

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS - CEERMIN**

MONOGRAFIA

Cadeia Produtiva do Cobre

Aluno: Abel Garcia Gonçalves da Silva

Orientadora: Profa. Rísia Magriotis Papini

Março 2011

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS - CEERMIN**

Abel Garcia Gonçalves da Silva

Cadeia Produtiva do Cobre

**Monografia apresentada ao Curso de
Especialização em Engenharia de Recursos
Minerais da Universidade Federal de Minas
Gerais**

**Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientadora: Profa. Rísia Magriotis Papini**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Março 2011**

Em primeiro lugar à minha amada esposa, minha grande motivação, por me apoiar em tudo, pelo seu companheirismo, pela alegria de compartilhar todos os nossos momentos e pelo nosso amor.

À minha família, principalmente aos meus pais que sempre são inspiração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA.....	13
3. ASPECTOS GERAIS	14
3.1 História	14
3.2 Utilização.....	16
3.3 Produção	21
3.4 Mercado e Preço	26
3.5 Reservas	29
3.6 Tipos de Depósitos	32
3.7 Minerais de Cobre	33
3.8 Métodos Usuais de Lavra	36
4. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS DE COBRE	39
4.1 Britagem	39
4.2 Moagem (bolas/SAG)	41
4.3 HPGR.....	45
4.4 Flotação de Sulfetos	47
4.5 Separação Sólido/Líquido.....	60
5. METALURGIA EXTRATIVA	64
5.1 Hidrometalurgia (Davenport, 2002).....	66
5.2 Pirometalurgia (Davenport, 2002)	69
6. RECICLAGEM DE COBRE	72
7. EXEMPLOS DE PLANTAS DE BENEFICIAMENTO DE COBRE NO BRASIL.....	76
7.1 Sossego.....	76
7.2 Salobo.....	80
8. CONCLUSÃO	86
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Linha do tempo – Eras das civilizações (DNPM, 2009).....	15
Figura 3.2 – Artefatos de cobre produzidos pelo homem. (The British Museum, 2011).	15
Figura 3.3 - Produção mundial de cobre dos séculos 19 e 20 (Butts, 1954; USGS, 2010, adaptado).	16
Figura 3.4 - Distribuição do consumo mundial de cobre por setor (ICSG, 2010).....	18
Figura 3.5 - Consumo de cobre no setor da Construção Predial (ICSG, 2010).....	18
Figura 3.6 - Consumo de cobre no setor de infra-estrutura (ICSG, 2010).....	19
Figura 3.7 - Consumo de cobre no setor Produtivo (ICSG, 2010).	19
Figura 3.8 - Consumo mundial de cobre (ICSG, 2010, adaptado).	21
Figura 3.9 - Origem cobre utilizado. Produção primária e secundária (ICSG, 2010, adaptado).	22
Figura 3.10 - Produção mineral de cobre conforme a origem: concentrados de minério de cobre e SX-EW (ICSG, 2010, adaptado).	23
Figura 3.11 - Evolução e participação dos continentes na produção mineral de cobre (ICSG, 2010, adaptado).....	24
Figura 3.12 - Os 20 maiores produtores de cobre primário (ICSG, 2010, adaptado). ...	25
Figura 3.13 - Variações de preço e produção de cobre metálico entre 1990 e 2008 (USGS, 2011, adaptado).....	29
Figura 3.14 - Reservas Brasileiras minério de cobre (DNPM, 2009).	31
Figura 3.15 - Distribuição dos dois principais tipos de depósitos de cobre (USGS, 2008, adaptado).	33
Figura 3.16 - Exemplo de mina a céu aberto - Chuquicamata, Chile (Esacademic, 2011).	37
Figura 3.17 - Foto mina subterrânea Estefanía, Antofagasta, Chile (Alam, 2011).....	38
Figura 4.1 - Corte típico de instalação de britagem primária com utilização de britador giratório (Metso, 2002, adaptado).	40
Figura 4.2 - Circuito de moagem típico utiliza moinho SAG (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006, adaptado).....	41

Figura 4.3 - Moinho SAG instalado na Mina de Cobre de Sossego, Pará (Metso, 2005).	43
Figura 4.4 - Moinho de Bolas instalado na Mina de Cobre de Sossego, Pará (Metso, 2005).	44
Figura 4.5 - Crescimento da utilização de prensa de rolos na indústria de mineração (Polysius, 2008, adaptado).	46
Figura 4.6 - Desenho esquemático do princípio de funcionamento da prensa de rolos (Polysius, 2008, adaptado).	46
Figura 4.7 – Influência da granulometria na recuperação da flotação de minério de cobre (Davenport, 2002, adaptado).	49
Figura 4.8 – Influência da granulometria no teor de Cu nos rejeitos da flotação de minério de cobre (Davenport, 2002, adaptado).	50
Figura 4.9 – Influência da granulometria na recuperação da flotação de cobre. (Bulatovic, 2007, adaptado).	51
Figura 4.10 – Influência do nível de aeração na recuperação da etapa rougher de flotação de cobre. (Bulatovic, 2007, adaptado).	52
Figura 4.11 – Influência do pH na flotação de sulfetos. Na região esquerda de cada curva ocorre flotação. Na região direita de cada curva não ocorre flotação (Wills, 1997, adaptado).	53
Figura 4.12 – Ilustração esquemática da célula de flotação tipo tanque auto-aerada (Flsmidth, catálogo, adaptado, 2008).	56
Figura 4.13 – Ilustração esquemática da célula de flotação tipo tanque com ar forçado, produzido por sopradores não indicados (Outotec, catálogo, adaptado, 2008).	57
Figura 4.14 – Ilustração esquemática da coluna de flotação (Papini, 2010).	58
Figura 4.15 – Fluxograma típico de flotação de sulfeto de cobre contendo calcopirita, indicando as etapas, teores e recuperações (Davenport, 2002, adaptado).	60
Figura 4.16 – Vista superior do espessador tipo coluna (Chaves, 2004).	61
Figura 4.17 – Vista lateral do espessador tipo coluna (Chaves, 2004).	62
Figura 4.18 – Foto filtro prensa vertical modelo VPA (Metso, 2004).	63
Figura 5.1 – Rotas gerais de processamento e extração para minérios de cobre (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006).	64

Figura 5.2 - Esquema de lixiviação em pilhas para minérios oxidados e carbonatados de cobre (Davenport, 2002).	68
Figura 5.3 - Sequência de processamento de minérios sulfetados, mostrando a rota pirometalúrgica (BNDS, 1997).	71
Figura 6.1 – Fluxograma de reciclagem do cobre (Davenport, 2002).	72
Figura 6.2 – Reciclagem de cobre para os bens de consumo – final vida útil (ICSG, adaptado, 2009).	74
Figura 6.3 – Processos utilizados para a reciclagem de sucatas de cobre (Davenport, adaptado, 2002).	75
Figura 7.1 - Rota de tratamento de minério sulfetado – Uso de SAG (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006).	78
Figura 7.2 – Fluxograma esquemático da planta de beneficiamento de Salobo (Vale, Projeto Salobo, 2008).	83

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Uso do cobre em função das propriedades (Copper Development Association, 2011)	17
Tabela III.2 – Principais consumidores de cobre (ICSG, 2010)	20
Tabela III.3 - Evolução do comércio exterior de concentrado de cobre 2001-2008 no Brasil (DNPM, 2009)	27
Tabela III.4 – Evolução da balança comercial brasileira dos catodos de cobre 2001-2008 (DNPM, 2009)	28
Tabela III.5 – Reservas Mundiais de cobre (DNPM, 2009)	30
Tabela III.6 - Reservas Brasileiras de cobre (DNPM, 2009)	31
Tabela III.7 – Fator de concentração para alguns metais (Skinner, 1969)	34
Tabela III.8 - Principais minerais comerciais de cobre (Davenport, 2002 e Dana,1969)	35
Tabela IV.1 - Principais coletores utilizados na flotação de sulfetos (Wills, 1997 e Rosa, 2006).....	54
Tabela V.1 – Maiores plantas de produção de cobre primário (ICSG, 2010 e Davenport, 2002).....	66
Tabela VI.1 – Reciclagem do cobre contido nos bens de consumo no Japão em 1997 (Sasaki, 1999).....	73
Tabela VII.1 – Composição percentual mineralógica do minério de Sossego (Rosa, 2006)	77
Tabela VII.2 – Composição química do minério de Sossego (Nankran, 2006).....	77
Tabela VII.3 – Lista dos principais equipamentos de processo da planta do Sossego (Rosa, 2006, Vale, 2004, adaptado).....	80
Tabela VII.4 – Composição química do minério de Salobo (Vale, 2008).....	81
Tabela VII.5 – Composição mineralógica do concentrado de Salobo (Vale, 2008).....	82
Tabela VII.6 – Composição química do concentrado de Salobo (Vale, 2008).....	82
Tabela VII.7 – Lista dos principais equipamentos de processo da planta do Salobo (Vale, adaptado, 2008)	85

RESUMO

Neste trabalho foi feito um levantamento dos aspectos gerais do cobre. Foram retratados história, utilização, produção, mercado/preço, reservas, tipos de depósitos e minerais associados. Também foram abordadas etapas ligadas à produção mineral tais como lavra e processamento mineral englobando as etapas de fragmentação, concentração e separação sólidos/líquido. Além disso, relatou-se também as etapas relacionadas à metalurgia extrativa como pirometalurgia e hidrometalurgia. Devido a sua importância e crescimentos mundiais a reciclagem do cobre mereceu destaque. Exemplos de plantas de beneficiamento de cobre no Brasil também foram indicados, onde se pôde observar todas as etapas de produção mineral descritas no trabalho.

ABSTRACT

In this monography a survey of general aspects of copper was described, and the history, use, production, market / price, mineral reserves, copper deposit and copper minerals were studied. The article also develops the production stages such as mining and mineral processing, including the fragmentation, concentration and dewatering steps. It was also reported the steps related to extractive metallurgy and smelting and hydrometallurgy. Due to its importance and global growth, copper recycling was highlighted. Examples of copper beneficiation plants in Brazil were also shown, where one can observe all stages of mineral production described in the work.

1. INTRODUÇÃO

O cobre é um dos metais mais importantes e mais utilizados no mundo hoje em dia. Sua importância como metal remonta desde a Idade do cobre, sendo o primeiro metal que o ser humano utilizou há aproximadamente 5.000 anos. O desenvolvimento da economia durante a época moderna conduziu a um desigual desenvolvimento das capacidades de produção, o que levou a grandes disputas pelo controle dos territórios e das jazidas de minério, bem como dos segredos ligados à produção dos objetos metálicos. O cobre, assim como outros metais, passou a fazer parte da vida do homem de forma mais intensa como um aliado na busca pelo desenvolvimento sócio-econômico da sociedade.

Atualmente o cobre é o terceiro metal mais produzido e utilizado no mundo. A importância do cobre no desenvolvimento industrial merece destaque, pois representa a base da indústria elétrica e de equipamentos devido a sua característica de excelente condutor elétrico.

A produção mundial de cobre está estimada em cerca de 24 milhões de toneladas. Cerca de um terço é proveniente da reciclagem do metal e o restante da produção mineral.

O maior produtor mineral de cobre é o Chile, que é responsável por mais de 5,5 milhões de toneladas por ano, cerca de um terço do total mundial produzido. Depois do Chile estão Peru, Estados Unidos, China e Indonésia.

O maior consumidor de cobre é a China que consome aproximadamente 7,9 milhões de toneladas por ano, cerca de um terço do total de cobre consumido no mundo. É seguida pela Europa e depois pelos Estados Unidos.

A maior reserva de cobre do mundo pertence ao Chile, com 36,1% do total, seguido pelo Peru com 12,0%. As reservas do Brasil representam apenas 1,7 % das reservas mundiais.

Os minerais sulfetados são os mais importantes para a indústria de extração do cobre. Calcopirita, calcocita e bornita são os principais minerais sulfetados de cobre. Secundariamente estão os minerais oxidados e carbonatados.

O beneficiamento de minérios sulfetados seguido da pirometalurgia é responsável por 80% da produção mineral de cobre. A rota hidrometalúrgica é utilizada para produção de 20% do cobre a partir de minerais oxidados e carbonatados.

As principais etapas de beneficiamento de minérios sulfetados envolvem a cominuição, flotação e separação sólido/líquido.

As etapas de cominuição utilizadas no processamento de minérios sulfetados de cobre são a britagem primária, realizada geralmente através de britadores giratórios, a etapa de moagem que na maioria dos casos utiliza moinho SAG (moinho semi-autógeno) juntamente com britagem de *pebbles* (realizada em britadores de cone) e moagem de bolas. Alternativamente em substituição ao SAG e britagem de *pebbles* aparece a prensa de rolos precedida de britagem secundária (em britador de cone).

Após as etapas de cominuição, onde os minerais de cobre já se encontram liberados, o minério é processado na etapa de flotação. A etapa mais importante de beneficiamento de minérios sulfetados de cobre é a concentração por flotação. Atualmente a flotação é feita através de células de flotação de grande capacidade (células tipo tanque) e também em colunas de flotação, geralmente utilizadas para as etapas de limpeza. Os principais reagentes utilizados incluem coletores, espumantes e modificadores.

O concentrado obtido na etapa de flotação passa pelo processo de separação sólido/líquido através do espessamento e da filtragem, geralmente realizada em filtros prensa.

No Brasil podem ser citadas algumas plantas de processamento de cobre como Caraíba, Sossego, Chapada e Salobo (em implantação). Porém é no Chile que se encontram as maiores minas produtoras de cobre, tais como: El Teniente e Andina (produzindo 600 mil toneladas de cobre por ano), a mina Escondida, a qual produz cerca de 25% da produção total de cobre do Chile e a mina de Chuquicamata, a qual representa o maior depósito de superfície de cobre do mundo.

A reciclagem merece destaque na cadeia produtiva do cobre, pois contribuí com cerca de um terço da produção, além de movimentar a economia e favorecer o desenvolvimento sustentável.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo deste trabalho é fazer uma revisão da literatura sobre a cadeia produtiva do cobre, levantando aspectos relacionados a sua história, utilização, ao seu beneficiamento mineral (processos/técnicas/operações unitárias) correlacionando com plantas atuais de processamento, além dos processos piro-hidrometalúrgicos utilizados e a reciclagem do metal.

Atualmente a demanda pelo metal cobre é muito grande e motivada principalmente pelo aquecimento da economia liderado pelo grande crescimento chinês, principalmente no setor de infra-estrutura e eletroeletrônicos. Além do interesse pelo aumento da produção busca-se economicidade dos projetos (atratividade) e otimização da operação das plantas de beneficiamento na busca de menores custos. Em função destes aspectos acima se torna relevante a abordagem do beneficiamento de minérios de cobre, caracterizando as principais etapas envolvidas na produção do metal como lavra, beneficiamento, metalurgia extrativa e reciclagem.

3. ASPECTOS GERAIS

3.1 História

O cobre é um metal de participação de destaque na história da humanidade. Desde os tempos pré-históricos o cobre exerce sua grande importância no desenvolvimento da sociedade.

O cobre foi um dos primeiros metais a serem utilizados pelo homem. Na Ásia oriental foram encontrados indícios de moedas e artefatos em cobre, cerca de 10.000 anos atrás (ICSG, 2010). O cobre pode ser encontrado na natureza na forma de metal. Daí a sua utilização como ornamentos, jóias, ferramentas, armas e utensílios.

O período calcolítico ou eneolítico, aproximadamente 4.500 a 3.500 A.C. é também conhecido como “idade do cobre”. A palavra calcolítico vem de *chalcos* (cobre em grego) e *lithos* (pedra em grego). Neste período o homem descobriu como fazer a extração do cobre para uso em ornamentos e utensílios. Entre o 4º e 3º milênio A.C. foi extraído cobre da região de Huelva, Espanha (ICSG, 2010).

A idade do bronze (2.500 A.C.) remete ao período em que foi utilizado o uso de ligas de cobre com estanho. Registros egípcios descrevem a utilização de cobre para tratar infecções e esterilizar a água (ICSG, 2010).

A ilha de Chipre, localizada na porção leste do mediterrâneo ao sul da Turquia abasteceu de cobre os fenícios, gregos e romanos. O nome da ilha em latim é *Cyprium*, nome que deu origem a palavra cobre. Depois de *Cyprium* veio *Cuprum*, originando o símbolo químico "Cu".

Na América do Sul, os maias, incas e astecas exploraram o cobre, além da prata e ouro. Também na idade média foram produzidos vários objetos em cobre e bronze na China, Índia e Japão (ICSG, 2010). Nota-se que os antigos artefatos de cobre e bronze encontrados ainda permanecem conservados graças às propriedades do metal, tais como resistência à corrosão, ductilidade e fácil manuseio (maleável). Ter conhecimento sobre os processos de confecção dos objetos/utensílios era sinônimo de poder e representavam domínio (DNPM, 2010).

Na revolução industrial o cobre também contribuiu, tendo um papel importante nas descobertas e desenvolvimentos relacionados à eletricidade e magnetismo. É importante

destacar a utilização do cobre, desde o início da humanidade até a evolução tecnológica nos nossos dias, com a aplicação do metal em vários produtos eletroeletrônicos (ICSG, 2010).

A figura 3.1 destaca a importância do cobre desde o início da civilização, com a indicação na história para a Idade do Cobre (4.500 A.C.).

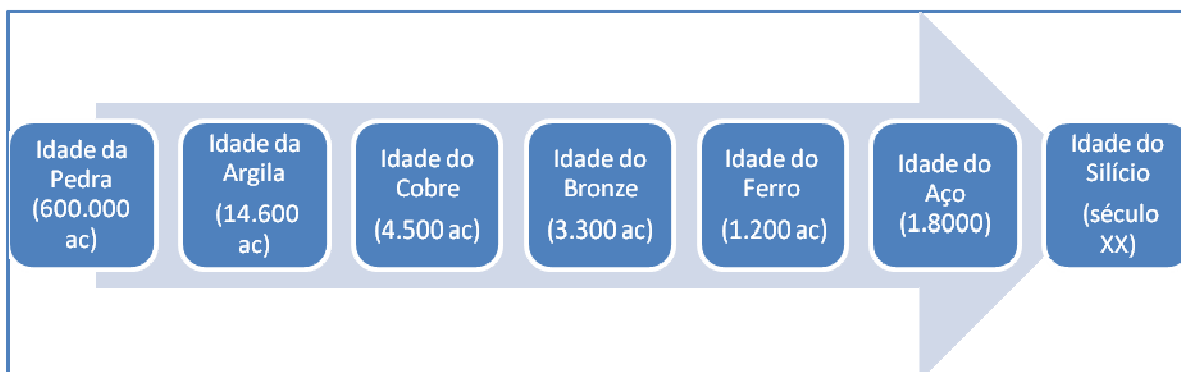


Figura 3.1- Linha do tempo – Eras das civilizações (DNPM, 2009).

A figura 3.2 apresenta exemplos de artefatos de cobre produzidos pelo homem há mais de 3000 anos. É mostrado um escudo em bronze (à esquerda), que data aproximadamente 1.200-1.300 A.C., encontrado no rio Tâmesa, Londres. Também é indicado um Jarro de cobre, de 1.500 -1.300 A.C., proveniente da Grécia (à direita).



Figura 3.2 – Artefatos de cobre produzidos pelo homem. (The British Museum, 2011).

3.2 Utilização

O cobre apresenta uma vasta possibilidade de usos. Sua principal utilização é na indústria de geração e distribuição de energia. Nota-se pela figura 3.3 que o crescimento do uso do cobre se deu principalmente a partir do início do século passado com a adoção da eletricidade. Atualmente o cobre é o 3º metal mais utilizado no mundo, atrás do aço (ferro) e alumínio.

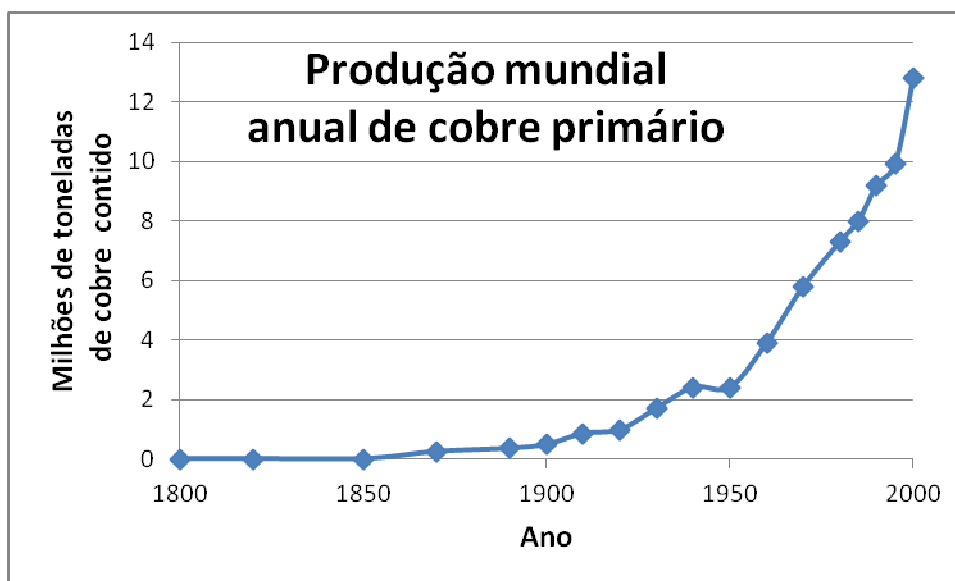


Figura 3.3 - Produção mundial de cobre dos séculos 19 e 20 (Butts, 1954; USGS, 2010, adaptado).

As propriedades do cobre podem ser destacadas:

- excelente condutor de eletricidade;
- não magnético;
- resistente à corrosão;
- dúctil e maleável;
- reciclável;
- excelentes propriedades na formação de ligas;

- propriedades antimicrobianas;
- beleza.

O cobre é largamente utilizado para transmissão de energia elétrica, dentro de residências e prédios comerciais (condutores) como também nos sistemas de geração de energia convencional (transformadores, geradores) e de energia renovável (solar, eólico, geotérmico, etc.) devido a sua excelente capacidade de condução de eletricidade e resistência à corrosão.

A tabela III.1 mostra a utilização do cobre em função das suas propriedades.

Tabela III.1 - Uso do cobre em função das propriedades (Copper Development Association, 2011)

Propriedade	Uso (%) do total
Condutividade elétrica	61
Resistência à corrosão	20
Condutividade térmica	11
Resistência mecânica	6
Propriedade estética	2

A figura 3.4 apresenta a distribuição do consumo de cobre entre os setores de construção predial, infra-estrutura e setor produtivo.

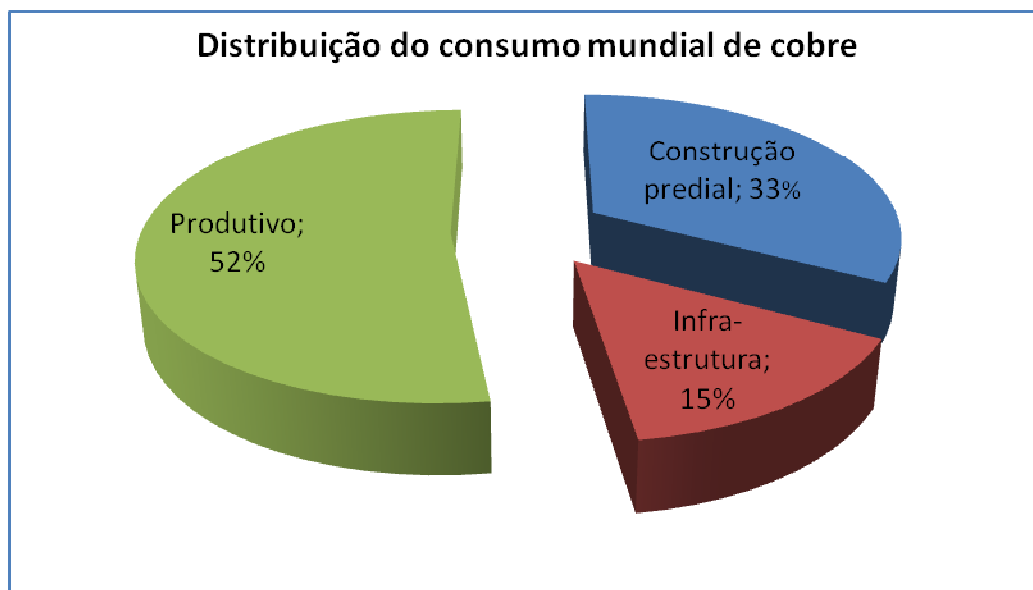


Figura 3.4 - Distribuição do consumo mundial de cobre por setor (ICSG, 2010).

As figuras 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam para cada setor analisado o detalhamento do consumo.

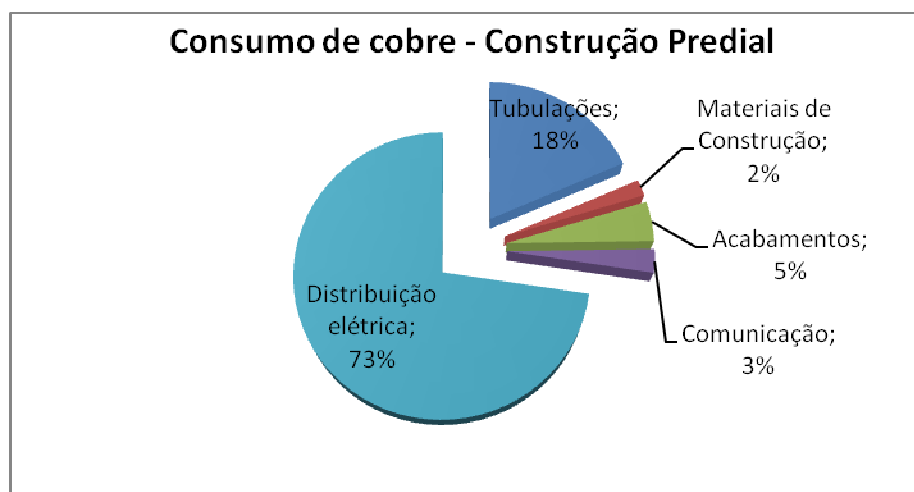


Figura 3.5 - Consumo de cobre no setor da Construção Predial (ICSG, 2010).

No setor de construção predial o maior destaque é para a distribuição elétrica, ou seja, cabos e condutores. O cobre é utilizado neste setor pela sua excelente condutividade elétrica e resistência à corrosão.

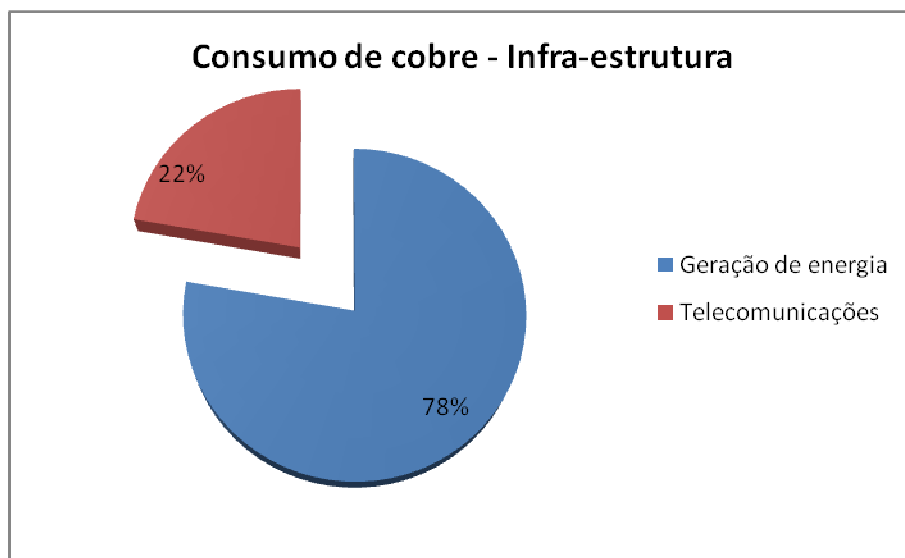


Figura 3.6 - Consumo de cobre no setor de infra-estrutura (ICSG, 2010).

No setor de infra-estrutura o maior consumidor é o sistema de geração de energia seguido por telecomunicações.

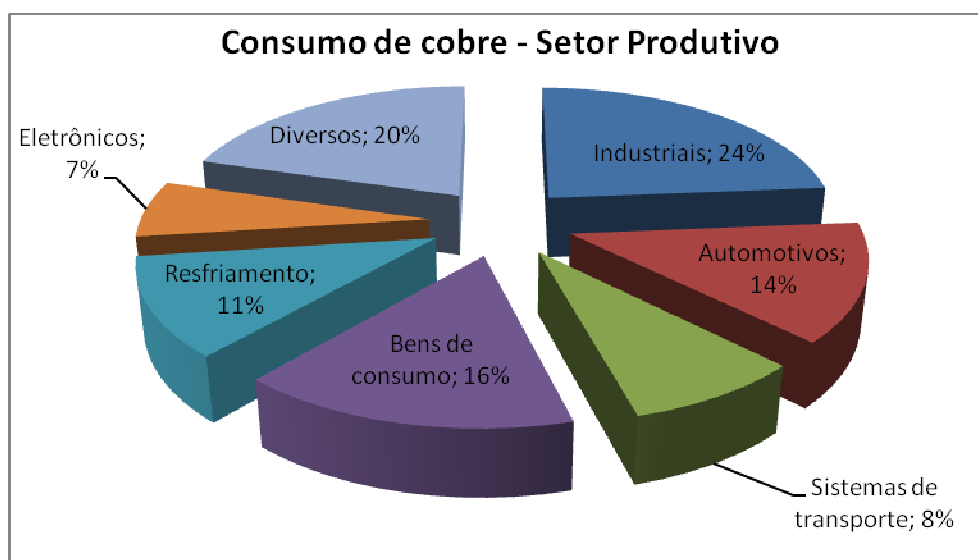


Figura 3.7 - Consumo de cobre no setor Produtivo (ICSG, 2010).

No setor Produtivo o maior destaque é para o setor industrial (equipamentos de bens de capital). O item de bens de consumo e o automotivo também têm importante participação no consumo de cobre.

A tabela III.2 apresenta os maiores consumidores de cobre referente ao ano de 2009. Destaque para a China que consome mais de um terço da produção mundial em função da necessidade e ritmo de crescimento.

Tabela III.2 – Principais consumidores de cobre (ICSG, 2010)

Consumidores de Cobre 2009	x 1000 toneladas	%
China	7.873	36%
Japão	1.222	6%
Coréia do Sul	766	3%
Índia	920	4%
ASEAN (*)	863	4%
Taiwan	435	2%
Estados Unidos	2.468	11%
América Latina	1.194	5%
Europa (exceto Rússia)	3.884	18%
Rússia	464	2%
África	534	2%
Resto do Mundo	1.477	7%
Total	22.100	100%

(*) Associação das Nações do Sudeste Asiático formado por Indonésia, Malásia, Filipinas, Cingapura e Tailândia, Brunei, Vietnã, Mianmar, Laos e Camboja.

A figura 3.8 ilustra como a produção de cobre está ligada ao crescimento da população mundial. O consumo apresentando no gráfico não representa o consumo per capita de cobre incorporado em produtos e sim a relação entre a quantidade de cobre metálico produzida (produtos semi-acabados) dividido pela população.

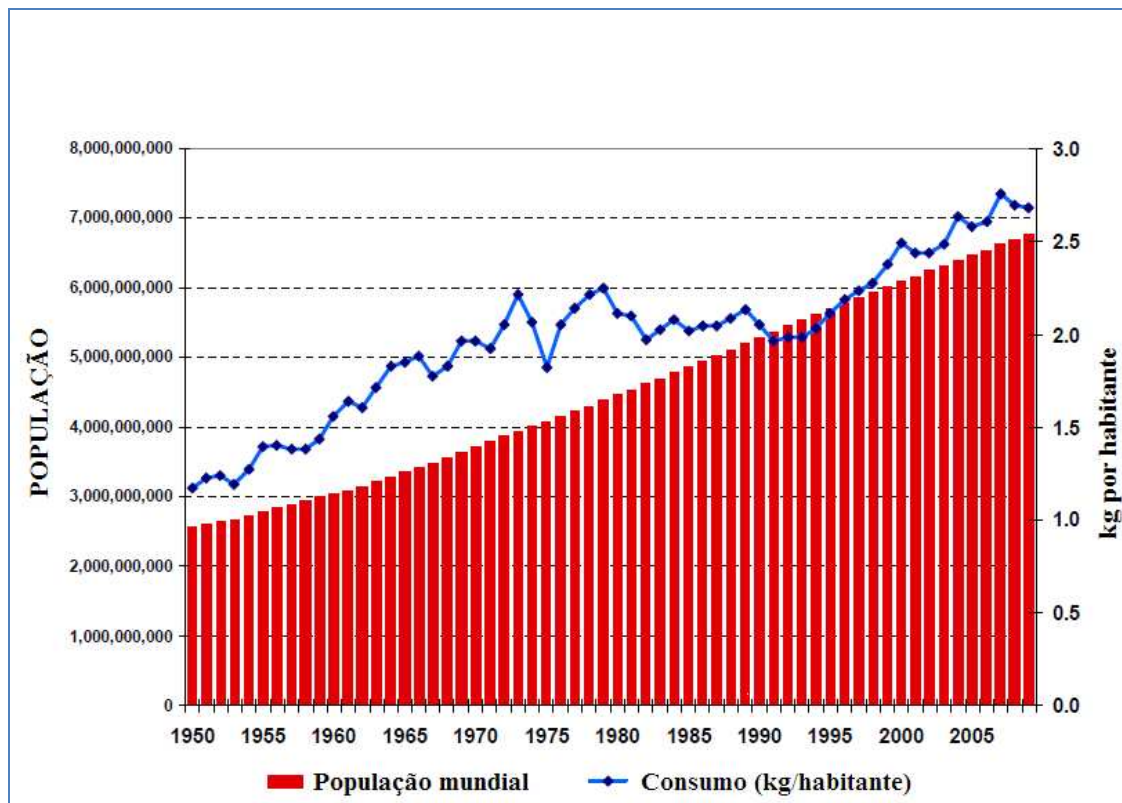


Figura 3.8 - Consumo mundial de cobre (ICSG, 2010, adaptado).

Apesar do grande uso na nossa sociedade, existem concorrentes do cobre que o substituem para determinadas aplicações, como é o caso do alumínio em cabos de transmissão de energia, equipamentos elétricos, radiadores de automóveis e sistemas de refrigeração. O titânio e o aço também substituem o cobre em componentes de trocadores de calor. A fibra ótica concorre com o cobre nas aplicações de telecomunicações e os plásticos o substituem em tubulações de água pressurizada, tubulações de drenagem de telhado e encanamentos em geral (USGS, 2010).

3.3 Produção

A maior parte do cobre é proveniente da produção mineral, também denominado de cobre primário. Outra parcela vem da reciclagem de sucatas de cobre, sendo uma parte proveniente do próprio processo produtivo e outra parcela da reciclagem de produtos que contém cobre e que chegaram ao final de sua vida útil. É importante destacar que o cobre pode ser reciclado inúmeras vezes que não irá perder suas propriedades. Pela

figura 3.9, observa-se que cerca de um terço do cobre consumido é proveniente de reciclagem. O restante vem da produção mineral.

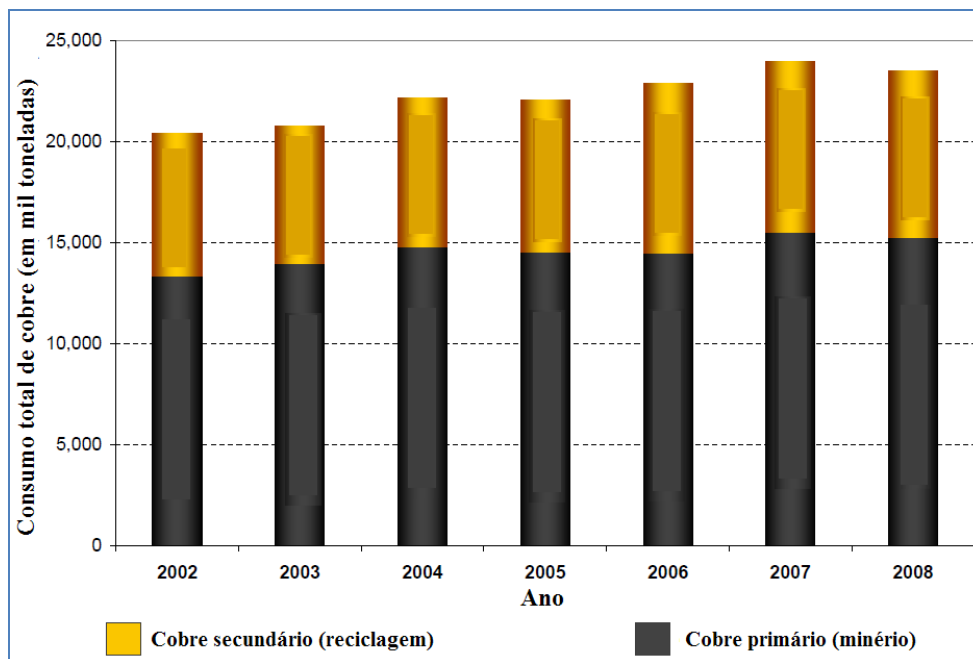


Figura 3.9 - Origem cobre utilizado. Produção primária e secundária (ICSG, 2010, adaptado).

A figura 3.10 apresenta a evolução da produção mineral de cobre desde o início do século passado até 2009. Nota-se que a produção do cobre a partir de técnicas hidrometalúrgicas, como a lixiviação, a extração por solvente e eletrorecuperação (SX-EW) começou na década de 60 e foi crescendo até os dias de hoje.

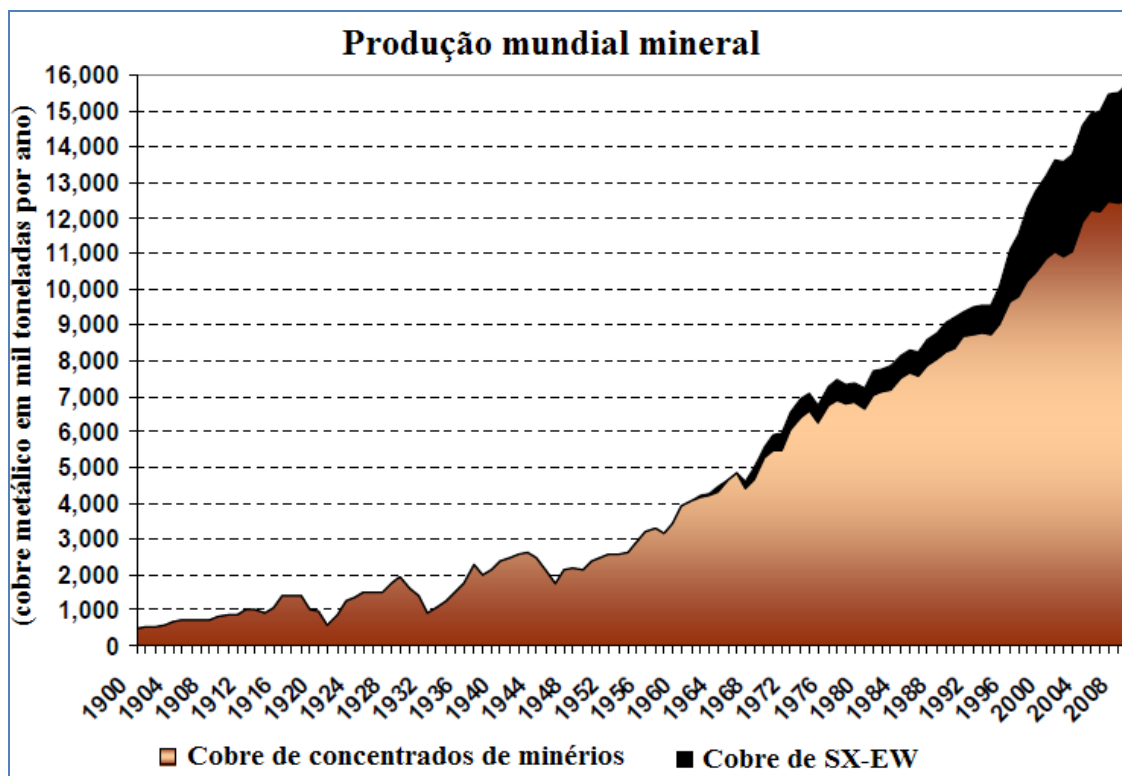


Figura 3.10 - Produção mineral de cobre conforme a origem: concentrados de minério de cobre e SX-EW (ICSG, 2010, adaptado).

SX-EW, abreviatura em inglês para *solvent extraction* (SX), extração por solventes e *electrowinning* (EW), eletrorecuperação, é a técnica hidrometalúrgica utilizada para o tratamento de soluções lixiviadas carregada de íons metálicos. O processo de extração por solventes promove o enriquecimento de cobre na solução. A solução enriquecida, chamada eletrólito alimenta a eletrorecuperação, onde o cobre em solução é depositado em catodos e forma o cobre metálico, através da passagem de corrente elétrica.

Atualmente cerca de 20% do cobre produzido do setor mineral é obtido através de SX-EW, cerca de 3,2 milhões. O restante 12,5 milhões é proveniente de concentrados de minério de cobre.

A figura 3.11 demonstra a importante contribuição da América Latina (Chile e Peru principalmente) na produção mundial de cobre. É possível observar o salto de produção da América Latina a partir da década de 80, que refletiu no crescimento da produção mundial. De forma menos destacada a Ásia também apresentou forte crescimento a partir da década de 80. E com menor importância Europa e Oceania também

apresentaram crescimento. Contrariamente África e América do Norte apresentaram ligeiro recuo da produção.

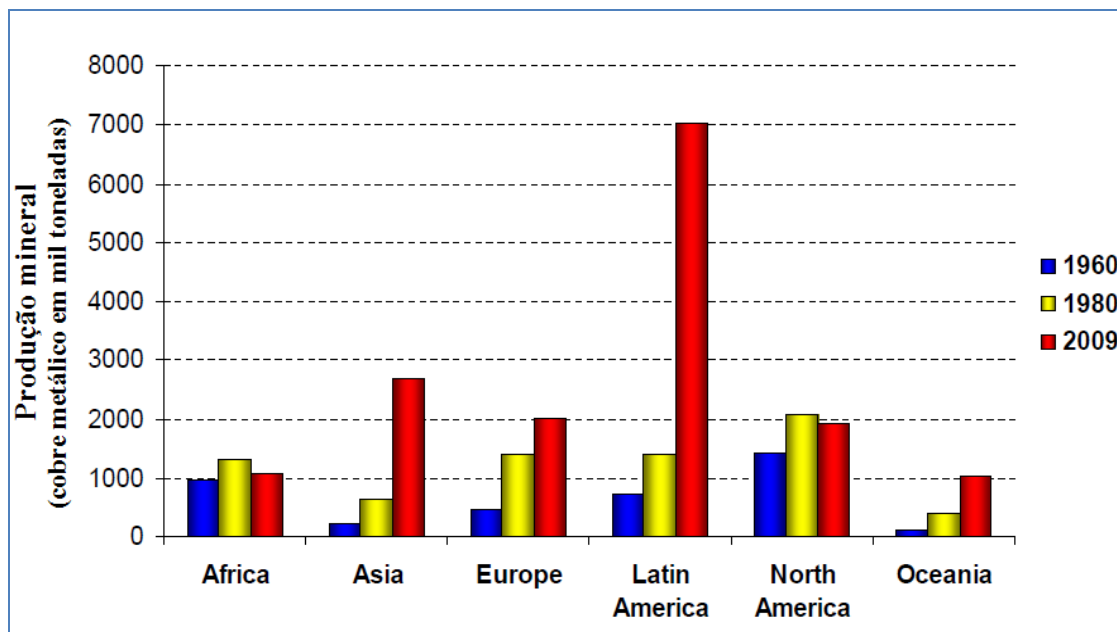


Figura 3.11 - Evolução e participação dos continentes na produção mineral de cobre (ICSG, 2010, adaptado).

A figura 3.12 indica os 20 maiores países produtores de cobre primário. O Chile é responsável por um terço da produção mundial de cobre primário, cerca de 5,5 milhões. Na sequência vem Peru e Estados Unidos, com cerca de 1,2 milhões e China e Indonésia com 1,0 milhão. Os demais apresentam produção menor que 1,0 milhão por ano.

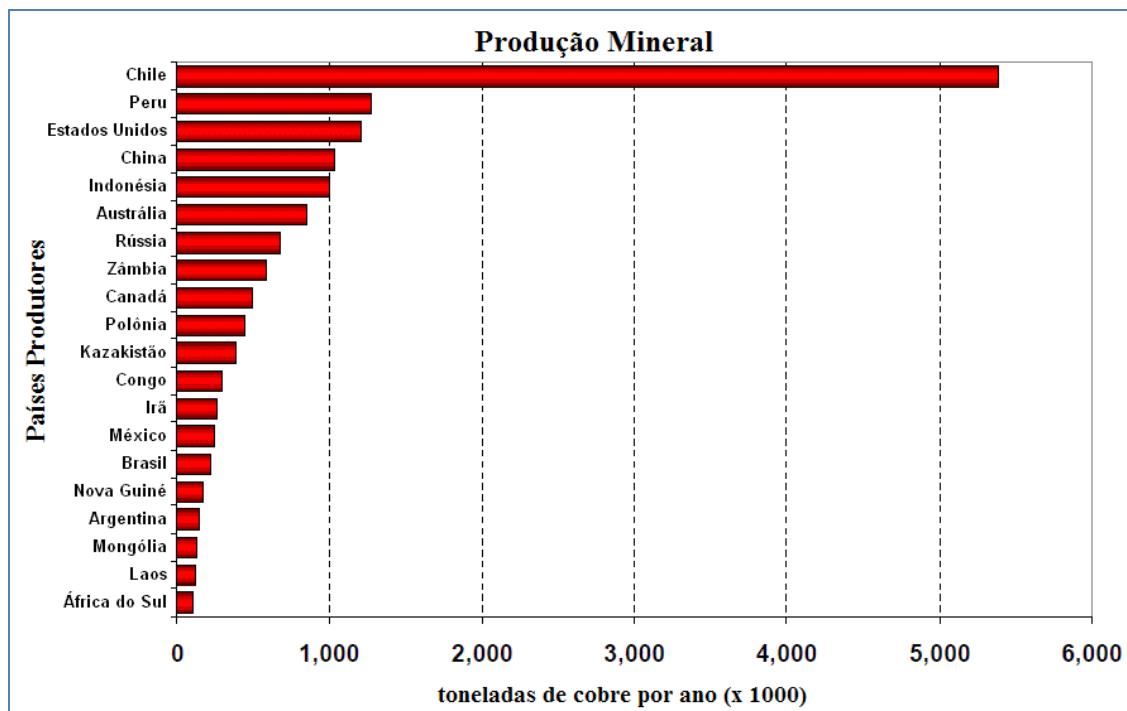


Figura 3.12 - Os 20 maiores produtores de cobre primário (ICSG, 2010, adaptado).

Os principais produtos de cobre “bruto” comercializados são o cobre fundido e o cobre refinado.

Definições para produtos de cobre metálico:

- Cobre fundido: produto da fundição e conversão do concentrado para eliminar as impurezas (principalmente enxofre e ferro), resultando no cobre blister (98,5% em cobre) e, posteriormente, refinado a fogo para a obtenção de anodos de cobre, com teor de 99,7% em Cobre;
- Cobre refinado: produto do refino dos anodos por eletrólise, ou eletrorecuperação das soluções de lixiviação, resultando em catodos de elevada pureza (99,99% em cobre).

3.4 Mercado e Preço

O cobre é considerado uma “commodity”, o que facilita e torna transparentes as negociações de seu preço. O preço é determinado pelo mercado e negociações nas bolsas de valores.

Existem três entidades financeiras que são tomadas como referências mundiais utilizadas para definição do preço do cobre: a bolsa de valores de Londres (LME – London Metal Exchange), bolsa de Nova Iorque (COMEX/NYMEX – Commodity Exchange Division of the New York Mercantile Exchange) e a bolsa de Xangai (SHME – Shanghai Metal Exchange) (ICSG, 2010).

Na bolsa de Londres (LME) o cobre é negociado em lotes de 25 toneladas e é cotado em US\$/tonelada (dólar americano por tonelada). Na bolsa de Nova York a negociação é feita em lotes de 25.000 libras, aproximadamente 11,3 toneladas, e o preço é negociado em ¢US\$/libra (centavos de dólar por libra). Em Xangai, na SHME trabalha-se com lotes de 05 (cinco) toneladas e a cotação é em CNY\$/tonelada (moeda chinesa “renminbi” por tonelada) (ICSG, 2010).

Nas bolsas de valores também se negociam preços fixos para contratos futuros (30, 60 e 90 dias). A cada contrato realizado são negociados os seguintes aspectos, dentre outros: qualidade, quantidade, prazo de entrega, estoque, etc.

O mercado de cobre trabalha com compra e venda de concentrados de minério de cobre, mate, blister/anodo, cobre refinado (catodos), ligas (bronze e latão), além de produtos semi-acabados (fios, barras, tubos, chapas, folhas, peças fundidas, etc.).

No ciclo do cobre a reciclagem tem fundamental importância. O mercado de sucatas tem tido muita importância nos últimos anos. Existem classificações para qualidade e origem da sucata, o que influencia no preço de comercialização. As sucatas podem ser recuperadas do próprio processo produtivo, como exemplo, do processo pirometalúrgico (*smelter*), do processo de refino do cobre, e do processo de conformação mecânica. Também podem ser provenientes de diversos produtos/utensílios que chegaram ao final da vida útil e são descartados e recolhidos para a reciclagem.

A tabela III.3 indica a evolução do comércio de minério de cobre no Brasil entre 2001 e 2008. A partir de 2004 com a entrada em operação da Mina de Sossego da Vale e

Mineração Chapada da Yamana Gold em 2007, o Brasil tende a equilibrar o saldo de importação/exportação de concentrados de minério de cobre. O objetivo da maioria das importações de concentrado de cobre é alimentar as instalações de extração e refino da Caraíba Metais. A maior parte do minério importado é originária do Chile. As exportações de minério têm os seguintes destinos principais: Índia, Espanha e Alemanha.

Tabela III.3 - Evolução do comércio exterior de concentrado de cobre 2001-2008 no Brasil (DNPM, 2009)

Ano	EXPORTAÇÃO		IMPORTAÇÃO		SALDO (*)	
	t	US\$ (x 1000)	t	US\$ (x 1000)	t	US\$ (x 1000)
2.001	0	0	182.179	238.721	(182.179)	(238.721)
2.002	0	0	155.147	197.231	(155.147)	(197.231)
2.003	0	0	138.229	195.074	(138.229)	(195.074)
2.004	76.806	171.344	247.915	463.782	(171.109)	(292.438)
2.005	116.051	299.237	132.780	413.266	(16.729)	(114.029)
2.006	120.133	519.969	176.894	1.068.678	(56.761)	(548.709)
2.007	177.705	1.032.312	154.541	1.077.660	23.164	(45.348)
2.008	151.580	507.705	142.732	829.545	8.848	(321.840)

(*) Números apresentados entre parêntesis representam valores negativos.

A tabela III.4 indica a evolução do comércio de catodos de cobre no Brasil entre 2001 e 2008. Nota-se que o Brasil depende da importação para atender as necessidades internas de consumo de cobre para sua indústria. A quantidade importada vem aumentando em função do próprio crescimento. O saldo ainda é negativo o que impacta muito a balança comercial brasileira, (cerca de 1,2 bilhões em 2008), mas a partir de 2007 as exportações de catodo de cobre aumentaram cerca de 50%, diminuindo um pouco o déficit da balança comercial.

Tabela III.4 – Evolução da balança comercial brasileira dos catodos de cobre 2001-2008
(DNPM, 2009)

Ano	EXPORTAÇÃO		IMPORTAÇÃO		SALDO (*)	
	t	US\$ (x 1000)	t	US\$ (x 1000)	t	US\$ (x 1000)
2.001	14.992	21.168	132.945	225.945	(117.953)	(204.777)
2.002	51.092	78.300	95.761	154.267	(44.669)	(75.967)
2.003	23.993	42.938	144.378	260.149	(120.385)	(217.211)
2.004	21.927	58.514	144.638	420.953	(122.711)	(362.439)
2.005	32.879	114.380	160.460	593.430	(127.581)	(479.050)
2.006	56.000	379.723	173.896	1.194.934	(117.896)	(815.211)
2.007	101.964	675.412	216.898	1.618.815	(114.934)	(943.403)
2.008	93.104	675.391	251.019	1.902.296	(157.915)	(1.226.905)

(*) Números apresentados entre parêntesis representam valores negativos.

O preço do cobre metálico varia em função da demanda e oferta do metal e da quantidade de estoque. Existe uma tendência do aumento de estoque quando há queda nos preços e vice-versa. Na verdade o estoque pode ser considerado uma espécie de pulmão entre a oferta e a demanda. Alterações no valor do estoque podem indicar desequilíbrio entre oferta e demanda (DNPM, 2009).

Na relação oferta/demanda mundiais, a oferta de cobre mundial depende do Chile, onde se localizam as maiores mineradoras e produtores de concentrado mundiais. A produção de cobre pode ser influenciada, por exemplo, por fatores externos como greves de trabalhadores e paralisações das plantas por problemas técnicos. As refinarias de cobre que consomem concentrados e que estão atreladas à demanda do metal, dependem do preço do cobre (cotação na bolsa), do custo da matéria prima (beneficiamento do concentrado) e do próprio custo de refino (DNPM, 2009).

Na figura 3.13 são apresentados a variação do preço e a produção de cobre entre 1990 e 2008. Na década de noventa o preço máximo chegou a US\$ 3.000,00/tonelada em 1995.

Após este pico o preço caiu até chegar ao valor mínimo abaixo de US\$ 2.000,00/tonelada em meados de 2004. Depois da queda, o preço do metal se recuperou e não parou de crescer até atingir o pico de US\$ 9.000,00/tonelada entre 2006 e 2008. Porém devido à crise financeira mundial no final de 2008, o preço despencou até US\$ 3.000,00/tonelada em 2009. Ao final da crise o preço voltou a crescer e em janeiro de 2011 atingiu valores acima de US\$ 9.000,00/tonelada.

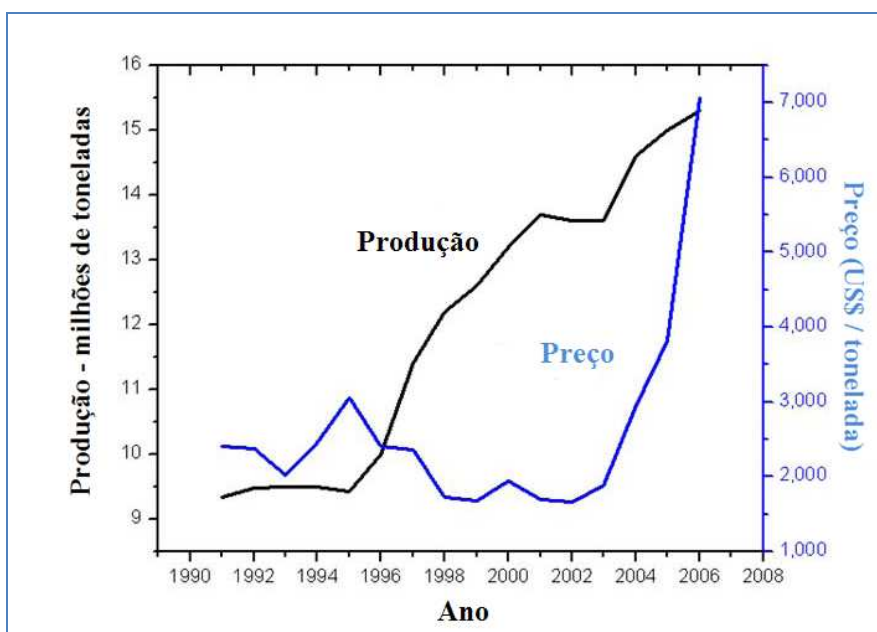


Figura 3.13 - Variações de preço e produção de cobre metálico entre 1990 e 2008 (USGS, 2011, adaptado).

3.5 Reservas

As reservas de cobre conhecidas no mundo se situam em torno de 01 (um) bilhão de toneladas de cobre contido. Geograficamente metade das reservas se localiza no continente Sul Americano. O Chile com maior participação (36%, mais de um terço das reservas) seguida pelo Peru com 12% (2ª maior reserva mundial) e Brasil com 1,7%. A tabela III.5 indica a evolução do crescimento das reservas, fruto de avaliações de depósitos na Austrália, Chile, China, Polônia e Peru.

Tabela III.5 – Reservas Mundiais de cobre (DNPM, 2009)

RESERVAS MUNDIAIS DE COBRE (x 1000 T Cu CONTIDO)					
PAÍS	2001	2003	2005	2008	%
Chile	160.000	360.000	360.000	360.000	36,1%
Peru	40.000	60.000	60.000	120.000	12,0%
EUA	90.000	70.000	70.000	70.000	7,0%
China	37.000	63.000	63.000	63.000	6,3%
Polônia	36.000	48.000	48.000	48.000	4,8%
Austrália	23.000	43.000	43.000	43.000	4,3%
México	27.000	40.000	40.000	40.000	4,0%
Indonésia	25.000	38.000	38.000	38.000	3,8%
Zâmbia	34.000	35.000	35.000	35.000	3,5%
Rússia	30.000	30.000	30.000	30.000	3,0%
Cazaquistão	20.000	20.000	20.000	22.000	2,2%
Canadá	23.000	20.000	20.000	20.000	2,0%
Brasil	14.172	14.291	15.331	17.320	1,7%
Outros	90.828	95.079	94.669	92.280	9,2%
Mundo	650.000	936.370	937.000	998.600	100,0%

Estima-se que o total de recursos disponíveis (conhecidos e não conhecidos) pode estar perto de três bilhões de toneladas em cobre contido (USGS, 2010). No fundo dos oceanos há pelo menos (estimativa) 700 milhões de toneladas de cobre contido, como nódulos.

No Brasil, as reservas são de aproximadamente 17,3 milhões de toneladas de cobre contido. A tabela III.6 indica a evolução das reservas. Nota-se que o teor médio das reservas diminuiu ao longo dos anos, acompanhando a tendência mundial em função da extinção de depósitos ricos.

Tabela III.6 - Reservas Brasileiras de cobre (DNPM, 2009)

ANO	MINÉRIO (t x 1000)	Cu CONTIDO (t x 1000)	TEOR MÉDIO (%)
2001	1.649.125	14.172	0,86%
2002	1.696.550	15.061	0,89%
2003	1.692.991	14.291	0,84%
2004	1.828.104	14.741	0,81%
2005	2.019.572	15.331	0,76%
2006	2.049.648	15.282	0,75%
2007	2.008.031	15.155	0,75%
2008	2.333.961	17.320	0,74%

O principal estado detentor das reservas é o Pará com mais de 80% do total, conforme indicado na figura 3.14, seguido por Goiás e Bahia, com 7% e 5% respectivamente.

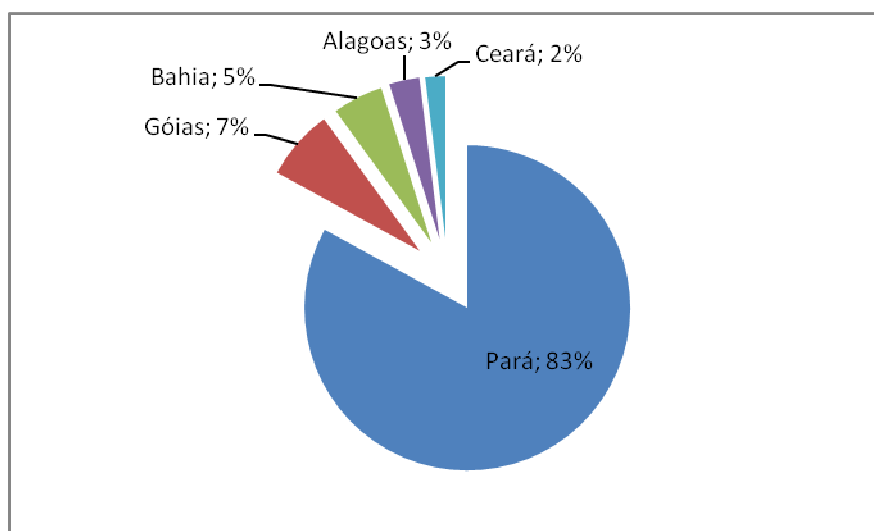


Figura 3.14 - Reservas Brasileiras minério de cobre (DNPM, 2009).

3.6 Tipos de Depósitos

Podem ser citados 07 (sete) principais tipos de depósitos minerais de cobre. São eles: porfirítico, sedimentares, vulcanogênicos, de segregação magmática, de escarnitos, filonianos e de cobre nativo. Todos eles apresentam distintas histórias de formação geológica (DNPM, 2001).

Dentre os tipos citados, os de maior relevância econômica, de onde se extraem de 85 a 90% da produção mundial mineral, são (DNPM, 2001):

- Porfiríticos: associado à intrusão ígnea. Os minerais de cobre se apresentam dispersos nas rochas. São os mais abundantes. Geralmente associados ao molibdênio. Representam cerca de 60% das reservas mundiais de cobre. O mineral de cobre geralmente é a calcopirita (CuFeS_2) disseminada.
- Sedimentares ou estratiformes: associado a rochas sedimentares. Neste tipo de depósito há predominância de sulfetos, principalmente a pirita (entre 10% a 90%). Em torno de 15% das reservas mundiais são provenientes deste tipo de depósito.
- Vulcanogênicos: representam aproximadamente 15% das reservas mundiais de cobre, formados por precipitação química de metais com outros elementos a partir de exalações vulcânicas.

A figura 3.15 indica a distribuição geográfica no planeta dos tipos de depósitos porfiríticos e sedimentares.

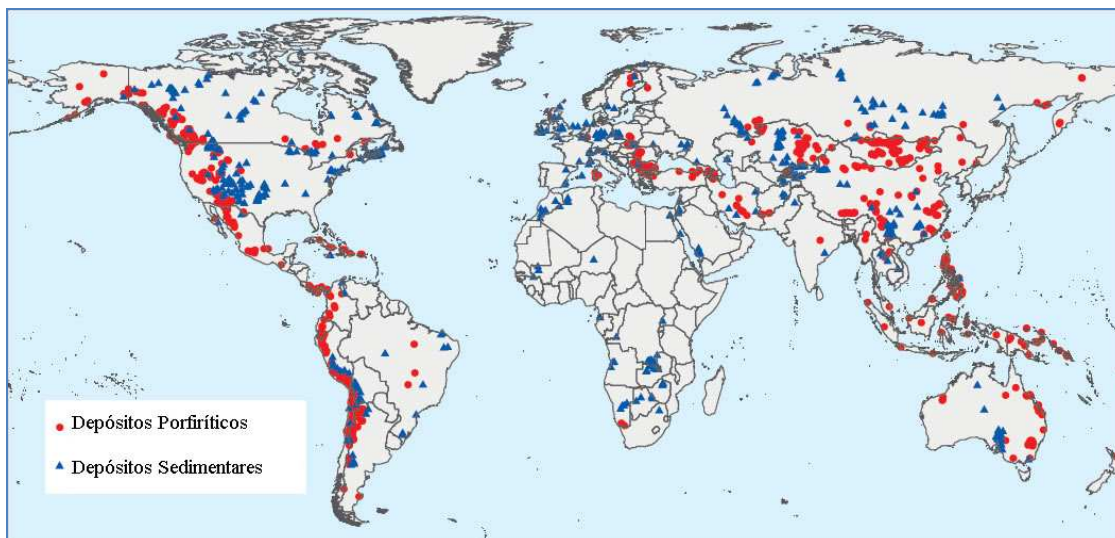


Figura 3.15 - Distribuição dos dois principais tipos de depósitos de cobre (USGS, 2008, adaptado).

3.7 Minerais de Cobre

O cobre é considerado um metal geoquimicamente escasso, com abundância inferior a 0,006% na crosta terrestre. Apesar de relativamente escasso, é encontrado em “grandes concentrações” constituindo os depósitos (Skinner, 1969).

Defini-se fator de concentração como uma relação da concentração do metal no depósito em relação à média da crosta (*background*) que torne possível a exploração de maneira econômica. São necessárias concentrações muito acima da média para o caso do cobre. A tabela III.7 indica o fator de concentração de alguns metais. No caso do cobre os depósitos precisam ter concentrações 90 vezes o valor médio (Skinner, 1969).

Tabela III.7 – Fator de concentração para alguns metais (Skinner, 1969)

Metal	Abundância (%)	Fator de concentração	Teor mínimo depósito (%)
Alumínio	8,6%	3,5	30%
Ferro	5,6%	4,5	25%
Cobre	0,006%	90	0,5%
Zinco	0,008%	300	2,5%
Ouro	0,0000002%	4000	0,0008%

O cobre nativo (metal puro) é raramente encontrado na crosta terrestre. A calcopirita (CuFeS_2) é o mineral de cobre mais comum, sendo também a principal fonte mineral de cobre.

Os minerais podem se dividir basicamente em sulfetados, oxidados, carbonatados e silicatados. A tabela III.8 apresenta os principais minerais comerciais de cobre por tipo, fórmula química, nome comum e o valor máximo de Cu (valor teórico em função da contribuição estequiométrica do cobre).

Tabela III.8 - Principais minerais comerciais de cobre (Davenport, 2002 e Dana,1969)

Tipo	Nome	Fórmula química	% Cu (máximo)	Cor
Sulfetos primários	Calcopirita	CuFeS_2	34,6	Amarelo
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3	Azul purpúreo
Sulfetos secundários	Calcocita	Cu_2S	79,9	Cinza do chumbo
	Covellita	CuS	66,5	Azul
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4	Preto acinzentado
Cobre nativo	Metal	Cu^0	100,0	Vermelho marrom
Carbonatos	Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57,5	Verde
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,3	Azul celeste
Hidroxi-silicato	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,2	Verde
Hidroxi-cloreto	Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59,5	Verde
Óxidos	Cuprita	Cu_2O	88,8	Vermelho
	Tenorita	CuO	79,9	Preto
Sulfatos	Antlerita	$\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	53,7	Verde
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,2	Verde

Os minerais portadores de cobre são encontrados em pequenas concentrações nos minérios de cobre. É difícil encontrar minérios com teores acima de 1% ou 2% de cobre. A maioria dos minérios apresenta teor próximo de 0,5% de cobre.

Os minerais de cobre também podem receber a classificação de mineral primário e mineral secundário. Os minerais primários também chamados de sulfetados são encontrados em maiores profundidades. Os secundários são de origem mais superficial, podendo ser citados como minerais secundários: os oxidados, os carbonatados e os silicatados.

O cobre é extraído de minerais sulfetados através de processos pirometalúrgicos como redução, fusão, conversão e refino. Antes de alimentar os processos pirometalúrgicos é necessário enriquecer o minério sulfetado. Como o minério disponível é muito diluído (concentração menor que 2%) a massa a ser processada seria muito grande. O enriquecimento ocorre através de várias etapas físicas, constituindo o processo de beneficiamento mineral que envolve: britagem, peneiramento, moagem, flotação, sendo

esta última a etapa de concentração. O concentrado obtido apresenta geralmente teor de cobre entre 30 e 35% (DAVENPORT, 2002).

Os minerais oxidados são tratados através de processos hidrometalúrgicos como lixiviação, extração por solventes, eletrorecuperação. Geralmente não é necessário realizar a etapa prévia de concentração mineral (Davenport, 2002).

3.8 Métodos Usuais de Lavra

As operações de lavra nas minas de cobre podem ser a céu aberto, subterrânea ou mista.

Atualmente, cerca de três quartos da produção mineral de cobre provém de minas a céu aberto. O restante, cerca de 25% é obtido a partir de minas subterrâneas (DNPM, 2009).

A decisão pelo método de lavra a ser utilizado está ligado a vários fatores. Entre eles estão:

- localização do corpo de minério (profundidade);
- distribuição e forma do corpo de minério;
- profundidade e extensão do capeamento (custo para remoção do estéril);
- teor do minério;
- características do minério e rochas participantes do depósito;
- topografia.

A lavra a céu aberto envolve as seguintes etapas (SME, 2002):

- decapeamento;
- perfuração;
- detonação;
- carregamento;
- transporte.

Utilizam-se praças e bancos de operação, dispositivos de contenção, pilhas de deposição de estéril. Os equipamentos que são empregados neste método são: perfuratrizes, carregadeiras, caminhões, transportadores de correia (em alguns casos). Os insumos mais utilizados são os explosivos, pneus, combustíveis, lubrificantes (SME, 2002). A figura 3.16 mostra um exemplo de mineração a céu aberto.



Figura 3.16 - Exemplo de mina a céu aberto - Chuquicamata, Chile (Esacademic, 2011).

A lavra subterrânea envolve os seguintes sistemas:

- galerias;
- câmaras e poços;
- dispositivos de contenção de estéril.

Os principais equipamentos envolvidos na operação de lavra subterrânea são:

- perfuratrizes;
- caminhões e carregadeiras especiais;
- elevadores;
- sistemas de ventilação e drenagem.

Os principais insumos utilizados na operação de lavra subterrânea são:

- explosivos;
- energia elétrica;
- combustíveis;
- lubrificantes;

A figura 3.17 é um exemplo de mina subterrânea. A foto ilustra a operação na mina subterrânea de cobre de Estefanía, da companhia Minera Michilla S.A., em Antofagasta, Chile.



Figura 3.17 - Foto mina subterrânea Estefanía, Antofagasta, Chile (Alam, 2011)

4. BENEFICIAMENTO DE MINÉRIOS DE COBRE

4.1 Britagem

Na mineração de cobre o circuito típico de cominuição é constituído por britagem primária, seguida por pilha de regularização, transporte do ROM (*Run of mine*) britado até a planta de moagem/concentração, moagem SAG (semi-autogêna), britagem de *pebbles* (material de tamanho crítico na moagem SAG), moagem de bolas, e em alguns casos remoagem no circuito de flotação.

Os fatores principais que devem ser observados no dimensionamento e escolha do equipamento de britagem primária são:

- tipo de minério, W_i , abrasividade;
- características do clima (influencia na coesividade do minério, umidade, etc.);
- capacidade da planta.

A britagem primária é a primeira etapa de cominuição na planta de beneficiamento. A maioria dos britadores primários empregados na mineração de cobre é do tipo giratório, por possuir grande capacidade e receber todo o fluxo, não necessitando de escalpes (prévia separação da fração grossa).

A alimentação da britagem primária é realizada através da descarga de caminhões fora de estrada diretamente na moega de alimentação do britador. A moega faz o direcionamento do minério para a boca do britador e geralmente tem volume suficiente para comportar 02 (duas) descargas de caminhões. O britador fica localizado logo abaixo da moega.

A função principal do britador é possibilitar a redução de grandes blocos (matacos) com dimensões em torno de 1m para tamanho próximo a 200 mm de modo a propiciar o transporte através de correias transportadoras e possibilitar a alimentação da moagem SAG.

O material britado é recolhido na moega inferior e então retomado através de alimentador de placas que transfere o minério britado para o sistema de transportadores.

A figura 4.1 mostra um corte típico de uma instalação de britagem primária.

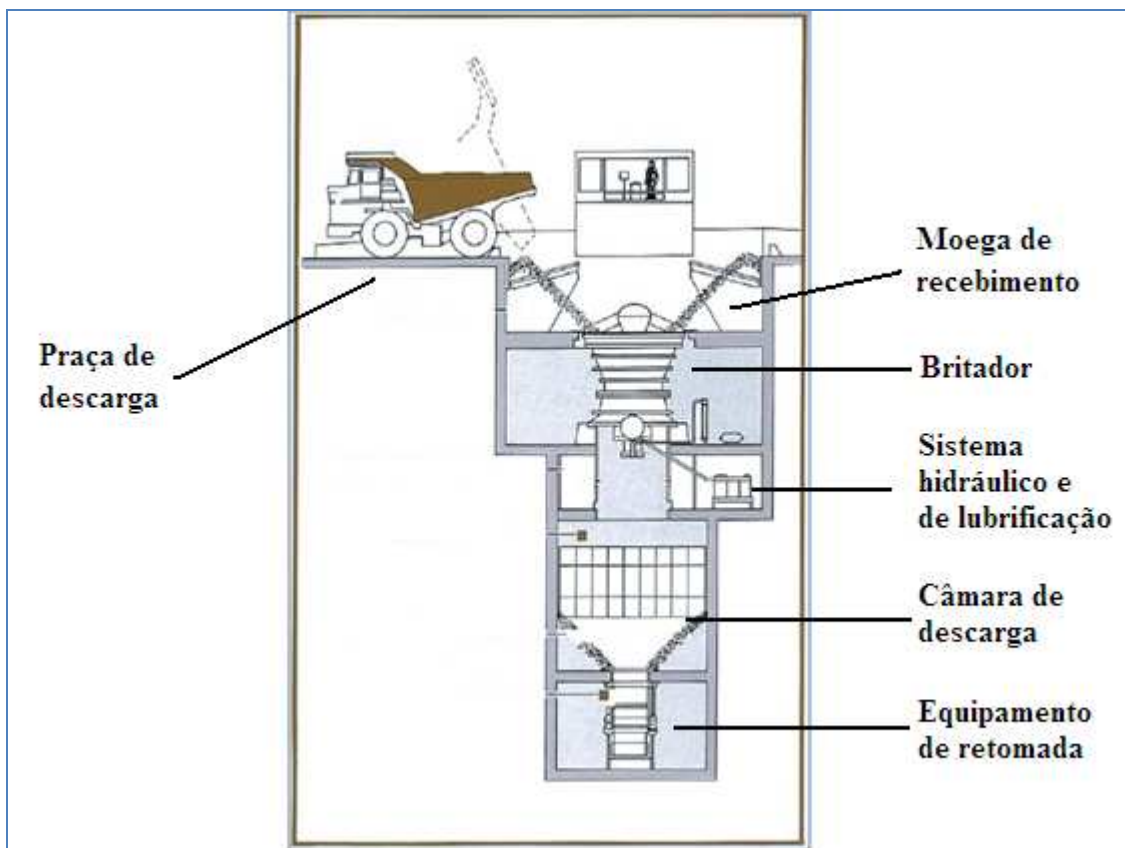


Figura 4.1 - Corte típico de instalação de britagem primária com utilização de britador giratório (Metso, 2002, adaptado).

O princípio de funcionamento do britador giratório consiste no movimento de um eixo excêntrico que gira pressionando o minério contra as paredes da câmara de britagem. Na porção superior do britador o espaço na câmara é maior e vai se estreitando até a porção inferior (região de saída do material britado). Britadores giratórios podem receber tamanho de material entre 42 polegadas (aproximadamente 1100 mm) a 72 polegadas (aproximadamente 1850 mm), dependendo do tamanho do equipamento. Possuem capacidades que variam de 1.600 a 7.600 t/h, dependendo do ajuste do britador (Metso, 2002).

4.2 Moagem (bolas/SAG)

A moagem é a etapa necessária para propiciar a liberação dos minerais de cobre presentes no minério. Os minerais de cobre devem estar fisicamente independentes (“livres”) dos demais minerais sem interesse, como sílica, pirita, etc.

A figura 4.2 indica o circuito típico de moagem utilizando o moinho SAG (semi-autôgeno), muito aplicado na indústria de beneficiamento de minério de cobre.

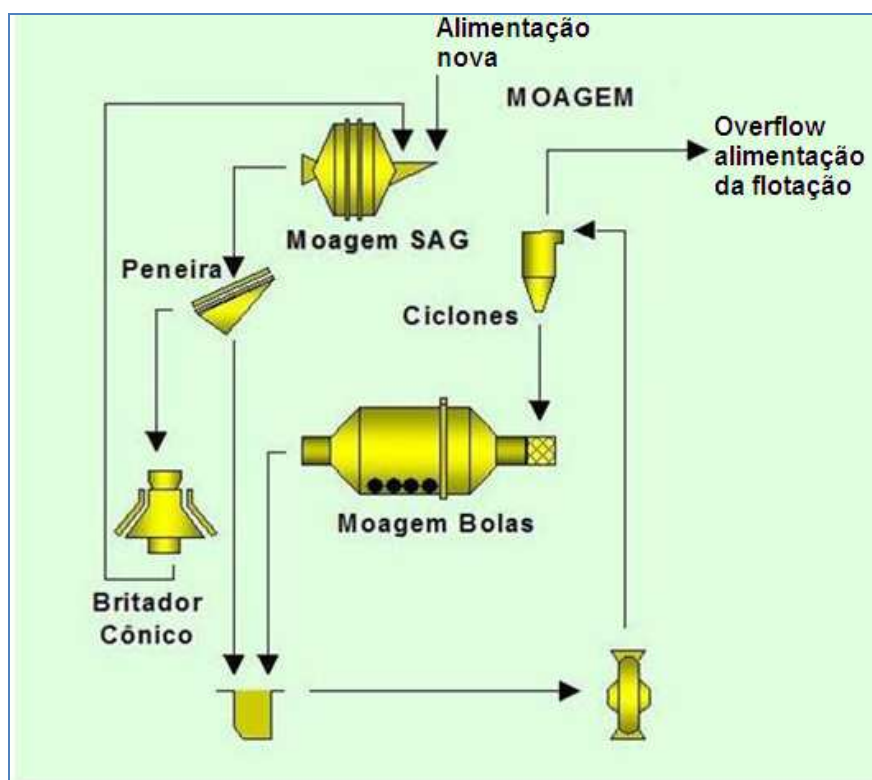


Figura 4.2 - Circuito de moagem típico utiliza moinho SAG (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006, adaptado).

O produto da britagem primária constitui a alimentação nova do moinho SAG. O material moído, produto da moagem SAG é descarregado em peneira classificadora (vibratória inclinada). O corte da peneira é geralmente de 12 mm. O objetivo é retirar os *pebbles*, que ficam retidos e seguem para a britagem de *pebbles*, realizada em britadores de cone. Por facilidade de manuseio através de transportadores (em função da granulometria) e pelo fato do moinho de bolas ser alimentado com polpa, o produto da britagem de *pebbles* retorna para alimentar a moagem SAG, fechando o circuito. O

passante da peneira é bombeado para alimentar a classificação realizada em hidrociclones. O overflow segue para a flotação. O underflow alimenta a moagem de bolas por gravidade. O produto da moagem de bolas se junta com o passante do peneiramento para alimentar a classificação em ciclones (Rosa, 2006).

No beneficiamento de minérios de cobre, o moinho SAG é muito utilizado. Para liberação dos minerais de cobre antes da etapa de flotação, é necessário reduzir todo o minério até tamanhos próximos entre 200 e 100 μm e até menores dependendo da liberação mineral (Davenport, 2002).

O moinho SAG pode substituir várias etapas de britagem e conseqüentemente simplificar a planta industrial, reduzindo a quantidade de prédios, transportadores de ligação, etc. Aliado também a grande capacidade unitária de processamento, o moinho SAG permite utilizar menor quantidade de linhas/equipamentos contribuindo para a simplificação das instalações. (Fuerstenau, 2003).

Além disso, o consumo de revestimento tende a ser menor se comparado ao circuito convencional de britagem, que exige maior número de equipamentos (Barratt, 1979).

Basicamente o moinho SAG é um corpo cilíndrico rotativo suportado por mancais e dotado de acionamento. O minério alimentado atravessa o moinho e é revolvido e levantado com auxílio de uma configuração interna de revestimentos.

Uma das características mais marcantes do moinho é apresentar diâmetro maior que o comprimento, diferente dos tradicionais moinhos de bolas. Geralmente a relação diâmetro/comprimento (L/D) varia de 0,3 a 1,0.

Tipicamente o moinho SAG recebe alimentação de minério em torno de 200 mm. As frações maiores que 20 mm auxiliam no processo de quebra do próprio minério. O conceito de moagem autógena é não utilizar corpos moedores.

A moagem autógena é bastante específica e depende das características do minério de modo a não permitir gerar partículas de tamanho crítico, os chamados *pebbles*. Os *pebbles* são partículas de tamanho tal que não conseguem ser quebradas e não auxiliam a quebra das partículas de menores tamanhos (Wills, 1997).

O moinho SAG trabalha com corpos moedores, na faixa de 6% a 15% em volume, o que aumenta a capacidade de moagem e a energia necessária para o acionamento. O

volume total ocupado pela carga (minério, bolas e água) chega a 30% do volume do moinho (Metso, 2002).

A figura 4.3 é a foto do moinho SAG da mina de cobre de Sossego pertencente à Vale no estado do Pará. O equipamento instalado tem dimensões $\varnothing = 38' \times L = 23'$ ($L/D = 0,6$) e potência de 20 MW.



Figura 4.3 - Moinho SAG instalado na Mina de Cobre de Sossego, Pará (Metso, 2005).

Alternativamente à moagem SAG a prensa de rolos de alta pressão ou HPGR (*high pressure grinding rolls*) tem sido utilizada recentemente em algumas plantas novas de beneficiamento de cobre, como Cerro Verde (Peru) e Salobo (Pará, Brasil).

O moinho de bolas é o equipamento tradicionalmente mais utilizado na mineração com fins de liberação. Também possui formato cilíndrico e tubular, por ter comprimento maior que o diâmetro, contrariamente ao moinho SAG. A relação L/D pode variar geralmente de 1,0 a 1,5.

O moinho de bolas geralmente recebe como alimentação material menor que 10 mm. Trabalha com fração de 30 a 40% de volume de corpos moedores. A maioria das aplicações de moinhos de bolas para cobre trabalha em circuito fechado com hidrociclones.

O produto da moagem (*overflow* dos ciclones) obtido geralmente apresenta granulometria entre 0,150 mm e 0,075 mm (entre 100# e 200#) podendo moer também até 0,044 mm (325#).

Na mineração de cobre, o grau de redução das etapas de cominuição, dependendo da etapa pode variar:

- 5 a 10 vezes: britagem primária;
- 15 a 20 vezes: moagem SAG;
- 50 a 80 vezes: moagem de bolas;
- 5 a 20 vezes: remoagem (moinho vertical).

A figura 4.4 é a foto do moinho de bolas da Mina de cobre de Sossego pertencente à Vale no estado do Pará. São 02 (duas) unidades instaladas de $\varnothing = 22'$ x $L = 32'$ ($L/D = 1,45$) e com potência de 8,5 MW.



Figura 4.4 - Moinho de Bolas instalado na Mina de Cobre de Sossego, Pará (Metso, 2005).

4.3 HPGR

A prensa de rolos de alta pressão, ou HPGR, é uma novidade no tratamento de minérios de cobre. A primeira aplicação do equipamento para a função de britagem em escala industrial foi em 1995 na Mina de Cobre Cyprus Sierrita, Arizona, EUA. Ocorreram problemas na prensa devido à grande abrasão do minério e detalhes de projeto como forma de alimentação, sistemas de proteção, etc. (Morley, 2010).

Após a experiência de Cyprus Sierrita, os fabricantes melhoraram e desenvolveram novos tipos de revestimento para minérios duros e abrasivos a base de carbetto de tungstênio, chamados *studs*. Este revestimento é muito resistente à abrasão, porém é sensível a materiais não britáveis como sucatas e pouco resistente ao impacto. A geometria do revestimento propicia também a formação de uma camada do próprio minério que trabalha como revestimento.

O projeto de instalação da prensa de rolos deve evitar alimentação segregada e permitir que o minério seja alimentado em toda a extensão dos rolos. O impacto de materiais bitolados pode danificar os revestimentos. O projeto deve prever também sistemas de proteção para evitar alimentação de materiais metálicos com a instalação de equipamentos como extrator de sucatas e detector de metais.

O projeto da mina de cobre de Cerro Verde no Peru em 2008 começou a utilizar prensa de rolos no circuito de cominuição. Com as melhorias do equipamento e de projeto, a planta obteve sucesso na operação. Outros grandes projetos utilizam também a prensa de rolos nos circuitos de cominuição como Freeport (Indonésia, cobre e ouro) e Boddington (Austrália, ouro) (Morley, 2010).

Outro projeto de grande porte, no beneficiamento de minério de cobre, está prevendo utilizar a prensa de rolos como equipamento de cominuição. É o projeto Salobo, pertencente à Vale no estado do Pará, Brasil. O início de operações está previsto para o 2º semestre de 2011.

A figura 4.5 apresenta a evolução do crescimento da utilização da prensa de rolos (HPGR) no mundo nos últimos 20 anos. As aplicações para cobre e ouro começaram a crescer a partir de 2000.

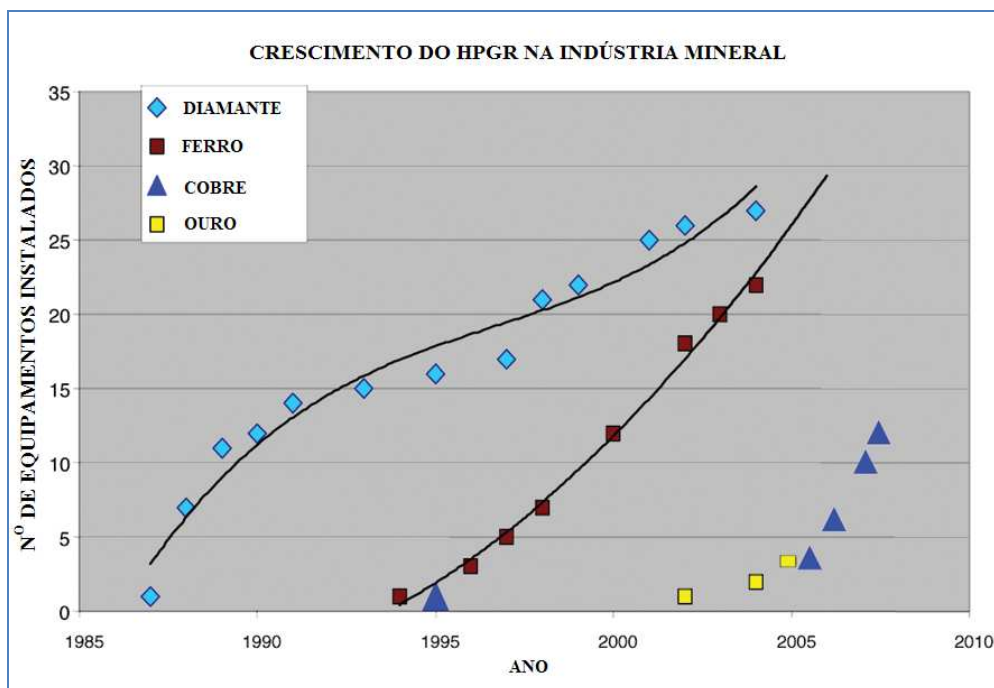


Figura 4.5 - Crescimento da utilização de prensa de rolos na indústria de mineração (Polysius, 2008, adaptado).

Basicamente o princípio de funcionamento da prensa de rolos consiste da utilização de 02 (dois) rolos paralelos girando em sentido contrário um contra o outro (figura 4.6). O minério é alimentado entre os rolos.

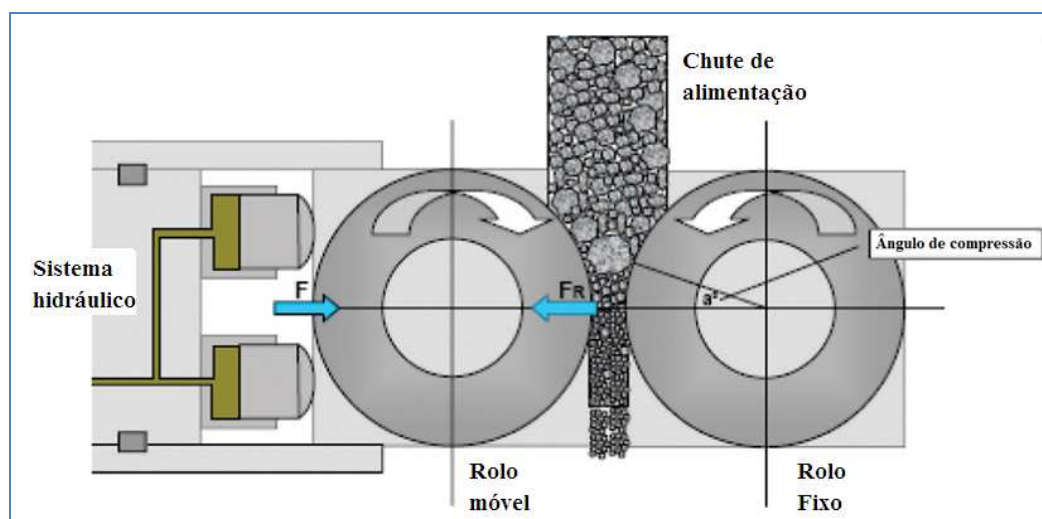


Figura 4.6 - Desenho esquemático do princípio de funcionamento da prensa de rolos (Polysius, 2008, adaptado).

O sistema de alimentação da prensa deve contemplar silos e alimentadores para permitir alimentação controlada e sem grandes variações. Os rolos são apoiados na estrutura da máquina. Um dos rolos é fixo. O outro rolo é móvel para permitir regular a abertura entre os rolos. Geralmente cada rolo possui acionamento independente com motor e redutor. A movimentação do rolo móvel é feita através de sistema hidráulico.

As aberturas de trabalho dependem do diâmetro dos rolos podendo variar de 2-2,5% do diâmetro do rolo. A pressão a que o material é submetido pode variar entre 50 a 150 kgf/cm². O material chega a ser submetido a forças que podem variar (dependendo do tamanho da máquina) de 300 a 2.500 toneladas (Polysius, 2002).

A grande pressão a que o material é submetido chega a criar micro-fraturas nas partículas minerais, o que pode beneficiar a etapa posterior de cominuição (moagem de bolas/remoagem) no sentido de diminuição do W_i necessário na moagem.

4.4 Flotação de Sulfetos

A flotação é a etapa de concentração mais utilizada nos processos de enriquecimento mineral. A etapa de flotação é a base do processo de beneficiamento mineral de vários metais. Podem ser citados cobre, molibdênio, níquel, chumbo, zinco e ouro que são concentrados através da flotação de sulfetos. Rocha fosfática e concentrado de minério de ferro também são obtidos através da flotação.

Pode-se definir flotação como o processo de separação de partículas minerais realizada em meio aquoso e com presença de fase gasosa através de fluxo de ar induzido. A separação se baseia nas diferenças de comportamento da partícula em função da característica de sua superfície, que pode apresentar diferentes níveis de hidrofobicidade (aversão pela água). Se a partícula tem afinidade pela água, a sua superfície pode ser classificada como hidrofílica. A água é uma molécula polar. Estruturas polares atraem outras estruturas polares e vice-versa, apolar atrai apolar. Pode-se dizer que a superfície hidrofílica apresenta caráter polar. Do mesmo modo, pode-se relacionar a superfície hidrofóbica com o caráter apolar. Assim o ar (oxigênio e nitrogênio) que é constituído de moléculas apolares terá afinidade com superfícies hidrofóbicas e desta forma pode promover a separação das partículas do meio aquoso.

Naturalmente são poucos os minerais com a característica hidrofóbica. Podem ser citados: a grafita, o talco, a molibdenita. A grande maioria dos minerais apresenta a superfície naturalmente hidrofílica. Mas com o uso de reagentes específicos a característica da superfície pode ser alterada de hidrofílica para hidrofóbica.

Por exemplo, os coletores são reagentes químicos que possuem ao mesmo tempo estrutura polar e apolar. A estrutura polar adsorve na superfície mineral e a parte apolar do reagente fica exposta e confere caráter hidrofóbico à superfície permitindo a combinação e a ligação com o ar e com isso promovendo a separação das partículas.

As bolhas de ar que capturam as partículas minerais precisam também da ação de um reagente químico chamado espumante para se tornarem estáveis a ponto de permitir a formação de espuma carregada com o mineral de interesse. Os espumantes têm a função de baixar a tensão superficial na interface líquido/ar.

Outros reagentes utilizados na flotação chamados de modificadores ou reguladores têm por objetivo ajustar as condições do sistema de flotação como o pH, o nível de potencial, auxiliara a ação do coletor, intensificar a característica hidrofílica (neste caso chamado de depressor) e controlar o estado de dispersão das partículas (Chaves, 2006).

O processo de flotação depende basicamente de fatores e condições que são importantes e devem ser observados:

- minerais de interesse liberados;
- tamanho adequado para a flotação;
- presença de finos controlada;
- escolha dos reagentes adequados;
- pH do meio;
- condições de alimentação da polpa.

O tamanho obtido na etapa de moagem é muito importante afetando a liberação e conseqüentemente o desempenho do processo de flotação. Dependendo do tipo de minério, formação geológica, minerais associados, existe um tamanho ótimo e adequado para a flotação (Davenport, 2002).

A influência da granulometria na recuperação da flotação é indicada na figura 4.7. Para este exemplo o tamanho correspondente a máxima recuperação está em torno de 37 μm .

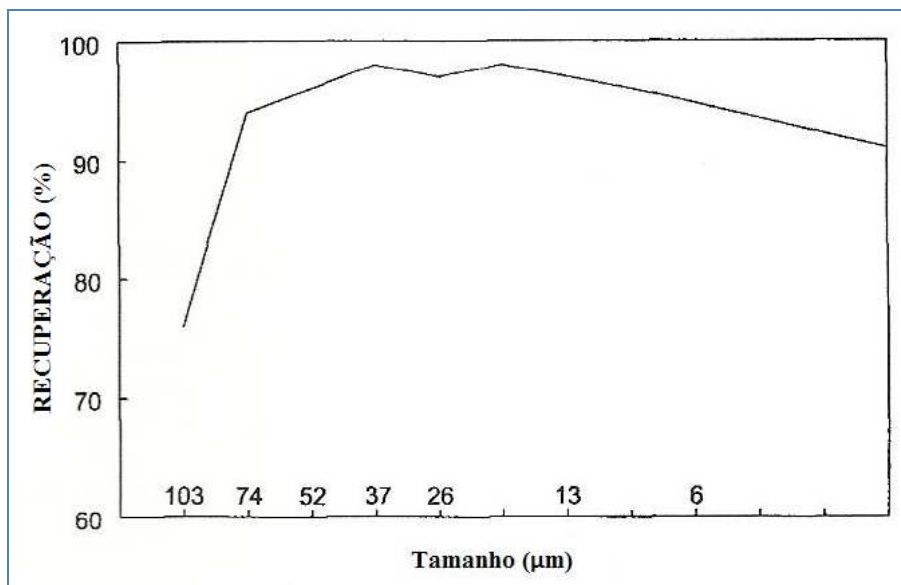


Figura 4.7 – Influência da granulometria na recuperação da flotação de minério de cobre (Davenport, 2002, adaptado).

A figura 4.8 exemplifica a influência da granulometria sobre o teor de cobre no rejeito. Também existe um tamanho que minimiza o teor de cobre no rejeito, consequentemente minimizando a perda de cobre.

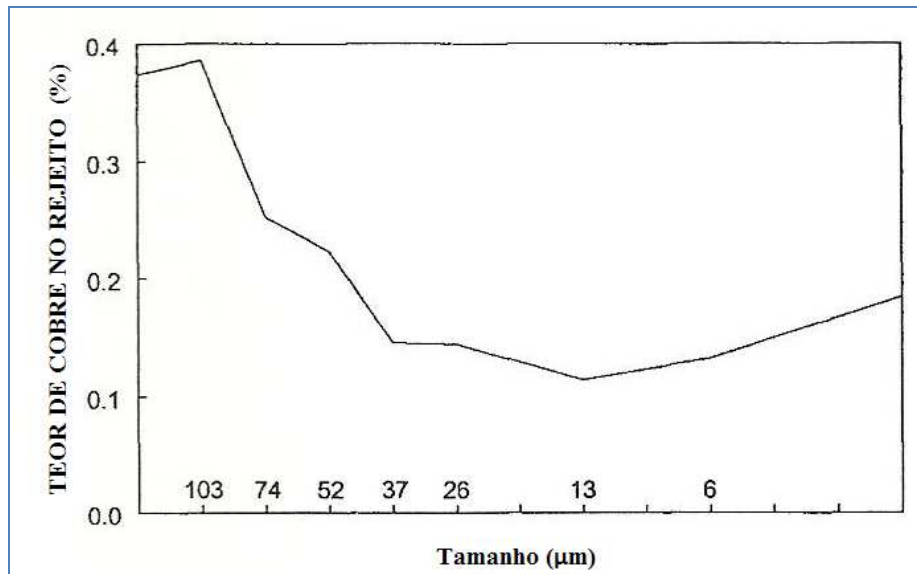


Figura 4.8 – Influência da granulometria no teor de Cu nos rejeitos da flotação de minério de cobre (Davenport, 2002, adaptado).

A figura 4.9 também ilustra o efeito da granulometria sobre a recuperação de cobre. São apresentados dados de plantas industriais de flotação de minérios de cobre do Chile. É apresentado o valor de recuperação por faixa de tamanho.

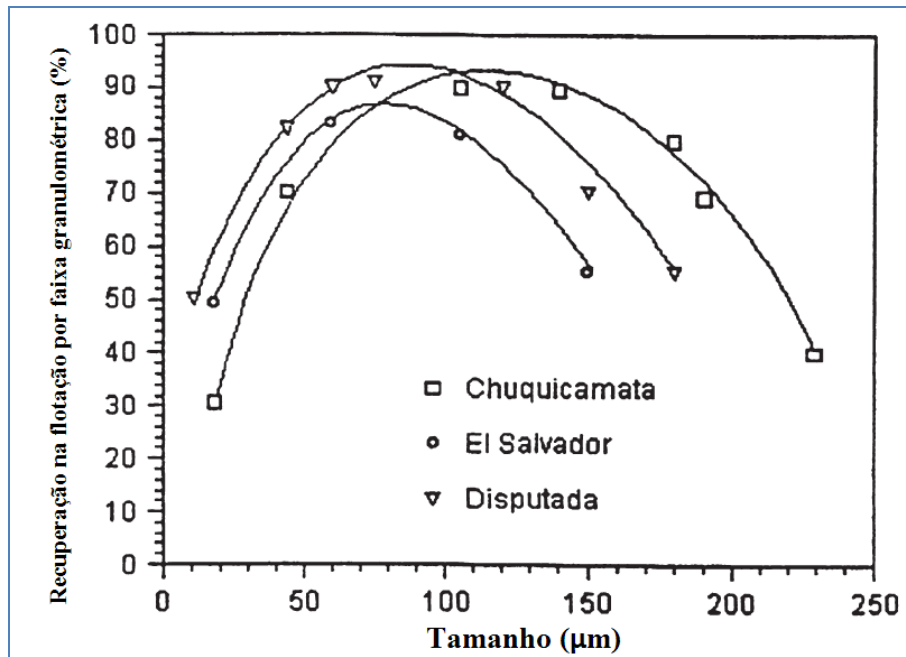


Figura 4.9 – Influência da granulometria na recuperação da flotação de cobre. (Bulatovic, 2007, adaptado).

A característica da estrutura cristalina de um mineral, a distribuição de impurezas no cristal do mineral, os minerais de ganga e o tamanho de liberação influenciam na flotabilidade dos minerais de cobre. Deste modo espera-se um comportamento diferenciado na flotação para cada tipo de minério encontrado na natureza. No dimensionamento dos circuitos de flotação faz-se necessário realizar testes com amostra representativa do depósito para determinar os parâmetros cinéticos, condições de operação e reagentes (Davenport, 2002).

A flotabilidade da calcopirita (CuFeS_2) é influenciada pelo nível de oxidação da superfície mineral que está diretamente ligada ao grau de aeração a que a polpa mineral é submetida. A figura 4.10 mostra a variação do nível de recuperação de cobre em função do tempo de aeração na flotação de calcopirita. Para tempos maiores de aeração, o nível de recuperação é maior (Bulatovic, 2007).

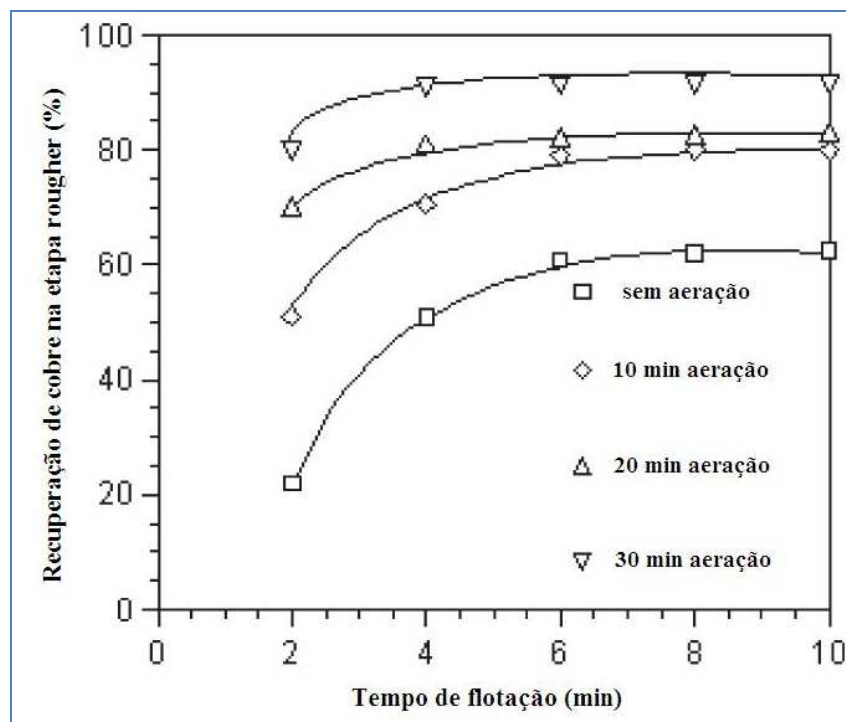


Figura 4.10 – Influência do nível de aeração na recuperação da etapa rougher de flotação de cobre. (Bulatovic, 2007, adaptado).

Este fato está relacionado ao comportamento diferenciado dos minerais de cobre em função do nível de oxidação da superfície mineral. Neste caso, oxigênio pode ser interpretado como agente modificador. Por exemplo, na flotação de calcopirita em presença de pirita o oxigênio deprime a pirita e ativa a calcopirita para auxiliara a ação do coletor.

O pH tem grande efeito na flotação de sulfetos. A influência de íons hidroxila (OH^-) e do cátion hidrogênio (H^+) na superfície dos minerais interfere na flotabilidade. A grande quantidade de hidroxilas satura os sítios de adsorção do coletor na superfície mineral diminuindo a flotabilidade. Para valores de pH acima de 11, mesmo com altas dosagens de coletor a calcopirita não é capaz de ser flotada. A figura 4.11 indica o efeito do pH na flotação para cada sulfeto (Wills, 1997).

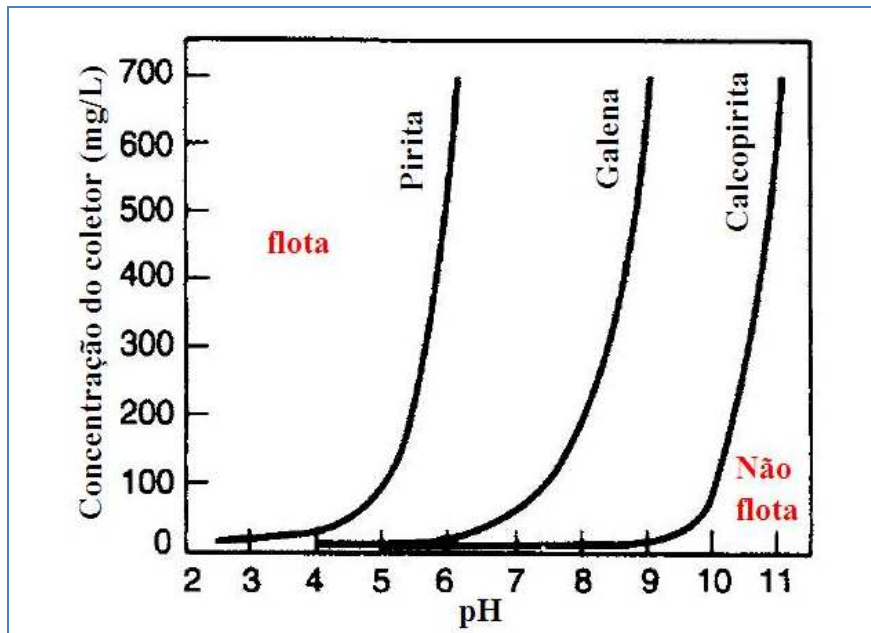
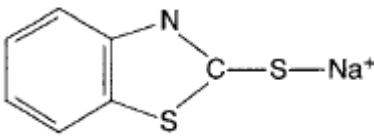


Figura 4.11 – Influência do pH na flotação de sulfetos. Na região esquerda de cada curva ocorre flotação. Na região direita de cada curva não ocorre flotação (Wills, 1997, adaptado).

Os coletores mais utilizados na flotação de sulfetos estão indicados na tabela IV.1. São os chamados tio-compostos, onde há a presença de 01 (um) enxofre não ligado ao oxigênio na parte polar do composto, e possuem radical (R) que representa a cadeia carbônica geralmente de tamanho curto.

Tabela IV.1 - Principais coletores utilizados na flotação de sulfetos (Wills, 1997 e Rosa, 2006)

Nome	Fórmula	Faixa pH	Principais usos
Xantato	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{O}-\text{C}=\text{S} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \quad \quad \quad \text{S}^--\text{K}^+ \\ \quad \quad \quad \text{(or Na}^+) \end{array}$	8-13	Flotação de sulfetos e minerais oxidados, como malaquita
Ditiofosfato	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{O} \\ \quad \quad \quad \diagup \\ \quad \quad \quad \text{P}=\text{S} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \text{R}-\text{O} \quad \quad \quad \text{S}^--\text{K}^+ \\ \quad \quad \quad \text{(or Na}^+) \end{array}$	4-12	Flotação seletiva de sulfetos de cobre e zinco
Ditiocarbamato	$\begin{array}{c} \text{R} \\ \quad \quad \quad \diagup \\ \quad \quad \quad \text{N}-\text{C}=\text{S} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \text{R} \quad \quad \quad \text{S}^--\text{K}^+ \\ \quad \quad \quad \text{(or Na}^+) \end{array}$	5-12	Mesmo uso do xantato, porém de maior custo
Éster Xântico	$\begin{array}{c} \text{R}-\text{O}-\text{C}=\text{S} \\ \quad \quad \quad \diagdown \\ \quad \quad \quad \text{S}^--\text{M}^+ \end{array}$	7-9	Flotação de sulfetos de cobre
Mercaptobenzotiazol		4-9	Flotação de sulfetos oxidados de cobre e chumbo

A escolha do espumante na flotação de sulfetos de cobre tem que levar em conta a formação da espuma com certa estabilidade para conseguir realizar o transporte da fração grossa dos minerais flotados. Deve se também levar em conta a seletividade do espumante para conseguir capturar a fração fina rica em minerais de cobre (Bulatovic, 2007). Além disso, a ação do espumante deve durar o suficiente para permitir a flotação e deve diminuir após a flotação para possibilitar o manuseio do concentrado (Davenport, 2002).

Álcoois e éteres podem ser utilizados como espumantes na flotação de sulfetos. Podem ser citados como principais espumantes na flotação de sulfetos de cobre:

- metil isobutil carbinol (MIBC);
- propileno glicol.

Na flotação de sulfetos é comum o uso de modificadores. Um dos objetivos é realizar a depressão da pirita através da elevação do pH, conforme pode ser visto pela figura 28.

A pirita (FeS_2) é o mineral sulfetado mais comum nos minérios de cobre. Por ser mais comum e não ser de interesse deve ser deprimido em relação aos minerais de cobre.

O reagente mais comum utilizado para ajuste do pH e para a depressão da pirita é a cal (CaO).

A oxidação da superfície da pirita aumenta o nível de hidratação, que conseqüentemente aumenta o caráter hidrofílico da superfície, e dificulta a ação do coletor.

Ao longo da operação na planta de beneficiamento, durante a vida útil da mina, a mineralogia do depósito mineral está sujeita a alterações. Por exemplo, diminuição do teor, aumento do W_i , etc. Para estes casos devem ser desenvolvidos novos reagentes, através de testes, para tentar manter a recuperação anterior. Em último caso deve-se procurar adaptar os equipamentos da planta para a nova situação (Davenport, 2002).

Os equipamentos mais utilizados na flotação de cobre atualmente são as células tanque de grande capacidade (entre 50 e 300 m^3) e colunas de flotação. As células de flotação basicamente são tanques agitados que podem ter aeração forçada, através de sistema de sopradores, ou ser auto-aeradas, onde o próprio movimento de rotação gera a aspiração de ar para dentro da célula.

A figura 4.12 mostra exemplo da célula de flotação auto-aerada, exemplo da célula WemcoSmartCell do fornecedor Flsmidth.

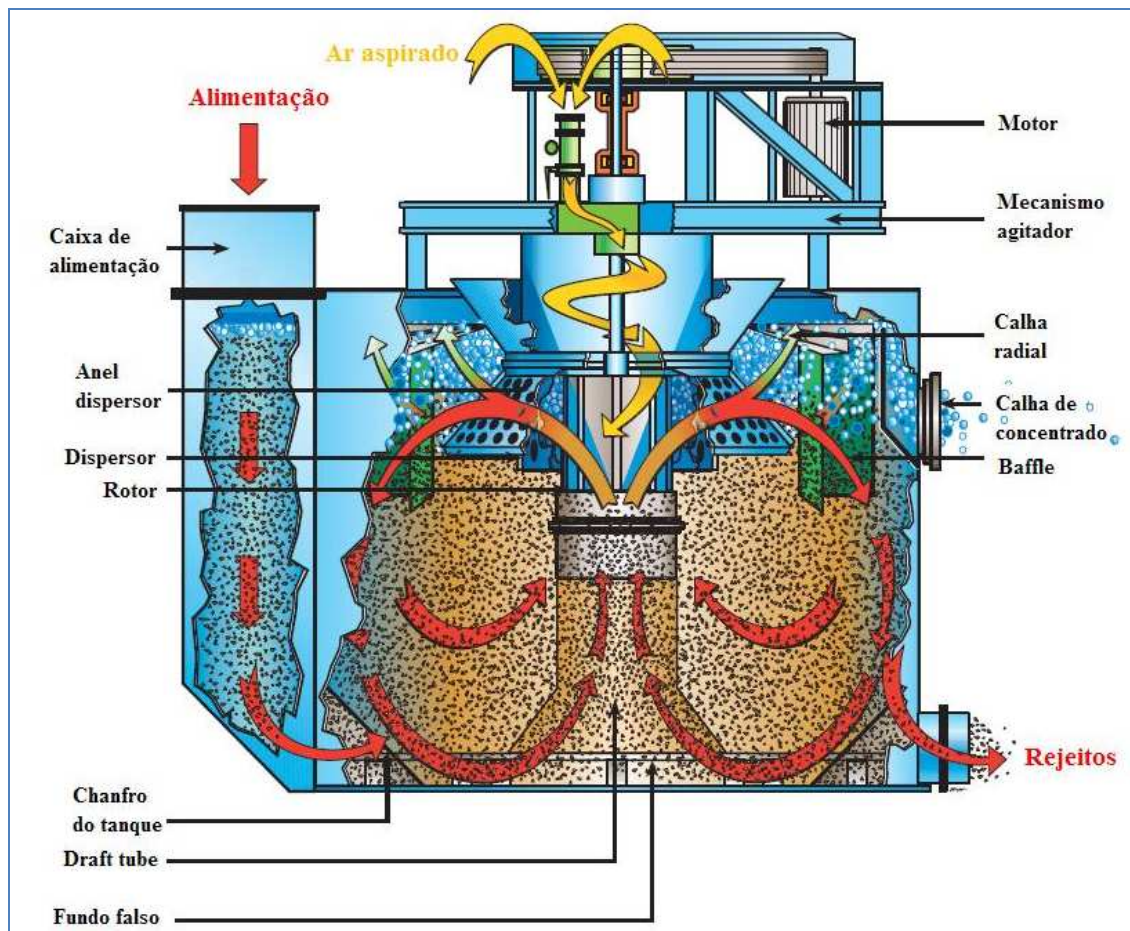


Figura 4.12 – Ilustração esquemática da célula de flotação tipo tanque auto-aerada (Flsmidth, catálogo, adaptado, 2008).

A figura 4.13 mostra exemplo da célula de flotação tipo tanque da Outotec que trabalha com injeção de ar (ar forçado). O ar é produzido por sistema de sopradores e encaminhado e controlado através de válvulas.

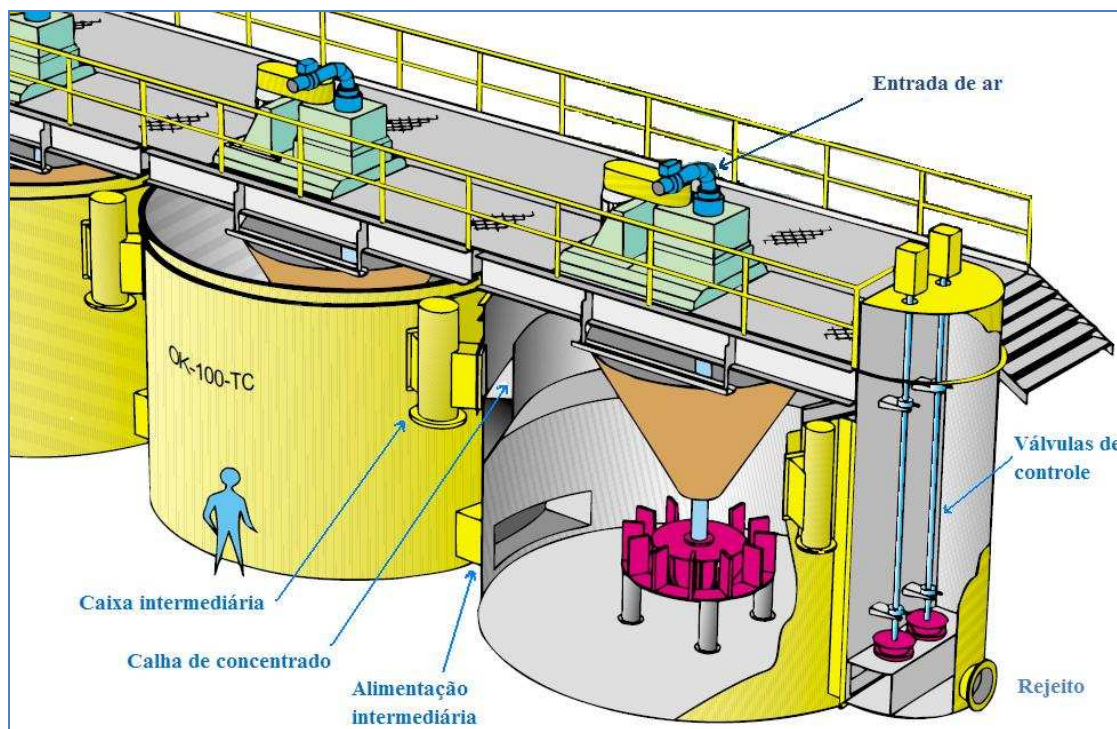


Figura 4.13 – Ilustração esquemática da célula de flotação tipo tanque com ar forçado, produzido por sopradores não indicados (Outotec, catálogo, adaptado, 2008).

A coluna de flotação é um equipamento estático onde a alimentação é realizada a cerca de dois terços da altura. O ar é injetado na base da coluna através de aeradores. O concentrado sai pela parte superior através de calhas de coleta. O rejeito sai pela parte inferior da coluna. A saída do rejeito é controlada através de válvulas. A figura 4.14 apresenta esquematicamente a coluna de flotação.

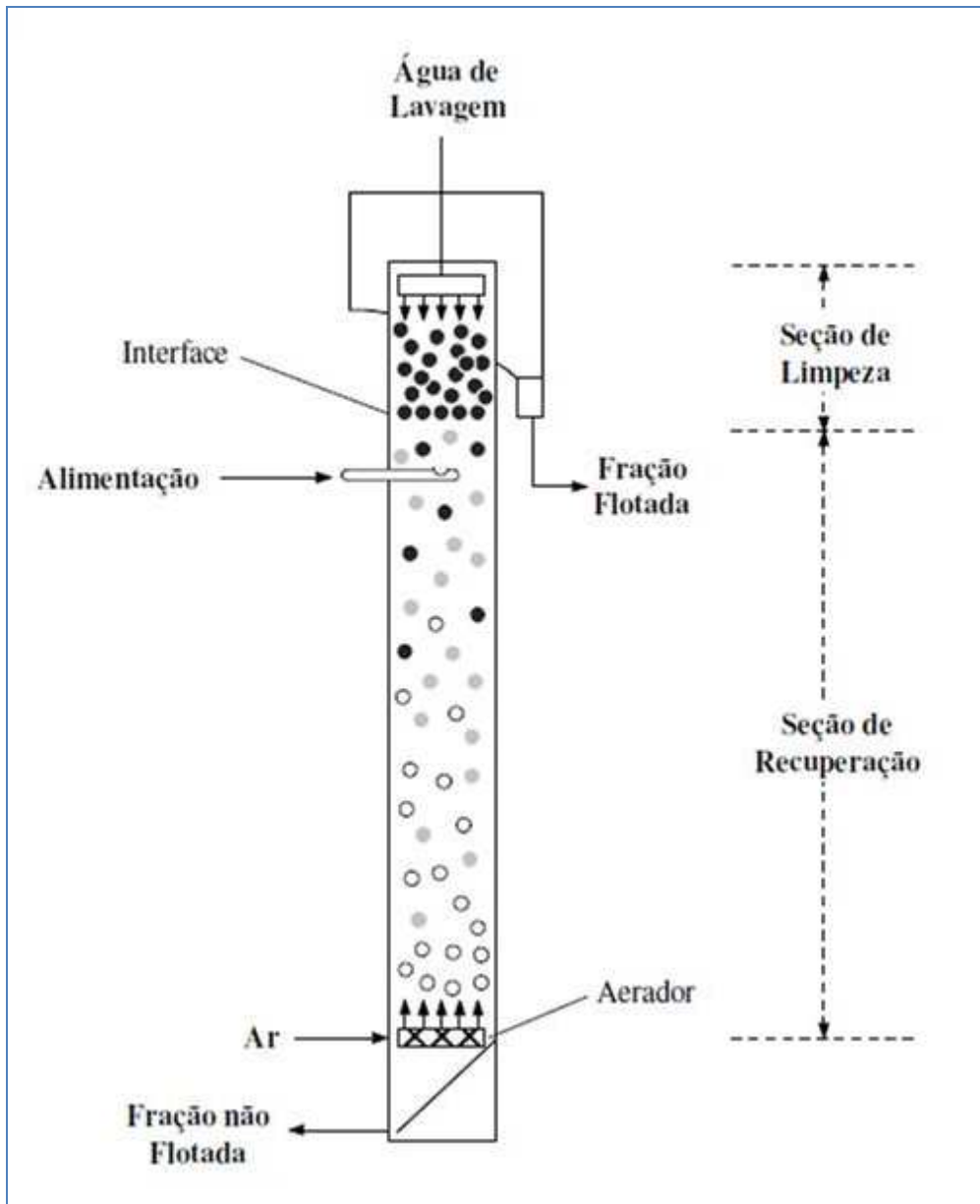


Figura 4.14 – Ilustração esquemática da coluna de flotação (Papini, 2010).

A coluna é equipamento de flotação mais recente e sua aplicação tem crescido principalmente para as etapas de limpeza.

As colunas possuem as seguintes vantagens:

- maior seletividade, particularmente para materiais finos;
- exigem menor espaço de instalação;
- menor custo de investimento;

- baixo custo operacional (não requerem sistemas de agitação);
- permitem a lavagem do concentrado, levando a obtenção de maiores teores;
- apresentam grande adaptabilidade a sistemas de automação.

Como desvantagem, as colunas exigem tempos de residência maiores. Tem-se observado que a tendência para a flotação de minérios de cobre é o uso de circuitos de flotação mistos. (Wills, 1997 e Chaves, 2006).

Um fluxograma típico da flotação de minérios de cobre é indicado na figura 4.15. As recuperações e teores típicos das etapas também são indicados. A recuperação metalúrgica global geralmente atinge 90 % com teores de cobre entre 27 – 30% dependendo dos minerais de cobre associados.

O concentrado obtido na etapa de flotação segue para o processo de separação sólido-líquido, próxima etapa de beneficiamento.

O rejeito geralmente é descartado por gravidade para a barragem de rejeitos. Para algumas situações onde o custo de obtenção de água é significativo e existem restrições ambientais ao uso extensivo de barragens, há uma tendência no sentido de recuperar a água na planta industrial através do espessamento dos rejeitos.

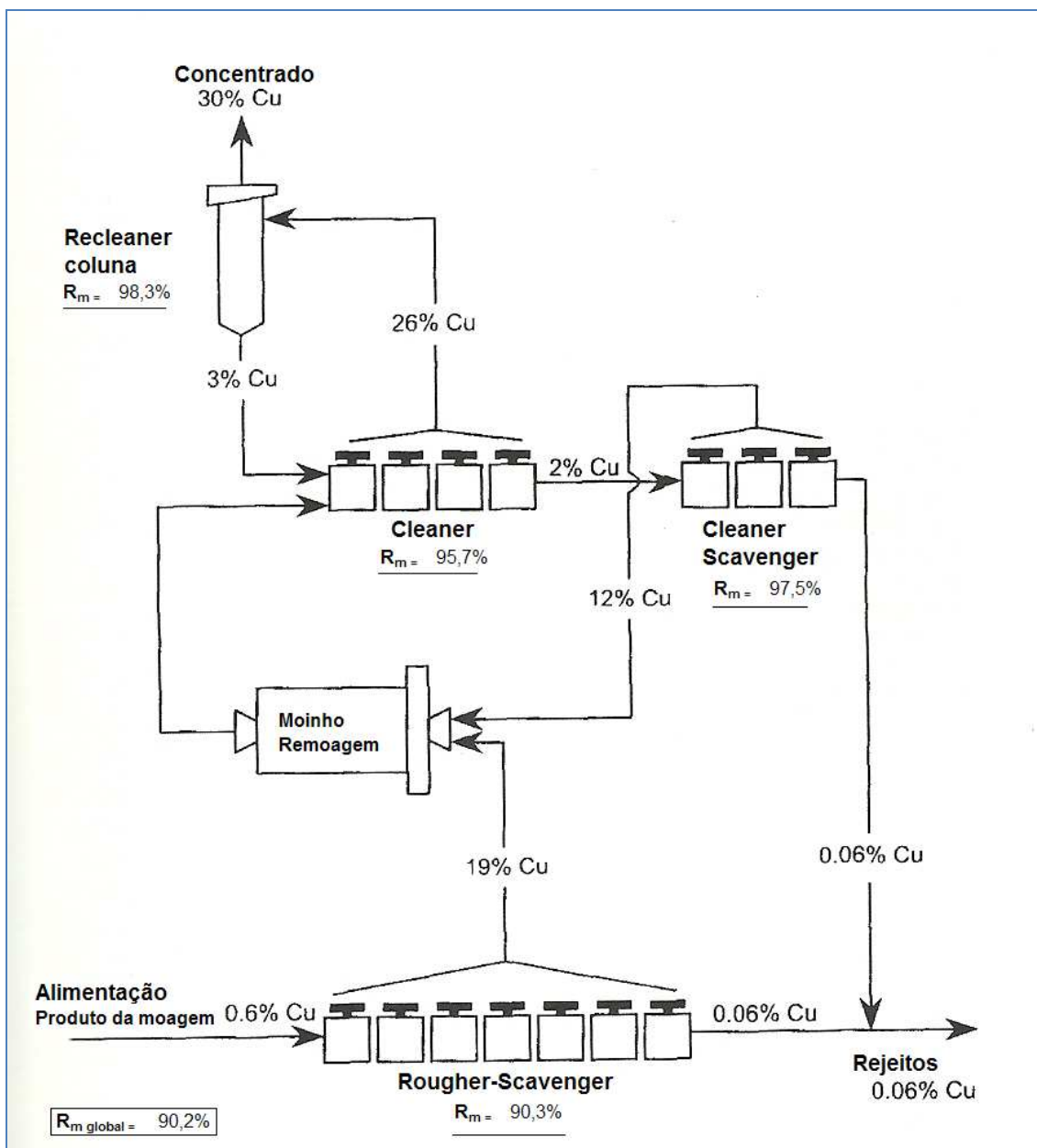


Figura 4.15 – Fluxograma típico de flotação de sulfeto de cobre contendo calcopirita, indicando as etapas, teores e recuperações (Davenport, 2002, adaptado).

4.5 Separação Sólido/Líquido

O concentrado obtido na etapa de flotação é uma polpa com geralmente 25-30% de sólidos em peso e deve ser processado para facilitar o manuseio, ser estocado e transportado economicamente para posteriormente alimentar a etapa de extração metalúrgica. O objetivo é produzir um concentrado em torno de 8-10% de umidade.

Na unidade de beneficiamento mineral são utilizadas as operações unitárias de espessamento e filtração.

O espessamento recebe polpa diluída, 25-30% de sólidos em peso e com a ajuda de floculantes, consegue processar o concentrado até 60-65% de sólidos em peso, e com conseqüente recuperação de água para o processo.

Os floculantes são polímeros sintéticos de cadeia longa e ramificada que auxiliam o processo de espessamento, aumentando a velocidade de sedimentação dos sólidos através da formação de flocos de partículas (Brandão, 2010).

As figuras 4.16 e 4.17, respectivamente, indicam a planta e corte de espessador tipo coluna (para a sustentação do mecanismo de giro), usualmente empregado quando o diâmetro necessário é maior que 40 m. Para diâmetros menores podem ser empregados espessadores tipo ponte.

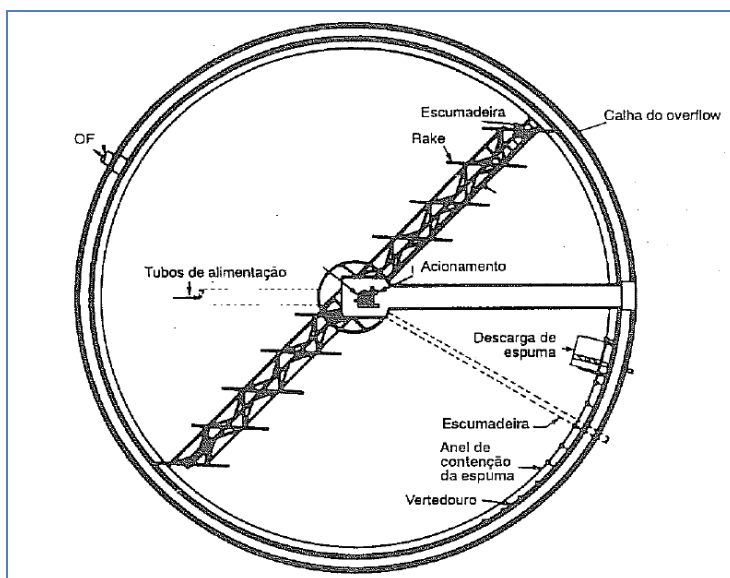


Figura 4.16 – Vista superior do espessador tipo coluna (Chaves, 2004).

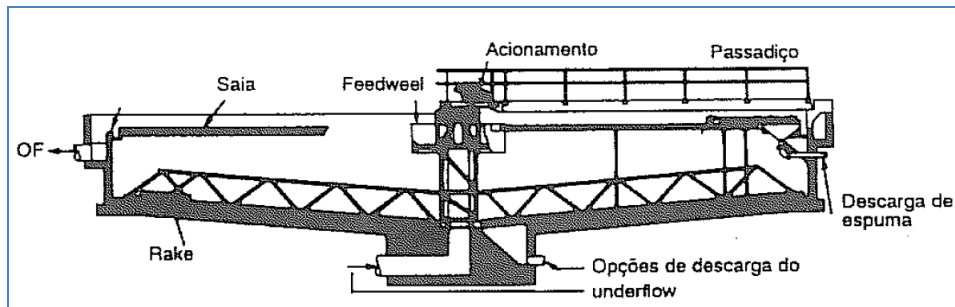


Figura 4.17 – Vista lateral do espessador tipo coluna (Chaves, 2004).

Espessadores são tanques com fundo inclinado na direção do centro e que são dotados de braços raspadores para encaminhar o sólido sedimentado para a saída inferior. A alimentação é feita pelo centro do espessador (poço de alimentação) juntamente com o floculante, que é geralmente utilizado através de solução diluída a 0,01% em peso. O material adensado (underflow) é recuperado por baixo geralmente através de bombas para alimentar o tanque de alimentação da filtragem. A água resultante da separação sai por cima e é recolhida através de calha periférica e segue para o sistema de recuperação de água da planta.

Para a filtragem de minérios de cobre podem se utilizar filtros de discos a vácuo, filtros de tambor a vácuo, filtros prensa e filtros com meio filtrante de cerâmica. O mais utilizado atualmente é o filtro prensa, especialmente em razão da maior dificuldade para filtrar concentrados obtidos de minérios que exigem tamanhos mais finos para a liberação. Atualmente os filtros apresentam bom grau de automatização, principalmente os de grande capacidade. Assim todos os ciclos de operação do filtro são realizados automaticamente sem a necessidade do operador.

O filtro prensa é constituído por placas que encostadas formam as câmaras de filtragem duas a duas. O tecido de filtragem se localiza entre cada placa. Alguns modelos possuem também membranas que podem ser infladas. As placas são providas de sistema de drenagem para o filtrado. O processo se inicia com ao preenchimento das câmaras através de bombeamento. Enquanto as câmaras são cheias já se inicia o processo de filtragem quando o sólido é retido entre as placas e o líquido é expulso para fora das câmaras através da pressão de bombeamento. Após completar o volume das câmaras é então inflado ar comprimido entre as membranas para pressionar a torta e retirar mais filtrado. Em seguida ar comprimido pode ser passado através da torta também para diminuição da umidade. A última etapa é a descarga da torta com a abertura das placas.

Na figura 4.18 tem-se uma idéia geral do filtro prensa de placas verticais com a visualização do conjunto de placas, o mecanismo de abertura hidráulico automático das placas e o chute de coleta da torta (Metso, 2004).

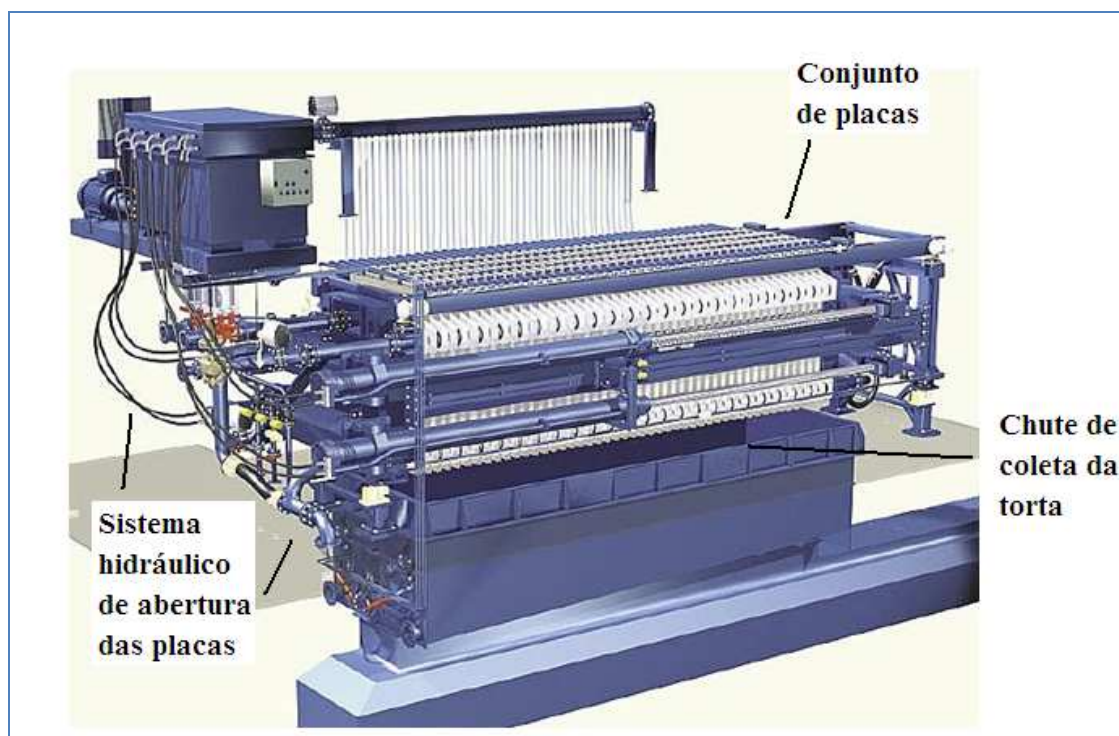


Figura 4.18 – Foto filtro prensa vertical modelo VPA (Metso, 2004).

5. METALURGIA EXTRATIVA

Dependendo do tipo de minério de cobre encontrado na natureza, o beneficiamento e o seu tratamento metalúrgico terão rotas diferentes de processamento. De forma geral existem dois meios para extração do cobre. O processo pirometalúrgico, aplicado para minerais sulfetados, e o processo hidrometalúrgico que pode ser utilizado para os minerais oxidados e também para os sulfetados, por exemplo, calcocita, Cu_2S .

A figura 5.1 apresenta as rotas gerais de processamento para os minérios de cobre.

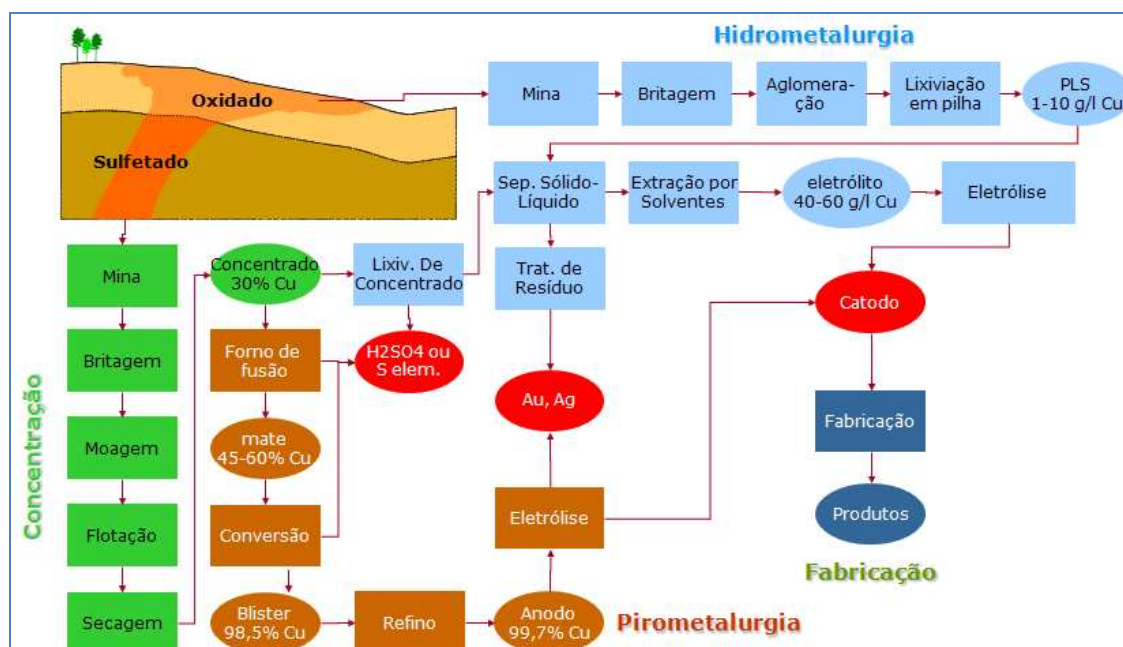


Figura 5.1 – Rotas gerais de processamento e extração para minérios de cobre (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006).

As etapas marcadas em verde representam as etapas de beneficiamento mineral de sulfetos. Os concentrados sulfetados são de difícil solubilização. As etapas marcadas em marrom dizem respeito ao processo de tratamento pirometalúrgico para os concentrados sulfetados.

O que está marcado de azul claro se refere ao processamento hidrometalúrgico. Antes da etapa de lixiviação em pilhas, os minérios oxidados devem ser britados (facilitar o manuseio) e aglomerados (facilitar a drenagem das pilhas).

Na rota de processamento pirometalúrgica há produção de ácido sulfúrico, produzido a partir do gás SO_2 gerado no processo de redução do sulfeto. Ouro e prata, associados ao minério são aproveitados como produtos secundários nas etapas de extração metalúrgica. O molibdênio associado a minérios porfiríticos pode ser aproveitado na etapa de flotação.

Após a etapa de eletrólise/refino eletrolítico o cobre com 99,99% de pureza pode ser utilizado para a indústria de semi-acabados e ligas.

Cerca de 80% do cobre primário (proveniente de minérios) é produzido através do beneficiamento de minérios sulfetados, redução e refino. Os restantes 20% são produzidos através de processos hidrometalúrgicos de lixiviação e (SX-EW).

A tabela V.1 apresenta as maiores plantas de produção de cobre primário. A capacidade anual de produção é dada em mil toneladas de cobre contido. São indicadas as rotas de produção de cobre: flotação, redução e refino ou hidrometalurgia (Davenport, 2002).

Tabela V.1 – Maiores plantas de produção de cobre primário (ICSG, 2010 e Davenport, 2002)

Posição	Mina	País	Fonte	Capacidade (t Cu/ ano) (x 1000)
1	Escondida	Chile	Flotação e SX-EW (*)	1.300
2	Codelco Norte (**) (***)	Chile	Flotação e SX-EW (*)	920
3	Grasberg	Indonésia	Flotação	780
4	Collahuasi	Chile	Flotação e SX-EW (*)	520
5	El Teniente	Chile	Flotação e SX-EW (*)	454
6	Taimyr Peninsula	Rússia	Flotação	430
7	Antamina	Peru	Flotação	400
7	Los Pelambres	Chile	Flotação	400
9	Morenci	EUA	Flotação e SX-EW (*)	390
10	Bingham Canyon	EUA	Flotação	280
10	Batu Hijau	Indonésia	Flotação	280
10	Andina	Chile	Flotação	280
13	Kansanshi	Zâmbia	Flotação e SX-EW (*)	270
14	Los Bronces	Chile	Flotação e SX-EW (*)	241
15	Zhezkazgan Complex (***)	Cazaquistão	Flotação	230
16	Olympic Dam (***)	Austrália	Flotação e SX-EW (*)	225
17	Rudna	Polónia	Flotação	220
18	Sarcheshmeh (***)	Iran	Flotação e SX-EW (*)	204
19	Spence	Chile	SX-EW (*)	200
20	La Caridad	México	Flotação e SX-EW (*)	195

(*) SX-EW: Técnica hidrometalúrgica de lixiviação, extração por solventes e eletrorecuperação.

(**) Inclui Chuquicamata, Radomiro Tomic, Mina Ministro Hales (projeto)

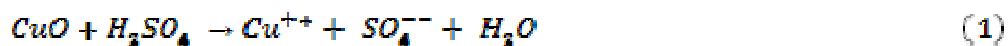
(***) Inclui redução e refino para o tratamento do concentrado obtido na flotação.

5.1 Hidrometalurgia (Davenport, 2002)

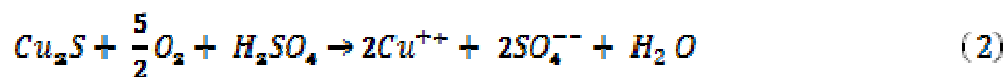
A técnica hidrometalúrgica mais utilizada para produção de cobre é a lixiviação em pilhas. As etapas principais que envolvem o tratamento hidrometalúrgico são:

- britagem (facilitar o manuseio até a pilha);
- aglomeração (recuperar os finos);
- lixiviação;
- extração por solventes;
- eletrorecuperação.

A lixiviação é feita com solução de ácido sulfúrico aspergida no topo das pilhas. O ácido percola pela pilha e reage com os minerais oxidados de acordo com a equação 1.



A reação com a calcocita, mineral sulfetado ocorre de acordo com a equação 2. No caso dos sulfetos a reação é acelerada pela presença de bactérias que agem como catalisador da reação.



A figura 5.2 apresenta um fluxograma esquemático do processo hidrometalúrgico, onde é indicado o valor típico da concentração de cobre nos fluxos das soluções.

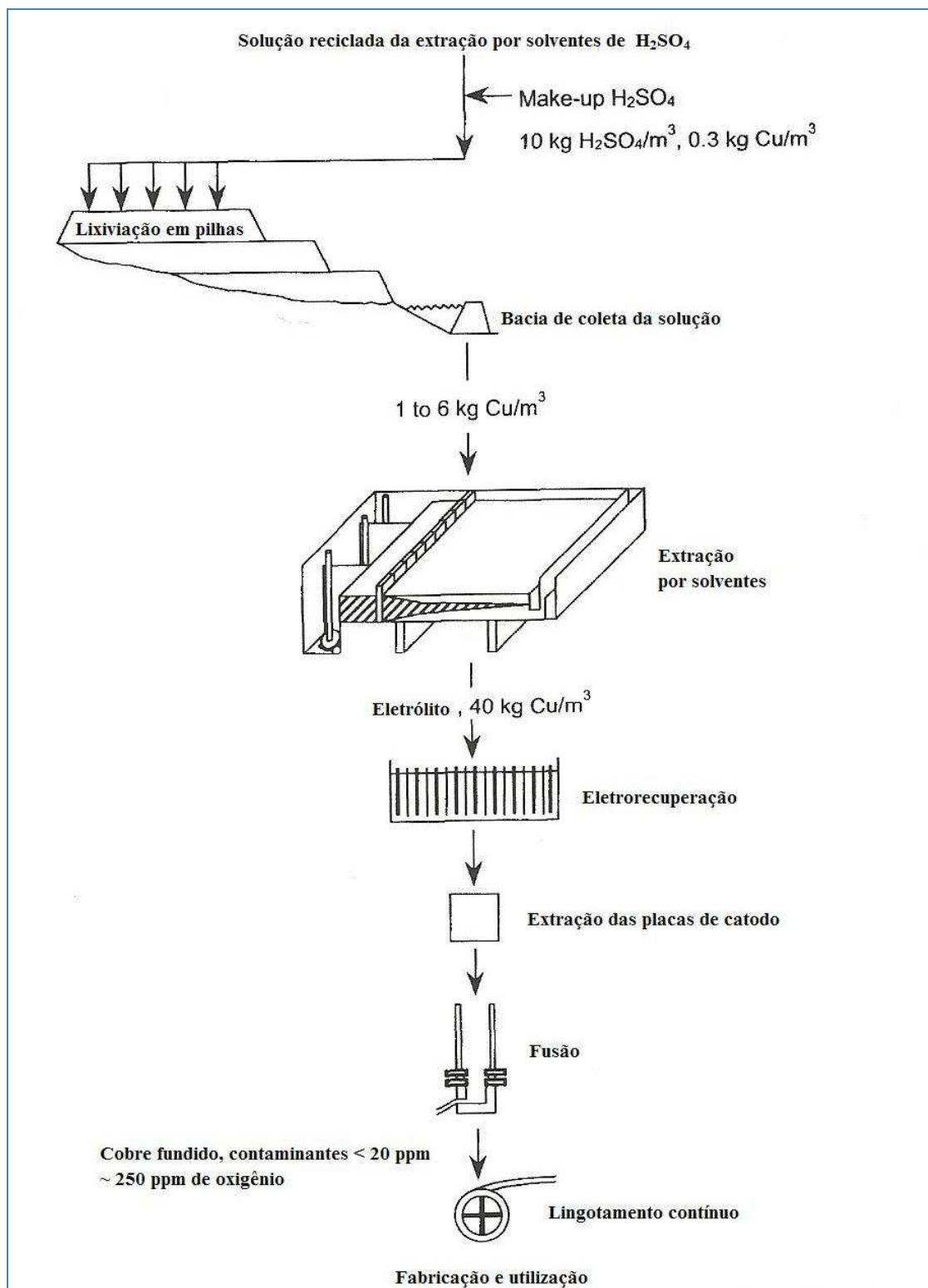


Figura 5.2 - Esquema de lixiviação em pilhas para minérios oxidados e carbonatados de cobre (Davenport, 2002).

A solução é estocada em bacias (ponds) para posteriormente alimentar a etapa de extração por solventes.

A solução resultante da etapa de lixiviação carrega Cu, H₂SO₄ e outras impurezas. É necessário fazer a extração do cobre dissolvido. A extração é feita através de reagente orgânico específico (extratante) que captura o cobre dissolvido. Posteriormente ocorre a separação da fase orgânica da fase aquosa por diferença de densidade. O cobre dissolvido é então recuperado da solução orgânica através da solução de eletrólito contendo alta concentração de ácido sulfúrico. A equação 3 indica o equilíbrio entre a espécie de cobre dissolvida na solução aquosa e combinada com o extratante orgânico.



Onde RH é o extratante orgânico e R₂Cu representa o orgânico carregado.

A equação 3 indica a influência da quantidade de ácido no processo de carregamento do cobre pelo reagente orgânico e o processo contrário (liberação do cobre).

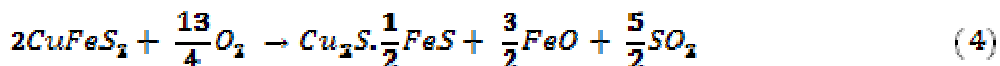
A solução rica em cobre e em ácido segue para etapa de eletrorecuperação onde ocorre a deposição do cobre metálico nos catodos de aço inox. No anodo ocorre a formação de oxigênio. A solução exaurida retorna ao processo de extração por solventes. As placas de cobre formadas nos catodos são extraídas e encaminhadas aos processos de conformação para produção de semi-acabados.

5.2 Pirometalurgia (Davenport, 2002)

As plantas pirometalúrgicas também conhecidas como Smelters produzem cobre metálico através de várias etapas com transformações químicas.

A primeira etapa é chamada de redução e tem por objetivo oxidar o enxofre e o ferro presentes no concentrado para formar uma fase fundida rica em cobre, chamada mate e outra fase fundida, pobre em cobre chamada de escória. A redução é realizada em fornos específicos com injeção de ar enriquecido com oxigênio.

As equações 4 e 5 representam as reações que ocorrem na etapa de redução.



Como produtos da redução são obtidos o mate, liga com o máximo possível de cobre (45-75% de Cu), a escória com o mínimo possível de cobre e o gás SO₂ que na maioria dos casos é aproveitado para a produção de ácido sulfúrico.

O mate segue para a etapa de conversão e a escória é tratada para a recuperação de cobre, sendo depois reaproveitada ou descartada.

A conversão é feita em um vaso específico com adição de oxigênio e SiO₂ (fundente) para capturar o ferro. O resultado é o blister com 99% de Cu. A escória resultante contém 4-8% de cobre que é recuperado por sedimentação (na fase fundida). Pode também ser solidificada e a recuperação do cobre ser feita através da flotação.

As equações 6 e 7 representam as reações que ocorrem na etapa de conversão.



O blister (cobre metálico) segue então para a etapa de refino a fogo e posteriormente para o refino eletrolítico. Em seguida o cobre segue para as etapas de conformação para produção dos semi-acabados.

A figura 5.3 apresenta a sequência de operações para produção do cobre.

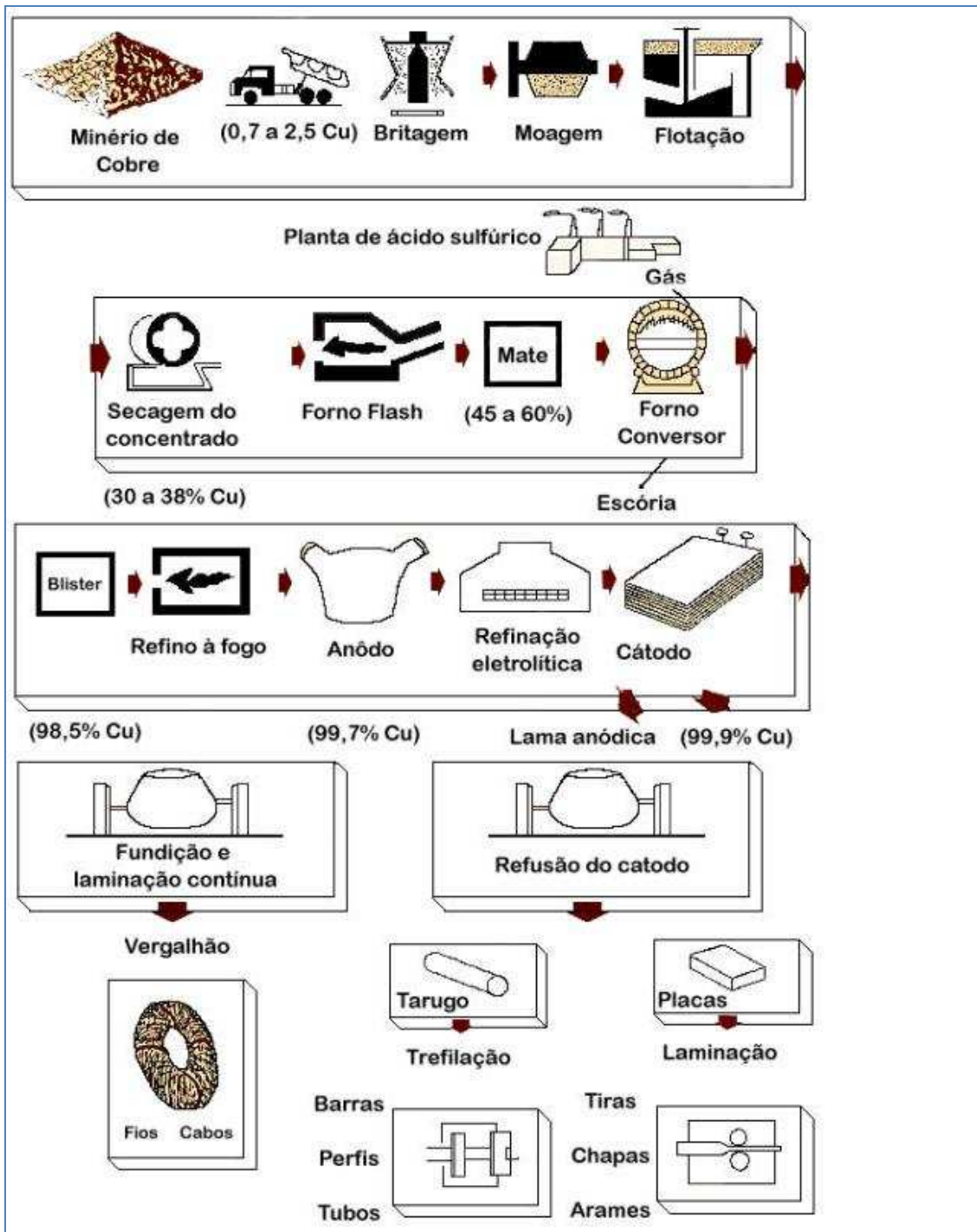


Figura 5.3 - Sequência de processamento de minérios sulfetados, mostrando a rota pirometalúrgica (BNDS, 1997).

6. RECICLAGEM DE COBRE

A reciclagem do cobre possui importância muito grande. Para se ter idéia cerca de 1/3 da produção de cobre provém da reciclagem. Além disso, 50% do cobre que chega ao mercado através de produtos pelo menos já foi reciclado alguma vez.

A produção primária de cobre é feita através do processamento, beneficiamento e extração a partir de minérios. A produção secundária é realizada através do aproveitamento e reciclagem de sucata de cobre.

A figura 6.1 apresenta o fluxograma da reciclagem de cobre.

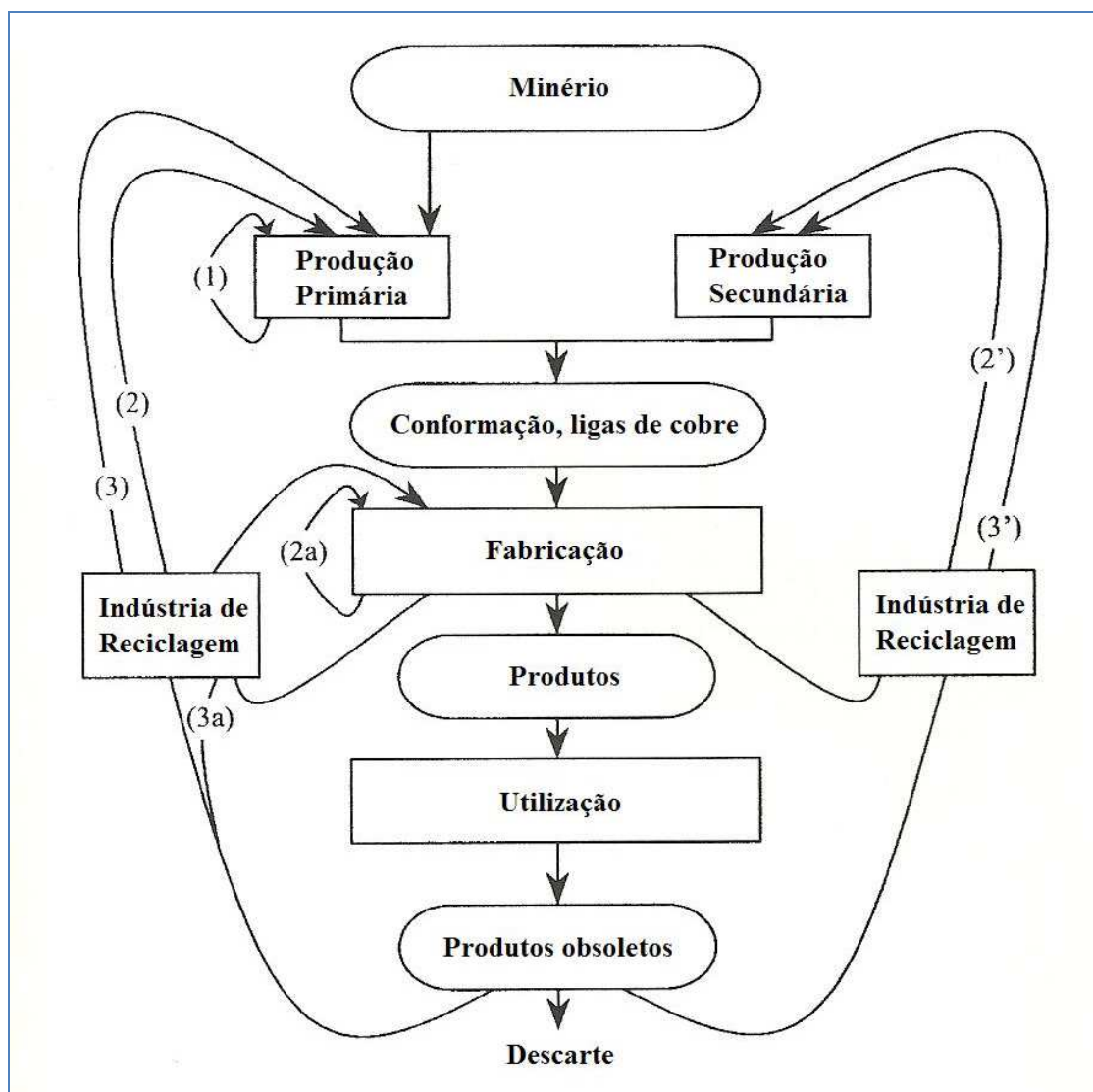


Figura 6.1 – Fluxograma de reciclagem do cobre (Davenport, 2002).

O fluxo (1) representa a sucata de cobre que é gerada e reaproveitada no próprio processo de produção primária. Geralmente são anodos, catodos ou barras que estão fora de especificação e não podem ser vendidos.

Os fluxos (2), (2a) e (2') denotam as sucatas de cobre que são geradas dentro do processo de manufatura e fabricação de um determinado produto. São caracterizadas pelo fato do cobre estar associado a outros elementos (como nas ligas) ou a outros materiais que estão fisicamente ligados ao metal de cobre.

Já os fluxos (3), (3a) e (3') representam o aproveitamento de cobre contido nos diversos bens de consumo que chegam ao final da sua vida útil.

A tabela VI.1 apresenta dados da reciclagem de cobre, aproveitado por tipo de aplicação de bens de consumo, no Japão no ano de 1997.

Tabela VI.1 – Reciclagem do cobre contido nos bens de consumo no Japão em 1997 (Sasaki, 1999)

Fonte da Sucata	Disponível (x 1000 t)	Reciclada (x 1000 t)	Aterros (x 1000 t)	% Reciclagem
Indústria de geração energia, telecomunicações, cabos	197	197	0	100
Utensílios, máquinas e aparelhos elétricos	142	29	113	20
Automóveis	79	38	41	48
Máquinas industriais, navios, vagões	62	51	11	82
Construções	118	81	37	69
Total	598	396	202	66

A figura 6.2 apresenta o nível de reciclagem de alguns países e da Europa Ocidental. Japão e Europa são os que mais reciclam no mundo apresentando índices em torno de 65%. Brasil e Estados Unidos reciclam menos, 49% e 46% respectivamente.

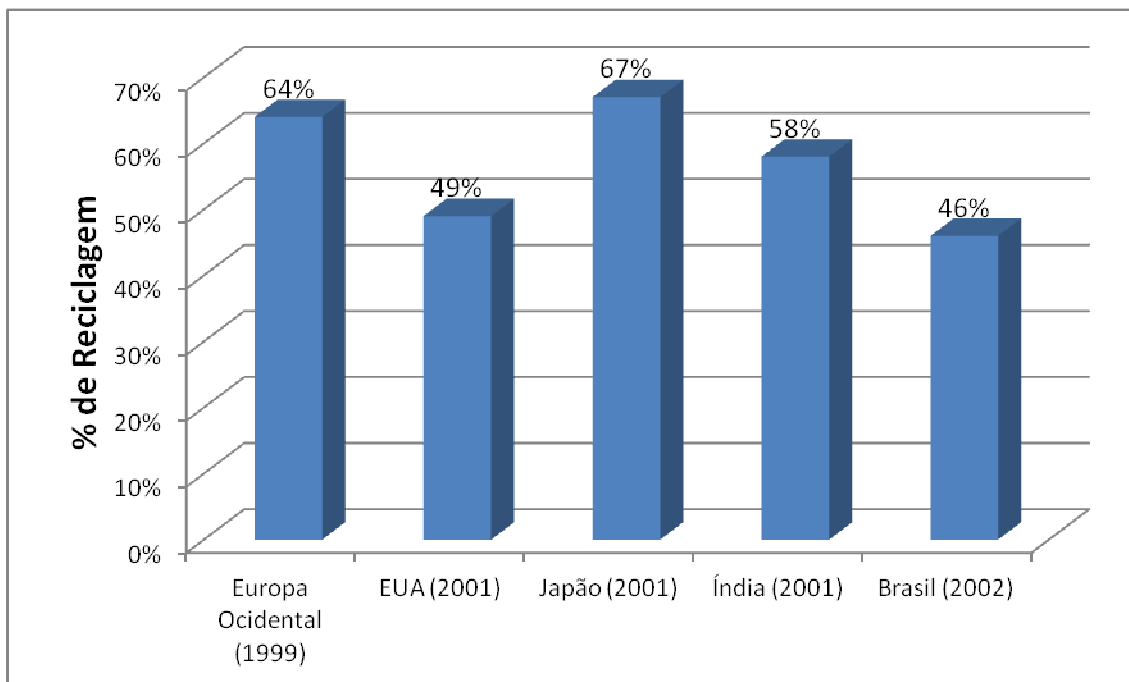


Figura 6.2 – Reciclagem de cobre para os bens de consumo – final vida útil (ICSG, adaptado, 2009).

Existe uma tendência de aumento da reciclagem de cobre no mundo. Um dos fatores é o aumento da demanda e preço do cobre e outro fator é que a disposição de materiais descartados está ficando mais difícil e conseqüentemente mais dispendiosa.

A figura 6.3 apresenta os processos utilizados para a recuperação do cobre dependendo do tipo, teor de cobre e qualidade da sucata. São também utilizados processos físicos e mecânicos para separar o cobre de outros metais e outros materiais, como por exemplo, a separação magnética para a retirada de metais ferrosos e a diferença de densidade para a separação de plásticos.

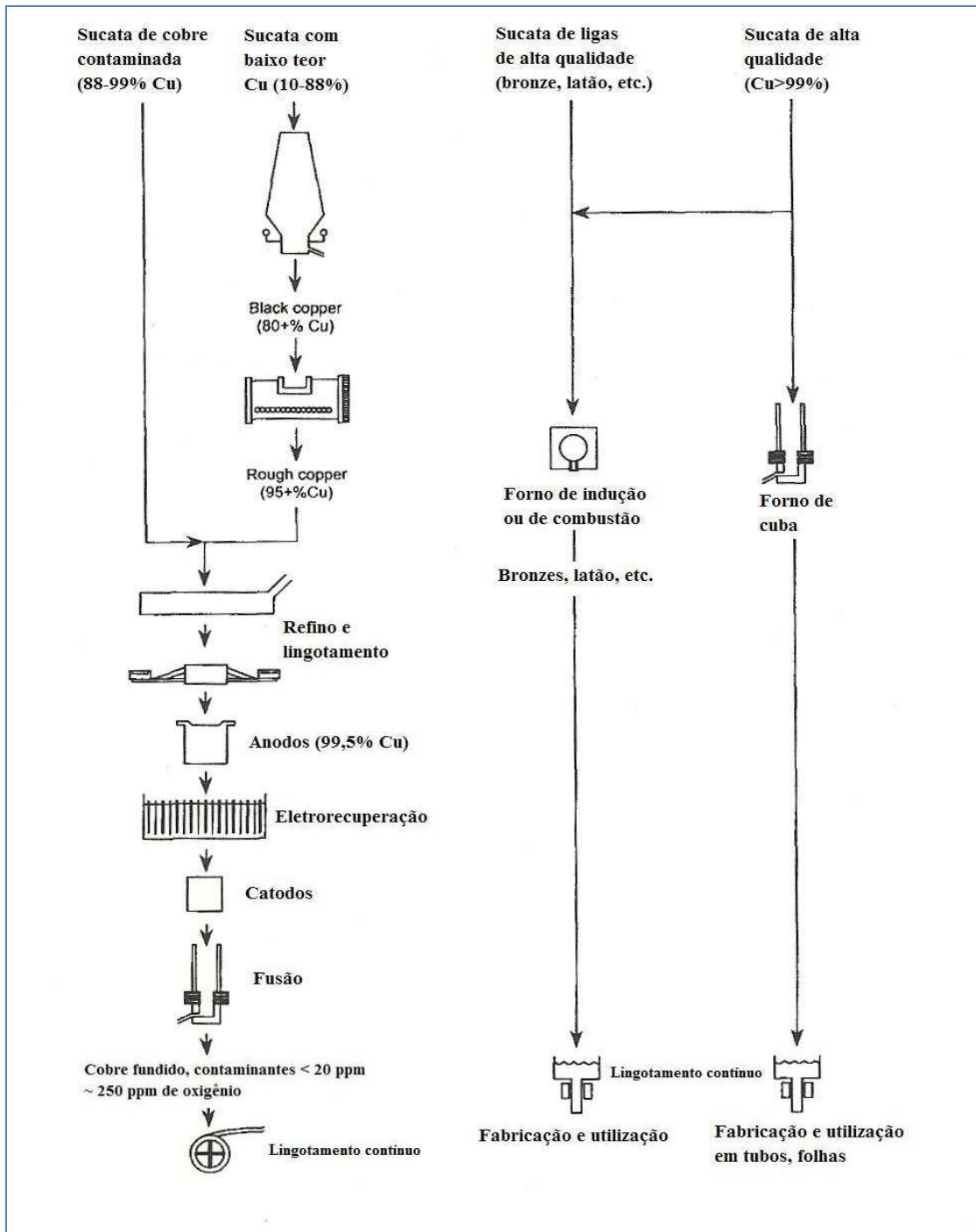


Figura 6.3 – Processos utilizados para a reciclagem de sucatas de cobre (Davenport, adaptado, 2002).

7. EXEMPLOS DE PLANTAS DE BENEFICIAMENTO DE COBRE NO BRASIL

7.1 Sossego

A planta de processamento de minério de cobre de Sossego foi inaugurada em 2004 e pertence à mineradora Vale. A planta de Sossego está localizada na região norte do país, na cidade de Canaã dos Carajás, Pará. A planta de beneficiamento é alimentada por 02 (duas) minas, Sequeirinho e Sossego.

O principal mineral de cobre presente é a calcopirita. Estão presentes em menor quantidade bornita e calcocita. Silicatos, magnetita e alguns óxidos e carbonatos constituem a ganga, sendo os dois últimos em menor quantidade (Rosa, 2006).

A tabela VII.1 apresenta a composição mineralógica do minério sulfetado processado na planta de Sossego. Os valores foram obtidos a partir de composição de amostras de testemunhos de sondagem.

Tabela VII.1 – Composição percentual mineralógica do minério de Sossego (Rosa, 2006)

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

A tabela VII.2 apresenta a composição química média de minério do Sossego do período inicial de operação.

Tabela VII.2 – Composição química do minério de Sossego (Nankran, 2006)

Elemento	Sequeirinho	Sossego
Cu (%)	1,37	1
Fe (%)	12,5	6,41
S (%)	1,46	0,89
Au (g/t)	0,37	0,3

A planta de beneficiamento do Sossego tem capacidade de processamento de 15 milhões de toneladas por ano de minério de cobre. Considerando teor médio de 1% em cobre da alimentação (ROM) e 30% de teor do concentrado para uma recuperação metalúrgica de 93% a planta é capaz de produzir até 520.000 t/ano de concentrado de minério de cobre. A recuperação em massa é da ordem de 3-4%.

A figura 7.1 apresenta o fluxograma simplificado da planta de beneficiamento de cobre do Sossego

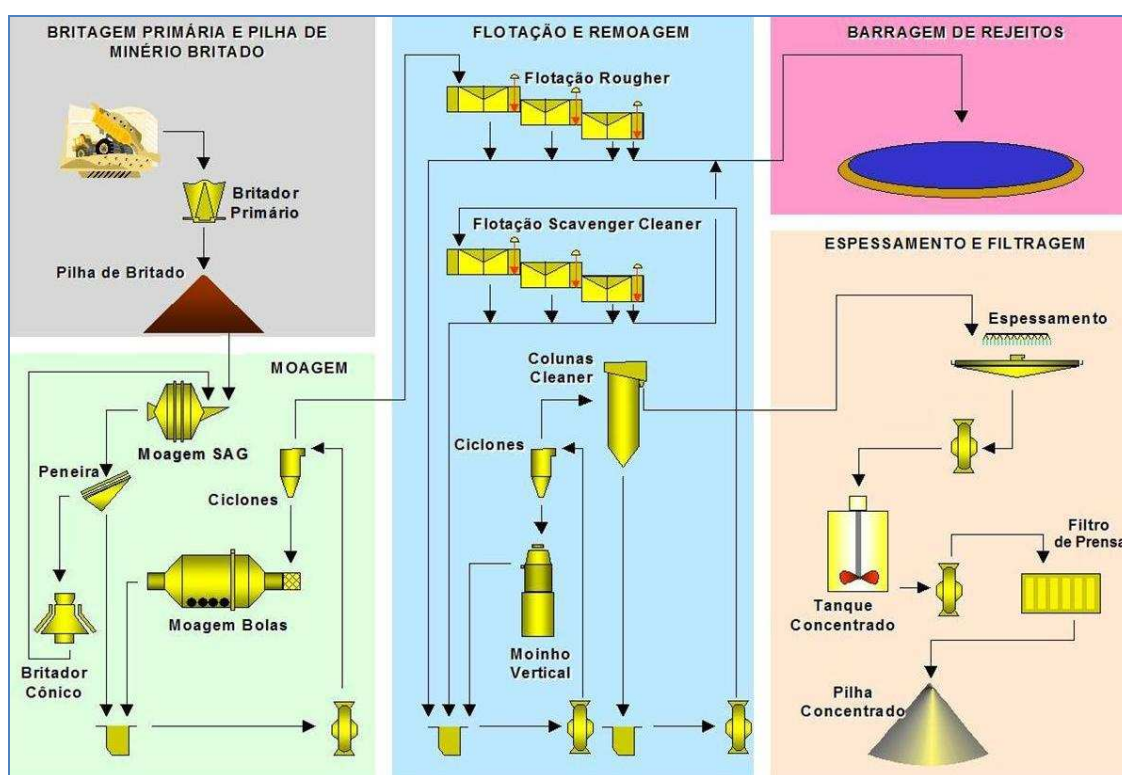


Figura 7.1 - Rota de tratamento de minério sulfetado – Uso de SAG (Manual do Processo Produtivo - Cobre, Vale 2006).

A operação da mina e a etapa de britagem primária foram projetadas para trabalhar com um regime operacional de 6.000 h/ano. O restante da planta, desde a retomada da pilha pulmão até a filtragem, trabalha cerca de 8.100 h/ano.

O minério proveniente da mina é transportado por caminhões de 240 t e descarregado na moega de alimentação da britagem. O produto da britagem primária (80% menor que 150 mm) é empilhado em pilha pulmão.

A retomada da pilha segue para a moagem semi-autógena SAG. A descarga do moinho é classificada em peneiras vibratórias com corte em 13 mm. O passante segue para alimentar a classificação da moagem. O material retido vai para a britagem de pebbles sendo que seu produto fecha o circuito retornando para a alimentação da moagem SAG. O underflow dos ciclones de classificação alimenta a moagem de bolas. O overflow, material com 80% menor que 0,150 mm segue para a etapa de flotação.

A flotação é realizada através de 03 etapas de concentração, sendo rougher e scavenger do cleaner realizadas em células tipo tanque e cleaner realizada em colunas. Para promover a liberação adicional dos minerais de cobre, o concentrado rougher e o concentrado scavenger do cleaner são processados na remoagem e posteriormente alimentarão a etapa cleaner.

Os rejeitos rougher e scavenger do cleaner constituem o rejeito final com 0,06% de cobre e seguem por gravidade para a barragem de rejeitos.

O concentrado cleaner é o concentrado final e segue para o espessamento e filtragem.

A tabela VII.3 apresenta a lista dos principais equipamentos de processo da planta de Sossego.

Tabela VII.3 – Lista dos principais equipamentos de processo da planta do Sossego (Rosa, 2006, Vale, 2004, adaptado)

Etapa	Quantidade	Características	Potência (kW)
Britagem Primária	01	Britador primário, 60" x 89", APA = 167 mm	600
Moagem semi-autógena SAG	01	Moinho SAG Ø = 38 ft (11,6 m) x , L = 23 ft (7,0 m)	20.000
Moagem de bolas	02	Moinho de bolas Ø = 22 ft (6,7 m) x , L = 32 ft (9,8 m)	8.500
Classificação descarga do SAG	02	Peneira vibratória inclinada 12 ft x 24 ft, duplo deque corte de 13 mm	100
Britagem de <i>pebbles</i>	02	Britador de cone short head, MP800, APF = 12 mm	600
Classificação da moagem	02	Bateria com 8 hidrociclones de 33 polegadas	-
Flotação <i>rougher</i>	02	Banco com 07 células tipo tanque de 160 m ³	7 x 150
Flotação <i>scavenger-cleaner</i>	01	Banco com 06 células tipo tanque de 160 m ³	6 x 180
Flotação <i>cleaner</i>	06	Coluna de flotação com Ø = 4,3 m e altura = 14 m	-
Remoagem	02	Moinho vertical VTM-1500	1100
Classificação da remoagem	02	Bateria com 7 hidrociclones de 15 polegadas	-
Espessamento de concentrado	01	Espessador Ø = 20 m, com acionamento tipo ponte	6
Filtragem de concentrado	02	Filtro tipo prensa VPA, 54 placas de 1500 mm	60

7.2 Salobo

A planta de processamento de minério de cobre de Salobo está prevista para ser inaugurada no segundo semestre de 2011 e pertence à mineradora Vale.

O complexo de mineração de Salobo está localizado na região norte do país no estado do Pará a cerca de 80 km do complexo de mineração de ferro em Parauapebas.

Os minerais de cobre presentes são a bornita, calcocita, calcopirita e covelita. Silicatos e magnetita constituem a ganga.

A tabela VII.4 apresenta a composição química do minério que alimentará a planta de Salobo.

Tabela VII.4 – Composição química do minério de Salobo (Vale, 2008)

Elemento	%
Cu	1,02
Magnetita	6,3
S	0,33
Au (g/t)	0,50

As tabelas VII.5 e VII.6 apresentam, respectivamente, a característica mineralógica e composição química previstas para o concentrado de Salobo.

Tabela VII.5 – Composição mineralógica do concentrado de Salobo (Vale, 2008)

Mineral	%
Bornita	20
Calcocita	17
Calcopirita	15
Covelita	12
Molibdenita	<0,5
Grafita	3,5
Magnetita	4,8
Clorita	15
Biotita	1,8
Outros silicatos	10

Tabela VII.6 – Composição química do concentrado de Salobo (Vale, 2008)

Elemento	%
Cu	38,0
Fe	19,3
S	13,6
Au (g/t)	15,0

A planta de beneficiamento do Salobo terá capacidade de processamento de 12 milhões de toneladas por ano de minério de cobre. Considerando teor médio de 1,02 % em cobre da alimentação (ROM) e 38% de teor do concentrado para uma recuperação metalúrgica de 87% a planta será capaz de produzir até 280.000 t/ano de concentrado de minério de cobre. A recuperação em massa é da ordem de 2,1%.

A figura 7.2 apresenta o fluxograma simplificado da planta de beneficiamento de cobre de Salobo. O beneficiamento de minério sulfetado de cobre de Salobo utilizará prensa de rolos e britagem secundária em substituição ao moinho SAG e britador de pebbles (Vale, Projeto Salobo, 2008)

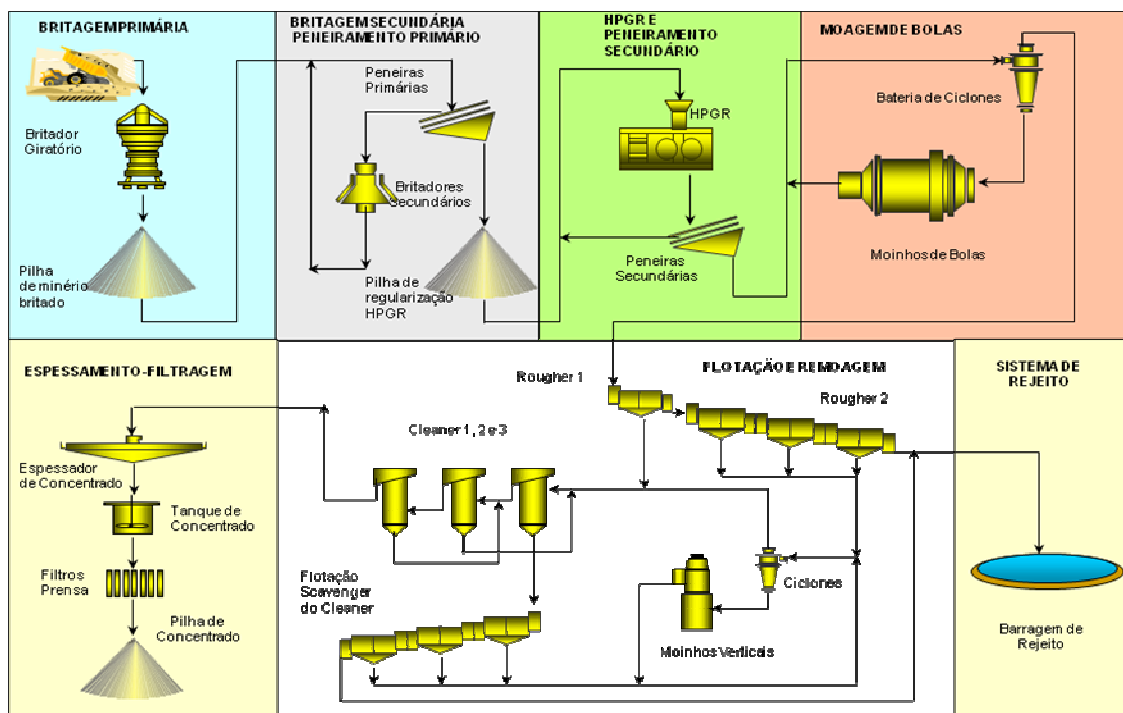


Figura 7.2 – Fluxograma esquemático da planta de beneficiamento de Salobo (Vale, Projeto Salobo, 2008).

A opção de Salobo foi utilizar britagem secundária seguida da prensa de rolos (como etapa de britagem terciária) à moagem SAG. No caso de Salobo, uma das razões por esta escolha se deve ao fato de que a magnetita presente na composição do minério poderá chegar até 20%. A presença de grande quantidade de magnetita traz dificuldades operacionais no caso da moagem SAG devido à necessidade de extrair bolas e pedaços de bolas da descarga do moinho SAG, antes de alimentar a britagem de pebbles. Neste caso a grande quantidade de magnetita também seria extraída o que iria trazer grande dificuldade operacional para separá-la da sucata e posteriormente para o seu retorno ao circuito. Outra razão pelo uso da prensa é a grande variabilidade do minério em relação

aos parâmetros de dureza. A moagem SAG é mais sensível a grandes variabilidades, afetando a capacidade e a estabilidade da operação.

A operação da mina e a etapa de britagem primária estão projetadas para trabalhar com um regime operacional de 6.570 h/ano. A britagem secundária e o peneiramento primário irão trabalhar 7.008 h/ano e o restante da planta, desde a retomada da pilha de regularização do HPGR até a filtragem, irá trabalhar cerca de 7.884 h/ano.

O minério proveniente da mina será transportado por caminhões de 240 t e descarregado na moega de alimentação da britagem. O produto da britagem primária (80% menor que 150 mm) será empilhado na pilha de minério britado.

A retomada da pilha irá alimentar a britagem secundária que trabalhará em circuito fechado com peneiramento com corte em 55 mm. O produto do circuito de britagem será empilhado na pilha de alimentação do HPGR (prensa de rolos). O material será retomado e alimentará a prensa de rolos que irá trabalhar em circuito fechado com o peneiramento a úmido com corte em 8 mm.

O passante das peneiras seguirá para alimentar a classificação da moagem. O underflow dos ciclones de classificação irá alimentar a moagem de bolas. O overflow, material com 80% menor que 0,105 mm segue para a etapa de flotação.

A flotação será constituída por 04 etapas de concentração, sendo rougher 1, rougher 2 e scavenger do cleaner a partir de células tipo tanque e cleaner (1, 2 e 3) a serem desenvolvidas em colunas. Para promover a liberação adicional dos minerais de cobre o concentrado rougher e o concentrado scavenger do cleaner serão processados na remoagem e posteriormente alimentarão a etapa cleaner.

Os rejeitos rougher e scavenger do cleaner constituirão o rejeito final com 0,14% de cobre e seguem por gravidade para a barragem de rejeitos.

O concentrado cleaner é o concentrado final e segue para o espessamento e filtragem.

A tabela VII.7 apresenta a lista dos principais equipamentos de processo da planta de Salobo.

Tabela VII.7 – Lista dos principais equipamentos de processo da planta do Salobo (Vale, adaptado, 2008)

Etapa	Quantidade	Características	Potência (kW)
Britagem Primária	01	Britador primário, 60" x 89", APA = 178 mm	600
Britagem secundária	02	Britadores de cone MP 1000, APA = 38 mm	700
Peneiramento Primário	02	Peneira vibratória inclinada 12 ft x 24 ft corte de 55 mm	50
Etapa de cominuição com prensa de rolos	02	Ø rolo = 2 m, comprimento = 1,5 m	3500
Peneiramento secundário	04	Peneira vibratória inclinada 12 ft x 24 ft corte de 8 mm, a úmido	50
Moagem de bolas	02	Moinho de bolas Ø = 26 ft (7,9 m) x , L = 40 ft (12,2 m)	17.000
Classificação da moagem	02	Bateria com 10 hidrociclones de 26 polegadas	-
Flotação rougher 1	02	Banco com 01 célula tipo tanque de 200 m ³	220
Flotação rougher 2	02	Banco com 06 células tipo tanque de 200 m ³	6 x 220
Flotação scavenger-cleaner	02	Banco com 05 células tipo tanque de 200 m ³	5 x 220
Flotação cleaner 1	08	Coluna de flotação com Ø = 6 m e altura = 14 m	-
Flotação cleaner 2	04	Coluna de flotação com Ø = 4,3 m e altura = 14 m	-
Flotação cleaner 3	02	Coluna de flotação com Ø = 4,3 m e altura = 14 m	-
Remoagem	04	Moinho vertical VTM-1500	1100
Classificação da remoagem	04	Bateria com 16 hidrociclones de 10 polegadas	-
Espessamento de concentrado	01	Espessador Ø = 15 m, com acionamento tipo ponte	6
Filtragem de concentrado	02	Filtro tipo prensa VPA	60

8. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi alcançado oferecendo um panorama geral sobre a cadeia produtiva do cobre, sua importância, utilização, reservas, produção e comercialização. O beneficiamento de minérios e a metalurgia extrativa também foram retratados, bem como a reciclagem do metal.

Nota-se deste trabalho que o cobre hoje é o terceiro metal mais utilizado no mundo e provavelmente com o grande crescimento econômico que se observa em países como a China, principalmente, essa posição de destaque deve se manter ainda por muitos anos.

Outro ponto de destaque, diz respeito a reciclagem do cobre produzido no mundo, verifica-se que há uma tendência mundial de se aumentar a porcentagem de cobre reciclado, pois ambientalmente é mais vantajoso e também economicamente, pois a produção do cobre reciclado é mais barata que a produção do cobre primário obtido através da extração mineral.

Em termos do processamento mineral verifica-se que a flotação é e continuará sendo o método de concentração mais utilizado para obtenção do cobre proveniente de minérios sulfetados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, J. E. – Foto Mina Subterrânea Estefanía, 2004 – www.flickr.com/photos/judehsamir/4198962902 (acessado em 23/02/2011, 15:42 h).

BARRATT, D.J. Semi-autogenous Grinding – **A comparison with the conventional route**. CIM Bulletin, 11:74.

BNDS – Banco Nacional de Desenvolvimento (Brasil), **Industria do Cobre**, 1997.

BRANDÃO, P.R.G. Agregação e Dispersão, Apresentação de Aula, **Reagentes usados em agregação e dispersão**, 2010.

BULATOVIC, S.M. – **Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice Flotation of Sulfides Ores**, Elsevier, Ontario, 2007, 446p.

BUTTS, A. **Copper, The Science and Technology of the Metal, Its Alloys and Compounds**, Reinhold Publishing Corp, New York, NY, 1954.

CHAVES, A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minério**, Volume 2, Signus Editora, 2004, 199p.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION – www.copper.org (acessado em 27/03/2011, 12:30 h)

DANA, J. **Manual de Mineralogia**, 1969, Editora Universidade de São Paulo, Volumes I e II, 642p.

DAVENPORT, W.G. **Extractive Metallurgy of Copper**, 4th ed., 2002, Oxford, GB, 432p.

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (Brasil) **Cobre**, 2009, www.dnpm.gov.br (acessado em 09/01/2011, 16:35 h).

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (Brasil) **Cobre, Balanço Mineral Brasileiro 2001**, www.dnpm.gov.br (acessado em 09/01/2011, 16:55 h).

ESACADEMIC - Foto da Mina de Chuquicamata no Chile, exemplo de operação de lavra a céu aberto. www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/261656 (acessado em 25/03/2011, 20:30 h).

FLSMIDTH, **Wenco Smart Cell Flotation**, catalog, 2008.

FUERSTENAU, M.C. Principles of mineral processing, SME, Colorado, 573p.

ICSG - International Copper Study Group – **The World Copper Factbook 2010**, Lisbon, 2010.

METSO, **Manual de Britagem**, 6ª Edição, 2005.

METSO, **Nordberg Superior Gyratory Crushers**, catalog, 2002.

METSO, Vertical Plate Pressure Filter, VPA, catalog, 2004.

MORLEY, C. – **HPGR – FAQ**, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, march, 2010.

OUTOTEC, **Flotation Technologies**, catalog, 2008.

PAPINI, R.M. **Apostila do Curso Flotação de Sulfetos**, 2010.

POLYSIUS, Polycom, **High-pressure grinding roll for the minerals industry**, catalog, 2008.

ROSA, M.N. **Flotação de Cobre no Sossego (CVRD)**. In: CHAVES, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Volume 4, Flotação, O Estado da Arte no Brasil, 1ª Ed, São Paulo, Signus Editora, 2006, 177-186p.

SASAKI, K. **Circulation of non-ferrous metals in Japan**, 1999.

SKINER, B.J. **Recursos Minerais da Terra**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1980, Título original de 1969, 140p.

SME – **Mining Reference handbook**, Edited by Raymond L. Lowrie, 2002, 448p.

THE BRITISH MUSEUM – www.britishmuseum.org (acessado em 22/02/2011, 20:55 h).

USGS – United States Geological Survey, Historical Statistics for mineral commodities – Copper – <http://minerals.usgs.gov> (acessado em 2/12/2010, 20:04 h).

VALE, **Manual do Processo Produtivo de Cobre**, 2006.

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

VALE, **Projeto Sossego**, Relatório do Projeto, 2004.

WILLS, B.A. **Mineral Processing Technology**, Sixth Edition, Butterworth-Heinemann, Burlington, 1997, 486p.