

# Série Tecnologia Ambiental

## Lama Vermelha: Caracterização e Aplicações

Paulo Fernando Almeida Braga

Flávio de Almeida Lemos

Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

Christine Rabello Nascimento

Luiz Carlos Bertolino

# **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

## **Lama Vermelha: Caracterização e Aplicações**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Michel Miguel Elias Temer Lulia**

Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**

**Gilberto Kassab**

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

**Elton Santa Fé Zacarias**

Secretário-Executivo

**Luiz Henrique da Silva Borda**

Diretor Substituto de Gestão das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais da Secretaria Executiva

**Isabela Sbampato Batista Reis de Paula**

Coordenadora-Geral Substituta das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Fernando Antonio Freitas Lins**

Diretor

**Robson de Araújo D'Ávila**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

**Claudio Luiz Schneider**

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Rochas Ornamentais e Minerais Industriais - COROM

**José Antônio Pires de Mello**

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

**Durval Costa Reis**

Coordenador de Administração - COADM

# SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN – 978-85-8261-075-6

STA - 97

## Lama Vermelha: Caracterização e Aplicações

### **Paulo Fernando Almeida Braga**

Eng. Químico, D.Sc. em Engenharia Mineral. Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC.

### **Flávio de Almeida Lemos**

Eng. Químico, D.Sc. em Ciências e Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Pesquisador/Bolsista CETEM/MCTIC.

### **Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos**

Eng. Químico, MSc, em Engenharia Metalúrgica e Materiais. Pesquisador do CETEM/MCTIC.

### **Christine Rabello Nascimento**

Eng. Química, D.Sc. em Ciência e Tecnologia de Polímeros. Pesquisadora Visitante da ANP.

### **Luiz Carlos Bertolino**

Geólogo, D.Sc. em Engenharia Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos. Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC.

**CETEM/MCTIC**

2017

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Luis Gonzaga Santos Sobral**

Editor

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Subeditora

### **CONSELHO EDITORIAL**

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos Augusto da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanon Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Revisão

---

Braga, Paulo Fernando Almeida

Lama vermelha: caracterização e aplicações/ Paulo Fernando Almeida Braga [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017.

64p.: il. (Série Tecnologia Ambiental, 97)

1. Lama vermelha. 2. Absorção. 3. Dióxido de carbono. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Braga, Paulo Fernando Almeida. III. Lemos, Flávio de Almeida. IV. Santos, Ronaldo Luiz Corrêa dos. V. Nascimento, Christine Rabello. VI. Bertolino, Luiz Carlos. VII. Título. VIII. Série.

CDD – 669.0283

---

# SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1   INTRODUÇÃO	9
2   OBJETIVOS	11
3   APLICAÇÕES DA LAMA VERMELHA	12
4   CAPACIDADE DE NEUTRALIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA E ABATIMENTO DE CO <sub>2</sub>	18
5   PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
5.1   Preparo da Amostra da Lama Vermelha	34
5.2   Caracterização da Amostra de Lama Vermelha	38
5.3   Titulação	39
5.4   Análise de Carbonato Total	40
5.5   Ensaio de Absorção	41
6   RESULTADOS	43
6.1   Classificação Granulométrica	43
6.2   Difração de Raios-X	45
6.3   Análises Químicas	46
6.4   Ensaio de Avaliação da Capacidade de Neutralização e da Absorção de CO <sub>2</sub> da Lama Vermelha	49
7   CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58



## RESUMO

A lama vermelha é um resíduo cáustico gerado na produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pelo processo Bayer, sendo obtida durante a digestão da bauxita com soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ). Apesar das usinas procederem a lavagem da lama vermelha exaustivamente, para a máxima recuperação do  $\text{NaOH}$  e do alumínio solúvel, a alcalinidade da lama descartada ainda é elevada, numa faixa de pH variando entre 10 e 13. Este resíduo fica estocado em bacias de rejeito, que representa um sério risco ambiental, como, por exemplo, o vazamento de cerca de  $700.000 \text{ m}^3$  de suspensão cáustica ocorrida em 2010, no oeste da Hungria. Se por um lado a alta alcalinidade da lama vermelha implica numa dificuldade para sua disposição final, por outro lado, esta característica torna a lama vermelha um resíduo com grande potencial para absorção e neutralização de efluentes ácidos.

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é um dos principais gases do agravamento do efeito estufa (GEE). A produção de alumínio primário gera quantidades significativas de  $\text{CO}_2$ , a média mundial de emissões do processo de produção de alumínio primário é de 7,1 toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente por tonelada (eq/t) de alumínio. No Brasil esta média é de apenas 2,7 toneladas de  $\text{CO}_2$  eq/t de alumínio, principalmente pelo fato da matriz principal de energia ser de origem hídrica.

Um emprego promissor para grandes quantidades de lama vermelha é o abatimento de  $\text{CO}_2$  proveniente de caldeiras, fornos, aquecedores e termelétricas, com a alcalinidade contida nesse resíduo. A utilização da lama vermelha, como meio absorvedor de gases ácidos (ou que geram produtos ácidos), pode ser uma alternativa na mitigação dos efeitos dos gases gerados em termelétricas, com benefícios ao meio ambiente.

### Palavras-chave

Lama vermelha, absorção, dióxido de carbono.



## **ABSTRACT**

The red mud is a caustic residue generated in the production of alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) by Bayer process, being generated during the digestion of bauxite with caustic soda ( $\text{NaOH}$ ). Although the mills wash the red mud exhaustively, for the maximum recovery of  $\text{NaOH}$  and soluble aluminum, the alkalinity of the discarded mud is still high, with pH ranging from 10 to 13. This waste is stored in tailings ponds, which represents a serious environmental risk, such as the leakage of about  $700,000 \text{ m}^3$  of caustic suspension in western Hungary back to 2010. If in one hand the high alkalinity of the red mud implies a difficulty on its final disposal, on the other hand, this characteristic makes the red mud a residue with great potential for absorption and neutralization of acidic effluents.

Carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) is one of the main greenhouse gases (GHG). The production of primary aluminum generates significant amounts of  $\text{CO}_2$ , the world average emissions from the primary aluminum production process is 7.1 tonnes of  $\text{CO}_2$  equivalent per tonne (eq/t) of aluminum. In Brazil, this average is only 2.7 tons of  $\text{CO}_2$  eq/t of aluminum, mainly because the main energy matrix is of water origin.

A promising job for large quantities of red mud is the abatement of  $\text{CO}_2$  from steam boilers, furnaces, heaters and coal fired power plants, with that residue bearing alkalinity. The use of red mud as an acid gas (or acid product) absorber can be an alternative to mitigate the effects of gases generated in thermoelectric plants, benefiting the environment.

### **Keywords**

Red mud, absorption, carbon dioxide.

## 1 | INTRODUÇÃO

A lama vermelha (LV) é um resíduo altamente alcalino, com pH acima de 13, gerado na lixiviação sob pressão da bauxita com hidróxido de sódio em temperaturas entre 150 e 230°C, visando a produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A composição química da lama vermelha varia em decorrência da natureza da jazida da bauxita e das técnicas empregadas no processo Bayer, e tem como os seus constituintes principais os óxidos de ferro, alumínio, sílica, sódio, cálcio e titânio. Além disso, vários elementos-traço, como os óxidos de vanádio, gálio, fósforo, manganês, magnésio, zinco, tório, cromo e nióbio, também podem estar presentes. As fases minerais mais comuns encontradas são a hematita, a goethita, a magnetita, a boemita, o quartzo, a sodalita e a gipsita e, em menor quantidade, a calcita e gibbsita (SILVA FILHO et al., 2007; SAHU, et al., 2010).

Em todo mundo, cerca de 70 milhões de toneladas de lama vermelha são geradas anualmente na produção de alumina a partir de bauxita. Numerosos métodos têm sido propostos para mitigar os potenciais impactos ambientais. Dentre esses métodos podem ser destacados a lavagem com a água do mar, correção da acidez de solos, aditivos na indústria de cimento, tratamento de drenagem ácida de mina e tratamento de esgoto. No entanto, processos envolvendo o reaproveitamento de grandes volumes de lama vermelha, economicamente viáveis, ainda não foram relatados na literatura (DILMORE et al., 2008).

A estocagem adequada de lama vermelha apresenta uma série de dificuldades, a começar pela dispendiosa manutenção das vastas áreas ocupadas pelas bacias de contenção, o risco de percolação do material e contaminação do lençol freático,

vazamentos de material cáustico para o meio ambiente e geração de poeiras do material seco em decorrência da baixa granulometria do material. O armazenamento deste material em barragens, além de ser uma tarefa onerosa, representa um sério risco ambiental. Um exemplo recente foi o rompimento de uma barragem no oeste da Hungria em 2010. Neste desastre cerca de 700.000 m<sup>3</sup> de suspensão de lama vermelha destruiu mais de 100 vilarejos, causando a morte de nove pessoas (RENFORTH et al., 2012).

O emprego de lama vermelha, como fonte secundária na obtenção de elementos das terras raras, a partir da lixiviação com solução 0,5 N de HNO<sub>3</sub>, foi realizada por Ochsenkuhn-Petropulu et al., (1996), onde foram recuperados 90% do Y, 80% Sc, 70% do Dy, Er e Yb, 50% do Nd, Sm, Eu e Gd, 30% La, Ce e Pr.

Um emprego promissor para grandes quantidades de lama vermelha é o abatimento de CO<sub>2</sub>, com o NaOH contido no resíduo. A neutralização da lama vermelha foi estudada por Khaitan et al. (2009) empregando polpa contendo 40% de sólidos e pH de 12,5 em função da pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Neste trabalho as amostras foram confinadas em atmosferas com composição pré-determinada de CO<sub>2</sub>. Os autores verificaram que a taxa de neutralização da lama vermelha aumentava com a pressão parcial de CO<sub>2</sub>, sendo atingido o valor de pH 7,7 para pressão parcial de CO<sub>2</sub> de 1 atm, após dois dias de exposição. O pH de todas as amostras aumentou até 10 no período de 12 a 24 horas após a reação, o que foi atribuído à dissolução do tri-cálcio aluminato de sódio.

## 2 | OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos específicos:

- fazer uma revisão dos processos desenvolvidos para aplicações potenciais da lama vermelha proveniente do processo Bayer;
- caracterizar tecnologicamente (propriedades físicas, químicas e composição mineralógica) a lama vermelha objeto do presente estudo;
- avaliar a viabilidade técnica da utilização da lama vermelha como agente de remoção de  $\text{CO}_2$  de correntes gasosas típicas das originadas nos processos industriais de combustão de óleo e carvão.

### 3 | APLICAÇÕES DA LAMA VERMELHA

Em virtude do acúmulo de lama vermelha representar um passivo ambiental expressivo, existe o interesse em dar utilidade a este resíduo e, conseqüentemente, é vasta a bibliografia que trata das alternativas para a utilização dessa lama. Em um artigo de revisão, Wang e colaboradores (2008) fizeram um resumo das principais pesquisas sobre as aplicações potenciais da lama vermelha (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1.** Áreas potenciais para aplicação da lama vermelha.

Aplicações		Objetivo da pesquisa	
Tratamento de água	Como coagulante	Aproveitar a LV como fonte de $Fe^{3+}$ e $Al^{3+}$ , obtendo compostos que atuem no tratamento de águas industriais.	
	Como adsorvente*	de anions	Adsorção de fosfatos (pirofosfatos, ortofosfatos, organo-fosfatos, entre outros), fluoretos e nitratos.
		de elementos-traço	Remover metais e metalóides de efluentes e de águas residuais da mineração. A alta basicidade da LV pode promover a precipitação e adsorção dos compostos de metais pesados.
		de corantes	Remover corantes como vermelho do congo, azul de metileno, <i>fast green</i> e rodamina
		de compostos orgânicos	Adsorção de fenóis e cloro-fenóis.
		de vírus e bactérias	Eliminação das bactérias <i>Escherichia coli</i> e <i>Salmonella Adelaide</i> e do vírus <i>poliovirus-1</i> de águas contaminadas.

**Tabela 2.** Áreas potenciais para aplicação da lama vermelha.

Aplicações		Objetivo da pesquisa
Catálise	Hidrogenação	Hidrogenação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, tais como o antraceno, o fenantreno e o pireno.
	Oxidação de hidrocarbonetos	Oxidar tolueno e metano e comparar as performances dos catalisadores obtidos com a LV e os comerciais.
Material de construção, cerâmicas, cimentos e pigmentos	Aplicar a LV em produtos capazes de absorver grande quantidade de material.	
Lavagem de gases	Adsorção ou absorção de H <sub>2</sub> S, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> e CO <sub>2</sub> .	
Recuperação de metais	Recuperação de Fe, Al, Ti, Ga, V, Sc, entre outros.	

Fonte: WANG et al., 2008.

Wang et al. (2008) ainda comentaram que a maior parte da lama vermelha é disposta em aterros, bacias de rejeitos ou no mar.

A utilização desse resíduo ainda é incipiente, apesar de já existirem pesquisas em estágio mais avançado, que visam desenvolver aplicações capazes de incorporar grande quantidade de massa como, por exemplo, na construção de pavimentos, na remediação de solos e na produção de cimento. Encontrar formas para tornar economicamente viável a aplicação do resíduo em escala industrial, ainda se constitui em um grande desafio a ser superado pelas empresas, na medida em que aumenta a pressão da sociedade e do governo por práticas sustentáveis de desenvolvimento.

Apesar de cáustica, a lama vermelha não é considerada um resíduo de alta toxicidade (WANG et al., 2008). Contudo, Doye & Duchesne (2005) estudaram a utilização da lama vermelha e de resíduos de cimento (RC) no tratamento de drenagem ácida de mina. O estudo foi feito com o propósito de avaliar o efeito da adição desses resíduos em lixívias ácidas e acompanhar a evolução do pH e a liberação de íons com o tempo, em função da quantidade adicionada de resíduos. Os autores concluíram que a adição isolada de 10% de RC ou da mistura LV e RC ao efluente ácido é suficiente para a manutenção do pH neutro, além de reter os íons metálicos, reduzindo, ainda, a proliferação bacteriana.

Outros autores propõem que a lama vermelha pode ser usada na preparação de materiais adsorventes de baixo custo, inclusive aplicáveis à poluentes gasosos (WANG et al., 2008). Fan et al. (2005) utilizaram a lama vermelha no preparo de um material apropriado para remover compostos sulfurosos da corrente gasosa originada na queima de carvão para geração de energia elétrica. Os autores extrudaram e calcinaram uma mistura de lama vermelha com argilas e aditivos. Os *pellets* formados apresentaram resistência mecânica satisfatória e boa performance quanto à remoção dos poluentes por até cinco ciclos de adsorção/regeneração, sendo que o declínio da atividade foi atribuído à sinterização ocorrida durante a etapa de regeneração do adsorvente. Outros artigos e patentes nessa linha, em que a lama vermelha é usada pura ou combinada para a eliminação de compostos com alta acidez de efluentes gasosos, foram publicados por Uysal et al. (1988), Junji et al. (2002), Mineo et al. (1977), Reiner & Rudolf (1992), Huang (2006), Kouzou et al. (1978), Zopff & Muller (1982), Yamada et al. (1980), Heins (1979) e Myers & Field (1970).

Observa-se que existe a possibilidade do abatimento dos compostos gasosos ácidos ocorrer via processos de adsorção ou absorção. No entanto, segundo Licks (2008), os processos de adsorção ainda não são considerados atrativos para o abatimento, em grande escala, do CO<sub>2</sub>, devido ao limite da capacidade e baixa seletividade dos adsorventes em relação ao CO<sub>2</sub>. A adsorção, contudo, poderá ser bem sucedida quando utilizada em combinação com outras tecnologias de captação.

Singh et al. (1996) chamaram a atenção para a importância de aplicações que requeiram grandes volumes de lama vermelha, no sentido de minimizar as dificuldades relativas à vasta extensão territorial necessária ao despejo da lama e o custo associado à esta disposição. Nesse trabalho os pesquisadores estudaram alternativas para o emprego da lama vermelha em composições de cimento. Foram testadas várias composições, com teores diversos de cal, lama vermelha, cinzas, bauxita e gesso, sendo estas composições submetidas a diferentes condições de processamento. O objetivo dos pesquisadores foi determinar quais eram as composições e condições operacionais que levassem à produtos com resistência similar a uma amostra de cimento Portland.

Existe também o interesse em linhas alternativas de aplicação, que demandam pouca quantidade de lama vermelha e visam a obtenção de produtos intensivos em termos de tecnologia e com alto valor agregado. Nesta linha, pode ser citado o trabalho de Park & Jun (2004), cujo objetivo consistiu na investigação de tratamentos aplicados à lama vermelha usada como carga para melhorar as propriedades de nanocompósitos



poliméricos. O efeito da carga incorporada à matriz polimérica, que neste caso é a lama vermelha tratada, resulta do grau de dispersão das partículas no polímero, do tamanho, forma e características superficiais das partículas. Como a interação e a adesão partícula-polímero são fundamentais para o bom desempenho mecânico dos compósitos, o tratamento mais adequado também vai depender da natureza química do polímero. Os autores concluíram que os tratamentos da lama vermelha com ácido e base aumentaram a estabilidade térmica dos compósitos formados com poli-metacrilato de metila [PMMA] e poli-cloreto de vinila [PVC], respectivamente, em comparação com aqueles com lama vermelha sem tratamento.

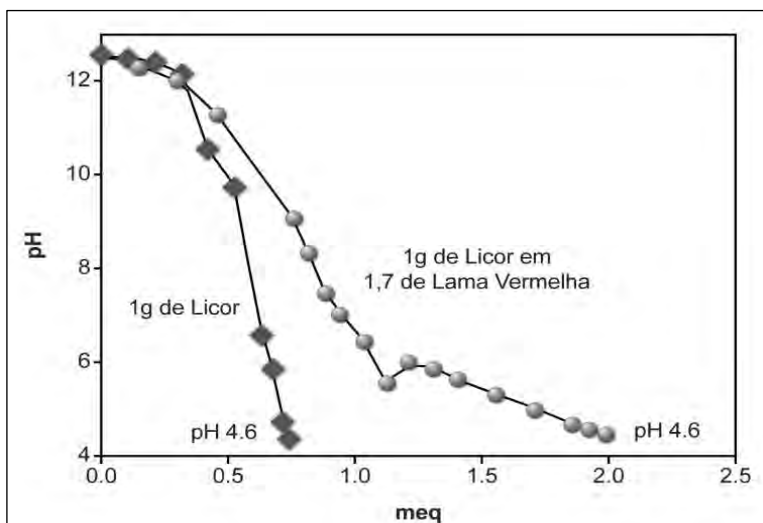
A granulometria fina e a alta concentração de ferro na lama vermelha tornam tecnicamente interessante a sua utilização na preparação de catalisadores. Entretanto, a presença dos óxidos de cálcio e sódio ocasiona a sinterização do catalisador em altas temperaturas, diminuindo sua área superficial e prejudicando esta aplicação (PAREDES et al., 2004). Em geral, catalisadores de óxidos metálicos são menos ativos, em comparação com os constituídos por metais nobres mas, em contrapartida, são de baixo custo e mais resistentes ao envenenamento (SUSHIL & BATRA, 2008). Geralmente, a área superficial das partículas (análise de BET) da lama vermelha se encontra na faixa de 20 a 30 m<sup>2</sup>/g, ficando bem abaixo dos valores encontrados para os catalisadores comerciais de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50 a 100 m<sup>2</sup>/g). Esse fato acarreta a necessidade de tratamento prévio da lama, cujo custo é compensado pelo alto valor agregado do produto obtido. Um exemplo dos tratamentos citados na literatura seria o método de “Pratt e Christoverson”, que consiste na dissolução da lama vermelha

em ácido clorídrico (HCl), seguida de precipitação com amônia e calcinação (PAREDES et al., 2004). Além do aumento da área superficial, este método possibilita a redução de Na e Ca, elementos que comprometem essa aplicação.

Os resultados das pesquisas mostram que alguns dos produtos obtidos com a lama vermelha, como os catalisadores ou adsorventes, quando não são submetidos a um tratamento adequado apresentam desempenho inferior ao similar usado comercialmente. Torna-se, então, evidente a necessidade da intensificação dos estudos voltados para o desenvolvimento e aprimoramento de produtos a base de lama vermelha. Na realidade, o aumento do número de trabalhos de P&D segue em consonância com a mudança de um paradigma: todo resíduo começa a ser considerado uma nova matéria-prima, que foi, até alguns anos atrás, ignorada, inexplorada ou mal aproveitada pelos processos produtivos.

#### 4 | CAPACIDADE DE NEUTRALIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA E ABATIMENTO DE CO<sub>2</sub>

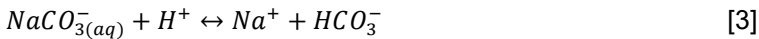
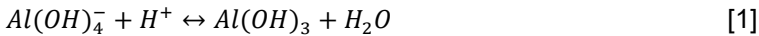
Através da determinação da capacidade de neutralização ácida (CNA) da lama vermelha é possível estabelecer o tratamento e acondicionamento adequado deste resíduo. Procedimentos específicos de titulação são empregados na determinação da CNA e os resultados obtidos, em conjunto com outras análises, podem servir para elucidar os mecanismos e reações que ocorrem durante a neutralização. Neste sentido, Khaitan et al. (2009 a) titularam amostras de lama vermelha com HCl e verificaram que o consumo de ácido pela suspensão foi maior do que pelo licor (fração líquida da lama) (Figura 1), comprovando que a fração sólida da lama também é reativa.



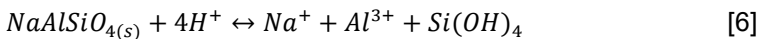
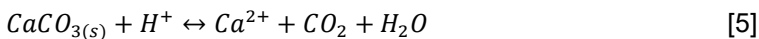
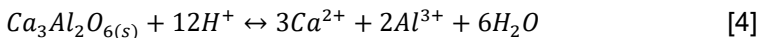
Fonte: Modificado de KHAITAN et al., 2009 a.

**Figura 1.** Variação do pH do licor e da lama vermelha em função da quantidade de HCl adicionada.

Os autores ainda investigaram as reações responsáveis pelo consumo de ácido forte pela lama vermelha e propuseram que as reações mais relevantes no processo de neutralização da fase líquida (licor) envolvem as espécies  $Al(OH)_4^-$  (aq),  $NaOH$  (aq) e  $NaCO_3^-$  (aq), conforme representado nas Equações 1, 2 e 3.



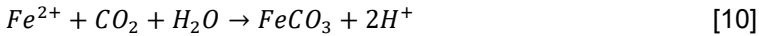
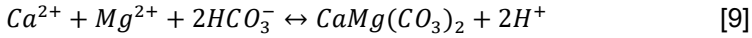
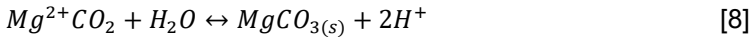
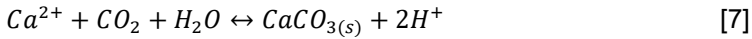
Na Figura 1, observa-se que na faixa de pH entre 12,5 e 12,0 não existem, praticamente, diferenças entre a suspensão e o licor, indicando que o estágio inicial da neutralização é controlado pelas espécies que estão em solução. Abaixo do pH 12,0, as curvas de neutralização não são mais coincidentes, indicando que a dissolução de sólidos é o processo que passa a controlar a variação do pH da suspensão. A dissolução é um processo lento e, segundo Khaintan et al. (2009 a), os sólidos reativos presentes na amostra da lama vermelha estudada eram o tri-cálcio aluminato ( $Ca_3Al_2O_6$ ), o alumino-silicato de sódio ( $NaAlSiO_4$ ) e a calcita ( $CaCO_3$ ), cujas dissoluções em meio ácido estão representadas nas Equações 4, 5 e 6 e ocorrem, respectivamente, nas faixas de pH de 8,7 a 9,9; de 4,5 a 6,0 e de 6,7 a 8,7.



Hanahan et al. (2004) mencionaram em seu trabalho a importância dos parâmetros cinéticos na determinação da alcalinidade da lama vermelha. Com base em trabalhos anteriores, os autores assumiram que o equilíbrio das reações de neutralização é atingido em 24 horas, pois consideraram desprezíveis as variações observadas após este período. No trabalho desenvolvido por esses pesquisadores, a lama vermelha, proveniente da refinaria de Queensland Alumina Ltd., foi neutralizada com água do mar, sendo o material obtido caracterizado. Este tipo de neutralização promove o aumento da velocidade de sedimentação da lama, facilitando seu manuseio na refinaria, e também melhora algumas características do material no caso de uso posterior, como a capacidade de adsorção de fosfatos, por exemplo.

É interessante observar que os autores constataram que a capacidade de neutralização ácida (CNA) não reduz quando a lama reage com a água do mar. Na realidade, a água do mar serve como fonte de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e o tratamento não elimina os íons hidróxidos da lama vermelha, ocorrendo, apenas, a conversão de espécies solúveis, extremamente cáusticas, nos hidróxidos pouco solúveis de cálcio e magnésio. Sendo assim, o material tratado apresenta grande potencial para aplicação como corretivo de solos ácidos.

O seqüestro de  $\text{CO}_2$  pela lama vermelha tratada com resíduos de salmoura foi estudado por Dilmore et al. (2008). Em trabalhos anteriores, foi verificado que a capacidade das soluções salinas na captura de  $\text{CO}_2$  aumenta com o aumento do pH. Nestas condições, são formados carbonatos insolúveis de ferro, cálcio e magnésio, segundo as reações descritas nas Equações 7, 8, 9 e 10.



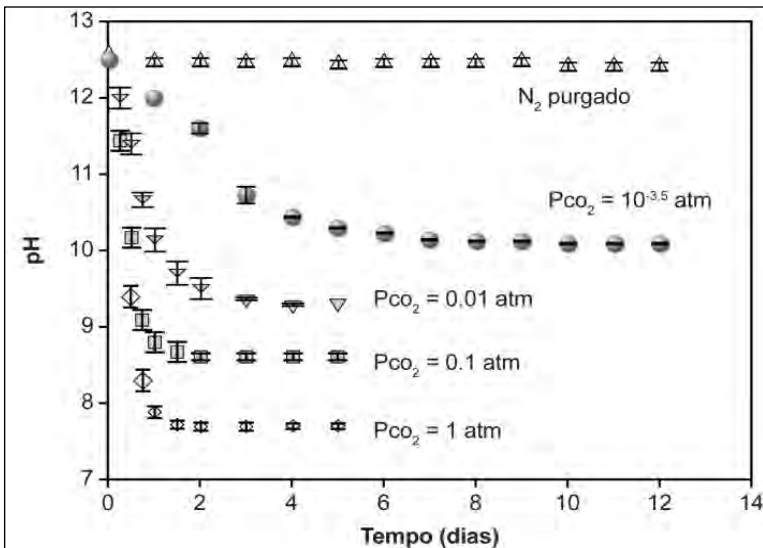
À medida que o  $CO_2$  é dissolvido no meio aquoso, forma-se o ácido carbônico que se dissocia, liberando íons  $H^+$  no meio. Se o meio não estiver tamponado, o excesso de íons  $H^+$  irá ocasionar a dissolução da calcita e dos outros carbonatos minerais, prejudicando o seqüestro de  $CO_2$ . Daí a importância da manutenção do pH elevado, que serve para contrabalançar a perda de alcalinidade devido à dissolução do  $CO_2$ . No trabalho em questão, a lama vermelha foi utilizada como meio cáustico e o resíduo de purificação de uma salmoura como uma fonte de íons  $Ca^{2+}$ . Os autores observaram que ao utilizar uma relação 90/10 em volume de lama vermelha e resíduo de salmoura, a capacidade de seqüestro de  $CO_2$  ficou acima de 9,5 g/L, utilizando como meio gasoso o  $CO_2$  puro.

Em um trabalho similar, no qual Jones et al. (2006) avaliaram o potencial de carbonatação da lama vermelha neutralizada com água do mar (Bauxsol™), os autores comentam sobre o interesse estratégico em dar uma nova utilização ao resíduo carbonatado, em virtude da grande quantidade de lama vermelha que é produzida: de 1 a 2 t/t de alumina, em média.

Com o objetivo de estudar o efeito da pressão parcial de  $CO_2$  na neutralização da lama vermelha, Khaitan et al. (2009 b) realizaram experimentos na faixa de 10 a 3,5 até 1 atm de  $CO_2$  e monitoraram os valores do pH da lama (fração solúvel) ao longo do tempo. Foi observado que o pH atinge um valor de equilíbrio de 7,7 após um dia de experimento usando  $CO_2$  puro

( $p_{CO_2} = 1 \text{ atm}$ ) e de 9,8 após nove dias usando uma pressão parcial na faixa de 10 a 3,5 atm (Figura 2); portanto, a velocidade de neutralização aumenta com a pressão parcial de  $CO_2$ .

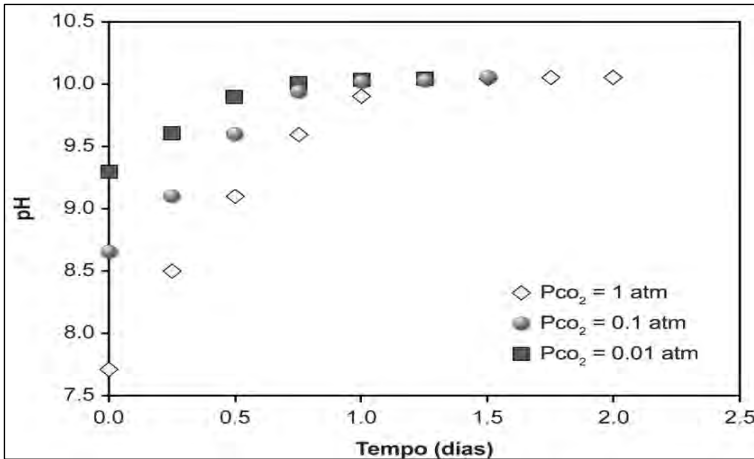
Os pesquisadores não utilizaram nenhum dispositivo especial para aumentar o contato gás/líquido, apenas isolaram a lama numa atmosfera com composição pré-determinada. Foi constatada que, após a neutralização, a lama apresentava uma tendência de elevação do pH quando acondicionada numa atmosfera que simulava a composição do ar atmosférico, em termos de concentração de  $CO_2$  (Figura 2).



Fonte: Modificado de KHAITAN et al., 2009 b.

**Figura 2.** Curvas de neutralização da lama vermelha com o uso de  $CO_2$ .

Os autores atribuíram esta tendência à dissolução lenta do tri-aluminato de cálcio e à formação de calcita, que são processos termodinamicamente favorecidos (Quadros 1 e 2).



Fonte: Modificado de KHAITAN et al., 2009 b.

**Figura 3.** Variação do pH de amostras de lama vermelha carbonatadas em diversas pressões parciais de CO<sub>2</sub>, em atmosfera de P<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 10-3,5 atm.

**Quadro 1.** Constantes de equilíbrio das reações que ocorrem no sistema lama vermelha/CO<sub>2</sub>.

Sólido formado	Reações em fase sólida	Log K
Boemita	$Al^{3+} + H_2O \leftrightarrow AlOOH_{(s)} + 3H^+$	-8,9
Calcita	$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \leftrightarrow CaCO_3$	8,48
Alumino-silicato	$Na^+ + Al^{3+} + Si(OH)_4 \leftrightarrow NaAlSiO_{4(s)} + 4H^+$	-15
Tri-cálcio aluminato	$3Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 6H_2O \leftrightarrow Ca_3Al_2O_{6(s)} + 12H^+$	-74

Fonte: KHAITAN et al., 2009 b.

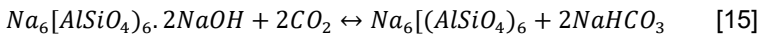
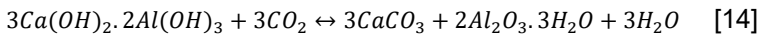
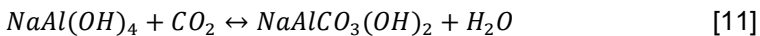


**Quadro 2.** Constantes de equilíbrio das reações que ocorrem no sistema lama vermelha/ $\text{CO}_2$ .

Reações em fase líquida	log K
$\text{Al}(\text{OH})_4^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O}$	22,7
$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$	3,5
$\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	-6,3
$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$	10,3

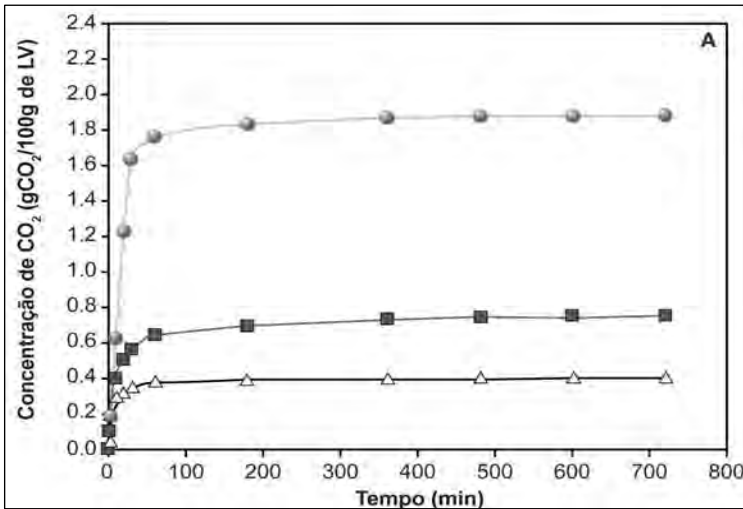
Fonte: KHAITAN et al., 2009 b.

Bonenfant et al. (2008) consideraram que a composição e a alcalinidade da lama vermelha são fatores que contribuem para sua aplicação no sequestro de carbono via carbonatação. A neutralização ocorre como consequência da carbonatação, o que traz vantagens tanto para o depósito como para uma posterior aplicação da lama, tais como a sua utilização na correção de solos, na remoção dos compostos de nitrogênio e fósforo de efluentes e na produção de cimento. Segundo os autores, as principais reações que ocorrem na carbonatação da lama vermelha são as seguintes (Equações 11, 12, 13, 14 e 15):



Bonenfant et al. (2008) avaliaram a variação do pH e da quantidade de  $\text{CO}_2$  absorvida com o tempo (Figuras 4 e 5), em experimentos realizados a  $20^\circ\text{C}$ , nos quais uma corrente

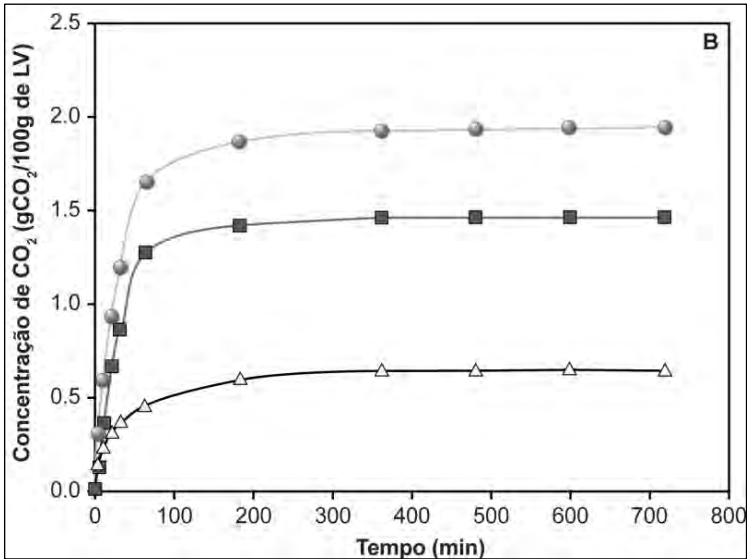
gasosa com 15% (v/v) de  $\text{CO}_2$  foi borbulhada nas suspensões diluídas da lama vermelha, de lixívia (diluições da lama em água) ou do material sólido separado das lixívia.



Fonte: BONENFANT et al., 2008.

**Figura 4.** Carbonatação de amostras da lixívia da lama vermelha (A).

Pelos resultados obtidos, pôde-se concluir que a capacidade máxima de captura de  $\text{CO}_2$  (saturação) foi maior para a suspensão da lama, seguindo do material sólido e da lixívia, respectivamente. Contudo, apesar do material sólido ter apresentado maior capacidade de incorporação de  $\text{CO}_2$ , em comparação com a lixívia, os autores não se aprofundaram neste estudo quanto aos aspectos cinéticos relativos à absorção. Os tempos reacionais para que ocorra a saturação são longos, da ordem de 100 minutos, muito acima dos tempos de residência usuais empregados em colunas de absorção.



Fonte: BONENFANT et al., 2008.

**Figura 5.** Carbonatação do material sólido lixiviado (B).

Caso a lixívia ou o licor reajam em tempos muito mais curtos com o CO<sub>2</sub> do que a fração sólida, a absorção em colunas, usando apenas a fração líquida da lama, pode se tornar uma boa opção. Ao que tudo indica, pelos dados divulgados na literatura, o tempo reacional nas colunas de absorção será insuficiente para que a saturação seja alcançada, seja pela lixívia ou pelo sólido. Se for considerado como foco principal do estudo o ganho de eficiência na retirada do CO<sub>2</sub> do efluente utilizando colunas de absorção, será importante avaliar até que ponto é interessante utilizar a fração sólida da lama no processo. Caso o tempo de residência seja insuficiente para o material sólido reagir ou apresentar qualquer efeito benéfico ao processo, seu uso poderá acarretar apenas resultados

negativos, tais como: maior gasto de energia no bombeamento, a abrasão e sedimentação no interior dos equipamentos. Se for priorizada a carbonatação da lama, outros tipos de processos, além da absorção em colunas, deverão ser contemplados.

É possível que a presença de partículas em suspensão e dos eletrólitos presentes na lama vermelha tenham influência nas suas características de absorção de  $\text{CO}_2$ , mesmo quando, aparentemente, não tenham uma participação direta nas reações de neutralização ou carbonatação. Como a viscosidade, a densidade e a difusividade do meio absorvedor são propriedades que influenciam a absorção, as espécies não reativas, mas que de alguma forma alterem estas propriedades, podem ter influência no processo de absorção.

Haubrock et al. (2007) realizaram experimentos de absorção do  $\text{CO}_2$  em solução de NaOH na presença de eletrólitos neutros (cloretos de sódio, de potássio e de lítio) e constataram que a influência destes compostos na taxa de reação é função da natureza do cátion. Os autores observaram que a constante de reação foi cerca de 1,5 vezes maior na presença de NaCl (1,5 M) em comparação com a solução de NaOH sem o sal. Já a adição de LiCl faz com que a taxa de reação diminua. Kordač & Linek (2008) relataram que a presença de sais na absorção de  $\text{CO}_2$  em água acarreta a diminuição da taxa de coalescência das bolhas. Contudo, o ganho em termos de área superficial entre as fases não significou aumento da absorção de  $\text{CO}_2$ . Aparentemente, a presença do eletrólito reduziu a capacidade de difusão do  $\text{CO}_2$  no líquido, prejudicando a absorção. Park et al. (2008) mencionaram em seu trabalho que a difusividade do gás dissolvido pode diminuir com o aumento da fração volumétrica das partículas na suspensão, reduzindo o coeficiente de transferência de massa da absorção gasosa.

Mediante estes dados da literatura, deve-se ter precaução quanto às simplificações durante o estudo da absorção gasosa com lama vermelha, que é mais complexo em comparação com sistemas cujas reações ocorram em uma única fase.

A presença de outros gases ácidos no efluente gasoso, situação típica encontrada nos gases de combustão, pode interferir na eficiência da absorção do  $\text{CO}_2$  em meio alcalino, particularmente quando estes gases são mais reativos. O trabalho de Sada et al. (1977) ilustra bem esta questão. Os pesquisadores realizaram experimentos em batelada, utilizando um tanque com agitação, onde foi realizada a absorção da mistura  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$  numa suspensão 20% (p/p) de partículas finas ( $5 \mu\text{m}$ ) de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Os resultados demonstram que a reação com o  $\text{SO}_2$  é praticamente instantânea e muito mais rápida, quando comparada com a reação do  $\text{CO}_2$ . A constante da taxa de reação entre o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é da ordem de  $10^4$  maior do que a constante correspondente à reação com  $\text{CO}_2$ . Os autores concluíram que a presença do  $\text{SO}_2$  no sistema faz com que o  $\text{CO}_2$  se comporte como um gás inerte. Portanto, no projeto de uma instalação de abatimento de  $\text{CO}_2$ , proveniente de uma corrente gasosa de um processo de combustão, em meio alcalino, deve ser avaliada a necessidade do abatimento prévio dos gases mais reativos.

A crescente pressão para redução das emissões de  $\text{CO}_2$ , geradas por fontes expressivas, à exemplo da queima de combustíveis fósseis, como nas usinas termoelétricas, faz com que aumentem as iniciativas de P&D voltadas para tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Das principais tecnologias que podem ser usadas na captura do  $\text{CO}_2$ , que são a absorção física, separação por membrana, fracionamento criogênico e absorção química, esta última é considerada a

tecnologia mais madura (WU & CHAN, 2009). Segundo relatório divulgado pelo *International Test Centre for CO<sub>2</sub> capture* (ITC), da Universidade de Regina no Canadá, os solventes à base de aminas são os mais efetivos na captura do CO<sub>2</sub> de emanações gasosas de processos de combustão, utilizando tecnologias de lavagem de gases (BOOTH, 2005).

Notz et al. (2007) afirmaram que todos os processos existentes na captura de CO<sub>2</sub>, de correntes gasosas de processos de combustão, utilizam aminas como meio absorvedor, em sistemas onde o solvente é recuperado após uma etapa de desorção. Os autores relataram que os custos de capital são, principalmente, influenciados pela vazão do efluente, variável que determina o diâmetro da coluna, e pela cinética da reação de absorção, que influenciará a definição da altura da coluna. Os custos operacionais são influenciados, sobretudo, pela vazão do fluido absorvente e pelo consumo energético. Segundo os autores, os valores baixos de pressão parcial de CO<sub>2</sub> nos efluentes das plantas de geração de energia – 40 mbar com a queima de gás e 140 mbar com a queima de carvão – inviabilizam os processos criogênico e de absorção física da captura do CO<sub>2</sub> desses efluentes.

Além da reatividade do meio absorvedor, a eficiência de remoção do CO<sub>2</sub> em colunas é determinada pelo contato gás-líquido e outros parâmetros da corrente gasosa (BOOTH, 2005). Um dos parâmetros mais importantes que possibilita a comparação, em termos de efetividade de absorção, entre os diversos equipamentos e processos de absorção em colunas, é o coeficiente de transferência de massa ( $K_G$ ), definido na Equação 16, onde  $N_{CO_2}$  é a vazão mássica de CO<sub>2</sub> capturado,  $P_{y_{CO_2}}$  é a pressão parcial do CO<sub>2</sub> no gás de entrada e  $P_{y_{CO_2}}^*$  é a pressão parcial do CO<sub>2</sub> no gás de saída. Observa-se que  $K_G$

é função da reatividade do meio, das variáveis operacionais e da configuração da coluna. Desta forma,  $K_G$  pode ser usado, por exemplo, como um indicativo da eficiência de remoção de  $\text{CO}_2$  em colunas recheadas com diferentes tipos de recheio ou das diversas formas de empacotamento (estruturado ou *aleatório*).

$$N_{\text{CO}_2} = K_G \cdot (P_{Y_{\text{CO}_2}} - P_{Y_{\text{CO}_2}}^*) \quad [16]$$

Aroonwilas et al. (1999) compararam os valores do coeficiente de transferência de massa por unidade de volume ( $K_{GAV}$ ) na avaliação do desempenho de colunas com recheio estruturado, usadas na absorção de efluentes contendo  $\text{CO}_2$ . Uma das variáveis estudadas foi o tipo de solvente utilizado: soluções de hidróxido de sódio (NaOH), monoetilamina (MEA) e 2-amino-2-metil-1-propanol (AMP). Os autores verificaram que o desempenho do sistema utilizando a solução de NaOH é maior do que quando o AMP foi utilizado e menor do que quando a solução de MEA foi utilizada. Na discussão dos resultados, os autores argumentaram que, apesar da solução de NaOH apresentar a constante da taxa de reação com  $\text{CO}_2$  mais elevada, o efeito da baixa tensão superficial da solução de MEA prevaleceu no sistema, tornando a MEA um meio mais eficiente para tal absorção. Ou seja, até mesmo a reatividade do meio absorvedor pode não ser o parâmetro determinante da eficiência de uma coluna de absorção devido ao grande número de variáveis que influenciam a transferência de massa.

Os autores observaram, ainda, que o aumento da temperatura de entrada do solvente absorvedor (MEA) aumenta  $K_{GAV}$  até um ponto ótimo, a partir do qual o aquecimento passa a ser prejudicial à transferência de massa. A hipótese levantada para explicar este efeito é de que o aumento da temperatura

contribui para tanto aumentar a velocidade da reação entre MEA e  $\text{CO}_2$ , como para diminuir a solubilidade do gás no meio absorvedor. O efeito final no processo seria, então, uma resultante destas duas contribuições. Contudo, com a simplificação na análise dos resultados, os autores não mencionaram outros possíveis efeitos térmicos que poderiam estar ocorrendo.

Stragevitch (1996) deu uma descrição mais detalhada sobre os fenômenos térmicos que podem ocorrer na absorção gasosa reativa, considerando que a reação é exotérmica. Segundo a autora, os efeitos térmicos sobre as taxas de transferência de massa ocorrem em consequência da variação da entalpia devido à mudança de fase e à reação química. Quando o gás se difunde no líquido, poderá haver uma elevação da temperatura na interface gás-líquido devido à liberação do calor de solução e do calor da reação química. Este aumento de temperatura acarreta o aumento da taxa da reação química e da difusividade das espécies na fase líquida, o que favorece a transferência de massa. Por outro lado, com a elevação da temperatura existe a tendência de redução da solubilidade do gás no líquido, contribuindo no sentido oposto do da transferência de massa. Outros efeitos, como a vaporização do líquido, também podem ocorrer e contribuir para a diminuição da temperatura na interface. Torna-se, então, evidente a multiplicidade e a dinâmica dos fenômenos térmicos envolvidos que irão interferir na transferência de massa.

Apesar de não haver a pretensão, nesta série, em avançar na área de modelagem dos sistemas de absorção gasosa, é de suma importância o conhecimento das variáveis que afetam o processo de absorção em colunas, bem como os métodos que podem ser usados na manipulação destas variáveis, visando a



otimização do processo. Neste sentido, faz-se necessária a introdução de alguns conceitos básicos, como os apresentados no estudo de Souza (1997). Este autor estudou a transferência de massa entre fases num processo de borbulhamento (absorção gás/líquido), no qual ocorre reação química. Em sua dissertação, Souza (1997) considera que o fenômeno de transferência de massa num sistema de bolhas imersas num meio líquido reativo pode ser decomposto em quatro etapas:

- difusão do(s) reagente(s) da fase gasosa para a interface entre as fases;
- difusão do(s) reagente(s) através da interface;
- reação química na fase líquida;
- difusão do(s) reagente(s) e produto(s) na fase líquida em função do gradiente de concentração gerado pela reação química.

Com esta descrição, fica explícita a influência da difusão no processo de absorção reativa. Sabe-se que a etapa lenta é função da velocidade da transferência de massa, tendo maior influência no processo como um todo. Desta forma, se (i) for a etapa limitante, ou seja, a difusão dos reagentes gasosos para a interface, ocorrer com velocidade muito inferior à velocidade da reação, o processo poderá ser tratado como uma absorção puramente física. Em processos industriais, economicamente atrativos, a reação entre gás e líquido deve ser rápida o bastante para aumentar a capacidade do líquido de absorver o gás e, além disso, ela deve ocorrer próxima à interface de forma apreciável.

Souza (1997) destacou, ainda, a importância de parâmetros como o diâmetro da bolha e o regime de escoamento no interior da coluna. O diâmetro da bolha é influenciado por diversos fatores, como a velocidade superficial do gás e o diâmetro do orifício no qual a bolha é gerada. Obviamente que a absorção é favorecida na presença de bolhas menores, que acarretam a elevada área superficial de contato entre as fases. O regime de escoamento pode ser classificado como homogêneo, heterogêneo ou tipo *slugging* e é função de variáveis como a velocidade superficial do gás e o diâmetro da coluna, entre outras. O regime tipo *slugging* é caracterizado por bolhas com diâmetro próximo ao diâmetro da coluna, em forma de projétil, devendo sempre ser evitado na operação por ocasionar baixa área específica. No regime homogêneo, as bolhas são relativamente pequenas e de mesmo tamanho. Já no regime turbulento, as bolhas coexistem numa ampla faixa de diâmetros no interior da fase líquida, em plena turbulência.

## 5 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 | Preparo da Amostra de Lama Vermelha

Cerca de 1 tonelada de lama vermelha foi coletada em usina de produção de alumina, na região norte do Brasil.

Devido ao alto grau de compactação dos sólidos no fundo do *container*, causado pelo transporte do material, não foi possível fazer a homogeneização e a retirada de frações menores da lama conforme recebida. Sendo assim, a retirada e preparação da amostra seguiu conforme a sequência abaixo:

- retirada e pesagem do licor sobrenadante;
- retirada e pesagem da torta úmida, em frações menores;
- secagem em estufa da torta úmida e pesagem do material seco;
- desagregação e homogeneização (pilha) de todo o material seco;
- fracionamento do material seco em alíquotas de 20 e 0,5 kg.

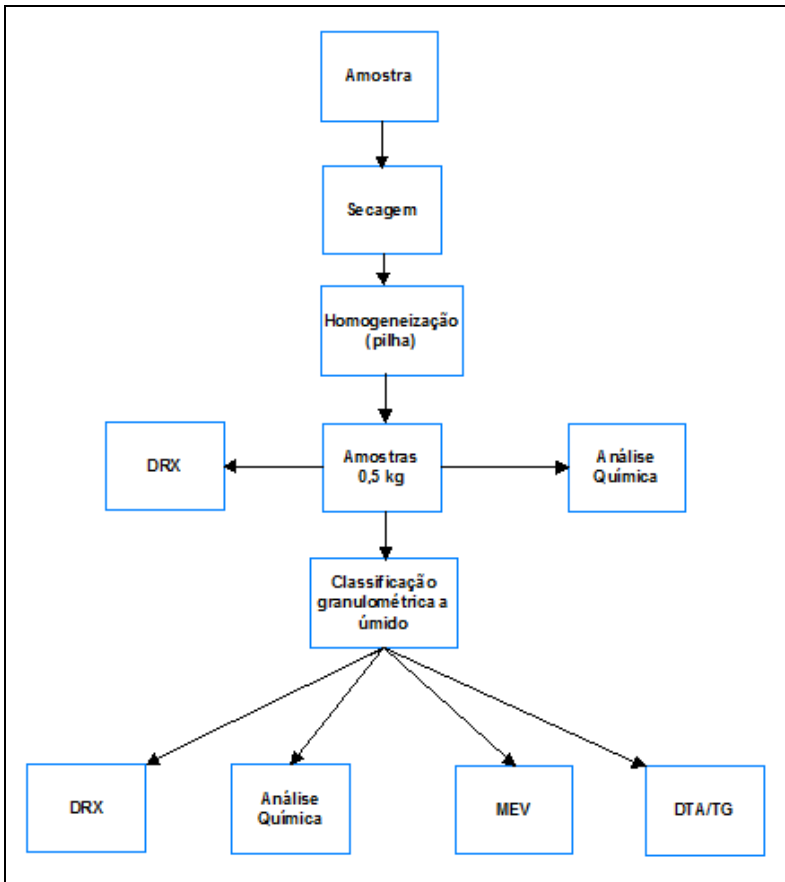
O teor calculado da lama vermelha foi de 72% (p/p). Este valor deve estar acima do valor real devido à evaporação natural da torta úmida ocorrida durante todo o período em que a amostra ficou exposta. Para que a lama pudesse ser recomposta a partir do material sólido seco, numa composição e teor próximas à da lama original, foram determinados os fatores  $f$  e  $f'$  (Quadro 3), calculados a partir dos valores das massas do licor (ML), do sólido (MS) e da água liberada na secagem (MA).

Desta forma, para qualquer valor de massa do sólido seco ( $m_s$ ), calcula-se os valores de massa de licor ( $m_l$ ) e de água ( $m_a$ ), a serem adicionados para a recomposição da lama (mLV).

**Quadro 3.** Fatores de proporcionalidade usados nos cálculos de recomposição da lama vermelha.

Fatores de proporcionalidade	
$f = \frac{M_A}{M_S}$	$f = 0,33778$
$f' = \frac{M_L}{M_A + M_S}$	$f' = 0,03818$
$m_{LV} = m_a + m_l + m_s$	
$m_a = f \cdot m_s$	
$m_l = f'(m_a + m_s)$	

A rota de caracterização, empregada no presente estudo, apresentando todas as etapas do processo, pode ser observada na Figura 6.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 6.** Diagrama de blocos do processo de preparação da amostra de lama vermelha.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram a lama vermelha devidamente quarteada, a homogeneização e dispersão da amostra e o aparato empregado na determinação da granulometria do material por via úmida, respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 7.** Pilha de homogeneização da amostra de lama vermelha.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 8.** Homogeneização e dispersão da amostra de lama vermelha.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 9.** Classificação granulométrica a úmido da amostra de lama vermelha.

## 5.2 | Caracterização da Amostra de Lama Vermelha

As amostras foram caracterizadas mineralogicamente, primeiramente, por meio da difração de raios-X (DRX), método do pó. Os difratogramas de raios-X das amostras, foram obtidos em equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação  $\text{Co K}\alpha$  (40 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ 2\theta$  por passo com tempo de contagem de 0,5 segundos por passo e coletados de 4 a  $80^\circ 2\theta$ , com detector sensível à posição LynxEye. As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por

comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 2006) em software Bruker DiffracPlus. Foram realizadas análises de difratometria de raios-X da amostra total e da fração  $-37\ \mu\text{m}$  para identificar os minerais presentes. Nos difratogramas das amostras foram identificados picos que correspondem possivelmente às fases cristalinas apresentadas nas figuras.

As amostras foram, ainda, analisadas por meio de lupa binocular, visando identificar a distribuição mineralógica por faixa granulométrica.

As análises químicas foram realizadas nos Laboratórios ALS Chamex, por fluorescência de raios-X (FRX) e *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP).

### 5.3 | Titulação

A metodologia de titulação foi baseada no procedimento adotado por Khaitan et al. (2009), em que as capacidades de neutralização ácida (ANC) da lama vermelha e do licor (fração líquida da lama) são determinadas.

Foram feitas medições potenciométricas de pH das amostras de licor, lama (suspensão) e lixívia, após sucessivas adições de alíquotas de HCl padronizado até um valor de pH na faixa entre 4,5 e 4,0. No caso da suspensão, a amostra foi agitada por cinco minutos a cada adição do ácido, e, no caso do licor ou das lixívia, por dois minutos, para, então, o pH ser medido.

Todas as amostras foram tituladas com HCl 0,4965 M, sendo adicionadas alíquotas de 0,5 mL. As lixívia foram produzidas através da adição de água destilada à lama, de modo à serem obtidas concentrações de 33, 20 e 9% (base seca). As polpas



resultantes sofreram agitação mecânica e, por fim, as lixívia foram obtidas por filtração a vácuo em funil de büchner. No caso da lixívia preparada com 33% de sólidos, foram testados os tempos de agitação de dez minutos e três horas, a fim de verificar se o tempo de contato com a fase sólida teria influência na alcalinidade da lixívia. Para a titulação, foram tomadas alíquotas de 25 mL das amostras de lixívia e de licor. As suspensões de lama foram preparadas mediante a adição de 4 e 8 g do sólido lavado e seco, proveniente da lama, a 25 mL do licor.

#### **5.4 | Análise de Carbono Total**

A análise de carbono total foi feita em equipamento LECO CNS-2000 com forno a 1400°C e padrão de solo da LECO 501-062 (1,26%). Foram analisadas amostras de suspensão (lama diluída em água) antes e após a reação de carbonatação em reator de vidro.

Após a reação de carbonatação, todo o conteúdo do reator foi imediatamente vertido num vaso e, sob agitação mecânica, foram retiradas as alíquotas para análise através de uma válvula localizada no fundo do vaso. A princípio, as amostras de suspensão eram secas em estufa entre 50 e 80°C, homogeneizadas em gral e quarteador Jones antes de serem analisadas.

## 5.5 | Ensaios de Absorção

Os ensaios de absorção foram feitos em reator de vidro, no qual uma corrente da mistura gasosa ar e CO<sub>2</sub> foi borbulhada no interior da suspensão através de um dispositivo de vidro sinterizado.

Os experimentos foram realizados com suspensões nas relações sólido:líquido de 5, 10, 20, 30 e 35 % (p/p). A quantidade de CO<sub>2</sub> presente no ar, medido no micro-cromatógrafo Varian (Modelo CP4900), era de 0,056% e foi considerada desprezível.

A variação do pH foi acompanhada durante todo o período dos experimentos, mediante a utilização de um eletrodo imerso na suspensão.

As concentrações das correntes gasosas nas linhas de entrada e saída do reator foram verificadas, utilizando um micro-cromatógrafo da marca Varian (Modelo CP4900), provido de detector de condutividade térmica e duas colunas para medição simultânea (Figura 10).

Foi utilizado argônio como gás de arraste. As medidas do gás de saída foram feitas num intervalo de três minutos, ou seja, as alíquotas analisadas eram aspiradas e injetadas no equipamento de três em três minutos, sendo este o menor intervalo de tempo possível para este aparelho.

O primeiro ponto (primeira alíquota) foi tomado após 20 s de reação, já que este período foi considerado suficiente para que o gás de entrada percolasse todo o sistema e a medida representasse o início do processo de absorção.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 10.** Sistema de absorção gasosa consistindo de reator de vidro, medidor de pH, cromatógrafo gasoso e "notebook" com software para aquisição de dados.

## 6 | RESULTADOS

### 6.1 | Classificação Granulométrica

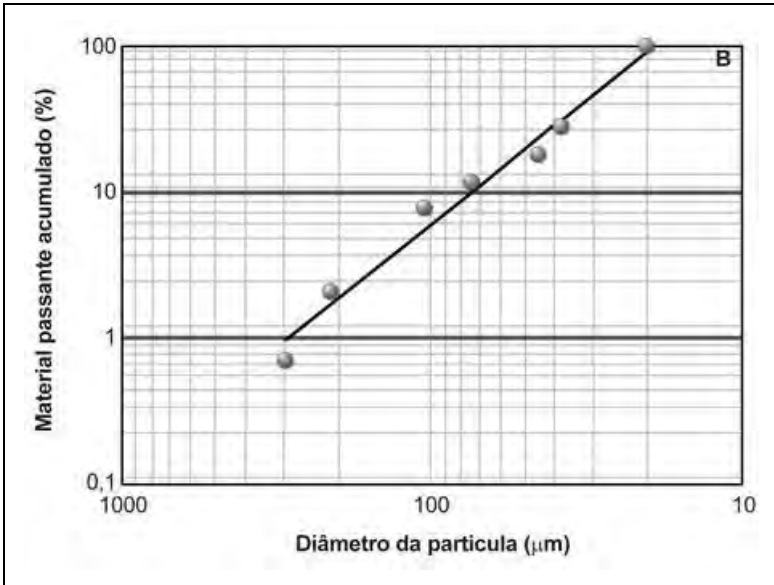
A seguir são apresentados, na Tabela 3, os resultados da classificação granulométrica a úmido da lama vermelha. Conforme os resultados, observa-se que o material concentra-se, preferencialmente, nas frações mais finas (44, 37 e -37  $\mu\text{m}$ ).

**Tabela 3.** Classificação granulométrica da lama vermelha.

Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Passante (%)	Acumulado (%)
297	0,71	0,71
210	1,38	2,08
106	5,53	7,62
75	3,79	11,41
44	6,53	17,94
37	9,78	27,72
-37	72,28	100,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	-

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 11 pode ser visto o gráfico da distribuição granulométrica da amostra de lama vermelha. Observa-se que diâmetro médio das partículas ( $d_{50}$ ) é de, aproximadamente, 35  $\mu\text{m}$ .

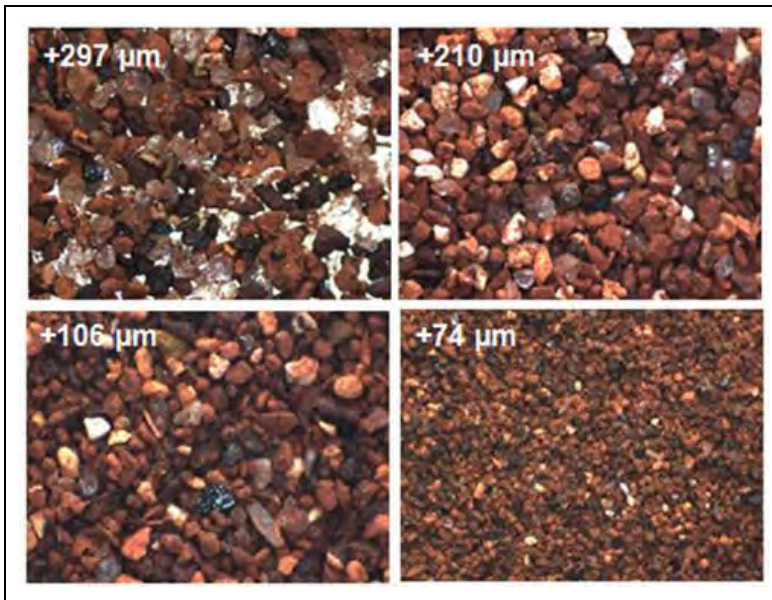


Fonte: Próprio autor.

**Figura 11.** Análise granulométrica da amostra de lama vermelha.

Na Figura 12 podem ser observadas fotos da lama vermelha em diferentes faixas granulométricas (297, 210, 106 e 74 µm) obtidas com o auxílio de lupa binocular em laboratório.

As análises indicaram que os minerais presentes, em quantidades significativas, no material foram o quartzo, gibbsita, óxido e hidróxido de ferro.

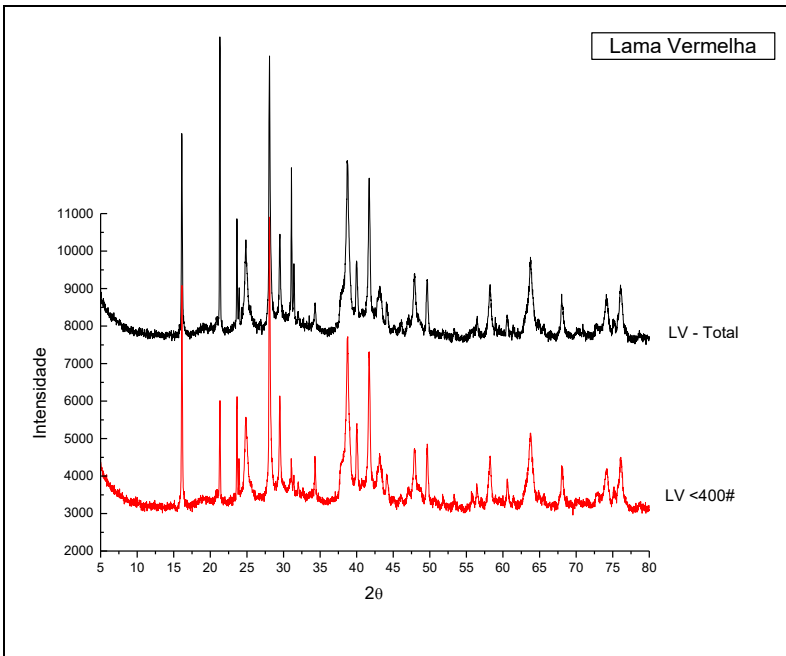


Fonte: Próprio autor.

**Figura 12.** Fotos da amostra de lama vermelha em diferentes granulometrias obtidas com lupa binocular.

## 6.2 | Difração de Raios-X

A seguir são apresentados os difratogramas de raios-X (Figura 13) da amostra média composta e a fração  $-37 \mu\text{m}$ . As amostras são constituídas por gibbsita, goethita, hematita, quartzo, rutilo/anatásio, hidróxido de cálcio e alumínio. Observa-se que ocorre uma pequena variação na composição mineralógica das amostras.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 13.** Difratogramas de raios-X das amostras de lama vermelha.

### 6.3 | Análises Químicas

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados das análises químicas das distintas faixas granulométricas da lama vermelha em estudo, empregando a técnica de fluorescência de raios-X por dispersão de energia.

**Tabela 4.** Análise química por FRX da lama vermelha por fração granulométrica.

Composto	Amostra Média (%)	Faixa Granulométrica ( $\mu\text{m}$ )		
		-297 +210 (%)	-210 + 106 (%)	-106 + 75 (%)
SiO <sub>2</sub>	19,08	39,07	25,32	17,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,47	11,3	12,17	12,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,93	36,49	45,24	48,60
CaO	1,21	0,67	0,99	1,57
MgO	0,01	0,01	0,01	0,01
Na <sub>2</sub> O	9,42	3,07	4,11	4,26
K <sub>2</sub> O	0,29	0,1	0,09	0,06
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,05	0,07	0,07
TiO <sub>2</sub>	4,69	1,62	4,23	6,37
MnO	0,03	0,03	0,08	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,051	0,035	0,058	0,055
SrO	0,01	0,01	0,01	0,01
BaO	0,01	0,01	0,01	0,01
PF	10,75	7,54	7,59	8,96
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados da análise química (Tabelas 4 e 5) é possível inferir que ocorre uma concentração da sílica na fração mais grossa do material (+210  $\mu\text{m}$ ), uma maior ocorrência de ferro entre -210+44  $\mu\text{m}$  e concentrações mais elevadas de sódio na fração mais fina do material (-37  $\mu\text{m}$ ).



**Tabela 5.** Análise química por FRX da lama vermelha por fração granulométrica.

Composto	Amostra Média (%)	Faixa Granulométrica ( $\mu\text{m}$ )		
		-297 +210 (%)	-210 + 106 (%)	-106 + 75 (%)
SiO <sub>2</sub>	19,08	16,73	16,99	18,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,47	18,32	21,65	23,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,93	41,58	35,32	30,31
CaO	1,21	1,52	1,43	1,12
MgO	0,01	0,01	0,01	0,01
Na <sub>2</sub> O	9,42	6,39	8,3	10,5
K <sub>2</sub> O	0,29	0,21	0,31	0,17
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,06	0,05	0,05
TiO <sub>2</sub>	4,69	5,45	4,83	4,68
MnO	0,03	0,09	0,04	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,051	0,069	0,055	0,051
SrO	0,01	0,01	0,01	0,01
BaO	0,01	0,01	0,01	0,01
PF	10,75	9,56	11,00	11,25
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

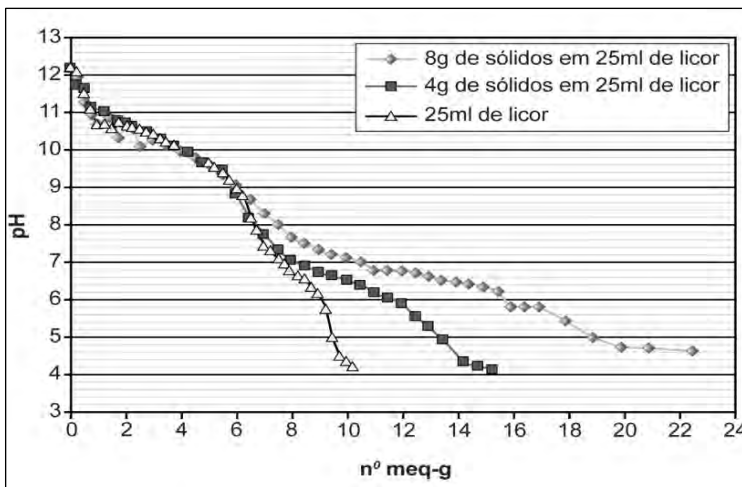
Fonte: Próprio autor.

## 6.4 | Ensaios de Avaliação da Capacidade de Neutralização e da Absorção de $\text{CO}_2$ da Lama Vermelha

### 6.4.1 | Avaliação da Capacidade de Neutralização

Os ensaios de titulação foram feitos nas amostras não reagidas de lama, licor e lixívia obtidas a partir da lama vermelha, enquanto que o monitoramento do pH, ao longo do tempo, foi feito para amostras de suspensão de lama vermelha após a absorção gasosa em reator de vidro.

Os resultados das análises titulométricas comprovaram a reatividade da fração sólida da lama frente ao ataque ácido (Figura 14).



Fonte: Próprio autor.

**Figura 14.** Variação do pH de amostras do licor com e sem a adição de sólidos em função do número de mili-equivalentes-grama (meq-g) de HCl adicionado.

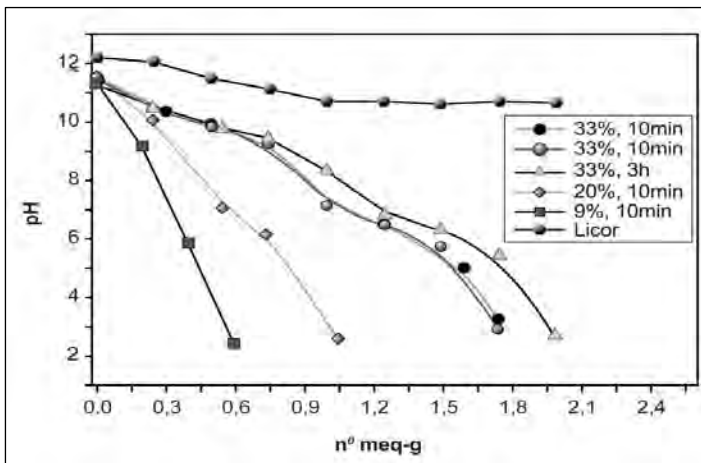
Observa-se que o aumento do consumo do ácido das amostras contendo sólidos ocorre em valores de pH mais baixos, consumo este que é função da quantidade de sólidos adicionada. Como o sólido reage mais lentamente que o líquido, a variação de pH em decorrência da adição de sólidos pode ser influenciada pelo tempo de titulação, ou seja, existe a possibilidade dos sólidos demorarem tanto a reagir que o aumento do consumo do ácido só se torne evidente após um determinado tempo de titulação, quando o pH estiver mais baixo. Para a comprovação desta hipótese, seria necessário fazer um estudo sobre a influência do tempo de titulação, o que não foi feito no presente trabalho já que, para efeito de comparação entre as amostras, os resultados obtidos foram suficientes.

Espera-se que quanto maior for a capacidade de neutralização ácida, utilizando ácido forte, maior será a capacidade de neutralização do ácido carbônico, o que tende a favorecer a taxa de absorção do  $\text{CO}_2$ . Contudo, é importante ressaltar que o processo de absorção gasosa é bem mais complexo do que a reação entre espécies que estejam solúveis numa mesma fase, já que existe a influência de outros parâmetros como a tensão superficial, por exemplo. Desta forma, a capacidade de neutralização é um indicativo importante mas não suficiente para a previsão da eficiência de absorção de  $\text{CO}_2$  pela amostra.

As lixívias poderiam vir a ser uma boa opção de material absorvedor em virtude da redução das dificuldades operacionais relativas à presença de sólidos, tais como o entupimento e abrasão da coluna e demais equipamentos. Por outro lado, a baixa alcalinidade e o custo decorrente da preparação da lixívia são desvantagens para seu uso.

Baseando-se nos resultados apresentados na Figura 14, estima-se que a capacidade de absorção de  $\text{CO}_2$  estaria entre 82 e 63  $\text{kg CO}_2/\text{t}$  de lama vermelha, caso fosse possível atingir valores de pH próximos aos obtidos utilizando HCl. Contudo, os ensaios preliminares em reator de vidro indicaram a formação de um tampão em valores de pH próximo a 7,0. Desta forma, a capacidade de absorção seria reduzida para a faixa de 49 a 30  $\text{kg CO}_2/\text{t}$  de lama, que estaria de acordo com os resultados obtidos com as suspensões mais diluídas.

As lixívia obtidas através da filtração das polpas, com relações sólido/líquido de 33, 20 e 9%, apresentaram alcalinidade bem inferior à do licor (Figura 15); portanto, é provável que possuam menor capacidade de reação com ácido carbônico.



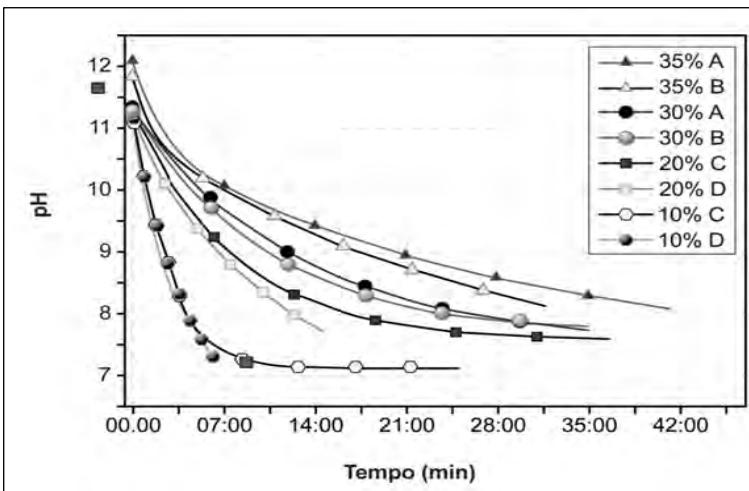
Fonte: Próprio autor.

**Figura 15.** Variação do pH em função do número de mili-equivalentes-grama (meq-g) de HCl das amostras (25 mL) de licor e lixívia preparadas com diversas relações sólido/líquido, sob agitação de dez minutos e três horas.

Conforme esperado, a alcalinidade da lixívia aumenta com o teor de lama e o tempo de agitação usado no preparo.

### 6.4.2 | Testes de neutralização da lama vermelha

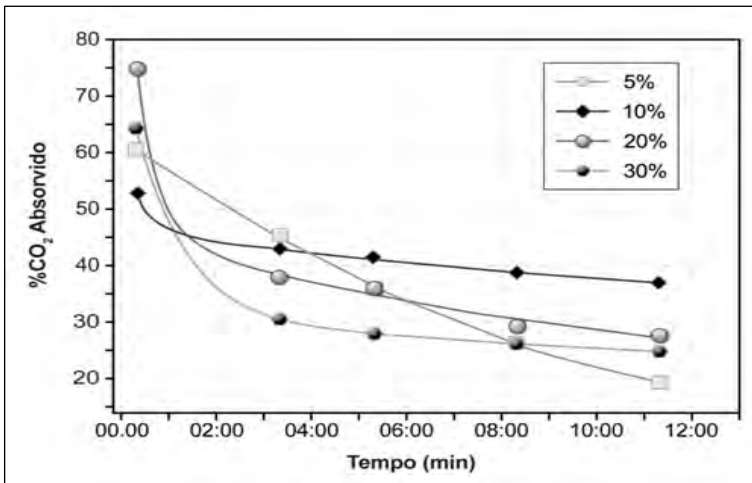
Os ensaios de absorção em reator de vidro foram realizados com o monitoramento do pH ao longo de toda a batelada, de modo que se pôde observar a influência da relação sólido/líquido da suspensão (Figura 16). Conforme esperado, as suspensões mais diluídas tendem a neutralizar mais rapidamente e atingir patamares mais baixos de pH.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 16.** Variação do pH com o tempo de absorção de amostras de suspensão com diversas concentrações, utilizando reator de vidro e vazão de  $1766 \text{ cm}^3/\text{min}$  ( $20\% \text{ CO}_2$ ).

Os resultados obtidos por cromatografia gasosa para a eficiência de absorção de  $\text{CO}_2$  (Figura 16 17) indicaram que o decaimento desse parâmetro ocorre de forma exponencial. As maiores eficiências de absorção de dióxido de carbono foram obtidas empregando suspensões mais diluídas de lama vermelha.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 17.** Variação da porcentagem de absorção de  $\text{CO}_2$  em função do tempo de reação com vazão da corrente gasosa de  $340 \text{ cm}^3/\text{min}$  (12%  $\text{CO}_2$ ).

Dessa forma, será importante avaliar se a utilização da fração sólida da lama é interessante em termos de ganho de eficiência na retirada do  $\text{CO}_2$  do efluente utilizando colunas de absorção, ou se seu uso resultará apenas em resultados negativos, tais como maior gasto de energia no bombeamento, a abrasão e sedimentação no interior dos equipamentos. Para efeito de neutralização ou carbonatação da lama, é provável que os

processos em batelada sejam mais adequados para este fim, considerando que os sólidos reagem lentamente. Neste caso, existe a necessidade de fazer um levantamento prévio para saber se a quantidade de CO<sub>2</sub> produzida na planta é suficiente para fazer a neutralização da lama produzida, para que seja justificável qualquer investimento neste sentido.

Além da reatividade do meio absorvedor, um grande número de propriedades, variáveis de projeto e variáveis operacionais, têm influência na eficiência de uma coluna de absorção. Propriedades que afetem a difusão de reagentes e produtos, tais como a tensão superficial, viscosidade e densidade, podem ter um efeito crítico no processo. Portanto, existe a possibilidade de até mesmo os constituintes não reativos da lama vermelha influenciarem no processo de absorção, na medida em que afetem essas propriedades.

As análises de difração de raios-X indicaram que a sodalita é parcialmente consumida durante o processo de neutralização da lama vermelha.

Os ensaios de titulação da lama vermelha indicaram que os sólidos apresentam um papel relevante na neutralização em valores de pH abaixo de 7,0, valores que não devem ser atingidos utilizando dióxido de carbono.

## 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de haver inúmeros trabalhos publicados sobre as possíveis aplicações da lama vermelha, a maior parte deste resíduo ainda é disposta em barragens ou bacias de rejeitos. Isto demonstra, claramente, a necessidade de estabelecer iniciativas para tornar economicamente viável a utilização da lama vermelha em escala industrial. As aplicações apresentadas na literatura variam desde produtos capazes de incorporar grande quantidade de massa do resíduo à aplicações que demandam pouca quantidade de lama vermelha, mas que visam a obtenção de produtos intensivos em tecnologia e com alto valor agregado. A tendência de melhora no desempenho dos produtos obtidos, em comparação com os produtos similares usados comercialmente, ocorre em virtude do aumento do número de trabalhos de P&D voltados para o aprimoramento desses produtos.

A alta alcalinidade da lama vermelha faz com que este resíduo possua potencial para ser utilizado na absorção e neutralização de efluentes ácidos, sendo este o foco de interesse deste projeto de pesquisa. Quanto ao abatimento de gases ácidos, utilizando a lama vermelha, existe a possibilidade deste abatimento ser feito em processos de adsorção ou absorção gasosa, sendo o segundo método mais adequado para a captura do  $\text{CO}_2$  em composições típicas dos efluentes de processos de combustão. Observa-se que, em alguns dos trabalhos sobre o abatimento de  $\text{CO}_2$  com lama vermelha, os autores mencionam o interesse estratégico em dar uma nova utilização ao resíduo carbonatado, em virtude da grande quantidade de lama vermelha que é produzida: de 1 a 2 ton por ton de alumina, em média.



É relatado na literatura que tanto espécies solúveis como insolúveis contribuem para a alcalinidade da lama vermelha; contudo, espera-se que as espécies solúveis reajam mais rapidamente com o ácido. Durante a absorção gasosa, à medida que o  $\text{CO}_2$  é dissolvido no meio aquoso, forma-se o ácido carbônico que se dissocia, liberando íons  $\text{H}^+$  no meio. Se o meio não estiver tamponado, o excesso de íons  $\text{H}^+$  irá ocasionar a dissolução da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dos outros carbonatos insolúveis presentes, prejudicando o seqüestro de  $\text{CO}_2$ . Desta forma, quando se prioriza o seqüestro de carbono, é importante a manutenção do pH elevado durante o processo.

Dados da literatura demonstram que o aumento da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  contribui, significativamente, tanto para a taxa de redução do pH como para o valor mínimo de pH atingido: conforme a pressão aumenta, mais rápida é a redução e menor é o valor final do pH. Contudo, após a carbonatação, observa-se uma tendência de aumento do pH da lama ao longo do tempo, provavelmente devido à dissolução lenta da fase sólida reativa, sendo este um aspecto negativo quando se deseja neutralizar a lama via carbonatação. A reação lenta dos sólidos é justamente apontada como um fator que restringe o potencial de seqüestro de carbono pela lama vermelha.

Os trabalhos publicados que tratam do abatimento de  $\text{CO}_2$  com a lama vermelha e seus sub produtos - líxivias e sólidos líxiviados - não aprofundam os aspectos cinéticos relativos à absorção, que são imprescindíveis quando se pensa em fazer o abatimento usando colunas de absorção gasosa. Espera-se que os tempos de residência em colunas de absorção sejam muito curtos e, desta forma, a taxa de reação se torna um parâmetro relevante juntamente com outras propriedades que tem influência no coeficiente de transferência de massa da

absorção gasosa reativa. Desta forma, será importante avaliar se a utilização da fração sólida da lama é interessante em termos de ganho de eficiência na retirada do  $\text{CO}_2$  do efluente, utilizando colunas de absorção ou se seu uso acarretará desvantagens, tais como o maior gasto de energia no bombeamento, a abrasão e sedimentação no interior dos equipamentos. Para efeito de neutralização ou carbonatação da lama, é provável que os processos em batelada sejam mais adequados à este fim, considerando que os sólidos reagem lentamente. Neste caso, existe a necessidade de se fazer um levantamento prévio para saber se a quantidade de  $\text{CO}_2$  produzida na planta é suficiente para fazer a neutralização da lama produzida, para que seja justificável qualquer investimento neste sentido.

Além da reatividade do meio absorvedor, um grande número de propriedades, variáveis de projeto e variáveis operacionais têm influência na eficiência de uma coluna de absorção. Propriedades que afetem a difusão de reagentes e produtos tais como a tensão superficial, viscosidade e densidade, podem ter um efeito crítico no processo. Portanto, existe a possibilidade de até mesmo os constituintes não reativos da lama vermelha influenciarem no processo de absorção, à medida que afetem essas propriedades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AROONWILAS, A.; VEAWAB, A. & TONTIWACHWUTHIKUL, P. **Behavior of the Mass-Transfer Coefficient of Structured Packings in CO<sub>2</sub> Absorbers with Chemical Reactions.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 38, p. 2044 – 2050, 1999.
- BONENFANT, D.; KHAROUNE, L.; SAUVÉ, S.; HAUSLER, R.; NIQUETTE, P.; MIMEAULT, M. & KHAROUNE, M. **CO<sub>2</sub> Sequestration by Aqueous Red Mud Carbonation at Ambient Pressure and Temperature.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 47, p. 7617 – 7622, 2008.
- BOOTH, N. J. **Secondment to the International Test Centre for CO<sub>2</sub> Capture (ITC), University of Regina, Canada.** Report No COAL R303 DTI/Pub URN 06/798, May 2005.
- DILMORE, R.; LU, P.; ALLEN, D.; SOONG, Y.; HEDGES, S.; FU, J. K.; DOBBS, C. L.; DEGALBO, A. & ZHU, C. **Sequestration of CO<sub>2</sub> in Mixtures of Bauxite Residue and Saline Wastewater.** *Energy & Fuels*, v.22, p. 343 – 353, 2008.
- DOYE, I. & DUCHESNE, J. **Column Leaching Test to Evaluate the Use of Alkaline Industrial Wastes to Neutralize Acid Mine Tailings.** *Journal of Environmental Engineering*, v. 131, n. 8, p. 1221 - 1229, 2005.
- FAN, H-L.; LI, C-H. & XIE, K-C. **Testing of Iron Oxide Sorbent for High-Temperature Coal Gas Desulfurization.** *Energy Sources*, v. 27, p. 245 – 250, 2005.
- HANAHAN, C.; MCCONCHIE, D.; POHL, J.; CREELMAN, R.; CLARK, M. & STOCKSIEK, C. **Chemistry of Seawater Neutralization of Bauxite Refinery Residues (Red Mud).** *Environmental Engineering Science*, v. 21, n. 2, p. 125 – 138, 2004.
- HAUBROCK, J.; HOGENDOORN, J.A. & VERSTEEG, G.F. **The Applicability of Activities in Kinetic Expressions: A More Fundamental Approach to Represent the Kinetics of the System CO<sub>2</sub>-OH<sup>-</sup>-salt in Terms of Activities.** *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 5753 – 5769, 2007.

- HEINS, S. M. **Method for Removal Sulfur from Coal in Stoker Furnaces**. US4173454, 1979.
- HUANG, L. J. **Process for Absorption of Sulfur Dioxide Waste Gas by Bayer Red Mud**. CN1883766, 2006.
- JONES, G.; JOSHI, G.; CLARK, M. & McCONCHIE, D. **Carbon Capture and the Aluminium Industry: Preliminary Studies**. *Environmental Chemistry*, v. 3, p. 297 – 303, 2006.
- JUNJI, A.; TAKESHI, T.; DAISUKE, M. & YASUHIRO, U. **Exhaust Gas Treatment Agent**. JP2002011346, 2002.
- KHAITAN, S.; DZOMBAK, D. A. & LOWRY, G. V. **Chemistry of the Acid Neutralization Capacity of Bauxite Residue**. *Environmental Engineering Science*, v. 26, n. 5, p. 873 – 881, 2009 (a).
- KHAITAN, S.; DZOMBAK, D. A. & LOWRY, G. V. **Mechanisms of Neutralization of Bauxite Residue by Carbon Dioxide**. *Journal of Environmental Engineering*, v. 135, n. 6, p. 433 - 438, 2009 (b).
- KORDAČ, M. & LINEK, V. **Dynamic Measurement of Carbon Dioxide Volumetric Mass Transfer Coefficient in a Well-Mixed Reactor Using a pH Probe: Analysis of the Salt and Supersaturation Effects**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.47, p. 1310 – 1317, 2008.
- KOUZOU, F.; KOUJI, I.; SHIYOUZOU, F.; YOUICHI, K.; KOUICHI, Y.; TAKUO, H. & YASUMI, S. **Removing Method for Sulfur Oxides and Nitrogen Oxides in Exhaust Gas**. JP53113761, 1978.
- MINEO, K.; ITSUPEI, N. & KAORU, K. **Treatment of Exhaust Gas with Industrial Waste Materials**. JP52094862, 1977.
- MYERS, J. G. & FIELD, J. H. **Alkalized Alumina Absorbent and Method of Making Same**. US3551093, 1970.

- NOTZ, R.; ASPRION, N.; CLAUSEN, I. & HASSE, H. **Selection and Pilot Plant Tests of New Absorbents for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture.** *Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, v. 85(A4), p. 510 – 515, 2007.
- OCHSENKUHN-PETROPOLU, M.; LYBEROPULU, T.; OCHSENKUHN, K. M.; PARISSAKIS, G. **Recovery of Lanthanides and Yttrium from Red Mud by Selective Leaching**” *Analytica Chimica Acta*. v. 319, p. 249-254, 1996.
- PAREDES, J. R.; ORDÓÑEZ, S.; VEGA A. & DÍEZ, F. V. **Catalytic Combustion of Methane over Red Mud-Based Catalysts.** *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 47, p. 37 – 45, 2004.
- PARK, S-J. & JUN, B-R. **Improvement of Red Mud Polymer-Matrix Nanocomposites by Red Mud Surface Treatment.** *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 284, p. 204 – 209, 2005.
- PARK, S-W.; CHOI, B-S.; KIM, S-S.; LEE, B-D. & LEE, J-W. **Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Colloidal Silica Solution with Diisopropanolamine.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 14, p. 166–174, 2008.
- REINER, K. & RUDOLF, S. **Catalytic Absorbent Prod. from Mixed Inorganic and Organic Waste - Contg. Catalytic Heavy Metal and Carbon by Pyrolysis and Activation, Used in Waste Gas Purificn.** DE4102557, 1992.
- RENFORTH, P.; MAYES, W. M.; JARVIS, A.P.; MANNING D.A; Burke, I.T, GRUIZ K. **Contaminant mobility and carbon sequestration downstream of the Ajka (Hungary) red mud spill: The effects of gypsum dosing.** *Science of the Total Environment*. v.1, p.421–422, 2012.
- SADA, E.; KUMAZAWA, H. & BUTT, M. A. **Simultaneous Absorption with Reactions in a Slurry containing Fine Particles.** *Chemical Engineering Science*, v. 32, p. 1499 – 1503, 1977.

- SAHU, R. C.; PATEL, R. K.; RAY, B. C. **Neutralization of red mud using CO<sub>2</sub> sequestration cycle.** *Journal of Hazardous Materials*. v.179, p. 28–34, 2010.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M. & DA MOTTA, M. **Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas.** *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, p. 322 – 338, 2007.
- SINGH, M.; UPADHAYAY, S. N. & PRASAD, P. M. **Preparation of Special Cements from Red Mud.** *Waste Management*, v. 16, n. 8, p. 665 - 670, 1996.
- SOUZA, A. L. **Transferência de Massa com Reação Química em Processos de Borbulhamento.** 1997. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- STRAGEVITCH, A. S. E. X. **Absorção com Reação Química em Processos de Borbulhamento: Casos Isotérmicos e Não-Isotérmicos.** 1996. 248 p. Dissertação (Doutorado) – Programa de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- SUSHIL, S. & BATRA, V. S. **Catalytic Applications of Red Mud, an Aluminium Industry Waste: A Review.** *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 81, p. 64 – 77, 2008.
- UYSAL, B. Z.; AKSAHIN, I. & YUCELF, H. **Sorption of SO<sub>2</sub> on Metal Oxides in a Fluidized Bed.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 27, p. 434 – 439, 1988.
- WANG, S.; ANG, H.M. & TADÉ, M.O. **Novel Applications of Red Mud as Coagulant, Adsorbent and Catalyst for Environmentally Benign Processes** *Chemosphere*, v. 72, p. 1621–1635, 2008.
- WU, Y. & CHAN, C. W. **A Data Analysis Decision Support System for the Carbon Dioxide Capture Process.** *Expert Systems with Applications*, v. 36, p. 9949 – 9960, 2009.

**YAMADA, K.; HARATO, T. & SHIOZAKI, Y. Process for the Removal of Sulfur Oxides from Exhaust Gases Using Slurry of Red Mud Containing Calcium Ion. US4222992, 1980.**

**ZOPFF, H. & MÜLLER, H-E. Process for Eliminating Acidic Components from Waste Gases. US4341745, 1982.**

## SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2016, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 300 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

### Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-96 – **O Descarte dos Extintores Veiculares à Luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Eraldo José Brandão, Luis Gonzaga Santos Sobral e Marcelo dos Santos Garcia Santana, 2017.

STA-95 – **Remediação e Biorremediação de Solos Multicontaminados com Hidrocarbonetos e Metais com Ênfase na Aplicação de Surfatantes e Biossurfatantes.** Daniele Leonel da Rocha, Cláudia Duarte da Cunha, Andréa Camardella de Lima Rizzo e Eliana Flávia Camporese Sérvullo, 2016.

STA-94 – **The Influence of Different Mineral Processing Techniques on the Bio-extraction of Metal Values from Ores and Secondary Sources.** Débora Monteiro de Oliveira, Luis Gonzaga Santos Sobral, 2016.



## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Geral: (21) 3865-7222  
Biblioteca: (21) 3865-7218  
Telefax: (21) 2260-2837  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)  
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



## Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

## O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 39 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.