os teores médios considerados para as composições dos minerais presentes e respectivas massas específicas são expostos nos anexos 3 (banco de dados do MLA), bem como a comparação entre as composições químicas dosadas por FRX e as calculadas a partir do MLA, indicando elevadas correlações e validando os resultados da análise de imagens (anexo 4).

4.2.5.3 Partição do Cu e S

As distribuições Cu e S dentre os minerais portadores de S é apresentada na Tabela 17.

O cobre está presente quase que em sua totalidade na forma de calcopirita (96%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita. O enxofre está presente em sua maioria na calcopirita (95%) e na pirita (4%); a parcela de enxofre nos demais minerais portadores (calcocita, milerita e siegenita) perfaz cerca de 1% do total presente na amostra.

Tabela 17 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – *cluster B*

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,210	93,4	6,6	-	-	-
	-0,210+0,150	98,8	1,2	-	-	-
	-0,150 +0,074	95,7	4,3	-	-	-
	-0,074 +0,037	98,6	1,4	-	-	-
	-0,037 +0,020	92,8	7,2	-	-	-
	-0,020 +0,010	95,5	4,5	-	-	-
	Total +0,010	96,3	3,7	-	-	-
S	+0,210	89,8	1,6	8,7	-	-
	-0,210+0,150	91,7	0,3	8,0	-	-
	-0,150 +0,074	96,0	1,1	2,9	-	-
	-0,074 +0,037	97,8	0,3	1,9	-	-
	-0,037 +0,020	95,7	1,8	2,3	-	0,2
	-0,020 +0,010	95,8	1,1	2,8	-	0,3
	Total +0,10	95,2	0,9	3,8	-	0,1

4.2.5.4 Caracterização microestrutural

Os principais aspectos texturais da calcopirita observados sob microscopia óptica de luz refletida, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 9 e Fotomicrografia 10.

Na primeira imagem é apresentado um aspecto geral da fração 0,21+0,15 mm, onde nota-se a presença dos minerais opacos: essencialmente magnetita (cinza claro) e calcopirita (levemente amarelado).

A calcopirita ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. Detalhes destas texturas podem ser mais bem observados na Fotomicrografia 10.

Os mesmos aspectos texturais podem ser observados na Fotomicrografia 11 e na Fotomicrografia 12, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Fotomicrografia 9 – MO, *cluster* B, fração -0,21+0,15 mm

Aspecto geral da amostra *Cluster* B. Os minerais opacos são essencialmente magnetita, calcopirita e pirita.

Fotomicrografia 10 – MO, *cluster* B, fração -0,21+0,15 mm

Detalhe das partículas com calcopirita disseminada (a), (b) e (c) e cristais maiores (d).

Fotomicrografia 11 – MEV, *cluster B*, fração -0,21+0,15 mm

Aspecto textural da calcopirita: cristais de calcopirita e sua associação com a ganga.

Fotomicrografia 12 – MEV, *cluster B*, fração -0,21+0,15 mm

Cristais de calcopirita maiores (em relação à forma disseminada).

4.2.5.5 Características da calcopirita

A caracterização das principais associações da calcopirita foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura MEV/EDS aliada ao sistema de análise de imagens *Mineral Liberation Analyser (MLA)*.

A Figura 34 e a Tabela 18 apresentam a distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre partículas livres (>95% do mineral de interesse), mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e mistas em partículas ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm.

Figura 34 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – *cluster B*

A calcopirita apresenta liberação global de 84%, variando de 54 a 96% nas frações, aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,074 mm, quando atinge liberação acima de 90%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 3 a 7% da fração. Nas partículas binárias a calcopirita ocorre associada principalmente com a clorita, quartzo e magnetita.

Tabela 18 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livres			Mista em binárias			Mista em ternárias		
+0,210	54			16			30		
-0,210+0,150	75			13			12		
-0,150 +0,074	78			14			8		
-0,074 +0,037	92			7			1		
-0,037 +0,020	93			7			0,3		
-0,020 +0,010	96			3			0,3		
Total +0,010	84			10			6		

Associações da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	quartzo	apatita	mag.	plagio.	carbon.	K-felds.	outros*	Total
+0,210	4	4	1	tr	2	2	1	2	16
-0,210+0,150	4	4	tr	2	1	1	-	1	13
-0,150 +0,074	6	2	1	2	1	1	tr	1	14
-0,074 +0,037	2	1	tr	2	tr	1	1	tr	7
-0,037 +0,020	2	tr	1	1	tr	tr	1	2	7
-0,020 +0,010	tr	tr	1	1	1	-	tr	tr	3
Total +0,010	3	2	1	2	1	1	tr	1	10

Associações da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	quartzo	apatita	mag.	plagio.	carbon.	K-felds.	outros*	Total
+0,210	5	6	4	1	4	1	3	7	30
-0,210+0,150	2	1	1	1	2	1	2	2	12
-0,150 +0,074	1	1	1	1	1	1	1	1	8
-0,074 +0,037	tr	tr	-	-	tr	-	-	tr	1
-0,037 +0,020	tr	-	-	-	-	-	-	tr	tr
-0,020 +0,010	-	-	-	tr	tr	-	-	tr	tr
Total +0,010	1	1	1	tr	1	1	1	1	6

Notas: 1. abreviaturas: mag = magnetita; plagioc = plagioclásio, carbon=carbonatos, K-felds= K-feldspato

2. (*) = outros minerais presentes

3, tr = fases com até 0,5% em massa

A partir das imagens digitais (MLA) calcula-se a fração de mineral útil para cada partícula, bem como a sua respectiva área ou perímetro exposto. O processamento desses dados permite determinar a distribuição em frequência do mineral de interesse segundo sua área ou superfície nas partículas. As curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em área e em

“superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula) são apresentadas respectivamente na Figura 35 e na Figura 36.

Figura 35 – Espectro de liberação da calcopirita em área – *cluster B*

Figura 36 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – *cluster B*

A Tabela 19 apresenta os valores de liberação considerando como partícula liberada aquelas com no mínimo 85%, 90%, 95% e 100% de calcopirita (valores extraídos das curvas de espectro de liberação do total deslamado, em termos de porcentagem em área e em superfície exposta).

Tabela 19 – Grau de liberação da calcopirita - *cluster B*

Fração de mineral útil na partícula (%)	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação da calcopirita (% em área)	87	86	84	74
Grau de liberação da calcopirita (% em perímetro exposto)	86	84	81	74

4.2.5.6 Curvas de distribuição versus teores de cobre

A curva de recuperação *versus* teor de Cu (obtida nos estudos de MLA) para o material acumulado acima de 0,10 mm, no intervalo considerado, é apresentada na Figura 37. Os estudos mostram que, teoricamente, nas condições de moagem empregadas para um teor entre 13 e 17% de Cu (valores típicos dos produtos da etapa *rougher* segundo Bergeman 2009), seria possível recuperar mais de 99% do total de Cu já na granulometria de moagem da etapa *rougher* de flotação.

Figura 37 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - *cluster B*, total acima de 0,010mm

4.2.6 Cluster C - Sossego

4.2.6.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores por fração granulométrica para o *cluster* C é exposta na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados de análise granuloquímica – *cluster* C

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (% em massa)												Distribuição no ensaio (%)					
			Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO
+0,210	17,2	17,2	0,88	0,93	54,6	15,6	6,81	5,76	4,49	0,98	1,46	0,40	1,12	6,38	13,0	13,3	18,8	14,9	18,0	14,3
-0,210+0,150	14,2	31,4	1,20	1,31	52,1	16,7	6,48	6,26	4,48	0,94	1,32	0,38	1,35	6,72	14,6	15,4	14,8	13,2	14,1	12,8
-0,150+0,074	23,4	54,8	1,37	1,48	50,1	17,7	6,25	6,90	4,47	0,84	1,29	0,40	1,58	6,80	27,5	28,8	23,5	23,0	22,4	23,3
-0,074+0,037	18,2	73,0	1,42	1,54	47,1	19,9	6,26	6,93	4,79	0,72	1,20	0,38	1,62	7,22	22,2	23,3	17,2	20,2	17,5	18,2
-0,037+0,020	7,9	80,9	1,27	1,34	45,3	21,0	6,53	7,05	5,33	0,63	1,27	0,40	1,50	7,45	8,6	8,8	7,2	9,3	7,9	8,1
under	8,6	89,5	1,15	0,79	47,6	22,0	5,97	8,31	4,82	0,72	1,21	0,46	1,65	4,73	8,5	5,7	8,2	10,6	7,9	10,3
over	10,5	100,0	0,62	0,54	48,7	14,9	7,58	8,57	6,16	0,87	1,39	0,40	1,18	8,38	5,6	4,7	10,3	8,7	12,2	13,0
Total calc.	100		1,17	1,21	49,7	18,0	6,51	6,94	4,82	0,83	1,31	0,40	1,44	6,84	100	100	100	100	100	100
Total dos.	100		1,23	1,30	49,3	18,5	6,26	6,73	4,60	0,82	1,34	0,40	1,37	7,34						

A análise granulométrica do *cluster* C indica que cerca de 17% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 19% constituem material abaixo de 0,020 mm, para as condições de moagem empregadas.

Os teores de Cu variam de 0,62 e 1,42% e os de S encontram-se entre 0,54 e 1,54%. Ambos apresentam tendência semelhante, aumentando progressivamente até o intervalo +0,037 mm, a partir do qual ocorre decréscimo.

Os teores de SiO₂ variam de 45,3 a 54,6%, com teor médio de 49%. Os teores de Fe₂O₃ situam-se entre 14,9 e 22,0%, e os de Al₂O₃, entre 5,53 e 7,58%. Ainda permanecem cerca de 7% de CaO e 5% de MgO, além de 0,8% de Na₂O, 1,3% de K₂O (1%), 0,4% de TiO₂ e 1,4% de P₂O₅.

4.2.6.2 Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA)

A composição mineralógica das frações acima de 0,010 mm, calculada através do sistema de análise de imagens *Mineral Liberation Analyser* (MLA-FEI), está exposta na Tabela 21.

Tabela 21 – Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – cluster C

Minerais	Fração (mm) - % em massa						Total +0,010
	+0,210	-0,210 +0,150	-0,150 +0,074	-0,074 +0,037	-0,037 +0,020	-0,020 +0,010	
calcopirita	2,7	3,4	4,3	5,1	3,6	3,8	3,9
pirita	<0,1	-	<0,1	-	-	<0,1	<0,1
outros sulfetos	-	-	-	-	-	-	-
quartzo	33	32	29	27	22	23	29
clorita	15	15	16	16	17	16	16
magnetita	8	9	12	12	18	14	12
carbonatos	7	9	9	9	10	11	9
mica	8	8	7	8	10	11	8
plagioclásio	7	7	6	6	5	5	6
K-feldspato	6	6	5	5	3	4	5
anfíbólio	6	5	4	4	4	6	5
apatita	2	2	3	4	3	3	3
epídoto	1	1	1	1	1	1	1
outros	3	3	3	3	3	3	3

Nota: outros sulfetos = calcocita, milerita e siegenita, anfíbólio = actinolita ±hastingsita; plagioclásio = albita ±plagioclásio sódico com cálcio, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, carbonatos = calcita ±anquerita, outros = piroxênio +escapolita + titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o *cluster C* é composto predominantemente por quartzo (29%), clorita (16%) e magnetita (12%), além de carbonatos (9%), micas (8%), plagioclásio (6%), K-feldspato (5%), anfíbólios (5%), apatita (3%) e epídoto (1%). Os minerais traços (menos de 1%) são: piroxênio, escapolita, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita

Os conteúdos de calcopirita variam de 2,7 a 5,1%. A pirita representa menos de 0,1% do total e os demais sulfetos (calcocita, milerita e siegenita) não foram encontrados nesta amostra.

A proporção de quartzo situa-se entre 22 e 33%, diminuindo progressivamente em direção aos finos. O conteúdo de clorita (Fe-clinocloro) permanece ao redor de 15-17% ao longo de todo intervalo granulométrico, enquanto que o de magnetita varia de 8 a 18%, aumentando em direção às frações finas.

Os carbonatos (calcita e secundariamente anquerita) e micas (biotita/flogopita e muscovita) aumentam em direção aos finos, variando de 7 a 11% (carbonatos) e 7 a 11% (micas). Já os feldspatos decrescem nas frações mais finas, de 7 a 5% (plagioclásio) e de 6 a 3% (K-feldspato). O anfibólio e a apatita não apresentam tendência definida.

Os difratogramas interpretados de amostras representativas deste *cluster* são apresentados no anexo 2. Os teores médios considerados para as composições dos minerais presentes e respectivas massas específicas são expostos nos anexos 3 (banco de dados do MLA), bem como a comparação entre as composições químicas dosadas por FRX e as calculadas a partir do MLA, indicando elevadas correlações e validando os resultados da análise de imagens (anexo 4).

4.2.6.3 Partição do Cu e S

As distribuições Cu e S dentre os minerais portadores de S é apresentada na Tabela 22. No *cluster* C, o cobre está presente em sua totalidade na forma de calcopirita. Praticamente todo o enxofre da amostra está na forma de calcopirita (99%) e o restante associado à pirita (<1%).

Tabela 22 – Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – *cluster C*

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,210	100	-	-	-	-
	-0,210+0,150	100	-	-	-	-
	-0,150 +0,074	100	-	-	-	-
	-0,074 +0,037	100	-	-	-	-
	-0,037 +0,020	100	-	-	-	-
	-0,020 +0,010	100	-	-	-	-
	Total +0,010	100	-	-	-	-
S	+0,210	97,3	-	2,7	-	-
	-0,210+0,150	100	-	-	-	-
	-0,150 +0,074	98,9	-	1,1	-	-
	-0,074 +0,037	100,0	-	-	-	-
	-0,037 +0,020	100,0	-	-	-	-
	-0,020 +0,010	99,4	-	0,6	-	-
	Total +0,10	99,3	-	0,7	-	-

4.2.6.4 Caracterização microestrutural da calcopirita

Os principais aspectos texturais da calcopirita observados sob microscopia óptica de luz refletida, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 13 e na Fotomicrografia 14.

Na primeira imagem é apresentado um aspecto geral da fração 0,21+0,15 mm, onde nota-se a presença dos minerais opacos: essencialmente magnetita (cinza claro) e calcopirita (levemente amarelado).

A calcopirita ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. Detalhes destas texturas podem ser mais bem observados na Fotomicrografia 14.

Os mesmos aspectos texturais podem ser observados na Fotomicrografia 15 e na Fotomicrografia 16, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Fotomicrografia 13 – MO, *cluster C*, fração -0,21+0,15 mm

Aspecto geral da amostra *cluster C*. Os minerais opacos são essencialmente magnetita, calcopirita e pirita.

Fotomicrografia 14 – MO, *cluster C*, fração -0,21+0,15 mm

Detalhe de partículas com calcopirita disseminada (d), com cristais maiores (a) e (c). (d) Partícula com magnetita.

Fotomicrografia 15 – MEV, *cluster C*, fração -0,21+0,15 mm

Cristais de calcopirita maiores (em relação à forma disseminada), na partícula à direita.

Fotomicrografia 16 – MEV, *cluster C*, fração -0,21+0,15 mm

Cristais de calcopirita maiores (em relação à forma disseminada).

4.2.6.5 Características da calcopirita

A caracterização das principais associações da calcopirita foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura MEV/EDS aliada ao sistema de análise de imagens *Mineral Liberation Analyser (MLA)*.

A Figura 38 e a Tabela 23 apresentam a distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre partículas livres (>95% do minerais de interesse), mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e mistas em partículas ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm.

Figura 38 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster C

A calcopirita apresenta liberação global de 90%, variando de 79 a 95% nas frações e aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,150 mm, quando atinge liberação acima de 90%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 5 a 6% da fração, enquanto que as ternárias correspondem a 1% ou menos do total. Nas partículas binárias a calcopirita ocorre associada principalmente com magnetita e clorita.

Tabela 23 – Distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa)

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre		Mista em binárias			Mista em ternárias			
+0,210	79		13			8			
-0,210+0,150	84		10			7			
-0,150 +0,074	92		6			2			
-0,074 +0,037	94		5			1			
-0,037 +0,020	94		6			0,5			
-0,020 +0,010	95		5			0,4			
Total +0,010	90		7			3			

Associações da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	mag.	clorita	pirox.	carbon.	quartzo	anfib.	apatita	outros*	Total
+0,210	3	2	3	1	2	tr	tr	2	13
-0,210+0,150	2	2	3	2	1	tr	1	-	10
-0,150 +0,074	2	1	1	1	tr	tr	-	tr	6
-0,074 +0,037	2	2	1	tr	1	-	-	tr	5
-0,037 +0,020	1	2	1	-	1	1	-	1	6
-0,020 +0,010	1	1	tr	1	1	tr	tr	1	5
Total +0,010	2	2	1	1	1	tr	tr	tr	7

Associações da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	mag.	clorita	pirox.	carbon.	quartzo	anfib.	apatita	outros*	Total
+0,210	2	1	tr	1	2	tr	1	1	8
-0,210+0,150	1	1	tr	2	2	1	tr	1	7
-0,150 +0,074	tr	tr	tr	tr	1	-	-	1	2
-0,074 +0,037	-	tr	-	tr	tr	-	-	tr	1
-0,037 +0,020	-	tr	-	-	-	-	-	tr	0,5
-0,020 +0,010	tr	tr	-	-	-	-	-	tr	0,4
Total +0,010	1	tr	tr	tr	1	tr	tr	tr	3

Notas: 1. abreviaturas: mag = magnetita, pirox. = piroxênio, carbon = carbonatos e anfib = anfibólio

2. (*) = outros minerais presentes

3. tr = fases com até 0,5% em massa

A partir das imagens digitais (MLA) calcula-se a fração de mineral útil para cada partícula, bem como a sua respectiva área ou perímetro exposto. O processamento desses dados permite determinar a distribuição em frequência do mineral de interesse segundo sua área ou superfície nas partículas. As curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em área e em

“superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula). são apresentadas respectivamente na Figura 39 e na Figura 40.

Figura 39 - Espectro de liberação da calcopirita em área – *cluster C*

Figura 40 – Espectro de liberação da calcopirita em perímetro exposto – *cluster C*, total acima de 0,010mm

A Tabela 24 apresenta os valores de liberação considerando como partícula liberada aquelas com no mínimo 85%, 90%, 95% e 100% de calcopirita (valores extraídos das curvas de espectro de liberação do total deslamado, em termos de porcentagem em área e em superfície exposta).

Tabela 24 – Grau de liberação da calcopirita - *cluster C*

Fração de mineral útil na partícula (%)	≥ 85	≥ 90	≥ 95	100
Grau de liberação da calcopirita (% em área)	93	92	90	82
Grau de liberação da calcopirita (% em perímetro exposto)	91	89	87	83

4.2.6.6 Curvas de distribuição versus teores de cobre

A curva de distribuição acumulada *versus* teor de Cu (obtida nos estudos de MLA) para o material acumulado acima de 0,10 mm, no intervalo considerado, é apresentada na Figura 41. Os estudos mostram que, teoricamente, nas condições de moagem empregadas para um teor entre 13 e 17% de Cu (valores típicos dos produtos da etapa *rougher* segundo Bergeman 2009), seria possível recuperar 100% do total de Cu já na granulometria de moagem da etapa *rougher* de flotação.

Figura 41 – Curva de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu - *cluster C*, total acima de 0,010mm

4.2.7 Sumário dos resultados de caracterização tecnológica e discussão

É apresentado nesta seção um sumário comparativo entre os resultados obtidos nos estudos de caracterização tecnológica. Alguns destes resultados encontram-se expostos na Tabela 25.

Tabela 25 – Sumário dos resultados da caracterização tecnológica

	Sequeirinho		Sossego	
	Cluster A	Cluster D	Cluster B	Cluster C
% Massa acumulada abaixo				
0,21 mm	85	81	85	83
0,149 mm	69	66	67	69
0,074 mm	47	44	47	45
0,037 mm	28	28	28	27
0,020 mm	19	19	21	19
0,010 mm	10	11	12	10
Composição química (% em massa; principais compostos)				
Cu	2,09	0,92	0,66	1,23
S	2,26	1,01	0,69	1,30
SiO ₂	38,7	55,7	62,8	49,3
Fe ₂ O ₃	27,5	12,2	9,94	18,5
Al ₂ O ₃	5,69	9,92	9,12	6,26
CaO	8,49	6,00	4,55	6,73
MgO	5,71	4,07	2,52	4,60
Na ₂ O	1,58	3,69	2,87	0,82
K ₂ O	0,44	1,03	1,60	1,34
Partição do Cu e S nos minerais portadores (%)				
Cu				
calcopirita	99,5	98,6	96,3	100
outros sulfetos	0,5	1,4	3,7	0
S				
calcopirita	88,4	88,3	95,2	99,3
pirita	10,8	10,8	3,8	0,7
outros sulfetos	0,8	0,9	1,0	Tr

Para as condições de moagem empregadas, cerca de 81 a 85% em massa das amostras possui granulação abaixo de 0,21 mm; as frações abaixo de 0,020 mm representam 19 a 21% do total.

O *cluster* A possui o maior teor de cobre (2,09%), seguido do *cluster* C (1,23%). Em resumo, tem-se que o *cluster* A é o que possui os menores teores de SiO₂ (38,7%) e Al₂O₃ (5,69%) e os maiores teores de Fe₂O₃ (27,5%), MgO (5,71%) e CaO (8,49%), além de P₂O₅ elevado. O *cluster* B é o oposto, apresentando os maiores teores de SiO₂ (62,8%) e Al₂O₃ (9,94%) e os menores teores de Fe₂O₃ (9,94%), MgO (2,52%) e CaO (4,55%), além de Na₂O e K₂O (1,57%) elevado. Os *clusters* C e D possuem composição intermediária entre as amostras A e B, sendo o *cluster* C mais próximo do A e o *cluster* D, mais próximo do B.

As distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores indicam que a o cobre está presente quase que em sua totalidade na calcopirita (96-100%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita. O enxofre está em sua maioria na calcopirita (88-99%) e na pirita (1-11%); nos demais sulfetos – calcocita (Cu₂S), milerita (NiS) e siegenita (Ni,Co)₃S₄) - perfaz 0-1% do total presente na amostra.

A composição mineralógica das amostras totais +0,020 mm é apresentada comparativamente na Tabela 26 e na Figura 42. Vários são os minerais de ganga, os quais: quartzo, plagioclásio (albita ±plagioclásio sódico com cálcio), K-feldspato, anfibólio (actinolita ±hastingsita), magnetita, apatita, epídoto, clorita, escapolita, micas (biotita/flogopita e muscovita) e calcita. Os minerais acessórios são: piroxênio, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita.

Com relação à composição mineralógica, tem-se que, comparativamente:

- O *cluster* A possui elevada proporção de anfibólio (31%) e magnetita² (23%), além de plagioclásio (9%), apatita (8%), epídoto (5%) e quartzo (5%).
- O *cluster* D apresenta considerável proporção de anfibólio (23%) e plagioclásio (26%), além de quartzo (11%) e escapolita (8%).
- O *cluster* B é composto de essencialmente por quartzo (31%), plagioclásio (25%), k-feldspato (10%) e clorita (10%).
- O *cluster* C possui quartzo (29%), clorita (16%), magnetita-hematita³ (12%), além de carbonatos (9%), micas (8%) e feldspatos (11%).

² Estima-se que para o Cluster A, a proporção de magnetita seja predominante sobre a hematita.

³ Não foi possível estabelecer as proporções entre estes minerais.

Tabela 26 – Sumário dos resultados da caracterização tecnológica

Minerais (% em massa)	Sequeirinho		Sossego	
	Cluster A	Cluster D	Cluster B	Cluster C
calcopirita	5,6	2,6	2,2	3,9
pirita	0,5	0,2	0,1	<0,1
outros sulfetos	*	*	*	*
quartzo	5	11	31	29
plagioclásio	9	26	25	6
K-feldspato	1	5	10	5
mica	2	3	3	8
clorita	5	5	10	16
anfibólio	31	23	5	5
epidoto	5	6	1	1
magnetita/hematita	23	5	4	12
carbonatos	**	**	4	9
apatita	8	3	2	3
escapolita	3	8	*	*
outros	2	3	2	3

Notas: *proporções menores que 0,1; **mineral traço contabilizado em outros.

Figura 42 – Comparação mineralógica

As curvas de liberação da calcopirita em área e perímetro exposto (Figura 43 e Figura 44 respectivamente) demonstram que as amostras do corpo Sossego (*clusters* B e C) possuem maior grau de liberação da calcopirita para amostra total deslamada nas condições de moagem empregadas. Considerando partículas livres aquelas que possuem 90% de calcopirita em perímetro exposto, tem-se 90% de liberação para o *cluster* C, 84% para o B e cerca de 75% para A e D.

A liberação da calcopirita expressa em perímetro exposto é sistematicamente menor em relação à liberação expressa em área, com diferenças de 2 a 3% nas amostras. A liberação em perímetro exposto é a mais apropriada para análise, visto que o processo de concentração por flotação depende da acessibilidade do coletor à superfície das partículas de calcopirita.

Analisando comportamento de liberação das frações mais grossas (+0,21 mm) na Figura 45 e admitindo 90% em perímetro exposto para partículas livres, observa-se que somente aproximadamente 28% das partículas encontram-se liberadas no *cluster* D; 40% no *cluster* A e, 61 e 78% dos *clusters* B e C. Estes resultados podem indicar as possíveis perdas de minerais de cobre em partículas mistas mais grossas, principalmente nos *clusters* A e D, durante o processo de flotação.

Figura 43 – Espectros de liberação da calcopirita em área – total deslamado

Figura 44 – Espectros de liberação da calcopirita em perímetro exposto – total deslamado

Figura 45 – Espectros de liberação da calcopirita em perímetro exposto – frações +0,21 mm

As curvas de distribuição acumulada *versus* teor de Cu para o material acumulado acima de 0,10 mm, apresentadas na Figura 46, mostram que, teoricamente, para as condições de cominuição empregadas e um teor entre 13 e 17% de Cu (valores típicos dos produtos da etapa *rougher* segundo Bergeman 2009), as recuperações seriam da ordem de 97 a 100% já na granulometria de moagem da etapa *rougher* de flotação.

Já em se considerando teores do concentrado final (30% de Cu) estas recuperações seriam da ordem de 99%, 97%, 91% e 87%, respectivamente para os clusters C, B (Sossego), A e D (Sequeirinho).

Figura 46 – Curvas de distribuição acumulada de Cu versus teor de Cu

4.2.8 Validação dos resultados de MLA

A validação dos resultados da caracterização mineralógica quantitativa automatizada (MLA) foi realizada a partir do confronto com os dados da análise química (FRX). A comparação está apresentada no anexo 4 e Figura 47. O banco de dados utilizado no projeto encontra-se no anexo 3.

Houve boa correlação entre as composições químicas obtidas pela análise química tradicional (FRX) e os resultados obtidos pelo MLA, indicando que a amostragem para a confecção das seções polidas foi bem realizada e o banco de dados utilizado está coerente.

Nota: Cada ponto é representativo de uma fração granulométrica dos quatro clusters

Figura 47 – Comparações entre as composições químicas obtidas por MLA e FRX

5 CONCLUSÕES

As amostras de minério de cobre da Mina do Sossego foram classificadas a partir da análise por agrupamento dos difratogramas de raios X, resultando na distinção de sete ou quatro tipos de minério, a depender do nível de refinamento desejado (*cut off*). Para ambos os processamentos adotou-se a medida de distância Euclidiana e o método de linkagem por média, que considerou nos agrupamentos a posição dos picos.

Houve forte correlação entre os grupos com a localização das amostras: os *clusters* 1, 2, 6 e 7 são compostos majoritariamente por amostras do corpo Sequeirinho enquanto que os *clusters* 3 e 5 de amostras do corpo Sossego. O *cluster* 4 reúne amostras de ambos corpos. Esta correlação deve-se aos diferentes tipos e intensidades das alterações hidrotermais predominantes em cada corpo, que refletem na mineralogia e conseqüentemente nos difratogramas de raios X das amostras.

Os *clusters* se diferenciam a partir das proporções das seguintes fases: óxidos de ferro (magnetita/hematita), actinolita, feldspato (albita/feldspato potássico), mica (biotita/muscovita) e clorita. Os padrões difratométricos dos grupos indicam que:

- As amostras dos *clusters* 1 e 2 (*cluster* A para critério de 4 grupos) possuem em comum elevada proporção de actinolita e menor conteúdo de quartzo e feldspato, sendo que as do grupo 1 possuem pico de magnetita/hematita, ausente no grupo 2.
- As amostras dos grupos 3, 4 (*cluster* B para critério de 4 grupos) e 5 (*cluster* C para critério de 4 grupos) são mais ricas em quartzo. O *cluster* 5 (ou C) se diferencia por apresentar menor proporção de feldspato em relação às demais. Os *clusters* 3 e 4 (ou B) distinguem-se em relação à proporção de quartzo e actinolita.
- As amostras dos *clusters* 6 e 7 (*cluster* D para critério de 4 grupos) contém actinolita, quartzo e feldspato, sendo o grupo 6 distinto do grupo 7 em relação às proporções de mica e clorita.

Variações nas proporções minerais entre amostras de mesmo grupo (diferenças nas intensidades dos picos) são compatíveis com a gênese do depósito, de evolução hidrotermal.

Existem algumas dificuldades para estabelecer relações diretas entre o agrupamento e a geologia da Mina do Sossego, parte delas deve-se a indiferenciação das proporções de albita/feldspato potássico, magnetita/hematita e biotita/muscovita, outra parte deve-se a própria complexidade mineralógica e estruturação do depósito (superposição dos estágios de alteração hidrotermal) e dificuldades de definição de litotipos diretamente a partir de testemunhos de sondagens..

As informações de localização e principais fases minerais constituintes dos grupos (padrão difratométrico dos *clusters*) são coerentes com as interpretações sobre a distribuição regional dos estágios de alteração hidrotermal apontadas por Monteiro *et.al.* (2008). Concluiu-se que:

- As amostras dos *clusters* 1 e 2 (*cluster* A), provenientes do corpo Sequeirinho, são características de regiões onde a alteração sódica-cálcica foi mais intensa e houve a formação de corpos de actinolitos e magnetitos.
- Amostras dos *clusters* 6 e 7 (*cluster* D), também do corpo Sequeirinho, são características dos estágios de alteração sódica-cálcica e sódica. Há maior influência de alteração clorítica no *cluster* 7 e potássica ou hidrolítica no *cluster* 6.
- Os *clusters* 3 e 5 (parte do *cluster* B e *cluster* C) englobam amostras do corpo Sossego. O *cluster* 5 é representado por amostras com maior influência de alteração hidrolítica, enquanto o *cluster* 3, de alteração clorítica.
- Provavelmente as amostras do *cluster* 4 representam litotipos formados em ambiente transicional, sob influência de diversas alterações hidrotermais e por isso reúne amostras de ambos corpos.

Pode-se dizer que o agrupamento refletiu os diferentes ambientes geológicos de formação, agrupando as amostras de acordo com a(s) alteração(ões) hidrotermal(is) predominante(s).

Para o conjunto de dados, os três primeiros componentes principais descrevem cerca de 85% das informações. A análise do posicionamento das amostras em função destas variáveis indica que o agrupamento foi satisfatório, visto que os grupos ocupam regiões distintas do gráfico 3D.

A técnica permitiu a identificação dos principais tipos de minério presentes na Mina do Sossego de forma rápida e objetiva. A classificação das amostras sem a necessidade da identificação das fases otimizou o tempo da análise dos dados e minimizou a subjetividade da interpretação do difratograma.

Desta forma, acredita-se que o método possui potencial para aplicação em diversas fases do empreendimento mineiro: na fase de exploração para o reconhecimento dos litotipos presentes e determinação da variabilidade mineralógica do depósito e definição de amostras para ensaios de processamento mineral / metalúrgicos e no planejamento de lavra para auxílio em blendagens e em estudos específicos para seleção de amostras representativas do universo amostral.

Os estudos de caracterização tecnológica foram conduzidos com base no resultado do agrupamento relativo a quatro tipos de minério, de forma que as amostras dos grupos 1 e 2 foram compostas no *cluster* A, as do grupo 3 e 4 no *cluster* B e as dos grupos 6 e 7 no *cluster* D. O *cluster* 5 é o próprio *cluster* C.

Os resultados de caracterização tecnológica visaram a determinação da composição mineralógica e a forma de ocorrência da calcopirita e sua liberação nos grupos definidos.

Vários são os minerais de ganga, os quais: quartzo, plagioclásio (albita $\pm$ plagioclásio sódico com cálcio), K-feldspato, anfibólio (actinolita $\pm$ hastingsita), magnetita, apatita, epidoto, clorita, escapolita, micas (biotita/flogopita e muscovita) e calcita. Os minerais acessórios são: piroxênio, titanita, rutilo, zircão, alanita, monazita, ilmenita, thorita e uraninita.

A calcopirita é praticamente o único mineral de interesse econômico, visto que responde por 96 a 100% do cobre presente. A pirita é o segundo sulfeto mais

abundante; os demais sulfetos incluem calcocita (Cu_2S), siegenita ($(\text{Ni},\text{Co})_3\text{S}_4$) e milerita (NiS) e ocorrem como minerais traços.

A calcopirita ocorre tanto na forma de microcristais inclusos nos minerais de ganga quanto como cristais maiores. As amostras apresentam curvas de liberação bastante distintas; de modo geral as amostras do corpo “Sequeirinho”, representadas pelos *clusters* A e D, são as que possuem menores liberação. O comportamento nas frações mais grossas podem indicar as possíveis perdas de calcopirita em partículas mistas mais grossas, principalmente nos *clusters* A e D, durante o processo de flotação.

Com relação à recuperação do Cu *versus* teor de Cu para o material acumulado acima de 0,10 mm e as condições de cominuição empregadas, considerando teores observados para o concentrado rougher, entre 13 e 17% de Cu, estas recuperações, teoricamente, seriam da ordem de 97 a 100%; para concentrados com teor de 30% de Cu ter-se-iam recuperações teóricas de 99% do total de cobre do *cluster* C; 97% do *cluster* B e 91 e 87% dos *clusters* A e D, respectivamente.

5.1 Sugestões de trabalhos complementares

Para verificar a aplicabilidade da ferramenta de classificação por agrupamento de difratogramas de raios X em suporte ao planejamento de lavra, sugere-se realizar estudos mais aprofundados, envolvendo maior número de amostras (ampliação do universo amostral) considerando ainda os resultados em função das respostas dos materiais frente aos processos de beneficiamento, como moagem, flotação *rougher* e *cleaner*, num conceito mais amplo de abordagem geometalúrgica, além de acompanhadas por estudos de caracterização por MLA.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIASSI J.L. et al. Análise grupal por difratometria de raios X em apoio à exploração e geometalurgia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44, 2008, Curitiba, PR. **[Anais]**. Curitiba: SBG, 2008.

AUGUSTO R. A. et al. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). Revista Brasileira de Geociências, SBG, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 263-277, Jun. 2008.

BARTON, M. D.; JOHNSON, D. A. Footprints of Fe-oxide(-Cu-Au) systems. SEG 2004: Predictive Mineral Discovery Under Cover. Centre for Global Metallogeny, Spec. Pub. 33, The University of Western Australia, 112-116. 2004

BARTON, M. D.; JOHNSON, D. A., 1996, Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization: Geology (Boulder), v. 24, p. 259-262.

BERGERMAN, M. G. Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego. 2009. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas e de petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BIONDI, J. C. *Sistema Hidrotermal Magmático*. In: **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. Cap. 3, 528 pp.

BISH, D. L.; POST, J. E. (Eds). 1989. Modern powder diffraction. Mineralogical Society of America. **Reviews in mineralogy**, v. 20, 369 pp.

BULATOVIC, S. M. Flotation of Copper Sulfide Ores. In: Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. Elsevier Science & Technology Books, v. 1, 2007. Capítulo 12, p. 235-293.

COX, D. P.; SINGER, D. A, Descriptive and grade-tonnage models and database for iron oxide Cu-Au deposits: U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1155. 2007.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais**. Belém: SBG, 1988. p. 11-54.

FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D.; MOELLER, K. Modern SEM-Based mineral liberation analysis. Int. J. Miner. Process, v. 84, n. 1-4, p. 310-320, 2007.

GALARZA, T. M. A.; MACAMBIRA, M. J. B.; MOURA, C. A. V. Geocronologia Pb–Pb e Sm–Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 8, Manaus, AM. **Atas**. 2003. SBG [CD-ROM].

GRAINGER, C. J. et al. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base-and precious-metal mineralization. Ore Geology Reviews, v. 33, p. 451-489, 2008.

GUILBERT, J. M.; PARK Jr, C.F. **The geology of ore deposits**. Waveland Press. 2007. 985 pp.

HENLEY, K. J. Ore-dressing mineralogy. A review of techniques, applications and recent developments. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, ICAM'81. Johannesburg, África do Sul. 1981, Proceedings in Special Publication of Geological Society of South Africa, 7, 1983. p.175-200.

JONES, M. P. **Applied mineralogy**: a quantitative approach. London: Graham & Trotman, 1987. 259 p.

KAHN, H. et al. Mineralogia quantitativa através de análise de imagens automatizada conjugada a MEV/EDS: Estudos de caso aplicados a minérios de fosfato e ouro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44. 2008, Curitiba, PR. [Anais]. Curitiba: SBG, 2008. p. 669.

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, EUA, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2002.

LASTRA, R. Seven practical application cases of liberation analysis. . **International Journal of Mineral Processing** 84 (2007) 337–347.

MACCHIAROLA K. et al. Modern X-ray diffraction techniques for exploration and analysis of ore bodies. In: DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION, 5, 2007, Toronto, Canada.

MACHADO, N. et al. U–Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. Precambrian Research, 49, 1–26. 1991.

MARSCHIK, R.; LEVEILLE, R. A. 2001. Iron oxide Cu–Au deposits in South America: Candelária, Chile, and Sossego, Brazil. Geological Society of America Abstract with Programs 33.

MINGOTI, S. A. Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada – Uma Abordagem Aplicada. Belo Horizonte: Editora. UFMG 2005. 300 pp.

MOITA NETO, J. M.; MOITA G. C. 1998. Uma Introdução à Análise Exploratória de Dados Multivariados. Química Nova, São Paulo, SP: v. 21, n. 4, p. 467-469.

MONTEIRO, L. V. S. et al. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 34, p. 317-336, 2008a.

MONTEIRO, L. V. S. et al. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, v. 43, p. 129-159, 2008b.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; NETO, A. A. Caracterização tecnológica de minérios. In: **Tratamento de Minérios**. 4ª edição-CETEM. 2004. p. 55-109.

NEVES, M. P. **Estudos isotópicos (Pb-Pb, Sm-Nd, C e O) do depósito Cu-Au do Sossego, Província Mineral de Carajás**. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Pará. 2006.

NOGUEIRA, A. C. R. **Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás**. 1995. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Pará, 1995.

NORUŠIS, M. J. 2010. Cluster Analysis. In: Norušis, M.J. (Ed.), *SPSS 17.0 Statistical Procedures Companion*. p. 361-391: Prentice Hall.

PETRUK, W. (Ed.) 1989. *Short course on image analysis applied to mineral and earth sciences*. Mineralogical association of Canadá, Ottawa, 156 pp.

PETRUK, W. 2000. **Applied mineralogy in the mining industry**. Ottawa: Elsevier, 1st ed., 268 pp.

PIDGEON, R.T., MACAMBIRA, M.J.B., LAFON, J.M., 2000. Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium

Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, 166, 159–171

PINHEIRO R. V. L.; HOLDSWORTH R. E. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borda leste do Cratón Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, SBG, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 597-606, 2000.

REIS, R. L. G. Com Sossego, o Brasil entra na rota do cobre. *Revista Brasil Mineral*. v. 230, p. 38-45, 2004.

RIBEIRO, J.A. S. 2011. Cobre. In: Sumário Mineral Brasileiro 2011. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasil, 2011. v31, p.33-34.

RODRIGUES, A. F. S.; HEIDER, M. Cobre. In: Economia mineral do Brasil. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasil, 2009. 764p. cap. 4.3, p. 216-235.

RODRIGUES, E.S.; LAFON, J.M.; SCHELLER, T. Geocronologia Pb–Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1992, vol. 37, Boletim de Resumos Expandidos. SBG, vol. 2, pp. 183–184.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. São Paulo: EPUSP, 1997. 29 P. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/069)

SKIRROW, R. Iron oxide Cu-Au deposits: An Australian perspective on their unifying characteristics. In: McPhie, J. and McGoldrick, P. (editors), 2004. *Dynamic Earth: Past, Present and Future*. Abstracts of the 17th Australian Geological Convention, Hobart, Tasmania. February 8–13, Geological Society of Australia, Abstracts n. 73, p. 121. 2004

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

TAN, P. N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. 2006. Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms. *In*: Introduction to data mining. Pearson Addison-Wesley. Cap.8, p.125-146.

WILLIAMS, P. J. et al. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., **Economic Geology** 100th anniversary volume, 1902-2005, p. 371-405, 2005

ANEXOS

Anexo 1 – Relação das amostras estudadas

Anexo 2 – Difractogramas de raios-x das amostras mais representativas de cada grupo

Anexo 3 - Composição química das fases minerais – banco de dados MLA

Anexo 4 - Composições químicas dosadas (FRX) e calculadas (MLA)

ANEXO 1 - RELAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

ID	Massa recebida kg	Cluster (4 grupos)	Cluster (7 grupos)	Code Amostra	Litologia	Teor Cu (%)	Classificação moabilidade
SOSD 022 290-300	3,64	A	1	2008SEQ_AT	ACT	0,90	MDA
SOSD 033 263-273	3,68	A	1	2008SEQ_SAT	BSE	2,83	ALT
SOSD 033 289-299	3,90	A	1	2008SEQ_SAT	MAG	3,37	ALT
SOSD 033 300-310	3,70	A	1	2008SEQ_SAT	MAG	3,37	MDA
SOSD 050 292-302	3,68	A	1	2008SEQ_SAT	BSE	4,22	MDA
SOSD 097 287-297	3,65	A	1	2008SEQ_AT	MAG	0,72	MED
SOSD 098 235-245	3,74	A	1	2008SEQ_AT	ACT	0,99	ALT
SOSD 117 256-266	3,94	A***	1***	2008SEQ_AT	MAG	0,82	ALT
SOSD 117 267-277	3,86	A	1	2008SEQ_SAT	ACT	1,64	ALT
SOSD 177 279-289	3,78	A	1	2008SEQ_AT	ACT	0,99	ALT
SOSD 259 372-282	4,34	A	1				MDA
SOSD 316 289-299	3,84	A	1	2008SEQ_AT	MAG	0,57	ALT
SOSD 316 299-309	3,74	A	1	2008SEQ_AT	MAG	0,57	MDA
SOSD 316 309-319	4,16	A	1	2008SEQ_BT	MAG	0,17	ALT
SOSD 316 320-330	3,10	A	1	2008SEQ_AT	ACT	1,03	ALT
SOSD 379 261-271	4,28	A	1	2008SEQ_SAT	BSE	3,60	MDA
SOSD 220 287-297	3,80	A	2	2008SEQ_AT	GBA	0,95	ALT
SOSD 232 265-275	4,26	A	2***	2008SEQ_AT	GBA	0,93	ALT
SOSD 259 262-272	3,76	A	2	2008SEQ_SAT	ACT	5,06	MED
SOSD 001 137-147	3,84	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,51	ALT
SOSD 001 147-157	3,78	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,51	ALT
SOSD 001 157-167	4,08	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,51	ALT
SOSD 019 130-140	3,92	B	3	2008SOS_AT	GRF	1,50	ALT
SOSD 020 094-102	3,00	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,99	ALT
SOSD 020 108-118	3,94	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,99	ALT
SOSD 020 127-137	3,98	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,99	ALT
SOSD 020 137-145	2,80	B	3***	2008SOS_AT	GRF	0,99	ALT
SOSD 047 280-290	3,18	B	3	2008SEQ_AT	GRA	0,60	ALT
SOSD 053 121-131	4,06	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,64	ALT
SOSD 053 144-154	3,22	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,64	MDA
SOSD 053 154-162	2,36	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,64	ALT
SOSD 053 166-176	2,82	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,64	ALT
SOSD 054 117-126	3,54	B	3	2008SOS_AT	GRF	1,31	ALT
SOSD 080 286-296	4,12	B	3	2008SEQ_AT	MVA	1,05	ALT
SOSD 282 129-138	3,42	B	3	2008SOS_AT	GRF	1,78	ALT
SOSD 292 088-095	2,76	B	3	2008SOS_AT	BHT	0,56	ALT
SOSD 315 100-110	3,92	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,93	ALT
SOSD 315 110-120	4,50	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,93	ALT
SOSD 315 120-130	3,84	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,93	ALT
SOSD 315 152-162	4,23	B	3	2008SOS_AT	GRF	0,93	ALT
SOSD 419 048-058	3,86	B	3				ALT
SOSD 420 063-073	4,04	B	3				ALT
SOSD 019 165-175	4,08	B	4	2008SOS_AT	GRF	0,36	ALT
SOSD 049 306-316	2,82	B	4	2008SEQ_AT	GRA	1,17	ALT
SOSD 051 291-301	3,54	B	4	2008SEQ_AT	GRA	1,53	MDA
SOSD 130 251-261	3,72	B	4	2008SEQ_AT	GBA	0,76	ALT
SOSD 236 185-193	2,64	B	4	2008SOS_AT	BHT	0,97	ALT
SOSD 296 130-140	3,86	B	4	2008SOS_AT	GRF	0,87	ALT
SOSD 299 096-105	3,60	B	4	2008SOS_BT	BHT	0,56	ALT
SOSD 299 107-115	2,82	B	4	2008SOS_AT	GRF	0,70	ALT
SOSD 302 119-127	2,98	B***	4***	2008SOS_AT	GRF	0,44	ALT
SOSD 302 154-164	3,80	B	4	2008SOS_AT	GRF	0,61	ALT
SOSD 308 117-127	4,32	B	4	2008SOS_AT	BHT	0,39	ALT
SOSD 308 127-137	4,06	B	4	2008SOS_AT	BHT	0,39	ALT
SOSD 310 215-225	3,96	B	4	2008SEQ_AT	ACT	1,16	ALT
SOSD 311 111-119	2,98	B	4	2008SOS_AT	GRF	0,90	ALT
SOSD 317 242-252	4,58	B	4	2008SEQ_SAT	ACT	2,69	ALT
SOSD 318 110-120	3,80	B	4	2008SOS_AT	BHT	0,38	ALT
SOSD 379 215-225	3,46	B	4				ALT
SOSD 379 250 260	3,82	B	4	2008SEQ_AT	ACT	0,90	ALT

ANEXO 1 - RELAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

ID	Massa recebida kg	Cluster (4 grupos)	Cluster (7 grupos)	Código Amostra	Litologia	Teor Cu (%)	Classificação moabilidade
SOSD 013 087-093	3,94	C	5				
SOSD 019 140-150	3,97	C	5	2008SOS_SAT	BHT	3,60	MDA
SOSD 021 109-119	3,22	C	5				MTA
SOSD 236 164-174	3,60	C	5	2008SOS_AT	BHT	0,97	ALT
SOSD 296 164-171	2,84	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,87	ALT
SOSD 302 164-174	4,12	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,61	ALT
SOSD 302 174-182	2,80	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,61	ALT
SOSD 302 190-200	3,92	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,61	ALT
SOSD 314 122-132	4,14	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,82	ALT
SOSD 314 135-145	4,14	C***	5***	2008SOS_AT	GRF	0,82	ALT
SOSD 315 142-152	3,96	C	5	2008SOS_AT	GRF	0,93	ALT
SOSD 319 155-162	2,54	C	5	2008SOS_SAT	BHT	2,72	ALT
SOSD 319 176-186	4,32	C	5	2008SOS_AT	BHT	2,44	MDA
SOSD 016 245-255	3,58	D	6				MDA
SOSD 046 214-224	3,22	D	6				ALT
SOSD 049 316-326	3,00	D	6	2008SEQ_AT	GRA	1,17	ALT
SOSD 102 275-285	3,80	D	6	2008SEQ_BT	ACT	0,28	ALT
SOSD 119 197-207	3,30	D	6				ALT
SOSD 130 290-300	3,86	D	6	2008SEQ_AT	MVA	0,83	ALT
SOSD 239 190-200	3,44	D	6				ALT
SOSD 241 292-300	3,02	D	6	2008SEQ_AT	MVA	0,54	ALT
SOSD 247 116-126	3,94	D	6				ALT
SOSD 247 126-136	3,92	D	6				
SOSD 406 167-177	3,88	D	6				ALT
SOSD 408 248-258	4,38	D	6	2008SEQ_AT	MVA	0,95	ALT
SOSD 408 262-272	4,10	D	6	2008SEQ_AT	MVA	0,95	ALT
SOSD 408 273-283	4,06	D	6***	2008SEQ_AT	MVA	0,95	ALT
SOSD 408 283-293	3,92	D	6	2008SEQ_AT	MVA	0,95	ALT
SOSD 017 201-211	3,70	D	7	2008SEQ_BT	ACT	0,36	ALT
SOSD 031 186-196	3,74	D	7	2008SEQ_BT	ACT	0,30	ALT
SOSD 051 260-270	3,82	D	7	2008SEQ_AT	GRA	1,53	ALT
SOSD 051 271-281	3,62	D	7	2008SEQ_AT	GRA	1,53	ALT
SOSD 098 214-224	4,14	D	7	2008SEQ_AT	ACT	0,99	ALT
SOSD 098 225-235	3,86	D	7	2008SEQ_AT	ACT	0,99	ALT
SOSD 102 256-266	3,76	D	7	2008SEQ_AT	ACT	0,62	MTA
SOSD 102 310-320	3,76	D	7	2008SEQ_AT	GBA	0,77	ALT
SOSD 130 241-251	4,08	D	7	2008SEQ_AT	GBA	0,76	ALT
SOSD 130 266-275	3,42	D	7	2008SEQ_SAT	ACT	2,62	ALT
SOSD 177 268-278	3,54	D	7	2008SEQ_SAT	ACT	1,64	ALT
SOSD 215 204-213	3,84	D***	7				ALT
SOSD 232 265-275	4,26	D	7	2008SEQ_AT	ACT	1,17	
SOSD 232 277-287	3,84	D	7	2008SEQ_AT	ACT	1,17	ALT
SOSD 309 224-234	3,88	D	7	2008SEQ_SAT	ACT	1,70	ALT
SOSD 311 101-110	3,46	D	7	2008SOS_AT	GRF	0,90	ALT
SOSD 311 126-136	4,02	D	7	2008SOS_BT	GRF	0,23	ALT
SOSD 316 212-222	2,78	D	7				MTA
SOSD 316 336-346	4,00	D	7	2008SEQ_AT	ACT	1,03	ALT
SOSD 316 351-361	3,84	D	7***	2008SEQ_AT	ACT	1,03	ALT
SOSD 355 103-113	3,86	D	7	2008SEQ_AT	GBA	1,48	ALT
SOSD 403 220-230	3,74	D	7	2008SEQ_AT	BSE	1,03	ALT

Legenda:

Código da amostra: SEQ Sequeirinho, SOS Sossego, ESTER estéril, AT alto teor, SAT super alto teor, BT baixo teor;

Litologia: ACT actinolito, MAG magnetito, GRA granito, GBA gabro, GRF granófiro, MVA meta vulcânica ácida, BHT brecha heterolítica, BSE brecha sulfetada sequeirinho, BSO brecha sulfetada sossego, BIX biotita xisto

Classificação de moabilidade: MTA - Muito alta, ALT - alta, MDA -média alta- , MED - média moabilidade

ANEXO 2 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

Difratograma da amostra SOSD 017 256-266 m - **clusters A e 1**

Difratograma da amostra SOSD 232 265 - 275 m - **cluster 2**

ANEXO 2 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

Difratograma da amostra SOSD 020 137-145 m - **cluster 3**

Difratograma da amostra SOSD 302 119-127 m - **clusters B e 4**

ANEXO 2 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

Difratograma da amostra SOSD 314 135-145 m - **clusters 5 e C**

Difratograma da amostra SOSD 408 273-283 m - **cluster 6**

ANEXO 2 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

Difratograma da amostra SOSD316 351-361 m - **cluster 7**

Difratograma da amostra SOSD 215 204-213 m - **cluster D**

ANEXO 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS FASES MINERAIS –

BANCO DE DADOS MLA

Sulfetos						
Mineral	Dens.	S	Cu	Fe	Ni	Co
calcopirita	4,2	34,8	34,4	30,8		
calcocita	5,7	20,2	79,9			
pirita	5,1	53,5		46,6		
millerita	5,5	35,3			64,7	
siegenita	4,8	42,1			43,4	14,5

Principais minerais																	
Mineral	Dens.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O	Cl	F	FeO
quartzo	2,7	100															
Kfeldsp	2,6	64,1	19,3			16,6											
albita	2,6	68,8	20,3		10,9												
plagioc NaCa	2,8	44,4	35,8	19,2	0,56												
escapolita	2,6	57,2	23,1	6,76	9,81	0,57									2,54		
epidoto	3,4	41,0	19,6	22,4			15,1							1,93			
actinolita	3,0	57,0	2,74	10,4	0,44		9,00	17,2						2,85	0,32		
hastingsita	3,4	38,5	12,9	10,5	2,08	1,50	26,0	6,34							2,16		
muscovita	2,8	45,0	38,2			11,8								4,06		0,95	
bt-flog	3,0	35,0	14,6			7,49	27,9	10,4		1,13				2,92	0,69		
Fe-clinocloro	2,7	26,5	17,1				32,0	12,4						12,1			
magnetita	5,0	0,10					99,2			0,40	0,30						
Cr-magnetita	5,2						88,0		12,0								
ilmenita	4,8						47,9			49,7	2,44						
calcita	2,7			56,0									44,0				
anquerita	2,7			27,2				5,86	3,43				42,7				20,9
apatita	3,2			54,5								42,1			0,66	2,76	

Minerais traços																	
Mineral	Dens.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	F	Zr ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	ThO ₂	HfO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	UO ₂	V ₂ O ₅	Au
enstatita	3,3	64,1					8,90	27,0									
piroxênio	3,3	41,0	32,1	1,65	1,65		11,5	11,4		0,78							
zircão	4,7	31,7							58,4	2,30		5,53	2,10				
titanita	3,5	30,4	5,16	26,9	2,02		30,3	0,96		2,15			2,10				
rutilo	4,3															100	
monazita	5,1					29,5				34,1	5,50		16,9	14,0			
uraninita	9,5														100		
thorita	5,3	18,5									81,5						
alanita	3,9	29,3	18,7	5,47	9,74					31,3			5,51				
andradita	3,9			33,1	31,4										35,5		
ouro	17																100

ANEXO 4 - COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOSADAS (FRX) E CALCULADAS (MLA)

Cluster A

Fração (mm)	AQ -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	1,18	1,44	44,2	23,2	6,59	8,17	6,02	2,07	0,51	0,43	3,23	1,66
-0,21+0,150	1,48	1,82	40,4	26,3	6,07	8,43	5,75	1,83	0,44	0,43	4,00	1,58
-0,150+0,074	1,76	2,19	38,4	27,7	5,55	8,63	5,75	1,72	0,37	0,37	4,57	1,52
-0,074+0,037	2,24	2,63	36,6	28,4	5,06	8,80	5,85	1,40	0,39	0,39	4,49	2,04
-0,037+0,020	2,63	3,08	36,3	27,2	5,37	8,34	6,13	1,33	0,44	0,35	4,27	2,66
-0,020	2,61	2,06	37,7	26,6	5,54	8,92	6,36	1,30	0,40	0,36	4,89	1,88
Fração (mm)	MLA -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	1,25	1,51	41,1	26,7	7,53	8,61	6,04	1,96	0,53	0,49	2,49	1,61
-0,21+0,150	1,50	1,75	36,8	31,5	6,70	8,92	5,43	1,66	0,47	0,49	3,04	1,53
-0,150+0,074	1,69	1,95	34,2	34,3	6,07	9,10	5,21	1,44	0,43	0,47	3,42	1,57
-0,074+0,037	2,05	2,36	34,2	33,5	5,77	9,10	5,84	1,31	0,43	0,42	3,39	1,75
-0,037+0,020	2,98	3,23	31,2	35,3	5,61	8,90	5,89	1,11	0,45	0,45	3,39	1,95
-0,020	3,19	3,48	34,0	30,3	5,73	9,55	6,74	1,18	0,46	0,42	3,35	2,06

Nota: PF = H₂O + CO₂

Cluster B

Fração (mm)	AQ -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,37	0,40	67,5	7,40	9,64	2,96	2,20	3,32	1,74	0,45	0,64	3,00
-0,21+0,150	0,55	0,64	65,5	8,19	9,30	3,57	2,32	3,14	1,69	0,43	0,88	3,42
-0,150+0,074	0,75	0,85	64,9	8,95	9,23	4,30	2,46	3,06	1,65	0,40	1,18	1,71
-0,074+0,037	0,86	0,99	61,0	9,97	8,64	4,88	2,70	2,73	1,46	0,43	1,21	4,54
-0,037+0,020	1,05	1,14	58,2	11,42	8,45	5,40	2,91	2,47	1,40	0,42	1,25	5,33
-0,020	0,93	0,66	60,0	12,18	8,22	6,13	2,81	2,45	1,35	0,45	1,46	2,94
Fração (mm)	MLA -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,31	0,33	67,6	7,10	10,8	3,09	1,93	3,17	2,09	0,43	0,52	2,37
-0,21+0,150	0,62	0,68	66,0	7,73	10,7	3,35	2,15	3,04	2,09	0,33	0,52	2,69
-0,150+0,074	0,75	0,76	63,5	9,05	10,4	4,18	2,23	2,87	1,97	0,42	0,79	3,08
-0,074+0,037	0,92	0,94	62,0	9,85	9,79	4,75	2,38	2,64	1,79	0,40	0,88	3,58
-0,037+0,020	1,28	1,26	55,9	13,4	9,48	5,84	2,76	2,37	1,62	0,49	0,84	4,69
-0,020	1,12	1,13	56,0	12,0	9,71	6,45	3,11	2,49	1,58	0,48	1,07	4,88

Nota: PF = H₂O + CO₂

ANEXO 4 - COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOSADAS (FRX) E CALCULADAS (MLA)

Cluster C

Fração (mm)	AQ -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,88	0,93	54,6	15,6	6,81	5,76	4,49	0,98	1,46	0,40	1,12	6,38
-0,21+0,150	1,20	1,31	52,1	16,7	6,48	6,26	4,48	0,94	1,32	0,38	1,35	6,72
-0,150+0,074	1,37	1,48	50,1	17,7	6,25	6,90	4,47	0,84	1,29	0,40	1,58	6,80
-0,074+0,037	1,42	1,54	47,1	19,9	6,26	6,93	4,79	0,72	1,20	0,38	1,62	7,22
-0,037+0,020	1,27	1,34	45,3	21,0	6,53	7,05	5,33	0,63	1,27	0,40	1,50	7,45
-0,020	1,15	0,79	47,6	22,0	5,97	8,31	4,82	0,72	1,21	0,46	1,65	4,73
Fração (mm)	MLA -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,92	0,96	53,9	17,8	7,30	5,93	3,83	0,86	1,70	0,37	0,82	5,37
-0,21+0,150	1,17	1,19	51,4	18,4	7,11	7,06	3,68	0,85	1,56	0,42	1,02	6,06
-0,150+0,074	1,49	1,52	47,1	22,6	6,82	7,05	3,70	0,73	1,43	0,36	1,25	6,04
-0,074+0,037	1,75	1,77	45,4	22,6	6,79	7,62	3,87	0,67	1,44	0,34	1,5	6,38
-0,037+0,020	1,25	1,27	39,9	28,7	6,74	7,58	4,09	0,57	1,36	0,5	1,25	6,70
-0,020	1,29	1,31	41,8	24,7	6,80	8,51	4,25	0,63	1,50	0,55	1,11	7,34

Nota: PF = H₂O + CO₂

Cluster D

Fração (mm)	AQ -Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,48	0,56	59,9	9,54	10,7	5,32	3,98	4,12	1,12	0,53	0,90	1,96
-0,21+0,150	0,61	0,72	58,0	10,6	10,4	5,59	3,98	4,02	1,07	0,53	1,16	2,30
-0,150+0,074	0,84	0,99	56,0	11,8	9,98	6,11	4,08	3,81	1,00	0,52	1,67	2,18
-0,074+0,037	1,23	1,36	53,2	13,5	9,44	6,43	4,28	3,50	0,92	0,47	1,93	2,61
-0,037+0,020	1,39	1,59	52,0	13,8	9,21	6,52	4,77	3,31	0,91	0,47	1,90	2,86
-0,020	1,40	1,02	52,1	15,1	9,05	6,89	4,77	3,24	0,92	0,49	2,14	1,87
Fração (mm)	MLA-Teores (%)											
	Cu	S	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
+0,21	0,45	0,50	58,4	9,17	13,1	5,66	4,04	4,37	1,22	0,50	0,75	1,43
-0,21+0,150	0,57	0,67	56,2	11,1	12,6	5,96	4,03	4,13	1,22	0,51	0,96	1,51
-0,150+0,074	0,78	1,02	54,3	12,7	12,0	6,34	4,22	3,82	1,15	0,54	1,22	1,64
-0,074+0,037	1,19	1,32	52,9	13,4	11,6	6,53	4,50	3,64	1,12	0,52	1,34	1,76
-0,037+0,020	1,55	1,55	48,9	16,6	10,5	7,15	5,18	3,06	1,04	0,49	1,61	2,11
-0,020	1,69	1,81	48,6	16,7	9,99	7,22	5,7	2,86	0,98	0,55	1,56	2,28

Nota: PF = H₂O + CO₂

ANEXO 4 - COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOSADAS (FRX) E CALCULADAS (MLA)