



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

SYLVESTER STALLONE PONTES SALES

**INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO CONTROLE DA CINÉTICA DE
EXTRAÇÃO DO COBRE OXIDADO EM COLUNAS COM LEITO FIXO**

MARABÁ – PA

2014

SYLVESTER STALLONE PONTES SALES

**INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO CONTROLE DA CINÉTICA DE
EXTRAÇÃO DO COBRE OXIDADO EM COLUNAS COM LEITO FIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Minas e Meio Ambiente da
Universidade Federal do Sul e Sudeste
do Pará - UNIFESSPA, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas e Meio Ambiente.
Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Sabóia
de Paiva

MARABÁ – PA

2014

SYLVESTER STALLONE PONTES SALES

**INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO CONTROLE DA CINÉTICA DE
EXTRAÇÃO DO COBRE OXIDADO EM COLUNAS COM LEITO FIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva

Data de Aprovação: 17/07/2014

Conceito: EXC

Banca Examinadora:

Prof. Reginaldo Sabóia de Paiva - Orientador
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará

Prof. Wenderson Gomes dos Santos – Membro
Mestre em Engenharia Química
Universidade Federal do Pará

Prof. Manoel Ferreira Nunes – Membro
Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará

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

Sales, Sylvester Stallone Pontes

Influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado em colunas com leito fixo / Sylvester Stallone Pontes Sales ; orientador, Reginaldo Sabóia de Paiva. — 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Curso de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2014.

1. Minérios de cobre - Minas e mineração - Canaã dos Carajás (PA). 2. Cobre - Metalurgia. 3. Porosidade. 4. Lixiviação. I. Paiva, Reginaldo Sabóia de, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 669.3098115

*Dedico este trabalho à Lourival Bentes “Lúcio”,
meu eterno amigo. Me acolheu como um filho e
como tal sou eternamente grato.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar ao meu lado em todos os momentos, me dando sabedoria, serenidade e força para superar as dificuldades, me auxiliando a seguir bons caminhos e a Nossa Senhora do Carmo, minha padroeira e protetora.

Agradeço aos meus amados pais, Francisco Gildo e Maria do Socorro, pelo esforço, incentivo, dedicação e por todos os ensinamentos de vida.

Agradecimento especial a minha mãe, que abraçou a causa e não hesitou em um só momento, me dando o alicerce e tranquilidade nos momentos em que mais precisei. Essa vitória é muito mais sua do que minha.

Ao meu irmão, Alan Gilson, pelo apoio incondicional e a minha avó, Maria Sineide, pelo carinho e confiança.

Agradeço a minha namorada e futura mulher Rafaela Viana, pelo companheirismo, compreensão e por sempre me ouvir e aconselhar de maneira correta. Valeu a pena toda distância, sofrimento, renúncias. Valeu a pena esperar.

A família Bentes (Lourival, Laura, Lilia, Laurita, Luan, Gabriel) e ao primo parceiro Ivanildo, pela acolhida, confiança e apoio.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Reginaldo Sabóia de Paiva, por sempre me instruir de maneira alegre e prestativa e pelos conhecimentos que me foi repassado durante a elaboração do trabalho.

Aos professores MSc. Wenderson Gomes dos Santos e Bel. Manoel Ferreira Nunes, que aceitaram participar da minha banca.

Aos meus colegas e amigos de turma por fazerem desses 5 anos universitários menos cansativos, mais engraçados e menos pesados e em especial a Daniel Borges e Luis Gustavo, meus amigos desde o começo. Ao meu grupo (Primas e Primos) que levarei pra toda vida: Jéssica Kérina, Vivianne Andrade, Élyda Lima, Clayver Carvalho, Everaldo Cunha e Rafael Marques.

Aos meus mais novos amigos de faculdade Jailson Sousa e Bruna Melo, pela ajuda nos trabalhos experimentais.

E aos demais amigos e familiares, agradeço a torcida que, de alguma forma, me ajudou a chegar até aqui.

“Não devemos ter medo de inventar seja o que for. Tudo o que existe em nós também existe na natureza, pois fazemos parte dela.”

Pablo Picasso

RESUMO

O cobre é um metal cujas características lhe conferem alguma superioridade em muitas aplicações quando comparado a materiais similares ou potenciais substitutos. O minério de cobre *in natura* encontra-se em duas classificações geológicas: o oxidado, de origem mais superficial na crosta terrestre e de menor teor, e o sulfetado, que ocorre em camadas mais profundas e possui teor mais elevado. Atualmente o minério de cobre oxidado da mina do Sossego de Canaã dos Carajás-Pa está sendo estocado, devido à falta de tecnologias que viabilizem economicamente seu beneficiamento. Na tentativa de aprimoramento do processo de concentração deste minério, realizou-se, neste trabalho, a lixiviação do cobre oxidado aglomerado com ácido sulfúrico em colunas com leito fixo, com controle do tempo de residência entre o líquido e o sólido, afim de que se entendesse o comportamento da porosidade. Com isso, foi investigada a influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado. Após a realização dos experimentos, foi proposto um modelo cinético que prediz o comportamento da concentração na extração de cobre em função do tempo e que considera a variação da porosidade. Foram realizadas comparações com resultados de trabalhos anteriores e constatou-se que as curvas geradas através do modelo se enquadraram as curvas para resultados práticos.

Palavras - chave: cobre oxidado; porosidade; lixiviação em colunas; modelo cinético.

ABSTRACT

Copper is a metal whose characteristics give you some superiority in many applications compared to similar or potential substitute materials. The copper ore is found in nature in two geological classifications: Rusty, more surface water in the crust and lower content, and sulfide, which occurs in deeper layers and has higher content. Currently oxidized copper ore from the Quiet of Canaan Pa-mine is being stored, for lack of technologies that need for their economic improvement. In an attempt to improve the concentration of the ore process was held, in this work, the leaching of oxidized copper cluster with sulfuric acid in columns with fixed bed, with control of the residence time between the liquid and the solid, so that if understand the behavior of porosity. Thus, we investigated the influence of porosity in controlling the kinetics of extraction of oxidized copper. After the experiments, a kinetic model that predicts the behavior of the concentration on the extraction of copper as a function of time and considering the variation of the porosity was proposed. Comparisons with results of previous studies were conducted and it was found that the curves generated by the model not fit the curves for practical results.

Key - words: oxidized copper; porosity; leaching columns; kinetic model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.3 – Esquema do processo de uma pilha de lixiviação.	23
Figura 4.4 – Área de Lixiviação.	24
Figura 4.5 - Esquema da lixiviação em pilhas - Simulação em colunas.	25
Figura 4.6 - Escoamento de um fluido em meio poroso.	27
Figura 5.1 - Localização da mina do Sossego.....	31
Figura 5.2 - Amostra de rocha apresentando minerais de cobre na forma de sulfetados e oxidados.	32
Figura 5.3 - Preparo da amostra.....	32
Figura 5.4 - Tambor de aglomeração.....	33
Figura 5.5 - Dimensões da Coluna.....	34
Figura 5.6 - Quarteamento das amostras de cobre aglomerado.	35
Figura 5.7 - Ensaios de lixiviação realizados em béqueres	35
Figura 5.8 - Filtragem do licor.....	35
Figura 5.9 - Ensaios de Porosidade.	36
Figura 6.1 - Resultado do teste de integridade – Aglomerado.	39
Figura 6.2 - Curva prática da porosidade na cinética de extração do cobre oxidado aglomerado.....	40
Figura 6.3 - Curva prática e teórica da porosidade na cinética de extração do cobre oxidado aglomerado.....	41
Figura 6.4 - Curva teórica e experimental da cinética de extração do cobre oxidado sem inserção da porosidade.	43
Figura 6.6 - Curva teórica e experimental da cinética de extração do cobre oxidado com e sem variação da porosidade.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Transformadas inversas de Laplace.....	29
Tabela 6.2: Ensaio de porosidade.	40
Tabela 6.3: Comparação de porosidade prática e teórica.	41
Tabela 6.4: Resultados teóricos dos teores de cobre presente no licor.....	42
Tabela 6.5: Resultados teóricos da recuperação de cobre presente no licor.....	44

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA.....	16
3 OBJETIVOS.....	17
3.1 OBJETIVO GERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1 O COBRE	18
4.2 METALURGIA EXTRATIVA	19
4.2.1 Hidrometalurgia.....	20
4.3 LIXIVIAÇÃO	21
4.3.1 Teoria estabelecida da lixiviação	21
4.3.2 Tipos de lixiviação	22
4.4 POROSIDADE	26
4.4.1 Escoamento em meios porosos	27
4.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO	28
4.6 AGLOMERAÇÃO.....	30
5 MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1 COLETA DA AMOSTRA.....	31
5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	32
5.3 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS	34

5.4 ENSAIOS DE INTEGRIDADE E POROSIDADE.....	36
5.4.1 Ensaio de integridade	36
5.4.2 Ensaio de porosidade.....	36
5.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO COM VARIAÇÃO DA POROSIDADE.....	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1 INTEGRIDADE.....	39
6.2 POROSIDADE	40
6.3 INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO MODELO MATEMÁTICO.....	41
6.4 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COM VARIAÇÃO DA POROSIDADE.....	42
7 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Desde a idade do ferro o homem procura incessantemente metais a partir de substâncias minerais. Nesta procura, observou a Natureza e verificou que esta se encarregava de dissolver substâncias minerais, úteis à sua vida em sociedade, as transportava e as precipitava em depósitos de outro tipo. Não admira, portanto, que o homem tenha imitado a Natureza, para extrair as substâncias solúveis de que necessitava (Vila, 1995).

Com isso, o ser humano vem exercendo, continuamente, atividades de mineração, retirando de locais apropriados os mais diversos bens minerais como: a argila, para os artefatos de cerâmica, as rochas duras para a preparação de armas e objetos de corte, bem como ocos minerais para a confecção de pigmentos para utilização, sobretudo em pinturas e inscrições rupestres.

Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, a tal ponto que as fases de evolução da humanidade são divididas em função dos tipos de minerais utilizados: idades da pedra, do bronze, do ferro, etc. Nenhuma civilização pode prescindir do uso dos bens minerais, principalmente quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano - alimentação, moradia e vestuário - são atendidas essencialmente por estes recursos.

Dentre os mais diversos metais o cobre têm apresentado grande utilidade na sociedade moderna. Pode ser utilizado principalmente nas indústrias de fios e cabos elétricos, que absorvem mais de 50% do metal, sendo o restante utilizado em ligas especiais, tubos, laminados e extrudados.

O cobre é um metal cujas características lhe conferem alguma superioridade em muitas aplicações quando comparado a materiais similares ou potenciais substitutos, tais como alta condutividade elétrica e térmica, trabalhabilidade, alta ductilidade e maleabilidade, boa resistência à corrosão, capacidade de formar ligas, flexibilidade do uso e alto índice de recuperação ao final do seu ciclo de vida. Para muitas aplicações não há um substituto economicamente viável. (Pereira, 2000).

O minério de cobre *in natura* encontra-se em duas classificações geológicas: o oxidado, de origem mais superficial na crosta terrestre e de menor teor, e o sulfetado, que ocorre em camadas mais profundas e possui teor mais elevado.

Neste trabalho será analisado, especificamente, o cobre oxidado da mina do Sossego de Canaã dos Carajás-Pa. Na tentativa de aumentar sua recuperação serão feitos ensaios

laboratoriais hidrometalúrgicos através de lixiviação ácida com o intuito de investigar a influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado em colunas com leito fixo.

A preocupação com o meio ambiente, aliados aos teores cada vez mais baixos dos minérios, provocaram uma excelente oportunidade para a aplicação da hidrometalurgia. (DOMIC, 2001).

A Hidrometalurgia engloba processos de extração nos quais a principal etapa de separação do metal da ganga envolve reações de dissolução do mineral-minério que contém os metais de interesse. As aplicações tradicionais da Hidrometalurgia incluem a produção de alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, terras-raras, etc. (Ciminelli, 2009).

Frente às vantagens dos processos hidrometalúrgicos e ao desafio de pesquisar condições favoráveis para a recuperação do cobre oxidado via lixiviação tendo em vista a grande utilidade deste mineral e a esgotabilidade das jazidas de minérios, torna-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias mais competitivas, a fim de utilizar-se este cobre como matéria-prima no mercado nacional e internacional de metais (PAIVA et al, 2011).

2 JUSTIFICATIVA

O cobre é um metal de grande importância para o desenvolvimento de uma sociedade. Destaca-se entre os demais por apresentar alta condutividade elétrica e térmica, trabalhabilidade, alta ductilidade e maleabilidade, boa resistência à corrosão, capacidade de formar ligas, flexibilidade do uso e alto índice de recuperação ao final do seu ciclo de vida. Porém, é encontrado na natureza disseminado a baixas concentrações e devido à escassez de jazidas com teores maiores torna-se fundamental o aprimoramento em tecnologias que viabilizem economicamente o processamento do metal menos concentrado.

Atualmente a lixiviação em pilha é considerada a via de processamento mais eficaz para extração de cobre a partir de minérios baixo teor, sendo a principal vantagem deste processo o baixo custo de capital e de operação. Assim, neste trabalho será investigada a influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado em colunas com leito fixo como um dos inúmeros parâmetros passíveis de modificações no melhoramento da lixiviação do cobre oxidado.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado em colunas com leito fixo, para fins de otimização.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Determinar o tempo de desintegração total do minério aglomerado nas colunas em contato com o ácido sulfúrico.

b) Propor um modelo matemático de primeira ordem levando-se em consideração a porosidade e que descreva o perfil de comportamento da curva cinética de extração encontrada, comparando valores teóricos com valores experimentais.

c) Validar o modelo através de comparação entre os resultados de trabalhos anteriores sem a inserção da porosidade e com a inserção da mesma.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O COBRE

O cobre é um metal marrom avermelhado de massa molecular 66,55 g/mol e número atômico 29. Possui quatro estados de oxidação: metálico (Cu^0), íon cuproso (Cu^+), íon cúprico (Cu^{2+}), íon trivalente (Cu^{3+}). Apresenta dois isótopos: ^{63}Cu (69,17%) e ^{65}Cu (30,83%). Como propriedades físicas importantes, podem ser citadas a elevada condutividade térmica e elétrica, maleabilidade e resistência à corrosão. O cobre no estado elementar é distribuído na natureza como sulfetos, arsenitos, cloretos e carbonatos (AZEVEDO e CHASIN, 2003; BRASIL – DNPM – DF, 1982).

Em ambientes secos, o cobre metálico é estável, mas reage lentamente com a umidade do ar, sendo coberto por uma camada verde de carbonato hidratado. No meio ambiente, o cobre monovalente ou está complexado ou é rapidamente oxidado por qualquer agente oxidante. Poucos compostos cuprosos são estáveis em água, porém são extremamente insolúveis. Por isso, no meio ambiente aquático, o estado de oxidação bivalente é o normalmente encontrado. Os compostos cúpricos e complexos de cobre são, geralmente, solúveis em água com coloração azul ou verde. O cobre trivalente é um forte oxidante e ocorre em poucos compostos (AZEVEDO e CHASIN, 2003; BRASIL – DNPM - DF, 1982).

O cobre é necessário para um bom crescimento das plantas e animais, sendo essencial na atividade de algumas enzimas e proteínas. Nas enzimas, o cobre é responsável pela catálise de reações de oxidação-redução. No metabolismo animal, a falta de cobre pode provocar anemia, diarreia e distúrbios nervosos. Por outro lado, a ingestão excessiva do elemento pode causar vômitos, câibras, convulsões ou mesmo a morte (AZEVEDO e CHASIN, 2003).

Os compostos cuprosos (Cu^+) e cúpricos (Cu^{2+}) são diversos e com muitas aplicações. O óxido de cobre é utilizado como catalisador, corante de cerâmicas, em baterias, eletrodos e inseticidas. O cloreto cuproso é usado como desinfetante, na preservação da madeira, desodorante e desulfurizante em destilados de petróleo, em fotografia, na purificação da água e como aditivo alimentar. O cloreto cúprico é usado na tinturaria têxtil, como agente oxidante em corantes e como fungicida. O nitrato cúprico é usado para sensibilizar superfícies à luz e o fluoreto se utiliza como o pacificador em esmaltes, vidros e cerâmicas. O sulfato de cobre é usado em fungicidas, inseticidas e como aditivo dos solos. O metal é utilizado na

cunhagem de moedas, fabricação de tubos de canalização, peças decorativas, etc. (AZEVEDO e CHASIN, 2003).

O cobre é, raramente, encontrado no estado puro. Normalmente, está associado a outros elementos químicos, formando diversos minerais. Os minerais de cobre podem dividir-se em dois grupos distintos: os primários ou sulfetados e os secundários ou oxidados. Os minerais primários são depositados a grande profundidade e possuem origem ígnea. Os mais importantes são a calcopirita (CuFeS_2) com 34,6% de Cu e a calcocita (Cu_2S) com 79,9%. Outros exemplos de minerais sulfetados são a bornita (Cu_5FeS_4) com 63,3% e a enargita ($\text{Cu}_3\text{As}_5\text{S}_4$) com 48,3%. O segundo grupo é composto por minerais secundários resultantes da oxidação de sulfetos de cobre, tais como a cuprita (Cu_2O) com 88,8% de Cu, a malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) com 57,5% e a azurita ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) com 55,3%. Os minerais com maior interesse comercial são a malaquita, a calcocita e a calcopirita (AZEVEDO e CHASIN, 2003; BRASIL – DNPM - DF, 1982).

4.2 METALURGIA EXTRATIVA

A metalurgia extrativa estuda a obtenção de metais a partir de elementos minerais retirados da natureza ou de sucatas, onde a matéria prima bruta é transformada química ou estruturalmente em um tipo de composto mais puro, este processo acontece em etapas que se dividem em: hidro, piro e eletrometalurgia.

A hidro é uma metodologia que utiliza soluções aquosas para a dissolução de um determinado metal é muito aplicada em alguns minérios de cobre, níquel ou zinco.

Na piro ocorre a alteração ou redução do mineral utilizando os processos de calcinação (aquecimento que decompõe e elimina produtos voláteis), ustulação (tratamento térmico que provoca reações químicas entre o minério e a atmosfera dos fornos), fusão (separação em metais fundidos e/ou escória) e refinamento (aumenta a pureza e define a composição do mineral).

A eletro utiliza a energia elétrica para dissociar o metal refinando-o ou purificando-o através da eletrodeposição (passagem de corrente elétrica através de um banho de água que separa moléculas ou íons), eletrolítico (correntes elétricas derretem minérios parcialmente refinados), galvanoplastia (correntes elétricas passam em um banho de água-ácido) ou deposição física de vapor (ocorre a vaporização elétrica de um metal).

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).

A rota hidrometalurgia por lixiviação permite tratar minérios com baixos teores, e quando comparada à pirometalurgia tem a vantagem de necessitar de pequeno investimento, ter baixo custo de operação e ter características mais sustentáveis, pois reduz os impactos ambientais provenientes das descargas de SO_2 na atmosfera e permite a recirculação dos reagentes diminuindo a produção de efluentes (PAIVA *et al* (2011)).

4.2.1 Hidrometalurgia

A hidrometalurgia é utilizada para processar principalmente os minérios oxidados de cobre. O processo hidrometalúrgico consiste, em linhas gerais, em lixiviar o minério moído com solventes adequados, sendo o mais utilizado o ácido sulfúrico, obtendo-se soluções ricas.

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 demonstrando crescente desenvolvimento técnico, mesmo sendo uma técnica relativamente recente, a hidrometalurgia surge como a rota de processamento mais promissora para o fornecimento futuro do cobre no mercado mundial (Lehne 1993).

Em geral, a hidrometalurgia desenvolve-se em três etapas físico-químicas distintas:

- Uma de dissolução seletiva dos metais, a partir dos sólidos que os contêm, mediante uma solução aquosa; etapa conhecida como lixiviação.
- Uma etapa de processamento e transformação dos metais dissolvidos no meio aquoso de lixiviação, mediante agentes externos que permitem a purificação e/ou concentração desses metais ainda em solução aquosa.
- Uma etapa de recuperação seletiva dos metais dissolvidos no meio aquoso, conhecida como precipitação, na qual se obtém o metal ou um composto que o contém, na forma de um produto sólido.

4.3 LIXIVIAÇÃO

4.3.1 Teoria estabelecida da lixiviação

A extração de um constituinte solúvel de um sólido mediante um solvente chama-se, genericamente, lixiviação. Esta denominação é também correntemente usada para indicar qualquer processo de dissolução seletiva de constituintes químicos de uma rocha, mineral, depósito sedimentar ou solo, pela ação de um fluido percolante, normalmente água.

A lixiviação é uma técnica que põe em contato o dissolvente com os grãos de substância solúvel, pelo que o minério deve sofrer fragmentações de modo a ser reduzido a tamanhos finos (normalmente menores do que 1 mm) e assegurar uma libertação da substância útil que garanta a sua exposição máxima ao agente lixivante.

Quando um sólido é imerso num líquido forma-se no contato com a superfície um filme líquido estagnado através do qual os reagentes têm de se difundir antes de atingir a interface onde se dará a reação química. Este filme é chamado a camada limite de Nernst e tem cerca de 0,03 mm de espessura. A sua existência deve-se a dois fatores hidrodinâmicos:

- A adesão do líquido à superfície; em fluxo laminar este líquido aderente terá velocidade normal nula;
- A viscosidade do líquido implica um gradiente da sua viscosidade transversal de escoamento, desde zero à superfície de uma partícula até à sua velocidade normal de escoamento.

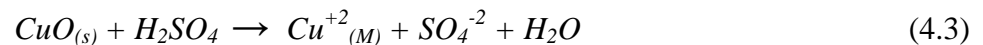
Então a dissolução de um sólido num líquido compreende a seguinte sequência de passos (Fiúza, 1991):

- 1) Transporte do reagente à superfície sólido-líquido pela difusão das suas moléculas através da camada limite de Nernst;
- 2) Adsorção dos reagentes pelo sólido;
- 3) Reação química à superfície;
- 4) Dessorção dos produtos da reação da superfície do sólido;
- 5) Transporte dos produtos solúveis para o exterior da superfície do sólido por difusão através da camada limite.

O processo de lixiviação é executado com o objetivo de separação. Consiste, basicamente, na remoção do metal de valor da ganga com um beneficiamento *mínimo* do minério, evitando-se, assim, os custos associados ao tratamento (beneficiamento) do minério.

A lixiviação de minerais de cobre oxidados é usualmente feita com soluções de ácido sulfúrico, por uma combinação de questões de economia e eficiência. Dentre os minérios oxidados de cobre existem espécies que são caracterizadas pelo tempo de lixiviação do minério, por exemplo: espécies de rápida lixiviação e espécies de médio tempo de lixiviação (CARRICONDE, 2011).

A equação (4.3) representa, genericamente, a reação que ocorre entre o ácido sulfúrico e os minerais oxidados:



4.3.2 Tipos de Lixiviação

Segundo Domic (1982), Catanch (1976) e Vilas boas *et al.*(1980), os métodos mais convencionais para lixiviação de minérios contendo oxidados de cobre, são: lixiviação em aterros (*dump leaching*); lixiviação em pilhas (*heap leaching*); lixiviação em tanques com agitação (*agitation leaching*) e lixiviação “*in situ*” (*in situ leaching*).

Neste trabalho será feita uma abordagem do método da lixiviação em pilhas para simulação em escala laboratorial do comportamento do processo de lixiviação em colunas.

a) Lixiviação em Pilhas

Além da existência local de grandes depósitos de minérios, a escolha da técnica de pilhas de lixiviação para extração de minerais é influenciada por fatores como a topografia do terreno, evitando-se áreas montanhosas, e a hidrologia do local. De maneira a tornar o processo efetivo e econômico, a manutenção de determinada concentração da solução ácida é necessária, a qual pode ser afetada pelas condições hidrológicas da região. Em climas áridos, com altas taxas de evaporação, uma grande quantidade adicional de água pode ser requerida para manter o volume necessário de água no circuito de lixiviação. Em contrapartida, em climas úmidos, a água infiltrada por chuvas pode resultar em quantidades crescentes de água no circuito, diminuindo a concentração da solução e comprometendo todo o processo industrial.

No processo de lixiviação em pilhas, 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.

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.).

A lixiviação em pilhas é possivelmente a forma de solubilização de minerais de cobre com maior número de operações no mundo. Utiliza minérios britados grosseiramente, organizados em pilhas sobre um terreno impermeabilizado com argila, asfalto ou lâminas de PEAD (polietileno de alta densidade) ou PVC (policloreto de vinila). Sob as pilhas é disposta uma rede de tubos plásticos perfurados que servem de dreno para a solução percolada. As pilhas são construídas com minério britado grosseiramente (50 mm a 60 mm). Quando a taxa de extração se reduz, evidenciando baixa concentração de cobre na lixívia, novas camadas de minério põem-se sobrepostas às pilhas, podendo atingir dezenas de metros de altura.

Um diagrama esquemático do processamento de minérios de cobre por pilhas de lixiviação é apresentado na Figura 4.3.

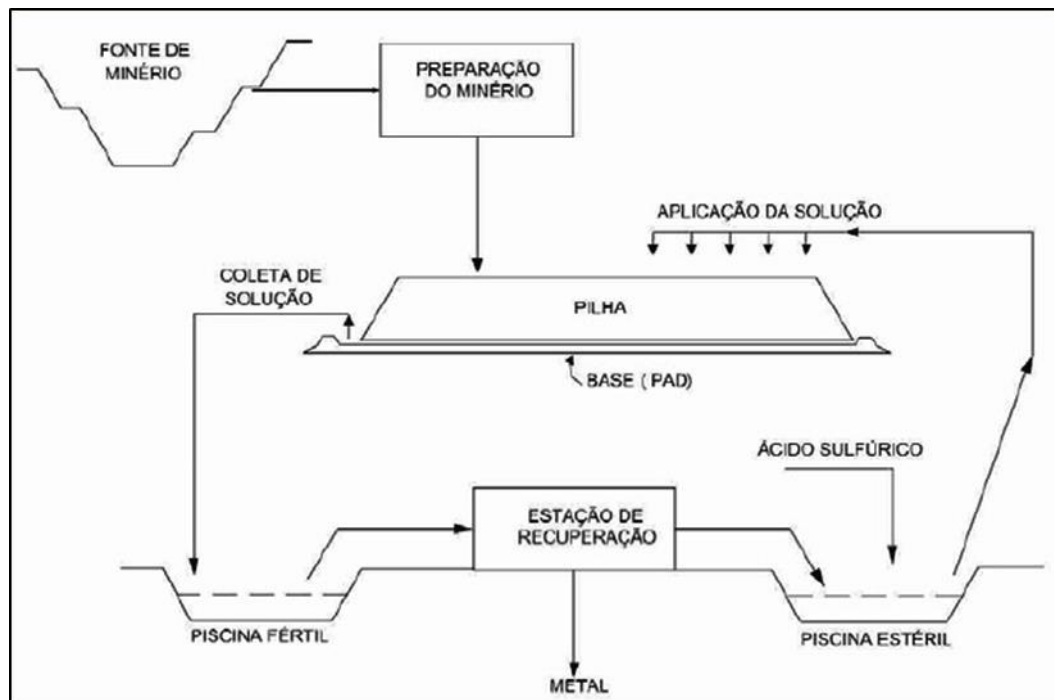


Figura 4.3 – Esquema do processo de uma pilha de lixiviação.

Fonte: Dorey, Zyl e Kiel, (1988).

De acordo com Carriconde (2011), uma variação da Lixiviação em Pilhas é denominada de Lixiviação em Leito Fixo, ou Processo TL. Neste processo, o minério, que é britado mais finamente antes de ser organizado em pilhas, recebe uma carga de ácido concentrado e repousa por cerca de 24 horas. Esse condicionamento proporciona intensa lixiviação inicial e aumenta a porosidade da pilha. Somente após o repouso o mesmo é organizado em pilhas de no máximo 3 m de altura; deste modo, apesar do manuseio constante de material, a velocidade de lixiviação permanece alta e existe um melhor controle do fluxo. Várias pilhas dispostas lado a lado são operadas em sequência, de forma que sempre há uma pilha sendo formada e outra descarregada. A Figura 4.4 apresenta um modelo de organização das pilhas frequentemente utilizado, a qual mostra que as pilhas são dispostas sobre uma inclinação no solo, de modo que a lixívia escorra por gravidade para a calha de coleta.

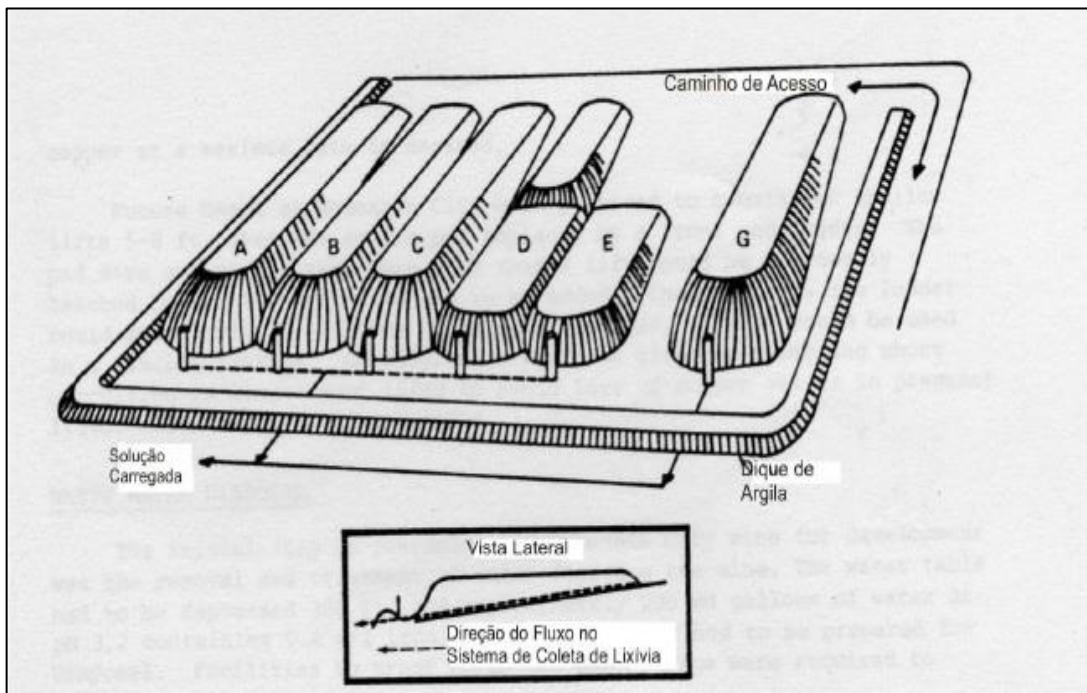


Figura 4.4 – Área de Lixiviação.

Fonte: C.B. Catanach. – Adaptada

b) Lixiviação em colunas

Partindo do pre-suposto de que o comportamento de um minério a ser submetido ao processo de lixiviação em pilha pode ser avaliado através de testes em colunas e em pequenas pilhas. Podem-se aperfeiçoar parâmetros como o consumo de lixiviante e a sua concentração no licor de lixiviação, a máxima extração dos metais e sua evolução temporal.

A Figura 4.5 representa um esquema da lixiviação em pilhas, simulando o comportamento do mesmo processo em colunas.

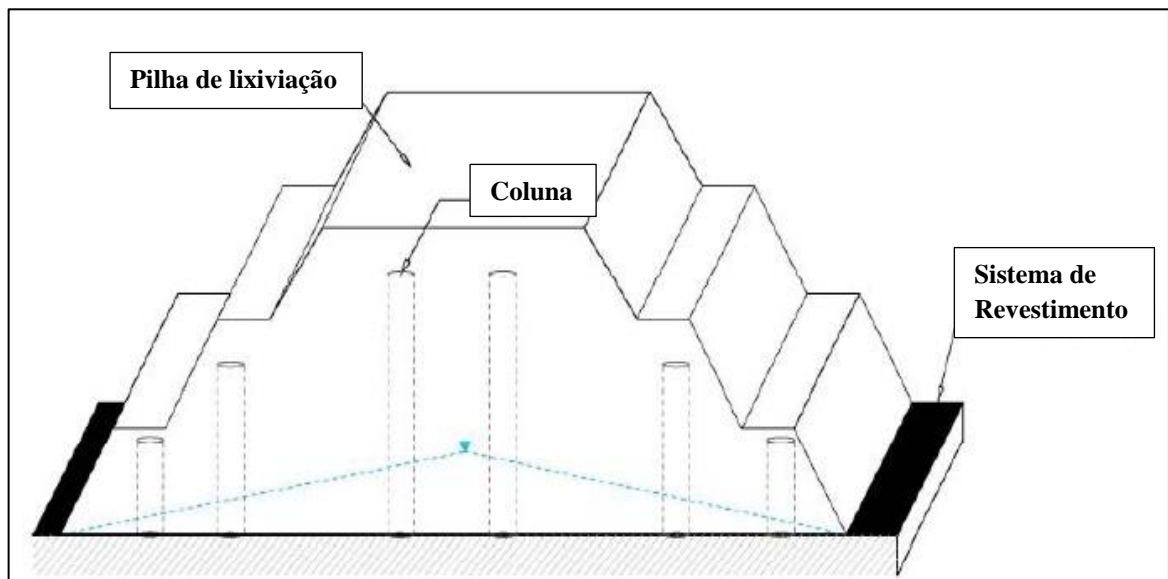


Figura 4.5 - Esquema da lixiviação em pilhas - Simulação em colunas.

Fonte: Ferraz, N. W. S. (2013)

Os revestimentos impermeáveis são necessários para conter a solução ácida dentro dos limites da instalação da pilha, prevenindo a possibilidade de vazamentos e contaminação do meio ambiente (PACHECO, 2005).

Cada pilha de lixiviação é única e o projeto da pilha e sua base (*pad*) requer a consideração de vários fatores como tipo de minério, conveniência da utilização de processo de lixiviação, topografia do terreno, propriedades geotécnicas e hidrológicas da área escolhida para a sua construção (PACHECO, 2005).

Neste trabalho, os ensaios de lixiviação serão realizados em colunas de leito fixo com percolação controlada. A presente pesquisa tem por propósito contribuir para a otimização do processo de lixiviação em colunas com leito fixo realizando estudos de viabilidade e aprimoramento da metodologia utilizada; levando-se em conta o estudo e variabilidade de parâmetros físicos e comportamento da vazão de reagentes líquidos durante o escoamento através do leito mediante a variação da porosidade durante a formação de finos devido à desagregação provocada pela reação química durante a lixiviação. Estes procedimentos são necessários para orientar o controle de acúmulo de reagentes na coluna de maneira a condicionar um melhor tempo de contato sólido-líquido, proporcionando com a segurança no caso de transbordamento de reagentes líquidos na parte superior da coluna modular e pelas emendas.

4.4 POROSIDADE

A porosidade \mathcal{E} é definida como a fração de volume de material ocupado por poros ou fração de vazios, variando de 0 até 1. Este espaço vazio (poro) pode ser conectado, isolado ou fechado. Os poros conectados definem a porosidade efetiva.

Um sólido é dito poroso quando apresenta cavidades e canais mais profundos do que largos. É importante diferenciar poros e vazios. Os vazios são espaços entre partículas e dependem da condição de compactação e do número de coordenação da partícula. Outra diferenciação necessária é aquela entre rugosidade e porosidade. A área de uma superfície rugosa é considerada como área superficial externa, enquanto que a área relativa às paredes dos poros abertos é considerada como área superficial interna. Porosidade refere-se ao volume de poros em um sólido. Estas são definições e terminologias da IUPAC.

A porosidade pode ser calculada mediante métodos experimentais, segundo Dullien (1979):

- Método direto: o volume da amostra, primeiramente, é medido. No passo seguinte esta amostra é destruída (trituração) para a eliminação de vazios e medição do volume das partículas solidas.
- Método de embebição: em um sistema de vácuo, a amostra é imersa em um fluido molhante por um longo tempo, permitindo assim o preenchimento de todos os poros. A amostra é pesada antes e depois deste processo. Conhecendo-se a densidade dos fluidos, é possível determinar o volume dos poros.
- Método de injeção de mercúrio: o volume dos poros é calculado pela imersão da amostra em mercúrio pressurizado. A pressão positiva é necessária, pois o fluido não é molhante.
- Método de expansão de gás: o volume da amostra é medido previamente. A amostra é então colocada em um recipiente de volume conhecido cheio de um gás também conhecido e conectado a outro recipiente a vácuo. Uma válvula que une os dois recipientes é aberta e o gás se expande no recipiente que está em vácuo reduzindo sua pressão. Utilizando a equação de gás ideal, é possível calcular o volume dos poros.
- Métodos óticos: mediante análise de imagem 2D, a porosidade é aproximada por um modelo estatístico. Pode-se também analisar a porosidade mediante tomografia de raios X. Nesta técnica de ensaio, uma série de radiografias são tomadas em diversas posições da amostra que, mediante um algoritmo computacional é convertida em uma imagem 3D.

- Porosidade pelo Princípio de Arquimedes: neste ensaio, baseado no princípio de Arquimedes, a massa da amostra é medida. Posteriormente, a superfície da amostra é impregnada com alguma substância não molhante (vaselina sólida), de tal forma que os poros sejam fechados. A seguir a amostra é mergulhada em água.

4.4.1 Escoamento em meios porosos

O escoamento de fluidos (líquidos ou gases) através de leitos de partículas (leito fixo) é uma prática muito comum. Em muitas operações industriais a fase fluida escoar através de uma fase sólida particulada (fase sólida estacionária).

Em um leito fixo o fluido passa através de um leito de partículas, em baixas velocidades, apenas percolando através dos espaços vazios existentes entre as partículas estacionárias.

Na coluna de leito fixo, o conjunto de partículas é uniformemente distribuído de modo a se manter estaticamente parado ao escoar uma determinada vazão fluida entre os espaços vazios contido entre as partículas, Figura 4.6 (SOUZA, 2003).

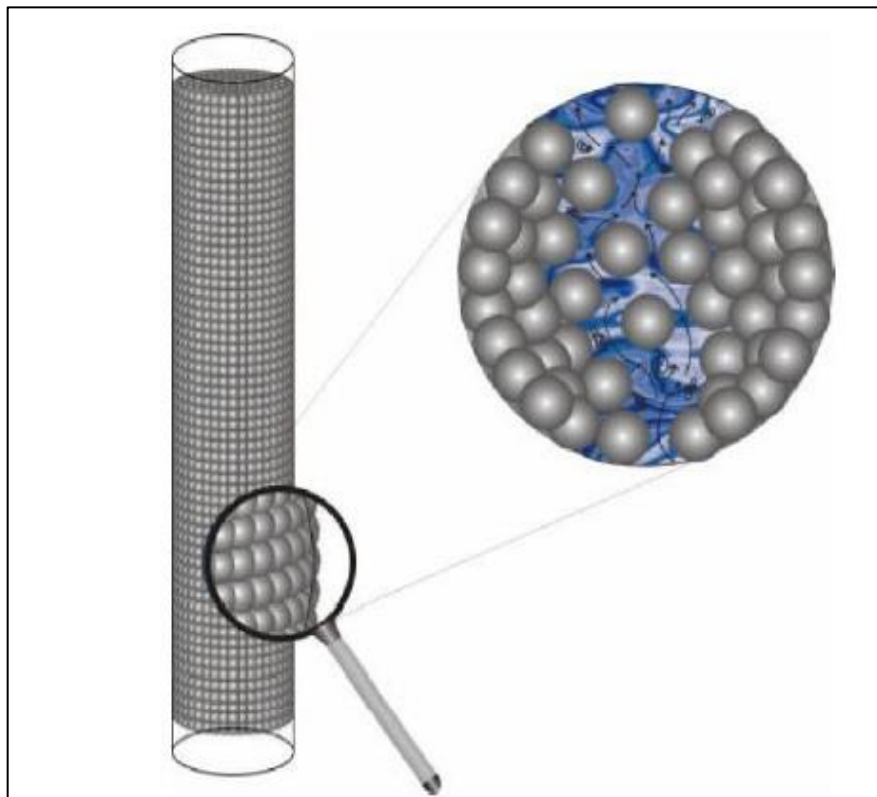


Figura 4.6 - Escoamento de um fluido em meio poroso.

Fonte: Souza (2003)

4.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO

De acordo com Carvalho (2014), o controle do teor do licor na coluna em função do tempo pode ser obtido com a observação de dados experimentais e o equacionamento de parâmetros físicos. Sabe-se que, para um determinado estágio, a quantidade que entra (E) na coluna menos a quantidade que sai (S) é igual ao que acumula (Ac).

$$E - S = Ac \quad (4.5)$$

A equação (4.5) pode ser representada por:

$$q_e C_o(t) - q_s C_l(t) = V \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \quad (4.6)$$

onde C é a concentração, V é o volume, q_e é a quantidade que entra e q_s é a que sai.

Utilizando-se da Transformada de Laplace na equação (4.6), o domínio tempo é transformado em frequência, logo:

$$q_e C_o(S) - q_s C_l(S) = V S C_l(S) \quad (4.7)$$

Dividindo-se (4.7) por q_s e resolvendo em função de C_l obtém-se:

$$C_l(S) = \frac{\frac{q_e}{q_s}}{\left(\frac{V}{q_s} S + 1\right)} C_o(S) \quad (4.8)$$

Sabendo-se que a concentração da alimentação não muda ao longo de cada operação da lixiviação, podemos representar a Transformada de Laplace na equação (4.8) na função constante $\frac{a}{S}$. Assim, tem-se:

$$C_l(S) = \frac{\frac{q_e}{q_s}}{\left(\frac{V}{q_s} S + 1\right)} \frac{a}{S} \quad (4.9)$$

Considerando-se $K = \frac{qe}{qs}$ e $\epsilon = \frac{V}{qs}$; teremos:

$$C_I(S) = a K \frac{1}{S(\epsilon S + 1)} \quad (4.10)$$

Dividindo-se (4.10) por ϵ , temos:

$$C_I(S) = \frac{aK}{\epsilon} \left[\frac{1}{S\left(S + \frac{1}{\epsilon}\right)} \right] \quad (4.11)$$

Utilizando-se da Tabela 4.1 citada por NUNES (2013) e considerando-se $a = \frac{1}{\epsilon}$ é possível obter-se a Transformada inversa de Laplace para o termo $S \left(S + \frac{1}{a} \right)$:

Tabela 4.1: Transformadas inversas de Laplace

$\mathcal{L} \{F(s)\}$	função no domínio do tempo
1	$\delta(t)$ impulso unitário
$\frac{1}{s}$	$u(t)$ degrau unitário
$S \left(S + \frac{1}{a} \right)$	$\frac{1}{a} (1 - e^{-at})$

Fonte: Edwards, C. H. Jr. – Adaptada

Desta forma, tem-se:

$$C_I(t) = \frac{aK}{\epsilon} \frac{1}{\frac{1}{\epsilon}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\epsilon}} \right) \quad (4.12)$$

Logo, tem-se como resposta a equação 4.13, que prediz o comportamento da concentração na extração de cobre em função do tempo:

$$C_I(t) = a K \left(1 - e^{-\frac{t}{\epsilon}} \right) \quad (4.13)$$

4.6 AGLOMERAÇÃO

A necessidade de recuperar partículas finas oriundas de um processo de beneficiamento de minérios ou de resíduos provocou o desenvolvimento da tecnologia de *aglomeração*, visa o aproveitamento comercial da fração fina desses materiais e diminui o impacto ambiental causado pela produção de material fino ou particulado.

Aglomeração é o termo geral empregado para designar algumas operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos, ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, entre si, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso.

Nas áreas de mineração e metalúrgica, o termo aglomeração designa operações aplicadas aos minérios e/ou concentrados de granulação fina não adequado, para utilização em processos industriais.

Segundo Nosrati *et al*, (2011), para conseguir um processo de lixiviação eficiente, a criação de uma pilha porosa com alta permeabilidade é essencial. Partículas finas de minério afetam a permeabilidade da pilha, pois, quando não aglomeradas, podem migrar para o interior da pilha, causar o entupimento dos canais de fluxo e produzir grandes áreas sem acesso para a solução lixivante. A distribuição ineficiente da solução diminui a recuperação do metal e aumenta os custos operacionais da pilha.

A aglomeração dos finos do minério antes da construção da pilha oferece vários benefícios, tais como: maior permeabilidade, fluxo rápido e uniforme da solução lixivante pela pilha, aumento da recuperação de metal, menor tempo de ciclo de lixiviação e, por consequência, aumento na produtividade e menor custo por tonelada (KODALI *et al*, 2011).

No presente trabalho, será realizado em escala laboratorial, ensaios de aglomeração em tambor com os finos do cobre oxidado, usando ácido sulfúrico como agente ligante. Foram analisados a influência da velocidade de rotação, da umidade total do minério e da relação ácido/água no processo de aglomeração, afim de que se chegasse a um produto aglomerado de boa resistência.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A execução dos experimentos foi realizada na Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – FEMMA, no Campus de Marabá-Pa da Unifesspa. Dividida em duas etapas: a primeira feita na Mini Usina de Beneficiamento de Minério e a segunda no Laboratório de Hidro e Eletrometalurgia – LHE.

5.1 COLETA DA AMOSTRA

A matéria prima deste experimento foi coletada em uma ocorrência na mina do Sossego, pertencente a Vale e que está localizada na Província Mineral de Carajás no município de Canaã dos Carajás, no sudeste do Pará, conforme mostrado na Figura 5.1.

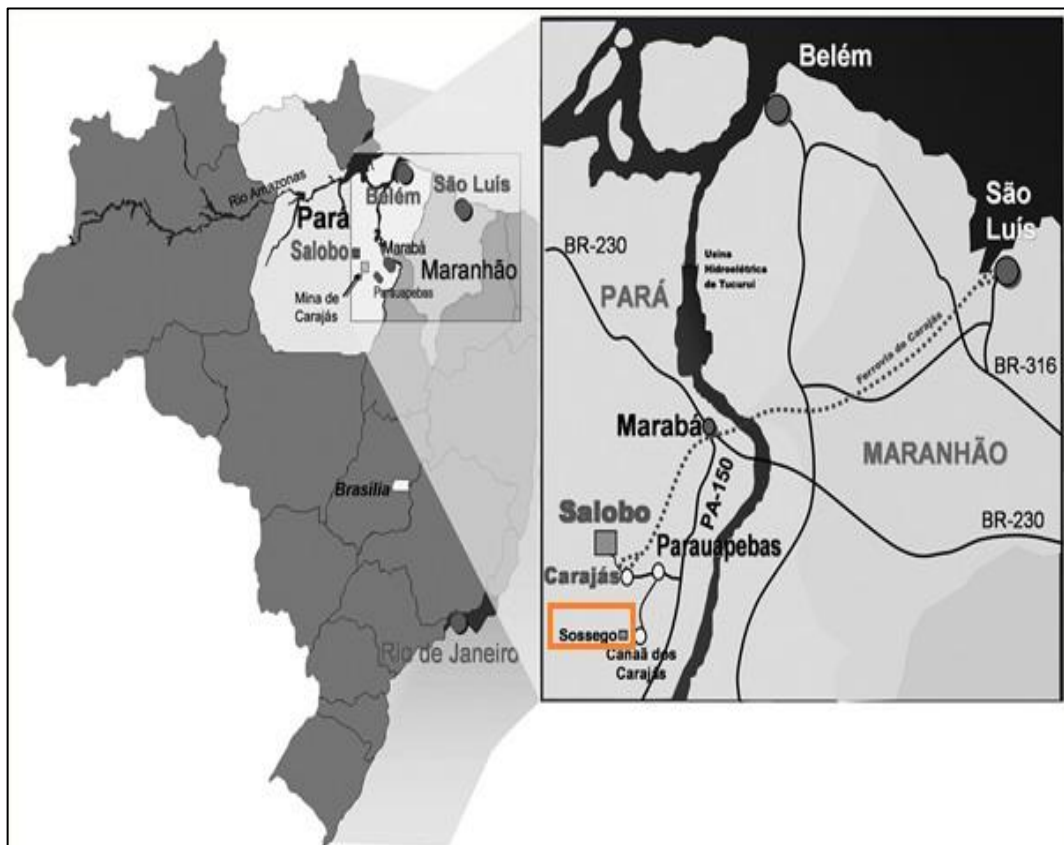


Figura 5.1 - Localização da mina do Sossego (sem escala)

Fonte: <http://periodicos.ufpb.br/> - Adaptada

A amostra para a realização dos ensaios foi constituída por material que atualmente está sendo estocado na mina. É proveniente do decapeamento da camada de minério oxidado e que localiza-se sobre a camada de minério sulfetado de cobre. A Figura 5.2 mostra uma amostra de rocha contendo minério de cobre sulfetado (parte metálica), minério de cobre

oxidado (em verde), carbonato de cobre (em azul) e minério de ferro oxidado (cor de ferrugem).



Figura 5.2 - Amostra de rocha apresentando minerais de cobre na forma de sulfetados e oxidados.
Fonte: Autor

5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Na Mini Usina de Beneficiamento de Minério, a amostra passou por um processo de britagem - britador de mandíbulas BM 120080, peneiramento primário - Peneira Vibratória Engendrar modelo PV 03 de três decks (com aberturas de 12,3mm; 6,3mm e 2,3 mm) e peneiramento secundário - Agitador de Peneiras Bertel série 1206 número 216 Figura 5.3.

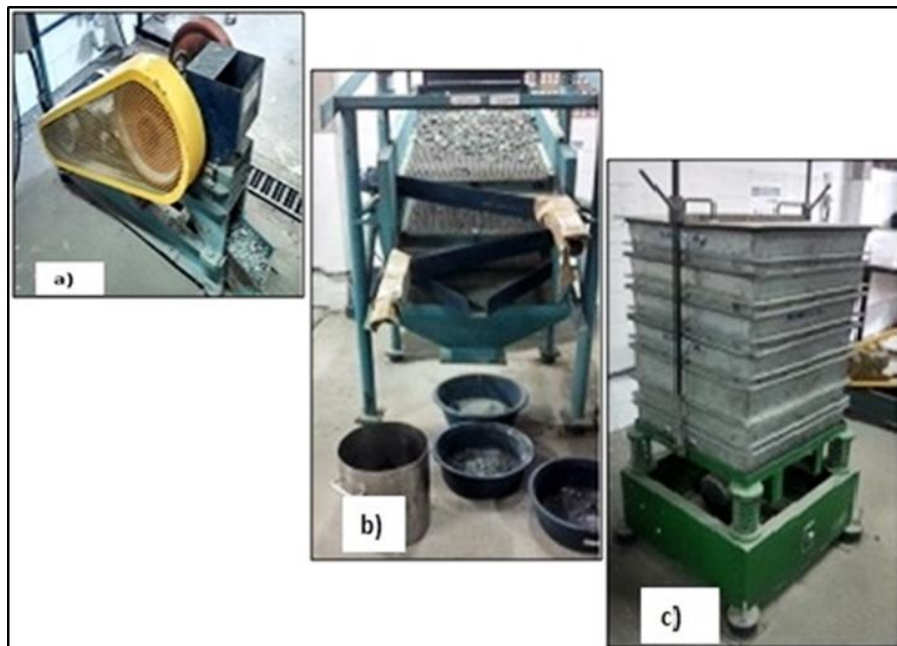


Figura 5.3 - Preparo da amostra: a) britagem; b) peneiramento primário; c) peneiramento secundário.

Fonte: Autor

Após a etapa de britagem o material foi conduzido para o peneiramento primário, na qual se recolheu o retido e passante no terceiro deck. Seguindo para o segundo peneiramento para uma melhor classificação. Deste peneiramento separou-se para a aglomeração o passante na abertura de 28# (6,0kg) classificado como finos, o retido nesta mesma malha e passante na abertura 20# (18,0kg) foi classificado como britado, com granulometria de aproximadamente 5mm.

Na etapa de aglomeração a amostra foi homogeneizada e quarteada para separar alíquotas de 1,6kg de minério. A fração granulométrica utilizada nos ensaios foi abaixo de 5 mm, sendo 7,56% passante em 200# ($<75\mu\text{m}$). A densidade e a umidade da amostra são, respectivamente, $2,573\text{ g/cm}^3$ e 2,58%.

Os ensaios foram conduzidos em um tambor de plástico de escala laboratorial (28 cm de diâmetro e 27 cm de altura) com velocidade de rotação parametrizada em um moinho de jarros Figura 5.4. Manteve-se constante a alimentação de minério e o tempo de aglomeração 30 minutos. A velocidade de rotação adequada à aglomeração foi determinada analisando-se o comportamento do minério dentro do tambor a várias velocidades entre 10 a 30rpm.



Figura 5.4 - Tambor de aglomeração.

Fonte: Autor

Na avaliação da qualidade dos aglomerados formados, além do aspecto visual foram feitos testes de resistência e integridade. Finalizados os ensaios de aglomeração obteve-se o seguinte produto que depois fora lixiviado: minério de cobre oxidado aglomerado com 75% de grossos e 25% de finos (17,5% de H_2SO_4 | 12,5% de água).

No Laboratório de Hidro e Eletrometalurgia foram desenvolvidos, primeiramente, ensaios de lixiviação com o minério de cobre oxidado britado para se determinar os parâmetros que seriam utilizados na lixiviação do cobre oxidado aglomerado. Em todos os

ensaios realizou-se uma análise química por titulometria, método da Iodometria, para a determinação dos teores de recuperação do cobre. Assim, os parâmetros foram otimizados: 8% de H_2SO_4 , relação líquido/sólido 0,8/1 e tempo de residência total de 2 horas.

5.3 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO EM COLUNAS

Com os parâmetros pré-determinados realizou-se a lixiviação do minério de cobre oxidado aglomerado em colunas. Nesta fase optou-se por se trabalhar em béqueres de 1000 ml com diâmetro interno de 10 cm, pois estes apresentaram medidas aproximadas das colunas e maior facilidade de manuseio Figura 5.5.

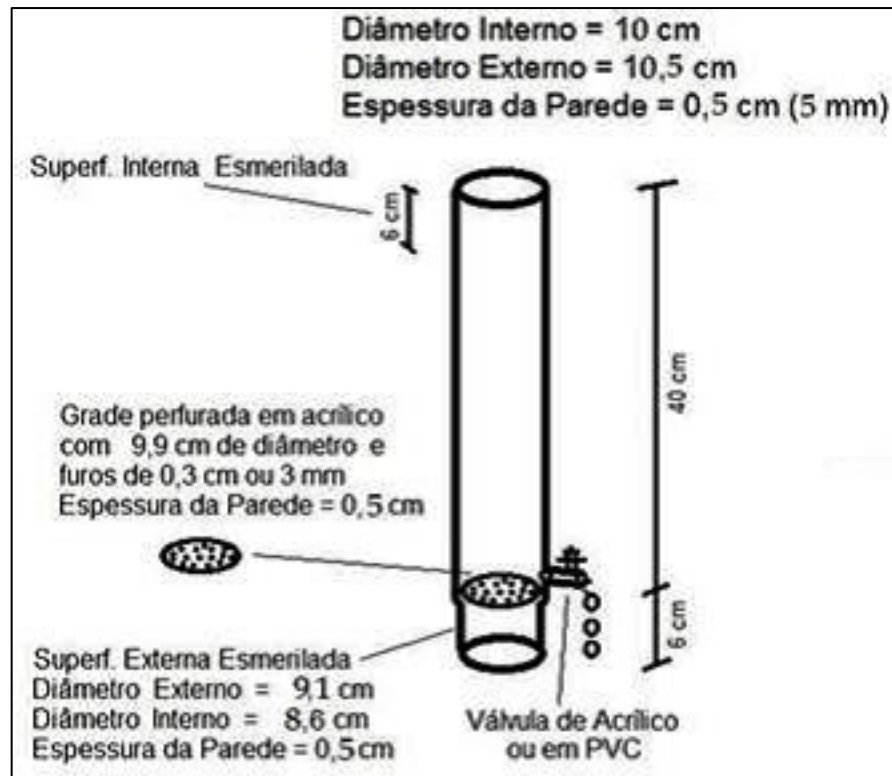


Figura 5.5 - Dimensões da Coluna

Fonte: Autor

Os ensaios de lixiviação do cobre oxidado aglomerado começaram com uma homogeneização e quarteamento de 1,2 kg Figura 5.6, que depois fora pesado em seis porções de aproximadamente 200g cada em uma balança analítica Marte - AL500C. Na sequência, as amostras foram transferidas para os béqueres e preencheu-se com a solução ácida Figura 5.7.



Figura 5.6 - Quarteamento das amostras de cobre aglomerado.

Fonte: Autor



Figura 5.7 - Ensaio de lixiviação realizados em béqueres.

Fonte: Autor

Ainda nesta etapa realizou-se a lixiviação de mais duas amostras, com os mesmos parâmetros, para os tempos de 150 e 180 min. Na sequência, efetuou-se a filtragem do licor nos tempos de 20, 40, 60, 80, 100 e 120 min, Figura 5.8, o mesmo também foi feito para os tempos de 150 e 180 min. O licor seguiu para uma análise química e o rejeito foi utilizado para realização dos ensaios de porosidade.



Figura 5.8 - Filtragem do licor

Fonte: Autor

5.4 ENSAIOS DE INTEGRIDADE E POROSIDADE

5.4.1 Ensaios de integridade

O método para determinar a integridade do cobre oxidado aglomerado consistiu em submergir 7,5 g desse material em 100 ml de solução de 8% H_2SO_4 e registrar através de fotos o comportamento de sua desintegração total em determinados intervalos de tempo. Os tempos de registros foram de 0 min, 5 min, 10 min e 17 min. O tempo que o aglomerado leva para se desintegrar dá uma indicação da sua força de re-umedecimento.

5.4.2 Ensaios de porosidade

Os ensaios de porosidade foram realizados através do método direto. Utilizou-se duas provetas, uma preenchida com minério (V_t) e outra com água (V_L). Após o registro do volume aparente de minério e o volume de água, despejou-se o minério dentro da proveta com água e anotou-se o volume deslocado como (V_p), representado na Figura 5.9.

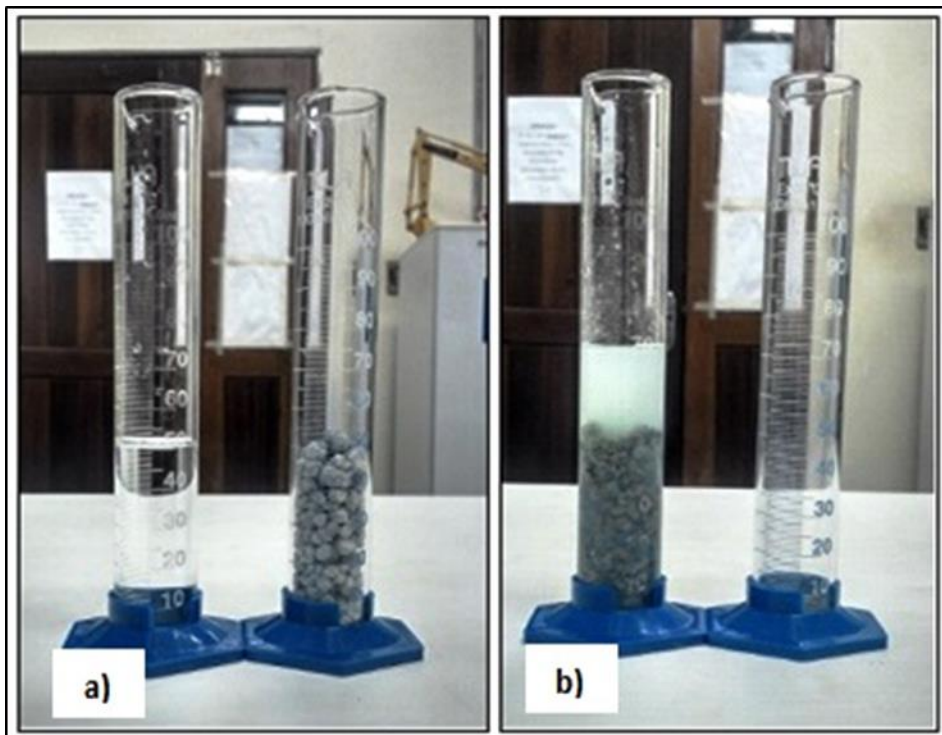


Figura 5.9 - Ensaios de Porosidade: a) medição de volume de água e volume total; b) medição do volume deslocado.

Fonte: Autor

Diante dos dados obtidos encontrou-se o volume dos vazios (V_e) e realizaram-se os cálculos de porosidade equação (5.3).

$$\mathcal{E} = V_e / V_t \quad (5.3)$$

onde $V_e = V_t - V_p$

Nestes ensaios calculou-se a porosidade inicial do minério aglomerado antes da lixiviação e nos tempos seguintes de 20, 40, 60, 80, 100, 120, 150 e 180 min.

5.5 MODELAMENTO MATEMÁTICO COM VARIAÇÃO DA POROSIDADE

No modelamento da equação (4.13) observou-se que não foi considerada a porosidade do leito que segundo os resultados dos testes de integridade do meio, varia com o tempo. Este fenômeno provoca uma certa defasagem entre os resultados experimentais e teóricos. Logo, propõe-se um remodelamento matemático, em que se insere a porosidade do leito em função do tempo de contato com o reagente lixiviante, como mostra a equação (5.4).

$$q_e C_0(S) - q_s C_I(t) = [(1 - \varepsilon) V] \frac{\partial c}{\partial t} \quad (5.4)$$

Trabalhando-se esta equação chega-se a:

$$C_I(t) = a K \left[1 - e^{-\frac{bt}{[(1-\varepsilon)]}} \right] \quad (5.5)$$

onde $b = \frac{1}{\varepsilon}$.

Em que a porosidade varia com o tempo. Os ensaios demonstraram tal variação através de um modelamento matemático em que chegou-se a seguinte função exponencial:

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 - A \left[\frac{1 - e^{-Bt}}{1 + e^{-[1-Bt]^2}} \right] \quad (5.6)$$

onde A e B são constantes de ajuste e dependem de propriedades físicas intrínsecas do minério. Essas constantes podem ser determinadas através do Método dos Mínimos

Quadrados para funções não lineares ou graficamente. O melhor resultado obtido foi: $A = 0,3$ e $B = 0,0275$.

Os valores encontrados na função temporal da porosidade são inseridos na equação (5.5) e fazendo-se os ajustes A e B na concentração para os valores experimentais, chega-se a seguinte função:

$$C_I(t) = a K \left[1 - e^{-\frac{bt}{[1-\varepsilon(t)]}} \right] \quad (5.7)$$

A equação 5.7 prediz o comportamento da concentração na extração de cobre em função do tempo de contato, considerando-se a variação da porosidade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados.

6.1 INTEGRIDADE

Os resultados destes testes indicaram uma rápida desintegração do cobre oxidado aglomerado. Percebeu-se que em 17 min a amostra apresentou desintegração total quando submergida na solução ácida. A Figura 6.1 mostra as etapas do teste de integridade.

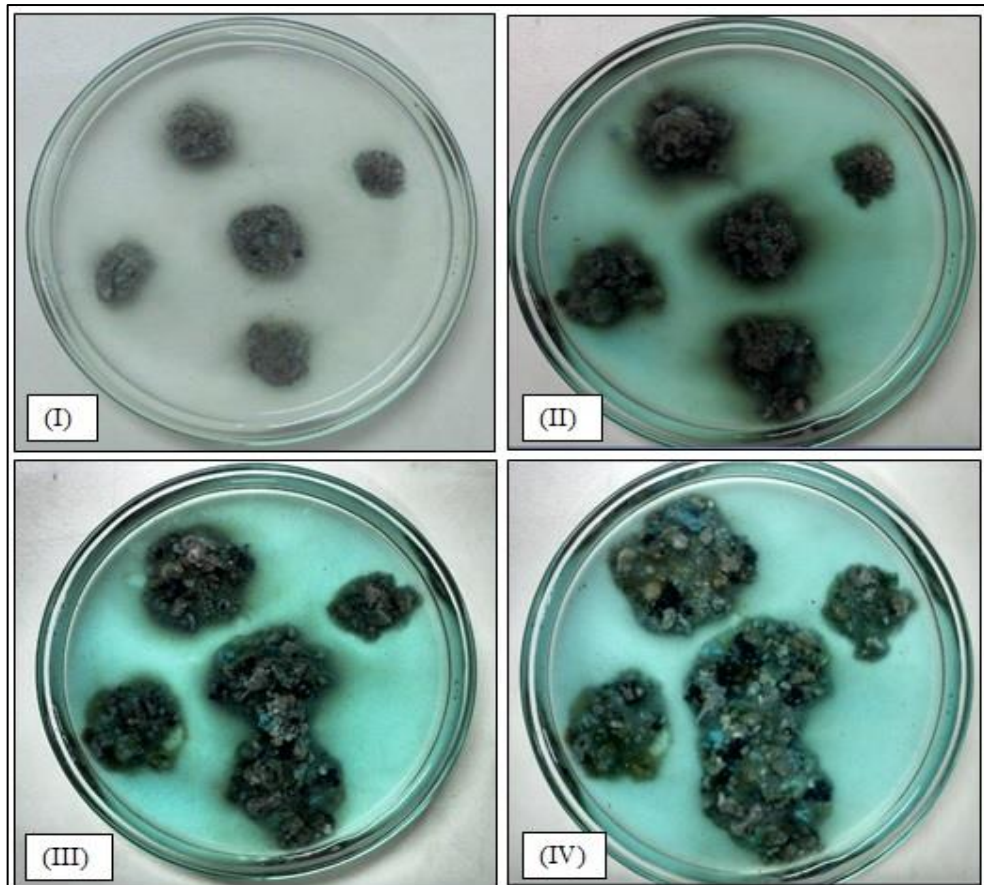


Figura 6.1 - Resultado do teste de integridade – Aglomerado: (I) Início do teste; (II) e (III) desintegração parcial; (IV) desintegração total.

Fonte: Autor

Os resultados deste teste indicam baixa resistência do aglomerado quando submetido ao agente lixiviante H_2SO_4 . Assim, pode-se compreender a diminuição da porosidade com o tempo, uma vez que a partículas finas em desintegração começam a preencher os espaços vazios.

6.2 POROSIDADE

Os resultados dos testes de porosidade do minério submetido aos ensaios de lixiviação ácida são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Ensaios de porosidade.

Tempo de filtragem (min)	Porosidade
0	0,614
20	0,581
40	0,5
60	0,425
80	0,405
100	0,349
120	0,321
150	0,321
180	0,321

Fonte: Autor

A Tabela 6.2, mostra que na prática, o valor da porosidade segue diminuindo na medida em que se aumenta o tempo de contato com o agente lixiviante e que no tempo de 120 min ela permanece constante. Este fato é melhor evidenciado na Figura 6.2.

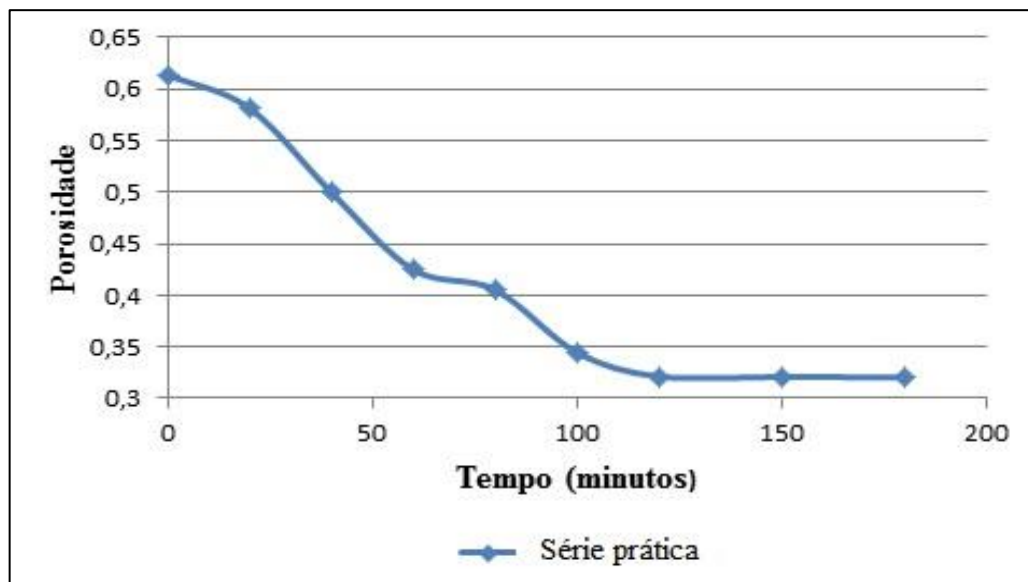


Figura 6.2 - Curva prática da porosidade na cinética de extração do cobre oxidado aglomerado.

Fonte: Autor

6.3 INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO MODELO MATEMÁTICO

Diante dos parâmetros devidamente ajustados, fez-se uma comparação entre os valores da porosidade prática e teórica Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Comparação de porosidade prática e teórica.

Tempo de filtragem (min)	Porosidade prática	Porosidade teórica
0	0,614	0,614
20	0,581	0,577
40	0,5	0,503
60	0,425	0,423
80	0,405	0,369
100	0,349	0,341
120	0,321	0,327
150	0,321	0,319
180	0,321	0,319

Fonte: Autor

Os resultados da Tabela 6.3, foram plotados para a obtenção das curvas da porosidade prática e teórica, como mostra a Figura 6.3.

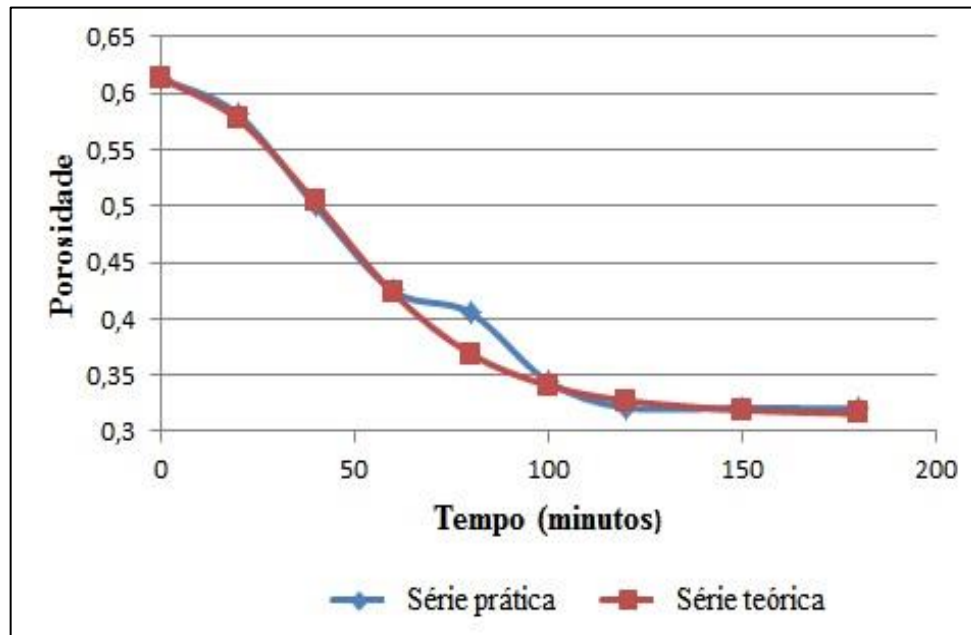


Figura 6.3 - Curva prática e teórica da porosidade na cinética de extração do cobre oxidado aglomerado.
Fonte: Autor

Através da análise das curvas apresentadas na Figura 6.2, nota-se que o modelo se mostrou adequado para a prescrição do comportamento teórico da porosidade, uma vez que se pode perceber que vários resultados obtidos na prática se enquadraram com os resultados teóricos, como os referentes aos tempos de 20, 40, 60, 100, 120, 150 e 180 min. Porém no

tempo de 80 min os valores teóricos não condizem com os valores práticos, tal fenômeno pode ser explicado devido à dificuldade de desintegração do minério britado, pois neste ponto o minério aglomerado desintegra-se totalmente e o britado por ser mais resistente demora a se desintegrar.

No tempo de 100 min as curvas voltam a se enquadrarem, demonstrando que o britado também está na sua desintegração final e em 120 min começam a permanecer constantes.

6.4 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO COM VARIAÇÃO DA POROSIDADE

Na expectativa de validação deste modelo realizaram-se aplicações do mesmo em alguns resultados gerados anteriormente.

Utilizando-se os resultados de Carvalho (2014) para o modelo sem a inserção da porosidade tem-se a Tabela 6.4 e Figura 6.4.

Tabela 6.4: Resultados teóricos dos teores de cobre presente no licor

Tempo (hs)	Teor no Licor (%)	Inv. Laplace
0,08	0,05	0,023
0,25	0,11	0,068
0,5	0,15	0,131
1	0,19	0,238
2	0,28	0,400
3,5	0,38	0,550
12	0,68	0,733
19	0,72	0,739
24	0,74	0,740
25	0,74	0,740
27	0,74	0,740
29	0,74	0,740
48	0,74	0,740

Fonte: Carvalho (2014)

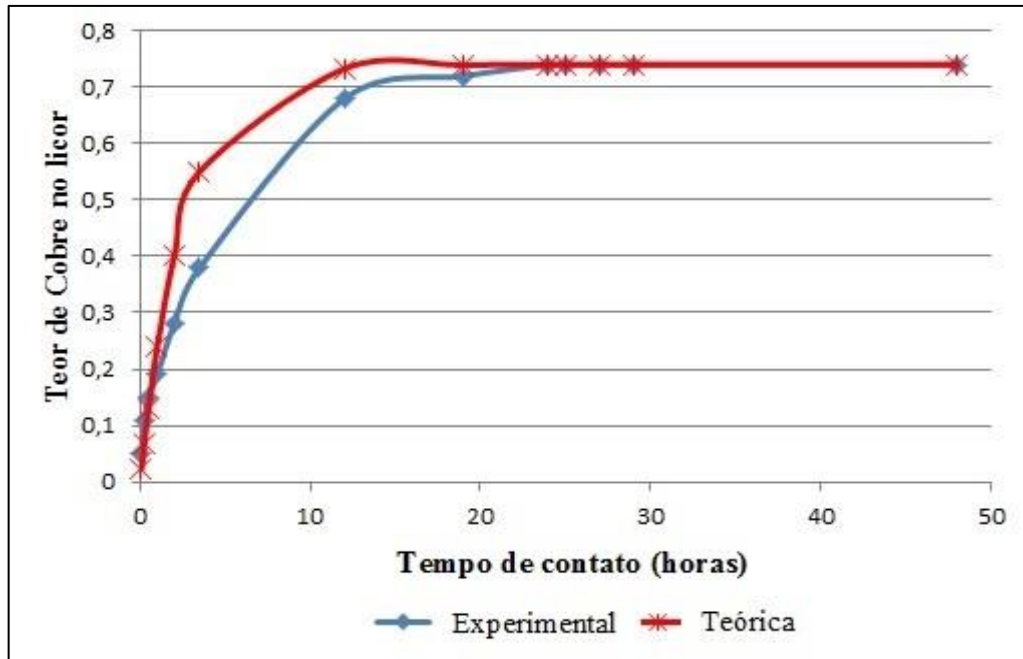


Figura 6.4 - Curva teórica e experimental da cinética de extração do cobre oxidado sem inserção da porosidade. Fonte: Carvalho (2014).

Neste gráfico os coeficientes de ajuste da equação foram: $A = 0,0074$ e $B = 0,389$.

Fazendo-se uso do modelo a partir da inserção da função de porosidade, com coeficientes de ajuste $A = 0,0074$ e $B = 0,083$, tem-se a Figura 6.5.

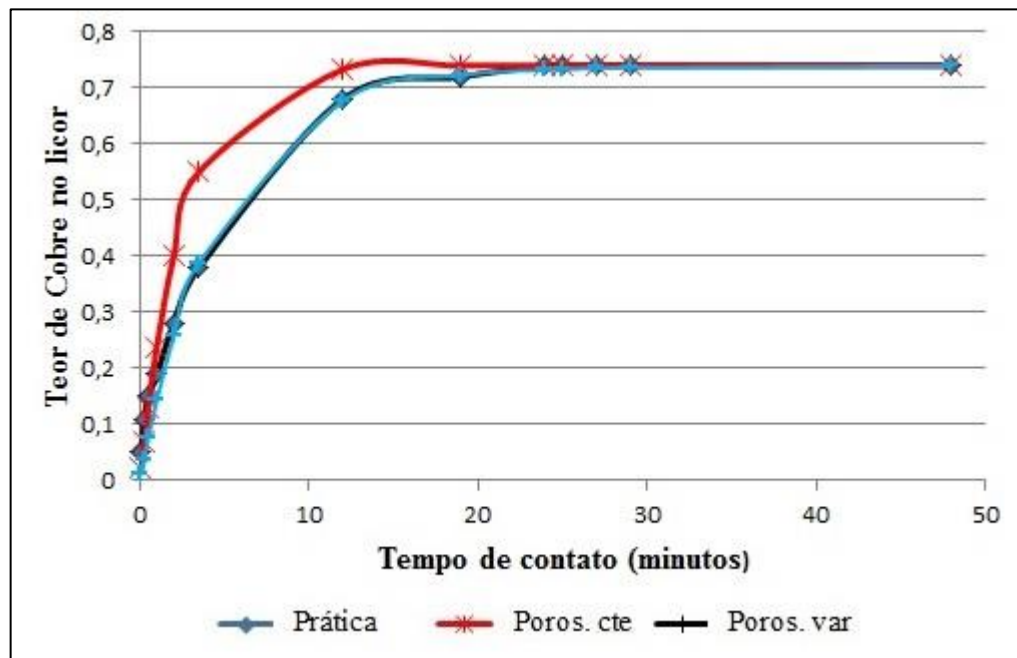


Figura 6.5 - Curva teórica e experimental da cinética de extração do cobre oxidado com e sem inserção da porosidade.

Fonte: Carvalho (2014) – Adaptada

Os resultados gerados na Figura 6.5, indicaram que a curva do modelo com variação da porosidade sobrepôs a curva do modelo para a os resultados da porosidade na prática. A

curva do modelo com a porosidade constante divergiu da prática. Isto prova que a inserção da porosidade no modelo os resultados ficaram mais ajustados.

Fazendo-se uma comparação para experimentos com amostras de cobre de granulometria diferentes, fez-se uso dos resultados de Borges (2014), com porosidade constante e termos de ajuste $A = 0,0074$ e $B = 0,389$, fez-se uma comparação com o novo modelo para a variação da porosidade, agora com os termos de ajuste $A = 0,0074$ e $B = 0,022$, como mostra a Tabela 6.5 e Figura 6.6.

Tabela 6.5: Resultados teóricos da recuperação de cobre presente no licor.

Tempo (min)	Teor no Licor (%)	Inv. Laplace
5	0,092	0,052
15	0,123	0,120
30	0,144	0,168
45	0,163	0,190
60	0,183	0,199
120	0,205	0,205
180	0,206	0,205
240	0,193	0,205
300	0,193	0,205
360	0,195	0,205

Fonte: Borges (2014)

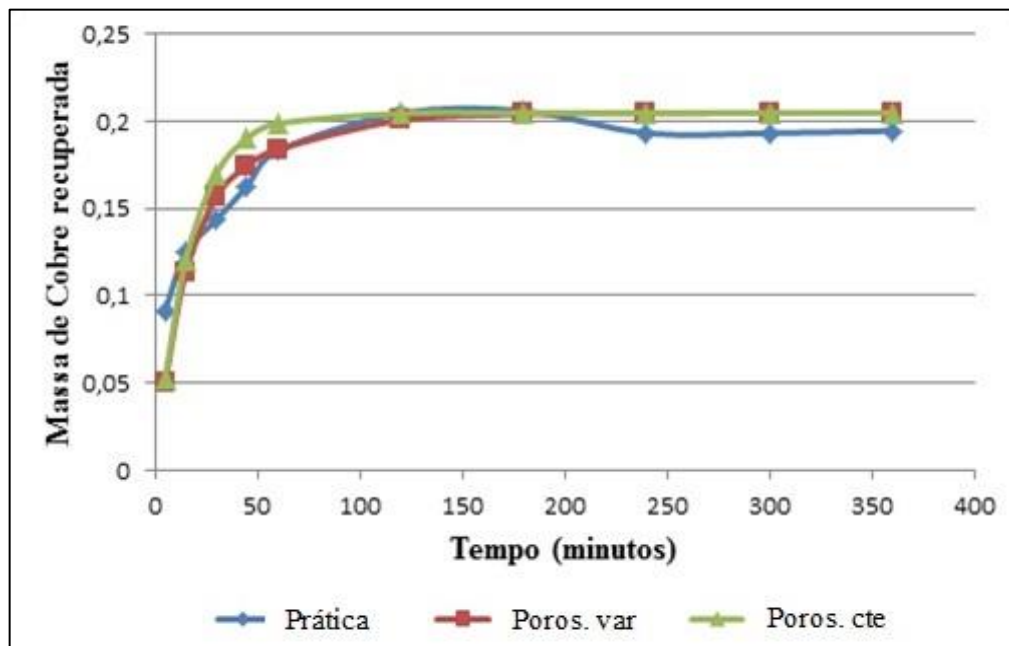


Figura 6.6 - Curva teórica e experimental da cinética de extração do cobre oxidado com e sem variação da porosidade.

Fonte: Borges (2014) – Adaptada

Observando-se o comportamento das curvas prática, teórica com e sem a variação da porosidade na Figura 6.6, constatou-se uma menor influência da porosidade quando comparada a outros resultados. Este fato é possivelmente explicado devido ao menor diâmetro das partículas utilizadas no experimento. Assim, constatou-se que quanto menor o diâmetro das partículas menor será a influência da porosidade na difusão do metal no líquido extrator. Isto é observado na medida em que se faz a comparação entre os resultados de Carvalho (2014) e Borges (2014).

7 CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões para o estudo da influência da porosidade no controle da cinética de extração do cobre oxidado, pela técnica de aglomeração, a partir da etapa de lixiviação do minério de cobre oxidado em colunas com leito fixo.

Os resultados dos ensaios práticos para a porosidade do minério aglomerado quando submetido ao agente lixiviante, indicaram que houve uma diminuição contínua do seu valor com o passar do tempo. No tempo de 120 min, a porosidade permanece com pouca variação, demonstrando que tanto o aglomerado como o britado presente na aglomeração esteja caminhando para um valor de porosidade constante. Isto ocorreu apenas no primeiro estágio, após os próximos estágios a influencia da porosidade permanece constante, facilitando o controle da operação.

Analisando a curva para o modelo com inserção da porosidade como um parâmetro variante na cinética de extração do cobre oxidado, pode-se perceber que ela se enquadrou na maioria dos pontos apurados. Apenas no tempo de 80 min a curva teórica não predisse o comportamento da curva prática. Uma possível explicação para a fato é que neste ponto o minério aglomerado desintegra-se totalmente e o britado por ser mais resistente demora a se desintegrar.

Observando o comportamento das curvas para o modelo com e sem a inserção da porosidade, ficou evidente a otimização da predição do comportamento das curvas com a inclusão da função da porosidade como uma variante, pois a mesma se sobrepôs aos valores da porosidade na prática, na maioria dos pontos.

Quando comparado os resultados de Carvalho (2014) e Borges (2014), para o comportamento da concentração com a porosidade como uma variante do processo, registou-se que a influência da porosidade diminui com a redução do tamanho das partículas.

A partir da análise dos resultados do teste de integridade do minério de cobre oxidado aglomerado submerso em solução de 8% H_2SO_4 , pode-se concluir que sua resistência foi baixa e não se comportou de maneira desejada. Deve-se, por tanto, estudar mecanismos que consigam aumentar essa resistência, adicionando-se material ligante no ato da aglomeração, como, por exemplo, cimento ou até mesmo material argiloso.

É importante salientar que, embora os resultados sejam adequados para esta etapa da pesquisa, deve ser considerada a importância de desenvolver-se um programa de testes de porosidade mais apurados, haja visto que o método direto, utilizado no trabalho, é sujeito a erros de interpretação.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, F.A.; CHASIN, A.A.M. **Metais – Gerenciamento da Toxicidade**. São Paulo: Atheneu, p. 143- 182, 187-199, 263-296, 2003.
- BORGES, D. R. **Levantamento de Parâmetros Ótimos para Extração Metalúrgica do Cobre Oxidado por Lixiviação em Colunas com Leitos Fixos**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente). Marabá: UFPA, 2014.
- BRAGA, A.L. *et. al.* **Estudo do comportamento da recuperação metalúrgica do cobre oxidado da mina do Sossego de Canaã submetido a lixiviação com H₂SO₄**. In: XXIV ENTMMME. Salvador – Bahia: 2011.
- CARRICONDE, L. D. **Estudo Prévio da Viabilidade de Extração de Cobre a partir de Minérios Oxidados por Lixiviação Ácida**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química, p. 8 - 10. Dezembro de 2011.
- CARVALHO, C. C. **Estudo do Comportamento Cinético da Extração de Cobre do Minério Oxidado da Mina do Sossego em Canaã dos Carajás com H₂SO₄ em colunas**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente). Marabá: UFPA, 2014.
- CIMINELLI V.S.T., 2009. **Hidrometalurgia**, capítulo 4. Online: <http://www.cetem.gov.br/tendencias/livro/PARTE%202%20TECNOLOGIA%20MINERAL/CAP%204%20HIDROMETALURGIA%20FINALIZADO>. Acesso em jun. 2014.
- DAVENPORT, W.G. **Extractive Metallurgy of Copper**, 4th ed., 2002, Oxford, GB, P.432.
- DOMIC, E. M. **Hidrometalurgia Fundamentos, Procesos y Aplicaciones**. 1^{ra}. Ed., Santiago: Andros Impresores Ltda, p. 4 – 10, 267 – 312 e 315 – 332, 2001.
- FERRAZ, N.W.S. **Levantamento de Parâmetros Físicos em Colunas de Extração Mineral no Estudo de Aproveitamento do Cobre Oxidado de Canaã dos Carajás/PA**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente). Marabá: UFPA, 2013.
- LEHNE, R.W. **Copper, its nature, its extraction. The world of metals - Copper. Frankfurt**, ed, Metallgesellschaft, GER, 1993. p. 25-27.
- PAIVA, R.S. *et. al.* **Estudo Preliminar do Escoamento Líquido em Meio Poroso Aplicado no Controle da Lixiviação em Colunas do Minério de Cobre Oxidado da Mina do Sossego - Canaã dos Carajás/PA**. Universidade Federal do Pará-UFPA. 2011.
- NUNES, F.N. **Modelagem e Controle em Colunas de Extração Mineral**. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente). Marabá: UFPA, 2013.
- PACHECO, P. G. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ, p.25. Agosto de 2005.
- PEREIRA, G. S. P. **Lixiviação em pilhas de minério oxidado de cobre**. 2000. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

P. Kodali, T. Depci, N. Dhawan, X. Wang, C.L. Lin, J.D. Miller, Evaluation of stucco binder for agglomeration in the heap leaching of copper ore, **Minerals Engineering**, Vol. 24, No. 8, 2011. Acesso em jun. 2014.

SILVA, A.R.B. **A Indústria Mineral no Pará**, Edição Própria, Belém, 2012, P.82.

SILVA, S.A. **Uso de Buscas de Documentos de Patentes na Área de Processamento Mineral – Um estudo de caso direcionado para a construção de panoramas tecnológicos sobre processos de produção de cobre**, 2010. Dissertação de Mestrado em Propriedade Intelectual e Inovação, INPI. P. 92.

SOUSA, N. M. **Adsorção e dessorção dos cátions Cu^{2+} , Ni^{2+} e Cd^{2+} sobre uma alumina ativada proveniente de uma gibbsita bayer**. 2002. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém 2002.

Vila M.C.C, 1995. **Lixiviação por percolação um modelo de parâmetros distribuídos**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Minas, FEUP, Porto.