

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIO
DA MINA DO SOSSEGO, REGIÃO DE CARAJÁS**

Viviane Kotani Shimizu

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 09/30)**

TF
S556
VK.d

São Paulo
2009

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIO
DA MINA DO SOSSEGO, REGIÃO DE CARAJÁS**

Viviane Kotani Shimizu

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 09/30)**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900026783

São Paulo

2009

1 P
5550
VK.d



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE SINÉRIO
DA MINA DO SOSSO, REGIÃO DE CARALÁ

Wladimir Kozlov Shilov

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kohn

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(1970)

São Paulo
1970

Identificação

Projeto: TF 09-34

Título: DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TIPOS DE MINÉRIO DA MINA DO
SOSSEGO, REGIÃO DE CARAJÁS.

Aluna: Viviane Kotani Shimizu

Orientador: Henrique Kahn

Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente e principalmente ao meu orientador Henrique por ter acreditado no potencial do projeto e tê-lo feito acontecer. Obrigada também pela confiança depositada diariamente, sempre me fazendo enxergar as coisas de uma forma mais simples.

Ao pessoal do laboratório, Daniel, Carina, Manu, André, Mari, Liz e Jú, agradeço por estarem dispostos a ajudar e contribuir nos momentos em que eu mais precisava.

Aos técnicos, Vavá, Rafão, Erílio, Rafa, Rose, Ilda, Carlos, Aílton, Juscelino e Lino, agradeço não só pela ajuda no trabalho pesado e pela paciência dedicada, mas também pelo convívio diário, sempre muito agradável.

Rê, Rafael e Lucas, vocês são demais, valeu por tudo! A amizade e ajuda de vocês foi importantíssima para mim.

Ao meu professor e amigo Boggiani pela ajuda que sempre me emprestou.

Cé, Pingols e Ganga obrigada pela amizade e companheirismo durante todo o curso, espero que isso perdure por mais muito tempo.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu namorado Paulo e minha família: mãe, pai, Ca e Ela pelo apoio incondicional e pelo carinho, sem isso jamais teria conseguido.

RESUMO

O presente projeto apresenta a classificação de amostras de minério de cobre, provenientes da mina do Sossego, com base nas técnicas de difração de raios X conjugada com a ferramenta de análise estatística por agrupamento. Trata-se de uma abordagem inédita na área de geociências e tecnologia mineral para avaliação de variabilidade mineralógica do depósito em questão. Complementando o trabalho, realizaram-se estudos de caracterização tecnológica dos grupos definidos no que se refere a composição mineralógica e forma de associações dos minerais portadores de cobre de modo fornecer informações relevantes ao beneficiamento.

Foram coletados difratogramas de raios X relativos a 110 amostras de minério cedidas pela Vale. Estes foram comparados e classificados em grupos de semelhanças através da técnica de análise por agrupamento. O agrupamento gerou dois resultados, um mais detalhado, que considera sete grupos, e outro com quatro grupos. Como não foram observadas diferenças substanciais entre eles, deu-se continuidade do projeto com o resultado relativo a quatro grupos; os grupos denominados "A" e "D" são compostos por amostras provenientes do corpo Sequeirinho e os grupos "B" e "C", do corpo Sossego.

Quanto às proporções mineralógicas de cada grupo, puderam ser observadas variações entre os mesmos. Os clusters A e D (Sequeirinho) possuem elevada proporção de anfibólio. No cluster A, o anfibólio e a magnetita, representam 30 e 23% do total respectivamente; no cluster D, feldspato e anfibólio perfazem 30 e 23% do total. Já as amostras de Sossego diferenciam-se por apresentar elevada proporção de quartzo; no cluster B o quartzo e o feldspato são os principais minerais, representando 29 e 33% do total e no C predominam quartzo (27%), clorita (14%) e mica (12%). Em relação aos minerais menores, verifica-se que nos clusters A e D (Sequeirinho) o conteúdo de escapolita e epidoto é mais elevado, e a clorita ocorre em menor proporção.

Calcopirita é praticamente o único mineral de útil, tendo-se que mais de 95% do Cu presente de Sequeirinho está contido na calcopirita; e mais de 99% para as amostras de Sossego. Em relação ao grau de liberação da calcopirita, os clusters A e D apresentam liberação acima de 90% nas frações abaixo de 0,037 mm; o cluster B, abaixo de 0,074 mm e o C, abaixo de 0,15 mm.

ABSTRACT

The present project aims the classification of copper ore samples from Sossego mine, based on cluster analysis of X ray diffraction spectra. It is an unprecedented approach in the geosciences and mineral technological field on evaluating the mineralogical variability of an orebody. In addition, technological characterization studies on composed samples defined by cluster analysis were carried out in order to gather relevant information for mineral processing.

There were collected XRD spectra from 110 ore samples given by Vale. These diffractograms were compared and classified in similarity groups using the cluster analysis technique. Two distinct clusters results were generated; one more detailed, which considers seven clusters and another with four groups. Since there was no major distinction between them the technological characterization studies were carried out with 4 samples – clusters "A" and "B" from Sequeirinho orebody and "B" and "C" from Sossego orebody.

It was observed variations of mineralogical proportions among the clusters. "A" and "D" clusters (Sequeirinho) shows high content of amphibole; in the "A" cluster, amphibole and magnetite represent 20 and 23% w/w, respectively; in the "D" cluster, feldspar and amphibole represent 30 and 23% w/w. Samples from Sossego present high quartz content differing from the others; in the "B" cluster quartz and feldspar are the main minerals, 29 and 33% w/w respectively, while "C" cluster is comprised by quartz (27%), chlorite (14%) e mica (12%). In relations to minor minerals clusters "A" and "D" presents relatively high contents of scapolite and epidote and minor amounts of chlorite.

Chalcopyrite is essentially the only valuable mineral; in Sequeirinho orebody more than 95% of copper is present in chalcopyrite while in Sossego it reaches more than 99%. The chalcopyrite free surface liberation spectra for clusters "A" and "D" indicates liberation degree above 90% for fractions sizes bellow 0,037 mm; for "B" and "C" clusters the same figure is achieved bellow 0,074 mm and 0,15 mm, respectively.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO PROJETO	2
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	3
3.1	Aspectos geológicos	3
3.1.1	Geologia regional	4
3.1.2	Geologia local	5
3.1.3	Tipos Litológicos	8
3.1.4	Beneficiamento do cobre	10
3.2	Técnicas analíticas	11
3.2.1	Difração de raios X	11
3.2.2	Análise por agrupamento (cluster analysis) por difração de raios X	12
3.2.3	Caracterização tecnológica	13
3.2.4	Mineralogia quantitativa automatizada	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	16
5	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	22
6	RESULTADOS	23
6.1	Resultados da Análise por agrupamento	23
6.2	Resultados da Caracterização Tecnológica	28
6.2.1	Composição química das amostras estudadas	28
6.2.2	Distribuição granulométrica das amostras estudadas	30
6.2.3	Cluster A	31
6.2.4	Cluster D	34
6.2.5	Cluster B	37
6.2.6	Cluster C	40
7	CONCLUSÕES	44
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

ANEXOS

ANEXO 1 - RELAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

ANEXO 2 - ASPECTO GERAL DAS AMOSTRAS RECEBIDAS

ANEXO 3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

ANEXO 4 - COMPARATIVO ENTRE DIFRATOGRAMAS DOS AGRUPAMENTOS

ANEXO 5 - DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVA DE CADA GRUPO

ANEXO 6 - ASSOCIAÇÕES DA CALCOPIRITA (MLA)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Localização da Província Mineral de Carajás no Cráton Amazônico (modificado de Grainger <i>et al.</i> 2008).	3
Figura 2 - Mapa geológico da Província Mineral de Carajás. (DOCEGEO 1988; Dardenne and Schobbenhaus 2001)	6
Figura 3 - Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego e distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermal (modificado da Vale, obtido de Monteiro <i>et al.</i> 2008a)	8
Figura 4 - Etapas do beneficiamento do minério (fluxograma cedido pela Vale)	10
Figura 5 - Procedimento da preparação das amostras.	17
Figura 6 - Procedimentos da análise mineralógica quantitativa automatizada	20
Figura 7- Dendograma indicando o agrupamento das amostras.	24
Figura 8 - Distribuição espacial dos agrupamentos de amostras segundo análise de componente principal (PCA), sob diferentes pontos de visada – 7 e 4 grupos.	25
Figura 9 - Comparação entre difratogramas representativos de cada grupo – 4 grupos	27
Figura 10 - Distribuição dos tipos litológicos nos grupos em termos de número absoluto de amostras.	28
Figura 11 - Teores de Cu por grupos definidos	28
Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação <i>rougher</i> e <i>cleaner</i> .	30
Figura 13 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster A	32
Figura 14 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster A	33
Figura 15 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster D	36
Figura 16 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta– cluster D	36
Figura 17 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster B	39
Figura 18 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster B	39
Figura 19 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster C	42
Figura 20 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster C	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Sumário da mineralogia dos litotipos	9
Tabela 2 - Cronograma das atividades executadas no projeto.	22
Tabela 3 - Comparação de análises mineralógicas semi-quantitativas entre resultados de distintos agrupamentos (amostras mais representativas de cada grupo).....	26
Tabela 4 - Resultados de análise química das amostras cabeças	29
Tabela 5 – Resultados de análise granuloquímica – cluster A	31
Tabela 6 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster A.....	32
Tabela 7 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores – cluster A.....	33
Tabela 8 - Resultados de análise granuloquímica – cluster D.....	34
Tabela 9 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster D	35
Tabela 10 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster D.....	37
Tabela 11 - Resultados de análise granuloquímica – cluster B.....	37
Tabela 12 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster B.....	38
Tabela 13 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster B.....	40
Tabela 14 - Resultados de análise granuloquímica – cluster C.....	40
Tabela 15 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster C	41
Tabela 16 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster C.....	43
Tabela 17 - Sumário comparativo das amostras estudadas.....	45

1 INTRODUÇÃO

A mina de Sossego, localizada na Província Mineral de Carajás, apresenta reserva de 245Mt com teor médio de 1,1% de cobre e 0,28 g/t de ouro (Lancaster-Oliveira *et al.* 2000 apud Monteiro *et.al.* 2008a) e é apenas a primeira entre os vários depósitos de cobre presentes na região a entrar em operação.

A mineralização, relacionada com a percolação de fluidos hidrotermais em descontinuidades, está disposta principalmente em dois de cinco corpos mineralizados: Sequeirinho e Sossego. Estes apresentam diferenças mineralógicas entre si, relacionadas com o tipo e intensidade das alterações hidrotermais e a rocha hospedeira.

Diversos trabalhos foram realizados a fim de caracterizar a mineralogia presente e discutir a gênese do depósito, além de estudos de processamento mineral, que visam a otimização do processo de beneficiamento.

Este trabalho de formatura visa à classificação de cerca de 110 amostras de minério com base em técnicas de difração de raios X e de estatística por análise por agrupamento. Para complementar os estudos e contribuir com eventuais informações relevantes para o processamento, os litotipos definidos foram compostos para estudos de caracterização tecnológica por meio de análise de imagens conjugada a microscopia eletrônica de varredura.

2 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA DO PROJETO

O presente projeto visou a classificação de amostras de minério de cobre provenientes da Mina do Sossego, Carajás, com base na difração de raios X conjugada a técnica de análise por agrupamento (*cluster analysis*), e a caracterização tecnológica dos grupos assim definidos.

A caracterização tecnológica empregou ferramentas de análise de imagens conjugada a microscopia eletrônica de varredura, de modo a definir a composição mineralógica quantitativa de cada grupo, partição de Cu presente e espectro de liberação dos minerais de Cu e outras eventuais informações relevantes no processo de beneficiamento.

Com isso procurou observar a aplicabilidade da ferramenta de análise por agrupamento (*cluster analysis*) utilizando a técnica de difração de raios X no auxílio à exploração mineral. A abordagem empregada é inédita nas áreas de geociências e tecnologia mineral. A partir dela pretende-se avaliar a variabilidade e classificação dos tipos de minérios em um estudo de caso aplicado a mina de cobre de Sossego, Serra dos Carajás.

O método de difratometria de raios X tem atualmente importante papel no setor mineral, devido a simplicidade, a rapidez das análises e a confiabilidade dos resultados. A técnica geralmente associada com análises químicas pode ser utilizada em diversas fases 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.

Além disso, ferramentas de softwares atuais podem classificar diretamente os difratogramas de raios X, sem o prévio tratamento dos mesmos ou identificação das fases presentes, otimizando o tempo de análise dos dados.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A mina do Sossego está localizada na Província Mineral dos Carajás, na região de Canaã dos Carajás, sudeste do Pará (Figura 1). A descoberta deste depósito deu-se em 1997 e a exploração iniciou-se em 2004 pela companhia Vale.

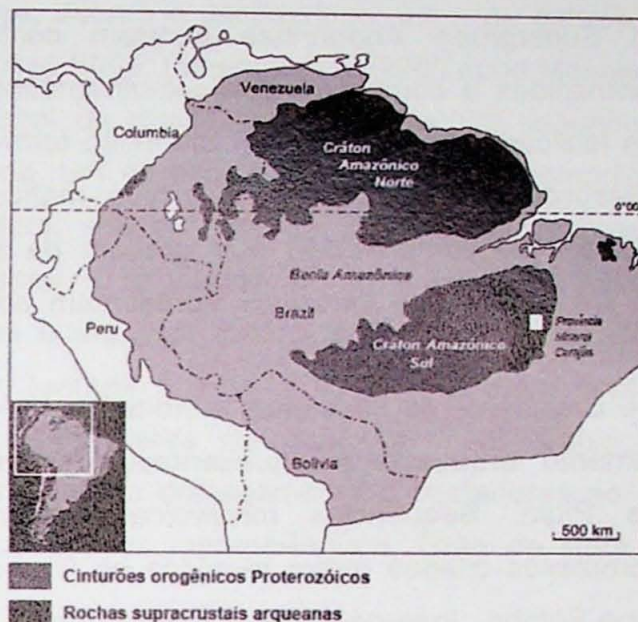


Figura 1- Localização da Província Mineral de Carajás no Cráton Amazônico (modificado de Grainger *et al.* 2008).

A mina apresenta reserva de 245Mt com teor médio de 1,1% de cobre e 0,28 g/t de ouro disposta em dois dos cinco corpos mineralizados: Sequeirinho e Sossego, que representam cerca de 85% e 15% das reservas consideradas no projeto (Monteiro *et al.* 2008b)

A mina do Sossego é a primeira a entrar em operação dentre os vários depósitos tipo óxido de ferro-Cu-Au (sigla em inglês IOCG, *iron oxid copper gold*) presentes na Província Mineral de Carajás. Estes depósitos, que incluem Salobo, Igarapé Bahia, Alemão, Cristalino, Gameleira e Alvo 118, dentre outros, somam reservas de 1.684 milhões de toneladas.

Em todos estes depósitos, a mineralização de cobre e ouro foi tardia e controlada por estruturas rúpteis ou rúpteis-dúcteis, que permitiram a percolação de fluidos hidrotermais. Os depósitos estão intimamente associados com zonas de cisalhamento, bem como intrusões de diferentes composições (granito, diorito, gabro, riolito, etc). Apresentam intensa alteração hidrotermal sódica, sódico-cálcica, potássica e escapolitização, além de cloritização, turmalinização e silicificação. Os depósitos diferem quanto às assembléias de alteração hidrotermal e os minerais de minério (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).

3.1.1 Geologia regional

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

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 anfíbolito superior (Igarapé Pojuca e Igarapé Salobo), com deformação variando desde rochas com estruturas primárias preservadas até rochas com estruturas completamente obliteradas. (DOCEGEO 1988, Galarza *et al.* 2003)

Sobreposto ao Supergrupo Andorinhas ocorre um pacote de rochas sedimentares terrígenas e marinhas, pouco metamorfisadas, dominadas por quartzo-arenitos e pelitos da Formação Rio Fresco ou Águas Claras (Nogueira *et al.* 1995, apud Neves 2006).

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: um mais antigo com ~2,76 Ga, um do final do Arqueano de ~2,57 Ga e outro Paleoproterozóico de ~1,88 Ga. 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 química e tectônica de granitos tipo A (Neves 2006, Augusto *et al.* 2008). Ainda ocorrem intrusões máficas-ultramáficas como os Complexos Luanga, Vermelho, Onça, Jacaré e Jacarezinho, além de gabros, diques e sills de idade 2.76-2.65 Ga (Galarza *et al.* 2003; Pimentel *et al.* 2003 apud Monteiro *et al.* 2008b).

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).

Ao longo da Zona de Cisalhamento Itacaiúnas ocorre grande quantidade de depósitos como Alvo 118, Sossego, Cristalino, dentre outros. O Cinturão é formado 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, dentre outros. (Pinheiro & Holdsworth, 2000).

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

3.1.2 Geologia local

Como já citado, a Mina do Sossego está localizada ao longo de uma zona de cisalhamento de porte regional, 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 intrusivos como granito, gabro e rocha metavulcânica félsica, alongados e concordantes com a estrutura regional, também afetados pelo hidrotermalismo de 2,2 Ga (Marschick and Leveille 2001 apud Monteiro *et al.* 2008a).

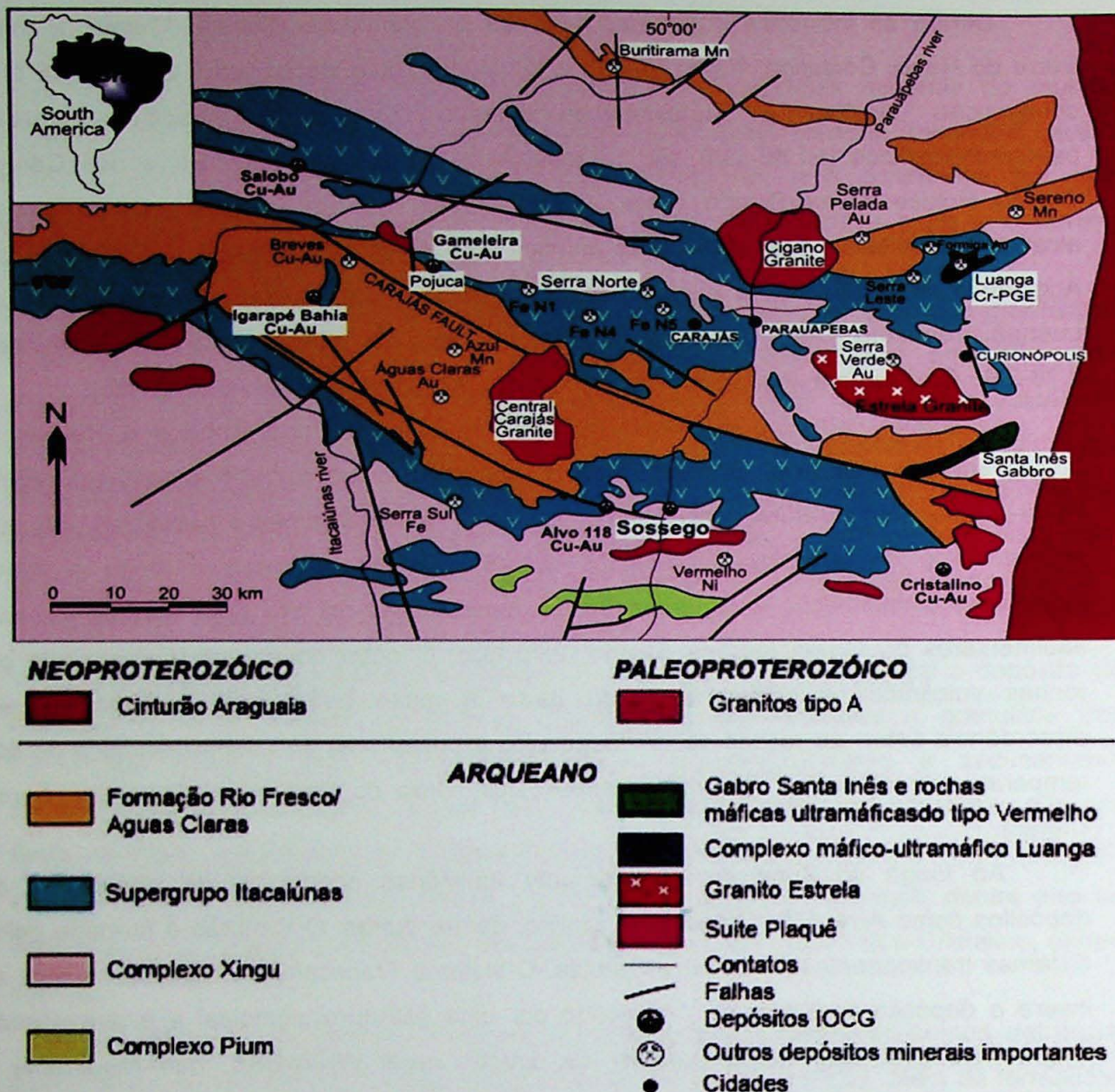


Figura 2 - Mapa geológico da Província Mineral de Carajás. (DOCEGEO 1988; Dardenne and Schobbenhaus 2001)

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.

O tipo e a intensidade das alterações hidrotermais variam entre os diferentes corpos mineralizados. Mais a oeste, no caso Pista, Sequeirinho e Baiano, as alterações iniciais sódica e sódica-cálcica são bem desenvolvidas; 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 à corpos maciços de magnetita-(apatita) e zonas constituídas de actinolita (actinolitos) na qual a alteração foi mais intensa.

A alteração potássica, mais tardia, é caracterizada pela presença de biotita, feldspato potássico e tem comumente associado grande quantidade de magnetita. É pouco desenvolvida nos corpos a oeste, sendo predominantes mais a leste, Curral e Sossego. O estágio de cloritização também é tardio e forma zonas ricas em clorita associada à calcita e epídoto (Monteiro *et al.* 2008a e Monteiro *et al.* 2008b).

A mineralização representa um estágio tardio do sistema hidrotermal e é representada por sulfetos, principalmente calcopirita e pirita e em menores quantidades pirrotita, esfalerita, millerita, vaesita, melonita, hessita e molibdenita. Ocorre na forma de vênulas, veios, bolsões, brechas e zonas de substituição da rocha hospedeira. (Monteiro *et al.* 2008a).

O principal mineral útil ou mineral de minério é a calcopirita; esta ocorre tanto na forma de maciça a semi-maciça, quanto disseminada, em vênulas, fraturas e stringers (stockwork) . Também ocorre intercrescida com pirita, magnetita e/ou silicatos, podendo apresentar inclusões de magnetita e pirita. (Monteiro *et al.* 2008a)

O ouro apresenta-se em sua forma nativa, tanto como inclusões de sub-micrométricas até cristais com mais de 100 µm dispersos na calcopirita. Apresenta ainda conteúdo de prata entre 10,7 e 14,9%.

Além dos minerais de minério, as fases associadas podem ser: pirita, magnetita, actinolita-ferroactinolita, quartzo, apatita, clinocloro, albita, epídoto, escapolita, biotita, allanita, calcita, entre outros, dependendo do corpo de minério. A descrição a seguir está baseada na tese de 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 ± muscovita ± quartzo ± actinolita ± siegenita. Apresenta quantidades subordinadas de calcita, allanita, monazita, albita, titanita e rutilo (Neves, 2006).

O minério do Sequeirinho apresenta em geral aspecto brechóide e é formado por calcopirita >> siegenita + pirita, além de apatita, clorita, quartzo, epídoto, albita, magnetita e actinolita. Em menores quantidades ocorrem escapolita, hastingsita, biotita e allanita (Neves, 2006).

A Figura 3 apresenta um mapa esquemático mostrando a distribuição das alterações hidrotermais nos corpos mineralizados, dentre eles os principais: Sequeirinho e Sossego.

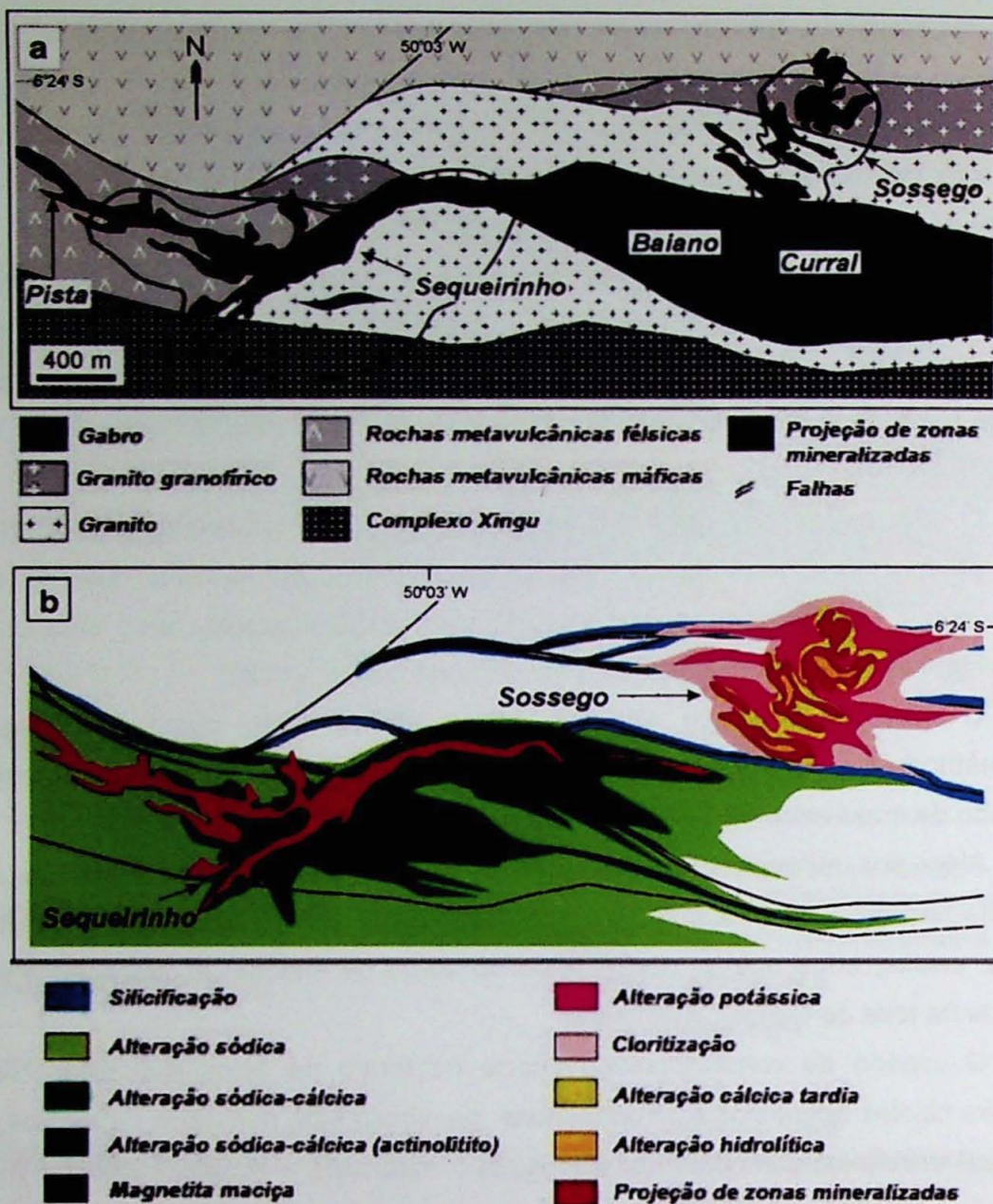


Figura 3 - Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos Pista, Sequeirinho, Baiano, Curral e Sossego e distribuição esquemática das zonas de alteração hidrotermal (modificado da Vale, obtido de Monteiro *et al.* 2008b)

3.1.3 Tipos Litológicos

Os tipos litológicos utilizados e definidos pela VALE encontram-se descritos brevemente a seguir. Esta descrição é baseada em estudos petrográficos expostos em Neves (2006).

O tipos granitóides são representados pelos tipos granitóides (GRA) e porfíricos (MVA). Nas duas variedades a albitização, silicificação, epidotização e cloritização foram os processos hidrotermais mais atuantes.

Os tipos **GRA** são em geral maciços e localmente foliados e milonitizados. São constituídos de albita, quartzo, anfibólio, epidoto, clorita, calcita e feldspato potássico. As

variedades porfíricas, **MVA**, possuem fenocristais de quartzo e plagioclásio dispostos em matriz é constituída de albita, epidoto, actinolita $\pm$ magnetita, titanita e calcopirita.

O grupo de rochas máficas é representado por diabásios-gabros (**GBA**) e actinolitos (**ACT**). 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. Os **ACT** representam um caso mais extremo da alteração hidrotermal das rochas máficas, em que grande parte dos minerais preexistentes foi transformada em actinolita. São constituídos por albita e quartzo, e por quantidades menores de titanita, epidoto, magnetita e calcopirita.

As rochas ricas em biotita, tipo **BIX**, são constituídas por biotita, quartzo, escapolita, hastingsita, e em quantidades menores de feldspato potássico, magnetita, albita, epidoto, actinolita, calcopirita, ilmenita e titanita.

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 por proporções subordinadas de albita, calcita, clorita, titanita, ilmenita e pirita.

A brecha tipo Sequeirinho, **BSE**, é formada por calcopirita >> siegenita + pirita junto a uma ganga composta de apatita, clorita, quartzo, epidoto, albita, magnetita e actinolita, além de quantidades menores de escapolita, hastingsita, biotita e alanita.

A brecha tipo Sossego, **BHT**, é dominada também por calcopirita. Os clastos são derivados essencialmente de rochas graníticas e a matriz é composta por calcopirita > magnetita > apatita $\approx$ clorita $\pm$ muscovita $\pm$ quartzo $\pm$ actinolita $\pm$ siegenita.

Tabela 1 - Sumário da mineralogia dos litotipos

	TIPOS LITOLÓGICOS							
	GRA	MVA	GBA	ACT	BIX	MAG	BSE	SOS
quartzo	√	√	tr	√	√	√	√	√
albita	√	√	√	√	tr	tr	√	
actinolita	√	√	√	√	tr	√	√	√
hastingsita			√		√	√	tr	
epidoto	√	√	√	tr	tr	√	√	
k-feldspato	√	√	√		tr			
clorita	√		√			tr	√	√
escapolita			√		√		tr	
biotita			tr		√		tr	
apatita	tr					√	√	√
magnetita	tr	tr	tr	tr	tr	√	√	√
calcita	√					tr		
sulfetos	tr					tr	√	√
calcopirita	tr	tr	tr	tr	tr	√	√	√

Nota: Mineralogia baseada no trabalho de Neves (2006)

3.2 BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DA MINA DE SOSSEGO

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 4.

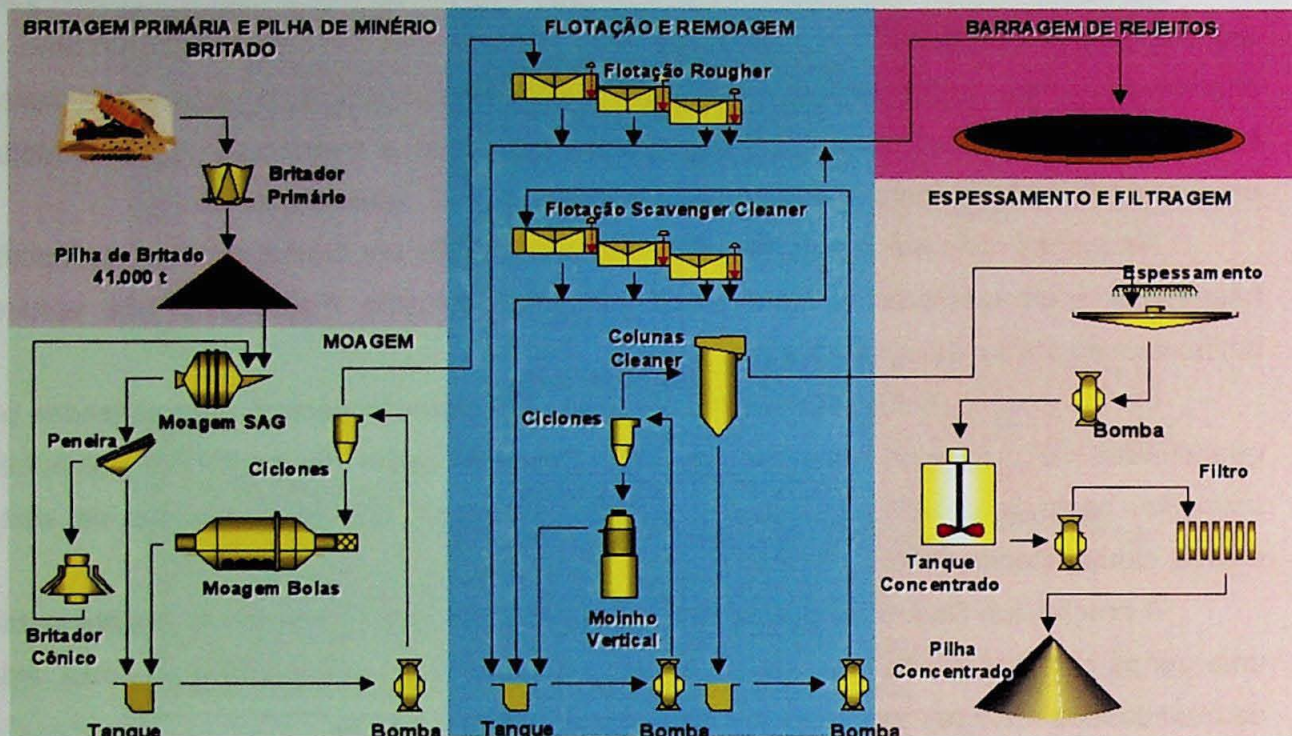


Figura 4 - Etapas do beneficiamento do minério (fluxograma cedido pela Vale)

Na planta 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 2,5 mm) é conduzido ao circuito de rebitagem em britador cônico, retornando ao moinho SAG. O material passante (< 2,5 mm) é bombeado para o circuito de classificação (ciclonagem) (Reis 2004).

O produto grosso do ciclone (*underflow*) alimenta o moinho de bolas. A descarga do moinho de bolas retorna para a ciclonagem, cujo *overflow* (produto abaixo de 0,21mm) alimenta o circuito de flotação. (Revista Minérios & Minerales, 2008)

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, que sai pela espuma, é bombeado para alimentar nova ciclonagem. O *underflow* dos ciclones alimenta dois moinhos verticais, que operam com bolas de aço, em circuito fechado com a ciclonagem. O *overflow* (material abaixo de 44 micra) é submetido à flotação *cleaner*. (Revista Minérios & Minerales, op.cit.)

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*. (Revista Minérios & Minerales, op.cit.)

O concentrado final sofre espessamento, filtração e depois de seco é encaminhado para estocagem na planta antes de ser embarcado para o porto de Ponta da Madeira.

É importante ressaltar esse processo apresenta elevada recuperação de cobre: partículas mistas com minerais portadores de cobre são concentradas nos estágios *rougher* e *scavenger cleaner* de flotação e sofrem remoagem até a liberação destes. Partículas liberadas saem do ciclo de flotação/remoagem através das colunas *cleaner* no concentrado final (Reis, op.cit.).

A produção de cobre cátodo em larga escala a partir do concentrado poderá ser realizada após a viabilização do processo na Usina Metalúrgica de Carajás, que está em etapa de teste de eficiência. Até 2010 a usina terá capacidade para processar 35 mil toneladas de concentrado de cobre por ano, produzindo 10 mil toneladas placas por ano, com 99,99% de pureza (Alves, 2008).

3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

A seguir são descritas brevemente as técnicas analíticas utilizadas neste projeto.

3.3.1 Difração de raios X

A técnica de difração de raios X através do método do pó possibilita a identificação de fases minerais a partir do espectro gerado pela sua estrutura cristalina (planos de difração e respectivas distâncias interplanares e densidades de átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino). Cada composto apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados

Parcela dos raios X ao atingirem a superfície do material sofrem espalhamento elástico sem perda de energia; caso os átomos que geram o espalhamento estejam arranjados sistematicamente numa estrutura cristalina, a relação de fases entre os espalhamentos torna-se periódica e tem-se a geração de uma radiação difratada (Bish & Post, 1989).

A interação dos raios X com a estrutura cristalina ocorre segundo a lei de Bragg, a qual 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, op. cit.)

$$\text{Lei de Bragg: } n\lambda = 2d.\text{sen } \theta, \text{ onde}$$

(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

Esta técnica 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.

3.3.2 Análise por agrupamento (cluster analysis) por 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, visando à classificação em grupos por semelhança e dissimilaridades.

Diferentemente de outros procedimentos estatísticos, o método de análise por agrupamento é utilizado quando não há uma hipótese a priori, e a pesquisa encontra-se em fase exploratória. Pode ser utilizado em diversos campos do conhecimento, sempre que se quer encontrar algum padrão de correlação entre objetos.

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 e Moita, 1998).

Existem várias maneiras de calcular a distância entre dois pontos e cabe ao pesquisador escolher aquela que melhor se aplica ao projeto. 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 e Moita, op.cit.).

A partir das distâncias calculadas é possível construir uma matriz de proximidade que descreve todas as distâncias entre amostras. A matriz é então utilizada para realizar o agrupamento das amostras. Existem diversas maneiras de aglomerar matematicamente os objetos.

A aglomeração hierárquica se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura em forma de árvore. Nela os objetos são interligados por suas associações, produzindo uma representação gráfica chamada de dendrograma, onde os objetos semelhantes, segundo as variáveis estudadas, são agrupados entre si. Já na aglomeração não hierárquica, assume-se um centro de agrupamento e, em seguida, agrupam-se todos os

objetos que estão a menos de um valor pré-estabelecido do centro. Nos métodos de agrupamento hierárquico aglomerativo, os objetos podem ser tratados como um subgrupo unitário inicial, 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 e Moita, op.cit.).

O dendograma é a figura que ilustra o agrupamento realizado. Nela, os 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 podemos ter uma visão bidimensional da similaridade ou dissimilaridade de todo o conjunto de amostras de estudo. (Moita Neto e Moita, op.cit.).

No caso da análise grupal por difratogramas de raios X, o 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 software permite ainda a identificação dos espectros mais representativos de cada grupo e os espectros que não se encaixam em nenhuma classe entre outras opções (extraído do Help do software X'Pert HighScore Plus, da PANalytical). 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.

3.3.3 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, 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 *et al*. 2004). Os estudos também podem ser empregados para resolver problemas no 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 *et al*. 2004, entre outros).

De maneira geral, a caracterização é realizada em etapas. Neumann *et al.* (2004) descreve 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). A última etapa visa à determinação do grau de liberação do mineral de interesse.

Sant'Agostino & 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.

Como já exposto, os procedimentos de caracterização de materiais geológicos variam de acordo com o tipo do minério. Estudos de casos de caracterização de diferentes materiais, bem como o de mineralização de sulfetos de metais base (objeto de estudo deste trabalho) são apresentados em Petruk (2000).

Em relação à caracterização de minérios de cobre, Petruk (2000) 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. A proporção destes minerais indicará o máximo teor de Cu recuperável do material (Henley 1983). A determinação do grau de liberação dos minerais de minério é outra 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 2000).

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 à microscopia eletrônica de varredura e microanálise por EDS. Esta técnica é discutida a seguir.

3.3.4 Mineralogia quantitativa automatizada

Ferramentas de mineralogia quantitativa automatizada através da conjugação de técnicas de análise de imagens e microscopia eletrônica de varredura e microanálise por EDS evoluíram de forma muito significativa nos últimos 20 anos possibilitando hoje gerar dados estatísticos substancialmente mais robustos. (Petruk 1989; Sutherland *et al.* 1991; Kahn *et al.* 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 adequada, tratamento da imagem, identificação dos minerais, segmentação das fases, 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) o parâmetro utilizado para a discriminação dos minerais é a sua reflectância. No caso do MEV são utilizadas imagens de elétrons retroespalhados (BSE) associadas com microanálises por EDS. Nas imagens de elétrons retroespalhados 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 presente; 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 análises quantitativas pontuais ou em áreas por EDS. (Neumann *et al.* op. cit., 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 requerem cuidados como amostragem adequada, utilização de resina específica, bom polimento, distribuição aleatória dos minerais na seção, entre outros. As imagens devem possuir alta resolução e baixo ruído para boa identificação e quantificação dos minerais (Fandrich *et al.* op.cit., Sutherland *et al.* op.cit.).

Uma das principais funções do software MLA é a deaglomeração de partículas e a segmentação das fases. A deaglomeração consiste em separar partículas que se tocam afim evitar resultados de liberação enviesados. Na segmentação de fases, o software identifica para cada partícula as fases presentes, delimitando áreas onde o nível 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 raios X, que podem ser coletados de diversas maneiras: um ponto ou área escaneada para cada área homogênea ou como um mapeamento total ou parcial da seção quando há minerais com tons de cinza semelhantes (demora muito mais tempo). (Fandrich *et al.* op.cit.).

Após os minerais serem identificados, o software assume valores numéricos para específicas propriedades das imagens, como comprimento, largura, área, perímetro, arredondamento, esfericidade, fornecendo informações como proporção mineralógica, distribuição granulométrica, grau de liberação mineral, associações minerais, distribuição de elementos de interesse, forma dos grãos, entre outras. (Neumann *et al.* op. cit., Fandrich, *et al.* op.cit.).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras utilizadas neste trabalho foram cedidas pela Vale e correspondem à contra-parte de amostras de intervalos de testemunhos de sondagem e de estudo prévio de geometurgia de moagem apresentado em Bergeman *et al.* 2009. A relação das 114 amostras recebidas é apresentada no Anexo 1; fotos de algumas amostras tal como foram enviadas ao laboratório, no Anexo 2.

As atividades foram realizadas nas dependências do Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT, do Departamento de Engenharia de Minas e do Petróleo da Escola Politécnica da USP. Estas podem ser subdivididas em duas etapas; a primeira de análise por agrupamento e a segunda de caracterização dos tipos de minérios.

A etapa de **análise por agrupamento** engloba:

- ✓ preparação das amostras na forma de amostragem de cerca de 30 gramas e pulverização em moinho planetário sob condições controladas;
- ✓ coleta de difratograma de raios X amostras utilizando difratômetro X'Pert Pro, marca PANalytical com tubo de Cu e detector sensível à posição (PSD - X'Celerator);
- ✓ análise por agrupamento dos difratogramas através do software X'Pert Highscore Plus considerando posição e intensidade dos picos difratados (conteúdo dos minerais presentes sem a necessidade da identificação das fases presentes);
- ✓ composição do difratograma relativo a cada grupo seguido de análise mineralógica semi-quantitativa (método RIR – *Reference Intensity Ratio*)

Definidos os tipos de minérios e compostas as amostras relativas aos mesmos, seguiu-se a etapa de **caracterização tecnológica**, que compreendeu:

- ✓ amostragem e composição dos tipos de minério (até 4 amostras)
- ✓ análise textural e definição da malha de cominuição
- ✓ cominuição seguida de classificação granulométrica por peneiramento a úmido mais ciclonagem do passante em 0,020 mm, seguida de dosagens químicas das frações obtidas;
- ✓ análises mineralógicas através da conjugação de microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectrômetro por dispersão de energia (EDS) e difração de raios X e de busca automatizada utilizando software Mineral Liberation Analyser (MLA-FEI), visando avaliar a composição mineralógica quantitativa, as características e associações dos minerais de Cu, incluindo grau de liberação por fração granulométrica e partição do elemento útil.

As atividades de preparação de amostra são descritas a seguir e ilustradas no fluxograma da Figura 5. Fotos dos equipamentos utilizados encontram-se no Anexo 3.

Inicialmente, o material recebido passou por uma **etapa de cominuição**, na qual foram utilizados dois britadores de mandíbulas com diferentes aberturas e um moinho de rolos. 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.

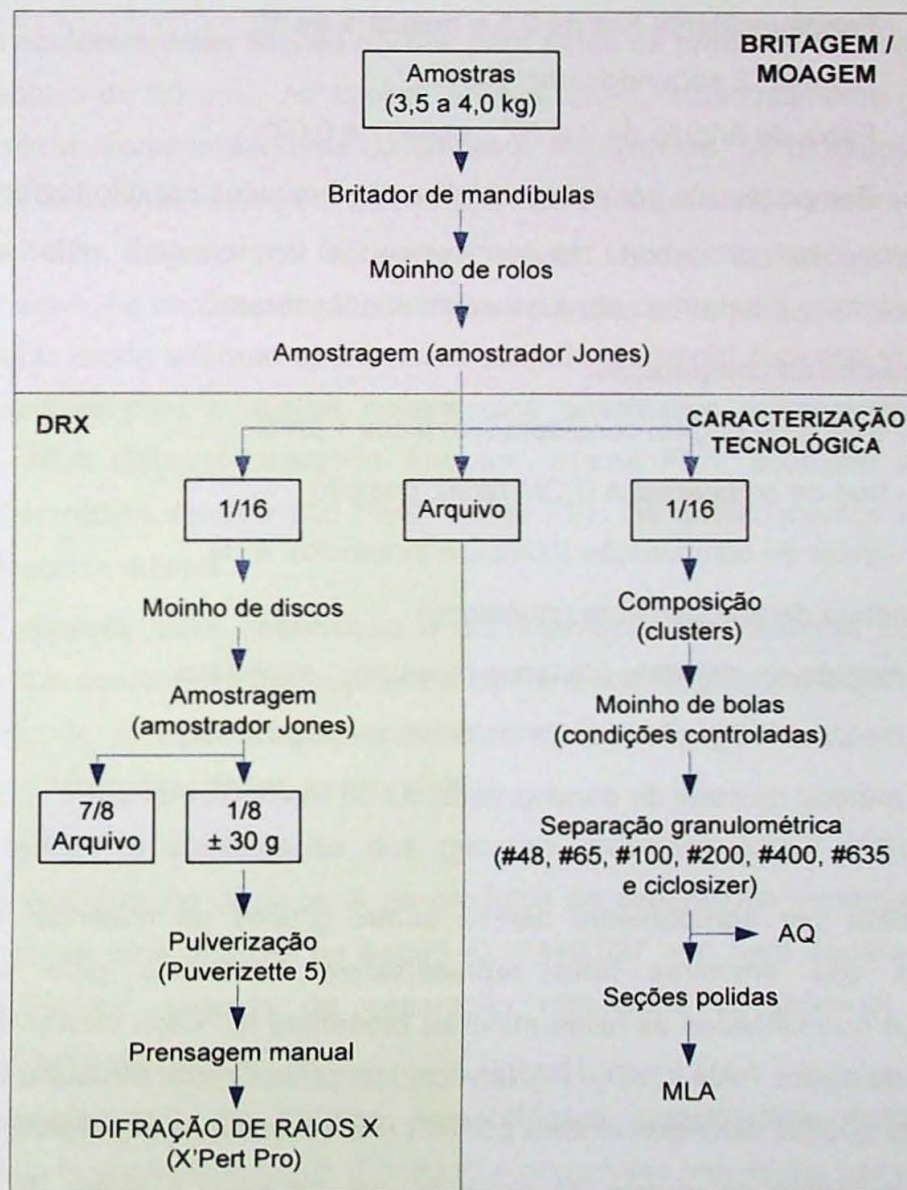


Figura 5 - Procedimento da preparação das amostras.

A alíquota destinada à **difração de raios X** sofreu diversos processos de cominuição e redução de massa até atingir aproximadamente 30g 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 a homogeneização do material para a retirada de uma alíquota de 30g. Estas alíquotas foram pulverizadas em moinho planetário Pulverizette 5, marca Fritsch, de forma a se ter granulometria inferior a 40 µm. Para tal, utilizou-se placas 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 e então encaminhadas ao equipamento X'Pert Pro, marca PANalytical, para a análise de difração de raios X.

As condições de coleta dos difratogramas foram:

- Tubo de cobre, 45 kV e 40 mA, filtro de Ni no feixe difratado;
- Fenda incidente fixa de 0,5 e máscara de 15;
- *Spinner*: 2 segundos por rotação;
- 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. Os parâmetros utilizados nesta análise 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
- método de corte do dendograma (cut off method): manual

A análise por agrupamento definiu quatro grupos de minérios. Com base nos difratogramas das amostras mais representativas, definidas pelo software, foram identificadas e quantificadas as fases minerais presentes em cada cluster. Para tal utilizou-se do banco de dados PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007) e o recurso de análise semi-quantitativa por RIR (*Reference Intensity Ratio*).

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

A preparação das 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 900g sofreram moagem controlada em moinhos de rolos e de bolas, de modo a gerar uma curva

de distribuição granulométrica semelhante a da alimentação da etapa *rougher* do processo de concentração por flotação.

Seguiu-se uma etapa de classificação granulométrica, na qual foram utilizadas 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# Tyler). O produto abaixo de 0,020 mm sofreu nova classificação, no equipamento 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.

Foram confeccionadas seções polidas para todos os produtos obtidos, com exceção do material abaixo de 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 5-10g. Este material foi reamostrado em micro-amostrador rotativo específico para pouca massa. As seções são 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. O software utilizado é o MLA (Mineral Liberation Analyser, marca FEI), acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 600 FEG, marca FEI. Os procedimentos adotados nesta análise são descritos 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 são do tipo polida, com material embutido em resina epóxi. O material foi observado em microscópio óptico de luz refletida.

Para facilitar a identificação dos minerais presentes foram efetuadas análises mineralógicas por difração de raios X de produtos de separações minerais. Em todas as amostras tomou-se uma alíquota da fração -0,074+0,037 mm para separação em líquido denso de 2,96g/cm³ seguido de separação magnética do material afundado em equipamento Frantz em 0,0A e 0,3A.

Os procedimentos da **análise mineralógica quantitativa automatizada** são apresentados no fluxograma a seguir (Figura 6) e podem ser resumidos nas etapas:

- definição das condições de coleta das seções polidas (parâmetros) e coleta;
- identificação dos minerais presentes e criação de um banco de dados;
- classificação das imagens a partir da comparação com o banco de dados;
- tratamento das imagens;
- extração das informações e tratamento das mesmas.

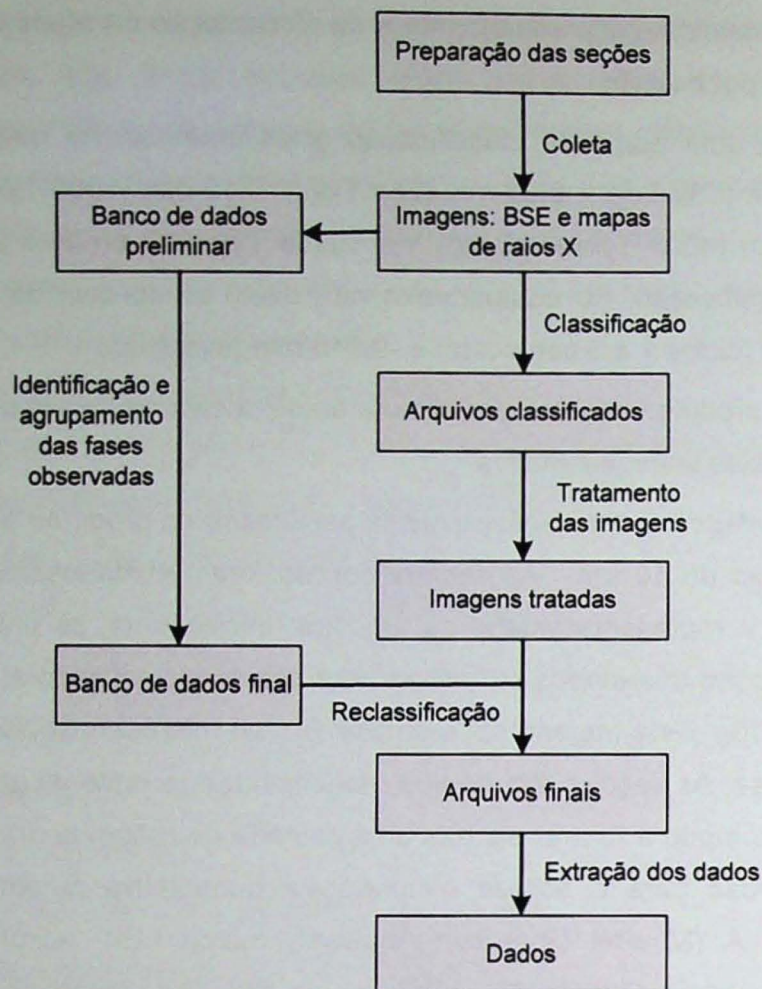


Figura 6 - Procedimentos da análise mineralógica quantitativa automatizada

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 ser coletadas, resolução e tamanho das imagens, condições de coleta dos raios X (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 pela difração de raios X e por análises quantitativas pontuais obtidas em microscópio eletrônico de varredura/EDS.

A etapa de classificação, bem como a de criação do banco de dados, foi realizada em duas instâncias. A primeira classificação foi com base no primeiro banco de dados, e a segunda, com o banco de dados refinado.

O tratamento de imagens engloba diversas atividades, sendo a principal a deaglomeração de partículas. Neste procedimento partículas do mineral de interesse em contato com outras partículas devem ser separadas manualmente porque influenciam 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 desconhecidas representavam menos de 0,2% do total.

Depois de terminado o tratamento das imagens segue-se a etapa de extração e tratamento dos dados. Para aferição dos resultados obtidos compara-se a análise química obtida do MLA com a análise química tradicional. Caso haja divergências significativas, retoma-se ao banco de dados para verificar as composições químicas dos minerais utilizadas e respectivas densidades.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento do projeto ocorreu de maneira contínua e tranquila, apesar das atividades de preparação terem se iniciado apenas em julho, devido ao atraso no recebimento das amostras. Vale lembrar que o atraso deu-se também em função da mudança da área de estudo do projeto, inicialmente a Mina de Antamina no Peru.

O cronograma das atividades realizadas é apresentado a seguir, na Tabela 2.

Tabela 2 - Cronograma das atividades executadas no projeto.

Atividades	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
1. Revisão bibliográfica								
2. Recebimento das amostras								
3. Análise por agrupamento								
3.1.Preparação de amostras								
3.2.Coleta de espectros de difração de raios X								
3.3.Análise por agrupamento								
4. Caracterização dos tipos de minérios								
4.1.Amostragem e composição								
4.2.Definição da malha de cominuição								
4.3.Cominuição e classificação granulométrica								
4.4.Análises mineralógicas - MLA								
5. Elaboração do trabalho de formatura								
5.1.Tratamento de dados								
5.2.Avaliação dos resultados								
5.3.Relatório de progresso								
5.4.Relatório final								

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DA ANÁLISE POR AGRUPAMENTO

A análise por agrupamento com base em difração de raios X considerou dois processamentos distintos no que se refere ao corte adotado no dendograma para definição de agrupamentos de amostras. Uma alternativa considera 4 classes e a outra, mais detalhada, 7 agrupamentos.

Para ambos 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 7 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; o sinal de *** depois da identificação das amostras apontam para a amostra mais representativa de cada grupo e; o sinal de + para as mais distantes das demais.

Outra maneira de verificar a qualidade do agrupamento é através da análise por principal componente (PCA - *principal component analysis*) apresentado na Figura 8. Nesta análise a qualidade do resultado obtido é visualizada a partir do posicionamento dos três parâmetros principais de correlação entre amostras. São considerados resultados satisfatórios quando a distribuição espacial das amostras de um determinado grupo é bem definida.

Pela análise por principal componente, pode-se concluir que o resultado referente ao agrupamento com quatro clusters é satisfatório, já que os grupos possuem posição no espaço relativamente bem definida.

A Tabela 3 apresenta a comparação dos resultados de composição mineralógica semi-quantitativa através do método RIR (*Reference Intensity Ratio*) das amostras mais representativas de cada grupo. As cores apresentadas indicam as similaridades entre agrupamentos definidos com 4 e 7 classes.

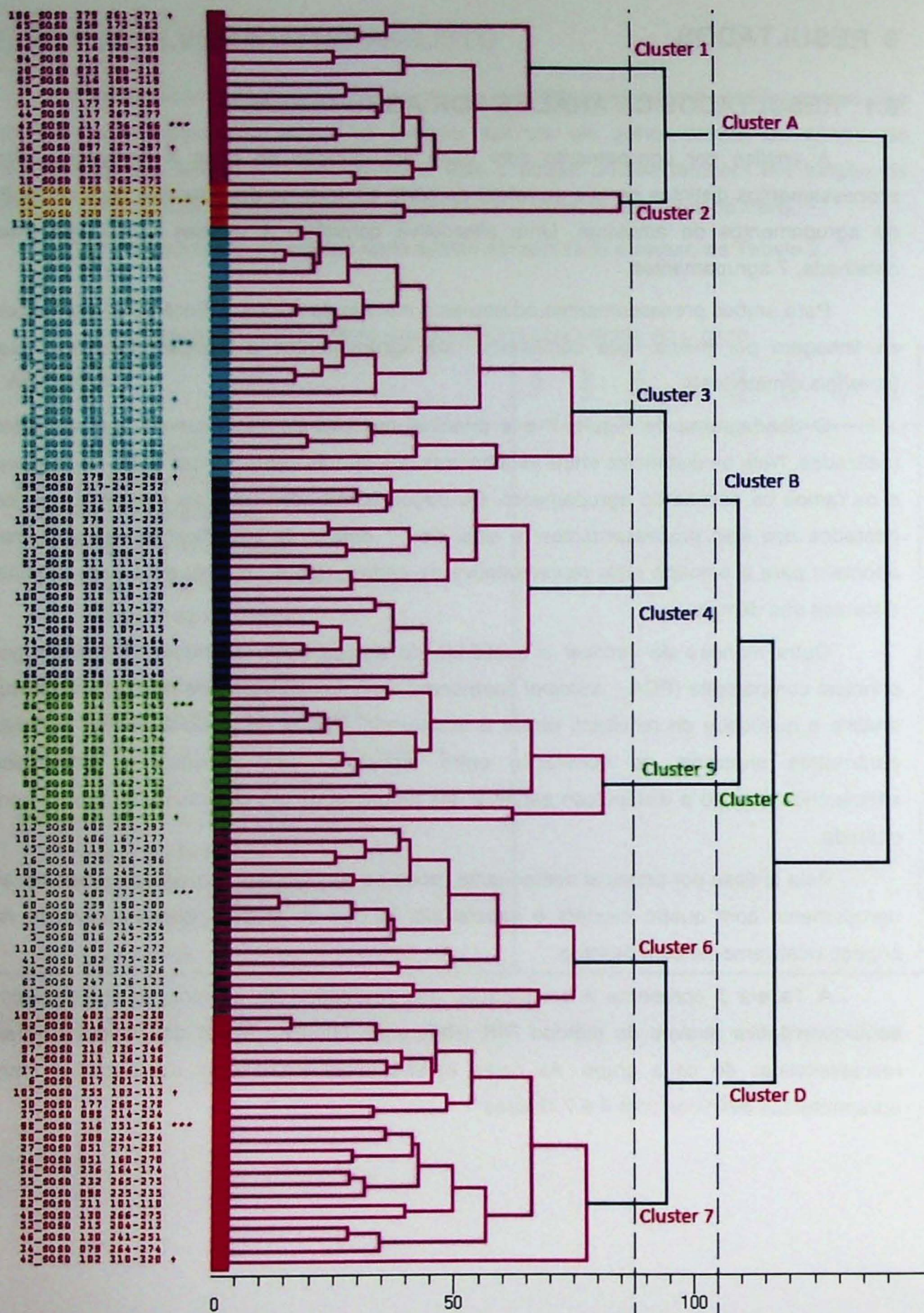
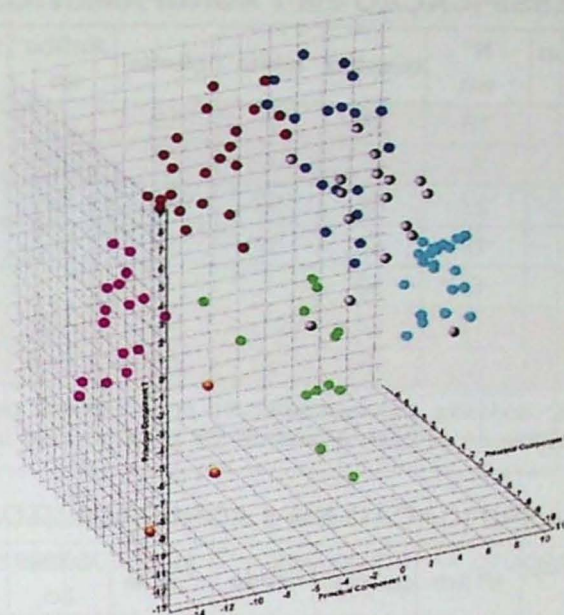
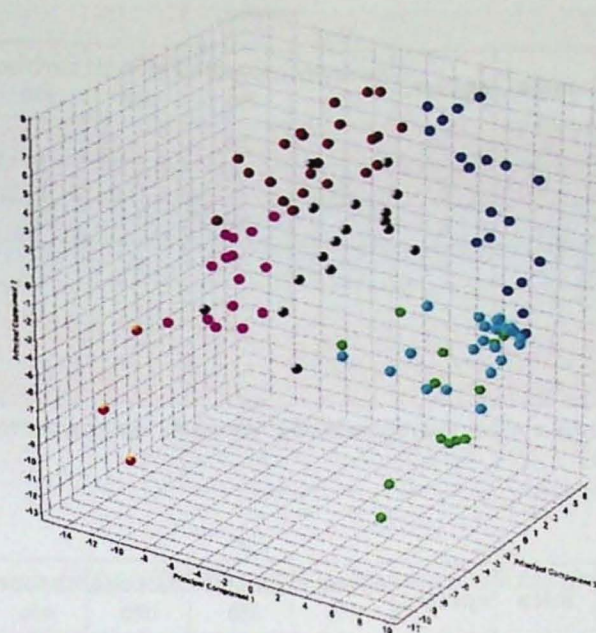
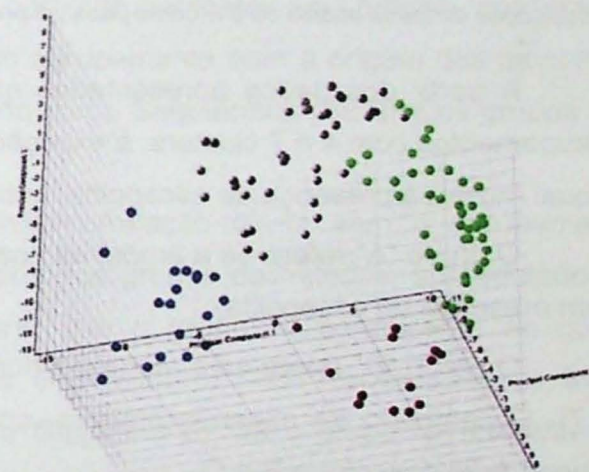
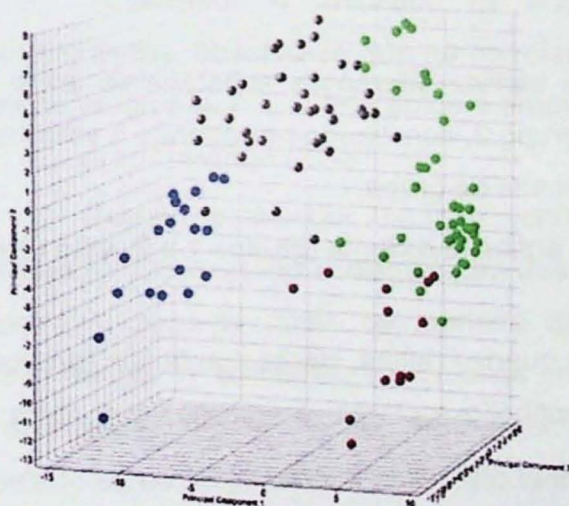


Figura 7- Dendrograma indicando o agrupamento das amostras.



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

Tabela 3 - Comparação de análises mineralógicas semi-quantitativas entre resultados de distintos agrupamentos (amostras mais representativas de cada grupo).

CLASSIFICAÇÃO EM 7 AGRUPAMENTOS

Agrup.	Nº am	quartzo	albita	clorita	Anfibólio	Piroxênio	mica	epidoto	escapolita	magnetita	calcopirita	carbonato
1	16	19	8	16	33	-	4	-	-	20	1	1
2	3	tr	5	17	50	-	3	2	19	1	1	2
3	23	50	33	10	tr	3	2	tr	-	tr	1	2
4	19	44	36	12	5	-	1	tr	-	2	tr	1
5	13	59	7	8	-	-	15	-	-	5	tr	4
6	17	26	28	10	19	1	12	2	-	1	tr	1
7	23	21	22	20	22	-	3	5	-	5	1	2

Nota: análises semi-quantitativas por DRX-RIR para amostras mais representativas de cada agrupamento; identificação de fases abaixo de 5% como possível presença

CLASSIFICAÇÃO EM 4 AGRUPAMENTOS

Agrup.	Nº am	quartzo	albita	clorita	Anfibólio	Piroxênio	mica	epidoto	escapolita	magnetita	calcopirita	carbonato
A	19	19	8	16	33	-	4	-	-	20	1	1
B	42	44	36	12	5	-	1	tr	-	2	tr	1
C	13	59	7	8	-	-	15	-	-	5	tr	4
D	40	22	26	14	22	-	11	1	-	2	1	2

Nota: análises semi-quantitativas por DRX-RIR para amostras mais representativas de cada agrupamento; identificação de fases abaixo de 5% como possível presença

A partir dos dados apresentados não se verifica diferenças substanciais entre os agrupamentos com 4 e 7 clusters, à exceção do grupo 2, constituído por apenas 3 amostras, o qual mostra a presença de escapolita, não verificada no grupo 1.

O grupo "A" refere-se a amostras ricas em anfibólio e clorita (grupos 1 e 2, este último com presença de escapolita).

O grupo "D" refere-se a amostras ricas em quartzo, albita, clorita e anfibólio (grupos 6 e 7). O conteúdo de minerais máficos, como anfibólio e clorita, é intermediário entre os grupos A (já descrito) e B e C.

Os grupos B e C referem-se a amostras mais félsicas. O grupo "B" é composto por amostras ricas em quartzo e albita, além de clorita em menor quantidade (grupos 3 e 4). O grupo "C" ou "5" refere-se a amostras ricas em quartzo e mica, provável zona com alteração potássica.

Na Figura 9 é apresentada uma comparação entre os difratogramas mais representativos de cada grupo, utilizados para a análise semi-quantitativa apresentada anteriormente. Um comparativo entre todos os difratogramas de cada grupo é apresentado no anexo 4, bem como os resultados obtidos para o processamento que considera sete grupos.

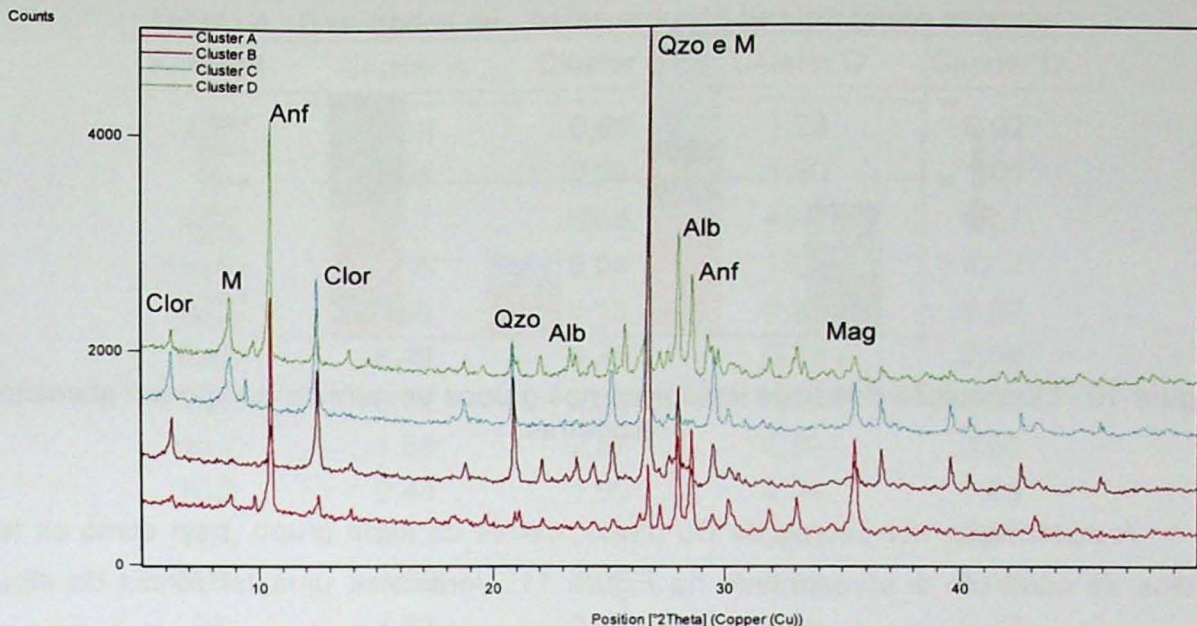


Figura 9 - Comparação entre difratogramas representativos de cada grupo – 4 grupos

No anexo 1 é apresentado além da classificação das amostras nos agrupamentos, dados cedidos pela Vale, como código da amostra, litologia, teor de Cu e classificação por índices de moabilidade.

Analisando o resultado da análise por agrupamento em função dos dados apresentados, observa-se que há correlação do agrupamento com a origem das amostras, sendo os grupos A e D referentes à amostras do corpo Sequeirinho (SEQ) e os grupos B e C, do corpo Sossego (SOS).

Quanto à litologia, não se verifica uma correlação direta com o agrupamento realizado. Observando a distribuição dos litotipos nos grupos delimitados, apresentado no anexo 1, 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.

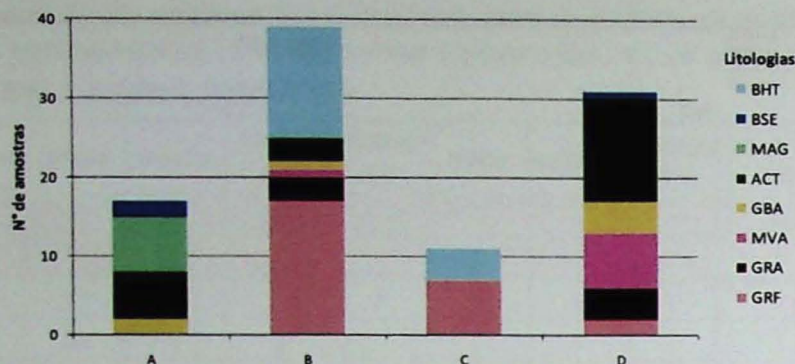


Figura 10 - Distribuição dos tipos litológicos nos grupos em termos de número absoluto de amostras.

A distribuição dos teores de Cu das amostras de cada grupo, bem como os teores médios de cada um é apresentada na Figura 11. Verifica-se uma tendência de algumas amostras dos grupos A e C possuírem teor mais elevado que as demais, o que eleva o teor médio dos mesmos.

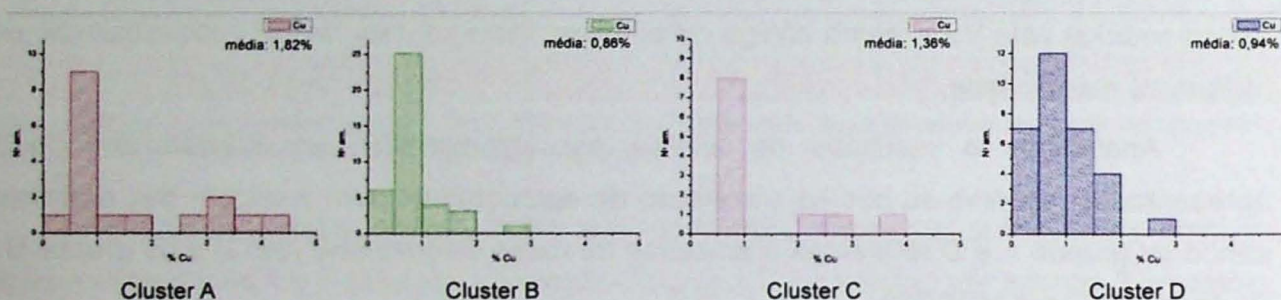


Figura 11 - Teores de Cu por grupos definidos (Fonte dos teores no Anexo 1)

6.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os resultados da caracterização tecnológica dos grupos definidos na análise por agrupamento são apresentados a seguir. As amostras serão apresentadas na seguinte ordem: "cluster A", "cluster D" (referentes ao corpo Sequeirinho) e "cluster B" e "cluster C" (corpo Sossego).

6.2.1 Composição química das amostras estudadas

Foram efetuadas análise químicas semi-quantitativas por fluorescência de raios X para todas as amostras cabeças. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4 - Resultados de análise química das amostras cabeças

Amostra	Cluster A	Cluster B	Cluster C	Cluster D
Cu	2,09	0,66	1,23	0,92
S	2,26	0,69	1,30	1,01
SiO ₂	38,7	62,8	49,3	55,7
Fe ₂ O ₃	27,5	9,94	18,5	12,2
Al ₂ O ₃	5,69	9,12	6,26	9,92
CaO	8,49	4,55	6,73	6,00
MgO	5,71	2,52	4,60	4,07
Na ₂ O	1,58	2,87	0,82	3,69
K ₂ O	0,44	1,60	1,34	1,03
TiO ₂	0,42	0,45	0,40	0,51
P ₂ O ₅	3,85	0,96	1,37	1,42
PF	1,63	3,38	7,34	2,49

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%, do Cluster D (0,92%) e por fim do Cluster B (0,66%). 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 o composto de maior teor; este, porém, varia amplamente entre as amostras: o cluster A é o mais pobre em SiO₂, com 38,7%, 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.

6.2.2 Distribuição granulométrica das amostras estudadas

Depois de compostos, as amostras dos 4 clusters sofreram moagem controlada em moinho de bolas, visando uma distribuição granulométrica intermediária entre a alimentação das flotações *rougher* e *cleaner*, da planta de beneficiamento. Os resultados das moagens são apresentados a seguir, na Figura 12.

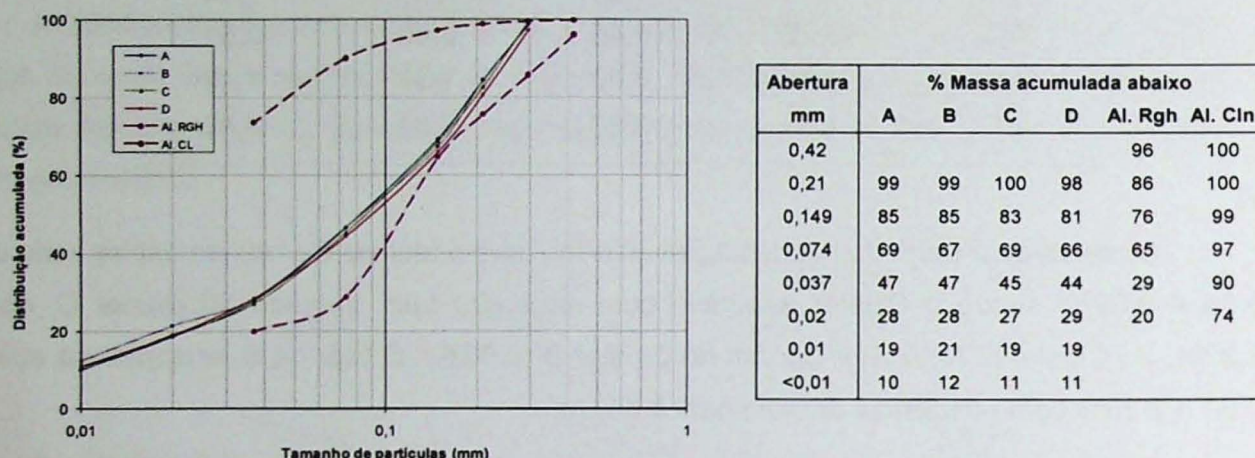


Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem e das alimentações dos estágios de flotação *rougher* e *cleaner*.

A partir das informações apresentadas observa-se que o material com granulação abaixo de 0,21 mm corresponde cerca de 97,5 a 99,0% da amostra. O material com granulação intermediária, entre 0,21 e 0,37 mm, corresponde de 52,5 a 56,7% da amostra e as frações abaixo de 0,020 mm (underflow+overflow) representam 18,7 a 21,3% do total.

A alimentação da flotação *rougher* (primeira etapa de flotação), representada pela linha pontilhada roxa, possui cerca de 86% do material abaixo de 0,21 mm. A fração abaixo de 0,020 mm representa cerca de 20% do total da alimentação.

Já a alimentação da flotação *cleaner*, última etapa de flotação do circuito de beneficiamento, possui distribuição bastante diferente das demais. O material é muito mais fino, com 99% em massa abaixo de 0,149 mm e 74% abaixo de 0,020 mm.

6.2.3 Cluster A - Sequeirinho

6.2.3.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores 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 (%)												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
+0,21	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
-0,21+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	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 do cluster A indica que cerca de 15,4% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 18,7% constituem material abaixo de 0,020 mm.

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. O teor de S encontra-se entre 1,44 e 3,08%, apresentando ocorrência semelhante ao cobre.

Os teores de SiO₂ variam de 36,3 a 44,6%, com teor médio de 39%, enquanto que os de Fe₂O₃ situam-se entre 23,2 e 28,4%.

Em menores proporções, ocorrem teores médio de CaO ao redor de 8%, 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.

6.2.3.2 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 6.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o Cluster A é composto predominantemente por anfibólio (30%) e magnetita (23%), além de plagioclásio (9%), apatita (8%), quartzo (5%), epídoto (5%) e clorita (5%). Em menor quantidade estão presentes escapolita (3%), micas (2%), entre outros. Os conteúdos de calcopirita variam de 3,6 a 10,6%, elevando-se progressivamente em direção aos finos; a pirita representa cerca de 0,5% da amostra e os outros sulfetos menos de 0,1% do total.

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

Minerais	% em massa por fração (mm)						Total +0,010 mm
	+0,21	-0,21 +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	10,6	5,7
calcocita	-	-	-	-	-	-	-
sulfetos Ni-Co	-	0,1	-	-	0,1	0,1	-
pirita	0,5	0,4	0,4	0,6	0,3	0,5	0,5
anfibólio	33	30	28	30	29	34	30
magnetita	18	23	26	25	25	21	23
plagioclásio	12	11	9	8	7	5	9
apatita	6	7	8	8	8	8	8
quartzo	6	6	6	5	4	3	5
epidoto	6	6	5	4	4	4	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
outros	1	1	1	1	1	1	1
K-feldsp	1	1	1	1	1	1	1
carbonatos	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
piroxênio	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,4

Nota: sulfetos Ni-Co = milerita e siegenita, anfibólio = actinolita ±hastingsita; plagiocláio = albita ±anorthita, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, carbonatos = calcita ±anquerita, outros = titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.

6.2.3.3. 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 13 apresenta a distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre liberada, partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm. Um sumário completo dos minerais associados a calcopirita nas partículas mistas é exposto no anexo 6.

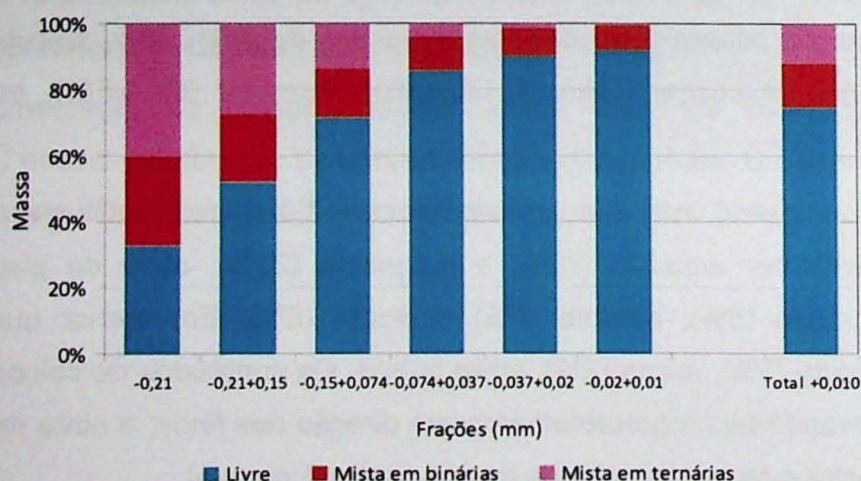


Figura 13 – Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster A

A calcopirita apresenta liberação global de 75%, variando de 33 a 92% nas frações, aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,074 mm, quando atinge liberação acima de 86%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 7 a 10% da fração. Nas associações binárias a calcopirita ocorre associada com anfibólios, apatita, clorita, magnetita e pirita (ver anexo 6).

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. A Figura 14 apresenta as curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em “superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula).

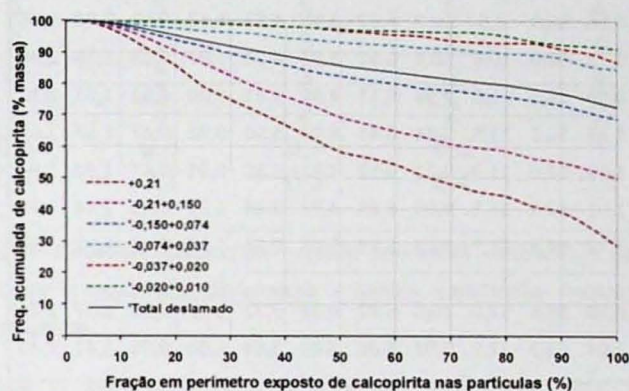


Figura 14 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster A

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

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

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,21	99,3	0,8	-	-	-
	-0,21+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	99,3	0,7	-	-	-
	Total +0,010	99,4	0,6	-	-	-
S	+0,21	82,7	0,2	16,1	0,2	0,8
	-0,21+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	93,6	0,2	5,4	0,1	0,7
	Total +0,10	88,6	0,1	10,5	0,3	0,5

No cluster A, o cobre está presente quase que em sua totalidade na forma de calcopirita (99,4%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita.

O enxofre está presente em sua maioria na calcopirita (89%) e na pirita (10%). O conteúdo de enxofre nos demais minerais portadores (calcocita, milerita e siegenita) perfaz cerca de 1% do total presente na amostra.

6.2.4 Cluster D - Sequeirinho

6.2.4.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores por fração granulométrica para o cluster C é exposta na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de análise granuloquímica – cluster D

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (%)												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
+0,21	15,4	15,4	0,48	0,56	59,9	9,5	10,7	5,32	3,98	4,12	1,12	0,53	0,90	1,96	9,9	10,8	20,6	15,1	20,4	16,9
-0,21+0,150	15,1	30,6	0,61	0,72	58,0	10,6	10,4	5,59	3,98	4,02	1,07	0,53	1,16	2,30	9,8	10,8	15,4	13,0	15,4	13,7
-0,150+0,074	22,8	53,4	0,84	0,99	56,0	11,8	9,98	6,11	4,08	3,81	1,00	0,52	1,67	2,18	19,9	21,9	22,0	21,3	21,7	22,1
-0,074+0,037	18,8	72,2	1,23	1,36	53,2	13,5	9,44	6,43	4,28	3,50	0,92	0,47	1,93	2,61	21,2	22,0	15,2	17,8	15,0	17,0
-0,037+0,020	9,16	81,3	1,39	1,59	52,0	13,8	9,21	6,52	4,77	3,31	0,91	0,47	1,90	2,86	14,3	15,3	8,8	10,8	8,7	10,2
under	8,64	90,0	1,40	1,02	52,1	15,1	9,05	6,89	4,77	3,24	0,92	0,49	2,14	1,87	12,2	8,3	7,5	10,1	7,3	9,2
over	10,0	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	9,9	8,2	10,8	10,6	12,0	10,1
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 19,1% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 19,0% constituem material abaixo de 0,020 mm.

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 SO₃ encontra-se entre 1,94 e 5,53%, 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%, com teor médio de 54-55%. Os teores de Fe₂O₃ situam-se 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%)

6.2.4.2 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 9.

Tabela 9 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster D

Minerais	% em massa por fração (mm)						Total +0,010 mm
	+0,21	-0,21 +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	6,8	2,6
calcocita	-	-	-	-	-	-	-
sulfetos Ni-Co	-	-	-	-	-	0,1	-
pirita	0,1	0,2	0,4	0,2	0,0	0,2	0,2
plagioclasio	30	29	26	2	20	16	25
anfibolio	21	21	22	22	26	28	23
quartzo	12	12	11	11	9	9	11
escapolita	9	9	8	7	8	7	8
magnetita	3	5	6	6	8	8	6
epidoto	6	6	6	6	5	4	6
clorita	4	5	5	5	7	8	5
K-feldsp	5	5	5	5	4	3	5
apatita	2	2	3	3	4	4	3
mica	3	3	3	3	4	4	3
outros	2	2	2	2	2	1	2
carbonatos	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1	0,6
piroxênio	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3

Nota: sulfetos Ni-Co = milerita e siegenita, plagiocláio = albita ±anorthita, anfibólio = actinolita ±hastingsita, clorita = Fe-clinocloro, mica = biotita/flogopita e muscovita, carbonatos = calcita ±anquerita, outros = titanita +rutilo +zircão +alanita +monazita +ilmenita +thorita +uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o Cluster D é composto predominantemente por feldspato (30%), anfibólio (23%) e quartzo (11%), além de escapolita (8%), filossilicatos (8%), epidoto (6%) e magnetita (5%). Em menor quantidade estão presentes apatita, calcita, piroxênio, entre outros. Os conteúdos de calcopirita variam de 1,2 a 6,4%, elevando-se progressivamente em direção aos finos; os outros sulfetos representam cerca de 0,2% da amostra.

6.2.4.3. 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 15 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre liberada, partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm.

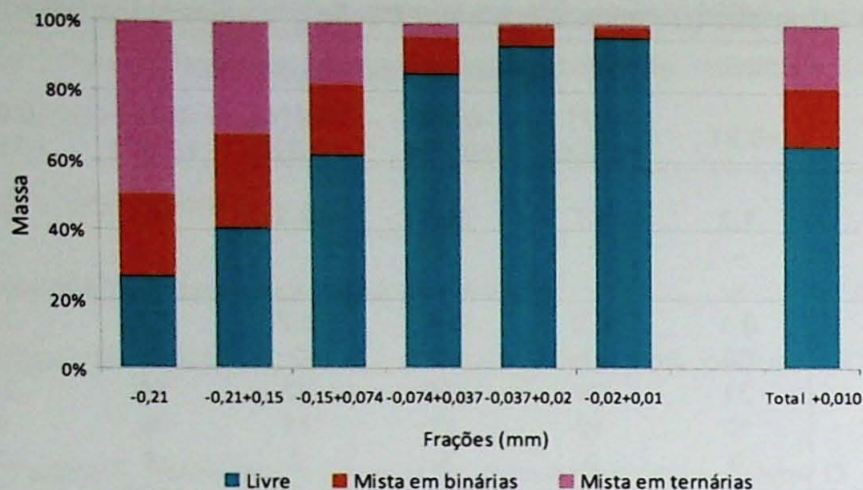


Figura 15 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster D

A calcopirita apresenta liberação global de 65%, variando de 27 a 93% nas frações, aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,074 mm, quando atinge liberação acima de 85%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 6 a 11% da fração. Nestas partículas a calcopirita ocorre associada com clorita, anfibólio, plagioclásio, apatita, pirita, entre outros.

A Figura 16 apresenta as curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em “superfície livre” (parcela de calcopirita exposta no perímetro de cada partícula).

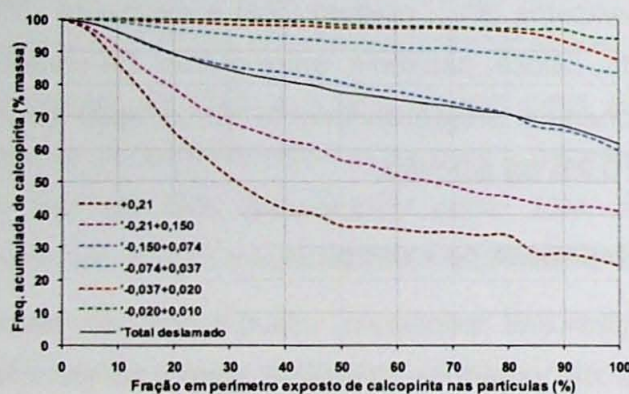


Figura 16 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster D

As distribuições Cu e S dentre os minerais portadores de S é apresentada na Tabela 10. No cluster D, o cobre está presente quase que em sua totalidade na forma de calcopirita (98,5%), sendo o restante referente ao cobre da calcocita.

O enxofre está presente em sua maioria na calcopirita (89%) e na pirita (10%). O conteúdo de enxofre nos demais minerais portadores (calcocita, milerita e siegenita) perfaz cerca de 1% do total presente na amostra.

Tabela 10 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster D

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,21	92,5	7,5	-	-	-
	-0,21+0,150	99,5	0,6	-	-	-
	-0,150 +0,074	99,9	0,1	-	-	-
	-0,074 +0,037	100	0,0	-	-	-
	-0,037 +0,020	98,2	1,8	-	-	-
	-0,020 +0,010	98,2	1,8	-	-	-
	Total +0,010	98,5	1,5	-	-	-
S	+0,21	84,3	1,7	13,9	-	0,1
	-0,21+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	96,2	0,5	2,9	0,1	0,3
	Total +0,10	89,0	0,3	10,0	0,4	0,3

6.2.5 Cluster B - Sossego

6.2.5.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores por fração granulométrica para o cluster B é exposta na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de análise granuloquímica – cluster B

Fração mm	% massa retida acum.		Teores (%)												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
+0,21	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	8,2	8,4	16,5	12,1	16,3	10,2
-0,21+0,150	15,1	30,6	0,55	0,64	65,5	8,19	9,30	3,57	2,32	3,14	1,69	0,43	0,88	3,42	13,4	14,8	17,9	14,9	17,6	13,7
-0,150+0,074	22,8	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	22,3	23,8	21,4	19,6	20,9	19,9
-0,074+0,037	18,8	72,2	0,86	0,99	61,0	9,97	8,64	4,88	2,70	2,73	1,46	0,43	1,21	4,54	22,6	24,4	17,8	19,4	17,4	20,0
-0,037+0,020	9,16	81,3	1,05	1,14	58,2	11,4	8,45	5,40	2,91	2,47	1,40	0,42	1,25	5,33	10,4	10,7	6,4	8,4	6,5	8,4
under	8,64	90,0	0,93	0,66	60,0	12,2	8,22	6,13	2,81	2,45	1,35	0,45	1,46	2,94	12,1	8,1	8,7	11,7	8,2	12,4
over	10,0	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	8,7	7,0	11,3	13,5	13,6	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 15,4% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 21,3% constituem material abaixo de 0,020 mm.

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.

O SiO₂ 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 Al_2O_3 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 Na_2O , 1,5% K_2O , 0,4% de TiO_2 e 1% P_2O_5 ,

6.2.5.2 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 12.

Tabela 12 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster B

Minerais	% em massa por fração (mm)						Total +0,010 mm
	+0,21	-0,21 +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	3,5	2,2
calcocita	-	-	-	-	0,1	0,1	-
sulfetos Ni-Co	-	-	-	-	-	-	-
pirita	0,1	0,1	-	-	0,1	0,1	0,1
quartzo	34	33	32	32	27	26	29
plagioclasio	28	27	26	24	21	19	24
clorita	8	9	10	11	13	14	9
K-feldsp	11	11	10	9	8	7	9
anfibolio	4	5	5	5	5	7	8
magnetita	3	2	4	4	6	7	5
carbonatos	3	3	4	5	7	6	4
mica	3	3	3	3	3	3	3
apatita	1	1	2	2	2	3	2
outros	2	1	2	2	2	2	2
epidoto	1	1	1	1	1	1	2
escapolita	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	1
piroxenio	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3

Nota: sulfetos Ni-Co = milerita e siegenita, plagioclásio = albita ± anorthita, clorita = Fe-clinocloro, anfibólio = actinolita ± hastingsita, carbonatos = calcita ± anquerita, mica = biotita/flogopita e muscovita, outros = titanita + rutilo + zircão + alanita + monazita + ilmenita + thorita + uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o Cluster B é composto predominantemente por quartzo (29%), feldspatos (24% de plagioclásio e 9% de k-feldspato), além de clorita (9%), anfibólios (8%), magnetita (5%), carbonatos (4%), mica (3%). Em pequenas quantidades estão presentes a apatita, epidoto, escapolita, entre outros. Os conteúdos de calcopirita variam de 0,9 e 3,5%, elevando-se progressivamente em direção aos finos; os outros sulfetos representam menos de 0,2% da amostra.

6.2.5.3. 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 17 apresenta a distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre liberada, partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm. Um sumário completo dos minerais associados a calcopirita nas partículas mistas é exposto no anexo 6.

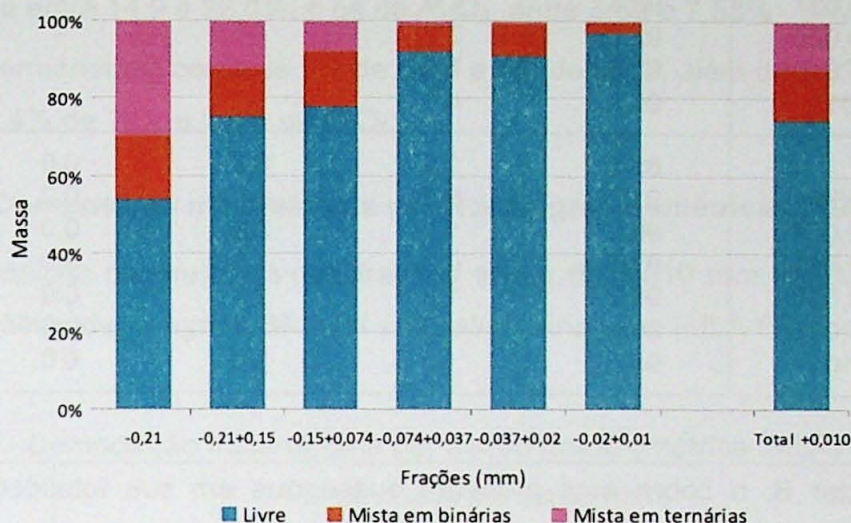


Figura 17 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster B

A calcopirita apresenta liberação global de 74%, variando de 54 a 97% nas frações, aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,074 mm, quando atinge liberação acima de 91%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 3 a 8% da fração. Nas associações binárias a calcopirita ocorre associada com clorita, quartzo, apatita, magnetita, plagioclásio e carbonatos (ver anexo xx)

A Figura 18 apresenta as curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em “superfície livre”.

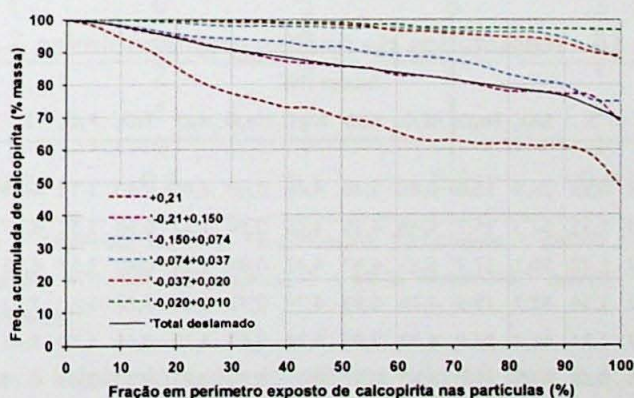


Figura 18 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster B

As distribuições Cu e S dentre os minerais portadores de S é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster B

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,21	93,4	6,6	-	-	-
	-0,21+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	92,9	7,1	-	-	-
	Total +0,010	95,9	4,1	-	-	-
S	+0,21	89,8	1,6	8,7	0,0	0,0
	-0,21+0,150	91,7	0,3	8,0	0,0	0,0
	-0,150 +0,074	96,0	1,1	2,9	0,0	0,0
	-0,074 +0,037	97,8	0,3	1,9	0,0	0,0
	-0,037 +0,020	95,7	1,8	2,3	0,0	0,2
	-0,020 +0,010	95,5	1,8	2,7	0,0	0,0
	Total +0,10	95,2	1,0	3,8	0,0	0,0

No cluster B, 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 1-2% do total presente na amostra.

6.2.6 Cluster C - Sossego

6.2.6.1 Distribuição dos elementos por fração

A distribuição de teores por fração granulométrica para o cluster C é exposta na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados de análise granuloquímica – cluster C

Fração mm	% massa		Teores (%)													Distribuição no ensaio					
	retida acum.		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	
+0,21	15,4	15,4	0,88	0,93	54,6	15,6	6,81	5,76	4,49	0,98	1,46	0,40	1,12	6,38	12,9	13,2	18,9	14,9	18,0	14,3	
-0,21+0,150	15,1	30,6	1,20	1,31	52,1	16,7	6,48	6,26	4,48	0,94	1,32	0,38	1,35	6,72	14,5	15,3	14,9	13,1	14,1	12,8	
-0,150+0,074	22,8	53,4	1,37	1,48	50,1	17,7	6,25	6,90	4,47	0,84	1,29	0,40	1,58	6,80	27,3	28,6	23,5	22,9	22,4	23,2	
-0,074+0,037	18,8	72,2	1,42	1,54	47,1	19,9	6,26	6,93	4,79	0,72	1,20	0,38	1,62	7,22	22,0	23,1	17,2	20,1	17,5	18,2	
-0,037+0,020	9,16	81,3	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	8,7	7,2	9,2	7,9	8,0	
under	8,64	90,0	1,15	0,79	47,6	22,0	5,97	8,31	4,82	0,72	1,21	0,46	1,65	4,73	8,4	5,6	8,2	10,5	7,9	10,3	
over	10,0	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	5,5	4,6	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 17,2% em massa estão retidos em 0,21 mm, enquanto que 19,1% constituem material abaixo de 0,020 mm.

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.

6.2.6.2 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 15.

Tabela 15 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Cluster C

Minerais	% em massa por fração (mm)						Total +0,010 mm
	+0,21	-0,21 +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	4,6	3,9
calcocita	-	-	-	-	-	-	-
sulfetos Ni-Co	-	-	-	-	-	-	-
pirita	0,1	-	-	-	-	-	0,1
quartzo	33	32	29	27	22	22	27
clorita	15	15	16	16	17	15	14
magnetita	8	9	12	12	18	17	12
carbonatos	7	9	9	9	10	11	8
anfíbolio	6	5	4	4	4	6	8
mica	8	8	7	8	10	11	7
plagioclásio	7	7	6	6	5	5	7
K-feldsp	6	6	5	5	3	3	5
apatita	2	2	3	4	3	3	3
outros	2	2	2	1	1	2	2
piroxênio	1	1	1	1	1	1	1
epidoto	1	1	1	1	1	1	2
escapolita	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	1

Nota: sulfetos Ni-Co = milerita e siegenita, clorita = Fe-clinocloro, carbonatos = calcita ± anquerita, anfíbolio = actinolita ± hastingsita, mica = biotita/flogopita e muscovita, plagioclásio = albita ± anorthita, outros = titanita + rutilo + zircão + alanita + monazita + ilmenita + thorita + uraninita.

Considerando-se o intervalo granulométrico +0,010 mm, o Cluster C é composto por quartzo (27%), clorita (14%), magnetita (12%), carbonatos (8%), anfíbolio (8%), além de micas (7%), plagioclásio (7%) e K-feldspato (5%) e apatita (3%). Em pequenas quantidades estão presentes o piroxênio, epidoto, escapolita, entre outros. Os conteúdos de calcopirita variam de 2,7 e 5,1%. A pirita representa menos de 0,1% do total.

6.2.6.3 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 19 apresenta a distribuição das formas de associação da calcopirita (% em massa), entre liberada, partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,010 mm. Um sumário completo dos minerais associados a calcopirita nas partículas mistas é exposto no anexo 6.

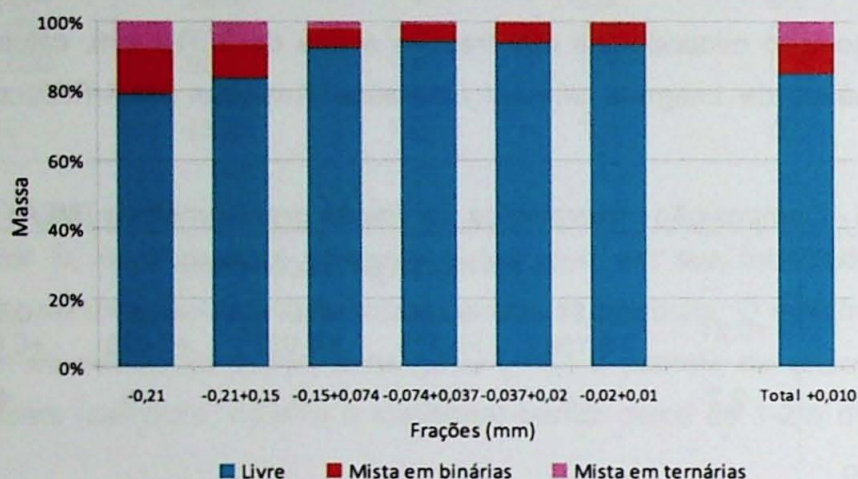


Figura 19 - Distribuição das formas de associação da calcopirita por fração granulométrica – cluster C

A calcopirita apresenta liberação global de 85%, variando de 79 a 94% nas frações e aumentando progressivamente em direção aos finos. Abaixo de 0,150 mm, quando atinge liberação acima de 94%, a calcopirita mista ocorre principalmente na forma de partículas binárias, que perfazem de 5 a 6% da fração. Nas associações binárias a calcopirita ocorre associada com magnetita, clorita, piroxênio, carbonatos e quartzo.

A Figura 20 apresenta as curvas de espectro de liberação da calcopirita considerando as frações em “superfície livre”.

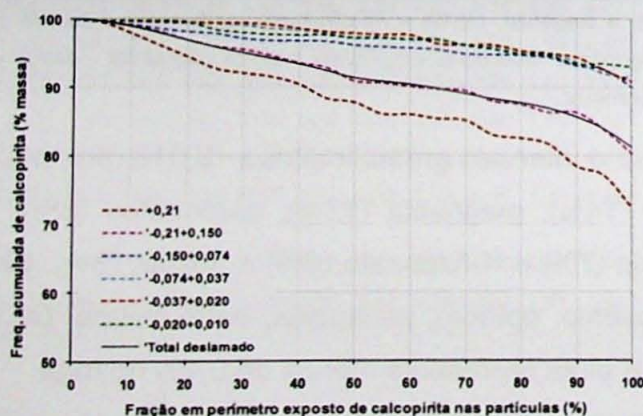


Figura 20 - Espectro de liberação da calcopirita em termos de superfície de grão exposta – cluster C

As distribuições Cu e S dentre os minerais portadores de S é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Distribuições de Cu e S dentre os minerais portadores de S – cluster C

	Fração	Distribuição (%)				
		calcopirita	calcocita	pirita	millerita	siegenita
Cu	+0,21	100	-	-	-	-
	-0,21+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	+0,21	97,3	-	2,7	-	-
	-0,21+0,150	100	-	0,0	-	-
	-0,150 +0,074	98,9	-	1,1	-	-
	-0,074 +0,037	100	-	0,0	-	-
	-0,037 +0,020	100	-	0,0	-	-
	-0,020 +0,010	99,8	-	0,3	-	-
	Total +0,10	99,3	-	0,7	-	-

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 na associado a pirita (<1%).

7 CONCLUSÕES

Conforme proposto foi realizada uma classificação de amostras de minério de cobre utilizando o recurso de análise por agrupamento com base em difratogramas de raios X. O método mostrou-se confiável para a discriminação dos tipos de minérios pelo menos em relação ao posicionamento das amostras no espaço, já que obteve total correlação na discriminação dos minérios do corpo Sequeirinho (cluster A e D) e do corpo Sossego (cluster B e C).

Os clusters A e C apresentam os teores mais elevados de cobre, respectivamente 2,09 e 1,23%. Já os clusters B e D possuem teores de 0,66 e 0,92% de Cu.

As amostras possuem algumas diferenças quanto a sua composição química. Em resumo, tem-se que o cluster A é o que possui os menores teores de SiO_2 (38,7%) e Al_2O_3 (5,69%) e os maiores teores de Fe_2O_3 (27,5%), MgO (5,71%) e CaO (8,49%), além de P_2O_5 elevado. O cluster B é o oposto, apresentando os maiores teores de SiO_2 (62,8%) e Al_2O_3 (9,94%) e os menores de Fe_2O_3 (9,94%), MgO (2,52%) e CaO (4,55%), além de Na_2O e K_2O (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.

A composição mineralógica das amostras varia amplamente em relação à proporção dos minerais presentes. Os clusters A e D, referentes a amostras do corpo Sequeirinho, possuem elevada proporção de anfibólio. No cluster A, o anfibólio e a magnetita, representam 30 e 23% do total respectivamente; no cluster D, feldspato e anfibólio perfazem 30 e 23% do total. Já as amostras relativas ao corpo Sequeirinho, diferenciam-se das demais por apresentar elevada proporção de quartzo; no cluster B o quartzo e o feldspato são os principais minerais, representando 29 e 33% do total. No cluster C predominam quartzo (27%), clorita (14%) e mica (12%).

Em relação aos minerais menores, verifica-se que nos clusters A e D (Sequeirinho) o conteúdo de escapolita e epidoto é mais elevado, e a clorita ocorre em menor proporção.

Em relação à distribuição do cobre, tem-se que mais de 95% do Cu presente nas amostras está contido na estrutura da calcopirita; nos clusters D e A essa proporção aumenta para 100 (todo o cobre presente está na calcopirita) e 99,4% respectivamente.

Em relação ao grau de liberação da calcopirita, os clusters A e D apresentam liberação acima de 90% nas frações abaixo de 0,037 mm; o cluster B, abaixo de 0,074 mm e o C, abaixo de 0,15 mm.

Um sumário com as principais características das amostras estudadas é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Sumário comparativo das amostras estudadas.

	Amostras			
	Sequeirinho		Sossego	
	Cluster A	Cluster D	Cluster B	Cluster C
Composição química (%)				
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
Composição mineralógica (% em massa)				
calcopirita	5,7	2,6	2,2	3,9
calcocita	-	-	-	-
sulf, Ni-Co	-	-	-	-
pirita	0,5	0,2	0,1	0,1
quartzo	5	11	29	27
plagioclasio	9	25	24	7
K-feldsp	1	5	9	5
anfibolio	30	23	8	8
clorita	5	5	9	14
mica	2	3	3	7
epidoto	5	6	2	2
escapolita	3	8	1	1
magnetita	23	6	5	12
Apatita	8	3	2	3
Piroxênio	0,4	0,3	0,3	1
Carbonatos	0,4	0,6	4	8
Outros	1	2	2	2
Distribuição de C e S nos minerais portadores				
Distribuição Cu na calcopirita (%)	99,4	98,5	95,9	100
Distribuição do S na calcopirita (%)	88,6	89,0	95,2	99,3
Características da liberação da calcopirita				
+0,21mm	33	27	54	79
-0,21+0,150 mm	52	40	75	84
-0,150 +0,074 mm	71	62	78	92
-0,074 +0,037 mm	86	85	92	94
-0,037 +0,020 mm	90	93	91	94
-0,020 +0,010 mm	92	96	97	93
Total +0,010 mm	75	65	74	85

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves F. 2008 Plano estratégico prevê investimentos de quase US\$ 60 bilhões. *Revista Brasil Mineral*. Maio 2008, **272**: 24-32.
- Augusto R.A., Monteiro L.V.S., Xavier R.P. e Souza Filho C.R. 2008. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geociências*. 38(2): 263-277
- Bergerman M., Delboni H., Nankran M. 2009. Estudo de variabilidade e otimização do circuito de moagem SAG da Usina do Sossego (Optimization of the Sossego SAG mill grinding circuit). REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(1): 93-97, jan. mar. 2009.
- Bish D.L. & Post J.E. (Eds) 1989. *Modern powder diffraction*. Mineralogical Society of America. Reviews in mineralogy, v. 20, 369 pp.
- Dardenne M.A., Schobbenhaus C.S. 2001. Metalogênese do Brasil. Editora Universidade de Brasília/CNPq, Brasília
- DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: SBG, Congr. Brás. Geol., 35, Anexo aos anais, pp 11–54, 1988.
- Fandrich R., Gu Y., Burrows D., Moeller K. 2007. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Int. J. Miner. Process.* **84**: 310–320
- Galarza T.M.A., Macambira M.J.B., Moura C.A.V. 2003. Geocronologia Pb–Pb e Sm–Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA) Simpósio de Geologia da Amazônia, 7, SBG [CD-ROM]
- Grainger C.J., Groves D.I., Tallarico F.H.B., Fletcher I.R., 2008. 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* 33 (2008) 451–489.
- Henley K.J. 1983. Ore dressing mineralogy - A review of techniques, applications and recent developments. *Spec. Publ. geol. Soc.S.Afr.*, 7(1983), 175-200.
- Jones M. 1987. *Applied Mineralogy, a quantitative approach*. Graham and Trotman, London, UK, 259p.
- Kahn H., D'Agostino L.Z., Brumattil M., Tassinari M.M.M.L., Uliana, D., Ulsen, C. 2008. Mineralogia quantitativa através de análise de imagens automatizada conjugada a MEV/EDS: Estudos de caso aplicados a minérios de fosfato e ouro. In: 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, PR. *Anais*, p. 669.
- Kahn H., Mano E.S., Tassinari M.M.M.L. 2002. Image analysis coupled with a SEM-EDS applied to the characterization of a partially weathered Zn-Pb ore. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v. 1, n.1, p 1-9.
- Lancaster, Oliveira, J., Fanton, J., Almeida, A.J., Leveille, R.A., Vieira, S., 2000. Discovery and geology of the Sossego copper–gold deposit, Carajás District, Pará State, Brazil. International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, IUGS, [CD-ROM].

- Macchiarola K., Koenig U., Gobbo L., Campbell I., McDonald A.M., Cirelli J. 2007. Modern X-ray Diffraction Techniques for Exploration and Analysis of Ore Bodies. In 7th Int. Conference on Mineral Exploration, Ottawa. Unpublished.
- 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
- 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., Xavier R.P., Hitzman M.W., Juliani C., Souza Filho C.R., Carvalho E.R. 2008a. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. Ore Geology Reviews 34, 317–336
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Johnson C.A., Carvalho E.R., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008b. 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 43, 129–159. doi:10.1007/s00126-006-0121-3.
- Neuman R., Schneider C.L., Neto A.A. 2004. Caracterização tecnológica de minérios. In: Luz A.B., Sampaio J.A., Almeida S.L.M. *Tratamento de Minérios*, 4^a edição-CETEM. pg: 55-109.
- Neves M.P. 2006. Estudos isotópicos (Pb-Pb, Sm-Nd, C e O) do depósito Cu-Au do Sossego, Província Mineral de Carajás. Dissertação de mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 104 p.
- Nogueira A.C.R. 1985. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará
- Petruc W. (Ed.) 1989. *Short course on image analysis applied to mineral and earth sciences*. Mineralogical association of Canadá, Ottawa, 268 pp.
- Petruc W. (Ed.) 2000. *Applied mineralogy in the mining industry*. Elsevier, Ottawa, Ontario, Canadá, 268 p.
- Pimentel M.M., Lindenmayer Z.G., Laux J.H., Armstrong R., Araújo J.C. 2003. Geochronology and Nd geochemistry of the Gameleira Cu– Au deposit, Serra dos Carajás, Brazil: 1.8–1.7 Ga hydrothermal alteration and mineralization. J South Am Earth Sci 15:803–813
- Pinheiro R.V.L., Holdsworth R.E. 2000. Evolução tectonoestratigráfica dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, Cinturão Itacaiúnas, na borde leste do Cratón Amazônico, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. 30 (4): 597-606.
- Reis R.L.G. 2004. Com Sossego, o Brasil entra na rota do cobre. *Revista Brasil Mineral*. Julho 2004, 230: 38-45.
- Revista Minérios & Minerales, Edição 308, sexta-feira - 15-08-2008 - 13:41:14 - Matéria do site - http://www.minerios.com.br/index.php?id_materia=939.
- Sant'Agostino L.M., Kahn H. 1997. Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI/069, 29p.
- Sutherland D.N., Gottlieb P. 1991. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. *Minerals Engineering*, v. 4, n.7-11, p.:753-762.

ANEXOS

ANEXO 1 – RELAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

ANEXO 2 – ASPECTO GERAL DAS AMOSTRAS RECEBIDAS

ANEXO 3 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

ANEXO 4 – COMPARATIVO ENTRE DIFRATOGRAMAS DOS AGRUPAMENTOS

ANEXO 5 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

ANEXO 6 – ASSOCIAÇÕES DE CALCOPIRITA (MLA)

ANEXO 7 – FOTOGRAFIAS AO MICROSCÓPIO DE LUZ REFLETIDA

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;

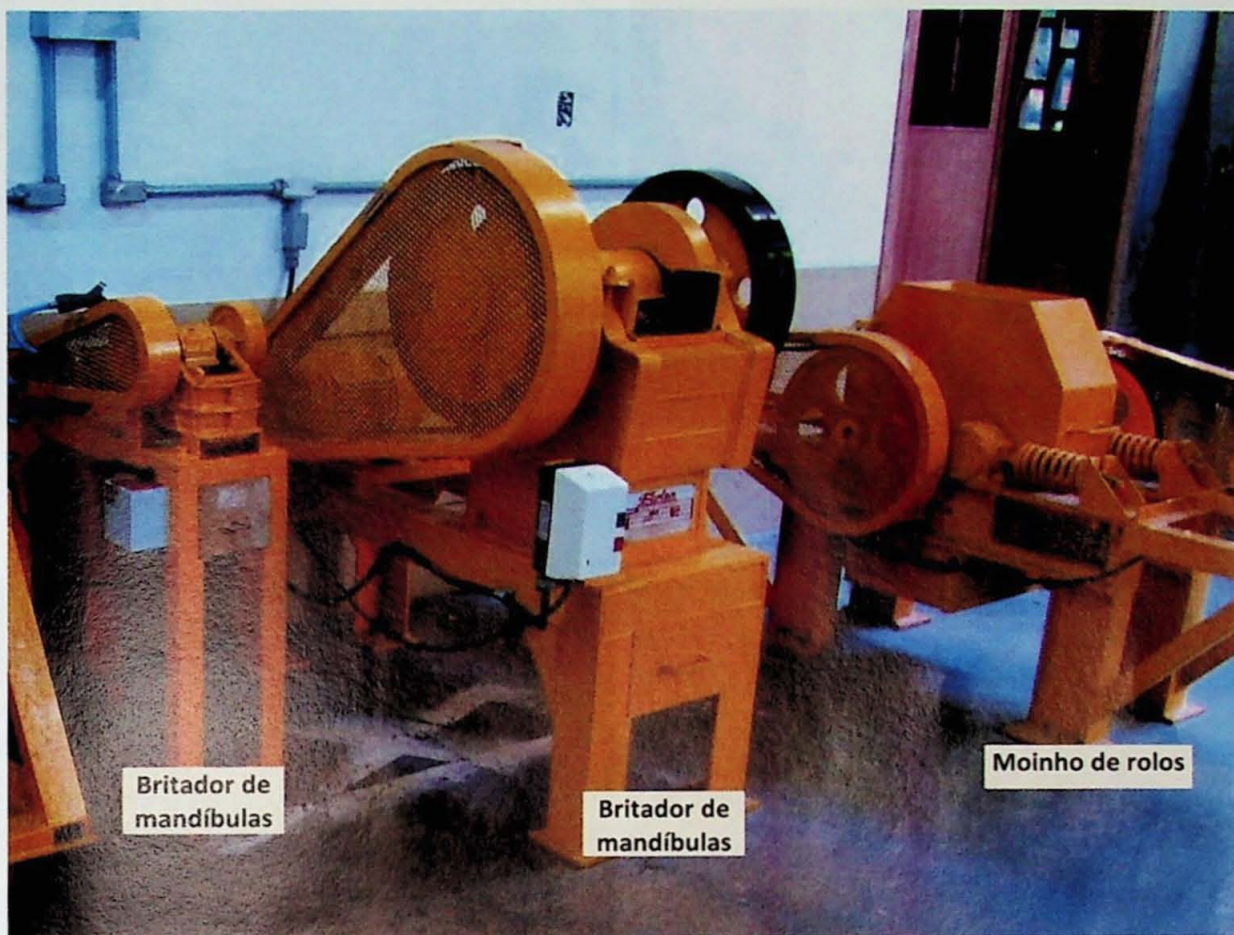
Litologia: ACT actinolítico, MAG magnetítico, GRA granito, GBA gabro, GRF granófiro, MVA meta vulcânica ácida, BHT brecha heterolítica, BSE brecha sulfetada sequeirinho, BSO brecha sulfetada sossego, BIX biotita xisto

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

ANEXO 2 - ASPECTO GERAL DAS AMOSTRAS RECEBIDAS



ANEXO 3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS



Britadores de mandíbulas e moinho de rolos



Moinho de discos
(preparação DRX)



Moinho de bolas
(pulverização para DRX)

ANEXO 3 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS



Prensagem manual de amostra para análise por DRX



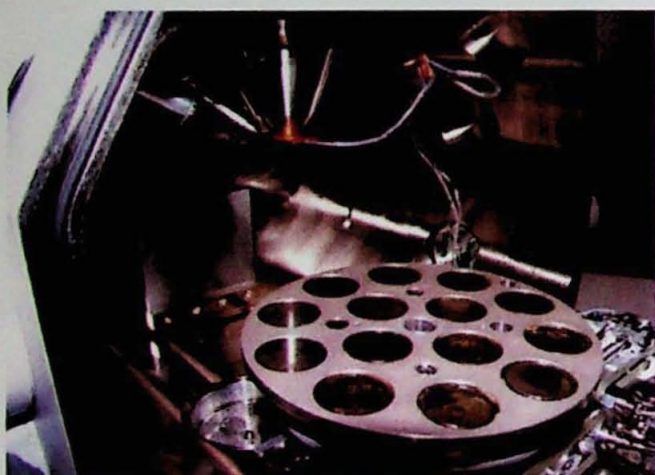
Difratômetro de raios X - X'Pert MPD, marca PANalytical



Moinho de bolas



Amostrador rotativo – Microscal MSR



Microscópio eletrônico de varredura

Quanta 600 FEG, FEI

Cluster 1

8060 002 204 000
8060 003 269 070
8060 003 269 069
8060 003 300 010
8060 003 250 002
8060 007 267 097
8060 008 228 046
8060 117 256 096
8060 117 257 077
8060 177 276 090
8060 256 370 062
8060 316 382 059
8060 316 388 090
8060 316 393 079
8060 316 393 090
8060 376 267 071

Cluster 2

8060 256 260 071
8060 226 267 069
8060 232 256 075

Cluster 3

8060 001 137 147
8060 001 147 152
8060 001 150 167
8060 010 130 140
8060 030 094 102
8060 030 106 118
8060 030 127 137
8060 030 137 146
8060 030 240 250
8060 053 121 131
8060 070 144 154
8060 110 154 162
8060 110 165 175
8060 110 175 185
8060 140 243 253
8060 140 253 263
8060 140 300 310
8060 140 310 320
8060 140 320 330
8060 140 330 340
8060 140 340 350
8060 140 350 360
8060 140 360 370
8060 140 370 380
8060 140 380 390
8060 140 390 400

Cluster 4

8060 010 137 147
8060 040 200 210
8060 053 200 210
8060 130 251 261
8060 270 180 190
8060 280 090 100
8060 280 100 110
8060 280 110 120
8060 280 120 130
8060 280 130 140
8060 280 140 150
8060 280 150 160
8060 280 160 170
8060 280 170 180
8060 280 180 190
8060 280 190 200
8060 280 200 210
8060 280 210 220
8060 280 220 230
8060 280 230 240
8060 280 240 250
8060 280 250 260
8060 280 260 270
8060 280 270 280
8060 280 280 290
8060 280 290 300
8060 280 300 310
8060 280 310 320
8060 280 320 330
8060 280 330 340
8060 280 340 350
8060 280 350 360
8060 280 360 370
8060 280 370 380
8060 280 380 390
8060 280 390 400

Cluster 5

8060 010 137 147
8060 010 140 150
8060 010 150 160
8060 010 160 170
8060 010 170 180
8060 010 180 190
8060 010 190 200
8060 010 200 210
8060 010 210 220
8060 010 220 230
8060 010 230 240
8060 010 240 250
8060 010 250 260
8060 010 260 270
8060 010 270 280
8060 010 280 290
8060 010 290 300
8060 010 300 310
8060 010 310 320
8060 010 320 330
8060 010 330 340
8060 010 340 350
8060 010 350 360
8060 010 360 370
8060 010 370 380
8060 010 380 390
8060 010 390 400

Cluster 6

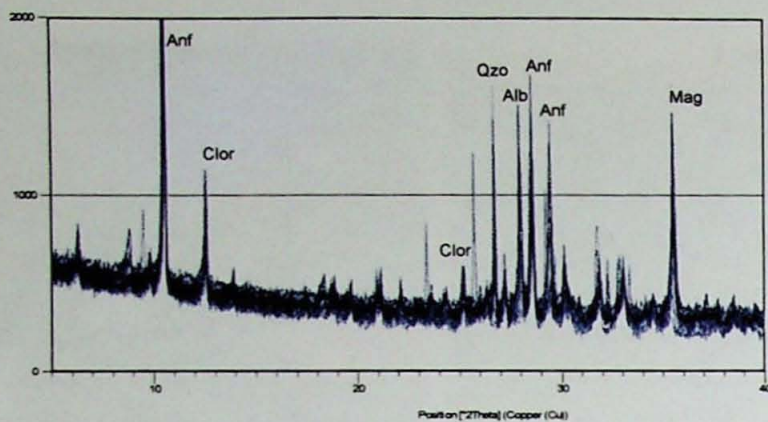
8060 010 137 147
8060 040 200 210
8060 053 200 210
8060 130 251 261
8060 270 180 190
8060 280 090 100
8060 280 100 110
8060 280 110 120
8060 280 120 130
8060 280 130 140
8060 280 140 150
8060 280 150 160
8060 280 160 170
8060 280 170 180
8060 280 180 190
8060 280 190 200
8060 280 200 210
8060 280 210 220
8060 280 220 230
8060 280 230 240
8060 280 240 250
8060 280 250 260
8060 280 260 270
8060 280 270 280
8060 280 280 290
8060 280 290 300
8060 280 300 310
8060 280 310 320
8060 280 320 330
8060 280 330 340
8060 280 340 350
8060 280 350 360
8060 280 360 370
8060 280 370 380
8060 280 380 390
8060 280 390 400

Cluster 7

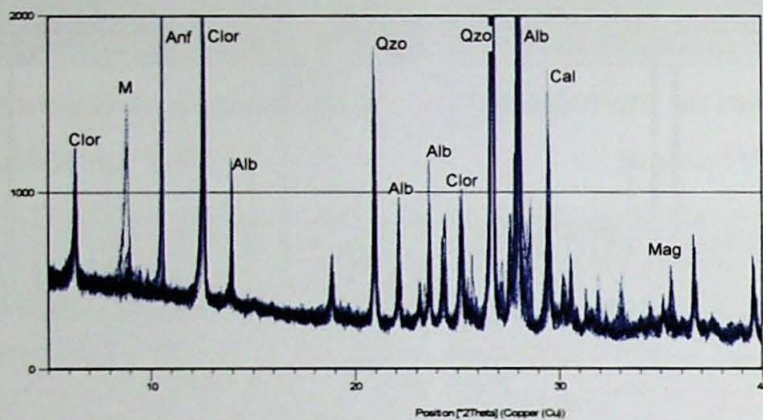
8060 010 137 147
8060 010 140 150
8060 010 150 160
8060 010 160 170
8060 010 170 180
8060 010 180 190
8060 010 190 200
8060 010 200 210
8060 010 210 220
8060 010 220 230
8060 010 230 240
8060 010 240 250
8060 010 250 260
8060 010 260 270
8060 010 270 280
8060 010 280 290
8060 010 290 300
8060 010 300 310
8060 010 310 320
8060 010 320 330
8060 010 330 340
8060 010 340 350
8060 010 350 360
8060 010 360 370
8060 010 370 380
8060 010 380 390
8060 010 390 400

Comparativo entre os difratogramas de 7 grupos.

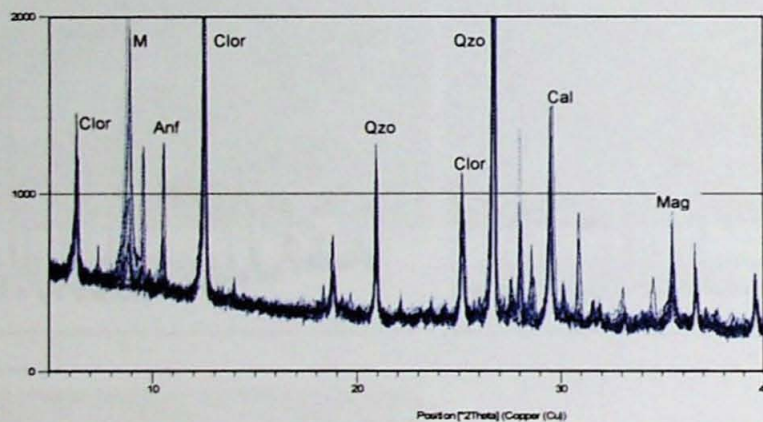
ANEXO 4 - COMPARATIVO ENTRE OS DIFRATOGRAMAS DOS AGRUPAMENTOS



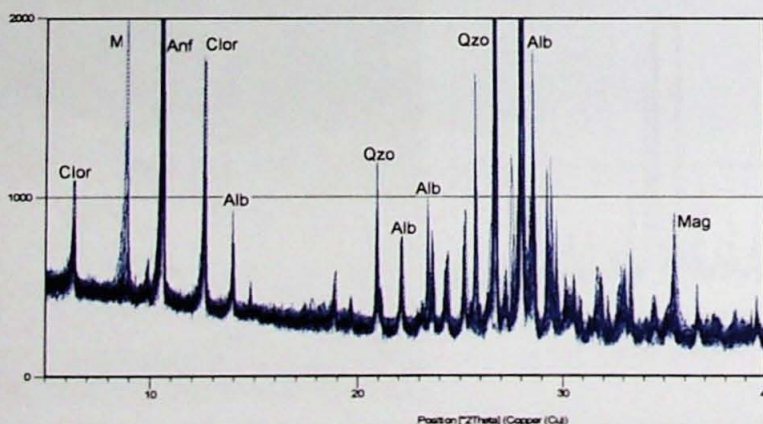
Cluster A



Cluster B



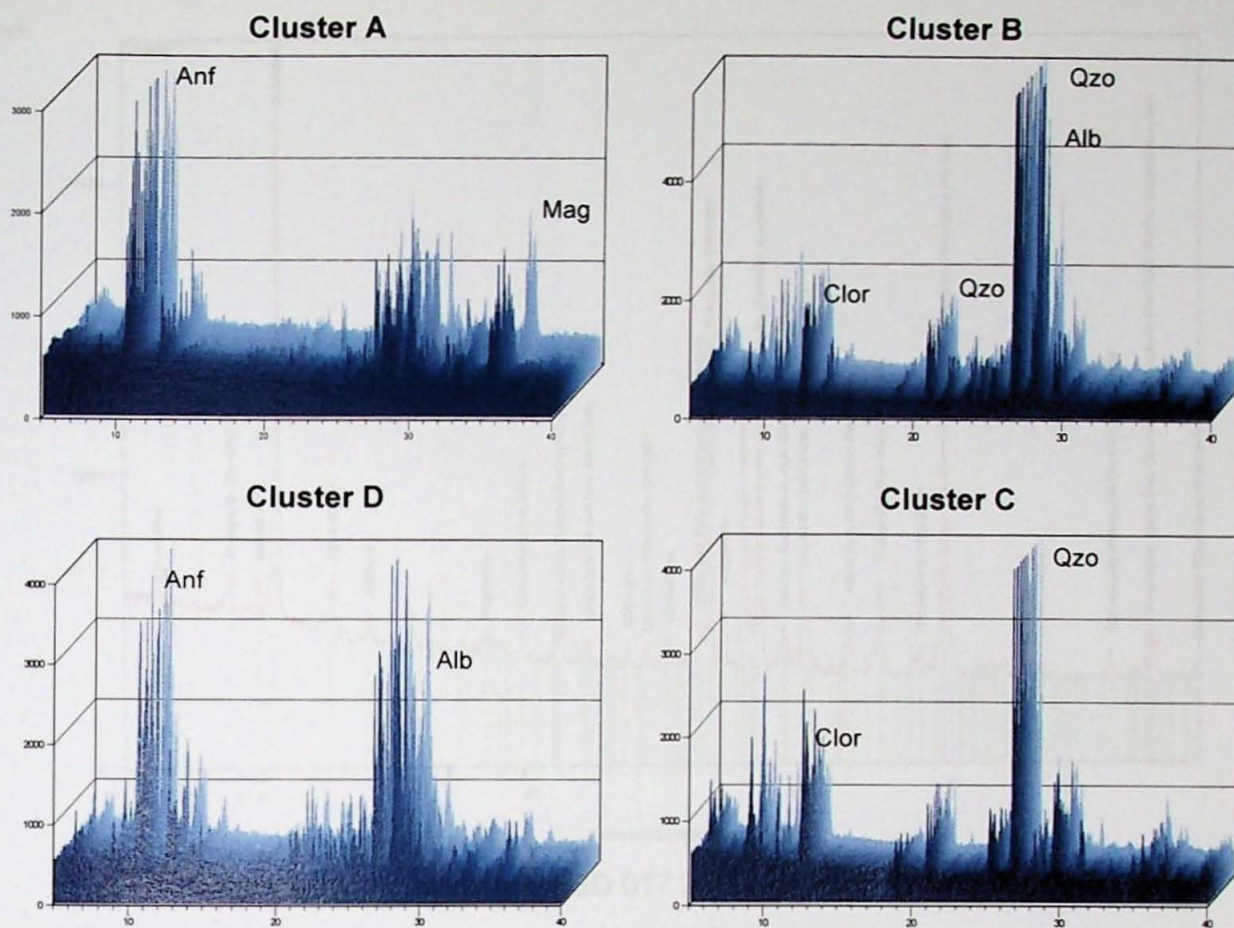
Cluster C



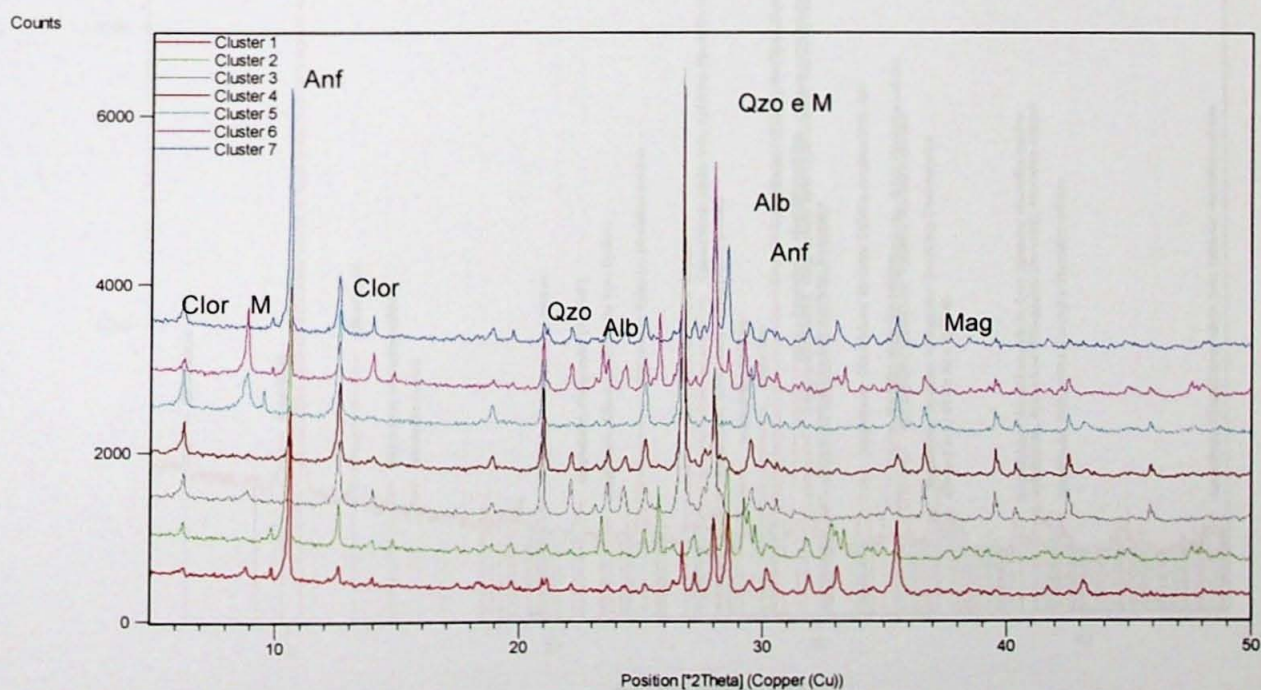
Cluster D

Comparativo entre os difratogramas de 4 grupos.

ANEXO 4 - COMPARATIVO ENTRE OS DIFRATOGRAMAS DOS AGRUPAMENTOS

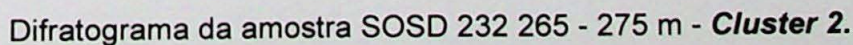
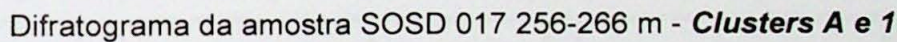


Comparativo entre os difratogramas de 4 grupos (3D)



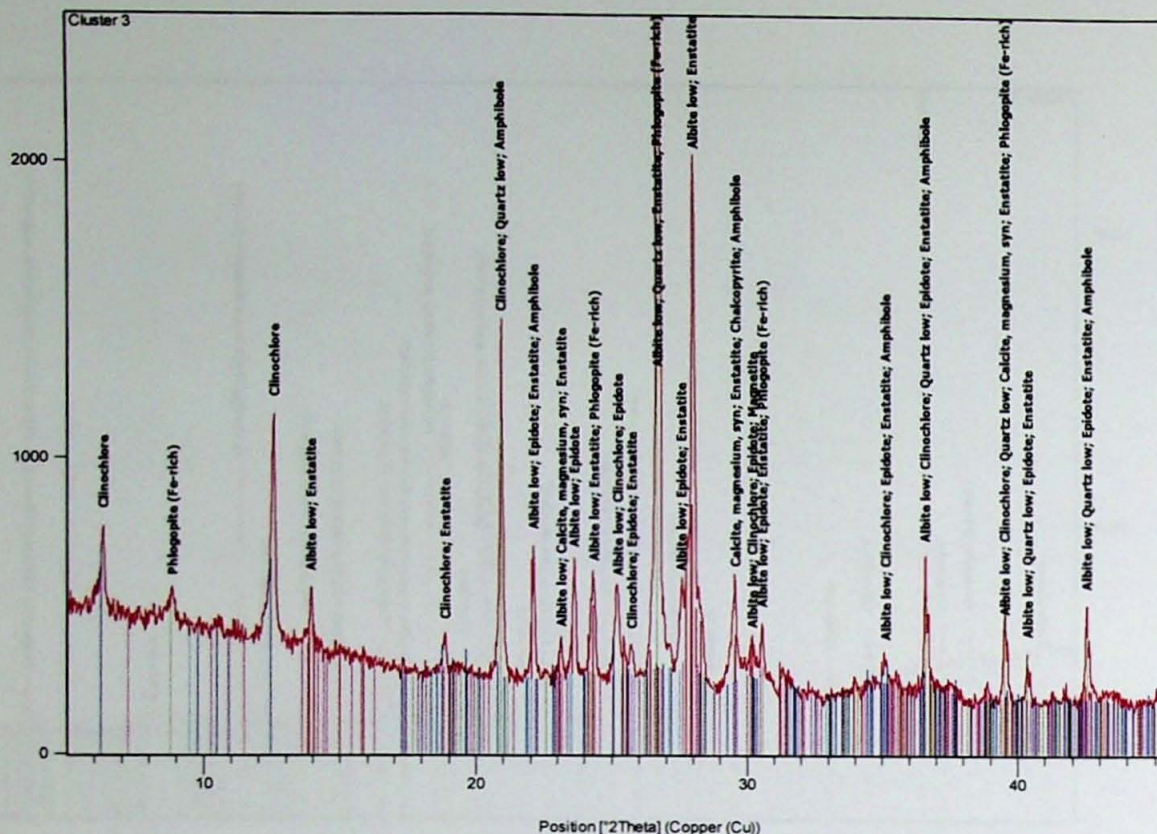
Comparação entre difratogramas representativos de cada agrupamento – 7 grupo

ounts



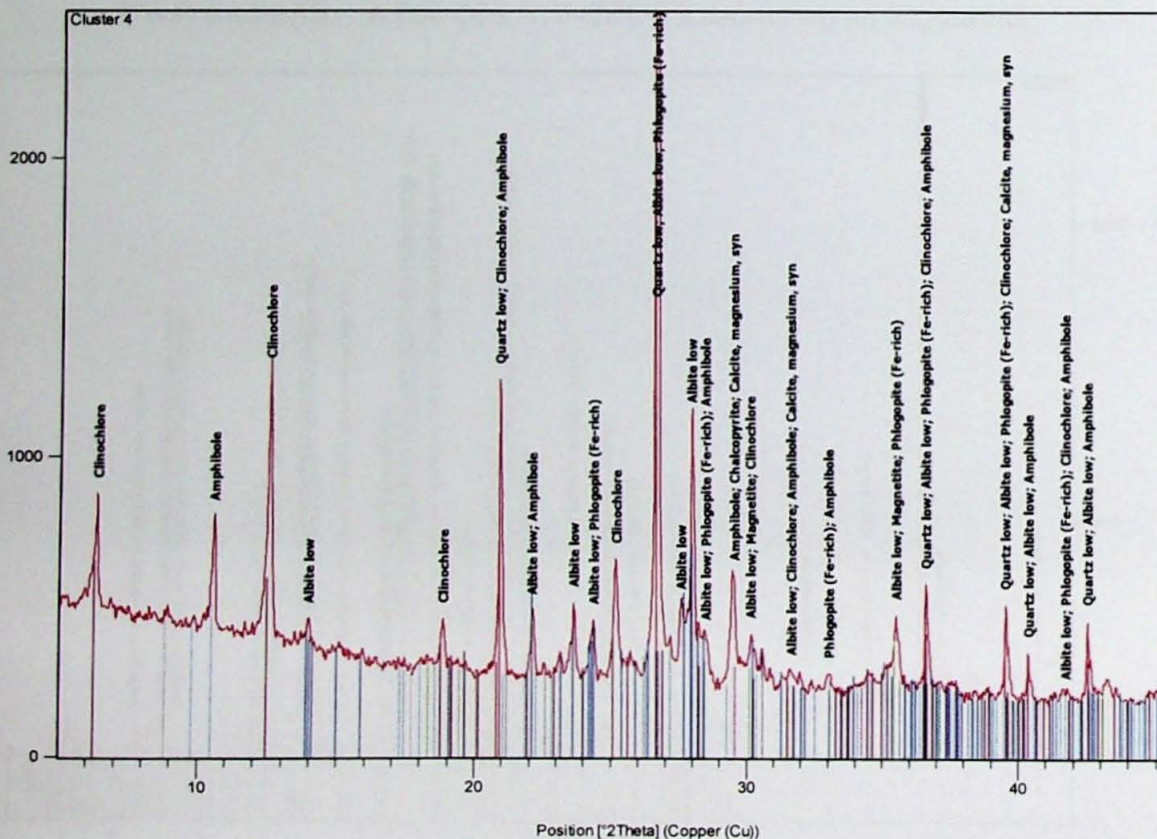
ANEXO 5 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

counts



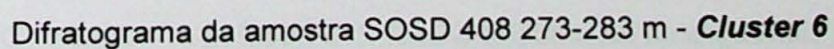
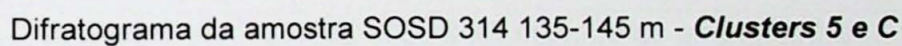
Difratograma da amostra SOSD 020 137-145 m - **Cluster 3**.

counts



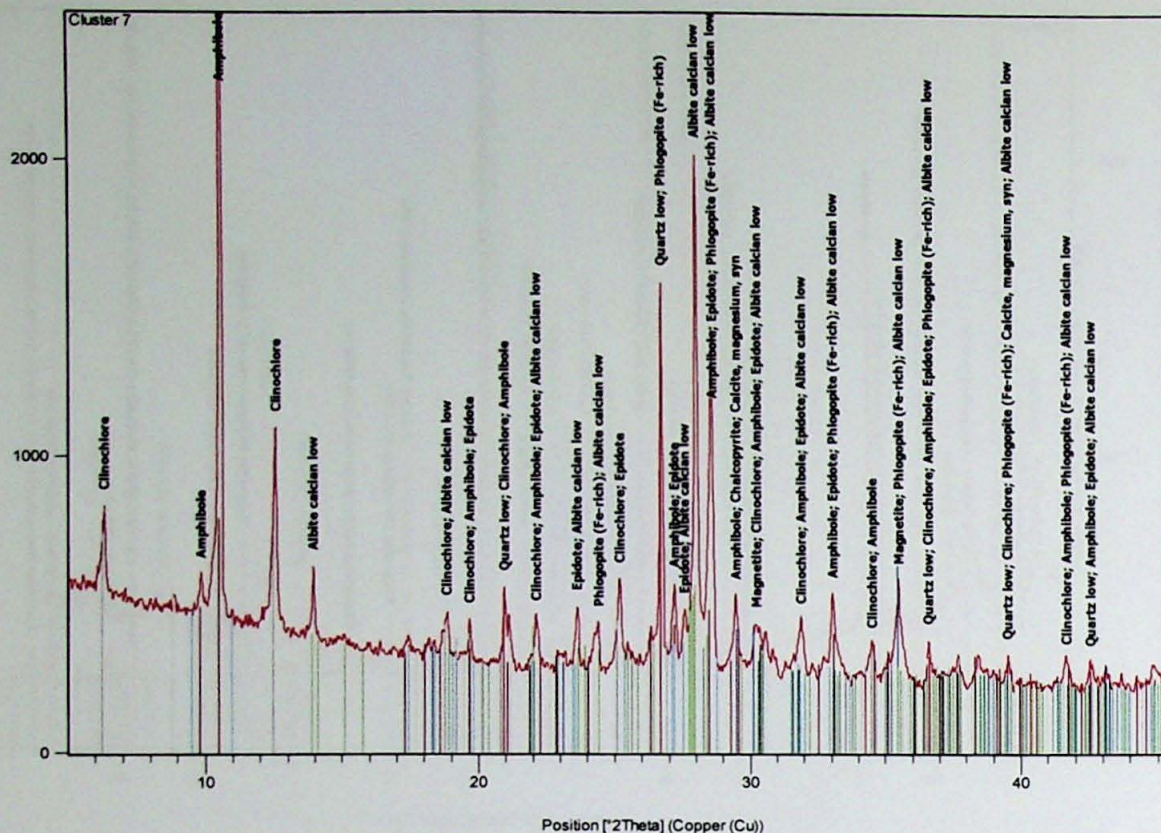
Difratograma da amostra SOSD 302 119-127 m - **Clusters B e 4**

counts



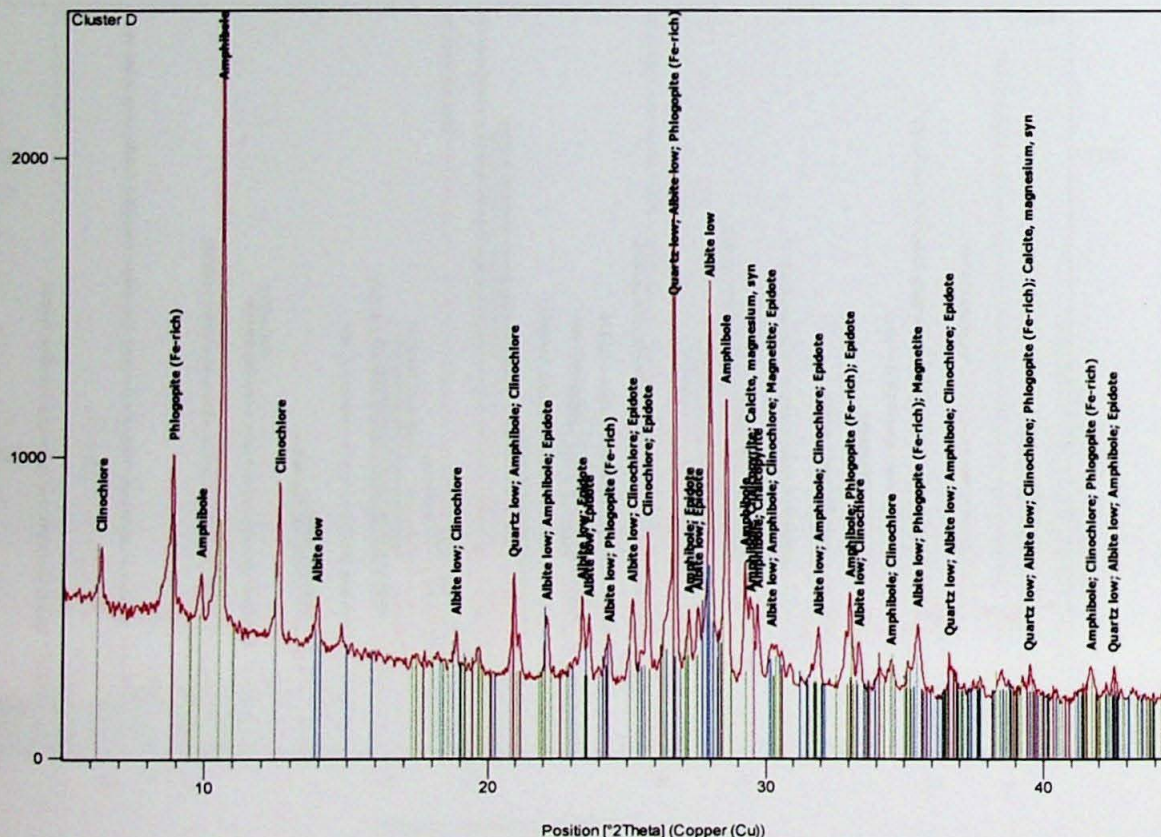
ANEXO 5 – DIFRATOGRAMAS DAS AMOSTRAS MAIS REPRESENTATIVAS DE CADA GRUPO

units



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

units



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

ANEXO 6 - ASSOCIAÇÕES DA CALCOPIRITA

Cluster A

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista	
+0,21	33	26		41		67		100	
-0,21+0,150	52	20		27		48		100	
-0,150 +0,074	71	15		14		29		100	
-0,074 +0,037	86	10		4		14		100	
-0,037 +0,020	90	8		1		10		100	
-0,020 +0,010	92	7		1		8		100	
Total +0,010	75	13		12		25		100	

Associação da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	anfíbolio	apatita	clorita	mag.	pirita	epidoto	plagioc.	outros*	Total
+0,21	6	6	3	2	5	1	1	2	26
-0,21+0,150	5	5	4	2	2	2	0	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	0	1	10
-0,037 +0,020	1	1	2	2	0	0	0	1	8
-0,020 +0,010	3	1	1	1	0	0	0	1	7
Total +0,010	3	3	2	2	1	1	0	1	13

Associação da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	anfíbolio	apatita	clorita	mag.	pirita	epidoto	plagioc.	outros*	Total
+0,21	9	6	3	1	4	4	4	7	41
-0,21+0,150	7	4	2	1	4	3	3	4	27
-0,150 +0,074	3	2	2	0	2	1	1	3	14
-0,074 +0,037	1	0,3	0,4	0	1	1	0,2	1	4
-0,037 +0,020	0,3	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	1
-0,020 +0,010	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	1
Total +0,010	3	2	1	0,3	1	1	1	2	12

Cluster B

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista	
+0,21	54	16		30		46		100	
-0,21+0,150	75	13		12		25		100	
-0,150 +0,074	78	14		8		22		100	
-0,074 +0,037	92	7		1		8		100	
-0,037 +0,020	91	8		1		9		100	
-0,020 +0,010	97	3		0		3		100	
Total +0,010	74	13		12		26		100	

Associação da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	quartzo	apatita	mag.	plagioc.	carb.	k-felds	outros*	Total
+0,21	4	4	1	0,2	2	2	1	2	16
-0,21+0,150	4	4	0	2	1	0	0	1	13
-0,150 +0,074	6	2	1	2	1	1	0	1	14
-0,074 +0,037	2	1	0,1	2	0	1	1	0,4	7
-0,037 +0,020	3	0	1	1	0	0	1	2	8
-0,020 +0,010	0	0	0	0	0	0	1	1	3
Total +0,010	3	2	2	2	1	1	0,4	3	13

Associação da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita	quartzo	apatita	mag.	plagioc.	carb.	k-felds	outros*	Total
+0,21	5	6	4	1	4	1	3	7	30
-0,21+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	0,2	0,2	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2	1
-0,037 +0,020	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1
-0,020 +0,010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0
Total +0,010	2	1	2	1	2	0	1	4	12

ANEXO 6 - ASSOCIAÇÕES DA CALCOPIRITA

Cluster C

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista	
+0,21	79	13		8		21		100	
-0,21+0,150	84	10		7		16		100	
-0,150 +0,074	92	6		2		8		100	
-0,074 +0,037	94	5		1		6		100	
-0,037 +0,020	94	6		0		6		100	
-0,020 +0,010	93	6		1		7		100	
						0			
Total +0,010	85	9		6		15		100	

Associação da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	mag.	clorita	px.	carb.	qtz	anf.	apat.	outros*	Total
+0,21	3	2	4	1	2	0,1	0,4	3	13
-0,21+0,150	2	1	3	2	1	0,1	1	2	10
-0,150 +0,074	2	1	1	1	0,4	0,1	0,0	2	6
-0,074 +0,037	1	2	1	0,2	1	0	0,0	1	5
-0,037 +0,020	1	2	1	0,0	1	1	0,0	1	6
-0,020 +0,010	1	1	0,0	2	0,3	0,0	0,0	1	6
Total +0,010	2	2	1	1	1	1	1	2	9

Associação da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	mag.	clorita	px.	carb.	qtz	anf.	apat.	outros*	Total
+0,21	2	1	0	1	2	0	1	1	8
-0,21+0,150	1	1	0	2	2	1	0	1	7
-0,150 +0,074	0,3	0,2	0,1	0,1	1	0,0	0,0	0,5	2
-0,074 +0,037	0,0	0,2	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,2	1
-0,037 +0,020	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0
-0,020 +0,010	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	1
Total +0,010	1	1	0	0	1	1	1	2	6

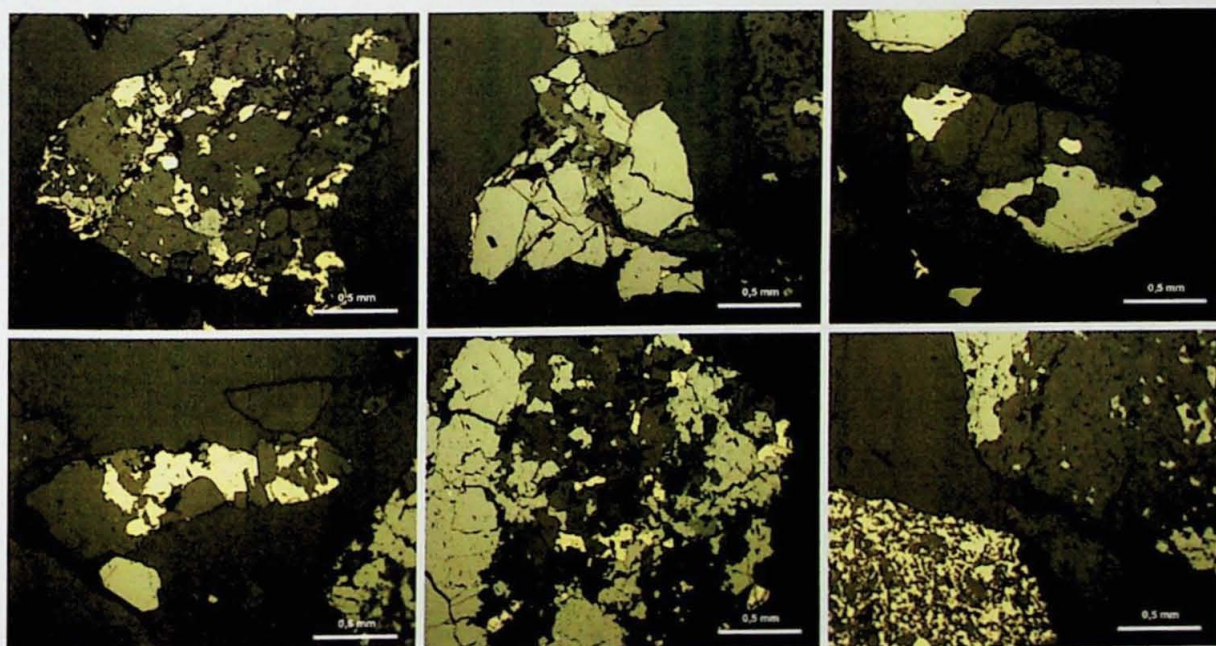
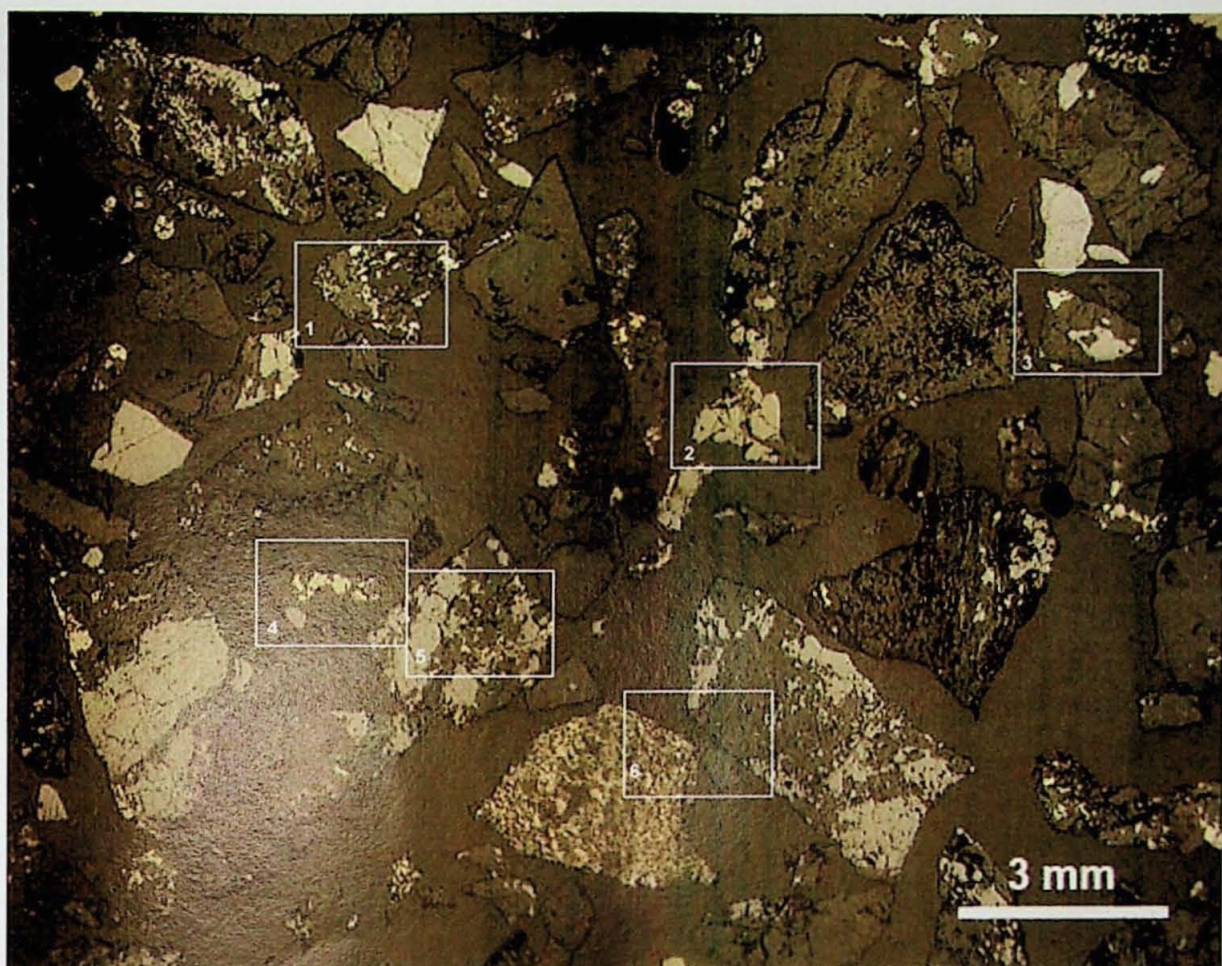
Cluster D

Sumário da distribuição da calcopirita (% em massa)									
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista	
+0,21	27	24		50		73		100	
-0,21+0,150	40	27		32		60		100	
-0,150 +0,074	62	20		18		38		100	
-0,074 +0,037	85	11		4		15		100	
-0,037 +0,020	93	6		1		7		100	
-0,020 +0,010	96	3		1		4		100	
Total +0,010	65	17		18		35		100	

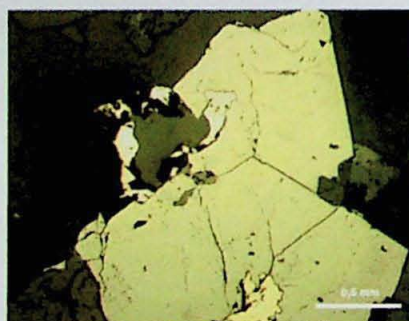
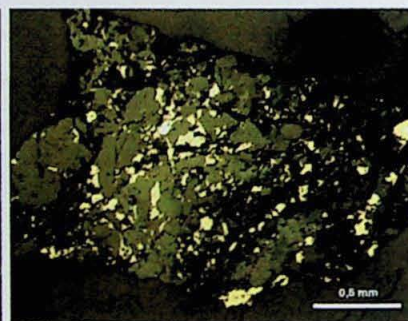
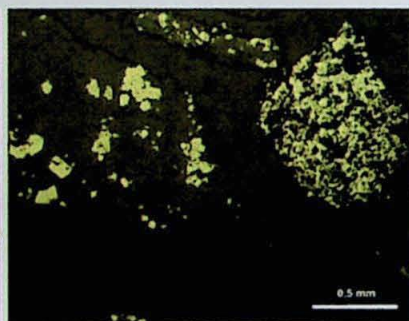
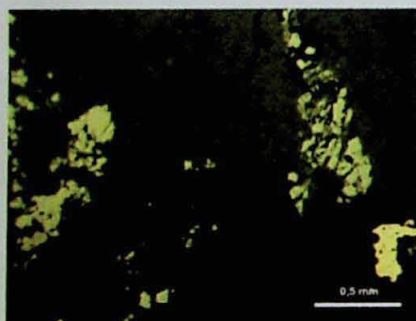
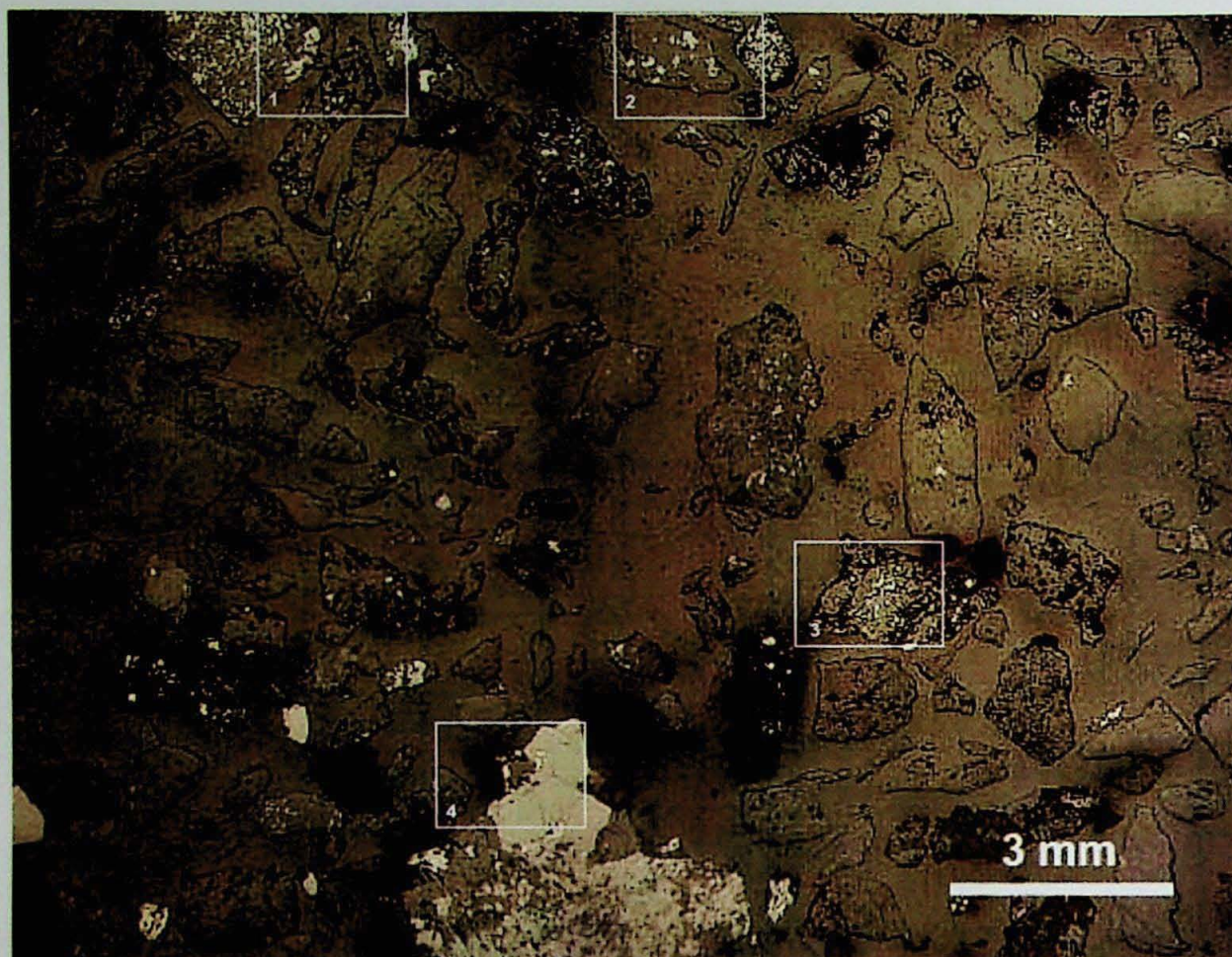
Associação da calcopirita em partículas binárias (% em massa)									
Fração (mm)	clorita.	anf.	plg.	apat.	qtz	pirita	epidoto	outros*	Total
+0,21	3	4	4	3	2	1	3	4	24
-0,21+0,150	7	4	7	1	1	1	1	4	27
-0,150 +0,074	4	3	2	4	1	4	1	2	20
-0,074 +0,037	3	2	1	2	0,3	0,4	0,2	1	11
-0,037 +0,020	1	1	1	0,1	0,1	0,0	1	2	6
-0,020 +0,010	1	0,2	1	0,1	0,3	0,0	0,0	1	3
Total +0,010	3	3	2	2	1	2	1	2	17

Associação da calcopirita em partículas ternárias (% em massa)									
Fração (mm)	mag.	clorita	px.	carb.	qtz	anf.	apat.	outros*	Total
+0,21	6	8	13	4	5	0	6	8	50
-0,21+0,150	4	7	7	3	3	0	3	7	32
-0,150 +0,074	1	3	3	1	3	1	1	6	18
-0,074 +0,037	1	1	1	0,4	0,2	0,0	0,4	1	4
-0,037 +0,020	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,2	0,5	1
-0,020 +0,010	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	1
Total +0,010	2	3	3	2	2	0	2	4	18

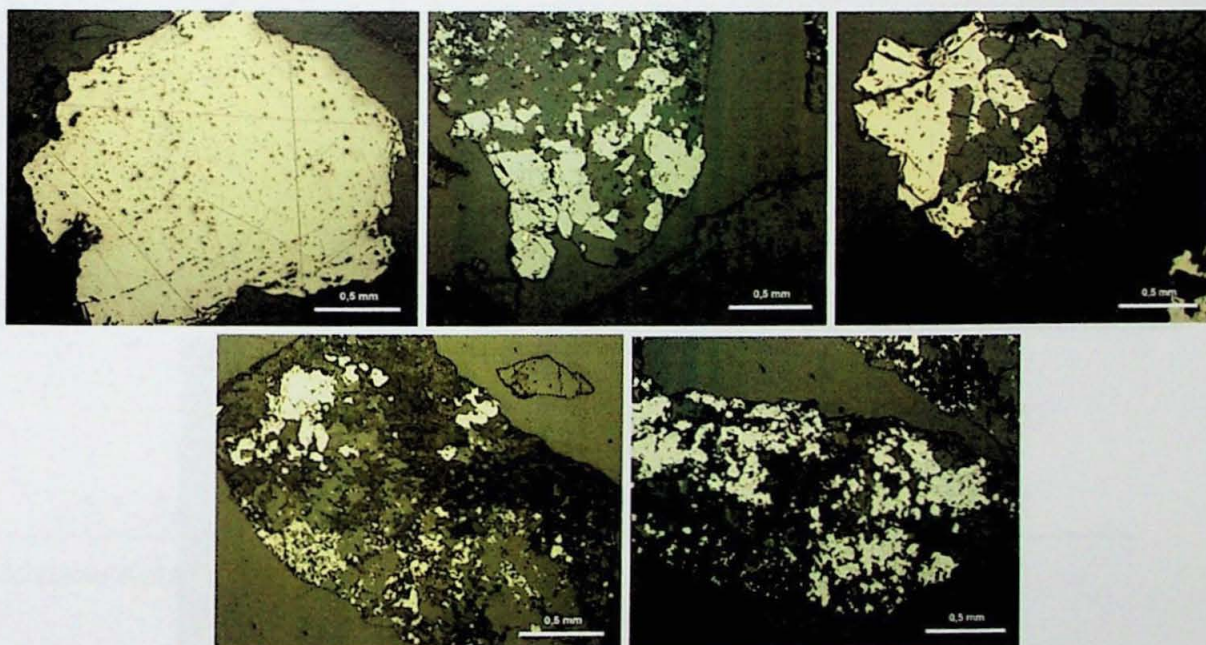
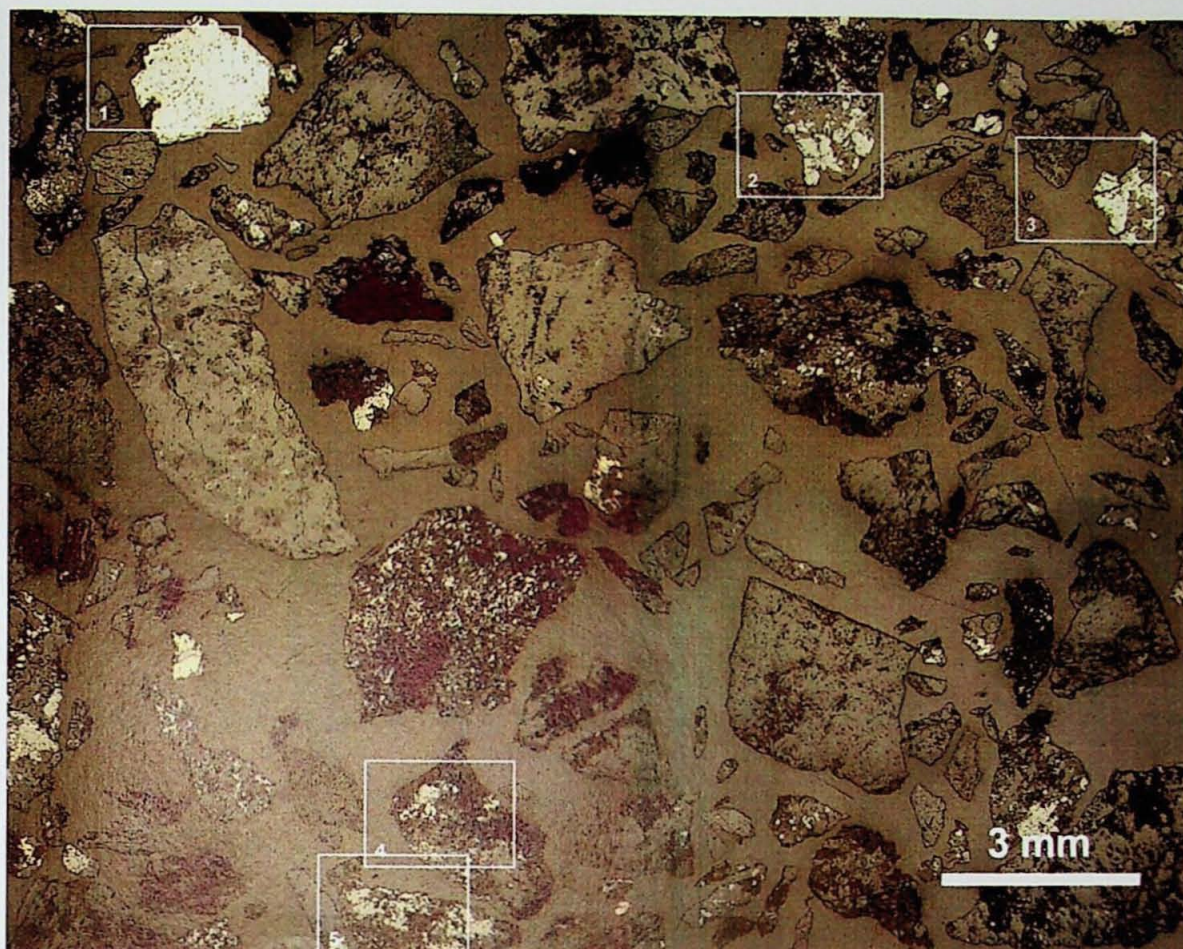
Cluster A



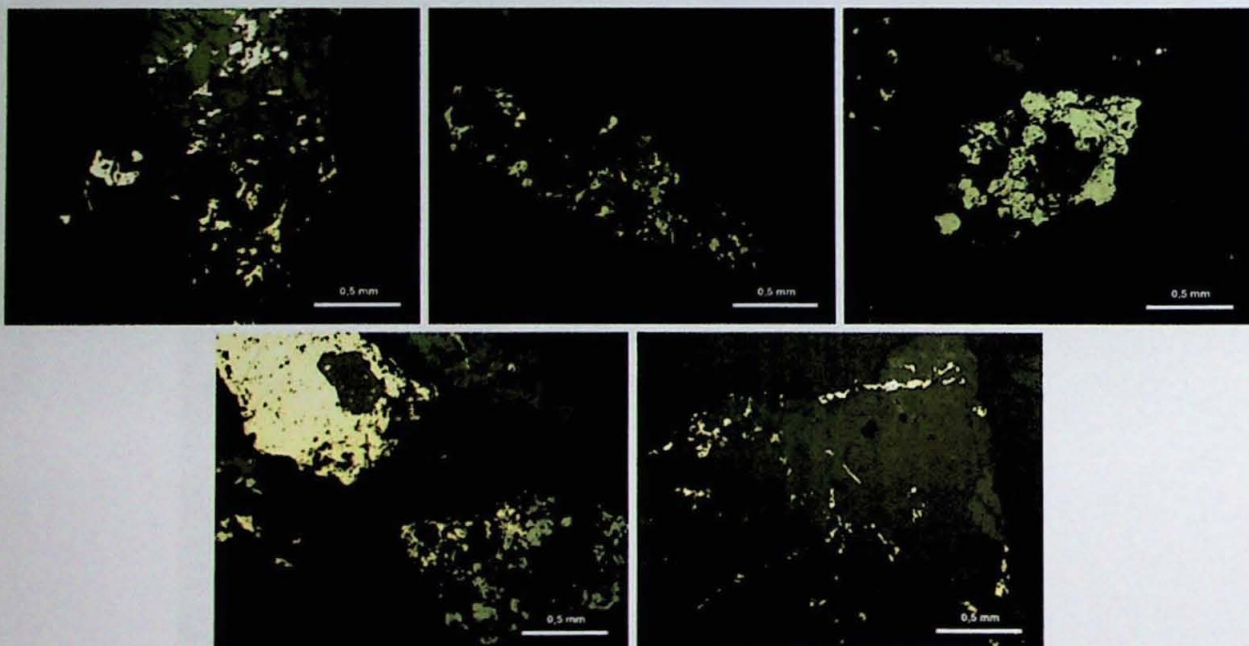
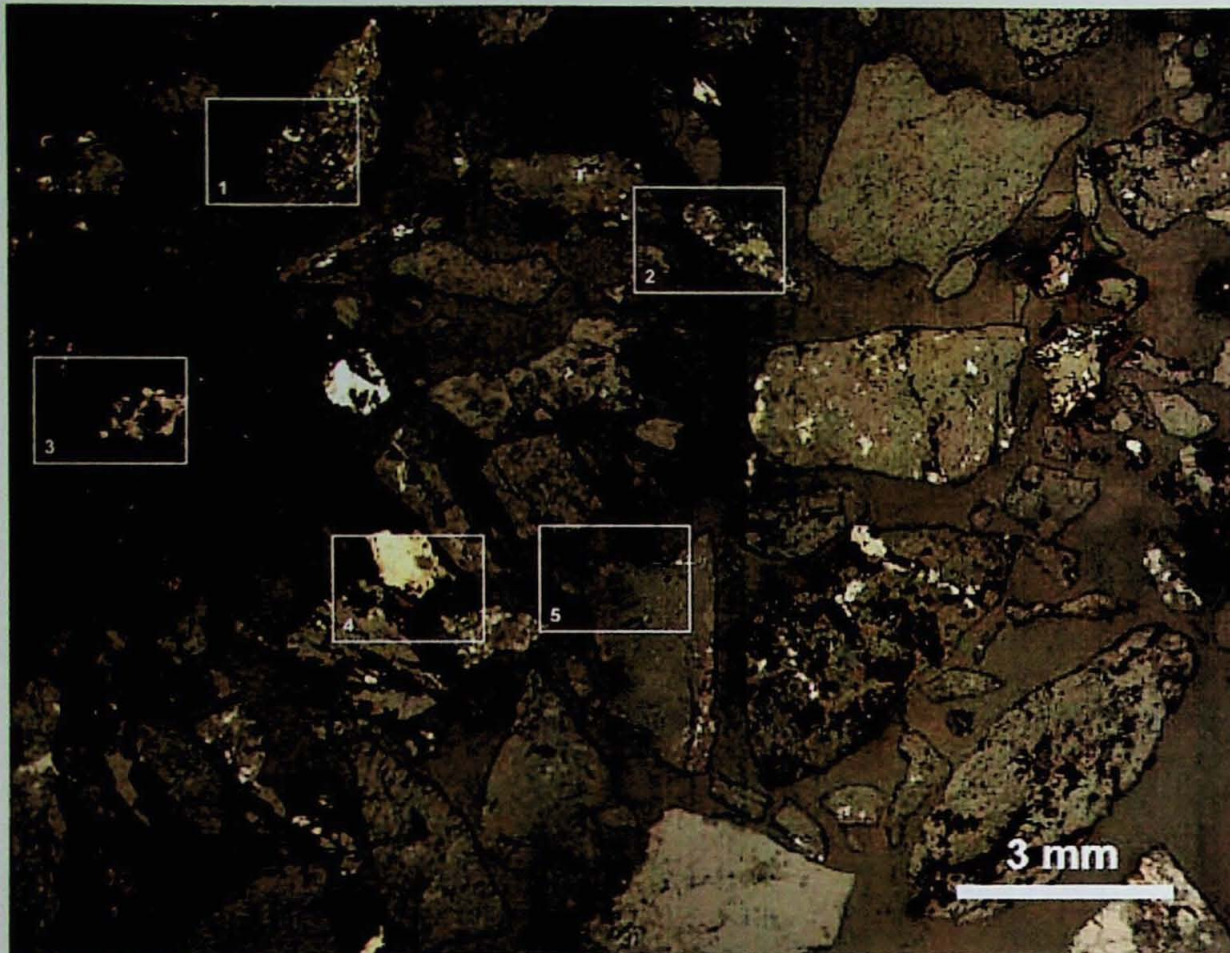
Cluster B



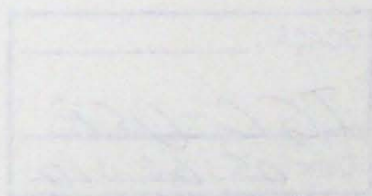
Cluster C



Cluster D



De acordo,



VK Shimizu

Viviane Kotani Shimizu
(Aluna)

H Kahn

Henrique Kahn
(Professor Doutor)

DOAÇÃO

IGC-USP

Data: 05/02/10

