



Instituto de Geociências



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia

LORENA DE FREITAS ROSSAS NOVAES

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO CONCENTRADO DE  
COBRE DA MINA DO SOSSEGO-PA**

**GEOCIÊNCIAS**  
**U F P A**

BELÉM – PARÁ  
2016

LORENA DE FREITAS ROSSAS NOVAES

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO CONCENTRADO DE  
COBRE DA MINA DO SOSSEGO-PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), como requisito de cumprimento às exigências para obtenção do grau de Geóloga - Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Joel Buenano Macambira

BELÉM-PARÁ  
2016

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

---

Novaes, Lorena de Freitas Rossas 1985-  
Caracterização tecnológica do concentrado de cobre da mina do Sossego  
-PA / Lorena de Freitas Rossas Novaes. – 2016.  
87 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Joel Buenano Macambira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2016.

1. Minérios de cobre – Canaã dos Carajás (PA). 2. Minérios –  
Canaã dos Carajás (PA). 3. Pesquisa Mineralógica. I. Título.

---

CDD 22 ed.: 553.43098115

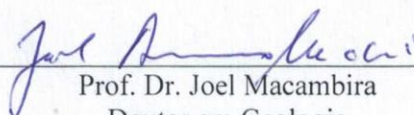
Lorena de Freitas Rossas Novaes

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO CONCENTRADO DE  
COBRE DA MINA DO SOSSEGO-PA**

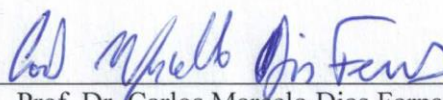
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da  
Universidade Federal do Pará (UFPA), como requisito  
de cumprimento às exigências para obtenção do grau de  
Geóloga - Bacharel em Geologia.

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

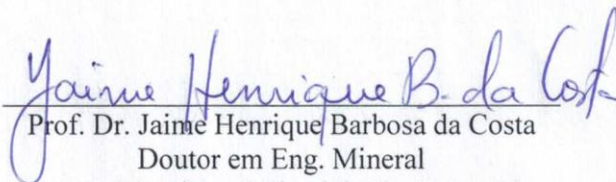
Conceito: \_\_\_\_\_



Prof. Dr. Joel Macambira  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Carlos Marcelo Dias Fernandes  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Jaime Henrique Barbosa da Costa  
Doutor em Eng. Mineral  
Instituto Federal do Pará

*Quero dedicar este trabalho aos meus pais, irmãos e esposo!  
Com muito carinho... Raimundo Novaes, Júlia Rodrigues,  
Thiago Novaes (In memorian), Frederico Neto, Felipe Novaes e  
Ubiratan Lima.*

## AGRADECIMENTOS

- Primeiramente quero agradecer ao meu Deus por conceder-me vida e saúde para realizar este trabalho, força, coragem e capacitação nos momentos mais difíceis que vivenciei durante este período.
- A minha família e ao meu esposo por todo apoio, paciência e confiança em mim depositados, e por terem testemunhado todo o meu esforço e empenho no decorrer dos anos de faculdade e no desenvolvimento para a produção deste trabalho.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Joel Buenano Macambira, por toda a atenção, paciência e compreensão despendidos, orientando-me sempre de maneira clara e objetiva para executar este trabalho desafiador da melhor forma possível.
- A empresa Vale, por ter cedido o material de trabalho para esta linha de pesquisa, no que se refere ao concentrado do minério de cobre.
- Aos professores José Bandeira, José Augusto, Rômulo Simões e Cândido Moura por permitirem o meu acesso aos laboratórios dos quais necessitei utilizar, como: laboratório de Sedimentologia, Análises químicas, difração de raios-x e o Pará-Iso.
- Aos técnicos de laboratório que ajudaram-me na execução das diversas etapas de trabalho, como: o seu Lopes do Laboratório de Sedimentologia, Joelma da laminação, seu Natalino de Análises químicas, Fredisson do Pará-Iso, Bruna e Emanuely da difração de raios-X, André Pinto do Laboratório de Análises Clínicas do (ICB) e a bibliotecária Lúcia Imbiriba.
- Aos meus amigos de graduação e colegas de profissão que sempre apoiaram-me e ajudaram-me de alguma forma: Maciel Martins, Alyson Nogueira, Deivid Teixeira, Celso Tonetti, Walmir Lima, Walnei Silva, Alex Nina e Francinaldo Sindeaux, em especial minhas estimadas amigas Letícia Briglia e Jamilly Trindade pela amizade cultivada.
- Enfim, agradeço a todos que de algum modo colaboraram e acompanharam a evolução deste trabalho ao longo desta jornada.

*O mundo não é dos espertos. É das pessoas honestas e verdadeiras. A esperteza um dia é descoberta e vira vergonha. A honestidade se transforma em exemplo para as próximas gerações. Uma corrompe a vida; a outra enobrece a alma. (Chico Xavier).*

## RESUMO

A produção de cobre no Brasil tem avançado atualmente, principalmente graças aos esforços da Vale que responde pelo maior volume de produção de concentrado, com isto, o cobre passou a ter peso importante no valor da produção mineral brasileira, situando-se em terceiro lugar, assim como na balança comercial do país. A Vale em 2014, foi responsável pelo maior volume de produção, das quais 98 mil toneladas foram obtidas a partir da exploração da mina do Salobo e 110 mil t na mina do Sossego, daí a relevância para a realização deste estudo. Neste trabalho é apresentado o estudo de caracterização tecnológica do concentrado de cobre produzido pela mina do Sossego (VALE), localizada no sudeste do Pará, no município de Canaã dos Carajás. A jazida está localizada numa zona de cisalhamento regional de atitude WNW-ESE/75°SSW que põe em contato rochas gnáissicas do Complexo Xingu, para sul, com rochas supracrustais do Grupo Grão Pará, para norte. A mineralização compreende um estágio tardio do sistema hidrotermal e é representada por calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), que é acompanhada em menores quantidades por pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e siegenita ( $(\text{Ni},\text{Co})_3\text{S}_4$ ). Mais raramente, ocorrem pirrotita ( $\text{FeS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), ouro nativo ( $\text{Au}$ ) entre outros, na forma de pequenas inclusões na calcopirita. A pesquisa objetivou investigar e determinar algumas propriedades físicas do concentrado de cobre, possibilitando o fornecimento de novas informações tecnológicas para adequar suas condições de manuseio, transporte e beneficiamento. Os parâmetros determinados foram: potencial hidrogeniônico, umidade, composição granulométrica, densidade, a presença de minerais magnéticos, composição mineral por difração de raio-X e a análise minerográfica. A pesquisa mostrou que a água em contato com o concentrado de cobre apresentou pH ácido de 2,82, devido ao período em que a amostra ficou armazenada, 18 meses. A umidade registrada foi de 9%, com granulometria muito fina, de fração predominante ( $< 0,062$  mm) e peso de (95%). A densidade real do concentrado foi de  $4,22\text{g}/\text{cm}^3$ , com teor de magnetita de 0,37%, sua composição mineralógica identificada por DRX foi: calcopirita, clorita, anfibólio, K-feldspato, talco, albita e quartzo, além de sua composição minerográfica ser constituída por calcopirita em até 90%.

Palavras-chave: Caracterização Tecnológica. Concentrado de Cobre. Mina do Sossego (PA).

## ABSTRACT

Copper production in Brazil has advanced today, mainly thanks to Vale's efforts to respond to the higher volume of concentrate production, thus, copper began to have an important weight in the value of Brazilian mineral production, standing third, as well as the country's trade balance. Vale in 2014, accounted for the bulk of production, of which 98 thousand tons were obtained from the exploitation of Salobo mine and 110 000 t in the Sossego mine, hence the relevance to this study. This paper presents the technological characterization study of copper concentrate produced by Sossego mine (VALE), located in the southeast of Pará, in the Carajás Canaan municipality. The deposit is located in a regional shear zone WNW-ESE attitude / 75°SSW that puts in contact gneissic rocks of the Xingu Complex, to south and supracrustals of the Grão Pará Group, to the north. The mineralization comprises a late stage of hydrothermal system and is represented by chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ), which is accompanied by minor amounts of pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) and siegenita ( $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{S}_4$ ). More rarely, occur pyrrhotite ( $\text{FeS}$ ), sphalerite ( $\text{ZnS}$ ), native gold ( $\text{Au}$ ), among others, in the form of small inclusions in chalcopyrite. The research aimed to investigate and determine some physical properties of the copper concentrate, enabling the provision of new technological information to suit its conditions of handling, transport and processing. The parameters determined were hydrogenionic potential, humidity, granulometric composition, density, the presence of magnetic minerals, mineral composition by X-ray diffraction and minerographic analysis. Research has shown that water in contact with the copper concentrate showed pH 2.82 acid, due to the period in which the sample was stored 18 months. The registered humidity was 9%, with very fine grain size, predominant fraction ( $<0.062$  mm) and weight (95%). The real density of the concentrate was  $4,22\text{g/cm}^3$ , with magnetite content of 0.37%, its mineralogical composition identified by XRD was, chalcopyrite, chlorite, amphibole, K-feldspar, talc, albite and quartz, as well as its minerográfica composition consists of chalcopyrite up to 90%.

Keywords: Technological Characterization. Concentrate of Copper. Sossego Mine (PA)

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 2- Corte esquemático de uma célula de flotação.....	21
Figura 3 - Mapa geológico simplificado de parte da Província Carajás.....	29
Figura 4 - Visão panorâmica da mina do Sossego. Em A, tem-se uma visão geral da mina; em B, observa-se a barragem de rejeito; em C, tem-se a cava do Sossego e em D a cava Sequeirinho. ....	30
Figura 5 - Mapa geológico simplificado do depósito Sossego.....	31
Figura 6 - Circuito de beneficiamento do minério de cobre.....	35
Figura 7- Fluxograma das análises de laboratório.....	40
Figura 8 - Eletrodo de vidro. ....	41
Figura 9 - pHmetro utilizado para análise do pH. ....	42
Figura 10 - Conjunto de peneiras utilizado para a separação granulométrica.....	43
Figura 11 - Conjunto de vidrarias utilizado durante a etapa da determinação da densidade. Em A, tem-se uma proveta, em B, uma bureta e em C, balões volumétricos, Erlenmeyer, Becker e bastão de vidro. ....	46
Figura 12 - Isodynamic Frantz, utilizado para fazer a separação magnética do concentrado. .	48
Figura 13 - Difratorômetro de raio-X, utilizado na identificação dos minerais presentes na amostra. ....	50
Figura 14 - Seções polidas produzidas para descrição de minerais opacos. Em A e B tem-se minerais não magnéticos e em C minerais de natureza fracamente magnética. ....	51
Figura 15 - Microscópio óptico de luz refletida, utilizado para descrever as seções polidas...	52
Figura 16- Gráfico mostrando a distribuição granulométrica do concentrado.....	56

Figura 17 - Cpy - Calcopirita, Clh - clorita, Am- Anfibólio (hornblenda?), Kfs - k-feldspato, Tlc - talco, Ab - albita, e Qtz - quartzo. ....	63
Figura 18 - Em A, tem-se a amostra observada a partir de lupa binocular, em B, dá-se ênfase para as frequentes inclusões de calcopirita nos fragmentos de quartzo.....	64
Figura 19 - Aspecto geral da seção polida pertencente a fração < 0,062 mm, não magnética.	65
Figura 20 – Em A, tem-se uma visão ampla da seção polida de fração < 0,062 mm, fracamente magnética. Em B, dá-se ênfase para o aglomerado formado possivelmente pela granulometria ser extremamente fina. ....	66
Figura 21 - Seção polida de fração > 0,062 mm, não magnéticos. Em A, tem-se inúmeros fragmentos de calcopirita (Cpy), e em B, destaca-se um fragmento de pirrotita (Po) com intercrescimento de calcopirita. ....	67
Figura 22: Seção polida de fração > 0,062 mm, não magnéticos. Em A, observa-se fragmentos de calcopirita (Cpy), com inclusão de hematita (Hem). Em B, destaca-se tal inclusão. ....	68
Figura 23 - Seção polida de fração < 0,062 mm (fundo), fracamente magnética. Em A, observa-se fragmentos de calcopirita (Cpy), e bornita (Bn). Em B, destaca-se tal fragmento apresentando oxidação.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais minerais para a obtenção de cobre .....	20
Tabela 2 - Reserva e produção mundial. ....	23
Tabela 3 - Principais estatísticas- Brasil.....	25
Tabela 4 - Cronograma de implantação do Projeto Sossego. ....	32
Tabela 5 - Composição mineralógica do minério processado na usina do Sossego.....	33
Tabela 6 - Equipamentos utilizados para lavra.....	34
Tabela 7 - Valores típicos dos produtos da etapa rougher.....	37
Tabela 8 - Valores típicos dos produtos da etapa cleaner.....	38
Tabela 9 - Valores típicos dos produtos da etapa scavenger. ....	38
Tabela 10 - Dosagens típicas de reagentes na flotação do Sossego. ....	38
Tabela 11- Classificação conforme faixa de campo e suscetibilidade magnética.....	47
Tabela 12 - Valores obtidos com a análise do pH. ....	53
Tabela 13 - Resultados da etapa de peneiramento em peso e percentagem. ....	55
Tabela 14- Análise granulométrica de concentrados, pertencentes a cava Sequeirinho.. ....	56
Tabela 15 - Resultados dos valores de densidade.....	59
Tabela 16 - Resultado das frações granulométricas após a separação magnética. ....	60
Tabela 17- Resultados obtidos durante as etapas de análise .....	73

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Localização</b> .....	17
<b>2</b>	<b>GENERALIDADES SOBRE O COBRE</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Exploração</b> .....	20
<b>2.2</b>	<b>Beneficiamento e Metalurgia</b> .....	21
<b>2.3</b>	<b>Mercado do Cobre</b> .....	22
2.3.1	Contexto Mundial .....	22
2.3.2	Produção Nacional .....	23
2.3.3	Importação.....	24
2.3.4	Exportação.....	24
<b>3</b>	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	26
<b>3.1</b>	<b>Província Mineral de Carajás</b> .....	26
<b>4</b>	<b>MINA DO SOSSEGO</b> .....	30
<b>4.1</b>	<b>Geologia do Depósito</b> .....	30
<b>4.2</b>	<b>Aspectos Históricos</b> .....	32
<b>4.3</b>	<b>Lavra</b> .....	33
<b>4.4</b>	<b>Circuito de Beneficiamento</b> .....	34
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	40
<b>5.1</b>	<b>Potencial hidrogeniônico (pH)</b> .....	40

<b>5.2</b>	<b>Umidade</b> .....	42
<b>5.3</b>	<b>Análise Granulométrica</b> .....	43
<b>5.4</b>	<b>Determinação da Densidade</b> .....	45
<b>5.5</b>	<b>Determinação dos Minerais Magnéticos</b> .....	46
<b>5.6</b>	<b>Determinação da Composição Mineral por Difração de Raios - X</b> .....	48
<b>5.7</b>	<b>Análise Minerográfica das Frações Granulométricas</b> .....	50
5.7.1	Descrição e Proporção dos Minerais.....	51
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES DOS RESULTADOS</b> .....	53
<b>6.1</b>	<b>Determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH)</b> .....	53
<b>6.2</b>	<b>Determinação da Umidade</b> .....	54
<b>6.3</b>	<b>Determinação da Composição Granulométrica</b> .....	54
<b>6.4</b>	<b>Determinação da Densidade</b> .....	56
6.4.1	Densidade Úmida .....	57
6.4.2	Densidade Aparente .....	57
6.4.3	Densidade Real.....	58
<b>6.5</b>	<b>Determinação dos Minerais Magnéticos</b> .....	59
<b>6.6</b>	<b>Determinação da Composição Mineralógica por Difração de Raios -X</b> .....	61
<b>6.7</b>	<b>Descrição do Concentrado de Cobre</b> .....	64
6.7.1	Descrição da Amostra Através de Lupa Binocular .....	64
6.7.2	Descrição Minerográfica das Seções Polidas.....	65
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	70

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE A - Descrições das Frações Granulométricas.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE B - Descrição após a Separação Magnética.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto da Geologia Econômica, o estudo da caracterização tecnológica de materiais como minério, concentrado, rejeito, estéril, entre outros, é de grande relevância para a mineração, pois são feitos estudos e pesquisas minuciosas acerca destes materiais, objetivando-se melhorar o nível de conhecimento dos recursos minerais em exploração, visando a maximização de seu aproveitamento, bem como o desenvolvimento de novos produtos e subprodutos. A caracterização tecnológica para fins de atividades de lavra, desmonte e manuseio do material desmontado, trata essencialmente do levantamento de parâmetros geomecânicos e geotécnicos, tendo em vista as tecnologias de processamento usualmente adotadas, daí a necessidade de conhecer as características de manejo do material. (SANT'AGOSTINO, 1996).

Na caracterização tecnológica para fins de beneficiamento são realizados estudos que levam ao conhecimento das características físicas (granulometria, densidade, porosidade, etc.) e também mineralógicas (minerais que constituem o material em análise), como por exemplo, a assembléia mineralógica que determina quais são os minerais de interesse e de ganga (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2000). Além disso, estuda as texturas da rocha, definindo o tamanho de partícula necessário para liberação dos minerais de interesse em relação àqueles de ganga, e ainda investiga propriedades físicas e químicas destes minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento. (NEUMANN; SCHENEIDER; ALCOVER NETO, 2004).

É de fundamental importância o papel da caracterização tecnológica em concentrados e rejeitos, pois visa fornecer subsídios para melhor desempenho dos mesmos. Tais situações propiciam o aprofundamento do desenvolvimento tecnológico, buscando melhor adequação às especificações da indústria de transformação, no caso do concentrado, e no que tange ao reaproveitamento do rejeito seja na fabricação de vidros, plásticos, ou na revegetação, preenchimento de cavas etc. (SANT'AGOSTINO, 1996).

O Brasil é um país exportador de concentrado de cobre e ocupa a 6ª posição em reserva mundial desse minério. No ano de 2014 o concentrado atingiu, em média, um preço de US\$ 2.105/t, com uma produção de cerca de 301,2 t o que corresponde a 1,6% da produção mundial atualmente. (RIBEIRO, 2015).

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho objetiva caracterizar o concentrado de cobre beneficiado pela mina do Sossego-Pa, para conhecer suas características físicas e mineralógicas, visando a obtenção de maiores informações geológicas e tecnológicas acerca deste material, e desta forma obter dados como: potencial hidrogeniônico (pH), umidade, composição granulométrica, densidade, presença de minerais magnéticos, identificação de minerais através de difração de raios-X e análise minerográfica. Além disso, garantir o aprendizado e a consolidação do conhecimento sobre o assunto por parte da autora.

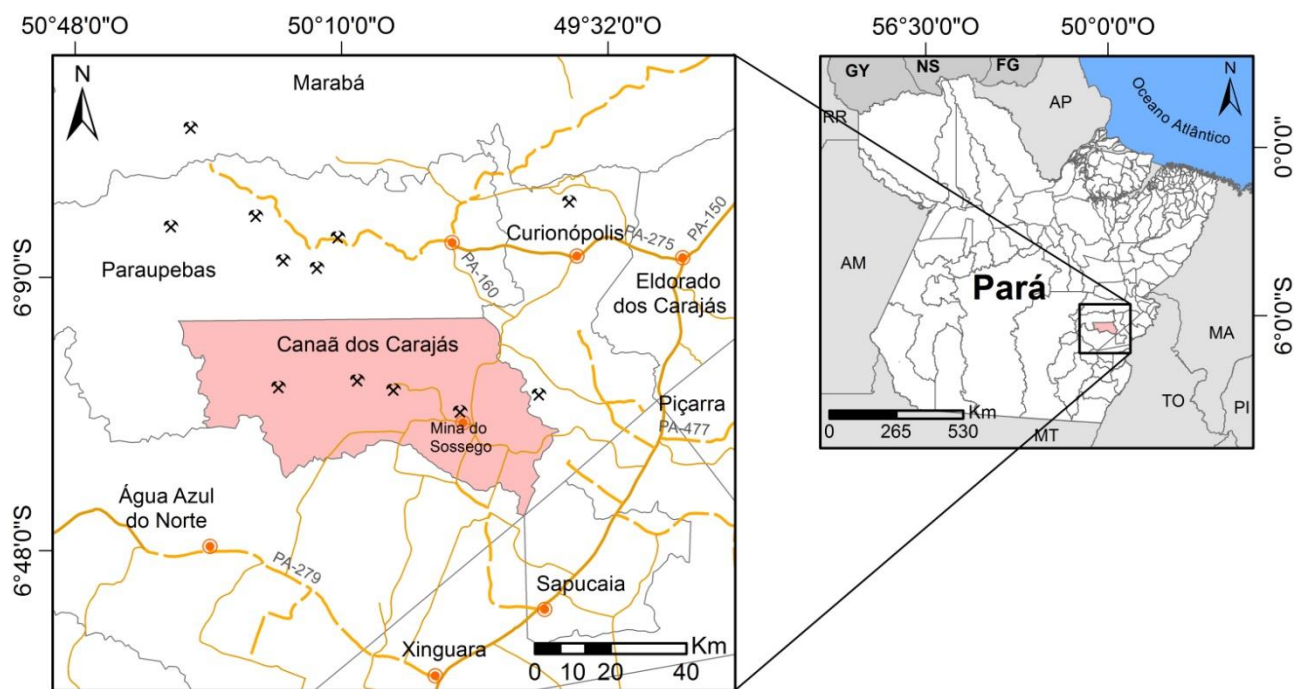
## 1.2 Localização

O material estudado, concentrado de cobre, é oriundo da mina do Sossego que está localizada na PMC (Província Mineral de Carajás), no município de Canaã dos Carajás sudeste do Pará, 550 km a sudoeste de Belém aproximadamente. A mina de cobre do Sossego faz parte dos depósitos pertencentes à (Companhia Vale S/A-VALE), e está situada na serra sul da PMC. Como mostra a Figura 1.

O acesso pode ser feito pela rodovia PA-150 que interliga Belém a Marabá seguindo até Eldorado dos Carajás. Após isso, o trajeto é feito pela PA-275 até Parauapebas, prosseguindo-se pela PA-160 até a cidade de Canaã dos Carajás. A viagem também pode ser feita por via aérea, com vôos comerciais regulares para Marabá e Parauapebas.

Canaã dos Carajás localiza-se a uma latitude  $06^{\circ}29'49''$  S e a uma longitude  $49^{\circ}52'42''$  O, estando a uma altitude de 210 metros acima do nível do mar. Sua população estimada em 2015 foi de 33.632 habitantes e uma área de  $3.146,407 \text{ km}^2$ . O clima é Tropical úmido com inverno seco, tipo Aw classificação segundo Köppen (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), com variação anual da temperatura média de  $25^{\circ}$  a  $26^{\circ}\text{C}$  (máxima de  $31^{\circ}$  a  $32^{\circ}\text{C}$ , e mínima de  $20^{\circ}$  a  $21^{\circ}\text{C}$ ). O período mais chuvoso é de novembro a abril, com 100 a 150 dias de chuva, e precipitação anual de 1750 a 2250 mm (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE, 2016).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

**Legenda**

● Cidades

✕ Minas

**Estradas**

--- Não Pavimentada

— Pavimentada

— Sem Toponímia

□ Municípios do Pará

■ Município Canaã dos Carajás

□ Estados do Brasil

■ Países da América Latina

Sistema de Coordenadas Geográficas: SIRGAS 2000

Fonte: Adaptado do Google Maps (2016).

## 2 GENERALIDADES SOBRE O COBRE

O nome cobre deriva do termo “*aes cyprum*” - minério de Chypre (Chipre)-, mais tarde conhecido como “*cuprum*”, palavra latina que deu origem ao símbolo químico Cu. O cobre é um dos metais de utilização mais antigo da civilização mundial, com datação de seus primeiros usos desde 8.000 anos a.C.. Na história da humanidade registrou uma época denominada “Idade do Bronze”, liga formada de cobre (90%) e estanho (10%), ressaltando sua importância. O domínio de posse e tecnologia do cobre representava nos povos da antiguidade a riqueza e o poder. (RIBEIRO, 2001).

Na atualidade, o cobre mantém sua relevância para o homem, graças às suas características que lhe conferem diversidade de aplicações no desenvolvimento tecnológico industrial, como por exemplo, na indústria elétrica e eletrônica, engenharia industrial, construção civil, indústria automobilística, naval, aeronáutica e ferroviária. Além destes, outros usos do cobre também incluem a cunhagem de moedas, a fabricação de armas e munições, a indústria alimentícia, farmacêutica e química, embalagens, bebidas, galvanização, cerâmica, produtos agrícolas, pesticida e fungicida, tintas e pigmentos, joalheria etc. (RIBEIRO, 2001).

O elemento químico cobre é um metal de cor avermelhada, calcófilo, de número atômico 29, peso atômico 63,54, dureza 2,5 a 3,0, ponto de fusão 1.023°C, brilho metálico, ótimo condutor de calor e eletricidade, dúctil e maleável. Apresenta elevada resistência à tensão física e à corrosão. Possui propriedade não magnética e é de fácil formação de ligas com outros metais. (RIBEIRO, 2001).

O cobre e suas ligas são amplamente utilizados em vários produtos que permitem melhorar a vida das pessoas, devido às suas características físico-químicas privilegiadas, pois podem ser facilmente soldados e brasados, permitindo também o polimento para qualquer textura e brilho desejados. O cobre puro é largamente aplicado em fios, cabos e contatos elétricos, entre vários outros instrumentos para conduzir corrente elétrica. Latões, bronzes e cobre-níquel são ainda usados em radiadores automotivos, trocadores de calor, sistemas de aquecimento doméstico, coletores solares dentre outras aplicações que requerem rápida passagem de calor ao longo de uma seção metálica. Devido à notável capacidade de resistir a corrosão, cobre, latão, bronze, e cobre-níquel, também são utilizados em tubulações, válvulas e conexões em sistemas de transporte de água potável ou outros fluidos aquosos e gases industriais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estabelece a definição de termos e classificação de tipos e ligas de cobre. Considera-se como cobre o metal que contenha 99,85 % ou mais desse elemento. (RIBEIRO, 2001).

O cobre raramente é encontrado na natureza na forma nativa, normalmente associa-se a outros elementos químicos com diversas formas estruturais, proporções estequiométricas e combinações químicas, originando vários minerais. Existem dois grupos de minerais: os sulfetados, que geralmente ocorrem em zonas mais profundas da crosta terrestre, e os oxidados que normalmente apresentam caráter mais superficial, (RIBEIRO, 2001). Entre estes grupos são conhecidos cerca de 170 espécies minerais, das quais apenas algumas possuem relevância econômica. Abaixo, na Tabela 1, são listados os principais minerais dos quais é possível extrair o cobre.

Tabela 1- Principais minerais para a obtenção de cobre

Minerais	Composição	Teor de Cu %
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34,6
Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,9
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3
Covellita	$\text{CuS}$	66,4
Enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	48,3
Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8
Tenorita	$\text{CuO}$	79,8
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57,5
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,3
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36

Fonte: Ribeiro (2001).

## 2.1 Exploração

Segundo Ribeiro (2001), a tecnologia disponível para a descoberta, produção e utilização do cobre envolve as etapas de prospecção, pesquisa, mineração, concentração, metalurgia e transformação.

A prospecção mineral compreende o levantamento inicial de todas as informações disponíveis a respeito da geologia da área a ser prospectada, na qual é feita uma seleção das áreas que possivelmente indiquem mineralização.

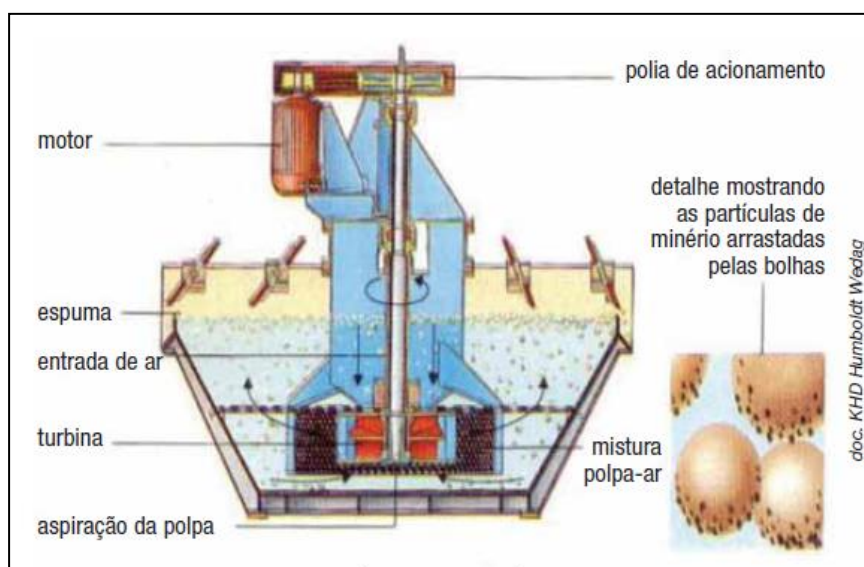
A pesquisa mineral constitui-se de uma programação sistemática que envolve inúmeras etapas de trabalho, como: mapeamento geológico detalhado, levantamentos geoquímicos e geofísicos, sondagem e avaliação econômica. Seu principal objetivo é descobrir e caracterizar depósitos minerais viáveis economicamente.

A mineração está relacionada à extração do minério de cobre, que pode ser realizada a céu aberto, subterrânea ou ainda de forma mista, no entanto, a mineração que tem sido a principal responsável na produção mundial de cobre é a do tipo a céu aberto, visto que permite a recuperação de depósitos de cobre de baixo teor, com até 0,5% Cu.

## 2.2 Beneficiamento e Metalurgia

A concentração corresponde ao processo de enriquecimento por meios físicos e químicos do metal no minério, envolvendo etapas de britagem (primária e secundária), peneiramento, moagem e flotação. O produto resultante é um concentrado com teor de 25 a 35% de cobre contido. (RIBEIRO, 2001). A última etapa, chamada *flotação*, consiste numa técnica de separação de misturas que baseia-se na introdução de bolhas de ar a uma suspensão de partículas, assim ocorre a aderência de partículas na superfície das bolhas, formando uma espuma que pode ser removida da solução, separando seus componentes de maneira efetiva. Como mostra a Figura 2.

Figura 2- Corte esquemático de uma célula de flotação.



Fonte: Ferran (2007).

A operação da metalurgia no sentido amplo congrega as fases de fundição e de refino, interligados na cadeia produtiva. A recuperação do metal cobre é dada por dois tipos de processos: o pirometalúrgico e o hidrometalúrgico. (RIBEIRO, 2001). O cobre composto pode ser convertido a cobre metálico por meio da pirometalurgia, que inclui a fundição e o refinamento eletrolítico, em geral usada em minérios sulfetados; e a hidrometalurgia, que inclui a lixiviação, extração por solvente (SX) e eletroextração (EW), comumente usada em minérios oxidados. (RÓCIO et al 2012).

A transformação, consiste nas etapas referentes aos processos da indústria metalúrgica, de trefilação, laminação e extrusão, na produção de semi-manufaturados, e manufaturados. Todavia, no sentido mais restrito, a transformação está relacionada mais especificamente aos estágios posteriores ao do refino do cobre, abrangendo fases preparatórias e intermediárias, ou ainda finais, de acordo com as diferentes aplicações comerciais desse metal. (RIBEIRO, 2001).

A trefilação é um processo de conformação plástica que se realiza pela operação de conduzir um fio (barra ou tubo) através de uma ferramenta (fieira), que contém um furo em seu centro, por onde passa o fio. Esse furo tem o diâmetro decrescente e apresenta um perfil na forma de funil cônico (BRESCIANI FILHO, 2011).

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica. Ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. (BRESCIANI FILHO, 2011).

A extrusão é um processo de conformação plástica que consiste em fazer passar um lingote (de secção circular), pela abertura existente no meio de uma ferramenta, por meio da ação de compressão de um pistão acionado hidráulicamente. Os produtos da extrusão são perfis, tubos, e barras de secção circular. (BRESCIANI FILHO, 2011).

## **2.3 Mercado do Cobre**

### **2.3.1 Contexto Mundial**

De acordo com Ribeiro (2015), as reservas mundiais de minério de cobre registraram em 2014 um total de 703 milhões de t em metal contido (teor do minério), quantidade 1,9%

superior à de 2013. As reservas lavráveis brasileiras de cobre no ano de 2014 somaram 10,84 milhões de t de Cu contido, apresentando queda de 3,3 % frente às do ano anterior, com destaques para os estados do Pará, com 82% desse total, Goiás, Alagoas e Bahia.

A produção mundial de concentrado de cobre, em metal contido, alcançou no ano de 2014 uma quantidade de 18,71 milhões de t, registrando um acréscimo de 2,5 % em relação a 2013. Quanto ao metal, em 2014 a produção mundial de cobre refinado (primário e secundário) atingiu 22,48 milhões de t, apresentando um crescimento de 6,8 % frente ao ano de 2013. A China (32,5 %), o Chile (13,0%), o Japão (6,8%) e os EUA (5,0%) foram os principais produtores do metal. (RIBEIRO, 2015).

No que se refere a produção brasileira de cobre primário e secundário, no ano de 2014 registrou-se uma quantidade de 236.685t, correspondendo a 1% da produção mundial de refinado (RIBEIRO, 2015), como mostra a tabela 2, a seguir:

Tabela 2 - Reserva e produção mundial.

Discriminação Países	Reservas <sup>(1)</sup> (10 <sup>3</sup> t)	Produção <sup>(2)</sup> (10 <sup>3</sup> t)			
		2014	2013 <sup>(r)</sup>	2014 <sup>(p)</sup>	(%)
Brasil	10.844		270,9	301,2	1,6
Chile	209.000		5.780,0	5.800,0	31,0
Peru	68.000		1.380,0	1.400,0	7,5
Estados Unidos da América	35.000		1.250,0	1.370,0	7,3
China	30.000		1.600,0	1.620,0	8,7
Austrália	93.000		990,0	1.000,0	5,3
Outros países	257.156		6.994,1	7.222,8	38,6
<b>TOTAL</b>	<b>703.000</b>		<b>18.265,0</b>	<b>18.714,0</b>	<b>100,0</b>

Fonte: DNPM; ICSG; USGS-United States Geological Survey; Vale; Salobo Metais S/A; Mineração Caraíba; Mineração Maracá; Votorantim Metais Níquel; Caraíba Metais e Sindicel-ABC. Dados em metal contido. (1) Brasil: reserva lavrável (DNPM). Para outros países: reserva econômica (USGS), (2) concentrado; (r) revisado; (p) preliminar.

Fonte: Ribeiro (2015).

### 2.3.2 Produção Nacional

Segundo Ribeiro (2015), a produção brasileira de concentrado de cobre alcançou em 2014 um total de 301.197 t em metal contido, registrando um aumento de 11,2% frente à de 2013, distribuída entre os estados do Pará, com 69,3% do total, Goiás, com 22,2%, e Bahia, com 8,5%, tendo como principais produtoras as empresas Vale, Salobo Metais, Mineração Maracá e Mineração Caraíba, e, como menores, a Votorantim Metais Níquel e a Serabi.

A produção nacional de cobre refinado (primária mais secundária), sob forma de catodo, atingiu em 2014 um total de 236.685 t, significando um decréscimo de 9,6% frente ao do ano anterior, tendo como destaque a empresa Paranapanema (Caraíba Metais), que

respondeu por cerca de 95% da totalidade do produzido no país, e a Mineração Caraíba, ambas situadas na Bahia. (RIBEIRO, 2015).

O preço do concentrado de cobre doméstico atingiu no ano de 2014 em média US\$ 2.105/t, representando uma queda de 6,2 % frente ao ano anterior. Para o metal, a cotação LME- *London Metal Exchange*, (Bolsa de Metais de Londres), atingiu no ano de 2014 o valor médio de US\$ 6.944/t, cifra 5,2 % inferior à praticada em 2013 (RIBEIRO, 2015).

### 2.3.3 Importação

No ano de 2014, o Brasil importou 496.331 t de bens primários de minério e/ou concentrado de cobre, equivalentes a 148.403 t em metal contido, a um custo de US\$ 976,82 milhões, FOB- *Free On Board*, (Livre à Bordo), procedentes primordialmente do Chile, com 78% do valor total, e Peru, com 15%. Os semimanufaturados de cobre totalizaram 212.415 t, num valor de US\$ FOB 1,49 bilhão, provenientes do Chile, com 73% do valor total, e do Peru, com 20%, destacando-se o cátodo de cobre, com importações de 189.549 t e valor de US\$ FOB 1,33 bilhão. Os manufaturados de cobre atingiram 52.114 t, com valor de US\$ FOB 449,48 milhões, oriundos do Chile, com 50% do valor total, e da China, com 22%. Os compostos químicos somaram 1.459 t, com valor de US\$ 10,64 milhões FOB, provenientes do Peru e dos EUA, ambos com 45% do valor total. (RIBEIRO, 2015).

### 2.3.4 Exportação

O Brasil exportou em 2014 um total de 855.527 t de bens primários de cobre, equivalentes a 239.548 t de cobre contido, num valor de US\$ FOB 1,8 bilhão, dirigidos para Alemanha, com 26% do valor total, Índia, com 17%, e China, com 15%. Os semimanufaturados somaram 68.868 t, com valor de US\$ FOB 395,56 milhões, destinados basicamente para a China, com 78 % do valor total, tendo destaque o catodo de cobre, num total de 42.202 t, com receita de US\$ FOB 295,99 milhões. Os manufaturados totalizaram 46.129 t, com valor de US\$ FOB 347,09 milhões, enviados para a Argentina, com 53% do valor total, a Costa Rica e os EUA, ambos com 9%. Os compostos químicos atingiram 1.738 t, perfazendo divisa de US\$ FOB 5,09 milhões, dirigidos para a China, com 47% do valor total, e a Argentina, com 23 %. (RIBEIRO, 2015). Abaixo, a tabela 3 ilustra resumidamente todas estas informações:

Tabela 3 - Principais estatísticas- Brasil

Discriminação		Unidade	2012 <sup>(r)</sup>	2013 <sup>(r)</sup>	2014 <sup>(p)</sup>
Produção	Concentrado <sup>(1)</sup>	(t)	223.141	270.979	301.197
	Metal primário	(t)	186.000	236.050	213.085
	Metal secundário	(t)	24.700	25.900	23.600
Importação	Concentrado <sup>(1)</sup>	(t)	76.072	152.292	148.403
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	561.922	1.061.837	976.817
	Metal <sup>(2)</sup>	(t)	298.100	280.600	246.437
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	2.369.597	2.055.676	1.711.258
Exportação	Concentrado <sup>(1)</sup>	(t)	157.650	242.750	239.548
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	1.510.644	1.825.968	1.805.255
	Metal <sup>(2)</sup>	(t)	72.500	118.700	92.710
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	576.302	869.596	643.778
Consumo Aparente <sup>(3)</sup>	Concentrado <sup>(1)</sup>	(t)	141.563	180.521	210.052
	Metal <sup>(2)</sup>	(t)	436.300	423.850	390.412
Preço	Concentrado <sup>(4)</sup>	(US\$/t)	2.530,0	2.245,0	2.105,0
	Metal – LME <sup>(5)</sup>	(US\$/t)	7.949,0	7.326,0	6.944,0

Fonte: DNPM; SRF-COTEC-MF; MDIC\SECEX; Caraiba Metais; SINDICEL-ABC.

(1) Metal contido; (2) metal primário + secundário; (3) produção + importação - exportação; (4) Vale; Mineração Maracá; Mineração Caraiba; (5) London Metal Exchange; (r) revisado; (p) preliminar.

Fonte: Ribeiro (2015).

De acordo com a tabela acima, pode-se observar a grande diferença existente entre os preços do concentrado e do metal cobre, mesmo com a redução em seus valores comerciais nos últimos anos. Essa diferença é devida, ao cobre metálico já ter passado por uma fase metalúrgica de transformação industrial, gerando a produção de semi-manufaturados como: laminados, tubos, barras, arames, e condutores elétricos como fios e cabos utilizados em setores de energia e telecomunicações, entre outros. Já o concentrado de cobre é mais barato, pois trata-se da matéria prima, apenas beneficiada a partir da sua extração da natureza. O Brasil, poderia investir mais no setor metalúrgico para produzir mais cobre metal ao invés de ser um país meramente fornecedor de concentrado de cobre, matéria prima semi-industrializada.

O ano de 2004 representou um marco importante para a indústria nacional do cobre, visto que dentre vários depósitos em desenvolvimento na região, o Sossego foi o primeiro a entrar em operação (BERGERMAN, 2009), com projeção de exaustão para o ano de 2024, segundo relatório da (VALE, 2015).

A mina do Sossego, localiza-se na Província Mineral de Carajás no Estado do Pará, é a segunda maior reserva de cobre brasileira e é uma das responsáveis por contribuir atualmente com cerca de 36% da produção de concentrado de cobre no Estado do Pará, com 23.600 t (VALE, 2016).

### 3 GEOLOGIA REGIONAL

#### 3.1 Província Mineral de Carajás

A Província Carajás (SANTOS J.O.S et al., 2000; SANTOS J.O.S, 2003), representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico, localizada na sua borda sul-oriental, no sudeste do Estado do Pará, e contém uma das maiores províncias minerais do planeta, com jazidas de ferro, manganês, níquel, cobre, ouro, estanho, bauxita e caulim. Tectonicamente é formada por dois compartimentos, um ao norte, o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas e o outro ao sul, o terreno *granito-greenstone* Rio Maria. (SANTOS J.O.S, 2003; VASQUEZ et al., 2008).

O domínio de transição se estende desde o norte de Xinguara até a borda sul do domínio Carajás, onde ocorrem as exposições mais meridionais do Supergrupo Itacaiúnas (FEIO 2011). É composto por ortognaisses, ortogranulitos e granitóides diversos datados entre 3,0 e 2,83 Ga (PIDGEON et al. 2000, VÁSQUEZ; ROSA-COSTA 2008; MORETO et al. 2011, FEIO 2011), além de granitóides e rochas indiferenciadas do Complexo Xingu com idades entre 3,01 e 2,99 Ga (MACHADO et al., 1991, AVELAR et al., 1999). Nele também ocorrem a Suíte Intrusiva Cateté ( $2378 \pm 55$  Ma, MACAMBIRA; TASSINARI, 1998) e granitóides neoarqueanos, como o Pedra Branca (~2,75 Ga, GOMES; DALL AGNOL, 2007) e as suítes Planalto (~2,74 Ga; FEIO 2011) e Plaqué ( $2.736 \pm 24$  Ma, AVELAR et al. 1999). Uma recente interpretação sustenta que o domínio de Transição teria uma evolução ainda mais antiga que o Rio Maria, e sua gênese estaria ligada a pelo menos quatro eventos magmáticos (FEIO 2011).

O Domínio Rio Maria é caracterizado por uma crosta juvenil mesoarqueana, com seqüências de greenstone belts e granitoides tipo TTG. Em contraste, o Domínio Carajás é uma região de crosta continental predominantemente neoarqueana, caracterizada principalmente por seqüências metavulcanosedimentares e granitóides de alto K. Ambos os domínios são marcados por um magmatismo granítico tipo A orosiriano, extensivo a outros domínios tectônicos no Estado do Pará. CPRM (2008).

Ao norte, no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, onde o depósito do Sossego está localizado, o embasamento arqueano é representado por gnaisses no Complexo Xingu (2,8 Ga, MACHADO et al., 1991) e granulitos no Pium (~3,0 Ga, RODRIGUES, LAFON; SCHELLER, 1992; PIDGEON; MACAMBIRA; LAFON, 2000).

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

Além de formações ferríferas, os litotipos do Supergrupo Itacaiúnas compreendem metassedimentos detríticos, químicos, vulcanoclásticos e rochas metavulcânicas félsicas a máficas. Apresentam metamorfismo que varia desde a fácies xisto-verde inferior (Grupos Igarapé Bahia e Grão do Pará) até anfibolito superior (Igarapé Pojuca e Igarapé Salobo), com grau de deformação oscilando entre rochas com estruturas primárias preservadas e rochas com estruturas integralmente alteradas. (DOCEGEO, 1988; GALARZA TORO; MACAMBIRA e MOURA, 2003).

O Supergrupo Itacaiúnas e a Formação Águas Claras foram afetados por inúmeros eventos intrusivos de idade arqueana e paleoproterozóica. Informações geocronológicas apontam para três intervalos magmáticos: dois no Arqueano e um no Paleoproterozóico com idades aproximadas de 2,76 Ga, 2,57 Ga e 1,88 Ga respectivamente. Muitos autores evidenciam a importância dos dois últimos eventos magmáticos na geração dos sistemas magmático-hidrotermais geradores dos depósitos tipo IOCG (MONTEIRO et al., 2008).

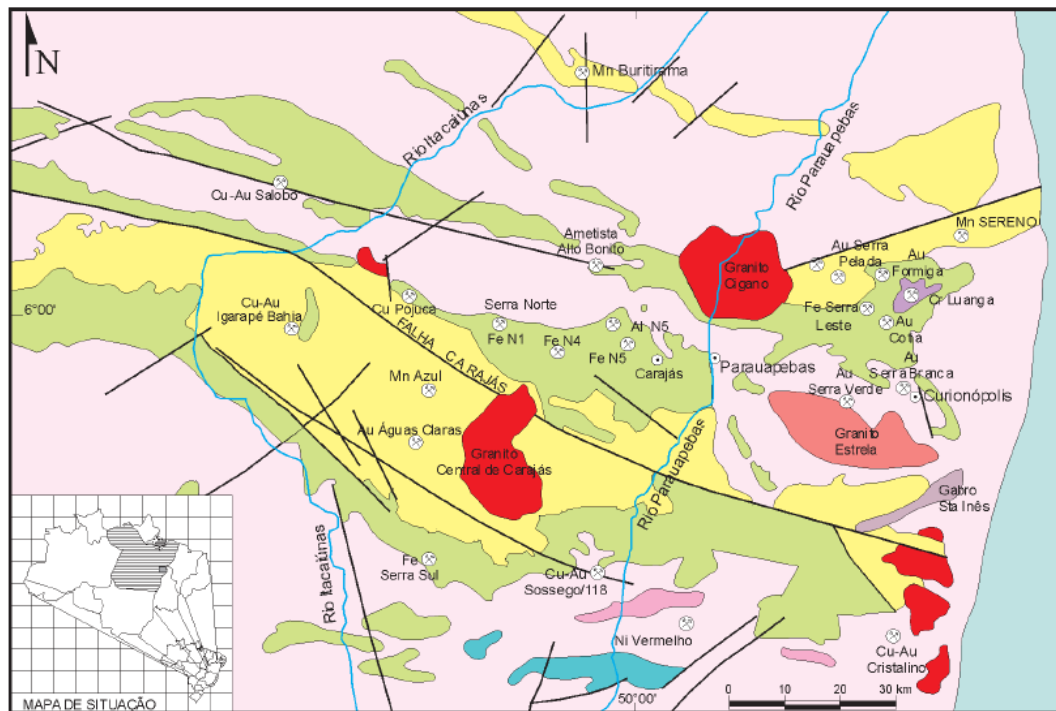
Segundo Neves (2006), com relação as intrusões arqueanas citam-se os granitóides Estrela, Plaquê, Planalto, Serra do Rabo, Cristalino, Velho Salobo e Itacaiúnas, com idades entre 2,76 e 2,56 Ga e composição alcalina e metaluminosa. Os episódios intrusivos paleoproterozóicos (~1,88 Ga) são representados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

De acordo com Pinheiro e Holdsworth (2000), o quadro estrutural da região pode ser dividido 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 vulcanossedimentares do Grupo Igarapé Salobo; 2,76 Ga). O outro domínio é representado por rochas

vulcânicas e sedimentares de baixo a muito baixo grau metamórfico, em discordância sobre as rochas do embasamento e posteriores ao evento tectônico de alta temperatura (rochas dos Grupos Igarapé-Pojuca, Grão do Pará e da Formação Águas Claras).

As grandes falhas transcorrentes E-W que cortam as rochas do Supergrupo Itacaiúnas e da Formação Águas Claras compõem a zona de cisalhamento Itacaiúnas que é formada pelos sistemas transcorrentes Cinzento e Carajás. O sistema transcorrente Carajás, no qual se insere o depósito Sossego é marcado por uma estrutura sigmoidal e é atravessada longitudinalmente pela falha Carajás (Figura 3), 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 de Cu e Au (PINHEIRO; HOLDSWORTH, 2000).

Figura 3 - Mapa geológico simplificado de parte da Província Carajás.



Fonte: Dardenne e Schobbenhaus (2001).

## 4 MINA DO SOSSEGO

### 4.1 Geologia do Depósito

A mina do Sossego localiza-se ao longo da Zona de Cisalhamento Itacaiúnas, a qual define o contato entre as unidades metavulcanosedimentares do Supergrupo Itacaiúnas e os gnaisses e migmatitos do Complexo Xingu. No depósito (Figura 4), ocorrem ainda diferentes corpos ígneos como granito, gabro, e rocha metavulcânica félsica, alongados e concordantes com a estrutura regional, também afetados pelo hidrotermalismo de 2,2 Ga (MARSCHICK; LEIVEILLE, 2001).

Figura 4 - Visão panorâmica da mina do Sossego. Em A, tem-se uma visão geral da mina; em B, observa-se a barragem de rejeito; em C, tem-se a cava do Sossego e em D a cava Sequeirinho.



Fonte: (VALE, 2012).

A jazida está localizada numa zona de cisalhamento regional de atitude WNW-ESE/75°SSW que põe em contato rochas gnáissicas do Complexo Xingu, para sul, e rochas supracrustais do Grupo Grão Pará, para norte (PINHEIRO; HOLDSWORTH, 2000; DOCEGEO, 1988). As rochas encaixantes da mineralização foram submetidas a intensidades variáveis de deformação, pois exibem foliação milonítica anastomótica paralela à estrutura regional. Os corpos de minério formam uma estrutura grosseiramente tabular que ocupa uma importante estrutura subvertical e orientada na direção NE-SW, a qual se prolonga nas duas extremidades na direção da foliação regional (MORAIS; ALKMIN, 2005).

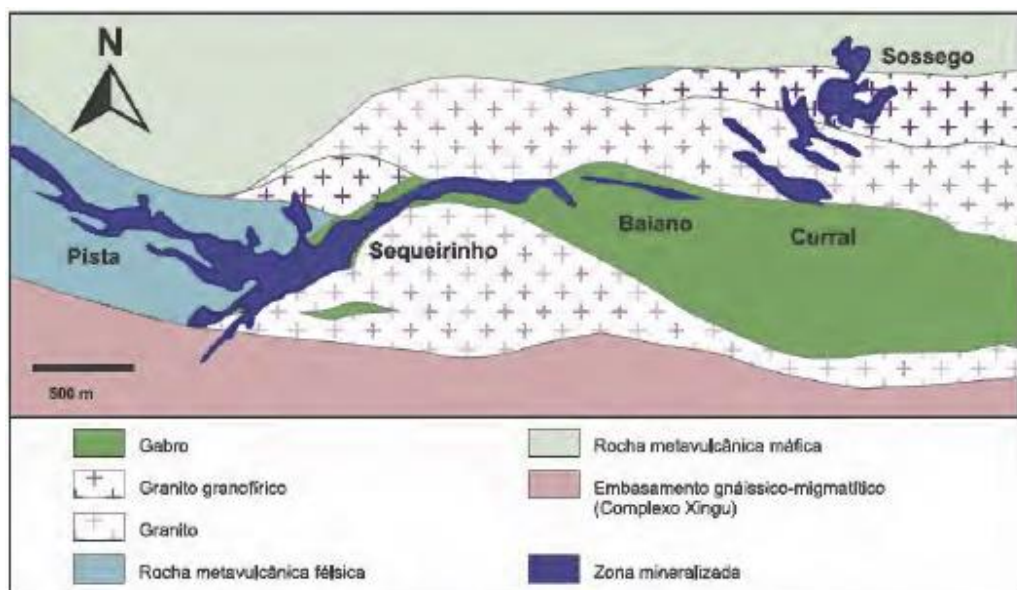
Na mina do Sossego, a mineralização está disposta em cinco corpos (Figura 5): Pista, Sequeirinho, Baiano, Sossego e Curral, com destaque para Sequeirinho e Sossego, os mais importantes. A mineralogia destes corpos difere fortemente entre si devido ao tipo de rocha hospedeira e também do tipo e intensidade das alterações hidrotermais predominantes em cada depósito.

Com relação aos corpos Pista, Sequeirinho e Baiano, as alterações iniciais sódica e sódica-cálcica são bem desenvolvidas; enquanto que nos corpos Sossego e Curral estas alterações são pouco desenvolvidas ou quase ausentes, predominando as alterações potássica e clorítica (MONTEIRO et al., 2008).

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

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

Figura 5 - Mapa geológico simplificado do depósito Sossego.



Fonte: Monteiro et al. (2008).

A mineralização compreende um estágio tardio do sistema hidrotermal e é representada por sulfetos, principalmente calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), e em menores quantidades, pirita ( $\text{FeS}_2$ ), siegenita ( $(\text{Ni},\text{Co})_3\text{S}_4$ ), milerita ( $\text{NiS}$ ) e vaesita ( $\text{NiS}_2$ ). Mais raramente, aparecem pirrotita ( $\text{FeS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), melonita ( $\text{NiTe}_2$ ), hessita ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ), molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) e ouro nativo ( $\text{Au}$ ), na forma de pequenas inclusões na calcopirita (MONTEIRO et al., 2008).

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

Conforme Monteiro et al. (2008) e Neves (2006), o minério do corpo Sossego ocorre na forma de veios e brechas. As brechas possuem clastos angulosos a arredondados, principalmente derivados de rochas graníticas, dispersos em matriz composta por calcopirita, magnetita, apatita, clorita e em menores quantidades muscovita, quartzo, actinolita e siegenita. O último estágio do sistema hidrotermal é a alteração hidrolítica, representada pela assembléia muscovita-hematita-quartzo-clorita-calcita, presente no corpo Sossego.

## 4.2 Aspectos Históricos

Entre o mapeamento geológico, iniciado em 1997, e o início da produção, em 2004, passaram-se somente sete anos, tempo considerado muito curto para os padrões da indústria mineral. A tabela 4, ilustra o cronograma de implantação.

Tabela 4 - Cronograma de implantação do Projeto Sossego.

Ano	Evento
1997	Mapeamento geológico
1999	Estudo do escopo concluído
2000	Estudo de pré viabilidade concluído
2001	Viabilidade e engenharia básicos concluídos
2002	Início da construção
2004	Início da produção

Fonte: Bergerman (2009).

O Sossego é o primeiro de uma série de projetos da Vale na área de não ferrosos na região da Província Mineral de Carajás. Os principais projetos na região são: Onça Puma (Níquel), Salobo (Cobre e Ouro), 118 (Cobre), Níquel do Vermelho (Níquel), Cristalino

(Cobre e Ouro) e Alemão (Cobre e Ouro). Existe ainda uma usina hidrometalúrgica semi-industrial para avaliar um novo processo de produção de cobre metálico por oxidação sob pressão do concentrado sulfetado de cobre, que atualmente não está em operação. A reserva do Sossego foi estimada em 245 milhões de toneladas com 0,98% de Cu e 0,28 g/t de Au (para um *cut off* de 0,33% de cobre equivalente), divididos em dois corpos, denominados Sequeirinho principal corpo mineralizado com cerca de 85% das reservas e o Sossego com 15% (VALE, 2001). A composição mineralógica média do minério sulfetado processado na usina do Sossego é apresentado na tabela 5, a seguir:

Tabela 5 - Composição mineralógica do minério processado na usina do Sossego.

<i>Minerais</i>	<i>Sequeirinho (*)</i>	<i>Sossego (*)</i>
<i>Quartzo</i>	23	26
<i>Feldspato</i>	24	27
<i>Clorita</i>	2	14
<i>Biotita</i>	5	10
<i>Magnetita</i>	8	9
<i>Calcopirita</i>	2	3
<i>Bornita</i>	<1	<1
<i>Calcocita</i>	<1	<1
<i>Hematita</i>	1	1
<i>Anfibólio</i>	24	2
<i>Carbonatos</i>	<1	6
<i>Epidoto</i>	10	2

Fonte: Bergerman (2009).

### 4.3 Lavra

Os dois depósitos Sequeirinho e Sossego, são atualmente lavrados a céu aberto com equipamentos de carregamento e transporte de grande escala, com desmonte feito por explosivos. A vida útil da mina está estimada em 20 anos, com previsão de exaustão para o ano de 2024.

A operação da mina utiliza equipamentos pesados, incluindo: perfuratrizes elétricas e a diesel, escavadeiras de 54 m<sup>3</sup> e 21 m<sup>3</sup>, pás carregadeiras de 19 m<sup>3</sup> e caminhões fora de estrada de 240 toneladas. A tabela 6, abaixo apresenta o quantitativo de equipamentos utilizados.

Tabela 6 - Equipamentos utilizados para lavra

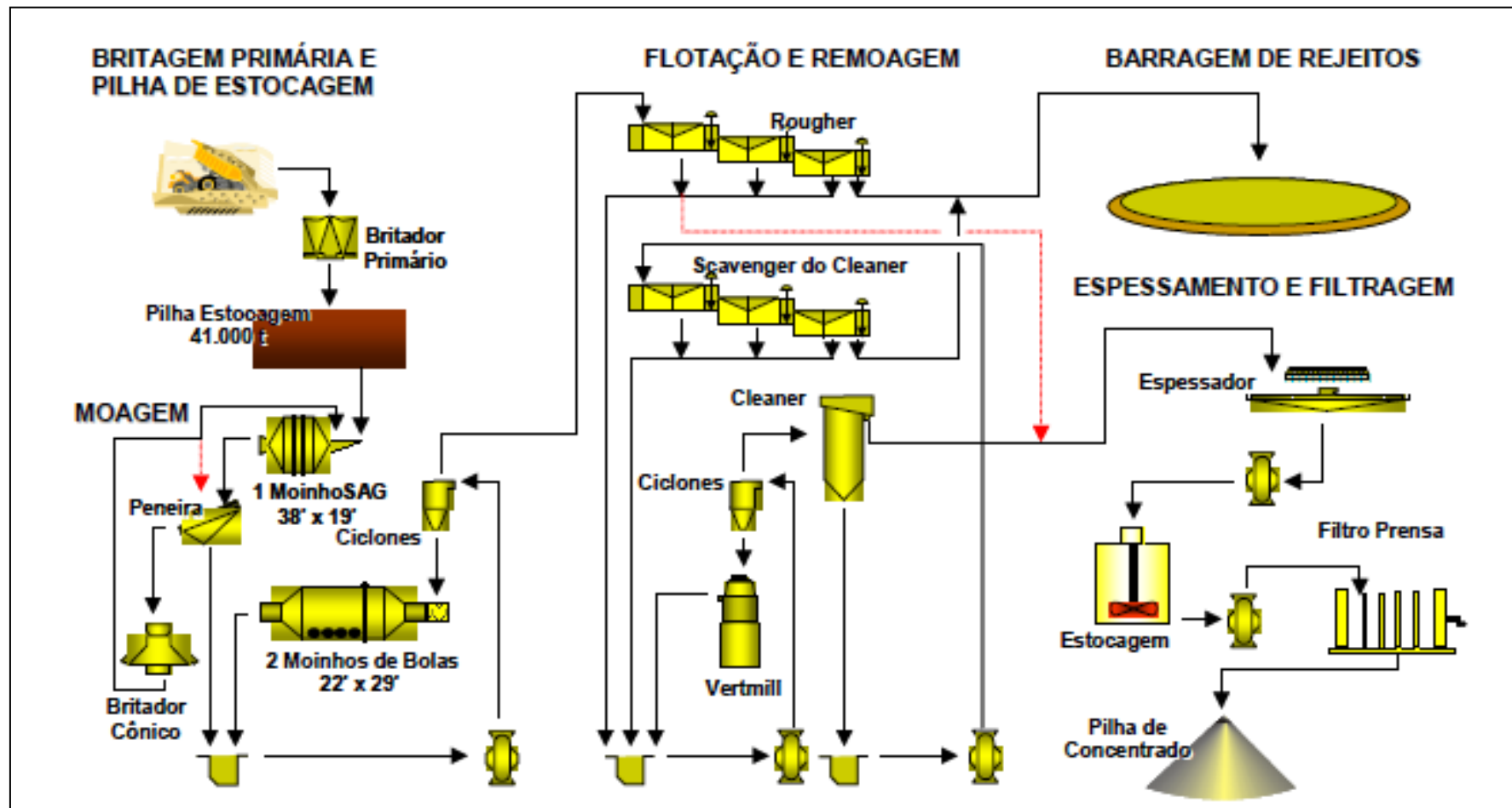
Equipamento	Quantidade
Perfuratriz Pit Vipper 351	4
Perfuratriz 49 HR	6
Perfuratriz T4	1
Escavadeira P&H 4100	1
Escavadeira P&H 2300	1
Escavadeira 495 HR	2
Pá carregadeira 994	4
Caminhão 793	23
Caminhão 785	16

Fonte: Okuhara (2008 apud BERGERMAN, 2009).

#### 4.4 Circuito de Beneficiamento

Com sua operação iniciada em março de 2004, a usina do Sossego processa 41.000 toneladas de minério de cobre por dia e está projetada para uma produção superior a 470.000 toneladas de concentrado de cobre por ano. O fluxograma de processo é apresentado na (Figura 6).

Figura 6 - Circuito de beneficiamento do minério de cobre.



Fonte: Bergerman (2009).

O *Run of Mine (R.O.M.)* é transportado por caminhões de capacidade de 240 toneladas e alimenta a britagem, com um tamanho máximo de rocha de aproximadamente 1,20 m. Trata-se de um britador giratório 60x89 com abertura de 152 mm na posição fechada e atualmente opera com capacidade de 2.500 t/h. O produto britado é transportado por um transportador de correia de longa distância (4.045 m) e alimenta uma pilha pulmão cônica de 41.000 toneladas de capacidade útil.

O minério é retomado da pilha pulmão por três alimentadores em linha, com velocidade variável, que alimentam a moagem semi-autógena. O moinho semiautógeno opera em circuito fechado com rebitadores cônicos (chamados britadores de *pebbles*), com uma carga circulante média de 25%. Há também a opção de se encaminhar o produto da rebitagem para um peneiramento com abertura de 15 mm, cujo passante segue direto para a moagem de bolas e o retido retorna à rebitagem (NANKRAN et al., 2007). A capacidade do moinho semi-autógeno é da ordem de 1.841 t/h e a sua descarga é realizada por grelhas (3 e 3 1/4" com aproximadamente 10% de área aberta), que alimentam duas peneiras vibratórias com telas de abertura de 13 mm. A fração passante na peneira é bombeada para o circuito de classificação, que é constituído por duas baterias com 8 ciclones de 33", os quais operam em circuito fechado reverso com dois moinhos de bolas. A carga circulante é da ordem de 300%. Os moinhos de bolas operam com uma porcentagem de sólidos de aproximadamente 70% e com até 35% de enchimento. A alimentação dos moinhos de bolas apresenta um  $F_{80}$  (tamanho no qual passam 80% da massa de sólidos do fluxo de alimentação), na faixa de 2,5 mm. O *overflow* das ciclonegens constitui a alimentação da etapa *rougher* de flotação, caracterizada atualmente por um  $P_{80}$  (tamanho no qual passam 80% da massa de sólidos do fluxo de produto), de 0,210 mm e 35% de sólidos.

A flotação é composta por três etapas: *rougher*, *cleaner* e *scavenger-cleaner*.

A etapa de flotação *rougher* consiste em duas linhas paralelas e independentes, constituídas por 7 células tanque cada uma, com capacidade de 160 m<sup>3</sup> e aeração forçada. As células *rougher* trabalham com as seguintes variáveis operacionais:

- nível de espuma: 100 – 350 mm;
- vazão de ar: 25 – 40 m<sup>3</sup>/h.

O rejeito *rougher* corresponde a 95% do rejeito final, sendo direcionado à barragem com vazão média de 1.740 t/h. Ressalta-se ainda que o pH médio da alimentação está em torno de 8,7. As características dos produtos *rougher* são mostradas na tabela 7.

Tabela 7 - Valores típicos dos produtos da etapa *rougher*.

Produto	Teor de Cobre (%)	Sólidos (%)
Alimentação	0,9-1,3	33-38
Concentrado	13-17	20-25
Rejeito	0,05-0,07	33-38

Fonte: Bergerman (2009).

O concentrado *rougher* apresenta teor de cobre variando entre 13 a 17%, com recuperação metalúrgica variando de 94% a 96%. Vale reportar também que o circuito *rougher* dispõe da alternativa dos concentrados *rougher* das três primeiras células de cada linha alimentarem diretamente o espessador ou a flotação *cleaner* (sem passar pela remoagem). Com esta alternativa em funcionamento, consegue-se também maior recuperação global na flotação.

Os concentrados *rougher* e *scavenger-cleaner* alimentam, por meio de bombas de velocidade variável, duas baterias de 7 ciclones de 15". O *underflow* da ciclonagem é direcionado, por gravidade, para dois moinhos verticais, que operam em circuito fechado com a ciclonagem (NANKRAN et al., 2007).

A fim de flexibilizar este circuito, foi instalada uma alternativa operacional para os casos de manutenção de um dos moinhos verticais. Pode-se encaminhar o material proveniente do circuito *rougher* e *scavenger* do *cleaner* diretamente ao circuito *cleaner*. Esta alternativa pode engrossar um pouco a alimentação da etapa *cleaner*, porém não a ponto de prejudicar a operação da mesma. O teor do concentrado também pode sofrer ligeira queda, mas que não impacta significativamente a qualidade, tendo em vista os curtos períodos de tempo em que este circuito é acionado.

O produto da remoagem (*overflow* dos ciclones), com  $P_{80}$  (tamanho no qual passam 80% da massa de sólidos do fluxo de produto), da ordem de 44  $\mu\text{m}$ , é submetido à flotação *cleaner* em seis colunas de flotação de 4,27 m de diâmetro e 14 metros de altura. As colunas operam da seguinte forma:

- nível de espuma: 400 – 1000 mm;

- vazão de ar: 80 – 150 m<sup>3</sup>/h;
- água de lavagem: 0 – 120 m<sup>3</sup>/h.

Os valores típicos de teores de cobre e percentagem de sólidos dos produtos da etapa *cleaner* são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Valores típicos dos produtos da etapa cleaner.

Produto	Teor de Cobre (%)	Sólidos (%)
Alimentação	10-15	12-15
Concentrado	28-32	20-25
Rejeito	2-4	12-15

Fonte: Bergerman (2009).

O rejeito da etapa *cleaner*, com teor aproximado de 4% de cobre, alimenta a etapa *scavenger-cleaner*, composta de 6 células de flotação tipo tanque com volume de 160 m<sup>3</sup>. Os valores típicos de teores de cobre e a porcentagem de sólidos dos produtos da etapa *scavenger* são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Valores típicos dos produtos da etapa scavenger.

Produto	Teor de cobre (%)	Sólidos (%)
Alimentação	2 a 4	15 a 20
Concentrado	8 a 9	20 a 25
Rejeito	0,3 a 0,5	20 a 25

Fonte: Bergerman (2009).

O circuito de flotação possui uma recuperação mássica que está entre 3,5 a 4,0%, com recuperação de cobre em torno de 93%, que chega a picos de 98%, em situações ótimas. O concentrado final é transportado para o espessador e posteriormente filtrado.

As dosagens típicas dos reagentes são apresentadas na tabela 10, ressalta-se ainda que os reagentes são dosados sem diluição, exceto o xantato, que é diluído para uma concentração de 20%.

Tabela 10 - Dosagens típicas de reagentes na flotação do Sossego.

Reagente	Dosagem (g/t)
Ditiofosfato	8
Amil xantato	8
MIBC	15
Propileno glicol	15

Fonte: Bergerman (2009).

O concentrado final obtido na etapa *cleaner* é enviado ao espessador, que opera com alimentação em torno de 15% de sólidos. A floculação é realizada com o auxílio de poliacrilamida aniônica na dosagem de 30 g/t de concentrado.

O *underflow* do espessador, com porcentagem de sólidos de 60-65%, segue, por meio de bombas com velocidade variável, para o tanque de alimentação da filtração, de 720 m<sup>3</sup>, dotado de agitador, suficiente para mais de 5,5 h de operação. Posteriormente, o concentrado é transferido para filtração.

A filtração consiste em dois filtros prensas com capacidade de produção da ordem de 54 t/h. A umidade do concentrado final varia entre 9,0-9,5%. O *overflow* constitui água de processo e retorna à moagem de bolas.

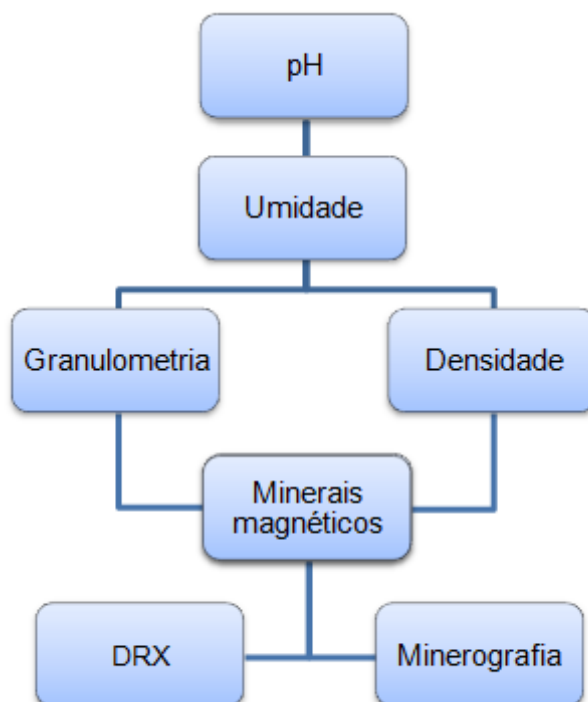
O produto final é transportado em caminhões até a pãra ferroviária da cidade de Parauapebas, PA, distante cerca de 100 km da mina do Sossego, onde é transferido para vagões ferroviários, que fazem a viagem até o porto da Madeira, em São Luis, MA, local em que o produto é carregado nos navios tendo como destino os clientes nacionais e internacionais.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste trabalho, fundamentou-se numa investigação, ou seja, na caracterização tecnológica do concentrado de cobre, oriundo da Mina do Sossego em Carajás. Para isso, foi feito um levantamento bibliográfico sobre geologia regional e também do depósito em estudo, buscando-se informações sobre rochas hospedeiras e mineralizações, além de pesquisas no que diz respeito ao beneficiamento do minério. Após isso, separou-se uma certa quantidade do material em análise, material esse coletado em etapas de campo anteriores pelo orientador deste trabalho.

A partir disso, iniciou-se as análises de laboratório onde a amostra passou por diversas etapas de trabalho tais como: a medição do potencial hidrogeniônico (pH), determinação da umidade, separação granulométrica em quatro frações, densidade aparente, real e úmida do material, separação magnética na qual objetivou-se separar os minerais magnéticos. Além disso, foi feita a difratometria de raios-x, a fim de identificar a composição mineralógica do concentrado de cobre, assim como, foram produzidas seções polidas para observação dos minerais opacos por meio da utilização do microscópio de luz refletida. Abaixo, na Figura 7, apresenta-se um fluxograma das etapas de trabalho.

Figura 7- Fluxograma das análises de laboratório.



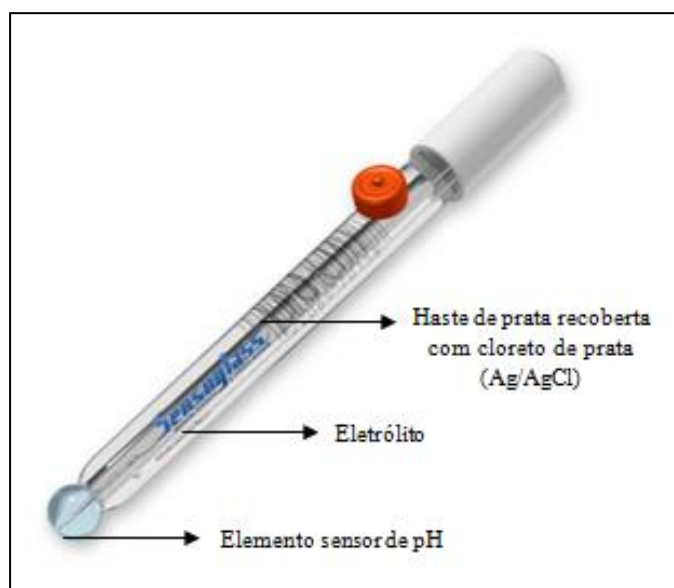
Fonte: Autora

## 5.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

Potencial Hidrogeniônico (pH) é um termo que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. É definido como o cologarítmo decimal da concentração efetiva ou atividade dos íons hidrogênio.

De acordo com Silva (2011), a determinação de pH é feita eletrometricamente com a utilização de um potenciômetro e eletrodos. O princípio da medição eletrométrica do pH é a determinação da atividade iônica do hidrogênio, utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio, que consiste de uma base de platina sobre a qual o gás hidrogênio flui a uma pressão de 101 kPa.. O eletrodo de hidrogênio, no entanto, não é bem adaptado para uso universal especialmente em trabalho de campo ou em soluções contendo espécies químicas contaminantes do eletrodo. Assim, o eletrodo de vidro é o mais comumente utilizado (Figura 8).

Figura 8 - Eletrodo de vidro.



Fonte: (DIGIMED, 2016).

A análise do pH visa observar o comportamento do sistema: concentrado de cobre e água, como se estivesse ao ar livre em contato direto com a atmosfera. Para representar esta situação utilizou-se água destilada fornecida pelo Laboratório de Análises Químicas do IG, de pH 6,09 em temperatura de 25,3°C. Esta água simulou a água da chuva na Amazônia, que naturalmente é considerada ácida, com pH em torno de 5,6 a qual foi deixada em contato com o concentrado de cobre por um período de 3 dias.

Para determinar o pH da água que ficou em contato com o concentrado, separou-se 50g da amostra num béquer de vidro de 200 ml, em seguida adicionou-se 100 ml de água destilada, agitando-se vigorosamente por 30 segundos. Após isso, aguardou-se cerca de 10 minutos para que o sistema permanecesse em repouso para então proceder a leitura do pH através da imersão do eletrodo na solução. Tal procedimento foi realizado 3 vezes ao dia, em intervalos de 1 hora a partir de sua agitação, registrando-se sempre o valor do pH seguido da leitura de temperatura, pois este varia no sentido contrário da mesma, ou seja, quanto maior a temperatura da água, menor será o pH.

Para esta etapa foi utilizado o pHmetro digital (Figura 9) PG1800 (GEHAKA), pertencente ao Laboratório de Análises Clínicas, localizado no prédio do ICB.

Figura 9 - pHmetro utilizado para análise do pH.



Fonte: Autora

## 5.2 Umidade

A determinação da umidade é um dos parâmetros mais importantes na caracterização tecnológica de materiais. No caso do concentrado de cobre, a umidade interfere diretamente na densidade e na fluidez da polpa. A umidade representa a quantidade de água e reagentes, utilizados na flotação, que ficaram aderidos na superfície das partículas do concentrado e não foram eliminados pela filtragem. O cálculo da umidade foi feito a partir do registro da massa inicial de uma alíquota da amostra em balança de precisão. Em seguida foi colocada em estufa para secar, por 24h a uma temperatura de 60°C. Após isso, foi retirada da estufa deixando-se

arrefecer até a temperatura ambiente, registrando-se novamente sua massa. Posteriormente, fez-se a diferença entre os valores de massa obtendo-se a umidade em gramas. Esse valor é relacionado ao peso inicial da amostra e convertido em porcentagem representando a umidade do concentrado.

### 5.3 Análise Granulométrica

A separação granulométrica objetiva separar um material em duas ou mais frações com partículas de diferentes tamanhos, neste trabalho, portanto, busca-se determinar a composição granulométrica, em porcentagem, do concentrado de cobre beneficiado pela mina do Sossego. O método de separação escolhido foi o peneiramento a úmido, que é mais adequado para partículas com granulometria muito fina (CARRISSO, 2004).

Durante o peneiramento a úmido adicionou-se água destilada na amostra, com o objetivo de impedir a aglomeração de material, e desta forma facilitar a passagem das partículas mais finas através da malha das peneiras.

Para a separação granulométrica de fato, foi utilizado o conjunto de peneiras (Figura 10), pertencente ao Laboratório de Sedimentologia do IG, tais peneiras foram selecionadas com base no tamanho das partículas do concentrado que estão na faixa de areia muito fina predominantemente. A amostra passou através de um conjunto de três peneiras de nylon mais o fundo, cujas dimensões da malha correspondem a 120 mesh ( $< 0,177$  e  $> 0,125$  mm), 170 mesh ( $< 0,125$  e  $> 0,088$  mm), 250 mesh ( $< 0,088$  e  $> 0,062$  mm) e o fundo ( $< 0,062$  mm).

Figura 10 - Conjunto de peneiras utilizado para a separação granulométrica.



Fonte: Autora

Para iniciar esta etapa de trabalho, testou-se a peneira de 80 mesh ( $< 0,177$  mm), no entanto, esta não foi utilizada, visto que o concentrado é muito fino, e ultrapassou totalmente esta peneira, então substituiu-se por uma peneira de 250 mesh ( $> 0,062$  mm), colocada antes do fundo. Após a seleção das peneiras necessárias para o processo de separação granulométrica, separou-se cerca de 500g de amostra a qual foi desagregada, pois havia muitos agregados. Em seguida lavou-se a amostra com solução de HCl a 2% objetivando-se retirar qualquer tipo de oxidação da amostra. Durante a lavagem, observou-se que foram formadas poucas bolhas e em dado momento as mesmas já haviam se dissipado, após isso a amostra foi lavada por duas vezes com água destilada, a fim de retirar o HCl. Isto ocorreu durante aproximadamente 40 minutos num processo de decantação relativamente lento, no qual já era possível observar as fases de água e material decantado, num intervalo de tempo de 5 minutos.

Posteriormente, o material foi colocado na estufa durante 24h a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  para secar. A amostra então foi pesada registrando-se um valor de 442,20 g observando-se uma perda de 11% em relação ao valor inicial. Tal perda de valor significativo justifica-se por se tratar de um material extremamente fino e uma parte dele permanece na superfície da água. Este material sobrenadante é formado possivelmente por calcopirita e também pelos reagentes químicos que foram adicionados ainda durante o beneficiamento do minério, que acaba sendo descartado junto com a água durante a lavagem da amostra.

Durante o peneiramento usou-se um balde para armazenar a água da lavagem do material e também uma pisseta de 500 ml para a aplicação de água destilada para a total retirada dos resíduos da amostra, até que todo material fosse peneirado, obtendo-se desta forma as frações granulométricas do concentrado. A maior parte da amostra foi acumulada no fundo, e foi armazenada em um balde que reteve toda a água usada durante o processo, o qual permaneceu em repouso por 24 horas para que o material fosse totalmente decantado. Em seguida, as frações foram retiradas de cada peneira com o auxílio de um bastão de vidro, as peneiras foram lavadas continuamente com água destilada para a retirada de possíveis resíduos do material em estudo, repetindo-se o processo de armazenamento da água para a sua reutilização. De posse das três amostras já peneiradas mais o fundo, estas foram colocadas na estufa para secagem a uma temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  num período de 24h. A partir daí, obteve-se então quatro frações granulométricas do concentrado, na qual a fração mais fina corresponde ao fundo da peneira sendo  $< 0,062$  mm.

Em seguida, as quatro frações foram pesadas, e a partir dos resultados foi montada uma tabela para análise e interpretação dos dados obtidos.

#### 5.4 Determinação da Densidade

Densidade é a relação entre a massa de um material e o volume por ele ocupado. Trata-se, portanto de uma propriedade física utilizada para caracterizar uma dada substância, a densidade dos sólidos e líquidos é expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ). A densidade é calculada pela seguinte expressão:

$$\text{Densidade} = \text{massa} / \text{volume}$$

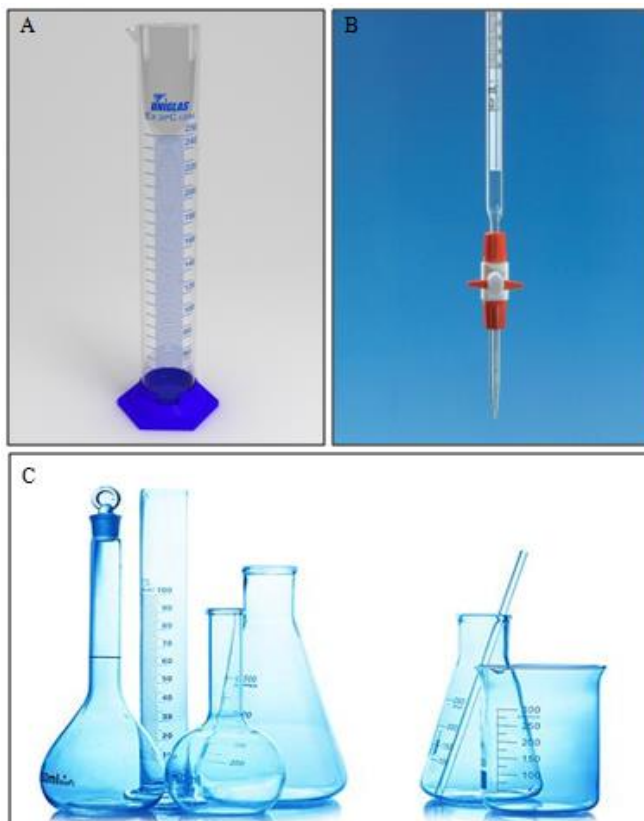
O concentrado é um material de granulometria muito fina, portanto, a determinação de sua densidade depende de dois fatores: grau de compactação das partículas (proporção de espaços vazios entre elas), e umidade (quantidade de água aderida na superfície das partículas). Diante disso, foram calculadas três tipos de densidade para este trabalho: densidade aparente, real e úmida.

De acordo com Sampaio e Silva (2007), a densidade aparente é fortemente dependente da composição mineral do material e do grau de compactação. A densidade aparente considera o volume da amostra como um todo, incluindo os espaços vazios existentes entre as partículas que a constitui, todavia, desconsidera-se qualquer umidade que a amostra possa apresentar, uma vez que o material em estudo é colocado para secar, antes de serem determinados o seu volume e massa.

A densidade real é a relação entre a massa de uma amostra e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas, desconsiderando-se a porosidade. Dessa forma, a densidade real de uma dada amostra de minério sempre será maior que sua densidade aparente, e para ser calculada é necessário utilizar-se da aplicação de líquidos na amostra para que os espaços entre as partículas sejam preenchidos.

A densidade úmida é calculada da mesma forma que a densidade aparente, no entanto, a amostra neste caso, não é colocada na estufa, ou seja, o material não é seco antes de sua densidade ser calculada, permanecendo com água aderida na superfície das suas partículas. Para a determinação da densidade foram utilizadas as vidrarias pertencentes ao Laboratório de Análises Químicas do IG, como mostra a (Figura 11).

Figura 11 - Conjunto de vidrarias utilizado durante a etapa da determinação da densidade. Em A, tem-se uma proveta, em B, uma bureta e em C, balões volumétricos, Erlenmeyer, Becker e bastão de vidro.



Fonte: Google (2016).

## 5.5 Determinação dos Minerais Magnéticos

Segundo Luz, Sampaio e Almeida (2004), a separação magnética é um método consagrado na área de processamento de minérios para concentração e/ou purificação de muitas substâncias minerais. Pode ser empregada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético associadas às espécies mineralógicas individualmente, no beneficiamento de minério.

A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade os materiais ou minerais são classificados em: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso tem-se os minerais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos.

A Tabela 11, mostra uma lista de cinco grupos minerais que são classificados de acordo com a sua susceptibilidade magnética, como: ferromagnéticos, magnéticos, fracamente magnéticos, muito fracamente magnéticos e não magnéticos. A tabela também apresenta as faixas de intensidade de campo magnético para esses minerais.

Tabela 11- Classificação de alguns minerais conforme sua faixa de campo e suscetibilidade magnética

<b>Grupo</b>	<b>Susceptibilidade magnética</b>		<b>Faixa de campo (T)</b>	<b>Exemplos de Minerais</b>
A	Ferromagnético	Ferromagnéticos	0,05 - 0,5	Ferro e magnetita
B	Paramagnéticos	Magnéticos	0,5 – 1,0	Ilmenita, pirrotita e franklenita.
C		Fracamente magnéticos	1,0 – 1,8	calcopirita, bornita, calcocita e hornblenda.
D		Muito fracamente magnéticos	> 1,8	Pirita, covelita e feldspato.
E	Diamagnéticos	Não magnéticos	-	Barita, coríndon e apatita.

Fonte: Luz, Sampaio e Almeida (2004).

A etapa de separação magnética foi realizada no separador magnético *ISODYNAMIC FRANTZ*, modelo L1, com voltagem de 115 volts, frequência 50-60 hertz, tipo barreira magnética, do laboratório PARA-ISO/UFPA (Figura 12), com campo magnético que varia de 0,5 a 1,5 T. A unidade de intensidade de campo magnético no sistema internacional (SI) é o tesla (T). Para efetuar a separação, empregou-se os intervalos de intensidade entre 0,5 e 1,5 T que abrangem tanto os minerais magnéticos como àqueles fracamente-magnéticos, conforme a tabela 11, o valor da inclinação adotado para os intervalos de intensidade do campo magnético acima descrito foi de 5°.

Figura 12 - Isodynamic Frantz, utilizado para fazer a separação magnética do concentrado.



Fonte: Autora

Para este procedimento o material passou por lavagem em solução de 250 ml de HCl a 2% para retirar alguma possível oxidação e secagem em estufa a uma temperatura de 60°C durante 24h. A preparação da amostra para o processo de separação magnética consistiu apenas em sua secagem, a qual foi colocada em estufa a uma temperatura de 60°C, por 2 horas aproximadamente, a fim de eliminar qualquer possível umidade presente no material.

Antes de dar início a esta etapa, foi passado o ímã de mão em cada uma das frações granulométricas, objetivando-se remover magnetita e pirrotita. O material utilizado para este procedimento, foi o mesmo que passou pela análise granulométrica, ou seja, foram as quatro frações resultantes da etapa de peneiramento: ( $> 0,125\text{mm}$ ,  $> 0,088\text{mm}$ ,  $> 0,062\text{mm}$ , e  $< 0,062\text{ mm}$ ). Portanto, foi separada a fração fracamente magnética, daquela não magnética, adotando-se o intervalo de intensidade de campo entre 0,5 e 1,5 T, com a intenção de atrair os fragmentos de calcopirita de cada uma das frações granulométricas.

## 5.6 Determinação da Composição Mineral por Difração de Raios - X

A difração de raios-X (DRX) corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, podendo ser aplicada em diversos campos do conhecimento, no entanto, este tipo de técnica é mais especificamente utilizada na engenharia, ciência de materiais, engenharias metalúrgicas, química, de minas e também nas geociências, além de outros.

Geralmente, a análise é realizada em amostra de material cristalino e pulverizado, pois baseia-se na interação da radiação X com a matéria cristalina, a qual tem a capacidade de refletir os raios-X em direções cristalográficas preferenciais de acordo com cada espécie mineral. A difratometria de raios-X é adequada para identificar os tipos minerais, constituintes da amostra numa proporção maior que 5% em peso. (FIGUEIREDO, 2000).

As análises de DRX foram feitas pelo método do pó que compreende um dispositivo cilíndrico no qual a amostra em pó é acondicionada em um capilar posicionado no centro da câmara sobre o qual é focalizado um fino feixe de raios-X. Cones de difração de raios-X são então gerados a partir da amostra, sendo que uma parte destes sensibiliza um filme fotográfico posicionado na parede interna da câmara, possibilitando a coleta de raios-X desde praticamente  $0^\circ$  até  $180^\circ$  em termos de  $2\theta$ . (SANTOS, 2009).

Nesta etapa, foram analisadas 4 amostras, divididas em três frações granulométricas 170 mesh ( $> 0,088$  mm), 250 mesh ( $> 0,062$  mm) e fundo ( $< 0,062$  mm). Tais frações foram separadas ainda na fase de análise granulométrica, seguida da separação magnética, resultando num total de 13 amostras, das quais 4 foram selecionadas devido sua maior quantidade, sendo três amostras não magnéticas cujas frações são: ( $> 0,088$  mm), ( $> 0,062$  mm) e ( $< 0,062$  mm), sendo apenas uma de natureza magnética também correspondente ao fundo ( $< 0,062$  mm). Antes da análise, as amostras foram pulverizadas para garantir uma identificação mais precisa e eficaz.

Para este procedimento, foi utilizado o difratômetro de raios-X do modelo X'PERT PRO 3 MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60 ( $\theta$ - $\theta$ ) e com tubo de raios-X cerâmico, de ânodo de Cu ( $K\alpha_1=1,540598$  Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kV. Foi usado o filtro  $K\beta$  de Ni. O detector adotado foi o PIXCEL1D, do tipo RTMS (*Real Time Multiple Scanning*), no modo *scanning*. As condições instrumentais utilizadas foram as seguintes: varredura  $4^\circ$  a  $70^\circ$   $2\theta$ , 40 kV, corrente: 40 mA, passo:  $0,02^\circ$   $2\theta$  e tempo/passo: 20 s, fenda fixa (divergente): 1/2 e anti-espalhamento  $1^\circ$ , máscara 10 mm, movimento da amostra: *spinning*, com 1 rotação/s. Estas análises foram feitas no Laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Geociências (IG). A análise dos resultados é processada através de *software* X Pert, que compara o pico de incidência de elétrons com um banco de dados disponível para caracterização dos minerais que constituem a amostra. A seguir, na (Figura 13), a ilustração do difratômetro de raios-X.

Figura 13 - Difratorômetro de raio-X, utilizado na identificação dos minerais presentes na amostra.

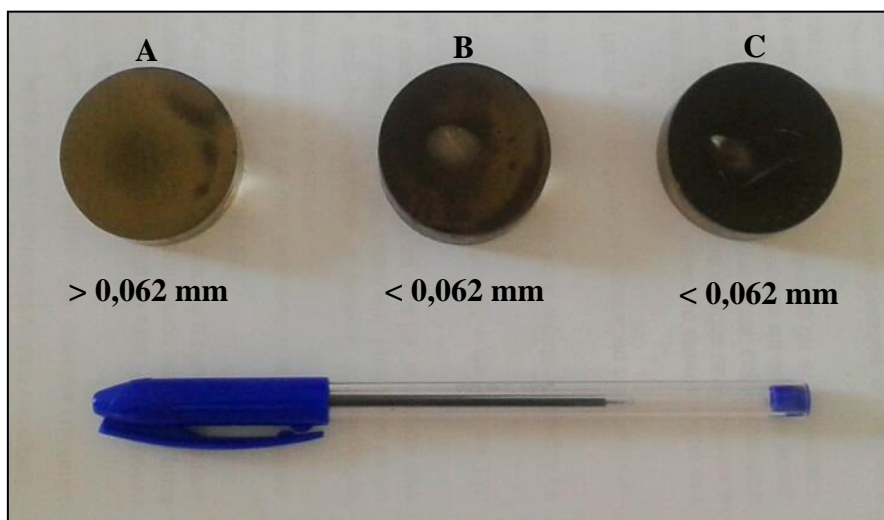


Fonte: Autora

### 5.7 Análise Minerográfica das Frações Granulométricas

Para a análise minerográfica foram confeccionadas três seções polidas (Figura 14), divididas em duas frações granulométricas distintas, 250 mesh ( $> 0,062$  mm) e o fundo ( $< 0,062$  mm), sendo duas amostras não magnéticas correspondentes a fração ( $> 0,062$  mm) e ( $< 0,062$  mm), com apenas uma fração fracamente magnética também equivalente ao fundo ( $< 0,062$  mm). Tal análise, visou observar as partículas do concentrado, identificar a calcopirita e os demais minerais pertencentes ao concentrado de cobre, assim como observar a distribuição destes minerais, nessas frações.

Figura 14 - Seções polidas produzidas para descrição de minerais opacos. Em A e B tem-se minerais não magnéticos e em C minerais de natureza fracamente magnética.



Fonte: Autora

Para confeccionar uma seção polida é necessário seguir alguns passos, como:

- Colocar cuidadosamente a amostra em um anel de PVC, apoiado sobre uma placa de vidro, em seguida a mesma é recoberta por resina epóxi (GY260) e o endurecedor (837 DE) numa proporção de 3:1.
- Após a secagem deste material, inicia-se o processo de lixamento que é feito utilizando-se o aparelho Buehler Automet 250, para que ocorra o nivelamento da seção é preciso usar três tipos de lixa: 800, 1200 e 2500  $\mu\text{m}$ . As seções são então lixadas uma a uma num disco de rotação com abrasivo e água, até alcançar uma superfície lisa e plana.
- Finalmente, a seção recebe o seu polimento por meio de uma lixa especial para este fim, o qual é feito utilizando-se um lubrificante (Arotec). Dessa maneira, após todas estas etapas, a seção está pronta para ser observada no microscópio de luz refletida.

#### 5.7.1 Descrição e Proporção dos Minerais

A descrição dos minerais foi feita segundo PRACEJUS, (2008), Identificando-se cada um dos minerais de acordo com as suas propriedades ópticas como:

- ✓ Cor
- ✓ Reflectância
- ✓ Bi-reflectância
- ✓ Anisotropia

✓ Reflexos internos

Para a identificação e a descrição dos minerais, foi utilizado o microscópio óptico de luz refletida (Figura 15), as seções foram descritas adotando-se três objetivas de aumento (10, 20 e 50). Para estimar a percentagem dos minerais nas seções, selecionou-se a objetiva 10x de aumento, em seguida elegeu-se campos visuais estimando-se as proporções de acordo com os minerais encontrados na área da seção.

Figura 15 - Microscópio óptico de luz refletida, utilizado para descrever as seções polidas.



Fonte: Autora

## 6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

### 6.1 Determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH)

A análise do pH objetivou determinar se a água da chuva em contato com o concentrado de cobre apresentaria alteração desse parâmetro. A partir disso, e de acordo com o resultado, oferecer sugestões a respeito de medidas de tratamento preventivo no manuseio do material, a fim de inibir possíveis consequências nocivas para o meio ambiente, assim como evitar prejuízos durante a manipulação do mesmo, pois eventualmente o concentrado pode ser estocado ao ar livre, e durante o transporte também pode ser exposto à chuva. Os resultados obtidos durante a análise do pH estão na tabela 12, abaixo:

Tabela 12 - Valores obtidos com a análise do pH.

<b>Dia</b>	<b>pH /12:00h/°C</b>	<b>pH/13:00h/°C</b>	<b>pH/14:00h/°C</b>
<b>06/06/15</b>	3,20 - 25,2°	3,11 - 24,7°	3,20 - 25,1°
<b>07/06/15</b>	3,41 - 24,5°	3,48 - 24,6°	3,51 - 24,5°
<b>08/06/15</b>	2,86 - 24,3°	2,82 - 24,7°	2,83 - 24,7°

Fonte: Autora

Baseado nos valores obtidos durante a análise do pH, pode-se dizer que em todos os dias de medição ocorreu flutuação nos valores observados, assim como nos valores de temperatura. No entanto, notou-se que no primeiro dia o pH registrado já se mostrou bastante ácido com um valor de 3,20 e com o passar dos outros dias essa acidez se intensificou ainda mais chegando ao valor de 2,82 com uma média de temperatura de 24,7°C. Devido a variação da temperatura ter sido muito pequena, não foi considerada suficiente para interferir no valor do pH.

De acordo com a (COMPANHIA VALE DO RIO DOCE- CRVD, 2005), o pH do concentrado de cobre que sai da planta de beneficiamento é alcalino, com valor de 8,5, um valor muito diferente do resultado de caráter bastante ácido de valor 2,82, obtido através da análise deste trabalho. Isso pode ser explicado, devido a amostra ter ficado armazenada na UFPA por cerca de 18 meses, um período considerado muito longo, levando-se em conta a umidade própria do material que é de 8 a 9,5%. Tal fato favoreceu a ocorrência de reações

químicas que produziram ácido sulfúrico e tornaram o pH da água em contato com o concentrado bastante ácido.

A água usada no experimento, de pH = 6,09, simulou a água da chuva na Amazônia, tornando-se fortemente ácida (2,82) ao passar 3 dias em contato com o concentrado.

Diante disso, pode-se inferir que o concentrado de cobre não deve permanecer estocado por longo tempo (meses), pois se for colocado em contato com a água da chuva, nestas condições, fará com que esta torne-se muito ácida, como foi observado a partir dos resultados deste trabalho. Recomenda-se que o estoque do concentrado seja feito por pouco tempo, em áreas cobertas e o seu transporte com o uso de cobertura de lona.

## 6.2 Determinação da Umidade

Um dos primeiros parâmetros a ser determinado na caracterização tecnológica de materiais é o teor percentual (%) de umidade presente na amostra. O cálculo da umidade foi feito da seguinte forma: pesou-se a amostra úmida, da maneira como ela estava na saída de planta de beneficiamento, registrando-se uma massa de 500g. Após isso, a mesma foi colocada em estufa a uma temperatura de 60°C para secar durante 24h, então pesou-se novamente para saber quanto de umidade foi perdida. Essa segunda pesagem da amostra seca, registrou uma massa de 455g, daí calculou-se o valor percentual de 9% de umidade. Segundo a (CVRD, 2005), o concentrado de cobre apresenta 8% de umidade, na fase de transporte, valor bastante próximo do determinado neste trabalho. Abaixo, a demonstração do cálculo da determinação da umidade:

$$\text{Peso inicial} - \text{Peso final} = Xg \quad 500g \text{ --- } 100\% \quad X = 9\% \text{ de umidade.}$$

$$500 - 455 = 45g \quad 45g \text{ --- } X\%$$

## 6.3 Determinação da Composição Granulométrica

Para o peneiramento foi utilizado um total de 500 g da amostra, que foi lavada em uma solução de 250 ml de ácido clorídrico a 2% para retirar qualquer possível oxidação da amostra, após isso, a amostra foi lavada com água destilada para remover o HCl, e colocada para secar em estufa a uma temperatura de 60°C durante 48h. Em seguida, o material seco e arrefecido foi pesado, registrando um peso de 442,20 g, mostrando uma perda de 57,80 g (11%) da amostra. Tal perda de valor significativo, justifica-se por se tratar da umidade (9%)

e por ser um material extremamente fino, onde uma parte dele permanece na superfície da água. Esse material sobrenadante é provavelmente formado por calcopirita e reagentes químicos utilizados na fase de beneficiamento do minério, que acabam sendo descartados junto com a água durante a lavagem da amostra. Após o peneiramento as frações granulométricas foram somadas obtendo-se 425,80g, indicando uma perda no peneiramento de 9,81g correspondente a 2,25%.

O objetivo do peneiramento foi determinar quais frações granulométricas constituem o concentrado de cobre, a fim de identificar em qual fração predomina a maior quantidade do concentrado. Os resultados obtidos se encontram na tabela 13, abaixo:

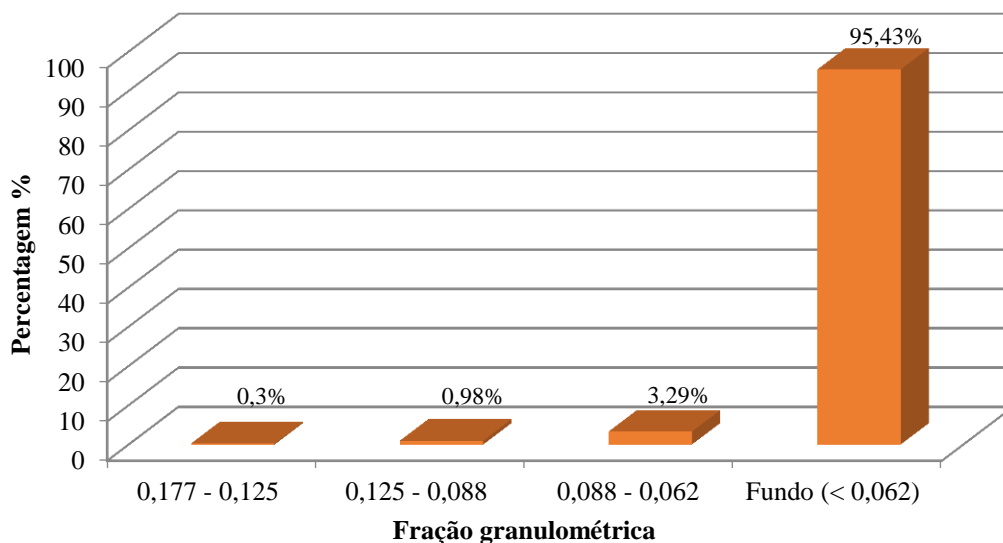
Tabela 13 - Resultados da etapa de peneiramento em peso e percentagem.

Peneira (mm)	Peso da amostra (g)	Peso (%)
0,177 - 0,125	1,26	0,30
0,125 - 0,088	4,19	0,98
0,088 - 0,062	14,01	3,29
Fundo (< 0,062)	406,34	95,43
TOTAL	425,80	100%

Fonte: Autora

De acordo com a tabela 13, a fração granulométrica que concentra a maior quantidade do concentrado é a fração correspondente ao fundo da peneira (< 0,062 mm), com peso percentual de 95,43%. Tal fração é a de menor granulometria, ou seja, o concentrado da mina do Sossego é formado por um material muito fino, na fração silte. Como mostra a figura 16, abaixo:

Figura 16- Gráfico mostrando a distribuição granulométrica do concentrado.



Fonte: Autora

Para comparação, abaixo, tem-se a tabela 14 mostrando a granulometria do concentrado proveniente da cava Sequeirinho (CVRD, 2001).

Tabela 14- Análise granulométrica de concentrados, pertencentes a cava Sequeirinho. A soma das frações < 53  $\mu\text{m}$  é 95,7%, na coluna Retida simples.

Tamanho da partícula em micrômetro	Sequeirinho	
	% Retida simples	% Retida acumulada
74 (Areia muito fina)	4,3	4,3
53 (Silte grosso)	7,8	12,1
44 (Silte grosso)	9,5	21,6
31 (Silte grosso)	15,0	36,6
23 (Silte médio)	15,9	52,5
-23 (Silte fino)	47,5	100,00

Fonte: Modificado de (CVRD, 2001).

#### 6.4 Determinação da Densidade

Por se tratar de um material finamente granulado, o cálculo da densidade do concentrado de cobre torna-se dependente da proporção de espaços vazios entre as partículas da amostra, e da ausência de umidade, pois é necessário que o material em estudo esteja seco.

#### 6.4.1 Densidade Úmida

Para calcular a densidade úmida, não foi necessário que a amostra fosse colocada na estufa, pois o objetivo deste procedimento foi determinar a densidade da amostra da maneira como ela estava, em temperatura ambiente, ou seja, incluindo a umidade aderida nas superfícies das partículas do material. Para isso, utilizou-se uma proveta de 200 ml e 430,84 g de amostra, obtendo-se um valor de densidade de  $2,15 \text{ g/cm}^3$ . Para calcular a densidade, a amostra foi colocada na proveta até atingir 200 ml, após isso, fez-se a diferença de massa do conjunto, registrando-se um valor de 430,84 g, em seguida, calculou-se a relação massa / volume.

Densidade = massa / volume

Massa da amostra: 430,84 g

Volume: 200 ml

$D = 430,84 / 200 = 2,15 \text{ g/ml} = \mathbf{2,15 \text{ g/cm}^3}$

\*  $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3$

#### 6.4.2 Densidade Aparente

Para calcular a densidade aparente foi utilizada a amostra seca em estufa por 24h, e uma proveta de 200 ml. A amostra foi colocada na proveta até atingir o volume de 200 ml, em seguida determinou-se a diferença de massa do conjunto, obtendo-se uma massa de amostra de 352,70 g. Daí, calculou-se a densidade aparente pela relação massa/volume, cujo valor foi de  $1,76 \text{ g/cm}^3$ .

$D = \text{massa da amostra} / \text{volume que amostra ocupa}$

Massa da amostra = 352,70 g

Volume ocupado = 200 ml

$D = 352,70 \text{ g} / 200 \text{ ml} = 1,76 \text{ g/ml} = \mathbf{1,76 \text{ g/cm}^3}$

A densidade aparente determinada acima é muito aproximada daquela divulgada pela (CVRD, 2005), cujo valor é de  $1,7 \text{ g/cm}^3$ . De todo modo este valor tende a aumentar devido à trepidação durante o transporte, pois o concentrado vai ficando mais compactado, ou seja, os espaços vazios entre as partículas vão diminuindo. Ao mesmo tempo, o material vai perdendo umidade devido ao calor do Sol, enquanto é transportado.

### 6.4.3 Densidade Real

Para a determinação da densidade real foram utilizados uma bureta de 25 ml, álcool etílico e um balão volumétrico de 200 ml. A amostra previamente seca em estufa a uma temperatura de 60°C, foi colocada no balão volumétrico até a marca de 200 ml. O conjunto foi pesado e a massa da amostra foi obtida pela diferença entre o peso do conjunto e o peso do balão (inicialmente pesado), tendo como resultado 380,25g. Em seguida, foi adicionado álcool ao balão volumétrico, até a marca de 200 ml, objetivando-se preencher todos os espaços vazios entre as suas partículas, até que a amostra fosse completamente tomada pelo álcool. O fato deste possuir tensão superficial menor que a da água, facilita a percolação do fluido e a expulsão do ar de entre as partículas. Para calcular a densidade real, obteve-se o volume da amostra através da diferença entre o volume do balão volumétrico (200 ml), e o volume de álcool utilizado (110 ml).

Densidade = massa da amostra / volume

Massa da amostra: 380,25g

Volume: 110 ml de álcool

$V = 200 \text{ ml} - 110 \text{ ml} = 90 \text{ ml}$  da amostra

$D = 380,25 / 90 = 4,22 \text{ g/ml} = \mathbf{4,22 \text{ g/cm}^3}$

O resultado da densidade real ficou dentro da amplitude encontrada normalmente para o mineral calcopirita, entre 4,1 a 4,3 g/cm<sup>3</sup>.

O valor de densidade do concentrado divulgado pela (CRVD, 2005), é de 4,1g/cm<sup>3</sup>. Considerando que o concentrado não é composto por calcopirita pura, (~90% de calcopirita, neste trabalho), e que ocorrem também cerca de 10% de outros minerais, os resultados obtidos são bastante coerentes.

A densidade aparente, assim como a densidade úmida, foram determinadas a partir da medição do volume da amostra, sua pesagem, mais os espaços vazios existentes entre as suas partículas. No entanto, para encontrar a densidade aparente necessitou-se que o material fosse seco em estufa, antes da execução da etapa. Já para a determinação da densidade úmida não foi preciso, pois neste caso, considera-se a água existente no concentrado.

A densidade real apresenta maior valor que a aparente e a úmida, devido ao fato de ser a média ponderada das densidades dos minerais que compõem a amostra, principalmente a calcopirita que constitui 83% do concentrado (CRVD, 2005), e provavelmente sofreu

influência de minerais pesados como a magnetita cuja densidade é de  $5,1 \text{ g/cm}^3$  e dos outros minerais que acompanham a calcopirita.

O estudo da densidade é de grande relevância, pois é necessário conhecer o concentrado, para determinar quais métodos operacionais serão aplicados para a manipulação desse material, e quais equipamentos serão utilizados para transportá-lo, objetivando-se adequar a capacidade e a força do maquinário adotado. De acordo com os dados obtidos, o concentrado que é manuseado apresenta de fato densidade úmida de  $2,15 \text{ g/cm}^3$ , bem como densidade aparente de  $1,76 \text{ g/cm}^3$ , logo, quanto mais seco o material estiver, menor será a densidade e a energia para manuseá-lo. A seguir, na tabela 15, um resumo dos valores de densidade obtidos:

Tabela 15 - Resultados dos valores de densidade

Material	Densidade úmida	Densidade aparente	Densidade real
Concentrado	$2,15 \text{ g/cm}^3$	$1,76 \text{ g/cm}^3$	$4,22 \text{ g/cm}^3$

Fonte: Autora

## 6.5 Determinação dos Minerais Magnéticos

Para a determinação dos minerais magnéticos foi utilizado um total de 425,80g da mesma amostra usada durante a separação granulométrica, da qual foram retirados, com ímã de mão, os minerais ferromagnéticos de cada uma das 4 frações granulométricas. Após a separação magnética a soma do peso de todas as frações foi de 422,51g indicando uma perda de 3,29g (0,77%) durante todo o procedimento de separação dos minerais magnéticos.

A separação magnética dos minerais objetivou determinar em qual das frações granulométricas ocorre uma tendência de maior concentração de minerais magnéticos, para separá-los, e assim diminuir tais espécies minerais durante a análise por difração de raio-X. Inicialmente foi passado o ímã de mão para remover a magnetita e a pirrotita, que totalizam um peso de 1,59g, distribuídos na coluna “minerais ferromagnéticos” da tabela 16. Em seguida utilizou-se o separador magnético Frantz para determinar as frações não magnéticas e as frações fracamente magnéticas de acordo com a tabela 16, abaixo:

Tabela 16 - Resultado das frações granulométricas após a separação magnética.

Fração (mm)	Massa amostra(g)	Amostra em %	Não Mag.(g)	Peso %	Fracamente mag.(g)	Peso %	Ferro Mag.(g)	Peso %	$\Sigma$ Peso %
> 0,125	1,19	0,28	0,17	14,29	0,87	73,10	0,15	12,61	100
> 0,088	3,92	0,93	0,15	3,83	3,45	88,01	0,32	8,16	100
> 0,062	13,84	3,28	0,61	4,41	12,36	89,31	0,87	6,28	100
< 0,062	403,56	95,51	149,67	37,09	253,64	62,85	0,25	0,06	100
Total	422,51	100	150,60	35,64	270,32	63,98	1,59	0,37	100

Fonte: Autora

A amostra analisada apresentou (magnetita + pirrotita) em todas as frações, sendo a maior quantidade percentual naquela ( $> 0,125$  mm), que corresponde à primeira peneira do conjunto utilizado, com peso de 0,15g e percentual de 12,61%. Na tabela 16, observou-se ainda que a magnetita tende a diminuir percentualmente, à medida que a fração granulométrica vai se tornando mais fina. Esse comportamento de magnetita certamente é devido à sua maior dureza em comparação com os demais minerais do concentrado, embora sua concentração absoluta seja baixa, com percentual de 0,37%.

Com relação aos minerais fracamente magnéticos, dentre eles a calcopirita, notou-se que predominam em todas as frações e sua maior concentração está localizada na fração correspondente a peneira ( $> 0,062$  mm), com 12,36g e peso percentual de 89,31%. Esses minerais constituem (63,98%) do concentrado. Já os minerais não magnéticos, concentraram-se na fração ( $< 0,062$  mm), equivalente ao fundo das peneiras com 149,67g e peso percentual de 37,09%. Sua participação no concentrado é de (35,64%).

O separador magnético Frantz, com a calibração (0,5 – 1,5 T), não conseguiu separar completamente a calcopirita para a fração fracamente magnética. As análises minerográficas demonstraram que há cerca de 90% de calcopirita tanto na fração não magnética como na fracamente magnética. Isso significa que outros minerais ocorrem intercrecidos com a calcopirita, determinando o seu comportamento magnético, ou seja, a calcopirita foi separada de maneira similar entre os grupos dos minerais não magnéticos e fracamente magnéticos, devido aos minerais com os quais estava agregada. Para que essa separação seja mais efetiva, recomenda-se estreitar a faixa de calibração do Frantz.

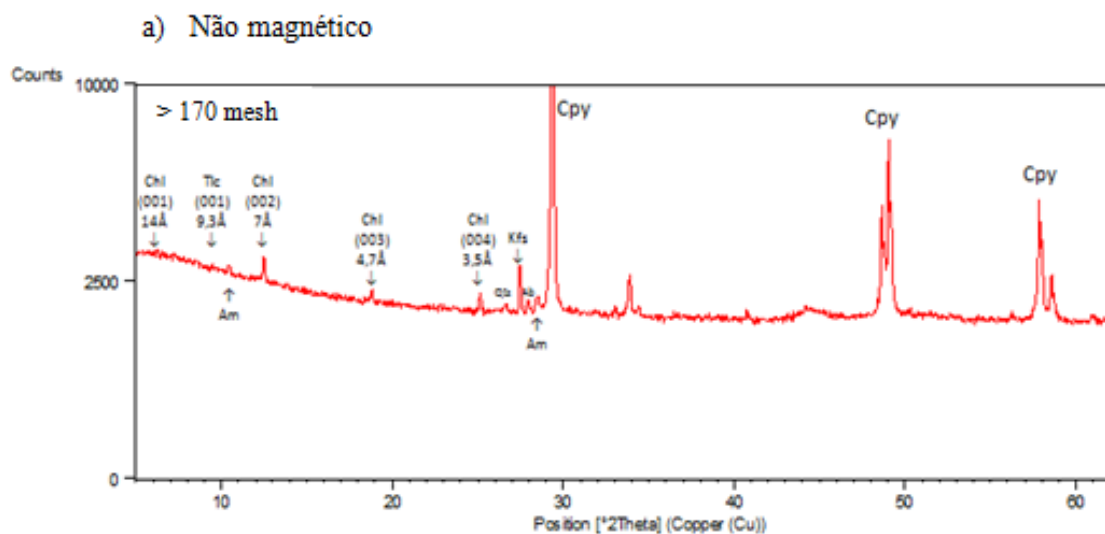
## 6.6 Determinação da Composição Mineralógica por Difração de Raios -X

Embora a DRX não seja um método quantitativo, foi feita uma aproximação para estimar as proporções relativas dos minerais presentes. Para identificar os minerais que compunham o material em estudo, selecionou-se quatro amostras representando três frações granulométricas, sendo três não magnéticas cujas frações são: 170 mesh ( $> 0,088$  mm), 250 mesh ( $> 0,062$  mm) e fundo ( $< 0,062$  mm) e somente uma de caráter fracamente magnético equivalente ao fundo ( $< 0,062$  mm). Esse material é o mesmo que passou pela separação magnética.

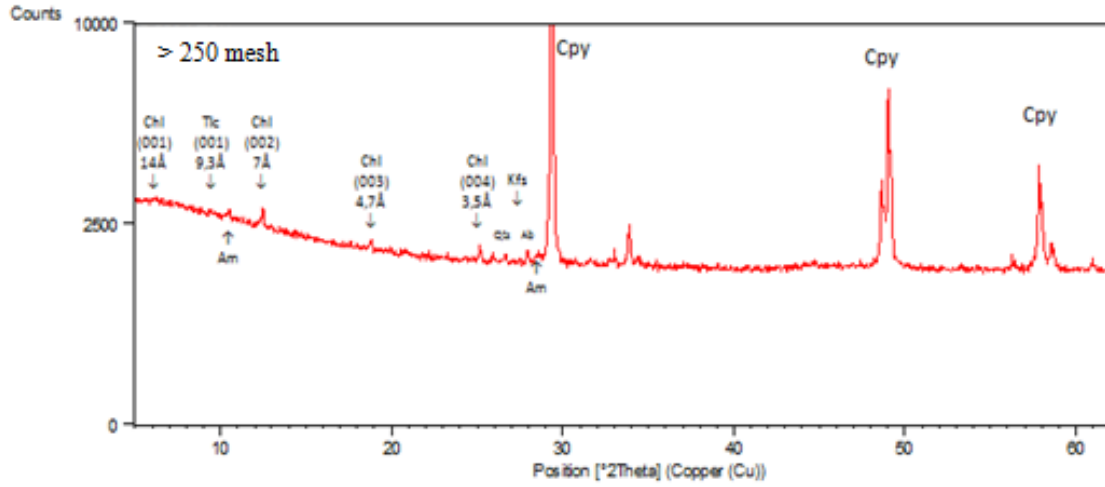
Os espectros obtidos, através da análise por difração de raios-X, do concentrado de cobre mostram os principais constituintes mineralógicos presentes na amostra, tanto nas frações não magnéticas quanto na fracamente magnética. Os minerais que foram identificados estão listados abaixo em ordem decrescente, segundo a proporção resultante da análise de difração:

- 1) Calcopirita -  $\text{CuFeS}_2$
- 2) Clorita -  $(\text{Mg,Al,Fe})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$
- 3) Hornblenda -  $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg,Fe})_4(\text{Al,Fe,Ti})\text{AlSi}_8\text{AlO}_{22}(\text{OH},\text{O})_2$
- 4) K-feldspato -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
- 5) Talco -  $\text{Mg}_6(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4$
- 6) Albita -  $(\text{Na}_{1-0,9},\text{Ca}_{0-0,1})\text{Al}(\text{Al}_{0-0,1},\text{Si}_{1-0,9})\text{Si}_2\text{O}_8$
- 7) Quartzo -  $\text{SiO}_2$

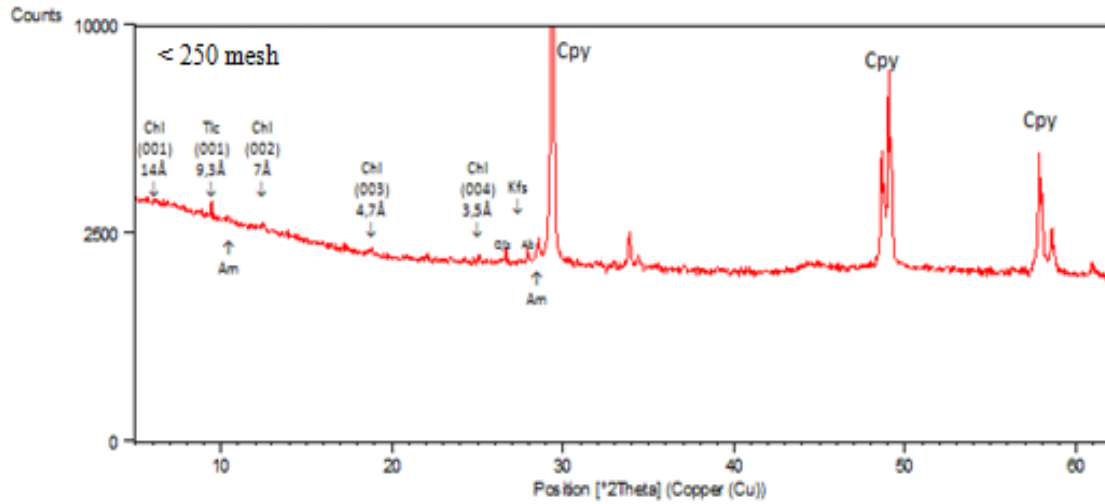
A seguir os espectros de difratometria de raios-X:



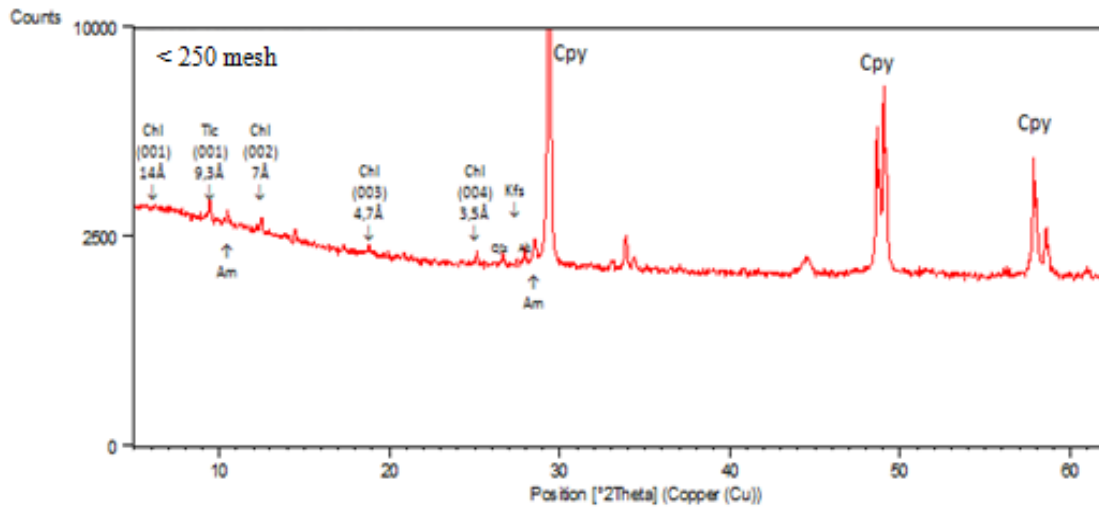
b) Não magnético



c) Fracamente magnético

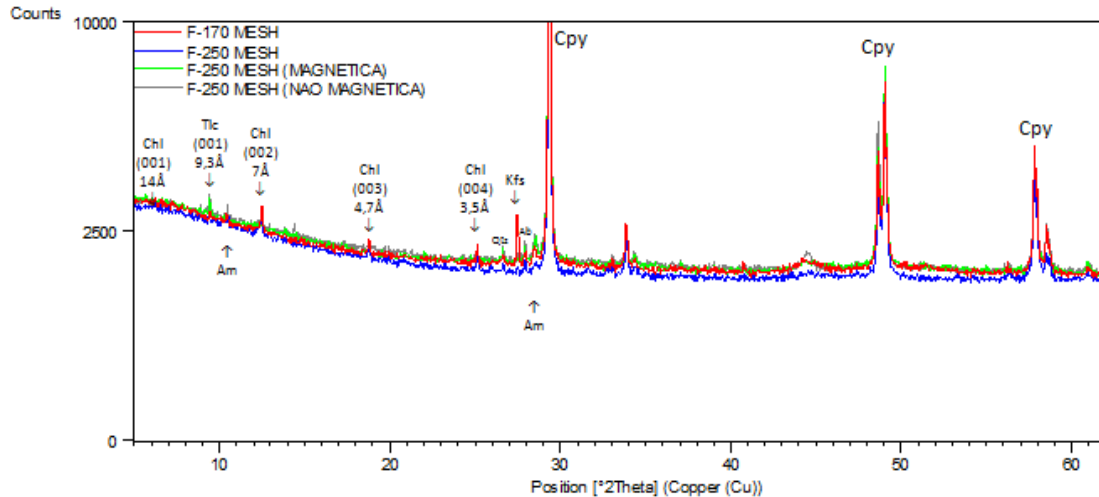


d) Não magnético



Abaixo na figura 17, tem-se todos os espectros de difração de raios-X das amostras em diferentes frações granulométricas, em ordem de abundância dos minerais identificados.

Figura 17 - Cpy - Calcopirita, Clh - clorita, Am- Anfibólio (hornblenda?), Kfs - k-feldspato, Tlc - talco, Ab - albita, e Qtz - quartzo.



Fonte: Laboratório de DRX.

Com base nas análises de difração de raios-X, no que diz respeito ao conteúdo mineralógico identificado, pode-se concluir que as diferentes frações do concentrado apresentam as mesmas composições mineralógicas, todavia, ocorrem de maneira variada segundo cada fração granulométrica, nas quais os maiores picos são correspondentes a maior predominância do mineral existente na amostra, neste caso, a calcopirita que constitui o principal mineral minério de cobre.

Outro mineral de presença marcante na amostra foi a clorita, seguida do anfibólio (hornblenda), k-feldspato, talco, albita e quartzo. Na fração dita magnética, não observou-se magnetita, pois antes da realização da DRX, foi passado o ímã de mão na amostra para retirar os fragmentos de magnetita, e desta forma evitar possíveis interferências ferromagnéticas ao longo da análise. Durante a separação magnética, por meio do ímã de mão, inúmeros fragmentos de minerais como clorita, quartzo e calcopirita foram atraídos, o que indica a presença de inclusões de magnetita em outros minerais, conforme já observado em lupa binocular.

De posse da interpretação mineralógica através da DRX, é possível verificar que em relação a tabela 5- *Composição mineralógica do minério processado na usina do Sossego*, ocorreu uma variação na composição mineral em relação ao concentrado de cobre. No concentrado destaca-se a presença de calcopirita, clorita, anfibólio, feldspato, quartzo,

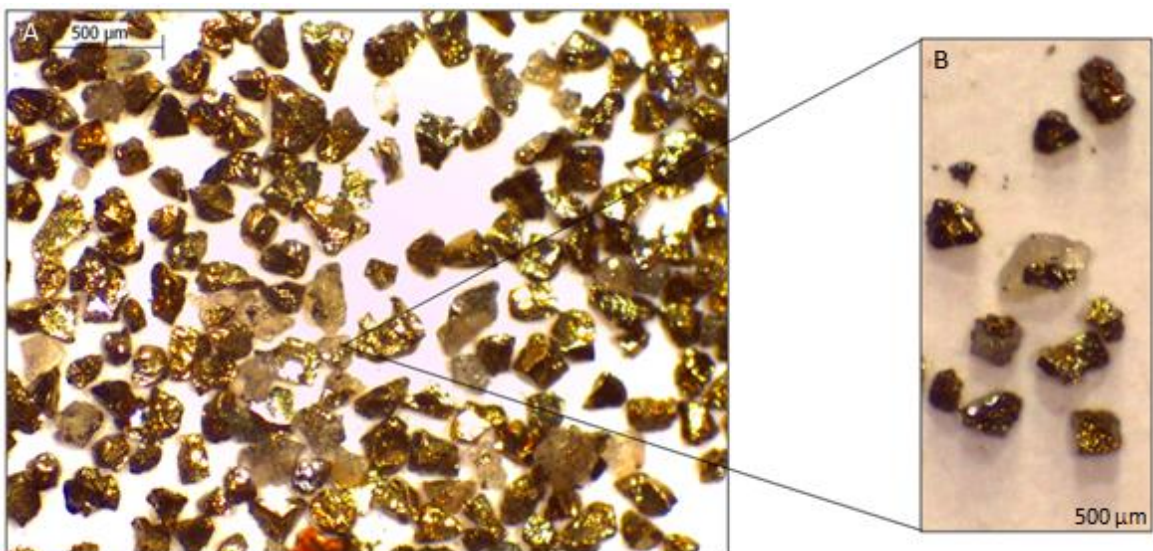
magnetita, bornita e hematita, enquanto que no minério ocorrem além desses, a biotita, carbonatos e epidotos, os quais não foram identificados nesta etapa de trabalho.

## 6.7 Descrição do Concentrado de Cobre

### 6.7.1 Descrição da Amostra Através de Lupa Binocular

Para realizar a descrição em lupa binocular utilizou-se a fração mais grossa, que corresponde a 120 mesh ( $> 0,125$  mm), pois esta possui fragmentos minerais maiores facilitando sua observação e identificação (Figura 18). A fração em análise apresenta em geral, cor cinza escuro com tonalidade levemente dourada, possui homogeneidade quanto ao tamanho dos fragmentos que encontram-se bem desagregados, podendo-se observar bem a superfície dos fragmentos. Tais fragmentos apresentam cores e formas variadas, visto que observou-se fragmentos dourados, de forte brilho e forma subédrica, caracterizando a calcopirita, fragmento mais abundante da amostra com cerca de 55%. Além destes, visualizou-se fragmentos também dourados, porém mais claros e com brilho mais intenso podendo se tratar da pirita, com 20%. Na amostra ocorre ainda, o quartzo com 15%, apresentando brilho vítreo, fratura conchoidal, forma anedral e cores variadas como branco, rosa, incolor, amarelo e avermelhado. O quartzo por vezes apresenta inclusão de calcopirita nos seus fragmentos. Em proporções menores têm-se a bornita com 5%, de coloração arroxeadada, possui brilho discreto e fragmentos angulosos, seguida de fragmentos verdes claros, podendo ser o anfibólio 3%, de brilho vítreo, forma subédrica com inclusões frequentes de calcopirita. Por fim, notou-se raramente fragmentos angulosos de tonalidade prateada (2%), e brilho metálico intenso podendo ser a hematita.

Figura 18 - Em A, tem-se a amostra observada a partir de lupa binocular, em B, dá-se ênfase para as frequentes inclusões de calcopirita nos fragmentos de quartzo.



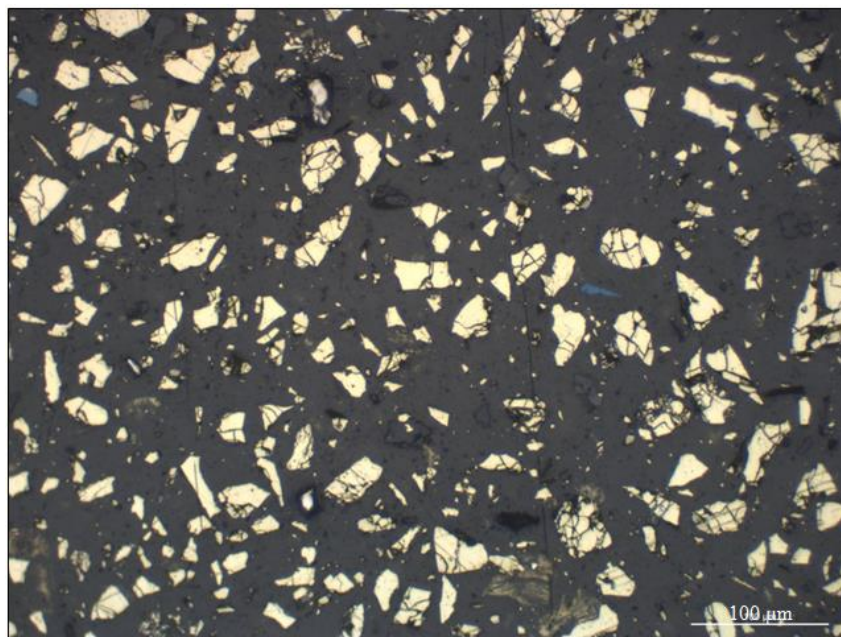
### 6.7.2 Descrição Minerográfica das Seções Polidas

Como já era previsto o mineral mais abundante encontrado nas seções polidas foi a calcopirita, todavia também observou-se outros minerais em menores proporções como: quartzo, bornita, hematita e pirrotita, ou seja, nas três seções analisadas foram identificados basicamente a mesma composição mineralógica, diferindo somente em estimativa percentual. Na seção dita magnética, não foi possível observar fragmentos de magnetita, já que o ímã de mão foi utilizado antes da sua confecção, ocasionando a remoção da grande maioria destes fragmentos.

#### 1) $F < 0,062$ mm (Fundo), fração não magnética:

Em todas as seções polidas o mineral predominante observado é a calcopirita, a seção em análise apresenta cerca de (90%) destes fragmentos, embora também ocorram outras espécies minerais. Seguindo com as observações e com base nas propriedades ópticas foi possível identificar os minerais como: pirrotita (4%), quartzo (2%), bornita (1%) e hematita ( $< 1\%$ ). Além disso, observou-se alguns aglomerados de fragmentos (2%), dos mesmos minerais pertencentes à seção, isto acontece devido a amostra apresentar granulometria muito fina facilitando a formação desses aglomerados. Raramente visualizou-se inclusões de quartzo nos fragmentos de calcopirita. Na Figura 19, tem-se a visão geral de uma seção.

Figura 19 - Observa-se o aspecto geral da seção polida pertencente a fração  $< 0.062$  mm. não

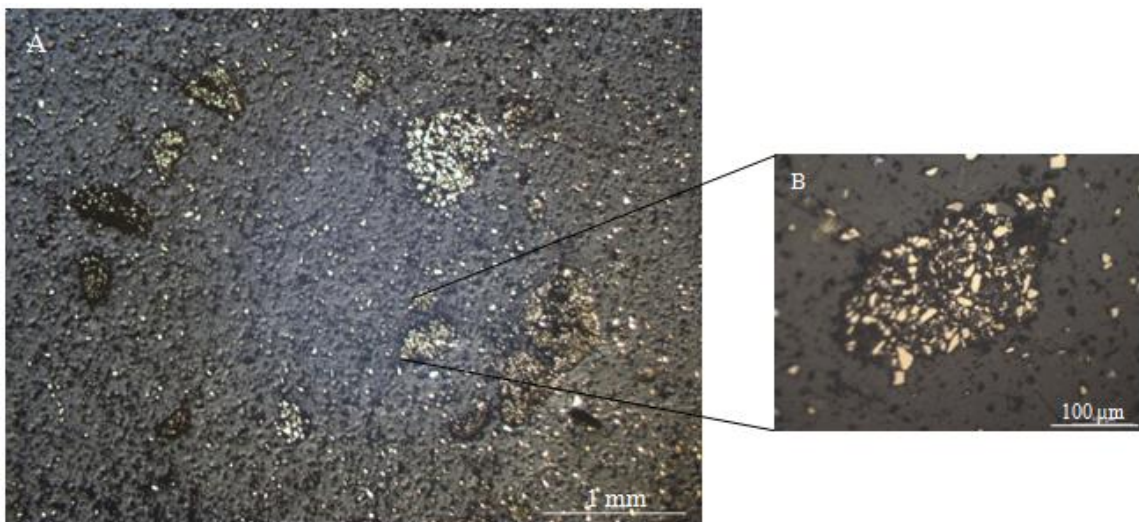


Fonte: Autora

2)  $F < 0,062$  mm (Fundo), fração fracamente magnética:

A descrição a seguir é basicamente a mesma da anterior, no entanto ocorrem algumas variações no que diz respeito à estimativa percentual dos fragmentos minerais presentes nesta seção. O fragmento mais abundante observado, assim como na outra seção é a calcopirita, perfazendo aproximadamente (93%) da amostra, seguidos de quartzo (3%), pirrotita (1%) e hematita ( $< 1\%$ ). Os fragmentos de calcopirita apresentam inclusões frequentes de quartzo, ocorrendo ainda aglomerados (2%), dos variados fragmentos minerais existentes na amostra, (Figura 20). Não foram observados fragmentos de magnetita, visto que utilizou-se o ímã de mão antes de sua confecção, o que pode ter ocasionado a retirada quase total destes fragmentos, podendo-se considerar a hipótese de inclusões de magnetita nos fragmentos de calcopirita, justificando o seu comportamento magnético.

Figura 20 – Em A, tem-se uma visão ampla da seção polida de fração  $< 0,062$  mm, fracamente magnética. Em B, dá-se ênfase para o aglomerado formado possivelmente pela granulometria ser extremamente fina.

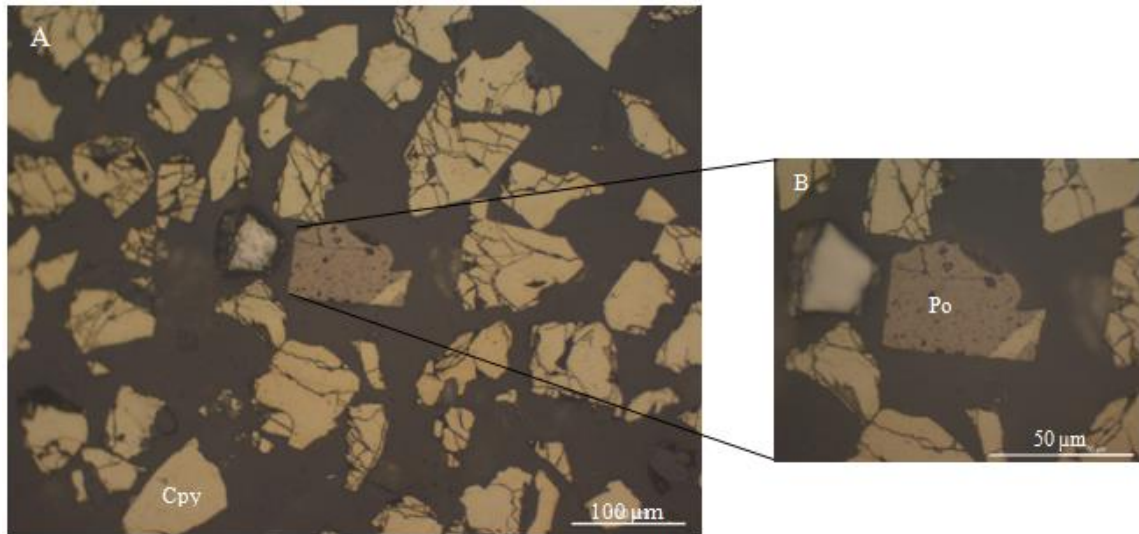


Fonte: Autora

3)  $F > 0,062$  mm, minerais não magnéticos:

Desta vez, a fração apresenta granulometria um pouco maior em relação as outras, o que dificulta a formação de aglomerados não sendo possível a sua visualização nesta seção. Como já foi dito anteriormente, a descrição é bastante similar permanecendo a calcopirita como fragmento mais numeroso com percentual em torno de (90%), ocorrendo também fragmentos de quartzo (4%), pirrotita (3%) algumas vezes associadas aos fragmentos de calcopirita como forma de intercrescimento (Figura 21), hematita (2%) e alguns fragmentos de cor azul podendo tratar-se da bornita (1%), oxidada.

Figura 21 - Seção polida de fração > 0,062 mm, não magnéticos. Em A, tem-se inúmeros fragmentos de calcopirita (Cpy), e em B, destaca-se um fragmento de pirrotita (Po) com intercrescimento de calcopirita.

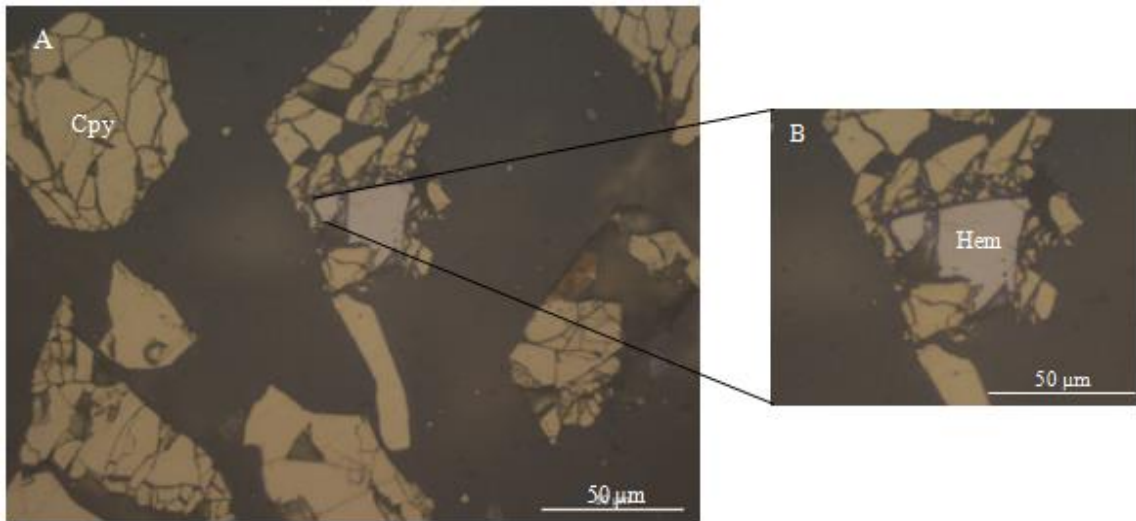


Fonte: Autora

### Descrição dos Minerais

- a) **Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ):** Trata-se de um sulfeto hidrotermal com disseminações em rochas ígneas, apresenta cor amarelo dourado, com reflectância média (38,69 - 39,80%), bi-reflectância fraca, anisotropia fraca e reflexos internos ausentes.
- b) **Pirrotita ( $\text{FeS}$ ):** Ocorre em rochas ígneas e metamórficas, os fragmentos observados na seção polida apresentam tonalidade creme levemente amarronzado, com reflectância (36,91 - 41,56%), bi-reflectância distinta, anisotropia muito forte e reflexos internos ausentes.
- c) **Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ):** Pode ocorrer em ambientes magmáticos, hidrotermais, metamórficos e sedimentares. Apresenta tonalidade branca (Figura 22), com reflectância (26 - 29,64%), bi-reflectância distinta, anisotropia cinza acastanhado e reflexos internos vermelhos escuro, tipo sangue.

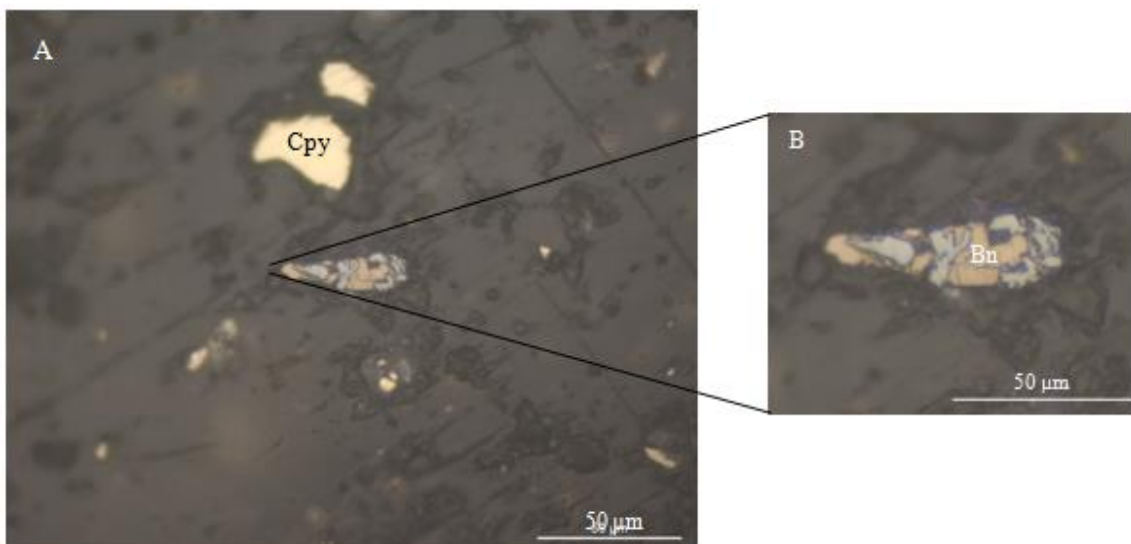
Figura 22: Seção polida de fração > 0,062 mm, não magnéticos. Em A, observa-se fragmentos de calcopirita (Cpy), com inclusão de hematita (Hem). Em B, destaca-se tal inclusão.



Fonte: Autora

- d) Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ):** Se desenvolve em ambiente geológico proveniente de intrusões ígneas, veios de minério hidrotermal de Cu, produto de alteração de minerais de Cu. Possui tom rosado (Figura 23), com reflectância (25.08%), bi-reflectância fraca, anisotropia fraca e reflexos internos ausentes.

Figura 23 - Seção polida de fração < 0,062 mm (fundo), fracamente magnética. Em A, observa-se fragmentos de calcopirita (Cpy), e bornita (Bn). Em B, destaca-se tal fragmento apresentando oxidação.



Fonte: Autora

**Teor de Cobre (Cu):**

Com relação ao teor de cobre, de acordo com (CVRD, 2005), o concentrado apresenta teor que varia no intervalo de 26 a 34%, comparado ao teor de cobre de uma calcopirita comum, cujo valor teórico é de até 34%, verifica-se uma grande semelhança entre os valores. A diferença para o menor valor (26%) é devida ao concentrado não ser constituído apenas por calcopirita, já que existem minerais de ganga na ordem de aproximadamente 10%, que fazem com que o teor de cobre seja menor.

Para determinar o teor de cobre teórico é necessário calcular a massa molecular de cada elemento químico da calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ):

$$\text{Cu} = 63,55$$

$$\text{Fe} = 55,85$$

$$\text{S} = 2 \times 32 = 64$$

Em seguida, somam-se estes valores e tem-se um total de:

$$63,55 + 55,85 + 64 = 183,40 \text{ (Massa molecular da calcopirita)}$$

Após isso relaciona-se o valor total em uma regra de três simples para cada elemento da fórmula química, calculando-se os respectivos valores de Cu, Fe e S, cujos resultados são:

$$\text{Cu} = 34,65\%$$

$$\text{Fe} = 30,45\%$$

$$\text{S} = 34,90\%$$

A elevada presença de calcopirita no concentrado, da ordem de 83% (CVRD, 2005) a 90% (deste trabalho), seria a causa do teor de cobre ser tão próximo daquele determinado teoricamente da calcopirita pura. Ou seja, o processo de flotação é extremamente eficiente na extração do cobre do minério.

## 7 CONCLUSÕES

O estudo da caracterização tecnológica do concentrado de cobre da mina do Sossego, foi desenvolvido nos laboratórios do IG da UFPA. A disponibilidade de aparelhos e equipamentos permitiu determinar 7 características, tais como: 1- pH da água em contato com o concentrado; 2- Granulometria; 3- Densidade; 4- Presença de minerais magnéticos; 5- Composição mineral por DRX; 6- Análise minerográfica e 7-Umididade. A partir disso, passou-se a conhecer melhor suas características, para contribuir com a administração do manuseio do material, além de compreender as transformações que ocorreram com o minério durante o beneficiamento.

A partir da análise em lupa binocular, observou-se que o concentrado apresenta em geral, cor dourada levemente cinza escuro, e a calcopirita caracteriza-se por ser o sulfeto mais importante e abundante do material, com cerca de 90%. Parte dos fragmentos de calcopirita possuem frequentes inclusões de quartzo e de magnetita, pois tais fragmentos foram atraídos fortemente pelo ímã de mão.

Conforme o estudo realizado foi possível concluir que:

- a) A água usada na etapa determinação do pH, simulou a água da chuva na Amazônia em contato com o concentrado de cobre, que apresentou um pH de caráter muito ácido 2,82. Isto ocorreu devido a amostra do concentrado utilizada no trabalho ter ficado estocada na UFPA por mais de 1 ano, diferentemente do que acontece na realidade, pois o pH na saída da planta de beneficiamento, (CVRD, 2005), possui natureza alcalina de 8,5. Logo, devido tratar-se de um material rico em calcopirita, não deverá permanecer por muito tempo estocado e ser exposto à chuva ou umidade, sendo necessário seu armazenamento em local fechado, utilizando-se lonas de proteção, para o transporte, como recomendado pela Vale.
- b) Segundo a (CVRD, 2005), o concentrado de cobre apresenta 8% de umidade, um valor perfeitamente coerente e muito próximo daquele obtido no presente trabalho, de 9%, apesar de ter sido determinado algum tempo após a coleta, em torno de 1 ano. Acerca do teor de cobre do concentrado, divulgado pela (CVRD, 2005), que varia no intervalo entre (26 - 34%), pode-se dizer que trata-se de um valor muito semelhante em relação àquele calculado a partir de uma calcopirita teórica, cujo valor é de 34%.
- c) As frações granulométricas que compõem o concentrado correspondem a 120 mesh (< 0,177 e > 0,125 mm), 170 mesh (< 0,125 e > 0,088 mm), 250 mesh (< 0,088 e > 0,062

mm) e o fundo da bateria de peneiras ( $< 0,062$  mm). Portanto, observou-se que o concentrado de cobre possui granulometria muito fina (silte), apresentando predominantemente a fração ( $< 0,062$  mm), equivalente a 95,43% em peso. Com menores proporções em peso, o concentrado ocorre também na fração ( $> 0,125$  mm) com 0,30%, seguida da fração ( $> 0,088$  mm) com 0,98% e fração ( $> 0,062$  mm) com 3,29%. Vale ressaltar que durante a lavagem do concentrado houve uma perda significativa de 11% da amostra, isto ocorreu devido à perda de umidade (9%) e aos produtos químicos que são aplicados durante o processo de flotação do minério, fazendo com que parte do material permaneça na superfície da água de lavagem, que é descartada. Embora tenha sido utilizada diferentes frações granulométricas, os dados deste trabalho corroboram com os dados da (CVRD, 2005).

- d) A densidade real do concentrado é de  $4,22$  g/cm<sup>3</sup>, pois corresponde à média ponderada das densidades dos minerais que o constituem, desconsiderando-se os espaços vazios existentes entre as partículas e a umidade. Como a calcopirita representa 83% do concentrado de cobre (CVRD, 2005), e (90% segundo este trabalho), a densidade real deve ser próxima do valor da densidade desse mineral, (4,1 a 4,3), como de fato acontece. A densidade úmida foi de  $2,15$  g/cm<sup>3</sup>, neste caso, os espaços existentes entre as partículas foram considerados e a água aderida na superfície dos fragmentos também, visto que a amostra foi analisada sem antes ser colocada em estufa para secar. Já a densidade aparente foi de  $1,76$  g/cm<sup>3</sup>, porém, desta vez a amostra foi colocada em estufa para a retirada de toda e qualquer umidade que pudesse estar presente, antes de sua análise. Logo, conclui-se que quanto mais seco o concentrado estiver, menor será sua densidade, assim como a energia necessária para o seu manuseio.
- e) A separação magnética, objetivou retirar os minerais de natureza ferromagnética como a magnetita, afim de evitar possíveis interferências durante a análise de difração de raios-X, além de selecionar os fragmentos de calcopirita, que constitui o real interesse do presente trabalho. Observa-se que a magnetita se encontra de modo mais abundante na fração 120 mesh ( $> 0,125$  mm), com 0,15g equivalentes a 12,61% desta fração e a calcopirita na fração ( $> 0,062$  mm), com 12,36g e 89,31% da fração. Os minerais não magnéticos concentraram-se na fração ( $< 0,062$  mm), com 149,67g e 37,09%. De acordo com a tabela 16, a partir dos resultados listados acima, pode-se afirmar que em todas as frações predominam os minerais fracamente magnéticos, caracterizados pela presença abundante dos fragmentos de calcopirita, conforme o esperado. Além disso, a fração dita não

magnética também mostrou um resultado notável destes fragmentos, devido às inúmeras inclusões de quartzo, anfibólio e clorita observados em lupa binocular, podendo-se concluir a partir das descrições minerográficas, que as seções polidas de caráter não magnético, apresentaram até 90% de calcopirita, pela mesma razão.

- f) A partir da análise de difração de raios-X, foi possível identificar os minerais que constituem o concentrado de cobre, cuja composição é formada principalmente por calcopirita, mineral minério responsável pelo valor comercial do concentrado, seguido de clorita, anfibólio, k-feldspato, talco, albita e quartzo. Com base na tabela 5- *Composição mineralógica do minério processado na usina do Sossego*, conclui-se que a partir do beneficiamento do minério, houve uma diminuição dos minerais de ganga como: quartzo, feldspato, clorita, magnetita e anfibólio, enquanto que a calcopirita aumentou, acompanhada de alguns outros minerais como a bornita, pirrotita e a hematita. Neste trabalho, minerais como biotita, carbonato e epidoto não foram identificados, embora constem na composição mineralógica do minério. Logo, infere-se que foram descartados como rejeito durante o processo de flotação.
- g) As seções polidas foram descritas a partir da utilização do microscópio óptico de luz refletida, e como já foi citado o mineral mais abundante observado foi a calcopirita com aproximadamente 90% em cada uma das frações granulométricas, magnéticos ou não, observadas em seções polidas. Tal estimativa foi feita visualmente, baseada na observação dos campos do microscópio, comparando-se com a tabela de estimativa percentual de minerais. Além disso, as seções polidas confirmaram intercrescimentos, dado que na fração mais grossa (> 0,062 mm), principalmente, visualizou-se através de lupa binocular fragmentos de calcopirita associados a fragmentos de quartzo, anfibólio e clorita, e raramente também foi possível observar inclusão de pirrotita. Dessa forma, conclui-se que a calcopirita encontra-se dispersa em todas as seções juntamente com cerca de 10% de fragmentos angulosos de outros minerais. A presença de fragmentos compostos por calcopirita associada a outros minerais, inclusive magnetita e pirrotita, explica o comportamento do concentrado durante a separação magnética com o Frantz.

A seguir, tem-se a tabela 17 com a apresentação das Características Tecnológicas do Concentrado de Cobre, ou seja, tratam-se dos resultados obtidos durante a execução deste trabalho, juntamente com os dados pertencentes a (CVRD, 2005), para efeito de comparação.

Tabela 17- Resultados obtidos durante as etapas de análise

<b>Características Tecnológicas do Concentrado de Cobre</b>			
<b>Dados deste trabalho</b>			<b>(CVRD, 2005)</b>
<b>pH</b>	2,82 ácido		8,5 alcalino
<b>Umidade</b>	9%		8%
	Úmida	2,15 g/cm <sup>3</sup>	
<b>Densidade</b>	Aparente	1,76 g/cm <sup>3</sup>	1,7 g/cm <sup>3</sup>
	Real	4,22 g/cm <sup>3</sup>	4,1 g/cm <sup>3</sup>
<b>Análise Granulométrica</b>			
<b>Dados deste trabalho</b>		<b>(CVRD, 2001)</b>	
<b>Fração (mm)</b>	<b>Peso %</b>	<b>% Retida simples</b>	<b>Granulometria</b>
0,177 - 0,125	0,30%		Areia fina
0,125 - 0,088	0,98%		Areia muito fina
0,088 - 0,062	3,29%	4,3%	Areia muito fina
Fundo (< 0,062)	95,43%	95,7%	Silte
<b>Análise de Minerais Magnéticos deste trabalho</b>			
<b>Classe</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Peso %</b>	<b>Concentração total</b>
Ferromagnéticos	0,177 - 0,125	12,61%	0,37%
Fracamente magnéticos	0,088 - 0,062	89,31%	63,98%
Não magnéticos	Fundo (< 0,062)	37,09%	35,64%
<b>Composição Mineralógica</b>			
<b>Por difração de raios-X</b>		<b>(CVRD, 2005)</b>	
Calcopirita, clorita, anfibólio, k-feldspato,		Calcopirita, bornita, calcocita, covelita	
talco, albita e quartzo.		Pirita e quartzo	
<b>Composição Mineralógica deste trabalho (Minerografia)</b>			
Calcopirita, pirrotita, hematita e bornita.			

Continuação da tabela- 17

Teor de cobre (Cu)	Calcopirita comum	(CVRD, 2005)
	34%	26 - 34%

Fonte: Autora

### Comentários Finais

O cobre é o terceiro metal mais utilizado no mundo, ficando atrás somente do ferro e do alumínio, ou seja, é uma das commodities mais solicitadas comercialmente tanto nacional como internacionalmente, pois trata-se de um bem mineral muito importante para a sociedade como um todo. No entanto, o Brasil poderia investir mais no setor metalúrgico e na transformação industrial, para produzir metal de cobre diminuindo seu perfil exportador de matéria prima semi-elaborada, como o concentrado de cobre, e assim diversificar sua economia.

Sem dúvida o trabalho desenvolvido contribuiu bastante para o aprendizado por parte da autora, haja vista a relevância das informações obtidas acerca do concentrado de cobre, visando enriquecer o conhecimento sobre este material tão necessário, e sobretudo no que se refere ao seu manuseio segundo suas especificações. Além da satisfação de estar colaborando para esta linha de pesquisa de sobremaneira importante que é a geologia econômica, através da produção deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L.C.M. **Mecânica: minerais metálicos e não metálicos**. Espírito Santo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, SENAI, 1996.
- AUGUSTO R.; MONTEIRO, L.; XAVIER, R.; SOUZA FILHO, C. Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA). **Revista Brasileira de Geociências**, SBG, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 263-277, jun. 2008.
- AVELAR, V; LAFON, J.; CORREIA JR.; F.; MACAMBIRA, E. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 4, p. 453-460, 1999.
- BERGERMAN, M.B. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego**. 2009. 207f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BRASIL MINERAL. **As maiores empresas do setor mineral**. São Paulo: Brasil Mineral; Mineração-Metalurgia-Siderurgia-Petróleo, 2015.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação Plástica dos Metais**; 6 ed. (primeira versão digital). Universidade de Campinas, Unicamp. 2011. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em 12 jun. 2016.
- BRITO, R.S.C.; SILVA, M.G.; KUYUMJIAN, R.M. **Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo**. Brasília, DF: CPRM, 2010. 190 p.
- CARRISSO, R.C. **Tratamento de minérios: classificação e peneiramento**. 4 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2004.
- COMPANHIA VALE DO RIO DOCE (CVRD). **Relatório de viabilidade do Projeto Sossego**. Carajás: Minerconsult Bechtel, ECM e Concremat, 2001. 451 p. (Relatório Interno).
- COMPANHIA VALE DO RIO DOCE (CVRD). Ficha de informações de segurança de produto químico. Brasília, 2005. 4p.
- COMPANHIA VALE S/A. **Relatório anual, de acordo com a seção 13 ou 15(d) da Lei de Mercado de Capitais de 1934**. Rio de Janeiro, 2015.
- COMPANHIA VALE S/A. **Produção da VALE no 2T16. Departamento de Relações com os investidores**. 2016. Disponível em: <[http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2016%202Q%20Production%20Report\\_p.pdf](http://www.vale.com/PT/investors/information-market/Press-Releases/ReleaseDocuments/2016%202Q%20Production%20Report_p.pdf)>. Acesso em 10 out. 2016.
- COPPER ALLIANCE. **A vantagem do cobre: um guia para trabalhar com o Cobre e suas ligas**. Disponível em: <<http://procobre.org/media-center/pt-br/publicacoes/20-institucional/118-vantagens-do-cobre.html>>. Acesso em 06 ago. 2016.
- CRAVEIRO, G.S.; VILLAS, R.N.N.; SILVA, A.R.C.S. Depósito Cu-Au Visconde, Carajás (PA): geologia e alteração hidrotermal das rochas encaixantes: **Revista Brasileira de Geociências**, v.42, p. 453-470, 2012.

DARDENNE, M.; SCHOBENHAUS, C. (org.). **Metalogênese do Brasil**. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília, 2001. 392p.

DIGIMED. **Eletrodo combinado de PH**. 2016. Disponível em: <<http://www.digimed.ind.br/br/produtos/detalhes.aspx?t=pr&u=1&cat=369&pr=DME-CM1>>. Acesso em: 07 set. 2016.

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

EL-HUSNY NETO, C. **Estudo minerográfico do minério de cobre do depósito do Sossego, Carajás, Pará**. 2014. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

FEIO, G. **Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás**: implicações para evolução crustal da Província Carajás. 2011. 205f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

FERRAN, A. **A Mineração e a flotação no Brasil**: uma perspectiva histórica. Brasília, DF: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Ministério de Minas e Energia, 2007. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/a\\_mineracao-e-a-flotacao-no-brasil.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/a_mineracao-e-a-flotacao-no-brasil.pdf)>. Acesso em 12 mai. 2016.

FIGUEIREDO, B.R. **Minérios e ambiente**. Campinas: Unicamp, 2000. 398p.

GALARZA TORO, A.; MACAMBIRA, M.; MOURA, C. Geocronologia Pb-Pb e Sm-Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 8., 2003, Manaus, AM. **Atas...** Manaus, AM: SBG, 2003. p.01-13.

GOMES, A.; DALL'AGNOL, R. Nova associação tonalítica-trondjemítica Neoarqueana na região de Canaã dos Carajás: TTG com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 37, p. 182-193, 2007.

GOOGLE MAPS. **Canaã dos Carajás**. 2016. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Cana%C3%A3+dos+Caraj%C3%A1s+-+PA/@-6.4813749,-50.6697771,9z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x92dd7869efa8c54d:0x6b158bb3c2827e8c!8m2!3d-6.5320907!4d-49.8512171>>. Acesso em 07 ago. 2016.

GOOGLE. **Vidraria**. 2016. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Vidraria>>. Acesso em 12 mai. 2016.

GROSSI, J.; VALENTE, J. **Guia prático para cálculo de recursos e reservas minerais**. 2003. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/JORC.ASP>>. Acesso em 23 mar. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidade: Carajás. 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=150215>>. Acesso em 03 ago. 2016.

LIMA, D.A. **Quantificação de fases cristalinas de incrustação em colunas de produção de petróleo pelo método rietveld**. 2010. 189f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências exatas e da Terra – CCET; Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2010.

LUZ, A.B. da; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. de (ed.). Separação magnética e eletrostática. **Tratamento de minérios**. 4 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. p. 305-335.

MACAMBIRA, E.; TASSINARI, C. Estudos Sm-Nd no complexo máfico-ultramáfico da Serra da Onça – Sol do Pará: implicação geocronológica e geotectônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, 1998, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1998. 430p. p. 31-50.

MACHADO, N; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. **Precambrian Research**, n. 49, p. 1-26, 1991.

MARSCHIK, R.; LEVEILLE, R. Iron oxide CU-AU deposits in South America: Candelária, Chile, and Sossego, Brazil. In ANNUAL MEETING, 33., 2001, [S.1]. **Abstract With Programs**. [S.1.]: Geological Society Of America- GSA, 2001. p. 24-50.

MASSI, L.; SOUSA, R.; LALUCE, C.; JAFELICCI JÚNIOR, M. Fundamentos e aplicação da flotação como técnica de separação de misturas. **Conceitos Científicos em Destaque**, n. 28, p. 1-4, 2008.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO – ME. **Educação Profissional**: referências curriculares nacionais da educação profissional de nível técnico: área profissional-Mineração. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2000.

MONTEIRO, L.; XAVIER, R.; CARVALHO, E.; HITZMAN, M.; JOHNSON, C.; SOUZA FILHO, C.; TORRESI, I. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. **Mineralium Deposita**, v. 43, p. 129-159, 2008.

MORAIS, R; ALKMIN, F. O controle litoestutural da mineralização de cobre do depósito Sequeirinho, Canaã dos Carajás, PA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1. 2005, Gramado. **Resumos...** Gramado: SBG/SEG/SGMTM-MME, 2005. 1 CD-ROM.

MORETO, C.; MONTEIRO, L.; XAVIER, R.; AMARAL, W.; SANTOS, T; JULIANI, C.; SOUZA FILHO, C. Mesoarchean (3.0 and 2,86 Ga) host rocks of the iron-oxide-Cu-Au bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. **Mineralium Deposita**, v.1. n.3, p.11-32, 2011.

NANKRAN, M.; BERGERMAN, M.; MIRANDA, A.; OLIVEIRA, J.; SOUZA, M.; BATISTA FILHO, J.; CARDOSO, W. Controle operacional da usina do Sossego. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 21., 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: [s.n.], 2007b, v. 1, p. 502-512.

NEUMANN, A.; SCHENEIDER, C.; ALCOVER NETO, A. Tratamento de minérios. In: \_\_\_\_\_. **Caracterização tecnológica de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 55-109.

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

PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENQ, J. **Les Minéraux em Grains: Methods D'étude et Determination**. Paris Masson, 1970. 578p.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PIDGEON, R.; MACAMBIRA, M.; LAFON, J. Th-U-Pb isotopic system and internal structures of complex zircons forma an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology**, n. 166, p. 159-171, 2000.

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

PINTO, A. **Viabilização da mina de cobre do Salobo, do estratégico ao tático**. São Paulo: VALE. 2012. p. 01-08. Disponível em: <[http://www.adimb.com.br/simexmin2012/wp-content/themes/simexmin/palestras/11novosdepositos/X\\_2\\_Pinto.pdf](http://www.adimb.com.br/simexmin2012/wp-content/themes/simexmin/palestras/11novosdepositos/X_2_Pinto.pdf)>. Acesso em 30 mai. 2016.

PRACEJUS, B. **The ore minerals under the microscope: an optical guide**. London: Elsevier, 2008. 875p. (Atlases in Geoscience, 3).

QUEIROGA, G.N. **A seção sedimentar sulfetada do ofiolito de Ribeirão da Folha e seu potencial metalogenético, Orógeno Araçuaí, MG**. 2006. 107f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

RIBEIRO, J.A.S. **Cobre em Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília, DF: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos>>. Acesso em 12 jun. 2016.

RIBEIRO, J.A.S. **Sumário mineral: cobre**. Salvador: Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM-BA), 2015.

ROCIO, M.A.R.; SILVA, M.M.; CARVALHO, P.S.L.; CARDOSO, J.G.R. **Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil**. Setorial 36. Brasília, DF: BNDES, 2012. p. 397-428.

RODRIGUES, E. C.; MORAES, C. G; MACÊDO, E. N.; NEVES, R. F.; SOUZA, J. A. S. Síntese de Zeólita Tipo A a partir de Caulim Calcinado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 55. 2011, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: UFPE, 2011.

RODRIGUES, E.; LAFON, J.; SCHELLER, T. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. **Boletim de Resumos Expandidos...** São Paulo: SBG, v. 2, p. 183-184.

SAMPAIO, J.; SILVA, F. Determinação das densidades de sólidos e de polpa. In: SAMPAIO, J.; FRANÇA, S.; BRAGA, P. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 111-131

SANT'AGOSTINO, L. **Caracterização tecnológica de um depósito mineral – um estudo de caso: o nióbio de Catalão I, Goiás.** 1996. 245f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

SANTOS, J.O.S. et al. New understanding of the Amazon Craton Provinces, based on field work and radiogenic isotope data. **Gondwana Research**, v. 3, n. 4, p. 453-488, 2000.

SANTOS, J.O.S. Geotectônica do escudo das Guianas e Brasil-Central. In: BIZZI, L.A. et al. (ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG.** Brasília,DF: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2003. p. 169-226.

SANTOS, W. **Rotas de processo para concentração de minérios itabiríticos e Hematíticos da mina de fábrica.** 2009. 202f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SHIMIZU, V. **Classificação e caracterização de tipos de minérios de cobre da mina do Sossego - região de Carajás.** 2012. 187f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, B. **Contribuição à caracterização mineralógica do rejeito da mina de cobre do Sossego - Pa.** 2014. 102f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SILVA, S.; OLIVEIRA, R. **Manual de análise físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias – Campina Grande, Paraíba.** 2011.

UYTENBOGAARDT, W.; BURKE, E.A.J. **Tables for the microscopic identification of ore minerals.** Amsterdam: Elsevier, 1971.

VÁSQUEZ M.L.; ROSA-COSTA L.T. (orgs). **Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG.** Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008. 328 p.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A - Descrições das Frações Granulométricas

1) Fração (< 0,177 e > 0,125 mm); Peso = 1,26 g ; % = 0,30

A fração em análise apresenta em geral cor cinza escuro, com tonalidade levemente dourada. A amostra apresenta homogeneidade quanto ao tamanho dos fragmentos que encontram-se bem desagregados, podendo-se observar bem a superfície dos fragmentos. Os fragmentos existentes no material apresentam várias cores e formas, visto que, foram observados fragmentos de tonalidade amarelo ouro com forma cúbica, euédrica a subédrica e brilho intenso, caracterizando a calcopirita. Além deste observou-se fragmentos subédricos de coloração prateada ou até mesmo um amarelo mais enfraquecido apresentando um forte brilho, podendo ser a pirita. Outros fragmentos incolores de fratura conchoidal e forma anédrica, também foram observados mostrando-se em vários tons como: branco (leitoso), incolor e rosado tratando-se do quartzo, o qual apresentou inclusões de calcopirita. Por fim notou-se um fragmento de cor arroxeadada com brilho fraco e forma anedral, podendo ser a bornita. A ordem de abundância dos minerais observados é: calcopirita > quartzo > pirita > bornita.

2) Fração (< 0,125 e > 0,088 mm); Peso = 4,19 g ; % = 0,98

Esta fração possui basicamente as mesmas características da fração anterior, porém sendo um pouco mais fina. O material encontra-se bastante desagregado e homogêneo, no entanto, a presença abundante dos fragmentos dos cristais de bornita é notória. Assim como em todas as frações, a proporção de fragmentos de calcopirita é superior em relação aos demais, já os fragmentos de (pirita?) aparecem com menor frequência. Além destes, foram observados fragmentos esverdeados transparentes (anfíbólio?) e raramente fragmentos tabulares de cor preta (biotita?), e por fim os fragmentos dos cristais de quartzo que, assim como a calcopirita aparecem com abundância. Logo, a ordem de abundância dos minerais observados é: calcopirita > quartzo > bornita > pirita > anfíbólio? > biotita?

3) Fração (< 0,088 e > 0,062 mm) ; Peso = 14,01 ; % = 3,29

Esta fração possui basicamente as mesmas características da fração anterior, porém numa granulação ainda mais fina. Nesta amostra o material ocorre um pouco mais agregado e os fragmentos observados são menores, mas em geral apresenta boa homogeneidade. Os fragmentos predominantes continuam sendo os de calcopirita em relação àqueles já citados

como a (pirita?), assim também como os fragmentos de quartzo. Vale ressaltar que, nesta fração, não observou-se fragmentos de tom arroxeadado (bornita?), nem àqueles de cor preta, porém visualizou-se com menor frequência fragmentos verdes transparentes (anfíbólio?). Logo, a ordem de abundância dos minerais visualizados é: calcopirita > pirita > anfíbólio? > quartzo.

4) Fração (< 0,062 mm = Fundo) ; Peso = 406,34 g ; % = 95,43

Esta fração possui basicamente as mesmas características da fração anterior, porém sendo bem mais fina. A massa cinza escura apresenta-se com diversos pontos brilhantes e dessa vez encontra-se mais agregada e com os seus fragmentos bem menores em relação aos anteriores. Agora os fragmentos de calcopirita predominam sobre os demais. No entanto, ainda observa-se alguns pontos brilhantes de tom amarelo claro (pirita?), ocorrendo algumas vezes fragmentos de quartzo, o que não acontece com os fragmentos de cor preta?, anfíbólio? e bornita, nunca vistos. A ordem de abundância dos minerais observados é: calcopirita > pirita? > quartzo.

## APÊNDICE B - Descrição Após a Separação Magnética

### 1) Fração (< 0,177 e > 0,125 mm): Não-magnética

Em geral, a fração em análise apresenta tonalidade dourada, que lembra o amarelo ouro. A amostra encontra-se bem selecionada, na qual é possível observar bem a superfície dos fragmentos dos minerais. Tais fragmentos possuem variadas espécies minerais como a calcopirita que é predominante no material com aproximadamente (55%), de cor dourada, possui forma angulosa e um forte brilho. Outro fragmento de mineral observado foi a pirita (20%), de tonalidade amarelo claro, apresenta um brilho mais intenso e fragmentos anédricos. Além destes, ocorre ainda o quartzo (15%), que apresenta fratura conchoidal, exibindo cores variadas como: branco, rosa, incolor, avermelhado e amarelo, seu brilho é vítreo e sua forma é anedral. O quartzo, por vezes, apresenta inclusão de calcopirita nos seus fragmentos. Em proporções menores observou-se a bornita (5%), de coloração arroxeadada, possui brilho discreto e fragmentos angulosos. Seguido de fragmentos verdes claros (3%), podendo ser o anfibólio? possui brilho vítreo, forma prismática, apresentando inclusões de calcopirita frequentes. Por fim, notou-se raramente fragmentos angulosos de tonalidade esbranquiçada (2%) ou ainda prateada, de brilho metálico intenso podendo ser a hematita. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

### 2) Fração (< 0,177 e > 0,125 mm): Fracamente magnética

A amostra apresenta cor escura em geral, no entanto, exhibe tons fortemente dourados pertencentes aos fragmentos de calcopirita e pirita, adicionalmente observou-se um material semelhante a fuligem. No material em análise, a maioria é caracterizada pela presença abundante da calcopirita (40%), que possui tonalidade amarelo ouro, forte brilho, com fragmentos angulosos. Observou-se também fragmentos verdes claro (20%), alguns de hábito prismático, brilho vítreo e forma subédrica, apresentando planos de clivagem e inclusão de calcopirita em sua maioria, podendo ser o anfibólio. Outro fragmento de mineral encontrado foi o quartzo (15%), incolor, branco e rosa, brilho vítreo, fratura conchoidal e forma anédrica, além disso, o quartzo apresenta frequentes inclusões de calcopirita e possivelmente de magnetita para justificar sua presença nesta fração que é de natureza magnética. Em menores proporções achou-se a pirita (13%), levemente dourada, brilho intenso e forma anédrica, seguida de fragmentos pretos (6%), de hábito prismático mais curto, com planos de clivagem e brilho vítreo, podendo se tratar de um piroxênio. Também notou-se com pouca frequência a

bornita (4%), que constituem fragmentos arroxeados com brilho discreto e forma anedral, e por fim fragmentos prateados (2%), de brilho metálico intenso, podendo ser a hematita. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

### 3) Fração (< 0,177 e > 0,125 mm): Magnetita

A amostra em estudo apresenta cor cinza escuro com tons levemente dourados, devido a quantidade elevada de fragmentos de calcopirita e pirita. A calcopirita (30%), possui tonalidade amarelo ouro, brilho forte e fragmentos de forma subédrica a anédrica. Outro fragmento similar ocorrente no material é a pirita (25%), de cor amarelo claro e também dourado, brilho intenso e forma subédrica a anédrica. Além destes, observou-se o quartzo (20%), em tons variados como: amarelo, branco e incolor, de brilho vítreo, fratura conchoidal e forma anédrica. Os fragmentos de quartzo, em sua maioria, apresentam inclusão de calcopirita e possivelmente de magnetita para justificar a sua atração pelo ímã de mão. Ocorre ainda fragmentos verdes claros (17%), com hábito prismático e planos de clivagem, brilho vítreo, com forma euédrica a anédrica podendo se tratar do anfibólio. Tais fragmentos também possuem inclusões frequentes de calcopirita assim como o quartzo. Em menor escala, visualizou-se fragmentos de cor preto (5%), brilho vítreo, forma subédrica e hábito prismático com planos de clivagem, no entanto, estes apresentavam um tamanho mais curto em relação ao anfibólio? podendo ser o piroxênio?. E por fim, achou-se fragmentos prateados ou esbranquiçados (3%), de brilho intenso e forma angulosa, podendo ser um?. E a bornita quase nunca foi vista nesta fração. A fração descrita acima foi separada com o auxílio de ímã de mão, e as percentagens são estimativas visuais realizadas por meio da utilização de lupa binocular.

### 4) Fração (< 0,125 e > 0,088 mm): Não-magnética

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. A amostra apresenta em geral, coloração amarelada ou ainda dourada, levemente cinza escuro. O fragmento mais abundante nesta fração é a calcopirita com cerca de (35%), seguida da pirita (20%), assim como, daqueles possíveis fragmentos de anfibólio que correspondem a (15%), tais fragmentos possuem frequentes inclusões de calcopirita como já foi descrito anteriormente. Além do quartzo que perfaz em torno de (12%), e da bornita com (10%) aproximadamente. Numa proporção

menor, encontrou-se fragmentos prateados?(5%) e aqueles de tonalidade preto, com prismas mais curtos, podendo se tratar do piroxênio (3%)?. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

#### 5) Fração (< 0,125 e > 0,088 mm): Fracamente magnética

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. Em geral, a amostra exibe aspecto escuro com tons dourados devido a presença da calcopirita e também da pirita. Além disso, por se tratar de uma fração mais fina, a quantidade de material semelhante a fuligem aumenta gradativamente no decorrer das descrições. O fragmento que predomina na fração em estudo continua sendo a calcopirita com percentual de (32%) presente na amostra, seguida da pirita com (22%) e do anfibólio? com cerca de (20%) aproximadamente. A maioria dos fragmentos de anfibólios?, assim como, de quartzo (17%), apresentam inclusão de calcopirita e possivelmente de magnetita como já foi mencionado nas descrições anteriores. Por fim, em menor proporção observou-se a bornita (4%) e os fragmentos prateados com brilho metálico intenso (5%)?. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

#### 6) Fração (< 0,125 e > 0,088 mm): Magnetita

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. A amostra apresenta cor escura com tons dourados devido a presença da calcopirita. Nesta fração, os fragmentos mais abundantes são os de calcopirita (40%), acompanhado da pirita (20%), do anfibólio? (20%) e do quartzo (15%). Os dois últimos como vem se observando são os fragmentos que apresentam frequentes inclusões de calcopirita e provavelmente de magnetita também, visto que, sua atração pelo ímã de mão foi muito significativa. No entanto, em escala menor identificou-se um fragmento prateado (5%), de brilho metálico intenso e forma angulosa, e raramente ocorreram fragmentos de bornita. Por fim, não visualizou-se fragmentos de possíveis piroxênios. A fração descrita acima foi separada com o auxílio de ímã de mão, e as percentagens são estimativas visuais realizadas por meio da utilização de lupa binocular.

#### 7) Fração (< 0,088 e > 0,062 mm): Não-magnética

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. Adicionalmente observou-se um material semelhante a fuligem por entre os finos fragmentos analisados, devido a fração ter diminuído ainda mais. Em geral, a amostra apresenta cor amarelo ouro, pois a presença dos fragmentos de calcopirita (45%), no material é predominante. Outro fragmento bastante representativo é a pirita com cerca de (25%), seguido do quartzo (14%), que continua apresentando inclusões frequentes de calcopirita. Na amostra, também observou-se a bornita (8%), e em menor quantidade os fragmentos de anfibólio (3%), que quase não possuíam inclusão de calcopirita. Por fim, identificou-se novamente fragmentos prateados (5%), de brilho metálico intenso e forma angulosa?, os possíveis fragmentos de piroxênio estão ausentes nesta fração. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

#### 8) Fração (< 0,088 e > 0,062 mm): Fracamente magnética

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. O material em geral, possui tonalidade cinza escuro com inúmeros pontos amarelos brilhantes ocasionado pela presença abundante da calcopirita (45%). Adicionalmente observou-se um material semelhante a fuligem por entre os finos fragmentos analisados, devido a fração ter diminuído ainda mais. Na fração em questão, ocorre também a pirita (20%), quartzo (9%), anfibólio (14%)?, fragmento prateado (10%) e a bornita (2%) com menor frequência. Os possíveis fragmentos de piroxênio não foram notados. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

#### 9) Fração (< 0,088 e > 0,062 mm): Magnetita

As características dos fragmentos dos minerais já descritos são equivalentes para a fração em análise, visto que, trata-se do mesmo material em estudo, porém, em proporções variadas de uma fração em relação a outra. A amostra apresenta em geral, tonalidade escura, mas exibe cor levemente dourada devido a numerosa presença do fragmento de calcopirita (30%), assim como, da pirita (25%). Seguida dos fragmentos de anfibólio (15%), e quartzo

(13%), que possuem frequentes inclusões de calcopirita e possivelmente de magnetita devido sua forte atração magnética, como já foi dito anteriormente. Além destes, também observou-se em maior quantidade, aqueles repetidos fragmentos prateados (12%), de brilho metálico intenso e forma angulosa. Por fim, os fragmentos de bornita foram menos ocorrentes perfazendo em torno de (5%) da amostra aproximadamente. Os possíveis fragmentos de piroxênio não foram visualizados nesta fração. A fração descrita acima foi separada com o auxílio de ímã de mão, e as percentagens são estimativas visuais realizadas por meio da utilização de lupa binocular.

#### 10) Fração (< 0,062 mm = Fundo): Não-magnética

A amostra apresenta cor cinza escuro predominantemente, porém possui tom fortemente dourado proveniente dos diversos fragmentos de calcopirita (80%), que aparecem na maioria das vezes, apenas como pontos brilhantes devido a fração ser extremamente fina. Todavia, também estão presentes no material a pirita (15%), com brilho mais intenso e coloração amarelo mais claro em relação a calcopirita, assim como, em menor proporção alguns fragmentos de bornita (3%) e quartzo (2%). Além destes, não foi possível identificar nenhum dos outros fragmentos minerais já mencionados ao longo das outras descrições. As percentagens acima, foram estimadas visualmente por meio da utilização de lupa binocular.

#### 11) Fração (< 0,062 mm = Fundo): Fracamente magnética

A fração em análise, assim como a anterior, apresenta as mesmas características quanto aos fragmentos encontrados, mostrando praticamente as mesmas proporções observadas, diferindo apenas com relação ao fragmento correspondente a bornita, que desta vez, raramente aparece.

#### 12) Fração (< 0,062 mm = Fundo): Magnetita

A amostra é composta basicamente por magnetita, que apresenta cor negra, com fragmentos altamente magnéticos que representam a maior parte do material com cerca de (90%). Além disso, observou-se alguns pontos brilhantes de tom dourado, ocorrentes devido a presença de calcopirita que possui um percentual de aproximadamente (10%). A fração descrita acima foi separada com o auxílio de ímã de mão, e as percentagens são estimativas visuais realizadas por meio da utilização de lupa binocular.