

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

Processo Produtivo do Cobre: Estudo de Caso do Projeto Salobo

Aluno: Camilla Cardoso da Silva

Orientador: Prof. MSc Luciano Fernandes de Magalhães

Junho 2019

DEDICATÓRIA

Primeiramente, agradeço a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para que eu tivesse uma educação de qualidade, além do apoio, amor e carinho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 História	10
3.2 Propriedades	12
3.3 Utilização e Consumo.....	13
3.4 Minerais de Minério	14
3.5 Depósitos de Cobre.....	15
3.6 Mercado e Preço	18
3.7 Reservas.....	19
3.8 Produção	22
4 ROTA DE PROCESSAMENTO	25
4.1 Métodos de Lavra	25
4.2 Cominuição.....	26
4.3 Britagem	27
4.4 Moagem SAG e Moinho de bolas	28
4.5 HPGR e Britador Cônico.....	32
4.6 Flotação	35
4.7 Separação Sólido/Líquido	38
4.8 Metalurgia Extrativa.....	40
4.8.1 Hidrometalurgia.....	40
4.8.2 Pirometalurgia	42
4.9 Reciclagem	45
5 ESTUDO DE CASO - SALOBO	47

5.1	Dados Gerais	47
5.2	Beneficiamento	48
5.2.1	Britagem Primária	49
5.2.2	Pilha de Britagem	50
5.2.3	Peneiramento Primário e Britagem Secundária.....	50
5.2.4	Transportadores de Correia de Longa Distância (TCLDs).....	51
5.2.5	Pilha de estocagem do minério britado	51
5.2.6	HPGR	52
5.2.7	Peneiramento Secundário	52
5.2.8	Moagem e Classificação	53
5.2.9	Sistema de Manuseio e Estocagem de Bolas.....	53
5.2.10	Flotação	53
5.2.11	Remoagem.....	55
5.2.12	Espessamento de concentrado	55
5.2.13	Filtragem e estocagem de concentrado.....	56
5.2.14	Reagentes.....	56
6	CONCLUSÕES	58
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo analisar o processo produtivo do cobre. Para isso, foram analisadas a história, propriedades, consumo, utilização, depósitos, métodos de lavra, reserva e produção. Também foram analisados os processos de beneficiamento do cobre envolvendo a cominuição, concentração e separação sólido/líquido, a metalurgia extrativa (pirometalurgia e hidrometalurgia), a reciclagem do metal e o estudo de caso do projeto Salobo, no Pará.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the copper production process. For this, the history, properties, consumption, utilization, deposits, mining methods, reserve and production were examined. Copper beneficiation processes involving comminution, solid and liquid concentration and separation, extractive metallurgy (pyrometallurgy and hydrometallurgy), metal recycling and the case study of Salobo project, in Pará, were also analyzed.

1. INTRODUÇÃO

O cobre é considerado um dos primeiros metais descobertos pelo ser humano. Evidências indicam a sua utilização há mais de 10.000 anos. Desde então, passou a fazer parte da vida do homem, sendo um importante aliado no desenvolvimento socioeconômico da sociedade.

O cobre é o metal com maior condutividade térmica e elétrica, possui excelente resistência a corrosão, é utilizado na formação de ligas, maleável e possui ótima conformidade, antimicrobiano, entre outros.

Possui aplicações no setor elétrico, construção civil, setor industrial e de transporte; podendo ser utilizado para transmissão de energia, calhas, usinagem de peças, fabricação de radiadores e diversas outras aplicações. A maior aplicação está na fabricação de equipamentos.

O cobre é um metal escasso, com aproximadamente 0,006% na crosta terrestre. Os minerais sulfetados são a principal fonte: calcopirita, calcocita e bornita. Os principais depósitos são vulcanogênicos, porfiríticos e sedimentares. O método de lavra pode ser a céu aberto, subterrâneo ou misto.

Atualmente, o total de reservas identificadas corresponde a 2,1 milhões de toneladas, sendo 38% localizadas na América do Sul, seguido de 23% na América do Norte.

O beneficiamento envolve etapas de cominuição, flotação e separação sólido/líquido. Pode-se utilizar também a metalurgia extrativa: pirometalurgia e hidrometalurgia.

A etapa de cominuição corresponde a britagem primária, realizada por britadores giratórios; a etapa de moagem, normalmente realizada por moinhos SAG em conjunto com britadores cônicos e a moagem de bolas. Como forma alternativa, pode-se utilizar o britador cônico (britagem secundária) e a prensa de rolos (HPGR) ao invés do SAG e britador cônico.

A etapa seguinte é a flotação. É considerada a etapa mais importante do processo produtivo do cobre. A etapa é realizada através da utilização de células de flotação de grande capacidade (células tanque) e colunas de flotação. As colunas são geralmente utilizadas no processo de limpeza. Como reagentes são utilizados: coletores, espumantes e modificadores.

No processo de separação sólidos/líquido, o concentrado obtido na flotação é submetido aos processos de espessamento e filtragem. Para isso, normalmente utiliza-se filtros prensa.

No Brasil, são exemplos de plantas de processamento de cobre: Caraíba, Sossego e Salobo. A planta de Salobo pertence a mineradora Vale e está localizada no Pará. Possui capacidade de processamento de 36 milhões de toneladas (em implantação) e teor de concentrado de 38%.

A reciclagem também merece destaque na cadeia produtiva, uma vez que contribui com grande parte da produção e favorece o desenvolvimento sustentável.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O cobre é um dos metais mais utilizados pela humanidade e sua demanda vem crescendo continuamente. Com o avanço da tecnologia, novas aplicações são descobertas e os processos precisam crescer em conjunto, buscando otimizar o processo e aumentar a produção, uma vez que o teor tende a diminuir com o passar do tempo. Então, o objetivo é buscar eficiência de processamento, mantendo um custo baixo e uma recuperação atraente.

O objetivo deste trabalho é descrever o processo de beneficiamento do cobre correlacionando com a planta de processamento do projeto Salobo, através da revisão da literatura e análise da rota do projeto em questão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 História

O cobre foi um dos primeiros metais a serem descobertos e evidências arqueológicas indicam a sua utilização há mais de 10.000 anos, em moedas e ornamentos, na Ásia ocidental (ICSG, 2018).

A idade do cobre, ou período calcolítico, compreende o período de 4.500 a 3.500 a.C. A palavra calcolítico é derivada das palavras gregas *chalcos* (cobre) e *lithos* (pedra). Nesse período, o homem aprendeu a extrair o cobre e utilizá-lo para a produção de ornamentos e ferramentas. A figura 3.1 exemplifica o uso de cobre para fabricação de ferramentas.



Figura 3.1 - Pontas de lanças feitas de cobre do período calcolítico

Fonte: www.biodiversidadvirtual.org, 2019

O cobre ligado ao estanho, liga conhecida como bronze, iniciou a Idade do Bronze, em aproximadamente 2.500 a.C. Na América do Sul, as civilizações Incas e Maias extraíram o cobre, o ouro e a prata. Alguns artefatos da época são exemplificados na figura 3.2.



Figura 3.2 - Artefatos da idade do bronze

Fonte: www.sciencealert.com

As invenções relativas à eletricidade e magnetismo no final do século XVIII e início do século XIX por Ampere, Faraday e Ohm, com produtos fabricados utilizando cobre, alavancou a produção e ajudaram a dar início e Revolução Industrial (ICSG, 2018). Desde então, o cobre tem sido utilizado para aplicações diversas e ainda há desenvolvimento de novas utilidades.

A figura 3.3 exemplifica o uso de cobre para a fabricação de tubos.



Figura 3.3 - Tubos produzidos em cobre

Fonte: www.revistamineracao.com.br

3.2 Propriedades

O cobre é um metal de cor avermelhada, excelente condutor de eletricidade e calor, maleável e dúctil. Devido a suas propriedades é um dos metais mais utilizados no mundo. Suas principais características estão relacionadas abaixo:

- Condutividade – dos metais, possui a maior condutividade elétrica e térmica. O cobre e suas ligas são ideais para produtos eletrônicos e elétricos. A condutividade elétrica dos materiais é medida através da comparação com uma barra de cobre “puro” considerada 100% IACS (*International Annealed Copper Standard* – Padrão Internacional de Cobre Recozido) (DNPM, 2001). Atualmente, devido as constantes melhorias no processo produtivo é possível obter cobre com condutividade ligeiramente acima de 100%. Para a transmissão elétrica é utilizado cobre com condutividade elétrica de 85% ou superior.
- Corrosão – possui excelente resistência a corrosão, portanto é utilizado em diversas aplicações. Coberturas de cobre apresentam taxa de 0,4 mm (0,15 pol.) de corrosão em 200 anos (DNPM, 2001). Sua taxa de corrosão é insignificante em água, ácidos purgados e ar despoluído.
- Junção – o cobre e suas ligas podem ser unidos utilizando os métodos de brasão, solda, cravação, colagem de adesivo, parafusos ou rebites.
- Resistência mecânica – o metal é maleável e possui ótima conformidade. A formação de ligas torna o material mais forte. As ligas podem ser de latão, bronze e cobre-níquel, podendo ser utilizadas para diversas aplicações.
- Formabilidade – o cobre é capaz de produzir fios de tamanho microscópico e a formação de ligas proporciona maior resistência mecânica.
- Antimicrobiano – essa propriedade tem sido explorada há séculos. Os egípcios utilizavam recipientes de cobre para limpar a água.

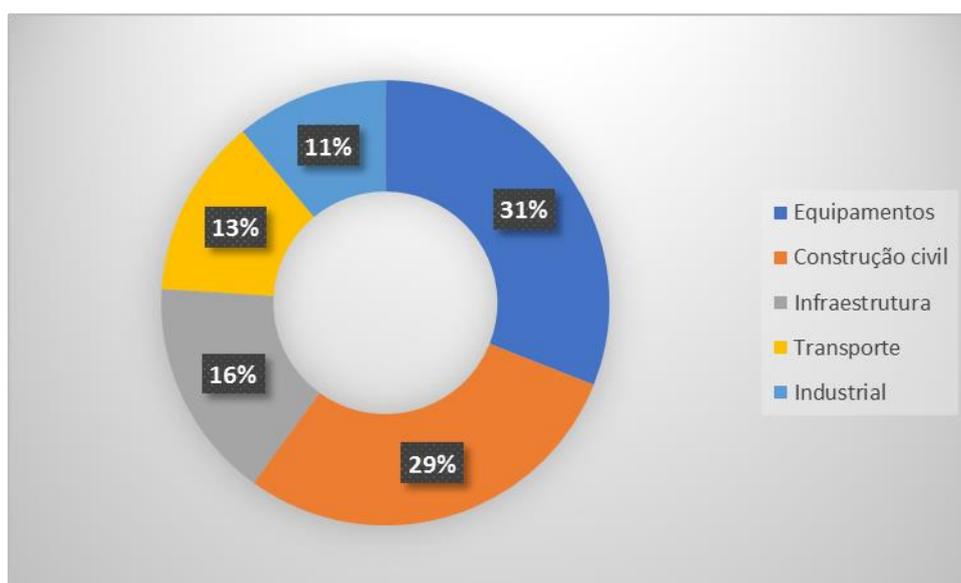
3.3 Utilização e Consumo

O cobre é um dos metais de maior importância e possui uma gama enorme de aplicações, seja na forma pura ou combinada. Dentre elas, pode-se citar:

- Setor elétrico – transmissão de energia, aparelhos eletrodomésticos e eletrônicos;
- Construção civil – calhas, instalações elétricas, ferragens, corrimões, luminárias, portas, adornos decorativos, fechaduras;
- Setor industrial – usinagem de peças, válvulas, tubos e chapas de trocadores de calor, refrigeradores e condicionadores de ar;
- Transporte – fabricação de radiadores, carburadores e acessórios de veículos, aparelhos de telecomunicação aeronáutica, motores e outros equipamentos.

A demanda global de cobre continua a crescer e seu uso mais do que triplicou nos últimos 50 anos, graças aos setores em expansão. O gráfico 3.1, ilustra o consumo de cobre de acordo com o setor de utilização no Brasil.

Gráfico 3.1 - Consumo de cobre por setor no Brasil



Fonte: (DNPM, 2016)

Na tabela 3.1, pode-se verificar o consumo de cobre de 2012 a 2016, nacional e

mundial. Percebe-se um aumento de consumo do metal consumido em âmbito mundial e uma diminuição de consumo por habitante.

Tabela 3.1 - Consumo de cobre interno e mundial

Ano	Consumo de concentrado (interno) - toneladas	Consumo de cobre metálico (interno) – toneladas	Consumo mundial de cobre refinado – milhões de toneladas	Consumo por habitante – kg/hab.
2012	141.563	436.300	20,51	2,2
2013	180.521	423.850	21,70	2,1
2014	210.052	390.412	22,90	2,1
2015	204.565	337.969	23,04	1,7
2016	158.765	292.593		

Fonte: (DNPM,2016)

Obs: O consumo de cobre metálico (interno) inclui a produção primária (mineração) e a produção secundária (reciclagem de sucatas).

3.4 Minerais de Minério

O cobre em estado puro raramente é encontrado na natureza, além de ser um metal escasso com cerca de aproximadamente 0,006% na crosta terrestre. Normalmente, é encontrado associado a outros minerais e já foram identificados mais de 150 minerais portadores do metal (SKINNER, 1969).

Existem dois grupos de minerais:

- Primários (sulfetados): formados nas zonas mais profundas da crosta terrestre e possuem maior teor de cobre. Os minerais com importância econômica estão representados na Tabela 3.2;

Tabela 3.2 - Minerais minério primários de cobre

Minério	% aproximada de Cu
Calcopirita	34,6
Calcocita	79,9
Bornita	63,3
Covellita	66,4
Enargita	48,3

- Secundários (oxidados): formados superficialmente e com menor teor de cobre. Os principais minérios estão citados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Minerais minério secundários de cobre

Minério	% aproximada de Cu
Cuprita	88,8
Tenorita	79,8
Malaquita	57,5
Azurita	55,3
Crisocola	36,0

Dos minerais citados nas tabelas 3.2 e 3.3, a calcopirita (CuFeS_2) é o mineral de cobre mais comum e também a principal fonte do metal.

A Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) considera como cobre o metal que contenha 99,85% ou mais do elemento químico ou 97,5% em massa de cobre (DNPM, 2001).

As jazidas de cobre possuem baixo teor e grandes dimensões. Os teores podem variar de 1% a 3%, porém a maioria dos minérios apresentam teor de aproximadamente 0,5% (DNPM, 2001).

Outros elementos podem estar associados ao cobre e os principais são: bismuto (teor não deve exceder 0,5%); arsênio, 2%; antimônio, 1%; zinco, 10%; e níquel, 0,25% (DNPM, 2001).

3.5 Depósitos de Cobre

Existem 07 (sete) tipos de depósitos minerais de cobre:

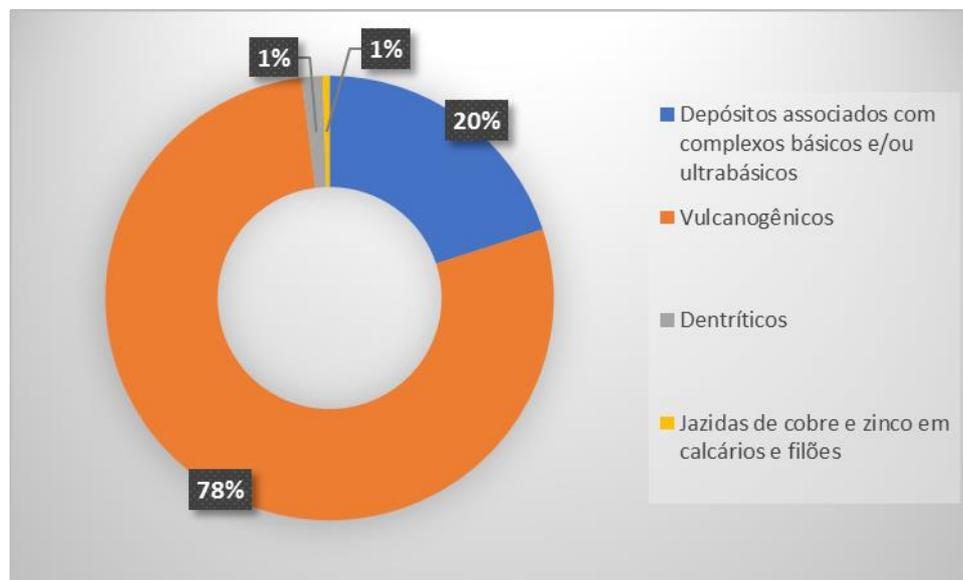
- Depósito de cobre nativo – compõe cerca de 0,1% dos depósitos, possuindo pouquíssima importância econômica. Ocorre associado a lavas básicas;
- Depósitos sedimentares detriticos – detêm cerca de 14,5% das reservas

mundiais e são compostos por espessas sequências de conglomerados e arenitos de ambientes continentais ou transicionais. Possuem teor médio de 2,34% e podem estar associados ao chumbo, zinco, prata, urânio, cobalto, ouro, platina, paládio, vanádio, molibdênio, cádmio e selênio. Reservas variam de $10^{1,5}$ a 10^8 toneladas;

- Depósitos de veios – corresponde a 3% das reservas mundiais. São formados por filões de quartzo com siderita ou outros carbonatos. São depósitos de pequeno porte;
- Depósito porfirítico – formados com a concentração de sulfetos a partir de soluções hidrotermais. Detentores de grandes reservas, podendo ser superior a 500 milhões de toneladas, com baixo teor de cobre. Esses depósitos são responsáveis por 60% da produção de cobre;
- Depósitos vulcanogênicos – cerca de 15% das reservas mundiais. Formados pela precipitação química de metais e outros elementos a partir de exalações vulcânicas. Explorados para cobre, chumbo e zinco, tendo como subproduto o ouro e a prata;
- Depósitos de escarnitos – reservas mundiais inferiores a 0,4% e são formadas por metamorfismo e metassomatismo de contato;
- Depósitos de segregação magmática – corresponde a 7% das reservas. São formados por imiscibilidade de líquidos, sulfetado. O cobre é geralmente explorado como coproduto do níquel. (Rocio et. al., 2012)

Aproximadamente 85% da produção de cobre contido é proveniente de depósitos porfiríticos, sedimentares e vulcanogênicos. No âmbito nacional, a distribuição está relacionada conforme o gráfico 3.2 abaixo:

Gráfico 3.2 - Distribuição dos depósitos de cobre no Brasil



Fonte: (DNPM, 2001)

No Brasil há diversos exemplos de depósitos de cobre, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Exemplo de depósitos de cobre de acordo com o tipo

Tipo de depósito	Exemplos
Vulcanogênico	Província Mineral de Carajás – Salobo, Pojuca e Igarapé Bahia
Vulcanossedimentares	Goiás – Palmeirópolis, Bom Jardim e Chapada Província Mineral de Carajás – Sossego, Gameleira, Antes Sul/Rio Verde
Segregação Magnética	Goiás – Distrito cuprífero-niquelífero de Americano do Brasil Bahia – Distrito cuprífero do Vale do Curaçá (caraíba e Baraúna, Surubim e Angico) Alagoas (Arapiraca) – Serrote da Laje Minas Gerais – Fortaleza de Minas Sergipe – Complexo de Canindé (poço redondo e Porto da folha)
Sedimentares	Rio Grande do Sul – Distrito cuprífero de Camaquã.

Fonte: (Rocio et. al., 2012)

3.6 Mercado e Preço

Assim como as demais *commodities*, o cobre é negociado entre os produtores e consumidores. Os produtores vendem o produto beneficiado aos clientes, que transformam o metal em outras formas e ligas e vendem aos fabricantes de diversos produtos.

O cobre é negociado principalmente em 3 (três) mercados:

- *London Metal Exchange* (LME) – bolsa de valores de Londres. As negociações são diárias. É possível negociar por meio de contratos a termo, futuros ou de opções. Produtos derivados também são passíveis de negociações.
- *New York Mercantile Exchange* (NYMEX / COMEX) – bolsa de valores de New York, nos Estados-Unidos.
- *Shanghai Future Exchange* (SHFE) – bolsa de valores da China.

No LME, o cobre é negociado em lotes de 25 toneladas e cotado em dólares por toneladas. No SHFE, a negociação é realizada em lotes de 5 toneladas e cotado em Renminbi por tonelada. No COMEX, o lote corresponde a 25.000 libras (11,3 toneladas e cotado em dólares por libra (ICGS, 2018).

As bolsas também permitem as negociações de contratos futuros e de opções. Estes permitem aos produtores e consumidores fixar um preço, fornecendo uma proteção contra as variações de preços do mercado.

O gráfico 3.3, obtido a partir de dados da bolsa *London Metal Exchange*, mostra a evolução do preço do cobre entre os anos de 2010 e 2019, em milhares de dólares por toneladas.

Gráfico 3.3 - Preço do cobre entre os anos de 2010 e 2019



Fonte: (LME, 2019)

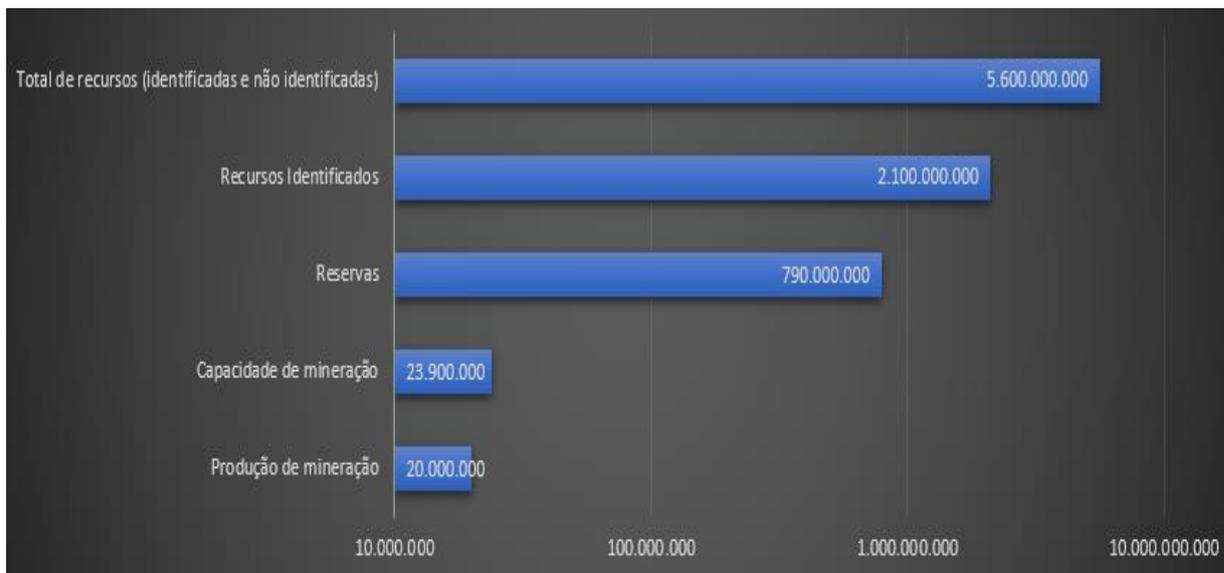
Obs: No gráfico 3.3, o “eixo x” refere-se ao preço do cobre em dólares por tonelada e o “eixo y” refere-se ao período.

3.7 Reservas

A disponibilidade está ligada aos conceitos de reserva e recurso. Reserva são depósitos descobertos, estudados e avaliados como economicamente viáveis para exploração. Recursos incluem reservas, depósitos descobertos e potencialmente lucrativos e não descobertos, mas previstos com base em levantamentos geográficos preliminares.

Atualmente, as reservas de cobre constituem cerca de 790 milhões de toneladas e os recursos são estimados entre 2.100 e 3.500 milhões de toneladas (ICSG, 2018). A estimativa de reservas não inclui depósitos no fundo do mar. O gráfico 3.4 apresenta uma estimativa de recursos e reservas.

Gráfico 3.4 - Estimativa de cobre mundial



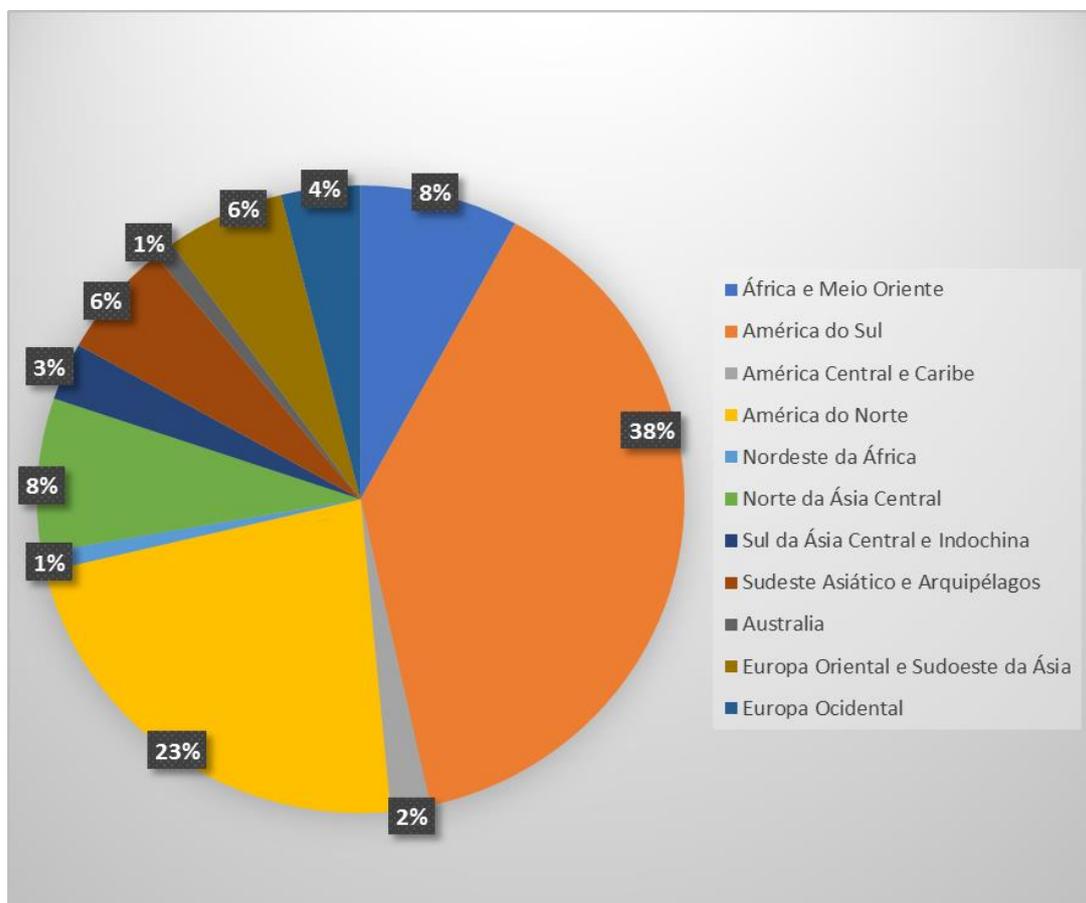
Fonte: (Adaptado de ICSG, 2018)

Segundo o *US Geological Survey* (USGS, 2019), as reservas de cobre em depósitos pórfiros correspondem a 60% das reservas de cobre mundial. Os depósitos sedimentares detêm cerca de 20% das reservas.

A média de depósitos pórfiros e sedimentares não descobertos correspondem a 3,1 bilhões e 400 milhões de toneladas, respectivamente (ICSG, 2018). Para esses depósitos, os recursos são estimados em 5,6 bilhões de toneladas.

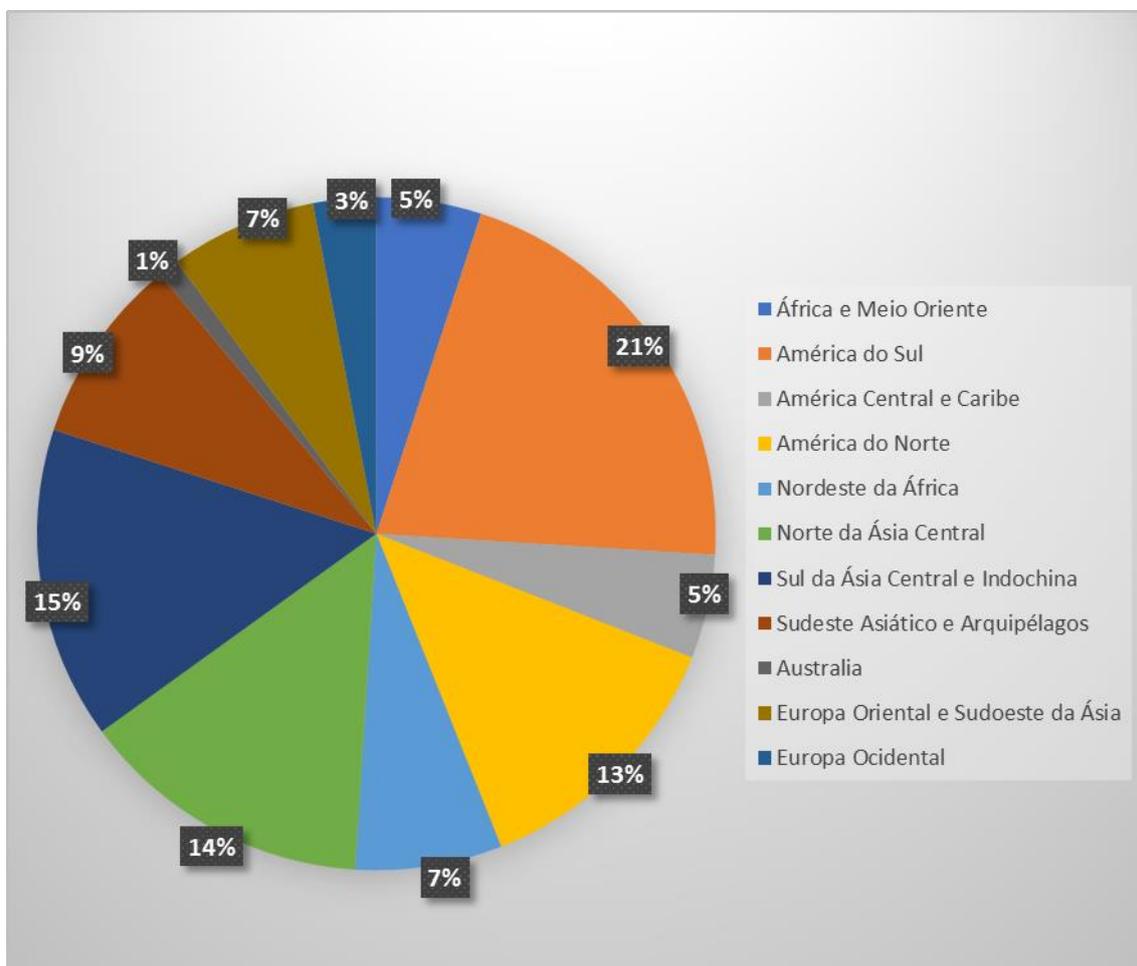
Os gráficos 3.5 e 3.6 representam, respectivamente, a distribuição de cobre identificada e não identificada dos recursos mundiais de cobre.

Gráfico 3.5 - Distribuição dos recursos de cobre mundiais identificados



Fonte: (ICSG, 2018)

Gráfico 3.6 - Distribuição dos recursos de cobre mundiais não identificados



Fonte: (ICSG, 2018)

3.8 Produção

Após o processo de extração o minério é processado e atinge uma concentração média de 30%, podendo variar de 20% a 40%. No processo de fundição, atinge uma concentração de 50-70%. O blister atinge 98,5 -99,5%. O eletro-refinamento produz cobre com até 99,99% (ICSG, 2018).

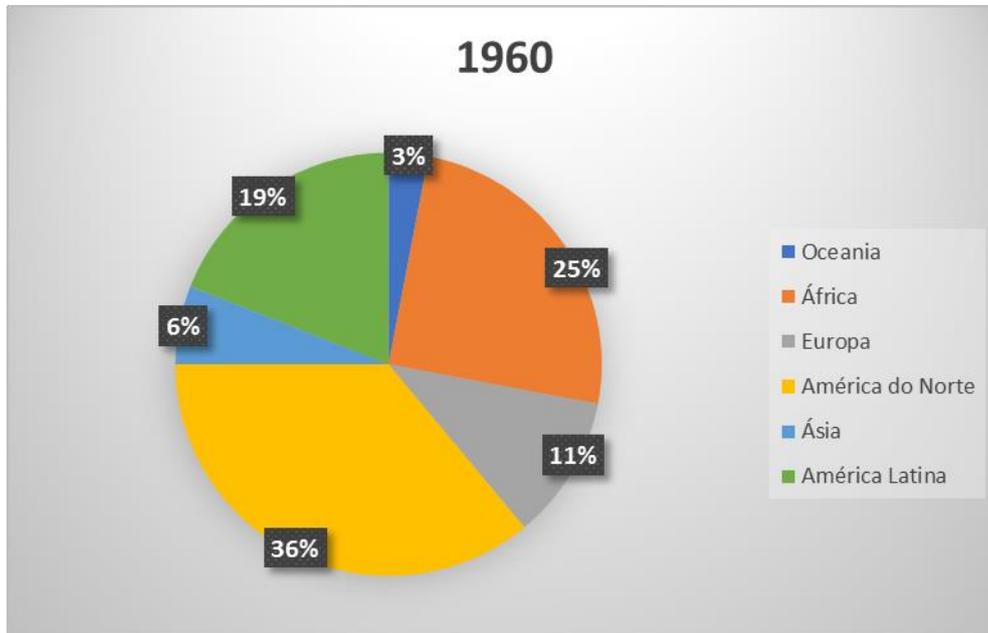
A rota hidrometalúrgica utiliza cobre de baixo teor e também minérios sulfetados através de processos de lixiviação e eletropuração (processo SX-EW). Segundo o ICSG (2018), estima-se que em 2017 a produção de SX-EW representou 16% da produção total de cobre refinado.

Outra importante fonte de cobre é sucata. O metal pode ser reciclado inúmeras vezes sem perder as suas propriedades. Podendo ser proveniente da sucata de processos produtivos (nova) ou de produtos com o fim da vida útil (velha).

O cobre proveniente da produção das minas é denominado primário e aquele proveniente de sucatas, secundário. Segundo o ICSG (2018), a produção refinada de cobre secundário atingiu 17% em 2017.

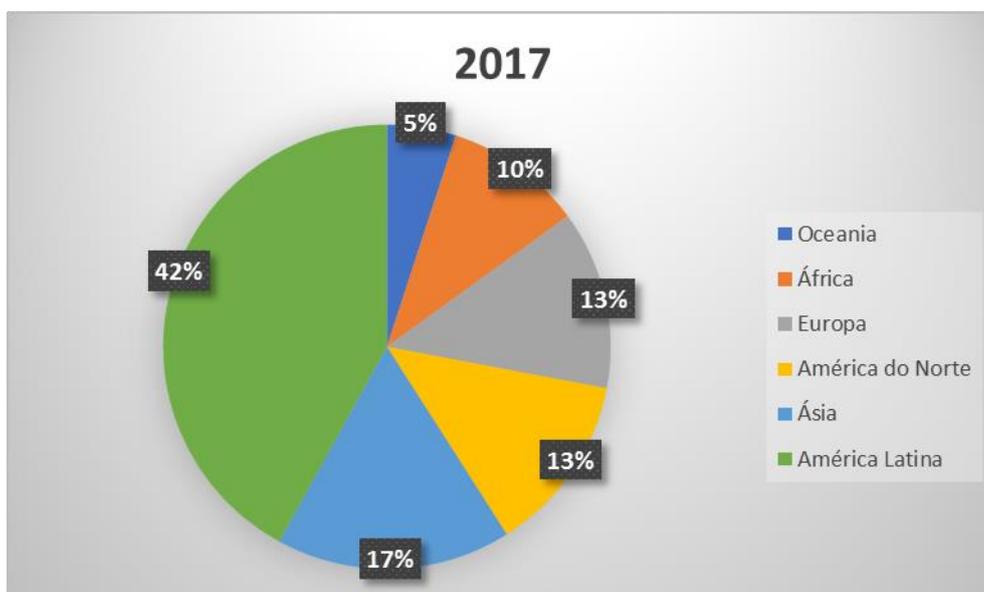
Com o aumento da população, desenvolvimento da tecnologia e descobrimento de novas aplicações para o cobre, a demanda pelo metal aumentou nos últimos anos. De menos de 750.000 toneladas de produção de cobre em 1960, na América Latina, a produção subiu para 8,4 milhões de toneladas em 2017, representando cerca de 42% da produção total. Esse percentual passou de 19% para 42%, comparando os dois anos, conforme gráficos 3.7 e 3.8.

Gráfico 3.7 – Produção mundial de cobre em 1960



Fonte: (ICSG, 2018)

Gráfico 3.8 – Produção mundial de cobre em 2017



Fonte: (ICSG, 2018)

Os 5 principais produtores de cobre são: Chile, Peru, China, Estados Unidos e Congo. O Chile foi responsável por mais de $\frac{1}{4}$ da produção mundial em 2017, com uma produção de 5,5 milhões de toneladas de cobre.

4 ROTA DE PROCESSAMENTO

4.1 Métodos de Lavra

As jazidas de cobre são, na maioria das vezes, de grande porte e baixo teor. A extração pode ser a céu aberto, subterrânea ou mista.

A mineração a céu aberto é a mais utilizada, permitindo a exploração de depósitos de baixo teor, com mínimo de 0,5% Cu. Esse método possui uma estrutura formada por praças de trabalho e bancos de operação. São realizadas etapas de decapeamento, perfuração, desmonte, carregamento e transporte. Para os equipamentos, são necessárias perfuratrizes, carregadeiras e caminhões.

A figura 4.1 representa uma foto da mina a céu aberto Salobo, objeto de estudo no presente trabalho.



Figura 4.1 - Lavra a céu aberto da Mina Salobo

Fonte: www.opetroleo.com.br

O método subterrâneo é empregado quando o minério se encontra em profundidade elevada e quando a relação estéril/minério é inviável economicamente para a lavra a céu aberto. A lavra está associada formação de galerias, câmaras e poços, além da ventilação e iluminação. Na figura 4.2, pode-se observar o desenvolvimento da etapa de perfuração em uma mina subterrânea.



Figura 4.2 - Mina subterrânea de Caraíba

Fonte: www.minacaraiba.com

A lavra mista associa ambos os métodos citados acima, onde uma parte da lavra acontece a céu aberto e a outra parte subterrânea. Esse método foi utilizado na Mina Caraíba, no Vale do Curaçá, no município de Jaguari, Bahia.

Para escolher o método adequado, fatores como condições topográficas do terreno, profundidade, qualidade de acesso, condições ambientais, legislação local e outros, devem ser considerados.

4.2 Cominuição

A cominuição faz parte da maioria dos projetos de processamento, incluindo etapas de fragmentação, que podem ir do desmonte ao produto final, e intermediárias para transporte, concentração física ou metalurgia extrativa (LUZ, 2010).

O produto fragmentado influencia diretamente o rendimento dos processos subsequentes de concentração. No caso do processamento do cobre, as etapas de cominuição incluem britagem e moagem.

4.3 Britagem

No processamento do minério de cobre, a britagem primária é a primeira etapa de cominuição e possibilita um tamanho máximo de alimentação de 1000mm com produção em aproximadamente 200mm, dependendo das dimensões dos britadores (LUZ,2010).

O britador giratório é o equipamento utilizado quando há uma grande quantidade material a ser fragmentado, além de possuir a flexibilidade de ser alimentado por qualquer lado. Portanto, é o equipamento mais utilizado na britagem primária do cobre.

A alimentação do britador dispensa o uso de alimentadores e é realizada diretamente através da descarga dos caminhões na moega de alimentação do britador, como representado na figura 4.3. A moega realiza o direcionamento do material para a entrada do britador. Devido a flexibilidade do equipamento, é possível a alimentação simultânea de 2 caminhões.

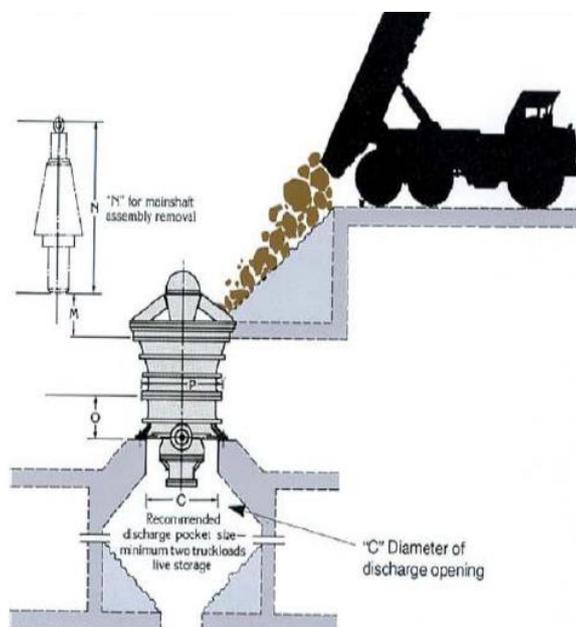


Figura 4.3 – Esquema de alimentação do britador giratório

Fonte: www.usp.br

O princípio de funcionamento do britador giratório consiste no movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação a carcaça invertida. Com o movimento circular, toda a carcaça é utilizada no processo de cominuição, possibilitando uma grande capacidade de operação. A figura 4.4 representa o diagrama funcional de um britador giratório e sua seção transversal.

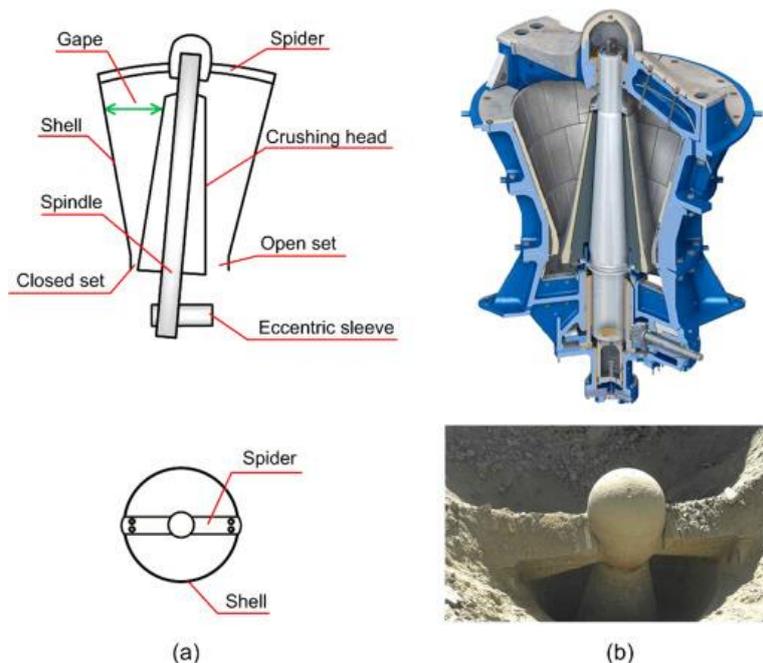


Figura 4.4 - Britador giratório a) diagrama funcional do britador b) seção transversal e visão aérea.

Fonte: www.sciencedirect.com

4.4 Moagem SAG e Moinho de bolas

A moagem é o último estágio da cominuição. As partículas são reduzidas a um tamanho adequado do mineral de interesse. Essa etapa requer maior investimento e possui um gasto maior de energia.

Os moinhos semiautógenos (SAG) e de bolas são os equipamentos utilizados no circuito típico do beneficiamento de cobre. No caso de minérios com maior tendência a formar

pebbles (partículas de tamanho tal que não podem ser quebradas e não auxiliam na quebra de partículas menores (WILLS, 1997)), que não são adequadamente fragmentados nos moinhos SAG, pode-se aumentar a abertura da grelha de descarga do moinho e adicionar britadores de reciclo. Esse tipo de circuito é denominado SABC (BERGUERMAN, 2009).

O produto da britagem primária alimenta a etapa de moagem, constituído inicialmente pelo moinho SAG. O produto do moinho alimenta as peneiras que realizam a classificação do material. O passante segue para a etapa de moagem de bolas e o retido alimenta o britador de cone. O britador realiza a britagem de pebbles e o produto retorna para alimentar o moinho SAG, fechando o circuito.

O moinho de bolas é alimentado com polpa, portanto o material passante na peneira segue para empolpamento e é bombeado para alimentar os hidrociclones que realizam a classificação. O *overflow* segue para a etapa de flotação e o *underflow* alimenta a moagem de bolas. O produto retorna a etapa de empolpamento e é novamente submetido a classificação. O circuito de moagem está representado no fluxograma da figura 4.5.

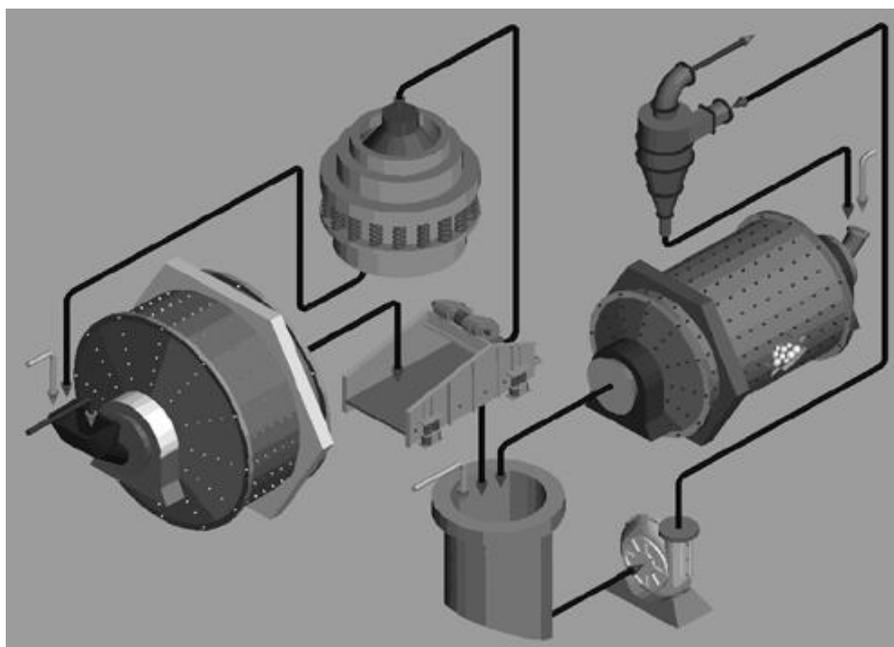


Figura 4.5 - Fluxograma da moagem semiautógena com britagem de reciclo, seguida de moagem de bolas (circuito SABC).

Fonte: (LUZ, 2010)

Os moinhos são basicamente cilindros rotativos revestidos internamente com placas de desgaste (figura 4.6). Internamente, possuem corpos moedores que se movem livremente, realizando a cominuição do material. Através da rotação do moinho, os corpos são elevados e caem sobre a polpa de minério ocasionando a quebra do minério. O escorregamento dos corpos moedores sobre o revestimento e o impacto destes corpos entre si também acarretam a moagem (METSO, 2005).

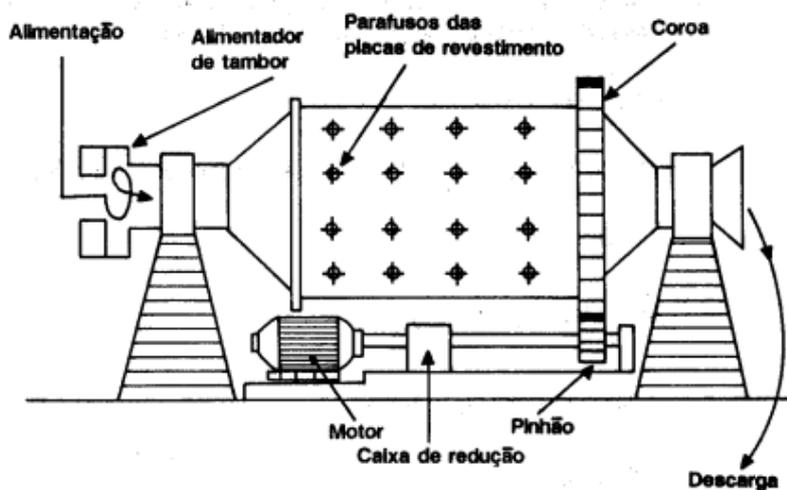


Figura 4.6 - Diagrama funcional genérico de um moinho

Fonte: Figueira, 2004

De acordo com a figura 4.7, os corpos moedores são elevados através do movimento até certo ponto onde caem, descrevendo uma trajetória parabólica, sobre outros corpos que estão na parte inferior e sobre o material.

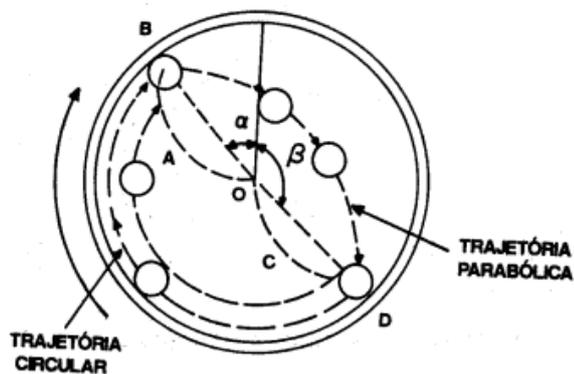


Figura 4.7 - Trajetória dos corpos moedores dentro do moinho

Fonte: FIGUEIREDO, 2010

O moinho SAG utiliza bolas de aço em adição ao próprio minério, como corpos moedores, sendo necessário apenas de 3% a 20% do volume do moinho (RODRIGUES, 2012). O equipamento possui uma ampla faixa de capacidade de processamento, se comparado aos demais.

Segundo Mular e Burkertz (1989), os moinhos SAG devem visar a maximização da vazão de alimentação. Como a densidade do minério é menor que a das bolas, é necessário maiores volumes e/ou velocidades se comparado ao moinho de bolas (RODRIGUES, 2012).

A figura 4.8 exemplifica um moinho SAG e possibilita uma noção aproximada da sua proporção de tamanho.



Figura 4.8 - Moinho SAG

Fonte: www.metso.com

O moinho de bolas utiliza esferas de aço ou ferro como corpos moedores. Sua câmara de moagem possui um comprimento útil menor que o dobro do seu diâmetro. Devido ao comprimento curto, utiliza-se o circuito fechado, visto que não há controle do tamanho máximo do produto através da operação do moinho apenas.

A moagem de bolas é realizada via úmida, requerendo apenas 77% da potência necessária para a moagem via seca do mesmo material e granulometria. Isso ocorre devido a ação lubrificante e transportadora da água, facilitando o processo. Além disso, apresenta benefícios como a facilidade de controle do processo através da densidade da polpa e pelo nível de descarga do moinho; e a ausência de coletores de pó, evitando a poluição da instalação (METSO, 2005).

4.5 HPGR e Britador Cônico

O moinho de rolos é uma alternativa em substituição a moagem SAG e o britador de reciclo (giratório), adicionalmente a britagem secundária (cone). O esquema de cominuição alternativo está representado na figura 4.9.

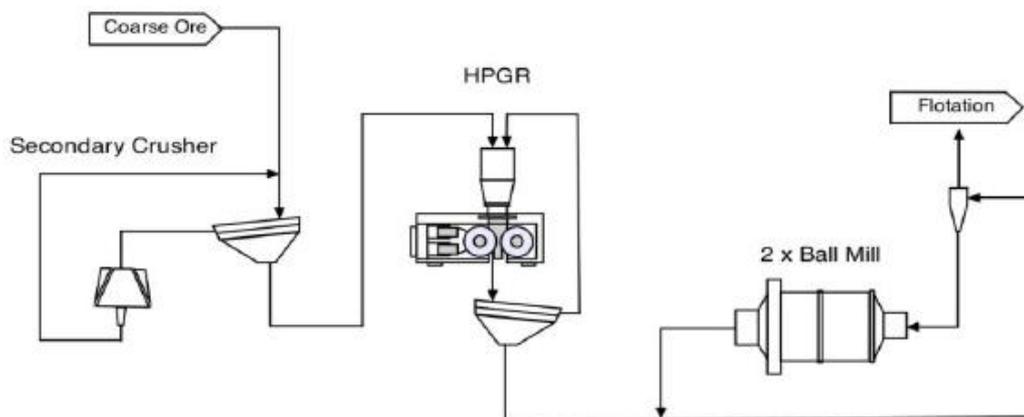


Figura 4.9 - Circuito alternativo utilizando HPGR e britador cônico

Fonte: (WANG, 2013)

O moinho/prensa de rolos de alta pressão (HPGR) é uma tecnologia relativamente nova e tem origem nos moinhos movidos por tração animal e utilizados para moagem de grãos. Tentativas de aplicação na moagem de minérios mostrou um alto desgaste da superfície dos rolos, sendo, portanto, indicados apenas para materiais pouco abrasivos. Além de ser necessária a instalação de equipamentos como detector de metais e extrator de sucatas para proteção do equipamento.

O moinho é constituído por dois rolos paralelos girando em sentido contrário, a velocidades iguais ou diferentes. O material alimentado é submetido à força de compressão. O movimento do rolo móvel é controlado hidraulicamente. O trabalho da abertura dos rolos é determinado pela natureza do material e granulometria da alimentação. Pode-se utilizar também um HPGR constituído por um rolo móvel e outro fixo (equipamento utilizado no Projeto Salobo). O diagrama funcional está representado na figura 4.10.

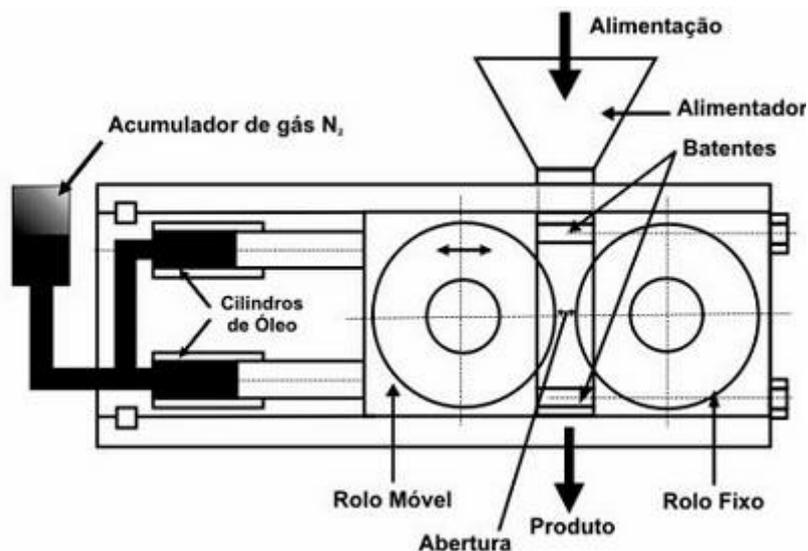


Figura 4.10 - Diagrama funcional do HPGR

Fonte: <http://www.metalica.com.br>

O HPGR apresenta vantagem em relação o moinho de bolas, visto que possuem um menor consumo de energia para uma dada relação de redução.

O britador cônico, utilizado na britagem secundária, possui o mesmo princípio de funcionamento do britador giratório. Ambos são máquinas com eixos oscilantes. No cônico, o manto e o cone apresentam superfícies paralelas, fazendo com que as partículas permaneçam por um tempo maior na região de cominuição. Ao contrário do britador giratório, no cônico a descarga é condicionada ao movimento do equipamento, para cima e para baixo (LUZ, 2010).

A altura do cone é reduzida em relação ao diâmetro da base e o manto é fechado no topo. Dessa forma o volume da câmara é melhor aproveitado no trabalho de rebitagem do material, conforme figura 4.11.

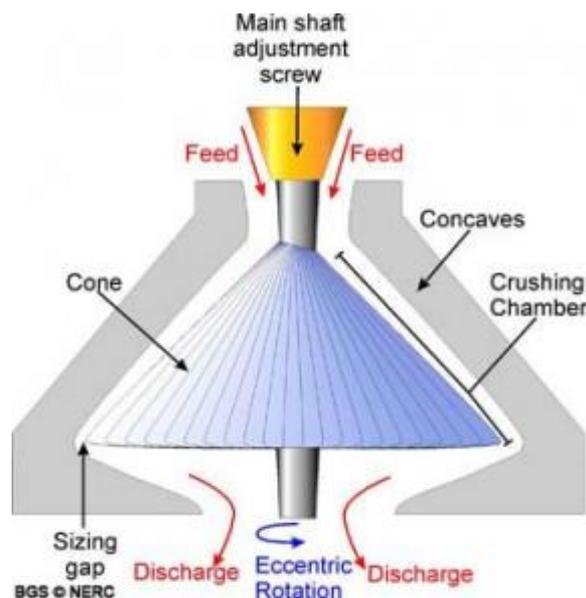


Figura 4.11 - Diagrama funcional do britador cônico

Fonte: www.engineeringintro.com

4.6 Flotação

A concentração é realizada através de processos de flotação direta. Na polpa, as partículas são obrigadas a percorrer um trajeto, sendo o material de interesse flotado. A diferenciação das partículas ocorre através da sua capacidade de ser prender a bolhas de gás, devido a hidrofobicidade. Quanto maior a hidrofobicidade, maior será a repelência por água e maior a afinidade por substâncias apolares ou lipofílicas. Se a partícula se adere a um número suficiente de bolhas, sua densidade se torna menor que a do fluido e ela é suspensa, ficando retida em uma espuma e recolhida através do transbordo ou mecanicamente. As demais partículas permanecem inalteradas e acompanham o fluxo de água (LUZ, 2010).

Os equipamentos mais utilizados na flotação são células e/ou colunas. As células possuem agitação e são alimentadas por uma de suas faces laterais e o produto é descarregado pela outra face, conforme figura 4.12. A espuma sobe e é descarregada por transbordo sobre calhas dispostas ao longo da extensão do equipamento. O material deprimido é arrastado pela água e descarregado pelo fundo.

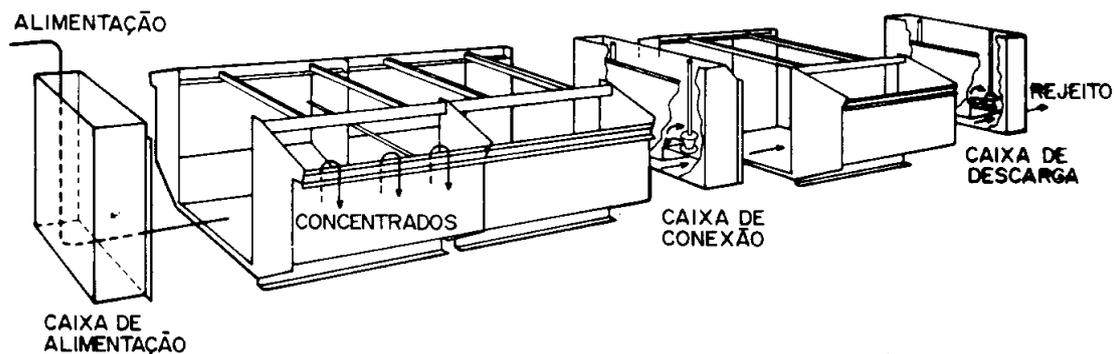


Figura 4.12 Arranjo de células de flotação

Fonte: (LUZ, 2010)

As colunas de flotação são equipamentos estáticos. A alimentação é realizada a cerca de $2/3$ da altura. O ar é injetado na base do tanque através de aeradores. O concentrado é flotado e retirado pela parte superior através de calhas. O rejeito é descarregado pela parte inferior e é controlado através de válvulas, conforme figura 4.13.

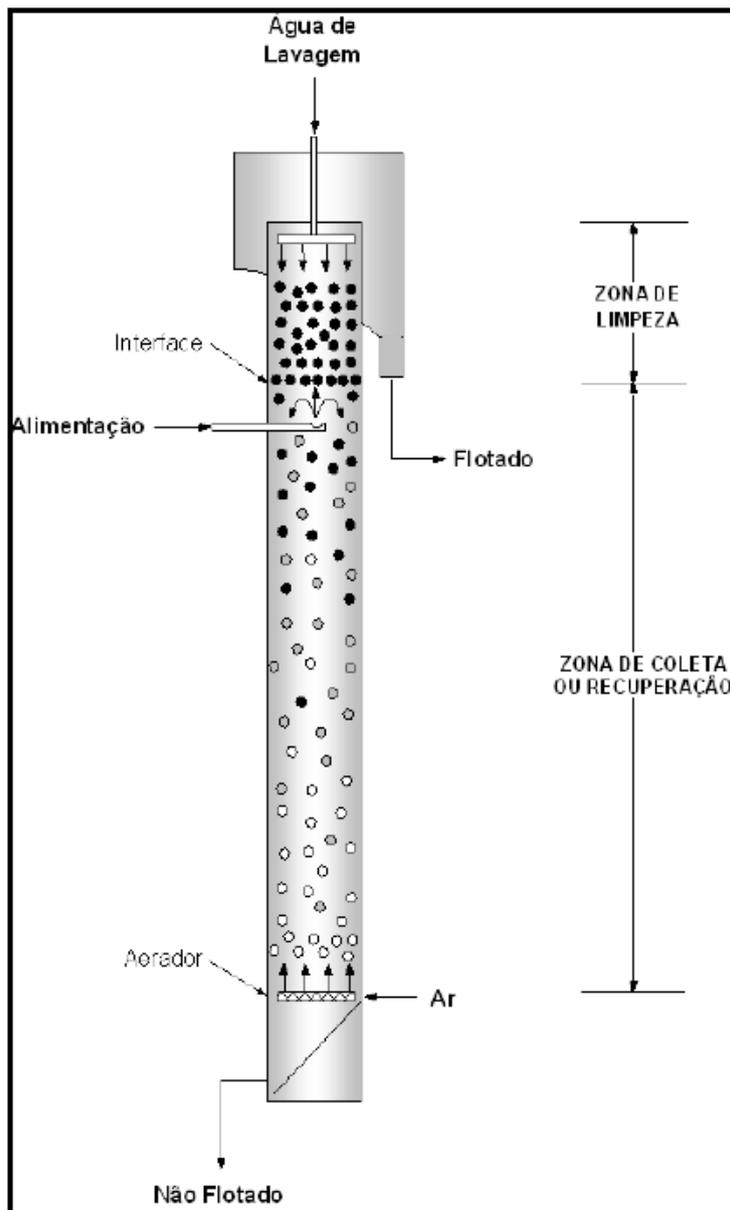


Figura 4.13 - Diagrama funcional de uma coluna de flotação

Fonte: LUZ, 2010

A flotação do cobre é composta das etapas *rougher*, *cleaner* e *scavenger*. Genericamente, na primeira etapa da flotação, *rougher*, obtém-se um concentrado pobre e um rejeito que ainda contém teores de minerais úteis. A etapa seguinte, *cleaner*, produz o concentrado final e um rejeito de teor elevado. O rejeito *rougher* alimenta a etapa *scavenger*, onde se obtém o rejeito final (muito pobre) e um concentrado com minerais úteis, mas que é pobre para ser classificado como concentrado final. O rejeito da *cleaner* e o concentrado *scavenger* ainda contêm minerais úteis e são retomados para a etapa *rougher*. Caso necessário, podem ser adicionados vários estágios de cada etapa.

Como a maioria dos minerais possuem natureza naturalmente hidrofílica (afinidade com a água), é necessário o uso de reagentes específicos para cada material afim de alterar sua característica para hidrofóbica.

Os coletores possuem natureza polar e apolar. Assim, a parte polar adere a superfície do mineral e a apolar fica exposta, conferindo caráter hidrofóbico a partícula. Dessa forma, a partícula se liga ao ar.

As bolhas de ar que se ligam as partículas também sobrem ação de reagentes, o espumante, permitindo a formação de espuma que carrega o material de interesse, uma vez que reduz a tensão na interface água-ar, provocando estabilidade.

Outros reagentes podem ser utilizados, como modificadores e reguladores para ajustar a condição ideal de flotação.

4.7 Separação Sólido/Líquido

Os dois objetivos para os processos de separação sólido/líquido são: produção de um sólido desaguado e de um líquido clarificado.

A sedimentação é um dos processos de separação baseado na diferença de densidades. A remoção é através da ação gravitacional, portanto o processo possui como característica o baixo custo e a simplicidade operacional.

Os sedimentadores podem ser: espessadores ou clarificadores. Os espessadores são focados no sólido e produzem um material espessado com alta concentração de sólidos. Já os clarificadores são focados no líquido e geram um produto com baixa concentração de sólidos.

No processamento do cobre são utilizadas etapas de espessamento e filtragem.

O espessamento é utilizado com a finalidade de obtenção de polpa com porcentagem de sólidos adequada ao processo subsequente e recuperação de água para reciclo no

processo de beneficiamento. Essa última finalidade é decorrente do constante aumento dos conceitos de sustentabilidade.

Os espessadores são basicamente tanques cilíndrico-cônicos, construídos com concreto ou aço e equipados com mecanismos de raspagem, para movimentar o material sedimentado até o ponto de descarga. Os raspadores também podem ser chamados de ancinhos ou rastelos e são acoplados a uma estrutura central onde se localiza o tubo de alimentação.

A figura 4.14 mostra o esquema de funcionamento de um espessador contínuo convencional, o mais utilizado industrialmente. O equipamento possui um sistema de alimentação de suspensão, raspadores e dispositivos de descarga *overflow* (líquido clarificado) e *underflow* (polpa com grande porcentagem de sólidos).

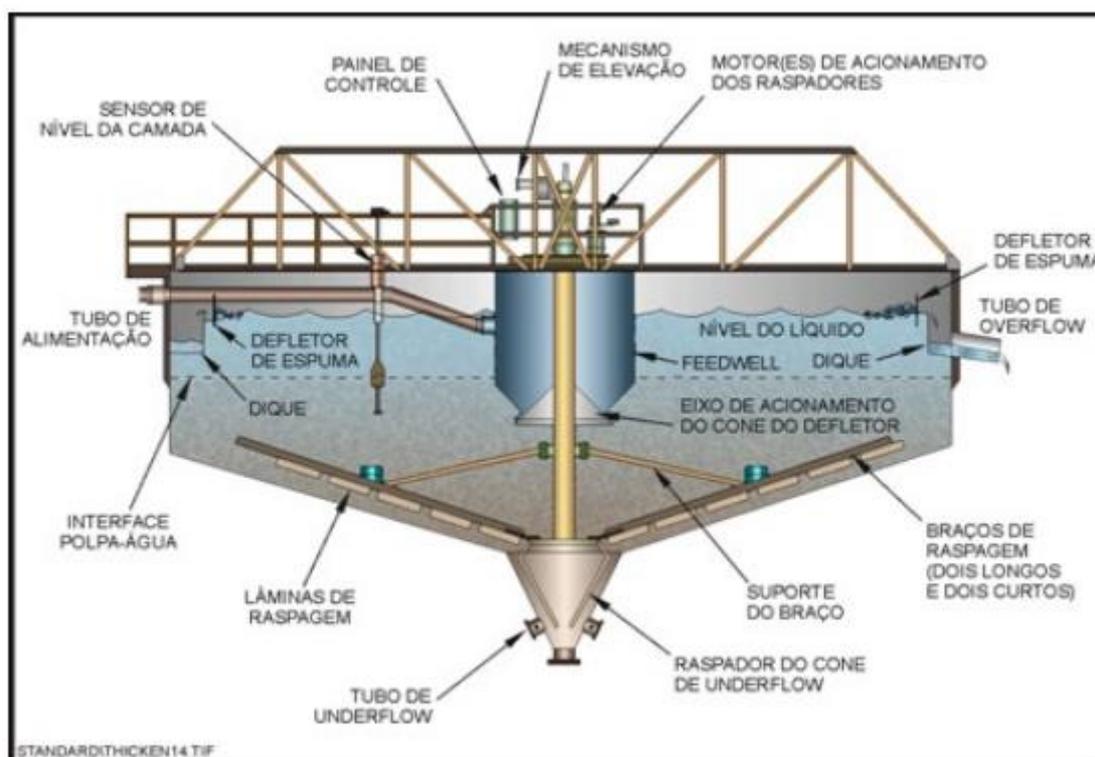


Figura 4.14 - Esquema funcional de um espessador

Fonte: www.slideplayer.com.br/slide/1235049

Após o processo de espessamento, a polpa é direcionada a filtragem. Para minérios de cobre podem ser utilizados filtros a vácuo (tambor e disco), filtros cerâmicos e filtros prensa.

Na filtração, a suspensão escoar por ação da pressão contra o meio filtrante, tendo como resultado a separação entre o filtrado e a torta. O filtrado corresponde ao líquido da suspensão e as partículas sólidas formam a torta. O meio filtrante é um tecido que retém as partículas. Posteriormente, a própria torta realiza a tarefa e aumenta sua espessura com o tempo. (LUZ, 2010).

4.8 Metalurgia Extrativa

A extração de cobre de concentrados de sulfetos, obtido pelo processo de flotação, ocorre através das rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas. O processo pirometalúrgico é aplicado a minerais sulfetados e o hidrometalúrgico, para minerais oxidados e também sulfetados.

4.8.1 Hidrometalurgia

É o processo de extração de metais onde a principal etapa de separação consiste em reações de dissolução do mineral minério em meio aquoso.

As etapas, de forma genérica, são separadas em:

- Preparação: ajuste das propriedades físico-químicas do sólido (processo de beneficiamento). Ajuste da granulometria, composição, teor, entre outros;
- Lixiviação: dissolução seletiva dos minerais contendo o metal de interesse através do contato do sólido (minério ou concentrado) com ácido, base ou agentes complexantes, em condições variadas de pressão e temperatura;
- Separação sólido/líquido: ciclonagem, espessamento e filtração;
- Tratamento da solução: purificação da solução produzida na lixiviação. O tratamento é feito através da separação de elementos provenientes da dissolução da ganga e que podem prejudicar a recuperação;

- Recuperação: reações de redução em fase aquosa. O principal processo utilizado é a eletrorrecuperação. O processo envolve aplicação de diferença de potencial entre cátodos-ânodos imersos em solução aquosa (CIMINELLI, 2007).

O processo de eletrólise é denominado SX-EW. Comparado a pirometalurgia, esse processo possui inúmeras vantagens incluindo o menor custo de produção do cobre, a não emissão de gases poluentes e o reaproveitamento de minérios de baixo teor.

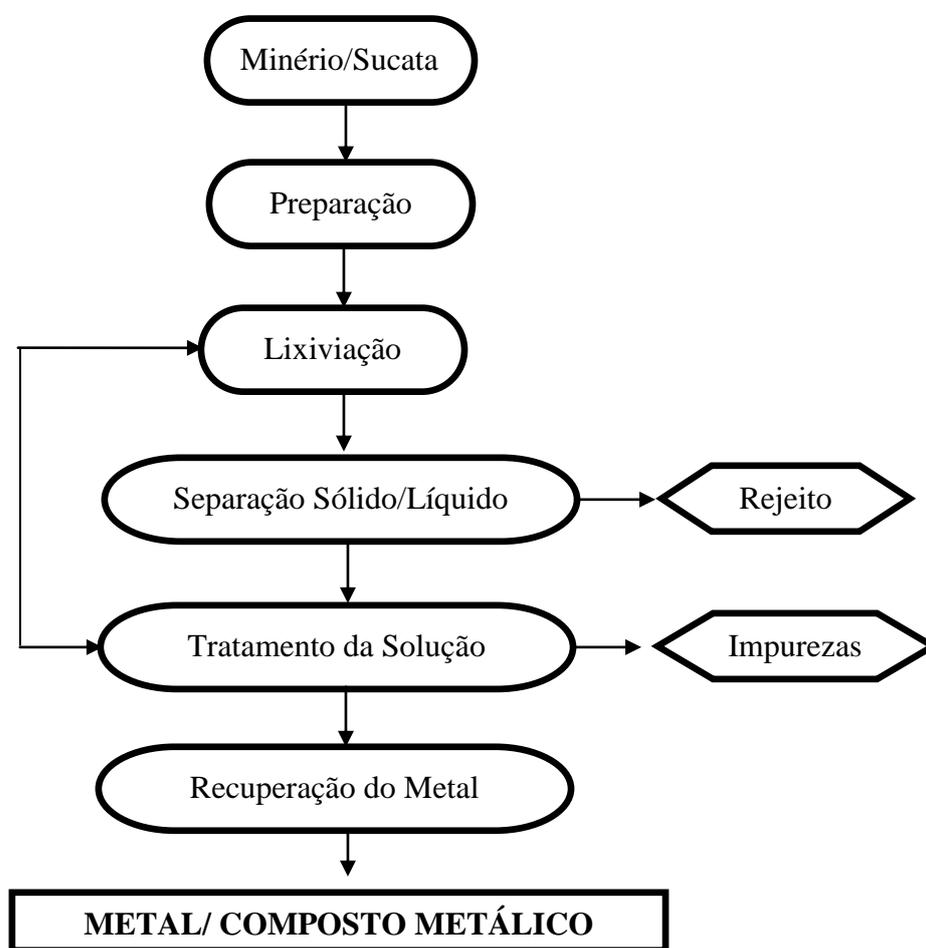


Figura 4.15 - Fluxograma com as principais etapas do processo hidrometalúrgico

Fonte: (Adaptado de CIMINELLI, 2007)

Para o cobre, temos os exemplos de aplicação da tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Exemplos de processos de metalurgia extrativa para o cobre

Item de interesse	Tipo	Preparação	Processos	
Cu	Minérios oxidados	Britagem e moagem, aglomeração (pré-cura ácida)	Com H ₂ SO ₄ , em pilhas	-
	Baixo teor, parcialmente oxidado	-	Em pilhas com microrganismos	Extração por solventes seguida de eletrorrecuperação
	Concentrado	Flotação	Lixiviação em autoclaves	-

Fonte: (Adaptado de CIMINELLI, 2007).

4.8.2 Pirometalurgia

O processo pirometalúrgico é o mais utilizado para minérios sulfetados.

As rotas pirometalúrgicas são: ustulação, seguida de lixiviação sulfúrica e o processo *flash smelting*.

- Ustulação: transformação de sulfetos de cobre, na presença de oxigênio e temperaturas elevadas, em óxido de cobre. O óxido é submetido a lixiviação sulfúrica com produção de sulfeto de cobre.
- *Flash Smelting*: transformação direta dos sulfetos de cobre, contidos nos concentrados de flotação, em cobre metálico impuro (blister). O material resultante é eletrorrefinado atingindo a pureza de 99,99%. (BARD, 2007).

A rota de processo *Flash Smelting* é a praticada industrialmente.

Após o processo de beneficiamento, o concentrado é submetido ao forno *flash*, obtendo como produto o *matte* com teor entre 45% e 60%. O *matte* é encaminhado ao forno

conversor obtendo-se o blister com 98,5% Cu. Dependendo do destino de utilização, o blister pode ser refinado ao fogo obtendo um concentrado de 99,7% (anodo) sendo posteriormente refinado eletroliticamente, atingindo a pureza de 99,9% (catodo).

O catodo é submetido ao processo de fusão ou trefilação para obtenção de vergalhões, placas, barras, tubos e outros (ANDRADE,1997).

A figura 4.16, representa um fluxograma resumo do processo de metalurgia extrativa. Nele pode-se comparar as rotas pirometalúrgica e hidrometalúrgica para produção do cobre.

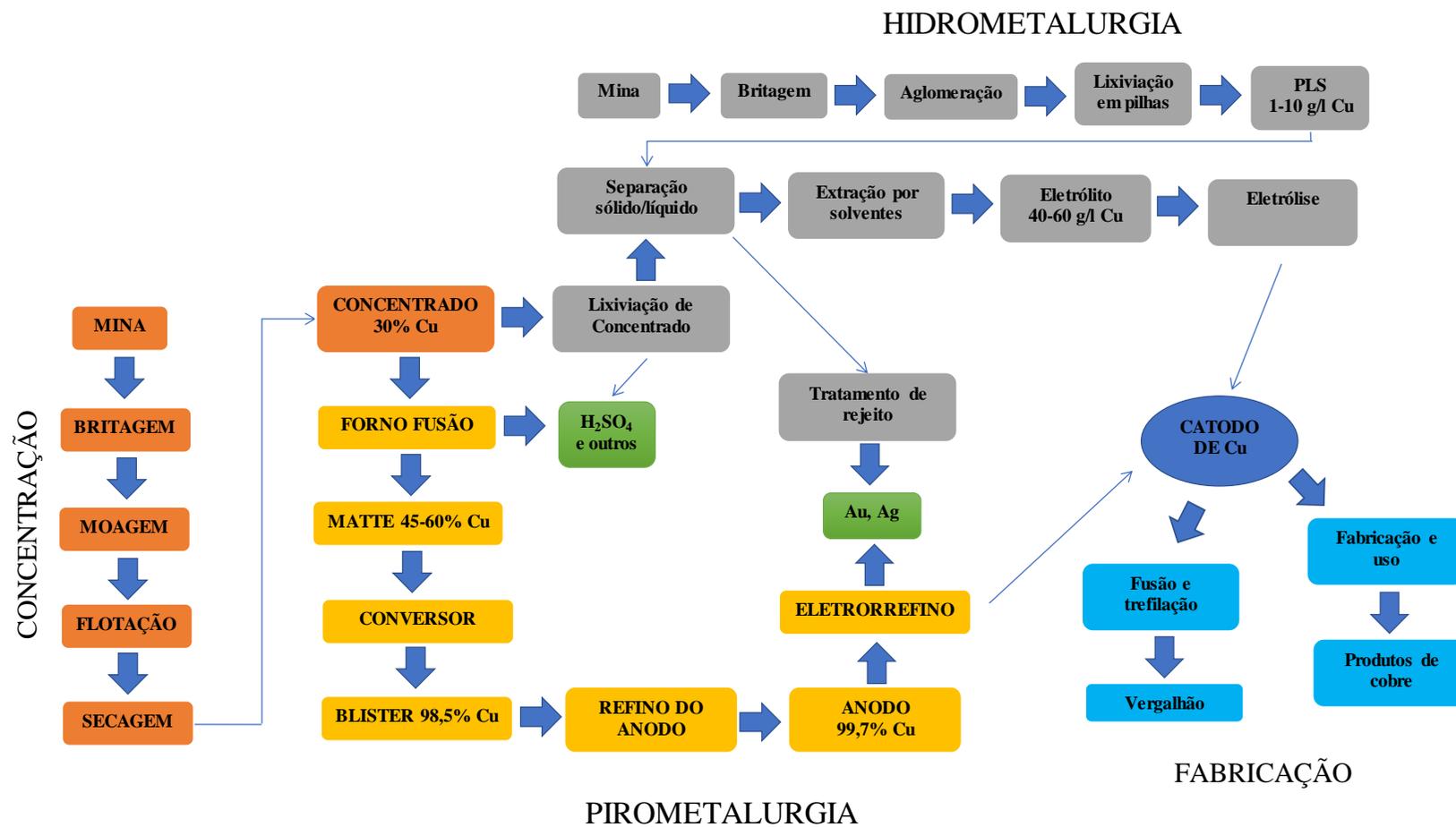


Figura 4.16 - Rotas metalúrgicas para o cobre
 Fonte: (Adaptado de www.slideplayer.com.br/slide/5615075)

4.9 Reciclagem

O constante crescimento de novas tecnologias utilizando o cobre faz com que a demanda pelo metal venha aumentando ao longo dos anos. A reciclagem do cobre é uma importante aliada nesse processo, uma vez que ajuda a atingir a produção necessária, além de fomentar o processo de conservação dos recursos naturais buscando sustentabilidade.

O cobre, por ser um metal 100% reciclável, é altamente indicado para reciclagem e reutilização, como observado na figura 4.17. Mesmo após esse processo, todas as propriedades do metal são mantidas, sendo, portanto, classificado da mesma forma que o metal recém extraído proveniente da mineração.



Figura 4.17 - Cadeia de valor simplificada do cobre

Fonte: (Internacional Copper Association, 2013)

O processo de reciclagem (produção secundária) requer 85% menos de energia que a produção primária (mineração) (Internacional Copper Association, 2013).

O cobre reciclado pode ser proveniente da “sucata velha” (material que chegou ao fim da sua vida útil) ou “sucata nova” (formata durante os processos de produção e fabricação).

Cobre de boa qualidade e com alta condutividade pode ser reciclado por fusão e inspeção antes da fundição, porém esse processo é exclusivo para materiais provenientes de ambientes de manuseio exclusivo do cobre. Se a sucata for proveniente de um liga, facilmente pode-se facilmente fundi-la e obter um novo produto de boa qualidade. Correções na composição podem ser realizadas durante a fusão, para melhorar a qualidade final.

Para o cobre contaminado, é necessário derretê-lo e fundi-lo no formato de anodo para ser purificado eletroliticamente. Se o nível de impureza for significativo, provavelmente o catodo produzido não irá atender aos padrões de alto nível (VASQUES, 2009).

5 ESTUDO DE CASO - SALOBO

A Mina de cobre do Salobo pertence a Vale e está localizada na região de Carajás, sudeste do Pará. É a maior reserva de cobre do país. Sendo composto por um depósito de cobre sulfetado, a lavra é a céu aberto.

O teor médio do depósito é de 0,76%. A rocha hospedeira é um xisto com percentual considerável de magnetita em sua composição (SOUZA, 2017).

A Mina de Salobo iniciou as atividades em 2012 processando 12 Mtpa de minério. Em 2014 duplicou a capacidade para um total de 24 Mtpa com a implantação da usina de Salobo II, correspondente a produção de aproximadamente 560 mil toneladas de concentrado de cobre e ouro, o equivalente a 200 mil toneladas de cobre contido por ano e 8 toneladas de ouro contido.

Espera-se com a implantação de Salobo III, planta adicional de 12 Mtpa de ROM, processar um total de 36 Mtpa, e dependendo do teor de alimentação, produzir um total de 840 mil toneladas de concentrado (capacidade de projeto), correspondendo a 300 mil toneladas de cobre contido e 12 toneladas de ouro contido.

5.1 Dados Gerais

A composição química do minério está representada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composição química do minério do projeto Salobo

Composto	Proporção (%)
Cobre	1,02
Magnetita	6,30
S	0,33
Au (g/t)	0,50

Fonte: (VALE, 2008)

Os principais dados de projeto estão especificados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Principais dados de processo da planta Salobo

Descrição	Dados
Teor médio de cobre na alimentação	1,02%
Teor de cobre na alimentação – até 2020	1,05%
Teor de cobre na alimentação – após 2020	0,85%
Teor de cobre na alimentação (máximo)	1,45%
Teor de cobre no concentrado (médio)	38,0%
Variação teor de cobre no concentrado	35,0-42,5%
Recuperação metalúrgica Cu	87,0%
Recuperação metalúrgica Au (estimada)	71,0%
Recuperação metalúrgica Ag (estimada)	40,0%
Recuperação em massa	2,11%
Capacidade de produção de concentrado (base seca) – média	280.670 tpa

Fonte: (VALE, 2008)

O regime operacional é separado por área, conforme especificado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Regime operacional da planta Salobo

Descrição	Britagem Primária	Britagem Secundária	HPGR/ Moagem/ Concentração	Filtragem /concentrado
Rendimento operacional	65	80	90	90
Horas efetivas /ano	5.694	7.008	7.884	7.884

5.2 Beneficiamento

A rota de processamento é constituída de cominuição, concentração e separação sólido/líquido:

- Cominuição:

- ✓ Britagem primária
- ✓ Peneiramento primário e britagem secundária
- ✓ Prensagem e peneiramento secundário
- ✓ Moagem de bolas e classificação em hidrociclones
- Flotação e remoagem:
 - ✓ *Rougher I*
 - ✓ *Rougher II*
 - ✓ SFR (*State Reactor Flotation*)
 - ✓ *Cleaner I*
 - ✓ *Cleaner II*
 - ✓ *Cleaner III*
 - ✓ *Scavenger do cleaner*
 - ✓ Remoagem
 - ✓ Lançamento de rejeitos
- Desaguamento do concentrado:
 - ✓ Espessamento
 - ✓ Mineroduto
 - ✓ Filtragem

As 3 etapas de processamento do Salobo (I, II e III), possuem rotas de beneficiamento semelhantes, com pequenas exceções que serão analisadas a seguir.

5.2.1 Britagem Primária

O minério é transportado por caminhões de 240/400 toneladas e alimenta os dois lados da moega de alimentação do britador primário giratório, tamanho 60” x 89”. A moega possui capacidade de 800t e pode ser alimentado simultaneamente por dois caminhões.

Estão instalados de dois rompedores de matacões para a quebra de blocos maiores que aqueles admitidos pela câmara do britador, de forma a proteger o equipamento e evitar possíveis paradas.

O produto do britador primário, cerca de 80% passante em 152mm, é descarregado na moega de descarga do britador e segue através de um transportador de alta capacidade para a formação da pilha de estocagem. O transportador é dotado de balança integradora para controle da produção.

5.2.2 Pilha de Britagem

A pilha cônica (pilha de estocagem de minério britado) tem capacidade útil de 24.000 t (para a fase de 12 e 24 Mtpa), permitindo uma autonomia de aproximadamente 14 horas de operação do peneiramento primário e da britagem secundária. Na fase de 36 Mtpa, a pilha possuirá capacidade útil de 25.400 toneladas, propiciando autonomia de 9 a 14 horas de operação. Tratores poderão ser utilizados para aumentar a utilização da pilha.

Quatro alimentadores de correia, com inversores de frequência e operando com 100% da capacidade, retomam o material da pilha de estocagem. Na fase 24 Mtpa e 36 Mtpa, apenas três alimentadores operam. Os alimentadores transferem o material para os transportadores que alimentam o silo. Os transportadores são dotados de extrator de sucatas, para proteger os britadores secundários, balança integradora para controle da alimentação da etapa seguinte, peneiramento primário/britagem secundária, e detector de metais.

5.2.3 Peneiramento Primário e Britagem Secundária

O material retomado da pilha de estocagem alimentará a britagem secundária que possui circuito fechado com o peneiramento primário. A retomada é realizada através de alimentadores de correia (de placas para a fase 36 Mtpa) e descarregado em transportadores de correia que alimentam o silo do britador. O silo será descarregado por alimentadores de correia para alimentar o peneiramento primário.

No peneiramento primário são utilizadas peneiras vibratórias tipo banana, de 12' x 24' e deck duplo, sendo o primeiro deck para alívio.

O retido do peneiramento alimenta diretamente o britador secundário de cone, modelo MP1000 ou similar com câmara de grossos. A descarga do britador é transferida por

transportadores de correia para recirculação, retornando novamente para o silo, fechando o circuito. Os transportadores possuem balança integradora para monitoramento da carga circulante.

O passante da peneira constitui o produto final da britagem, sendo 100% menor que 55mm, e será transportado por transportadores de correia de longa distância (TCLDs) para a pilha de estocagem secundária.

5.2.4 Transportadores de Correia de Longa Distância (TCLDs)

O sistema de transporte de longa distância é destinado a integrar as áreas operacionais de britagem primária, peneiramento primário e britagem secundária com as demais unidades de processo da planta de beneficiamento.

O sistema é constituído por um único transportador de correia do tipo tubular (*pipe conveyor*) com 2.000mm de largura e 1.773,5m de comprimento, na fase de 12 Mtpa. Na fase de 36 Mtpa, o sistema será constituído de cinco transportadores de correia, do tipo convencional, com 1.000mm de largura.

5.2.5 Pilha de estocagem do minério britado

A pilha secundária para estocagem do produto britado tem formato cônico. A critério da operação, tratores podem ser utilizados para aumentar a utilização da pilha.

O material é retomado por alimentadores de correia de velocidade variável. O ROM então será transferido por transportadores de correia, dotados de extratores de sucata e balança integradora.

O material não britável ou sucata metálica é recolhido juntamente com a magnetita pelos extratores de metais e alimenta o peneiramento da magnetita. O sistema é composto por transportador e peneira vibratória inclinada. O material retido na peneira é empilhado como sucata, enquanto o material passante é recolhido por transportador e retorna ao processo.

5.2.6 HPGR

O material estocado na pilha será retomado por transportador de correia para alimentar o silo das prensas de rolos (HPGR). O material estocado no silo, constituído de alimentação nova e carga circulante, é extraído por alimentadores de correia.

Os alimentadores transferem o material retomado dos silos para as prensas de rolos que operará em circuito fechado com o peneiramento secundário a úmido. O produto das prensas é recolhido e segue por transportadores de correia para alimentar o silo do peneiramento secundário. Os transportadores são dotados de extratores de metais.

Para manter a prensa de rolos em operação e com bom desempenho é necessário manter a alimentação livre de corpos estranhos e contaminantes que possam danificar o revestimento, reduzindo a vida útil e aumentando o custo operacional (OPEX). Para isso, além do peneiramento de magnetita mencionado anteriormente, são utilizados dispositivos de proteção para o equipamento. Os alimentadores que transferem o material para o HPGR são dotados de detectores de metais que comandam a operação de desviadores de fluxo. A alimentação é desviada para o transportador de descarga “by-passando” o HPGR. A posição de desvio é mantida por um determinado período para garantir que os metais detectados não alimentem a prensa.

5.2.7 Peneiramento Secundário

O material proveniente da prensagem alimenta o silo do peneiramento secundário. O silo é descarregado por alimentadores de correia que alimentam as peneiras.

As peneiras secundárias são do tipo banana com dimensões de 12' x 24'. O peneiramento será a úmido e, além da água de spray nas peneiras, um sistema de empolpamento é instalado nos alimentadores, para um bom desempenho do processo.

O retido no peneiramento (granulometria + 8mm) é conduzido por transportadores de correia que descarregam no desviador de fluxo, retornando novamente ao circuito, como

carga circulante. O transportador é dotado de balança integradora para controle da carga circulante.

O passante no segundo deck é conduzido para as caixas de polpa, onde é bombeado para alimentar a ciclonagem da moagem.

5.2.8 Moagem e Classificação

A classificação é realizada por duas baterias de 10 hidrociclones de 26” (7 operacionais e 3 reservas). Na alimentação de cada ciclone estão instaladas válvulas gilhotinas para permitir o isolamento individual de cada ciclone.

O *underflow* da ciclonagem alimenta dois moinhos de bolas. O produto da moagem seguirá novamente para a caixa de polpa e classificação por ciclonagem, fechando o circuito. O *overflow* da ciclonagem alimentará a etapa de flotação.

5.2.9 Sistema de Manuseio e Estocagem de Bolas

Os corpos moedores para os moinhos de bolas são recebidos a granel em caminhões e estocados em silos de concreto. Os silos são dotados de alimentadores rotativos de bolas que alimentam os transportadores, conduzindo até os moinhos de bolas.

A adição de bola aos dois moinhos não é simultânea. O transportador descarrega através de desviadores de fluxo no chute de alimentação dos moinhos. O controle de dosagem é realizado por balança integradora.

5.2.10 Flotação

O circuito de flotação adotado é direto e ocorre a flotação de grossos e de finos simultaneamente.

Conforme figura 5.1, a flotação é composta pelas etapas *rougher* I e II (células tipo tanque), *scavenger do cleaner* (células tipo tanque) e as etapas *cleaner* 1, 2 e 3

(colunas). Para a planta de Salobo III, ainda está prevista a instalação de uma SFR após a etapa *rougher 2*, conforme fluxograma da figura 5.1.

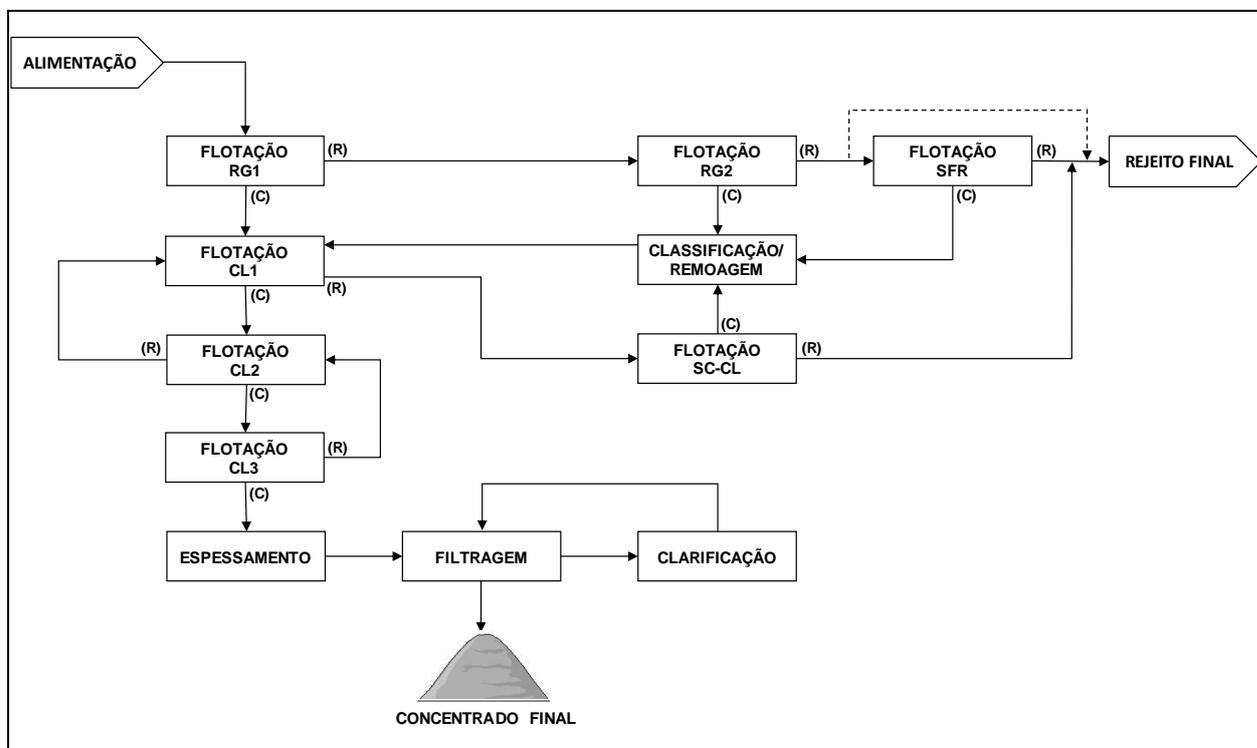


Figura 5.1 – Fluxograma de concentração e separação sólido/líquido do Salobo

Após a moagem, o material segue para flotação *rougher* I que é desenvolvida por células mecânicas, do tipo tanque. Para essa etapa são utilizadas duas células tanque de 200 m³ cada.

O concentrado *rougher* I (flotado) alimenta a *cleaner* I. O rejeito *rougher* I (afundado) segue para a flotação *rougher* II, que é constituída por seis células mecânicas de 200 m³.

O rejeito *rougher* II segue para a SFR (na planta de 36Mtpa), que é constituída por duas células. O rejeito SFR juntamente com o rejeito *scavenger* do *cleaner* formam o rejeito final que seguirá por gravidade para a barragem de rejeitos.

O concentrado rougher II juntamente com o concentrado da SFR seguem por gravidade em paralelo ao concentrado *scavenger* do *cleaner*, e depois, em uma única tubulação, alimentam a classificação da remoagem.

A flotação *cleaner* I é desenvolvida por colunas de flotação. O concentrado *cleaner* I (flotado) segue para alimentação da *cleaner* II. O rejeito alimenta a *scavenger* do *cleaner*. Essa etapa é constituída por dois bancos de células mecânicas de 200 m³.

O concentrado *scavenger* do *cleaner* é encaminhado por gravidade para a remoagem. O rejeito é parte do rejeito final da flotação.

A flotação *cleaner* II é desenvolvida em colunas, em 4 unidades. O rejeito retorna para a etapa *cleaner* I reunindo-se ao concentrado *rougher* I e o *overflow* da remoagem. O concentrado alimenta a *cleaner* III (2 colunas).

O rejeito da *cleaner* III retorna para a flotação *cleaner* II. O concentrado segue para a etapa de espessamento de concentrado.

5.2.11 Remoagem

A classificação da remoagem é desenvolvida em duas baterias de 28 hidrociclones de 10” de diâmetro (24 operacionais e 4 reservas). O *underflow* da ciclonagem é direcionado por gravidade para os moinhos verticais. A descarga dos moinhos reúne-se a alimentação nova da ciclonagem fechando o circuito de remoagem. O *overflow* alimenta a flotação *cleaner* I.

5.2.12 Espessamento de concentrado

O espessamento promove o adensamento da polpa e melhora a eficiência da filtragem. O concentrado *cleaner* III recebe adição de floculante e segue para o espessador. Alternativamente, o concentrado *cleaner* II também pode alimentar a caixa do espessador. Essa opção tem por objetivo permitir ajuste do teor de cobre do concentrado final, quando o minério apresentar teor maior de Cu. O *underflow*, com 60% de sólidos, segue para o filtro prensa.

5.2.13 Filtragem e estocagem de concentrado

Um tanque antecede o filtro com a função de estoque regularizador, garantindo a operacionalidade dos filtros, que operam em forma descontínua, em ciclos.

O concentrado é direcionado a um único filtro prensa. O filtrado gerado na prensagem é recolhido por dutos e conduzido a caixa de alimentação do clarificador. A torta é descarregada diretamente sobre a pilha de estocagem de concentrado, com umidade média entre 8,5% e 9,0%. A pilha está posicionada em galpão coberto.

Após o descarregamento da torta, as telas e dutos são lavados. O efluente da lavagem é incorporado ao filtrado e conduzido ao clarificado, onde é realizado o adensamento para recuperação de sólidos e água. O *underflow* do clarificador é incorporado a alimentação da filtragem. O *overflow* é reutilizado no processo.

O concentrado é retomado da pilha de estocagem por meio de pás carregadeiras, para caminhões caçamba de 35 t, que transportam o concentrado para a instalação de carregamento ferroviário na cidade de Parauapebas (PA), distante da planta 125km.

5.2.14 Reagentes

Para a planta de beneficiamento são utilizados os reagentes:

- Coletor 1 – Amil xantato
- Coletor 2 – Ditiofosfato de sódio
- Espumante 1 – Álcool Poliglicólico
- Espumante 2 - Álcool Poliglicólico ou Metil Isobutil Carbinol (MIC)
- Flocculante
- Cal

A rota de processamento simplificada está exemplificada no fluxograma da figura 5.2.

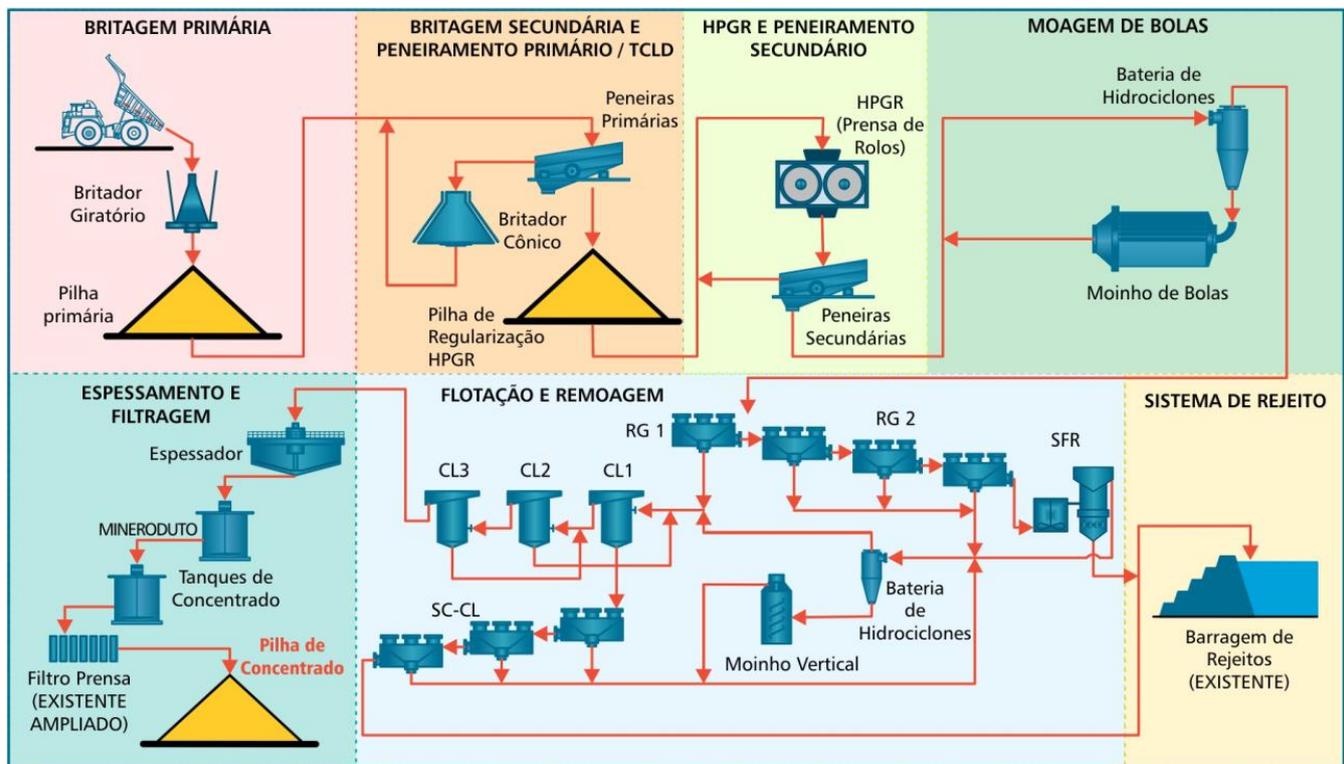


Figura 5.2 – Rota de beneficiamento do Projeto Salobo

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou a análise geral do cobre, através da utilização, reservas, produção, comercialização e outros. A descrição da rota de processamento, metalurgia extrativa e reciclagem do metal também possibilitaram a análise mais detalhada do processo.

O cobre é um dos metais mais utilizados no mundo e é um recurso natural não renovável, sendo importante escolher a rota de beneficiamento adequada. Aliado a isso, o conceito de sustentabilidade dá voz a reciclagem do metal, uma vez que suas propriedades se mantêm independentemente do uso/processos aplicados. O trabalho apresentou essas opções, buscando compreender o processo e escolher o melhor caminho a ser seguido.

No beneficiamento, destaca-se o processo de flotação como o principal meio de obtenção do metal concentrado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. L. A. et al. *A cadeia produtiva do cobre: panorama internacional e nacional*. 6 ed. Rio de Janeiro: BNDES, 1997.

BARD, G. N.; SOBRAL, L. G. S.; JUNIOR, L. V. *Recuperação de Ouro, Prata e Cobre de Lama Anódica Proveniente de Refino Eletrolítico de Cobre*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral/MCT, 2007.

CIMINELLI, V.S.T. *Hidrometalurgia*, 2007. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. *Cobre, Balanço Mineral Brasileiro*, 2001. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 17 maio. 2019.

DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. *Anuário Mineral Brasileiro*, 2016. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>. Acesso em: 17 maio. 2019.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B. *Tratamento de Minérios; Cominuição*. 4 ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

ICSG – Internacional Copper Study Group. *The World Copper Factbook*, 2010. Disponível em: <www.icsg.org>. Acesso em: 16 mar. 2019.

INTERNACIONAL COPPER ASSOCIATION. *Reciclagem do cobre*, 2013.

LME – London Metal Exchange. Disponível em: <www.lme.com>. Acesso em: 07 jun. 2019.

METSO MINERALS. *Manual de Britagem*. 6 ed. 2005.

MULAR, A. L.; BURKERTZ, A. INTERNACIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 1989,

Vancouver. Automatic control of semiautogenous gridding (sag) circuits. Vancouver: University of British Columbia, 1989, v. 2.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. *Tratamento de Minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932 p.

ROCIO, M. A. R.; SILVA, M. M.; CARVALHO, P. S. L.; CARDOSO, J. G. R. *Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil*, 2012. Disponível em: <www.bndes.gov.br>. Acesso em: 14 fev. 2019.

RODRIGUES, M. A.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. *Cobre*, 2012. Disponível em: <www.qnesc.sbg.org.br>. Acesso em: 15 abr. 2019.

SKINNER, B. J. *Recursos Minerais da Terra*. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 1980. Título original de 1969, 140 p.

SOUZA, A. A. T.; OLEGARIO, F.; SANTOS, P. F.; SILVA, M. A.; SILVEIRA, A.L.; RODRIGUES, R.A.R. *Geometalurgia de Curto Prazo da Mina do Salobo*, 2017. Belém: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa.

USGS – *United States Geological Survey*, 2019. Disponível em: <www.usgs.gov>. Acesso em: 21 fev. 2019.

VALE. *Projeto Salobo: Relatório do Projeto*, 2008.

VASQUES, A. C. *Estudo de Reciclagem de Metais no País*. J. Mendo, 2009. 168p.

WANG, C.; NADOLSKI, S.; MEJIA, O.; DROZDIK, J. KLEIN, B. *Energy and cost comparisons of HPGR based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry mine*, 2013. Ontario: Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference.

WILLS, B. A. *Mineral Processing Technology*. 6 edition. Butterworth-Heinemann: Burlington, 1997. 486p.