



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

ALEX SANDRO DE SOUZA RODRIGUES

**MONTAGEM DE MINI PLANTAS PARA LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS PARA  
LEVANTAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO**

MARABÁ – PA  
2011

ALEX SANDRO DE SOUZA RODRIGUES

**MONTAGEM DE MINI PLANTAS PARA LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS PARA  
LEVANTAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado para obtenção de conceito no  
curso de graduação em Engenharia de  
Minas.

**Orientador:** Prof. Dr. Reginaldo Saboide  
Paiva

MARABÁ – PA  
2011

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Rodrigues, Alex Sandro de Souza

Montagem de mini plantas para lixiviação em colunas para levantamento para otimização / Alex Sandro de Souza Rodrigues ; orientador, Reginaldo Sabóia de Paiva. — 2011

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2011.

1. Cobre - Minas e mineração. 2. Cobre - História. 3. Resíduos industriais - Lixiviação. 4. Minas e recursos minerais. I. Paiva, Reginaldo Sabóia de, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 669.3

---

Alex Sandro de Souza Rodrigues

**MONTAGEM DE MINI PLANTAS PARA LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS PARA  
LEVANTAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Pará, no Campus Universitário de Marabá-PA, em cumprimento as exigências para obtenção de Grau em Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Data de aprovação \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

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

Banca examinadora:

---

Prof.: Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará  
(Orientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Roseane de Lima Silva  
Universidade Federal do Pará  
(Membro)

---

Prof.<sup>a</sup> Karina Felícia Fischer Lima  
Universidade Federal do Pará  
(Membro)

MARABÁ – PA  
2011

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao meu pai Eliezer Pereira Rodrigues (*in memoriam*), a minha mãe Elaine Saturnino de Souza e a minha avó Alzira Rodrigues da Silva (*in memoriam*) por representarem meus referenciais de, honra, amor, caráter e determinação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente a Deus por ter me ajudado a concluir mais uma difícil e importante etapa da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva, pelo suporte e profissionalismo dado durante a elaboração desse trabalho.

A todos os amigos e amigas que fiz ao longo do curso.

Aos professores pelo apoio em momentos difíceis e pelo conhecimento transmitido.

À minha família, minha esposa, meus amigos e todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente na minha vida.

## **RESUMO**

O presente trabalho aborda o histórico do cobre, informações gerais sobre o metal e seus diversos minerais. Informações sobre reserva mundial, nacional e regional, demanda do metal, principais jazidas, método de extração do metal, bastantes praticados, além da hidrometalurgia. Mostra a metodologia a ser aplicada para trabalhar o levantamento de parâmetros ótimos que servirão de base para serem aplicados na lixiviação em pilhas de minérios, através de Mini Plantas em colunas para levantamento para otimização.

**Palavras-chave:** Lixiviação em pilha, Mini plantas de Colunas – Cobre.

## **ABSTRACT**

The present work discusses the history of copper, general information on the metal and its various mineral. Information on world reserves, national and regional, demand for the metal core deposits, a method of extracting the metal, very practical and apart from hydrometallurgy. Shows the methodology to be applied to work for the survey parameters great as a basis to be applied to the heap leach ore, Mini Plants by lifting columns for optimization.

**Key-word:** Heap leaching, Mini Plants column – Copper

## SUMÁRIO

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1. COBRE.....	13
1.1 Características Principais.....	13
1.2 Utilização .....	14
1.3 Propriedades .....	14
1.4 Principais depósitos .....	16
1.5 Depósito do Cobre no Pará.....	17
1.6 Província Mineral de Carajás.....	18
1.6.1 <b>Salobo</b> .....	20
1.6.2 <b>Alemão</b> .....	20
1.6.3 <b>Sossego</b> .....	20
2. METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE.....	21
2.1 Concentração de minério de cobre .....	21
3. HIDROMETALURGIA.....	22
4. LIXIVIAÇÃO.....	23
4.1 TIPOS DE LIXIVIAÇÃO.....	24
4.1.1 <i>lixiviação in situ</i> .....	25
4.1.2 <i>lixiviação em tanques agitados</i> .....	26
4.1.3 <i>lixiviação concentrados</i> .....	27
4.1.4 <i>lixiviação em tanques estáticos</i> .....	28
4.1.5 <i>lixiviação em Depósitos</i> .....	29
4.1.6 <i>lixiviação em pilhas</i> .....	29
4.2 LIXIVIAÇÃO DE MINÉRIO OXIDADO DE COBRE .....	31
4.2.1 <i>Química da lixiviação em pilha</i> .....	32
4.2.2 <i>Fatores que influenciam a dissolução dos minérios oxidado de cobre</i> .....	32

4.3. VARIÁVEIS E PARÂMETROS DE PROCESSO.....	34
4.3.1. Aglomeração e cura acida .....	35
4.3.2. Permeabilidade da pilha .....	35
4.3.3. Altura da pilha .....	36
4.3.4. Vazão de irrigação da solução lixiviante e modo de aplicação.....	36
4.3.5. Aeração da pilha.....	37
5. MONTAGEM DE MINICOLUNAS EM CIRCUITO FECHADO.....	37
6. MÓDULO DE ESTRUTURA DE LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS .....	38
6.1 Simulação do processo de Lixiviação em Colunas .....	41
6.2 Proposta de um modelo de cinético - Processo contínuo em leito fixo em colunas .	43
7. CONCLUSÃO.....	46
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## **LISTRA DE ILUSTRAÇÕES**

TAB. 1- Principais minérios de cobre .....	16
FIG. 1 – Foto cobre nativo – foto de SUE FULLER .....	13
FIG. 2 – Localização geográfica da Província Mineral de Carajás .....	18
FIG. 3 – Localização dos principais depósitos na Província de Carajás .....	19
FIG. 4– Fluxograma do processo de Hidrometalurgia.....	23
FIG. 5 – Fluxograma do processo lixiviante .....	29
FIG. 6 – Fotos do Sistema de colunas em 3 estágios.....	38
FIG. 7 – Fotos da plataforma de trabalho para apoio a coluna.....	39
FIG. 8 – Fotos da coluna modular, com módulos de 40 cm.....	41
FIG. 9 - Simulação da Pilha em área Plana .....	41

## INTRODUÇÃO

O cobre (Cu) é um dos poucos metais que podem ser encontrados em sua forma nativa na natureza. Segundo DAVENPORT et al. (2004), o cobre é mais comumente encontrado na crosta terrestre na forma de sulfeto juntamente com ferro (Fe) e enxofre (S), como exemplo temos a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) e calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). A concentração destes minerais em jazidas de cobre é bastante baixa, com teores por volta de 0,5% para minas a céu aberto e 1 a 2% para minas subterrâneas. Atualmente o cobre metálico puro é produzido destes minérios em sua grande maioria através da rota pirometalúrgica, com uma prévia concentração, geralmente por flotação, fundição do concentrado e posterior refino a fogo. Cerca de 80% do cobre proveniente de minério (não reciclado), é produzido por flotação, Fundição e eletrorefino. O cobre também pode ocorrer, em menores proporções, na forma de minerais oxidados (Carbonatos, Óxidos, Hidroxi-Silicatos), como exemplo tem-se a cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) e crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Nestes casos, o cobre metálico é geralmente produzido através da rota hidrometalúrgica de processamento, que envolve um conjunto de operações unitárias em série, compreendendo: lixiviação, extração por solvente e eletrorecuperação. O método de lixiviação de minérios oxidados mais comum é a lixiviação em pilhas que produz um licor de cobre impuro. Na extração por solvente, o cobre dissolvido no licor impuro proveniente da lixiviação é transferido para um eletrólito rico em cobre. A eletrorecuperação consiste da recuperação do cobre que encontrar-se dissolvido no eletrólito, originando o cátodo de Cu com pureza de 99,99% de Cu. Cerca de 20% do cobre proveniente de minério (não reciclado), é produzido por processamento hidrometalúrgico

Devido ao grande avanço na indústria de mineração nas últimas décadas, principalmente voltado para extração de minerais metálicos não ferrosos, é de extrema importância o investimento para desenvolvimento de tecnologias apropriadas para concentração e obtenção de metais.

O presente tem como objetivo de desenvolver tecnologias para levantamento de parâmetros ótimos para a lixiviação em colunas e estudar a utilização destas técnicas, aplicadas à lixiviação em pilhas a céu aberto.

## 1. COBRE

O cobre é um dos metais mais antigos usados pela humanidade. Como era encontrado em sua forma nativa, era empregado diretamente pelas antigas civilizações na fabricação de utensílios, armas e jóias (ornamentos). Há conhecimento da utilização do metal desde a Idade da Pedra, já que foram encontrados vários artefatos datados dessa época feitos de cobre.

### 1.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O cobre é um metal de transição avermelhado, que apresenta alta condutibilidade elétrica e térmica, só superada pela da prata. O cobre é o metal mais antigo a ser utilizado, pois se têm encontrado objetos de cobre de 8700 a.C. Pode ser encontrado em diversos minerais, encontrado nativo (figura 1), e na forma metálica.



Figura 1 – cobre nativo – Foto de SUE FULLER, 1995 ( fonte: <http://Wikipedia.org/wiki> -internet)

Na maioria de seus compostos apresenta estados de oxidação baixos, sendo o mais comum o +2, ainda que existam alguns com estado de oxidação +1. Exposto ao ar, a coloração vermelho salmão inicial torna-se vermelho violeta devido à formação do óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) para enegrecer-se posteriormente devido à formação do óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ).

Exposto longamente ao ar úmido forma uma capa aderente e impermeável de carbonato básico de coloração verde, característica de seus sais, que é venenosa.

Os halogênios atacam com facilidade o cobre, especialmente em presença de umidade; no seco o cloro e o bromo não produzem efeito e o flúor só o ataca a temperaturas superiores a 500 °C. Os oxiácidos atacam o cobre.

## 1.2 UTILIZAÇÃO

O cobre era principalmente utilizado na fabricação de jóias, utensílios, ferramentas e armas. É um excelente condutor de eletricidade e calor, é resistente a corrosão. Por ser dúctil, é facilmente transformado em fios, tubos e chapas, etc. Além de formar ligas com outros metais com certa facilidade, a condutividade elétrica, a resistência à corrosão e a condução térmica são suas propriedades mais exploradas.

## 1.3 PROPRIEDADES

Como o ouro e a prata, o cobre apresenta como características a maleabilidade e ductilidade. É resistente à corrosão e além de alta condutividade térmica, é também um excelente condutor elétrico (perdendo apenas para a prata), fácil de ser moldado e de receber solda.

Possui a capacidade de formar ligas facilmente com outros metais obtendo propriedades especiais. O bronze é uma liga formada entre o cobre e o estanho (as referências mais antigas sobre o bronze relatam que havia ocorrência natural desta liga, em depósitos que também continham estanho). O latão é uma liga formada entre o cobre e o zinco, que é muito usada em aplicações marinhas devido a sua resistência à corrosão. Principalmente se forem avaliadas estas propriedades de forma combinada, o cobre é um material de difícil substituição. Na tabela periódica, está no grupo dos metais de transição, com alta eletroafinidade e exibe mudanças no estado de oxidação com a tendência de formar complexos. Pode ocorrer com valências de 1 a 4, mas nas condições atmosféricas é usualmente bivalente. O cobre é resistente tanto a ácidos quanto a bases não oxidantes, exceto

as soluções amoniacais. Quando exposto à atmosfera produz gradualmente uma pátina verde que consiste de sulfatos básicos, carbonatos e cloretos, protegendo-o contra corrosão.

Geralmente não é atacado pela água depois que esta cobertura é formada. Por outro lado, dissolvem-se em presença de ácidos oxidantes, soluções complexantes e substâncias contendo sulfato. É também indispensável ao organismo humano, pois participa de numerosas enzimas que atuam no transporte do ferro, na síntese de elastina e colágeno, na síntese da melanina e na eliminação de radicais superóxidos. Foi recentemente identificado como elemento essencial para aumentar o nível das respostas imunológicas, a resistência ao estresse e às doenças de caráter crônico e/ou degenerativas.

- Massa atômica: 63,54
- Densidade: 8,93 g/cm<sup>3</sup>
- Ponto de fusão: 1.083°C
- Ponto de ebulição: 2.580°C
- Condutividade térmica (0° C): 3,98W/cmK
- Condutividade elétrica (20° C): 59,5Sm/mm<sup>2</sup>

#### 1.4 PRINCIPAIS DEPÓSITOS

A formação dos depósitos de cobre pode ocorrer tanto por segregação magmática, como por deposição hidrotermal, substituição metassomática, sedimentação e oxidação superficial com enriquecimento supergênico. Segundo ABREU (1973), os depósitos de cobre podem ser encontrados sob condições geológicas variadas, podendo ser associadas a rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Distinguem-se dois tipos principais de jazidas de cobre, que são os filões e os depósitos disseminados. No primeiro caso, as jazidas são geralmente de teores mais elevados e de pequenas dimensões, enquanto que as segundas constituem grandes massas de teor baixo. Grande parte destas últimas é representada pelo cobre porfirítico.

Os depósitos de maior importância econômica são os porfiríticos, que se caracterizam pela disseminação de sulfetos de cobre em intrusões ígneas, as quais são frequentemente associadas com substituições e veios mineralizados.

O segundo grupo em importância se refere aos depósitos sedimentares, que se caracterizam pela presença de arenitos e carbonatos. Neste caso, o cobre normalmente está associado com cobalto, prata ou outros elementos.

Os depósitos de cobre em complexos intrusivos básicos e ultra-básicos ocorrem em camadas de sulfetos de cobre-níquel, disseminados ou não. Além de cobre e níquel, é usual que os minérios deste tipo de depósito conttenham platina, cobalto, ouro e prata. A ocorrência de cobre em complexos carbonatíticos é rara, e neste caso, além do cobre há presença de minerais industriais.

Cerca de metade das reservas mundiais de cobre são depósitos porfiríticos, enquanto os depósitos sedimentares correspondem a um terço. Os principais minérios de cobre encontrados na natureza (Tabela 01), além de ocorrer em sua forma nativa, é encontrado numa grande variedade de minerais oxidados e sulfetados.

<b>Imagem</b>	<b>Minério</b>	<b>Fórmula</b>
	Cu nativo	Cu
	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
	Cuprita	Cu <sub>2</sub> O

	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
	Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Tenatita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$

Tabela 01: Principais minérios de cobre fonte: Wikipédia.org/Wiki – acesso em 12/04/2011

### 1.5 DEPÓSITOS DO COBRE NO PARÁ

Segundo HUNH et al. as reservas nacionais são localizadas principalmente nos estados do Pará (71%), Bahia (13%) e Goiás (12%). Dentre essas, destacam-se aquelas localizadas na região de Carajás, Estado do Pará.

O potencial para cobre desta região é muito grande e normalmente o minério contém ouro associado.

Vários projetos estão sendo realizados, onde destacam-se: Salobo, Alemão, Sossego, Cristalino e Alvo 118.

O Projeto Sossego compreende três áreas com características distintas. Dos projetos supracitados, é o único que atualmente está sendo lavrado, e o Salobo, em Marabá, Pará, está em plena fase de implantação.

A mineradora VALE detém uma expectativa de reserva (reserva estimada) de 14 milhões de toneladas de cobre na região de Carajás.

## 1.6 PROVINCIA MINERAL DE CARAJÁS

A Província Mineral de Carajás, situada na porção sudeste do Cráton Amazônico, compreende a área limitada a leste pelos rios Araguaia – Tocantins, a oeste pelo rio Xingu, a norte pela serra do Bacajá, e, a sul, pela serra dos Gradaús (HUNH et al.).

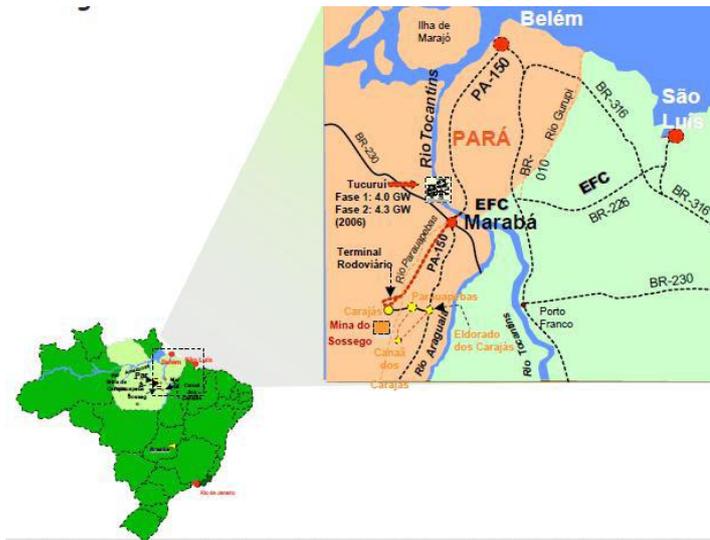


Figura 2 - Localização geográfica da Província Mineral de Carajás (Fonte: Projeto Grande Carajás).

A Bacia de Carajás compreende três unidades principais englobadas no Supergrupo Itacaiúnas.

- Grupo Igarapé Pojuca: unidade basal constituída por rochas vulcânicas bimodais, que hospeda os depósitos de metais base do Salobo (Cu-Au-Mo) e Pojuca (Cu-Zn);
- Grupo Grão Pará: unidade intermediária, composta por formações ferríferas bandadas, que hospedam os depósitos de ferro;
- Grupo Igarapé Bahia: unidade superior, formada por rochas sedimentares, vulcano-clásticas, vulcânicas-básicas e formações ferríferas subordinadas, que hospedam os depósitos de Manganês do Azul, de Au-PGM (Elementos do grupo da platina) de Serra Pelada, de Cu, Cu-Fe, Cu-Au-Mo-Ag, incluindo Igarapé Bahia e Alemão.

A bacia evoluiu sobre terrenos do tipo granito-greenstone (Supergrupo Andorinhas) e terrenos de elevado grau de metamorfismo.

As características dos depósitos cupríferos de Carajás têm sido alvo constante de estudos e avaliações. Huhn levantou a possibilidade de as mineralizações de Cu e Au da Província Mineral de Carajás pertencerem à classe de depósitos caracterizados pela presença da associação Cu-Au-U-ETR (Terras Raras), hospedados em rochas ricas em óxidos de ferro.

A partir desta hipótese foi feita uma associação entre os contextos geológico e geofísicos da área de Igarapé Bahia, antiga mina de ouro da mineradora VALE e potencial depósito de cobre, e proposto um modelo geológico-geofísico que vem sendo aplicado nas pesquisas da região. Através deste modelo foi descoberto o depósito Alemão e, mais recentemente, Cristalino.

Vem sendo verificada uma grande similaridade entre os depósitos cupríferoauríferos da região de Carajás, como por exemplo, entre Salobo, Alemão e Sossego, sendo também similares aos depósitos de Candelária (Chile) e Ernest Henry (Austrália).

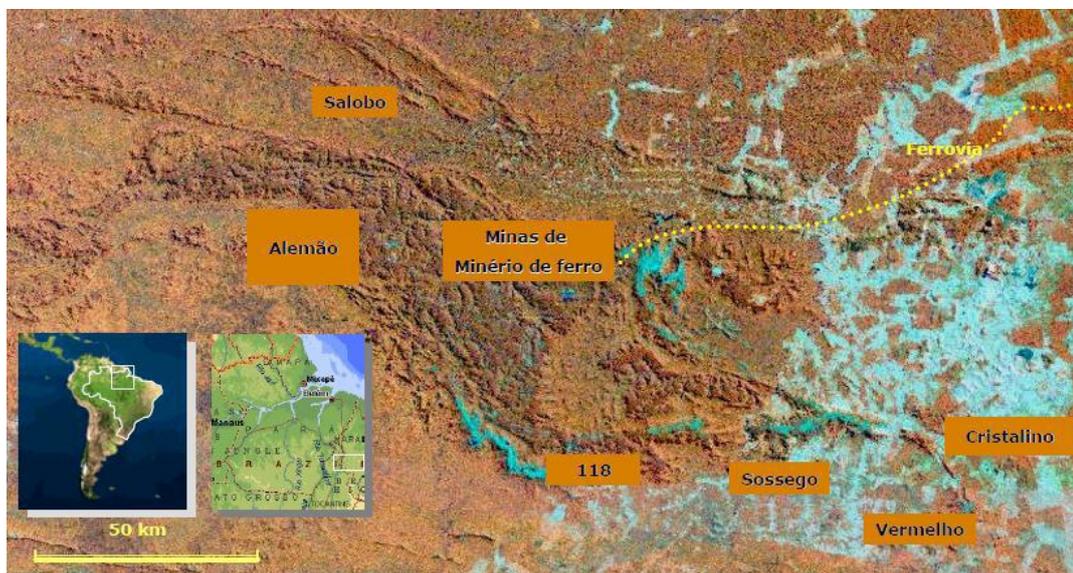


Figura 03 - Localização dos principais depósitos na Província Mineral de Carajás (Fonte: Projeto Grande Carajás).

### 1.6.1 Salobo

A jazida do Salobo está associada a uma faixa de rochas vulcano-sedimentares com formações ferríferas associadas, encaixadas em gnaisses e rochas quartzofeldspáticas, metamorfizadas em fácies anfíbolito. Esse depósito mostra-se fortemente deformado e apresenta grau metamórfico de médio a alto. Encontra-se em contato com o Complexo Xingu e com o Grupo Igarapé Pojuca,

### 1.6.2 Alemão

O conjunto de rochas que ocorre associado ao minério do Corpo Alemão faz parte de uma seqüência vulcano-sedimentar, intrudida por diques de composição intermediária a básica, metamorfizadas em fácies xisto verde, intensamente afetada por alteração hidrotermal. As brechas hidrotermais mineralizadas do Corpo Alemão foram classificadas em dois tipos, de acordo com a maior ou menor presença de magnetita associada aos sulfetos. O minério magnetítico é constituído por magnetita, clorita, siderita, calcita, quartzo e calcopirita. O minério clorítico apresenta quartzo, clorita, pouca magnetita, carbonatos e sulfetos, com predomínio de calcopirita e ocorrência de bornita e pirita.

### 1.6.3 Sossego

A faixa mineralizada pode ser dividida em três áreas, com características distintas: Sequeirinho, Baiano e Morro do Sossego. Na área Sequeirinho, a mineralogia indica a presença de magnetita, calcopirita, cristais de apatita, actinolita, leucogranito, cristais de feldspato potássico. Em alguns pontos o percentual de calcopirita atinge localmente 10%, apresentando uma média entre 3 e 4%. O teor médio é 1,47% de Cu e 0,35ppm de Au. Há presença também de minério oxidado com teores médios de 1,32% de Cu e 0,08ppm de Au. Situada entre o Sequeirinho e o Morro do Sossego, o minério da área Baiano é também

calcopirítico, apresentando teor médio de Cu da ordem de 0,5%. No Morro do Sossego, os resultados disponíveis revelam teores médios para os intervalos mineralizados de 1,36% de Cu e 0,50ppm de Au. O Morro do Sossego possui uma camada de 10 a 20m de espessura de zona oxidada, contendo malaquita, crisocola, neotocita e brochantita, atingindo teores de até 2% de Cu (HUNH et al.).

## 2. METALURGIA EXTRATIVA DO COBRE

O cobre encontra-se muito diluído da natureza, geralmente com teores entre 0,5 e 2%, inviabilizando economicamente uma fundição direta, já que fundir uma grande quantidade de ganga exigiria grande capacidade e energia dos fornos de fundição. Devido a este fato, os minerais destinados ao tratamento pirometalúrgico passam, anteriormente, por um processo de concentração física. O produto deste processo de concentração possui teores próximos a 30% de Cu. Concentração física se aplica a minérios sulfetados de cobre. Já os minérios destinados ao processamento de extração por hidrometalurgia tradicional, em pilhas, jamais é concentrado, o minério oxidado é submetido apenas a britagem, classificação e aglomeração dos finos, quando necessário (ROSENQVIST, 2004).

### 2.1. CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS DE COBRE

A concentração de minérios de cobre consiste basicamente em isolar o minério de cobre contido no ROM (RunOf Mine), em um concentrado de alto teor. Para tal, é necessário:

- Britar e moer o ROM, a uma granulometria em que o minério de cobre esteja liberado fisicamente dos minerais de ganga (liberação física dos minerais);
- Separação física do minério de cobre das partículas de ganga. O minério de cobre sairá do processo no concentrado e as partículas de ganga sairão como rejeito.

### 3. HIDROMETALURGIA

Em contraste com a pirometalurgia que tem cerca de 6.000 anos de história na produção de metais, a hidrometalurgia do cobre é relativamente recente.

O crescimento da aplicação de rotas hidrometalúrgicas no tratamento de minérios de cobre tem sido significativo a partir de 1970 e estima-se que, atualmente, cerca de 20% da produção mundial de cobre se processa via hidrometalurgia.

Em geral, as etapas dos processos hidrometalúrgicos são:

- Lixiviação (LX). Dissolução do cobre
- Extração por solvente (SX). Purificação e/ou concentração da solução;
- Eletrorecuperação (EW). Obtenção do produto final.

O interesse da lixiviação de minérios de cobre, associada aos processos de extração por solventes e eletrorecuperação se deve à possibilidade de se produzir cobre catodo de alta qualidade a baixos custos operacionais, à viabilidade de se extrair cobre de minérios de baixo teor e também por permitir tratar os minérios oxidados, os quais não são processados por flotação.

Além dessas considerações, ressalta-se igualmente a maior aceitabilidade ambiental em relação aos processos pirometalúrgicos.

As reservas mundiais de minério de alto teor estão sendo exauridas, o que é natural, pois os minérios de maiores teores apresentam maior lucro e retorno financeiro mais rápido.

Com a prevista escassez de minérios de alto teor, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de técnicas que viabilizem o processamento de minérios de baixo teor e com maior complexidade.

A hidrometalurgia é a opção que mais se adéqua à nova tendência de processamento de minerais de baixo teor, se mostrando uma alternativa ambientalmente mais atraente, e com os custos operacionais cada vez mais baixos, além de vir demonstrado crescente desenvolvimento técnico, mesmo sendo uma técnica relativamente recente, a hidrometalurgia surge como a rota de processamento (figura 4), mais promissora para o fornecimento futuro do cobre no mercado mundial (LEHNE, 1993).

Rotas dos Processo:

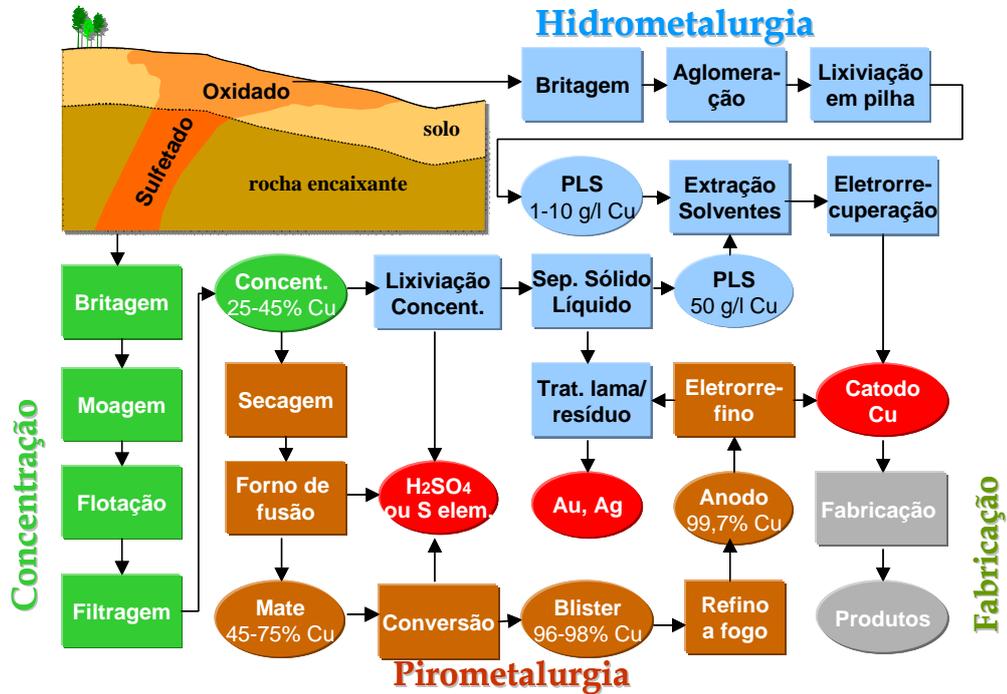


Figura 04: Fluxograma do processo de Hidrometalurgia

#### 4. LIXIVIAÇÃO

A extração de um constituinte solúvel de um sólido, mediante um solvente, chama-se, genericamente, lixiviação. Define como a operação de contato efetivo entre o minério a ser lixiviado e o solvente.

Os fatores que influenciam diretamente na velocidade de extração são principalmente:

- Dimensão da partícula;
- Tipo de solvente;
- Temperatura do processo;
- Agitação do fluido.

A lixiviação pode ser facilmente aplicada a alguns tipos de minérios oxidados e, através da ação bacteriana, a minérios sulfetados de enriquecimento secundário.

Os principais lixiviantes usados na solubilização de cobre incluem:

- Ácido sulfúrico: é o solvente mais amplamente utilizado, sendo aplicado a minérios oxidados;
- Amônia/Soluções de sais de amônio: aplicados a minérios oxidados de cobre, cobre nativo e concentrados;
- Cloretos: além do cloreto férrico e cúprico em soluções ácidas, está em estudo atualmente a utilização do composto  $\text{BrCl}_2$ .

A lixiviação aplicada a minérios de cobre pode ser em tanques agitados, tanques estáticos, pilhas e *in situ*. Através desses processos o cobre é recuperado a partir de sua solubilização em uma solução aquosa proveniente do tratamento de minérios, concentrados ou rejeitos.

Historicamente, o método pioneiro de lixiviação em pilhas foi observado nas minas de Rio Tinto, na Espanha, há cerca de 300 anos. A lixiviação em pilhas é uma opção tecnológica aplicada àqueles minérios oxidados e sulfetados que possuem um teor de cobre baixo de tal modo que não seja viável economicamente sua concentração e fusão, mas que em contrapartida tenham um valor econômico o suficiente para não serem descartados como rejeito (DAVENPORT et al.).

#### 4.1 TIPOS DE LIXIVIAÇÃO

A diferença conceitual que se faz entre *dump leach* e *heap leach*, praticamente se perdeu ao longo do tempo. O termo *dump leach* é normalmente empregado para a lixiviação de materiais de baixo teor, que são empilhados sem qualquer tipo de tratamento prévio, como o material que é estocado nos depósitos de estéril durante a lavra.

Na lixiviação em *dumps*, o tempo de lixiviação geralmente é muito longo, muitas vezes leva anos, isto se deve, em partes à heterogeneidade granulométrica do material empilhado, e a não aglomeração dos finos, o que prejudica a percolação da solução lixivante.

Por outro lado, *heap leach*, ou lixiviação em pilhas, é definida como a lixiviação de minério de teor relativamente alto e que tenha sido submetido a uma prévia preparação

(cominuição e aglomeração dos finos), a pilha é alocada de forma ordenada sobre uma área especialmente preparada.

Em se tratando do processo em si, tanto *heap leach* quanto *dump leach* envolvem a aplicação de uma solução lixiviante no topo da pilha e a recuperação da solução que percola até a base. Atualmente, o principal método de recuperação do metal na solução efluente é por extração por solventes.

De uma maneira geral, técnica semelhante é empregada na lixiviação *in situ*, onde a solução lixiviante é aplicada diretamente na jazida, ainda no subsolo, e posteriormente bombeada de volta.

Uma área que tem sido alvo de expressivos investimentos em desenvolvimento tecnológico é a de lixiviação de concentrados. O cenário atual da indústria do cobre, marcado pelos baixos preços atingidos pelo metal e por restrições ambientais cada vez maiores aos processos pirometalúrgicos tem alavancado esses estudos na busca de maior flexibilidade, menores investimentos e custos operacionais (DAVENPORT et al.).

#### **4.1.1 Lixiviação *in situ*;**

A lixiviação *in situ* é também conhecida como solução de mina. Por definição, o minério é lixiviado no local em que se encontra, sem ser lavrado.

Primeiramente, o minério é fraturado pela ação de explosivos para criar passagem para a solução lixiviante, e a solubilização do cobre é efetivada pela circulação alternada e intermitente de ar, água e da solução de processo (PLS) após extração do metal.

A solução lixiviada é drenada naturalmente e recolhida, por exemplo, em galerias construídas sob o corpo do minério. A eficiência do processo é difícil de ser avaliada em função do desconhecimento da quantidade e teor do minério antes e após a operação de lixiviação. Esta técnica se apresenta como uma boa alternativa para minérios de baixo teor que não teriam outra maneira economicamente viável de serem tratados.

Como principais dificuldades destacam-se: a formação de canais, que prejudicam a distribuição da solução sobre todo o minério, o transporte de finos e precipitação de sais que

com o tempo podem preencher os vazios, interferindo também no contato solução-minério.

Os pontos básicos necessários para que este sistema de lixiviação tenha sucesso são:

- Rocha encaixante não consumidora de ácido;
- Ausência de crepitação na rocha hospedeira;
- Rocha suficientemente fraturada para permitir acesso da solução aos minerais de cobre;
- Superfície impermeável sob e ao redor do depósito;
- Possibilidade de recirculação de soluções através do minério sem perdas excessivas ou contaminação da solução;
- Disponibilidade de água.

O processo de lixiviação *in situ* é classificado em três grupos:

- Minério localizado na superfície, acima do lençol freático;
- Depósitos localizados abaixo do lençol freático, mas acessível às técnicas de mineração convencionais;
- Depósitos localizados abaixo do nível do lençol freático e com uma profundidade tal que não seja possível a mineração pelos métodos convencionais.
- Para o primeiro e segundo tipos de depósitos há aplicação comercial. Já para o terceiro, não há ainda técnicas disponíveis para a operação *in situ*.

#### **4.1.2 Lixiviação em tanques agitados**

Em contraste com a lixiviação em tanques estáticos, este tipo de operação é apropriada para materiais finos, tais como rejeitos de flotação ou concentrados, para os quais o custo da moagem (redução de tamanho) já foi absorvido pela etapa de concentração. Comparando-se aos outros processos, possui menor tempo de lixiviação devido ao menor tamanho das partículas (maior área específica) e à turbulência no tanque que proporciona uma maior difusão entre o reagente e o minério.

### 4.1.3 Lixiviação de concentrados

Vários processos hidrometalúrgicos vêm sendo desenvolvidos para a extração de cobre de concentrados de minérios sulfetados, como alternativa aos processos pirometalúrgicos, que cada vez mais se confrontam com restrições ambientais e custos operacionais atingidos nos últimos anos. Nesses desenvolvimentos, o principal desafio tem sido a busca de alternativas para a solubilização da calcopirita que, além de ser o mineral de cobre mais abundante, responde pela maior parte dos concentrados de cobre produzidos. Concentrado este que atualmente é processado por métodos pirometalúrgicos.

Na última década, entre as alternativas tecnológicas pesquisadas, três linhas principais se destacam, com grandes chances de se tornarem viáveis economicamente a curto e médio prazo, que são: Lixiviação de concentrado sob pressão, Lixiviação por cloretos e Biolixiviação.

Para a biolixiviação de sulfetos de cobre a equação química é:  $\text{Cu}_2\text{S} + 2.5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{Cu}^{++} + 2\text{SO}_4^{--} + \text{H}_2\text{O}$  Os avanços alcançados se devem principalmente a: consolidação da lixiviação sob pressão em escala industrial para minérios de ouro, zinco e níquel laterítico; Descoberta de catalisadores para a lixiviação do cobre em autoclaves em meio sulfúrico, Visando acelerar a reação e controlar a formação de subprodutos; Grande evolução da biolixiviação para sulfetos; Maior domínio da química de cloretos; Desenvolvimento de materiais poliméricos, resinas de fibra de vidro e ligas de titânio de grande resistência à corrosão.

A rota de processo que atualmente mais está sendo testada é a lixiviação sob pressão, que pode ser considerada como a mais promissora em termos de tratamento hidrometalúrgico de concentrados. Três condições básicas estão sendo desenvolvidas, todas elas relacionadas à temperatura de operação, que por sua vez depende da mineralogia dos sulfetos presentes no minério: Baixa temperatura: até 120°C; Média temperatura: 150 a 170°C; Alta temperatura: acima de 200°C.

A biolixiviação de concentrados de cobre teve sua origem a partir dos conhecimentos adquiridos nos processos de bio-oxidação de minérios refratários de ouro e de minérios de

cobre em pilhas. As rotas em desenvolvimento também buscam condições de temperatura mais rigorosas e para isso busca-se o desenvolvimento de microorganismos mais resistentes.

As principais condições avaliadas são: Média temperatura: 45 a 50°C: Bactérias termofílicas moderadas; Alta temperatura: acima de 70°C: Bactérias termofílicas extremas.

Apesar da cinética relativamente lenta quando comparada com a lixiviação sob pressão (3 a 5 dias contra 1 a 3h), a biolixiviação de concentrados é um processo de grande potencial, principalmente dependendo do porte do empreendimento, já que os níveis de investimentos são bem menores.

A lixiviação por cloretos é um processo em desenvolvimento pelo Intec (Austrália) e tem se apresentado como o mais inovador para o processamento hidrometalúrgico de concentrados de cobre contendo ouro.

O princípio básico é a lixiviação de cobre e ouro pelo composto  $\text{BrCl}_2$  - (Halex), que é gerado na célula de eletrólise.

O principal atrativo desse processo é o baixo consumo energético na eletrorrecuperação.

#### **4.1.4 Lixiviação em tanques estáticos**

Neste processo, o minério é britado a uma granulometria fina, em geral com granulometria entre 6 e 13mm. O material é carregado em tanques, onde a solução lixiviante é administrada em fluxo ascendente.

Geralmente tem-se um circuito com vários tanques, operando em contra-corrente.

Um exemplo clássico da aplicação dessa rota é a Usina de Mantos Blancos (Chile), que trata um minério cuja principal fonte de cobre é antlerita.

O circuito consiste de 10 tanques, sendo 8 operando continuamente, um sendo descarregado e outro carregado.

As dimensões dos tanques são de 20m x 20m x 7,3m, correspondendo a uma capacidade unitária de 4.000 toneladas aproximadamente por ciclo.

O tempo de lixiviação nesse processo é de 60h por tanque, sendo que se considerando o ciclo completo, ou seja, carga/lixiviação/lavagem/descarga, tem-se um período de 100 horas.

#### 4.1.5 Lixiviação em Depósitos (Dump Leach).

Esta técnica é empregada em depósitos porfiríticos, processando os minérios oxidados e sulfetados existentes no material marginal, que não possui teor suficiente para alimentar as usinas de concentração.

Existem algumas variações relacionadas a este processo. Nas usinas mais antigas, verifica-se que o material de baixo teor foi sendo depositado em grandes pilhas, sem que fosse considerado um tratamento posterior. Essas pilhas se caracterizam por apresentarem grandes alturas, 100m ou mais, com períodos de lixiviação que podem durar de 10 a 50 anos.

Nas operações onde já se prevê o tratamento de material de baixo teor, o material retirado da mina é colocado sobre uma área devidamente preparada, formando elevações que variam de 5 a 9m. Depois que o ciclo de lixiviação de uma formação é completado uma nova elevação é construída sobre o material.

#### 4.1.6 Lixiviação em pilhas (Heap leach).

No processo de lixiviação em pilhas (figura5) o minério passa pela etapa de preparação antes de ser empilhado. Geralmente a preparação consiste de etapas de britagem e aglomeração dos finos. Após a preparação o minério é disposto em pilhas sobre uma área especialmente preparada para a lixiviação.

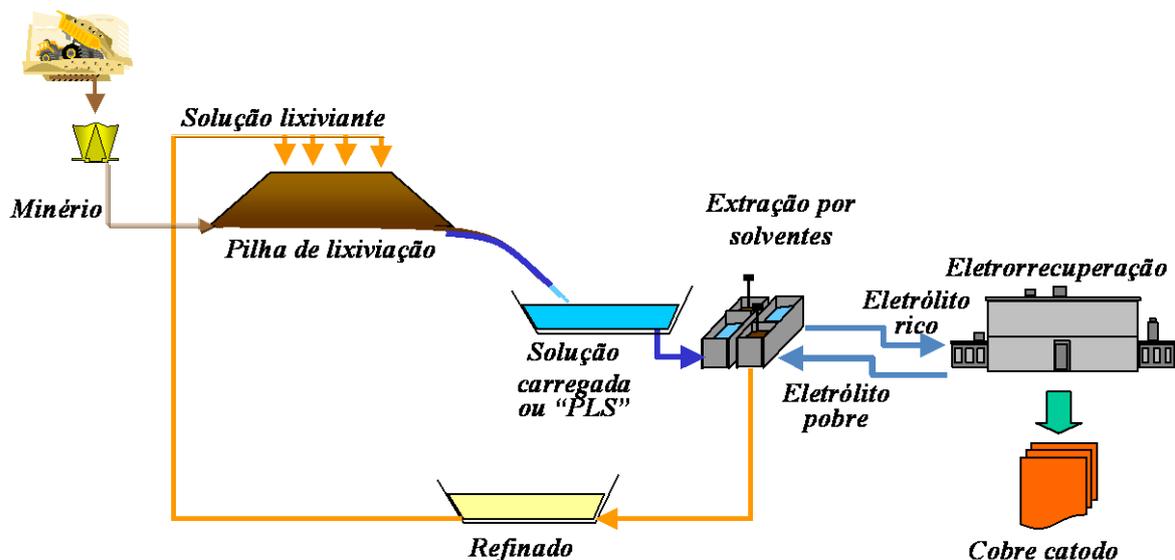


Figura 14: Fluxograma do Processo de lixiviação

A altura das pilhas no *heap leach* varia geralmente entre 3 e 10m, sendo que alguns projetos recentes têm empregado alturas menores, de 2,5 a 6m. Dentro desses desenvolvimentos encontra-se também a técnica do *Thin Layer Heap Leach*, que se caracteriza pelas pilhas de 1,5 m de altura, proporcionando um processo mais rápido e de mais fácil controle.

Na lixiviação em pilhas, o minério é irrigado, geralmente com uma solução sulfúrica diluída ( $H_2SO_4.H_2O$ ), e, dependendo do tipo de minério a ser tratado, o cobre é solubilizado por mecanismos diretos (diluição normal, sem necessidade de acrescentar algo, além do agente lixiviante) e/ou indiretos (quando há a necessidade de se acrescentar algum agente externo como bactérias, oxigênio, etc.).

Para os minérios sulfetados secundários, o processo pode ser assistido por bactérias, nos últimos cinco anos houve uma grande proliferação de operações utilizando a biolixiviação em pilhas, em função da boa eficiência para minérios sulfetados e proto-oxidados.

Os principais micro-organismos envolvidos na biolixiviação em pilhas (lixiviação em pilhas com auxílio de bactérias) são os *Thiobacillusferrooxidans*, *Leptospirillumferrooxidans* e *Thiobacillusthiooxidans*, que são bactérias oxidantes de ferro e enxofre, acelerando a oxidação do cobre até então sulfetado.

Além destas, no interior de uma pilha outras espécies de bactérias podem se desenvolver naturalmente, principalmente em locais com temperatura mais elevada (35-40 °C), tais como as *Sulfobacillus* (termofílicas moderadas).

Dependendo do teor do minério, da mineralogia e das condições de lixiviação, o processo pode durar de meses a anos. O cobre é recuperado da solução rica (PLS - *pregnantleachsolution*) por extração, concentração e purificação através dos processos de extração por solvente e eletrorecuperação.

Este é um fator crítico ao sucesso da lixiviação em pilhas, já que se não houver permeabilidade no leito de minério não haverá percolação, dissolução e extração do metal desejado. Nos processos de lixiviação em dumps, a permeabilidade é determinada basicamente pelas características do minério, pelo tamanho das partículas e pelo método de empilhamento. Já na lixiviação em pilhas, pode ser melhorada pelo tipo de aglomeração e cura ácida, pelo empilhamento cuidadoso, evitando-se compactação pelos equipamentos

pesados e evitando-se deslocamento das argilas presentes (muitas vezes provocado por uso de elevadas vazões unitárias de percolação).

São sugeridas alturas moderadas de empilhamento, dado que além de possibilitar um menor ciclo de lixiviação, permite um menor investimento no sistema de empilhamento. No caso de tratamento de minérios sulfetados, permite uma maior oxigenação da pilha para a atividade bacteriana. Atualmente cada elevação, no caso de pilhas sobrepostas, tem de 2,5 a 6m.

Tem sido muito utilizada a aplicação intermitente da solução lixiviante à pilha, isto é, a adição em períodos iguais de irrigação e repouso. O período de repouso permite a drenagem da solução, de modo que as partículas permaneçam úmidas. Este método otimiza a lixiviação com base em alguns efeitos, destacando-se entre eles:

- Diminuição da formação de canais preferenciais;
- O tempo de exposição das partículas ao ar entre cada período permite a oxidação das espécies presentes em forma reduzida, bem como de cobre metálico precipitado;
- Na lixiviação bacteriana, fornece às bactérias o oxigênio indispensável ao seu desempenho;

O tempo de exposição das partículas ao ar permite a oxidação dos íons ferrosos presentes na solução de impregnação a íons férricos, que precipitam facilmente por hidrólise e que se ressolubilizam em contato com a solução lixiviante no período seguinte. A presença dos íons férricos em solução favorece a solubilização do cobre.

#### 4.2. LIXIVIAÇÕES DE MINÉRIOS OXIDADOS DE COBRE

A lixiviação de minérios oxidados de cobre consiste na dissolução do Cu dos minerais por uma solução aquosa, constituída por  $H_2SO_4.H_2O$ . O principal e mais difundido método de lixiviação de minérios oxidados de cobre é a lixiviação em pilhas (*Heap leach*), que

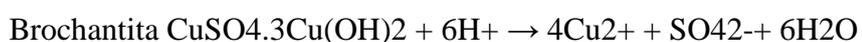
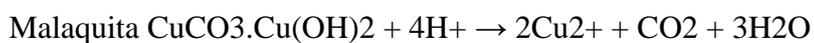
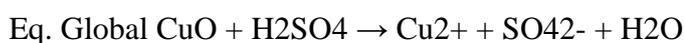
consiste de gotejar a solução lixiviante em pilhas de minério previamente preparado, e em condições atmosféricas normais.

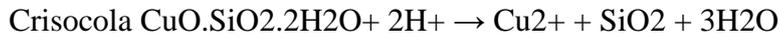
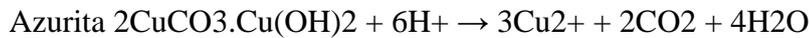
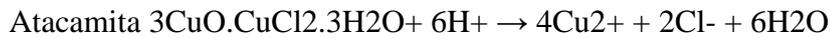
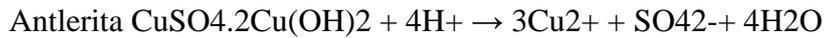
Os requisitos para a aplicação da *heap leach* são:

- Construção uma pilha de minérios, com o topo plano, com aproximadamente 7m de altura de área de 104 a 106 m<sup>2</sup> no topo;
- Aplicação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O no topo da pilha via tubos de polímero (gotejamento) ou esguichos (aspersão) equidistantes;
- Construir a pilha de modo que a percolação da solução lixiviante e do licor não sejam impedidas ou prejudicadas (a presença de grandes quantidades de finos na pilha é um dos condicionante para uma má percolação);
- Coleta do PLS em uma superfície impermeável e levemente inclinada (embaixo da pilha);
- A canalização para a captação do PLS deve ser por gravidade, sem a necessidade de bombeamento, o PLS deve ser captado em um tanque impermeável;
- O PLS deve ser enviado para a extração por solventes e eletrorrecuperação para a produção do cobre metálico;
- O licor pobre, que foi separado na extração por solventes e não seguiu para a eletrorrecuperação, deve retornar à pilha como agente lixiviante, pois ainda está contido de Cu e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O.

#### 4.2.1 Química da Lixiviação em pilha

Os óxidos de cobre são lixiviados diretamente pela solução H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O de acordo com as reações abaixo, para cada minério (HISKEY, 1993):





#### 4.2.2 Fatores que influenciam a dissolução dos minérios oxidados de cobre

Os principais fatores que atuam na dissolução dos minérios oxidados de cobre são (DAVENPORT et al. 2202):

- Forma de ocorrência;
- Efeito do óxido metálico;
- Estado de oxidação;
- Efeito do pH;
- Capacidade da solução lixiviante em manter o cobre em solução.

A forma de ocorrência dos óxidos de cobre lhes confere uma elevada área específica, já que são encontrados principalmente como grãos finos ou como uma camada delgada recobrendo principalmente as fraturas. A crisocola, por exemplo, além dessa forma de ocorrência, possui uma estrutura cristalina altamente porosa, aberta e fibrosa, que facilita bastante o acesso da solução lixiviante. Nesse caso, a cinética do processo é limitada pela difusão do reagente ( $\text{H}^+$ ) e do produto ( $\text{Cu}^{2+}$ ), através da camada de  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Deve-se observar que o efeito do íon metálico está relacionado com o fato de que a velocidade de dissolução do mineral é proporcional à solubilidade de seu principal óxido metálico. O cobre forma um óxido altamente solúvel em ambiente sulfúrico.

Os minerais que contêm além do cobre, ferro ou enxofre em sua forma reduzida possuem uma cinética de dissolução mais lenta, pois envolve uma reação de oxidação, que é em si um processo vagaroso, e não simplesmente uma ionização.

Esse efeito segue a seguinte ordem decrescente de dissolução:

Tenorita ( $\text{CuO}$ )

Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )  
Cobre Nativo ( $\text{Cu}$ )  
Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )  
Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ )  
Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )

A cinética do processo também depende do pH. No caso da cuprita, a velocidade de dissolução aumenta na ordem de 2,5 vezes se o pH do meio varia de 3,5 para 1. Outra propriedade importante com relação à dissolução dos minerais de cobre é a capacidade do lixiviante manter o cobre em solução.

Neste caso, as soluções ácidas de sulfato são ideais por formarem complexos fortes com o cobre.

Os sulfetos de cobre têm velocidades de dissolução bem mais lentas do que os óxidos. O ponto limitante é aparentemente a oxidação do íon ferroso a férrico ( $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ ), sendo o íon férrico um forte agente oxidante. A cinética de dissolução dos sulfetos em meio sulfato ocorre na seguinte ordem:

Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) > Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) > Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )

#### 4.3 PRINCIPAIS VÁRIÁVEIS E PARÂMETROS DE PROCESSOS

Os principais parâmetros que determinam as características operacionais de uma lixiviação em pilhas são (HISKEY, 1993; DAVENPORT et al. 2002:

- Aglomeração e cura ácida;
- Permeabilidade da pilha;
- Altura da pilha;
- Vazão de irrigação da solução lixiviante e modo de aplicação;
- Aeração da pilha.

### 4.3.1 Aglomeração Ácida

Um ponto de grande influência é a aglomeração/pelotização do material, que é obtida pela adesão das partículas menores às maiores (pelotização: processo onde todas as partículas são finas:  $< 850\mu\text{m}$ ). As partículas maiores têm um papel importante, representando um núcleo natural para a ação de agregação das partículas finas. O objetivo da aglomeração é minimizar a segregação na pilha entre as partículas finas e grossas do minério, reduzindo a formação de canais preferenciais e evitando a colmatação da pilha. Esta prática proporciona um umedecimento uniforme do material a ser lixiviado. Adiciona-se nesta etapa, ácido sulfúrico, preferencialmente concentrado, que atua como um agente aglomerante. Adiciona-se ainda água ou solução lixiviante até que se atinja a umidade de aglomeração do minério. Segue-se, então, um período de repouso ou cura. O minério aglomerado forma um substrato bastante permeável. O sistema apropriado de aglomeração dependerá basicamente da distribuição granulométrica do minério e da quantidade e tipo de minério argiloso presente. Os principais métodos são:

- Sistemas de correias em cascata;
- Combinação de correias e chute inclinado com vibração;
- Tambor misturador;
- Correias transportadoras descarregando diretamente nas pilhas.

### 4.3.2 Permeabilidade da Pilha

Este é um fator crítico ao sucesso da lixiviação em pilhas, já que se não houver permeabilidade no leito de minério não haverá percolação, dissolução e extração do metal desejado. Nos processos de lixiviação em dumps, a permeabilidade é determinada basicamente pelas características do minério, pelo tamanho das partículas e pelo método de empilhamento. Já na lixiviação em pilhas, pode ser melhorada pelo tipo de aglomeração e cura ácida, pelo empilhamento cuidadoso, evitando-se compactação pelos equipamentos

pesados e evitando-se deslocamento das argilas presentes (muitas vezes provocado por uso de elevadas vazões unitárias de percolação).

#### **4.3.3 Altura da Pilha**

São sugeridas alturas moderadas de empilhamento, dado que além de possibilitar um menor ciclo de lixiviação, permite um menor investimento no sistema de empilhamento. No caso de tratamento de minérios sulfetados, permite uma maior oxigenação da pilha para a atividade bacteriana. Atualmente cada elevação, no caso de pilhas sobrepostas, tem de 2,5 a 6m.

#### **4.3.4 Vazão de Irrigação da solução Lixivante e modo de aplicação**

Tem sido muito utilizada a aplicação intermitente da solução lixivante à pilha, isto é, a adição em períodos iguais de irrigação e repouso. O período de repouso permite a drenagem da solução, de modo que as partículas permaneçam úmidas. Este método otimiza a lixiviação com base em alguns efeitos, destacando-se entre eles:

- Diminuição da formação de canais preferenciais;
- O tempo de exposição das partículas ao ar entre cada período permite a oxidação das espécies presentes em forma reduzida, bem como de cobre metálico precipitado;
- Na lixiviação bacteriana, fornece às bactérias o oxigênio indispensável ao seu desempenho;
- O tempo de exposição das partículas ao ar permite a oxidação dos íons ferrosos presentes na solução de impregnação a íons férricos, que precipitam facilmente por hidrólise e que se ressolubilizam em contato com a solução lixivante no período seguinte.

A presença dos íons férricos em solução favorece a solubilização do cobre.

#### 4.3.5 Aeração da Pilha

A aeração da pilha é uma condição importante principalmente quando há necessidade da presença de agentes oxidantes ao processo, e crucial no caso de biolixiviação.

### 5. MONTAGEM EM MINICOLUNAS EM CIRCUITO FECHADO

A partir dos parâmetros preliminares encontrados nos ensaios em minicolunas são executados ensaios em colunas unitárias, cujas alturas variam de 2 a 9m. A execução destes ensaios em circuito fechado com uma unidade de extração por solvente é importante, já que a influência da presença de outras espécies minerais dissolvidas na solução pode ser avaliada (PEREIRA, 2000). Os parâmetros definidos nesta etapa são:

- Tamanho do ciclo de lixiviação;
- Altura da pilha;
- Consumo de ácido e curvas cinéticas finais de processo;
- Concentração de ácido na solução de irrigação da pilha;
- Extração de cobre.

A partir dos ensaios em colunas unitárias, serão realizados os ensaios conhecidos como colunas dinâmicas, onde se definem os parâmetros finais, tais como, a configuração final do circuito, alturas finais de empilhamento, duração econômica do ciclo de lixiviação, que serão adotados no projeto da instalação industrial.

## 6. MODULOS DE ESTRUTURA DE LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS

O sistema de colunas apresentado (figura 6) servirá para investigar a lixiviação em colunas em três estágios com 1,0 metro de comprimento cada. Será analisada a extração em configurações diferentes, mas com objetivo final de levantar parâmetros de otimização para a lixiviação em pilhas, do tipo, altura ótima das pilhas, tempo de esgotamento das pilhas, características físicas de aglomerados, otimização de aglomerados, tipo de material residual.

Confecção de uma coluna modular (figura 18), cada módulo com 40 cm, contendo em cada módulo uma válvula para tomada de alíquota, com capacidade para simular três metros de altura e 10 cm de diâmetro interno. Confecção da plataforma de trabalho (figura 7) para dar apoio à coluna. Esse dois equipamentos, formam o sistema de lixiviação em coluna modular, que irá servir para levantamentos de otimização da lixiviação em pilhas e fazer comparação com o sistema de colunas em três estágios.

Esse equipamento foi confeccionado em acrílico e estará pronto e montado na plataforma. Os procedimentos realizados até o presente momento para viabilizar os ensaios em colunas de lixiviação, foi a confecção de três colunas de um metro de comprimento e 12 cm de diâmetro, já montadas e fixadas em suporte de aço, em material de vidro transparente para análise da percolação.



Figura 6: Fotos do sistema de colunas em três estágios (acervo particular)

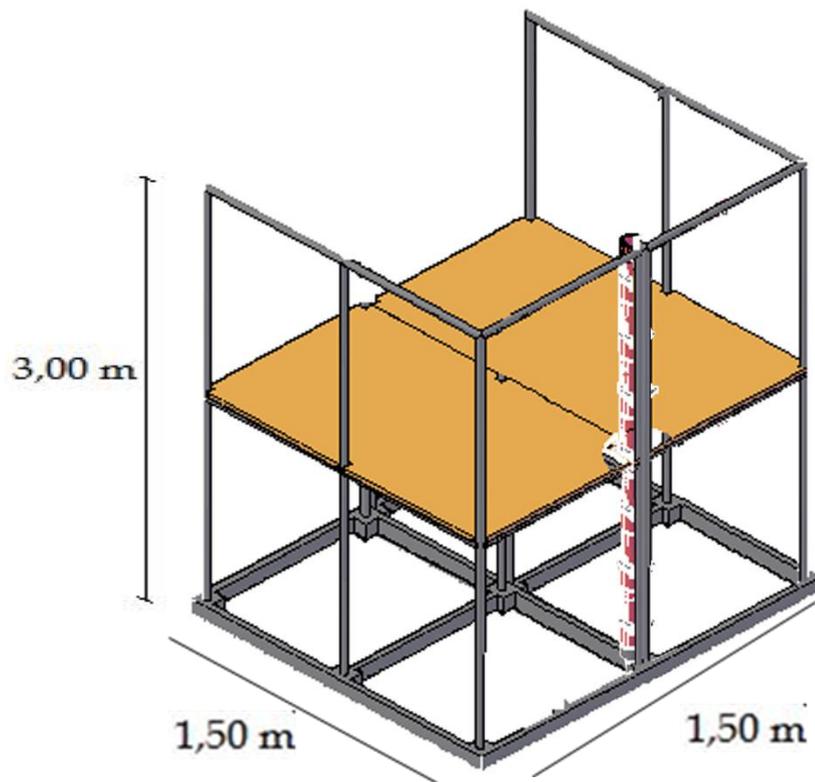
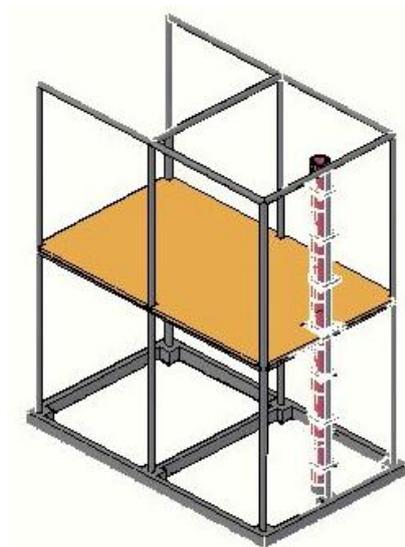


Figura 7: Fotos da plataforma de trabalho para dar apoio à coluna.



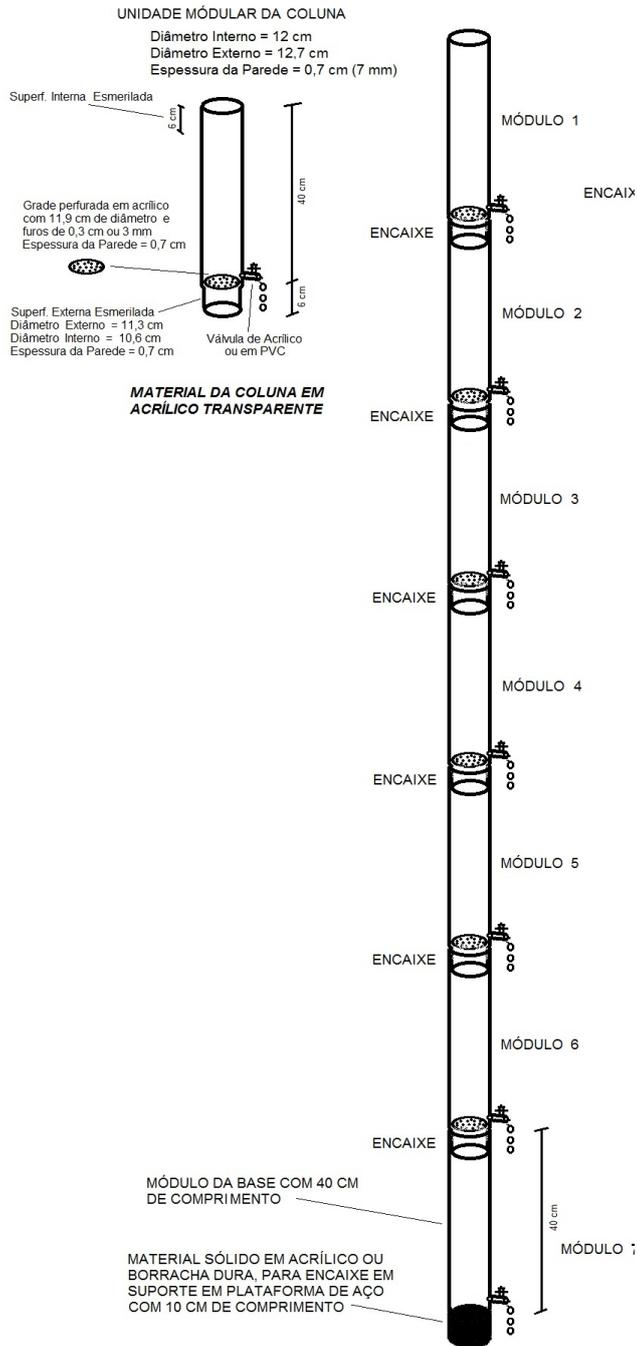


Figura 8: Fotos da coluna modular, cada módulo com 40 cm.

## 6.1 SIMULAÇÃO LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS

Objetivo de simular a lixiviação em pilhas em regime laboratorial ou em escala piloto e promover o levantamento de parâmetros para serem avaliados durante a percolação.

Os principais parâmetros a serem avaliados nos ensaios de percolação são:

- Determinação de um modelo para a cinética de extração;
- Estudo do efeito da granulometria na cinética de extração;
- Desenvolvimento de um modelo de dispersão axial para o teor de cobre extraído em função do tempo;
- Avaliação do teor de Cu no resíduo;
- Análise do efeito da temperatura no processo;
- Análise do efeito da Vazão da solução de  $H_2SO_4$  no processo

Para simular a lixiviação em pilhas (figura 9), através da lixiviação em colunas em laboratório.

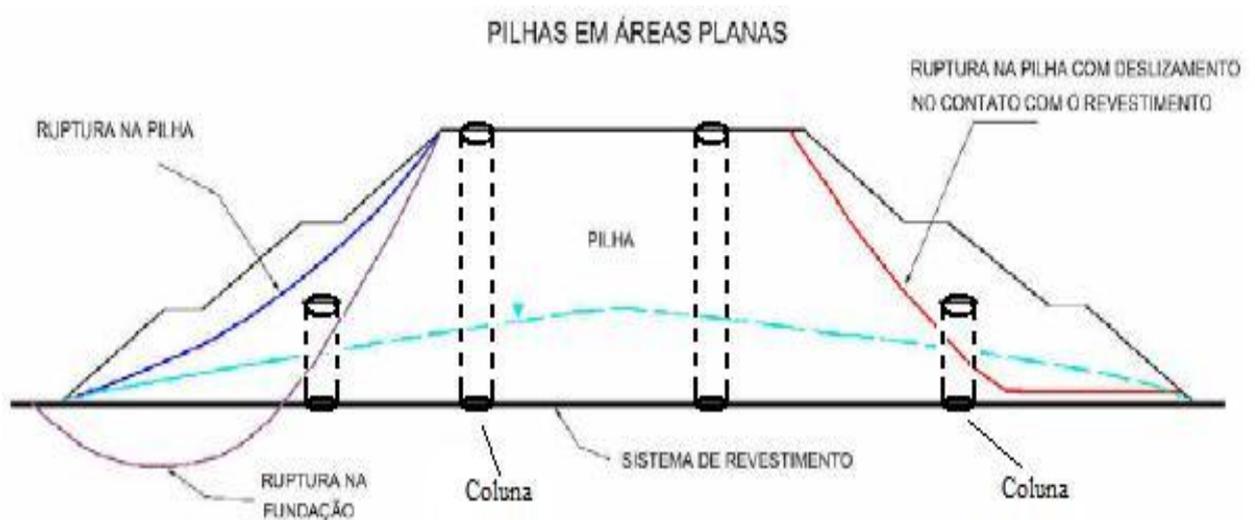


Figura 9: Simulação da Pilha em área Plana

O sistema de colunas em três estágios com 1,0 metros cada, servirá para analisar a extração em configurações de diferentes montagens, a operacionalização do sistema de Lixiviação haverá condições técnicas operacionais para o levantamento de parâmetros de otimização que poderão servir de valores referências iniciais para a lixiviação em pilhas.

Com os dados dos parâmetros poderão ser levantados a altura ótima de pilhas, comportamento da concentração residual com o tempo de percolação nas pilhas, perfil da concentração do licor com altura da pilha, comportamento da cinética de extração, tempo de esgotamento das pilhas.

Do mesmo modo os mesmos estudos poderão ser desenvolvidos na coluna vertical modular (figura 9), para assim ser comparada com o sistema de colunas em três estágios, para fins verificativos da eficiência. A coluna vertical possui, conforme mostra a figura um ponto de coleta a cada 40 cm de percolação do licor, tal configuração dará condições para validar as equações diferenciais, gerando valores mais apurados em comparação com os dados experimentais de recuperação metalúrgica.

A proposta de levantamento de parâmetros em coluna para servirem de base para a lixiviação em pilhas se reside na dificuldade de se fazer simulações em regime de laboratório pois um dos problemas a ser diagnosticados na operação é a permeabilização das camadas de minério que varia com a altura da pilha devida a ação da gravidade, que gera pressão das camadas de cima nas de baixo, compactando-as, e assim, criando direções preferenciais da percolação do agente lixiviante líquido. Para esta verificação tira que montar pilhas cada vez mais altas, o que exigiria bastante espaço físico para a execução. As colunas modular verticais projetadas tem uma grade a cada 40 cm para aliviar a pressão do minério sob o módulo inferior, portanto não simula o problema de compactação, mas poderá determinar valores “starts” para a lixiviação em pilhas. As grades contêm orifícios para a passagem do licor para a coluna de baixo, para que não ocorra entupimento desse orifício durante as operações deverão ser disponibilizadas acima das grades camadas de bolas sílicas ou de seixos com diâmetro diferenciais que providenciarão um barreira de proteção contra o problemas de entupimento. Nas grades, serão realizadas testes com papéis de filtro com a intenção de evitar a passagem de partículas muito finas que formam espumas no licor e que poderão incrustar nas superfícies dos pontos de coletas provocando também entupimentos ao longo do tempo.

Deste modo fica então o projeto e as sugestões para a montagem e operacionalização da coluna modular vertical que não foi possível ocorrer antes da conclusão deste trabalho, Quanto as colunas e 3 estágios, estas estão prontas, montadas, para a operacionalização.

## 6.2 PROPOSTA DE UM MODELO CINÉTICO PARA PROCESSO CONTÍNUO EM LEITO EM COLUNAS

Se denominarmos as frações mássicas ou molares na fases líquidas e sólidas de  $X_A$  e  $X_{AS}$  respectivamente, sendo  $X_{AS}$  a concentração de saturação, se pode definir que:

$$X_A = \frac{C_A}{C_T} \quad \text{e} \quad X_{AS} = \frac{C_{AS}}{C_T}$$

Em que  $C_A$ ,  $C_{AS}$  E  $C_T$  são concentrações do soluto A nas fases sólidas líquidas respectivamente.

Extrator contínuo de comprimento  $Z$  na posição  $z$ , a concentração da solução A nas fases líquida e sólida são respectivamente  $X_L$  e  $X_A$

$$M_A \approx M_R = S \quad M_{LE} \approx M_S = L$$

$$S X_{Ae} = S X_{Af} + L (X_{Lf} \sim X_{Le} )$$

Considerando que  $X_A = X_{AS} = X_{LS}$ ,

$M_A, X_A$  = massa e fração molar inicial do soluto A no sólido,

$M_{LE}, X_{LE}$  = massa e fração molar inicial na solução

$S, L$  = massa do sólido e líquido

$M_R, M_S$  = massa do resíduo e massa na saída.

$X_{AE}, X_{AF}$  = fração molar do soluto A na entrada e na saída.

Teremos:

$$X_{LS} = X_{Af} + \gamma (X_{Lf} - X_{Le}) \text{ sendo que : } L/S = \gamma$$

Substituindo em:

$$V * \frac{dX_L}{dt} = A K_2 (X_{LS} - X_L)$$

A, a área da superfície da partícula.

$K_i$ , coeficiente de transporte de massas.

$N_A$ , taxa de transferência de massa do soluto A.

$C_{AS}$ , concentração de A na superfície da partícula.

$C_A$ , concentração de A no seio da Solução.

V, volume da solução.

T, tempo de reação

Teremos:

$$\text{➤ } \frac{dX_L}{dt} = \frac{AK_L}{V} [X_{Af} + \gamma X_{Le} - (1-\gamma) X_L] \text{ eq. 1}$$

$$\text{➤ } \text{Mas: } S X_{Ae} + L X_{Le} = S X_{Af} + L X_{Lf} \div (S)$$

$$\text{➤ } X_{Ae} + X_{Le} \gamma = X_{Af} + \gamma X_{Lf}$$

$$\text{➤ } X_{Af} = X_{Ae} + \gamma (X_{Le} - X_{Lf}) \text{ eq. 2}$$

$$2 \text{ em } 1 \text{ tem-se que: } \frac{dX_L}{dt} = \frac{AK_L}{V} [X_{Ae} - \gamma X_{Le} - (1-\gamma) X_L]$$

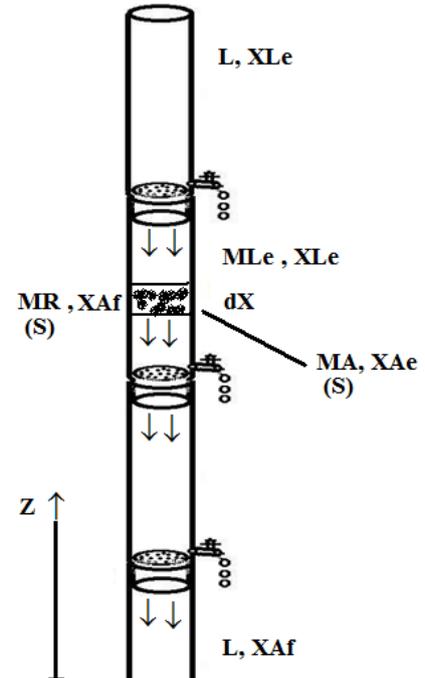
➤ Seja  $v = \frac{dx}{dt}$  a velocidade linear com que o sólido se move no tanque, então:

$$\text{➤ } dX_L = \frac{AK_L}{Vv} [X_{Ae} - \gamma X_{Le} - (1-\gamma) X_L] dx$$

➤

$$\text{➤ } \ln = \frac{[X_{Ae} - X_{Lf} - (1-\gamma)X_{Le}]}{[X_{Ae} - X_{Lf} - (1-\gamma)X_{Lf}]} = - \frac{A K_L (1-\gamma)}{V v} \cdot Z$$

$$\frac{[X_{Ae} - X_{Lf} - (1-\gamma)X_{Le}]}{[X_{Ae} - X_{Lf} - (1-\gamma)X_{Lf}]} = e^{-k \cdot Z} \quad \text{Onde: } \frac{A K_L (1-\gamma)}{V v} = k$$



### Modelo Cinético para colunas de lixiviação

$$X_{Ae} - \gamma X_{Lf} - (1 - \gamma) X_{Le} = (X_{Ae} - X_{Lf}) e^{-k \cdot Z}$$

$$- \gamma X_{Lf} + X_{Lf} e^{-k \cdot Z} = X_{Ae} e^{-k \cdot Z} - X_{Ae} + (1 - \gamma) X_{Le}$$

$$X_{Lf} (e^{-k \cdot Z} - \gamma) = X_{Ae} (e^{-k \cdot Z} - \gamma) + (1 - \gamma) X_{Le}$$

$X_{Lf} = \frac{(e^{-kZ} - 1)X_{Ae} + (1 - \gamma) X_{Le}}{(e^{-kZ} - \gamma)}$	Fração molar do soluto no licor em função da altura Z na coluna
---	---

## 7. CONCLUSÃO

Em se tratando de processamento hidrometalúrgico do cobre, pôde-se verificar que vários são os métodos possíveis de extração mineral por esta rota. A forma de aplicação mais difundida comercialmente é a lixiviação em pilhas (*Heap leach*), por apresentar melhor relação custo/benefício e condições técnicas de aplicação mais palpáveis e de mais fácil manuseio. Pode-se perceber também que não é tão somente a classe do minério, sulfetado ou oxidado, que o direciona para processamento por hidrometalurgia ou pirometalurgia, pois se tem minérios sulfetados que se comportam bem na lixiviação (alguns sulfetos secundários) e viu-se que temos minérios oxidados que não apresentam comportamento ideal quando lixiviados, como a maioria dos minerais da classe.

O circuito hidrometalúrgico completo compreende as operações unitárias de lixiviação (LX), extração por solventes (SX) e eletrorecuperação (EW), culminado na obtenção do cobre metálico, segundo DAVENPORT et al. este tipo de processamento é responsável por 20% da fabricação mundial de cobre extraído de minério e está em constante e acelerado crescimento, pois esta rota permite o aproveitamento de minérios com teores baixos, e, ao passo que os minérios de teores maiores estão ficando escassos, tratar dos minérios de teores baixos será a única opção da metalurgia.

Enfatizando na análise do processo de lixiviação, desenvolvemos um módulo de estrutura de lixiviação em colunas, para realizarmos ensaios em minicolunas em regime fechado em laboratório. Neste sistema taxamos alguns parâmetros principais do tipo: altura ótima da pilha, tempo de esgotamento, características físicas do aglomerado, otimização de aglomerados, tipo de material residual. Confeccionamos uma coluna modular, cada módulo de 40 cm.

Portanto, neste trabalho não foram abordados resultados dos ensaios de lixiviação de pilhas em colunas, pois não havia o material suficiente para realização dos ensaios, como também, a demora de entrega dos equipamentos que foram solicitados a confecção, ficando assim, com o objetivo de apresentar somente o equipamento desenvolvidos.

Como proposta para posteriores trabalhos, apresentação de resultados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.F. **Recursos Minerais do Brasil**. V.II, 2ª Ed., São Paulo, Edgard Blucher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1973.

BALTAR, C.A.M.; RIOS, E.M.; BALTAR, L.M.; MAFRA, J.S. **Uso de Técnicas de Química de Superfície para Concentração de Bactérias**. Congresso Brasileiro de Química - Recife, 2000.

BARREIRA, C.F.; SOARES, A.D.V; RONZÊ, P.C. Descoberta do Depósito Cu-Au Alemão – Província Mineral de Carajás (Pa). In: VI SIMPOSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. Anais. Manaus, Sociedade Brasileira de Geologia/Norte, p. 136-139, 1999.

HISKEY, J.B. Overview of Copper Heap leaching. In: SME SHORT COURSES in conjunction with the 1994 SME Annual Meeting & Exhibit, Albuquerque, new Mexico, USA. 1993.

HUNH, S.R.B.; SOUZA, C.I.J.; ALBUQUERQUE, M.C; LEAL, ED.; BROSTOLIN, V. Descoberta do depósito Cu(Au) Cristalino: Geologia e mineralização associada – Região da Serra do Rabo – Carajás (Pa). In: VI SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. Anais. Manaus, Sociedade de Geologia/Norte, p. 140-143, 1999.

LEHNE, R.W. Copper, its nature, its extraction. The world of metals – Copper Frankfurt, Ed, Metallgesellschaft, GER, 1993. Pg. 25-27

CHAVES, A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minério / Volume 4**. São Paulo: Signus Editora, 2006.

DNPM. Belo horizonte, MG: Cobre, 2009. Disponível em:[WWW.dnpm.gov.br/](http://WWW.dnpm.gov.br/). Acesso em 09 de maio 2011.

DAVENPORT, W. G.; KING, M.; SCHLESINGER, M; BISWAS, A, K. (Ed). *Extrative metallurgy of copper* – 4<sup>a</sup> edition. Oxford, Uk, ed. Pergamon, 2002. 432p.

**MOOB – Tratamento de minérios e hidrometalurgia**, In memoriam professor Paulo AbidAndery, Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ITEP). Recife, 1980, 95-111.

PEDROZO, M. F.M. e Lima, I.V., **Ecotoxicologia do Cobre e seus Compostos**, Centro de Recursos Ambientais – Caderno de Referência Ambiental, v.2, 128p., 2001.

PEREIRA, G.S.P. *Lixiviação em pilhas de minério oxidado de cobre*. 200.93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WIKIPÉDIA. Disponível em: [www.wikipédia.org/wiki/](http://www.wikipédia.org/wiki/). Acesso em 15 de maio 2011

ROSENQVIST, T., *Extractivemetallurgy*, McGraw-Hill, 1972. Pg. 49-58.

RIBEIRO CAMILA; UNIVERSIDADE DO PARANA, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, prof.º Aloísio Schmid, 2005. Acesso em: 12/04/2011.