



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

IARA FERREIRA SANTOS

ABSORÇÃO DE GASES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS
FÓSSEIS EM TORRE DE RECHEIO ESTRUTURADO
UTILIZANDO LAMA VERMELHA

BELÉM

2013

IARA FERREIRA SANTOS

ABSORÇÃO DE GASES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS EM
TORRE DE RECHEIO ESTRUTURADO UTILIZANDO LAMA VERMELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos.

ORIENTADORES: Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza.

Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza.

BELÉM

Março de 2013

IARA FERREIRA SANTOS

ABSORÇÃO DE GASES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS EM
TORRE DE RECHEIO ESTRUTURADO UTILIZANDO LAMA VERMELHA

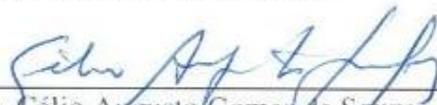
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos.

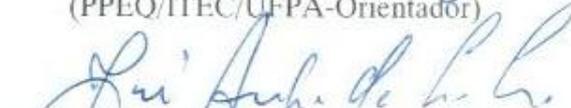
DATA DA AVALIAÇÃO: 11 / 03 / 2013

CONCEITO: _____

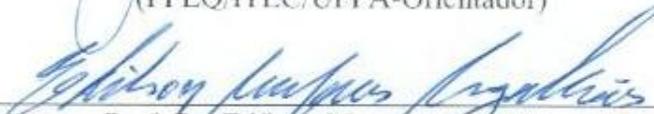
BANCA EXAMINADORA



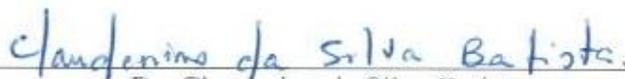
Prof. Dr. Celso Augusto Gomes de Souza
(PPEQ/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. Dr. José Antonio da Silva Souza
(PPEQ/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. Dr. Edilson Marques Magalhães
(FEQ/ITEC/UFPA-Membro)



Dr. Clauderino da Silva Batista
(PRODERNA/ITEC/UFPA-Membro)



Prof.^a. Dr.^a. Aderjane Ferreira Lacerda
(DTQ/CCET/UFMA-Membro)

BELÉM

Março de 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Santos, Iara Ferreira, 1990-
Absorção de gases da queima de combustíveis
fósseis em torre de recheio estruturado
utilizando lama vermelha / Iara Ferreira Santos.
- 2013.

Orientador: Célio Augusto Gomes de Souza;
Coorientador: José Antonio da Silva Souza.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém,
2013.

1. Gases- absorção e adsorção. 2. Dióxido de
carbono. 3. Bauxita- resíduos. I. Título.

CDD 22. ed. 660.28423

Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu marido, que são meus maiores incentivadores, e à toda a comunidade científica, que se empenha em pesquisar e estudar formas de tornar o nosso mundo um lugar melhor para todos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, por ter colocado em meu caminho diversas pessoas para me orientar e ajudar na longa jornada, por sempre me guiar em minhas escolhas, pelas graças e bênçãos alcançadas, e por agir em minha vida me fazendo ter a certeza de que sempre lhe terei ao meu lado.

À minha mãe, Marione Ferreira, por ter investido em minha educação, me amado e apoiado sempre em minhas escolhas e por ser minha melhor amiga. Obrigada por tudo que fazes por mim e que tenho certeza que continuarás fazendo. Mãe, todas as minhas vitórias na vida não são somente minhas, são nossas.

Ao meu marido, Cezar Monteiro Junior, por me amar, apoiar, incentivar e me fazer muito feliz, sendo sempre meu melhor amigo e companheiro, fazendo-se presente em todos os momentos e sendo meu porto seguro. Obrigada por tornar meus dias cheios de amor. Agradeço a Deus por ter te colocado em minha vida.

À minha irmã, Naara, e meus sobrinhos, Carlos e Pedro, por se fazerem presentes em minha vida apesar de distantes, me mostrando que família de verdade, independente da distância, sempre ama.

Ao meu orientador, Célio Souza, pelas orientações profissionais e pessoais. Obrigada por acreditar em mim e me orientar desde 2006, quando ainda como caloura fui inserida no enorme mundo da pesquisa científica, saibas que sempre serás lembrado com muito carinho e visto como exemplo de profissional a ser seguido.

Ao meu orientador, José Antonio Souza, por todas as orientações que me foram dadas e que permitiram que esse trabalho fosse realizado.

À todos os meus amigos, pelos momentos de descontração e risadas, e por torcerem pelo meu sucesso.

Aos profissionais que me ajudaram, Luis Venancio, Fernando Aracati, Otacílio Netto e Gláucia César. Nosso trabalho em equipe foi de fundamental importância para que essa dissertação e outros trabalhos fossem escritos, permitindo-nos contribuir, com nosso trabalho, para melhorar o mundo em que vivemos.

Ao CNPq pela ajuda financeira.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse projeto.

“Nenhuma abundância de recursos resiste ao impacto de uma exploração sem retorno.”
(Paulo Nogueira Neto)

RESUMO

A produção de alumina pelo processo Bayer produz de 1 a 3 toneladas de resíduo por tonelada de alumínio. Esse resíduo é denominado lama vermelha, composto de minerais não solúveis em hidróxido de sódio concentrado, como hematita e outros óxidos férreos, quartzo e óxidos de titânio. A lama vermelha possui em sua composição variados teores de NaOH, dependendo especificamente da planta industrial utilizada. A proposta desse trabalho é avaliar o processo de absorção de gases provenientes de uma caldeira em contracorrente com uma suspensão de lama vermelha a 27%, em torre *spray* e em torre de recheio estruturado. Foram realizados experimentos variando-se o tipo de torre de absorção, temperatura da fase líquida e teor de sólidos na fase líquida para avaliar a redução do teor dos gases de combustão na saída da torre de absorção e a variação do pH de acordo com o tempo de operação, para que fosse possível identificar o tempo necessário para que ocorra a neutralização da lama vermelha, bem como a redução no teor de dióxido de carbono, para isso foram realizadas medições dos teores de gases na entrada e na saída da torre de recheio estruturado, bem como medições de temperatura e pH. A absorção de CO₂ presente no gás de combustão pela suspensão de lama vermelha se dá pelo processo da carbonatação, no qual o gás reage com o NaOH presente na lama vermelha, sendo a água o catalisador. Os resultados obtidos após os experimentos foram satisfatórios, e concluiu-se que o processo realizado nas torres de absorção é eficiente para a diminuição do pH da lama vermelha e a redução do teor de CO₂ liberado para a atmosfera, promovendo um ganho duplo para o meio ambiente.

Palavras-chave: Absorção de gases; Dióxido de carbono; Lama vermelha.

ABSTRACT

The production of alumina from the Bayer process produces 1-3 tons of waste per ton of aluminum. This residue is known red mud, compound of minerals insoluble in concentrated sodium hydroxide, hematite and other iron oxides, quartz and titanium oxides. The red mud has in its composition varied levels of NaOH, depending on the specific industrial plant used. The purpose of this study is to evaluate the process of absorption of gases from a boiler countercurrent with a suspension of red mud, in a spray tower and a packed column. Experiments were performed varying the type of absorption tower, temperature of the liquid phase and solids content in liquid phase to evaluate the reduction in content of gases of combustion in the output of absorption tower and pH variation with time of operation, it was possible to identify the time required for the occurrence of red mud neutralization, and also a reduction in the content of carbon dioxide, thereunto were performed measurements of the concentrations of gases in the input and output packed column, and also measurements of temperature and pH. The absorption of CO₂ existing in the gases of combustion for suspension of red mud occurs by the carbonation process, where the gas reacts with NaOH present in red mud, with water as catalyst. The results obtained after the experiments were satisfactory, and it was concluded that the process performed in absorption towers is efficient for pH reduction of red mud and reducing the content of CO₂ freed to atmosphere, providing a double profit for the environment.

Keywords: Gas absorption; Carbon dioxide; Red mud.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Lagoa de disposição de lama vermelha da ALUMAR	27
Figura 2.2	Vista aérea da fábrica da Hydro-ALUNORTE.....	37
Figura 2.3	Difração de raios-x da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE.....	39
Figura 2.4	Gradiente de concentração para fluxo de material de um gás para um líquido	44
Figura 2.5	Torre <i>spray</i>	47
Figura 2.6	Torre de borbulhamento	47
Figura 2.7	Torre de recheios	48
Figura 3.1	Planta piloto situada no LEQ.....	51
Figura 3.2	Torre <i>spray</i>	52
Figura 3.3	Torre de recheios estruturados.....	53
Figura 3.4	Recheio estruturado	53
Figura 3.5	Reservatório destinado à preparação e circulação da suspensão de LV	54
Figura 3.6	Reservatório destinado ao peneiramento da suspensão de LV	55
Figura 3.7	Bomba centrífuga autoescorvante THEBE.....	55
Figura 3.8	Caldeira GERAMATIC utilizada como fonte de gases de combustão.....	56
Figura 3.9	Trocador de calor de contato direto em contracorrente	57
Figura 3.10	Bico gerador de névoa	57
Figura 3.11	Bico gerador de névoa montado no topo do trocador.....	58
Figura 3.12	Vista do ventilador ligado ao trocador de calor.....	58
Figura 3.13	<i>Manifold</i> utilizado para distribuição de gases	59
Figura 3.14	Phmetro portátil HANNA.....	59
Figura 3.15	Termômetro digital FTG.....	60
Figura 3.16	Anemômetro TSI e sonda de medição	60
Figura 3.17	Analizador de gases TELEGAN	61
Figura 3.18	Analizador de gases MRU Delta.....	61
Figura 3.19	Balança digital GEHAKA	62
Figura 3.20	Captador de sobrenadante imerso na fase aquosa da suspensão de lama vermelha após decantação da parte sólida	63

Figura 3.21	Conjunto de resistências em contato com a suspensão de LV para elevar a temperatura inicial do experimento64
Figura 3.22	Fluxograma do processo de absorção de gases.....65
Figura 3.23	Desenho esquemático do processo de absorção em contracorrente ocorrido nos experimentos67
Figura 3.24	Desenho esquemático da lavagem da torre de absorção ao final do experimento68
Gráfico 4.1	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0180
Gráfico 4.2	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0282
Gráfico 4.3	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0384
Gráfico 4.4	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0487
Gráfico 4.5	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0589
Gráfico 4.6	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0691
Gráfico 4.7	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0794
Gráfico 4.8	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0896
Gráfico 4.9	Variação do pH em função do tempo para o experimento 0998
Gráfico 4.10	Variação do pH em função do tempo para o experimento 10101
Gráfico 4.11	Variação do pH em função do tempo para o experimento 11103
Gráfico 4.12	Variação do pH em função do tempo para o experimento 12106
Gráfico 4.13	Variação do pH em função do tempo para o experimento 13110
Gráfico 4.14	Redução do pH ocorrida em experimentos realizados na TRE e na TS115
Gráfico 4.15	Variação do pH a longo prazo para os experimentos realizados na TS.....126
Gráfico 4.16	Variação do pH a longo prazo para os experimentos realizados na TRE..126
Gráfico 4.17	Variação do pH a longo prazo no experimento 02127
Gráfico 4.18	Variação do pH a longo prazo para o experimento 10 em FF e FA127
Gráfico 4.19	Variação do pH a longo prazo para o experimento 11 em FF e FA128
Gráfico 4.20	Variação do pH a longo prazo para o experimento 12 em FF e FA128
Gráfico 4.21	Variação do pH a longo prazo para o experimento 13 em FF e FA129
Figura 4.1	DRX da LV presente na suspensão antes e depois do experimento130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química média da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE	38
Tabela 2.2	Propriedades físicas da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE.....	39
Tabela 3.1	Propriedades dos recheios estruturados	54
Tabela 4.1	Condições operacionais para realização dos experimentos	76
Tabela 4.2	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 01	78
Tabela 4.3	Valores de pH obtidos no experimento 01	79
Tabela 4.4	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 01	79
Tabela 4.5	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 02	81
Tabela 4.6	Valores de pH obtidos no experimento 02.....	81
Tabela 4.7	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 02	82
Tabela 4.8	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 03	83
Tabela 4.9	Valores de pH obtidos no experimento 03	83
Tabela 4.10	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 03	84
Tabela 4.11	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 04	85
Tabela 4.12	Valores de pH obtidos no experimento 04	86
Tabela 4.13	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 04	86
Tabela 4.14	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 05	88
Tabela 4.15	Valores de pH obtidos no experimento 05	88
Tabela 4.16	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 05	89
Tabela 4.17	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 06	90
Tabela 4.18	Valores de pH obtidos no experimento 06	90
Tabela 4.19	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 06	91
Tabela 4.20	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 07	92

Tabela 4.21	Valores de pH obtidos no experimento 07.....	93
Tabela 4.22	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 07.....	93
Tabela 4.23	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 08.....	95
Tabela 4.24	Valores de pH obtidos no experimento 08.....	95
Tabela 4.25	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 08.....	95
Tabela 4.26	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 09.....	97
Tabela 4.27	Valores de pH obtidos no experimento 09.....	97
Tabela 4.28	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 09.....	98
Tabela 4.29	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 10.....	99
Tabela 4.30	Valores de pH obtidos no experimento 10.....	100
Tabela 4.31	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 10.....	100
Tabela 4.32	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 11.....	102
Tabela 4.33	Valores de pH obtidos no experimento 11.....	102
Tabela 4.34	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 11.....	103
Tabela 4.35	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 12.....	104
Tabela 4.36	Valores de pH obtidos no experimento 12.....	105
Tabela 4.37	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 12.....	105
Tabela 4.38	Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO ₂ , O ₂ , NO ₂ e SO ₂ presentes nos gases de combustão do experimento 13.....	107
Tabela 4.39	Valores de pH obtidos no experimento 13.....	108
Tabela 4.40	Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 13.....	109
Tabela 4.41	Valores da eficiência da absorção de SO ₂ para o experimento 10.....	118
Tabela 4.42	Valores da eficiência da absorção de SO ₂ para o experimento 11.....	118
Tabela 4.43	Absorção de CO ₂ durante os experimentos em 80 minutos.....	119
Tabela 4.44	Variação do pH durante os experimentos em 80 minutos.....	120
Tabela 4.45	Variação do pH a longo prazo para o experimento 01 em FF.....	121
Tabela 4.46	Variação do pH de longo prazo para o experimento 02 em FF.....	121
Tabela 4.47	Variação do pH de longo prazo para o experimento 03 em FF.....	121

Tabela 4.48	Variação do pH de longo prazo para o experimento 04 em FF	122
Tabela 4.49	Variação do pH de longo prazo para o experimento 05 em FF	122
Tabela 4.50	Variação do pH de longo prazo para o experimento 06 em FF	122
Tabela 4.51	Variação do pH de longo prazo para o experimento 07 em FF	123
Tabela 4.52	Variação do pH de longo prazo para o experimento 08 em FF	123
Tabela 4.53	Variação do pH de longo prazo para o experimento 09 em FF	123
Tabela 4.54	Variação do pH de longo prazo para o experimento 10 em FF	124
Tabela 4.55	Variação do pH de longo prazo para o experimento 10 em FA.....	124
Tabela 4.56	Variação do pH de longo prazo para o experimento 11 em FF	124
Tabela 4.57	Variação do pH de longo prazo para o experimento 11 em FA.....	124
Tabela 4.58	Variação do pH de longo prazo para o experimento 12 em FF	125
Tabela 4.59	Variação do pH de longo prazo para o experimento 12 em FA.....	125
Tabela 4.60	Variação do pH de longo prazo para o experimento 13 em FF	125
Tabela 4.61	Variação do pH de longo prazo para o experimento 13 em FA.....	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Anatásio
ALCOA	Empresa de Alumínio
ALUMAR	Consórcio de Alumínio do Maranhão
ALUNORTE	Alumina do Norte do Brasil SA
C	Cancrenita
C3A	Aliminato Tricálcico
Ca	Calcita
Daw	Dawsonita
DEA	Dietanolamina
EXP	Experimento
FA	Frasco Aberto
FF	Frasco Fechado
G	Gibsita
Go	Goetita
H	Hematita
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ITEC	Instituto de Tecnologia
K	Caulinita
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LV	Lama Vermelha
MDEA	Metildietanolamina
MEA	Monoetanolamina
MRN	Mineração Rio do Norte
PVC	Cloreto de Polivinila
Q	Quartzo
S	Sodalita
TCA	Trialuminato de Cálcio
TRE	Torre de Recheio Estruturado
TS	Torre <i>Spray</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
%	Porcentagem
SO ₂	Dióxido de enxofre
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
°C	Graus Celsius
Al(OH) ₃	Hidróxido de alumínio
NaOH	Hidróxido de sódio
km	Quilômetro
Al ₂ O ₃ .3H ₂ O	Alumina tri-hidratada
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
SiO ₂	Óxido de silício
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
TiO ₂	Óxido de titânio
Na ₂ O	Óxido de sódio
CaO	Óxido de cálcio
V	Vanádio
Ga	Gálio
Cr	Cromo
P	Fósforo
Mn	Manganês
Cu	Cobre
Cd	Cádmio
Ni	Níquel
Zn	Zinco
Pb	Chumbo
Mg	Magnésio
Zr	Zircônio
Hf	Háfnio
Nb	Nióbio
U	Urânio
Th	Tório

K	Potássio
Ba	Bário
Sr	Estrôncio
μm	Micrômetro
m^3/g	Metros cúbicos por grama
g/cm^3	Gramas por centímetros cúbico
g/l	Gramas por litro
% vol.	Porcentagem em volume
psi	Libra força por polegada quadrada (unidade de pressão)
CaCO_3	Carbonato de cálcio (Calcita)
Al	Alumínio
Cu^{2+}	Íon cobre (II)
Pb^{2+}	Íon chumbo (II)
g	Gramas
OH^-	Hidroxila
HCO_3^-	Íon bicarbonato
H^+	Hídron
min	Minuto
CO_3^{2-}	Íon carbonato
$\text{NaAl}(\text{OH})_2\text{CO}_3$	Dawsonita
$\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (aq)	Íon tetrahidróxidoaluminato
$\text{NaAl}(\text{OH})_4$ (aq)	Aluminato de sódio
$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$ (s)	Aluminato de cálcio hidratado
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	Água
NaHCO_3	Bicarbonato de sódio
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
$\text{Na}_6[\text{AlSiO}_4]_6$	Sodalita
$\text{H}_2\text{CO}_{3(aq)}$	Ácido carbônico
K	Kelvin
MPa	Megapascal (unidade de pressão)
rpm	Rotações por minuto
mL	Mililitro
kPa	Quilopascal (unidade de pressão)

M	Molar
HCl	Ácido clorídrico
kg	Quilograma
atm	Atmosfera (unidade de pressão)
L	Litro
P_{CO_2}	Pressão parcial de CO_2
h	Hora
km^2	Quilômetro quadrado
GtC	Bilhão de tonelada de carbono na atmosfera
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
NaCl	Cloreto de sódio
KCl	Cloreto de potássio
$MgCl_2$	Cloreto de magnésio
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
SO_x	Óxidos de enxofre
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O_2	Gás oxigênio
%-p	Porcentagem em peso
in	Polegada
cm^2	Centímetro quadrado
mm	Milímetro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
°	Grau
m^2/m^3	metros quadrados por metro cúbico
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
HP	<i>Horse-power</i> (unidade de potência)
g/dm^3	Gramas por decímetro cúbico
ppm	Parte por milhão
m^3/s	Metros cúbicos por segundo
l/s	Litros por segundo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	20
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	20
1.2 SÍNTESE DO TRABALHO.....	22
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 PROCESSO BAYER	23
2.2 LAMA VERMELHA	25
2.2.1 Utilização de lama vermelha	28
2.2.2 Química da carbonatação da lama vermelha	32
2.2.3 Sequestro de carbono utilizando lama vermelha	33
2.2.4 Lama vermelha proveniente da ALUNORTE	37
2.3 DIÓXIDO DE CARBONO	39
2.3.1 Sequestro de carbono	40
2.4 ABSORÇÃO DE GASES	42
2.4.1 Equipamentos utilizados para o processo de absorção	45
2.4.2 Absorção de dióxido de carbono	48
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	50
3.1.1 Lama vermelha	50
3.1.2 Gases de combustão	50
3.2 EQUIPAMENTOS	50
3.2.1 Sistema de lavador de gases	51
3.2.1.1 Torre <i>spray</i>	51
3.2.1.2 Torre de recheios estruturados.....	52
3.2.2 Sistema de preparo e circulação da suspensão de lama vermelha	54
3.2.3 Sistema de alimentação e distribuição de gases	55
3.2.4 Sistema de medição de dados do experimento	59
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	62
3.3.1 Preparo da suspensão de lama vermelha	62

3.3.1.1 Suspensão com defloculante.....	62
3.3.1.2. Suspensão com floculante	63
3.3.2 Temperatura inicial do experimento	63
3.3.2.1 Redução da temperatura	64
3.3.2.2 Elevação da temperatura.....	64
3.3.3 Procedimento experimental	64
3.3.3.1 Experimentos com adição de SO ₂	68
3.3.4 Tratamento dos dados experimentais obtidos	68
3.3.4.1 Equações mássicas para o CO ₂	68
3.3.4.2. Cálculo da eficiência da absorção de SO ₂	73
3.3.4.3 Cálculo da massa de CO ₂ absorvida por cem gramas de lama vermelha	73
3.3.4.4 Cálculo da porcentagem de CO ₂ absorvido durante o experimento	74
3.3.4.5 Cálculo da massa de CO ₂ absorvida por ano.....	74
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	77
4.1.1 Experimento 01 (Data de realização: 31/10/2011)	77
4.1.2 Experimento 02 (Data de realização: 18/11/2011)	80
4.1.3 Experimento 03 (Data de realização: 25/11/2011)	82
4.1.4 Experimento 04 (Data de realização: 02/12/2011)	85
4.1.5 Experimento 05 (Data de realização: 12/12/2011)	87
4.1.6 Experimento 06 (Data de realização: 13/12/2011)	89
4.1.7 Experimento 07 (Data de realização: 07/02/2012)	91
4.1.8 Experimento 08 (Data de realização: 08/02/2012)	94
4.1.9 Experimento 09 (Data de realização: 10/02/2012)	96
4.1.10 Experimento 10 (Data de realização: 20/03/2012)	98
4.1.11 Experimento 11 (Data de realização: 26/03/2012)	101
4.1.12 Experimento 12 (Data de realização: 26/04/2012)	103
4.1.13 Experimento 13 (Data de realização: 06/06/2012)	106
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 02 QUANTO AO USO DE SUSPENSÃO OU SOBRENADANTE	110
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 03 QUANTO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	111

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 11 QUANTO À QUANTIDADE DE NÍVEIS DE BICOS DA TORRE <i>SPRAY</i>	112
4.5 COMPARAÇÕES ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 08 E ENTRE OS EXPERIMENTOS 04 E 08 QUANTO AO TIPO DE TORRE	113
4.5.1 Comparação entre o experimento 01 e experimento 08	114
4.5.2 Comparação entre o experimento 05 e experimento 08	114
4.6 COMPARAÇÕES ENTRE OS EXPERIMENTOS 02 E 04 QUANTO AO TIPO DE TORRE UTILIZANDO SOBRENADANTE A TEMPERATURA ALTA.....	116
4.7 COMPARAÇÕES ENTRE OS EXPERIMENTOS 07 E 09 QUANTO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	117
4.8 COMPARAÇÕES ENTRE EXP 10 E EXP 11 QUANTO À EFICIÊNCIA DA ABSORÇÃO DE SO ₂	118
4.9 PORCENTAGENS DE CO ₂ ABSORVIDA DURANTE OS EXPERIMENTOS	119
4.10 VARIAÇÃO DO pH AO LONGO DO EXPERIMENTO.....	119
4.11 VARIAÇÃO DO pH A LONGO PRAZO	120
4.12 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DA LAMA VERMELHA ANTES E DEPOIS DA CARBONATAÇÃO.....	130
CAPÍTULO5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	132
5.1 CONCLUSÕES	132
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	134
ANEXO A	139
ANEXO B	141

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A crescente preocupação e cuidado com a preservação do meio ambiente e redução de impactos ambientais tem atraído a atenção da sociedade civil e da comunidade científica, para os diversos riscos que a produção industrial pode trazer para o meio ambiente e para a saúde humana. Dentre os impactos ambientais mais preocupantes pode-se citar a mudança climática devido ao aumento das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera.

Entre os vários tratados lançados a respeito do meio ambiente, o mais importante foi o Protocolo de Quioto, realizado em 1997, por convocar os países de todo o mundo, em especial os países desenvolvidos, a reduzirem as emissões de dióxido de carbono com cotas estabelecidas e prazos para a redução. Uma das formas existentes para reduzir as emissões são os chamados “créditos de carbono”, comercializados na forma de certificados de redução de emissões, são provenientes de projetos de sequestro de carbono. Há também o “Método de Desenvolvimento Limpo”, que é um mecanismo que permite que os países industrializados alcancem suas metas individuais de redução de emissões de CO₂ através de projetos que promovam transferência e geração de tecnologias ambientalmente seguras em países em desenvolvimento, apresentando benefícios para ambos os países.

Entre as atividades que contribuem para o aumento das emissões de CO₂ para a atmosfera, dá-se ênfase na produção de energia através da queima de combustíveis fósseis. Segundo Venancio (2010), em refinaria de alumina, utilizando o processo Bayer, localizada em Barcarena-Pará (Hydro-ALUNORTE) utiliza-se o óleo 1A ou 1B como combustível na caldeira de produção de vapor e no calcinado de alumina, gerando grande quantidade de gases de combustão com alto teor de carbono.

Outro problema ambiental referente ao processo Bayer é a grande quantidade de resíduo formado a partir do processamento da bauxita, denominado “lama vermelha”, que apesar de não ser considerado um resíduo tóxico apresenta um pH muito elevado, o que pode acarretar uma série de problemas ambientais caso não seja armazenado ou descartado de maneira correta.

No presente trabalho é estudada a viabilidade de utilizar a lama vermelha e os gases de combustão em um processo de absorção, buscando-se reduzir os impactos ambientais causados por esses dois rejeitos provenientes da indústria de produção de alumina.

Enick et al. (2001), Jones et al. (2006), Sahu et al. (2010a), Venancio (2010) entre outros, já abordaram o processo de absorção de CO_2 pela lama vermelha, obtendo bons resultados. O processo se dá pelas reações de carbonatação entre alguns constituintes da lama vermelha e o dióxido de carbono, reduzindo o pH da lama vermelha e sequestrando CO_2 .

A carbonatação é um processo seguro e barato, visto que os produtos formados a partir das reações químicas que ocorrem são estáveis. O uso da carbonatação pode ser uma solução vantajosa para os problemas enfrentados com o armazenamento de lama vermelha e com as milhares de toneladas de CO_2 que são emitidas anualmente pelas indústrias durante a produção de alumina. Além disso, a lama vermelha carbonatada apresenta uma série de benefícios associados ao seu uso para alteração do solo, material para a fabricação de telhas e tijolos, produção de cimento, entre outros materiais a serem utilizados na construção civil.

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivos:

- i. Avaliar o processo de absorção de CO_2 por uma suspensão de lama vermelha em uma planta piloto, com o intuito de capturar e reduzir o teor de dióxido de carbono nos gases de combustão provenientes da queima de combustíveis fósseis, bem como modificar algumas das propriedades da lama vermelha que impedem o descarte no meio ambiente.
- ii. Utilizando-se torres de absorção distintas para a realização dos experimentos pretende-se avaliar a eficiência de cada uma delas de acordo com variação de temperatura, concentração da suspensão e características estruturais das torres;
- iii. Estudar a taxa de variação do pH da suspensão de lama vermelha durante a realização do experimento em tempos reduzidos e a longo prazo;
- iv. Estudar a eficiência da absorção de SO_2 de acordo com o tipo de torre utilizada, visto que de acordo com o teor de soda cáustica presente na lama vermelha, proveniente do processo Bayer, e com os trabalhos encontrados na literatura é possível obter bons resultados, e como em algumas correntes de combustão também é detectado SO_2 o processo de absorção estudado no presente trabalho é uma forma de reduzir também as emissões de SO_2 .
- v. Comparar dois sistemas de absorção: utilizando torre de recheio estruturado comparando ao sistema convencionalmente utilizado de torre de lavagem por aspersão.

1.2 SÍNTESE DO TRABALHO

O presente capítulo apresenta as motivações que levaram à realização de um estudo acerca do processo de absorção que ocorre entre gases de combustão e uma suspensão de resíduo do processo Bayer, como será visto mais adiante, bem como os objetivos pretendidos nesse trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são abordados os temas: processo Bayer, lama vermelha, absorção de gases, dióxido de carbono e sequestro de carbono.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos experimentos e obtenção dos dados experimentais, bem como as etapas do processo. Mostram-se também as equações utilizadas para o tratamento dos dados obtidos após os ensaios experimentais.

No Capítulo 4 têm-se os dados experimentais obtidos ao longo desse trabalho, são apresentados os resultados obtidos ao longo de cada experimento e também o resultado do tratamento dos dados obtidos, fazendo comparações entre os experimentos de acordo com as informações que são consideradas mais importantes para o presente trabalho, a fim de que se torne possível avaliar quais as condições mais eficientes para o processo desejado.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais, bem como sugestões para trabalhos futuros, que podem ser desenvolvidos buscando-se cada vez mais o melhoramento do processo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO BAYER

O processo patenteado por Bayer, em 1892 foi um grande avanço no tratamento de minérios que permitiu extrair alumina do minério de bauxita em grande escala de forma econômica. Este processo, que hoje é geralmente conhecido como "o processo Bayer", foi tão bem sucedido que se tornou a base de uma indústria nova e importante que desde então tem crescido exponencialmente (KLAUBER et al., 2009).

Anteriormente ao surgimento do processo Bayer, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier, desenvolvido cerca de 30 anos antes por Louis Le Chatelier. Esse método consiste no aquecimento da bauxita com Na_2CO_3 a 1200°C , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ através da ação do CO_2 e, finalmente, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado é filtrado, seco e limpo (SILVA FILHO et al., 2007).

O processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, devido à drástica redução no custo de produção da Al_2O_3 que este proporcionou. O processo Bayer é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas (SILVA FILHO et al., 2007 apud HIND et al., 1999). Neste processo a bauxita é inicialmente digerida à temperatura de uma solução cáustica (digestão) para dissolver as espécies de alumínio solúveis (gibbsita, boehmita e diásporo) (WHITTINGTON, 1996).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de bauxita, com quase 10% da produção mundial, 2,7 bilhões de toneladas de reservas de bauxita existentes no país, dos quais 95% estão localizados no estado do Pará, na região norte do país, o que representa 11% das reservas mundiais (BORGES et al., 2011).

A bauxita produzida pela Mineração Rio do Norte (MRN) empresa de mineração, no estado do Pará, é transportada por cerca de 1000 km pelos rios Trombetas e Amazonas e levado para o porto de Vila do Conde, onde está localizada a Hydro-ALUNORTE, local onde a planta de produção de alumina está localizada (BORGES et al., 2011).

Segundo Machado (2010), a bauxita tem como constituintes principais/majoritários a gibbsita, boehmita e diásporo, enquanto que os constituintes minoritários são: hematita, magnetita, caulinita e outros óxidos.

O processo Bayer pode ser dividido em duas etapas: etapa vermelha e etapa branca.

De acordo com Souza (2010), as principais fases da etapa vermelha são:

- i. Estocagem da bauxita: a bauxita é descarregada dos navios no porto de Vila do Conde, situado na cidade de Barcarena, e transferida para a área de estocagem por meio de correia transportadora.
- ii. Moagem: a bauxita passa por um processo de redução de dimensões para que a polpa de bauxita atenda às exigências para o processo de digestão, tais como, granulometria, vazão e porcentagem de sólidos ideais. Após a moagem, a polpa é bombeada para o tanque pulmão e então bombeada para a digestão.
- iii. Digestão: ocorre a dissolução da alumina presente na bauxita pelo licor pobre, uma solução de soda cáustica, que irá extrair a alumina presente na bauxita enquanto que as impurezas permanecerão insolúveis.
- iv. Decantação e filtração da lama vermelha: nessa fase, a solução de licor rico é separada das impurezas sólidas (lama vermelha) através da decantação acelerada por floculantes sintéticos. Após decantada a lama é removida e bombeada para uma série de lavadores para que seja retirada grande parte da soda cáustica presente.
- v. Filtração: essa etapa tem como objetivo reter partículas sólidas presentes no aluminato de sódio para que o licor rico tenha baixa concentração (cerca de 10 mg/L) de lama para a próxima etapa do processo (etapa branca).

A etapa branca, segundo Souza (2010), apresenta três principais fases:

- i. Precipitação: nesse processo, a alumina solúvel presente no licor rico resfriado é transformada para a forma sólida da alumina tri-hidratada ou hidrato ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Aproximadamente 30% do licor rico é bombeado para precipitadores aglomeradores que recebe uma descarga de semente fina, onde ocorre a aglomeração das partículas, o restante do licor rico (70%) é levado para precipitadores cementadores que recebem semente grossa, nos cementadores ocorre um aumento da resistência das partículas do hidrato, que serão enviados aos precipitadores de leite denso para que ocorra um aumento do rendimento de precipitação.
- ii. Calcinação: após lavagem e filtração, o hidrato passa por secadores Venturi para retirar a umidade superficial, em seguida é encaminhada para o forno, onde ocorrerá a calcinação a temperatura entre 900°C e 1100°C, retirando-se a água de cristalização do hidrato. Em seguida, a alumina calcinada é então resfriada em resfriador de leite fluidizado.

- iii. Expedição: Após o processo de resfriamento, a alumina é então enviada por correia transportadora até o porto de Vila do Conde e embarcada nos navios para a exportação.

2.2 LAMA VERMELHA

Lama vermelha ou resíduo de bauxita é a denominação do material residual, obtido a partir da dissolução dos minerais hidratados de alumina presentes na bauxita pelo licor cáustico utilizado no processo Bayer. Ao lado dos componentes, essencialmente não solúveis da bauxita, tais como ferro e minerais de titânio, a lama vermelha contém alguns minerais solúveis de alumina não digeridos e outros compostos (BÁNVÖLGYI e HUAN, 2010). Consiste em média, de aproximadamente 70% (em peso) de fases cristalinas e 30% de materiais amorfos (GRÄFE et al., 2009).

De acordo com Tsakiridis et al. (2004), a lama vermelha é um material complexo, cuja composição química e mineralógica dependem diretamente da fonte da bauxita e dos parâmetros tecnológicos utilizados no processo de produção. Contém seis componentes principais, são eles: Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Na_2O e CaO , além de pequenas quantidades de outros elementos, presentes na forma de óxidos, tais como, V, Ga, Cr, P, Mn, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Mg, Zr, Hf, Nb, U, Th, K, Ba, Sr.

A LV possui partículas com tamanho médio inferior a $10\ \mu\text{m}$ e algumas partículas com diâmetro maior que $20\ \mu\text{m}$ também estão disponíveis. É um material alcalino, tixotrópico, e possui elevada área superficial na ordem de $13\text{-}16\ \text{m}^2/\text{g}$ com uma densidade real de $3,30\ \text{g}/\text{cm}^3$ (PARAMGURU et al., 2005).

A quantidade e qualidade da lama vermelha, a quantidade e o teor cáustico do licor aderente diferem amplamente em várias refinarias (BÁNVÖLGYI E HUAN, 2010). Dependendo da qualidade da bauxita e dos parâmetros do processo, cerca de 1-3 toneladas de resíduo são produzidos por tonelada de alumina, a um custo de cerca de 2-10 dólares por tonelada do resíduo seco. A produção anual global de resíduos é cerca de 120 milhões de toneladas, aumentando a uma taxa de cerca de 10% ao ano (ICSOBA, 2011).

A LV contém 15-40% de sólidos e é altamente alcalino (pH 11,0-12,5), contém partículas muito finas e é difícil de se estabilizar em água ou em terra compacta. O comportamento da sedimentação e propriedades físicas, químicas e mineralógicas da lama vermelha resultante do processo de produção de alumina podem afetar não apenas o custo de

produção da alumina mas também os aspectos ambientais e a eficácia da eliminação e armazenamento (LI, 1998).

O comportamento de sedimentação dos rejeitos é um fator econômico importante, uma vez que controla a pureza, e um importante fator ambiental, o conteúdo líquido final dos rejeitos de lama vermelha para eliminação. No processo Bayer, os fatores operacionais que determinam diferentes taxas de sedimentação não são ao todo claros. Sabe-se que dois diferentes tipos de bauxitas com alguns metros de separação podem produzir lamas vermelhas com diferentes taxas de sedimentação. (LI e RUTHERFORD, 1996).

O trabalho de Li e Rutherford (1996), revela as diferenças nas taxas de sedimentação, propriedades mineralógicas, físicas e químicas que existem entre resíduos de lama vermelha estudados, derivadas de bauxitas de fontes diferentes. Segundo Li e Rutherford (1996), a facilidade de sedimentação/separação da LV (rejeito) durante a produção de alumina a partir da bauxita pelo processo Bayer é um dos fatores importantes que controlam a produtividade da indústria de alumina, ou seja, a pureza de Al_2O_3 . Uma sedimentação rápida da LV permite um processo de separação fácil para a produção de Al_2O_3 com alta pureza e permite uma maior quantidade de alumina a ser produzida.

Até hoje, em quase todas as partes do mundo, a LV é eliminada a partir de duas formas principais, dependendo dos recursos e áreas disponíveis. Em países como a França, Inglaterra, Alemanha ou Japão, onde há disponibilidade de terra e mar para que o resíduo seja despejado nas proximidades, a prática é descarregar a lama no mar. Onde há terra disponível gratuitamente próximo às áreas de produção, a lama é bombeada para piscinas e lagos construídos especificamente para deposição de LV (PARAMGURU et al., 2005).

Os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição. Os métodos úmidos aplicáveis à lama vermelha consistem em grandes diques onde a lama vermelha é disposta com baixo teor de sólidos. A separação de fases ocorre no local de disposição, onde o material sólido sedimenta e surge um sobrenadante alcalino. A operação é simples e barata, consistindo na sedimentação natural da fase sólida e na recirculação do sobrenadante para a fábrica. Porém o potencial de impacto sobre o meio ambiente é alto. A área de disposição final necessária é grande, 100 a 200 acres em média. A vida útil da área normalmente é curta, entre 4 e 7 anos. Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos

de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes (SILVA FILHO et al., 2007).

Os depósitos são geralmente construídos perto das áreas de mineração de bauxita, e 88% estão localizados em regiões tropicais com um clima de monção (LI, 1998). A Figura 2.1 apresenta uma lagoa de disposição de LV, projetada especialmente para esse fim, da ALUMAR, empresa localizada no Brasil na cidade de São Luís, estado do Maranhão.



Figura 2.1 - Lagoa de disposição de lama vermelha da ALUMAR.
Fonte: SILVAFILHO et al., 2007.

A disposição de LV, o modo de transporte e deposição em uma bacia de decantação, lagoa ou aterro sanitário abrange aspectos de paisagismo, reabilitação e ambientais. Naturalmente, os principais objetivos continuam sendo, a redução do volume de LV, a redução no teor de soda cáustica presente no resíduo, a redução do impacto ambiental, o melhoramento do potencial de recuperação e a melhoria das possibilidades de reabilitação (PARAMGURU, 2005).

O método de disposição conhecido como “*off-shore disposal*” consiste no lançamento da lama vermelha em um corpo hídrico receptor, rio ou oceano (SILVA FILHO et al., 2007).

Na Grécia, a LV é descarregada, através de uma linha de tubos, a uma taxa de 500.000 toneladas/ano em Antikyra Bay, na linha da costa norte no centro do Golfo de Corinto. Na saída, a suspensão de LV tem uma concentração de 500 g/l e densidade de 1,3 g/l (TSAKIRIDIS et al., 2004 apud POULOS et al., 1996 e VARNAVAS e

ACHILLEOPOULOS, 1995). A característica da LV como resíduo rico em metal juntamente com a água superficial na área de depósito, leva a grande dispersão do material e ao transporte a maiores distâncias. Assim, quantidades significativas de metais tóxicos, associada com a LV, são dispersos no Golfo de Corinto (TSAKIRIDIS et al., 2004).

Os métodos conhecidos como métodos secos ou semi-secos de disposição tendem a serem aplicados com mais frequência. Os métodos secos de disposição apresentam as seguintes vantagens sobre os métodos úmidos: melhor manuseio, maior segurança, geração de um menor volume de lama, menor área ocupada e reabilitação mais fácil da área (SOFRÁ e BOGER, 2002).

Outro método utilizado é a disposição de “*tailing*” espessado, onde a lama vermelha é disposta no ponto central da área de disposição, formando um monte cônico. A geometria cônica elimina a necessidade de barragens ou diques, há um aumento na estabilidade do depósito, facilitando a reintegração da área ao meio ambiente (SOFRÁ e BOGER, 2002).

A disposição não adequada da lama vermelha pode acarretar em problemas como: contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outro agente químico; contato direto com animais, plantas e seres humanos; o vento pode carregar pó dos depósitos de lama vermelha seca, formando nuvens de poeira alcalina; impacto visual sobre uma extensa área. Alguns casos de acidentes ambientais provocados pela disposição inadequada da lama vermelha em vários países são relatados na literatura. Problemas relacionados com o encerramento das atividades sem a adequada proteção do meio ambiente também são reportados (SILVA FILHO et al., 2007).

Apenas uma pequena porcentagem da produção anual de resíduos está sendo usado atualmente, principalmente em cimento e cerâmica, na agricultura, como aterro ou na construção e aterramento de estradas. O restante é armazenado em grande parte (seca ou úmida) na terra e adicionado aos 2,7 bilhões de toneladas de resíduos que já estão armazenadas (ICSOBA, 2011).

2.2.1 Utilização de lama vermelha

Atualmente, a tendência geral para os resíduos industriais ou subprodutos, que são produzidas em países industrializados, é estudar as formas alternativas para o seu aproveitamento, a fim de eliminar custos de eliminação e evitar a contaminação do solo e da água (TSAKIRIDIS et al., 2004). Com base nisso, segue nesse tópico alguns trabalhos

encontrados na literatura que estudam a viabilidade de empregar a LV em outros processos para os mais diversos fins.

Wagh et al. (1996) desenvolveram um processo de estabilização de LV com base em reações ácido-base entre o óxido de magnésio e ácido fosfórico ou ácido de fosfato em solução, resultando em resíduos com propriedades de cerâmica dura e densa. Esse tipo de material cerâmico pode ser usado como materiais estruturais em operações de gerenciamento de resíduos e na construção civil. As cerâmicas de lama vermelha feitas por este processo foram de baixa porosidade materiais (= 2% vol.) e apresentaram uma força de compressão igual à do concreto de cimento *Portland* (4944 psi). O mecanismo de adesão responsáveis por esta resistência parece ser o resultado de reações da goetita e boehmita com a solução de ácido, e também a encapsulação de partículas de LV na matriz Mg-fosfato. Esse processo é bastante atraente para a fabricação de elementos de construção em regiões onde a indústria de cimento convencional não satisfaça a demanda.

López et al. (1998) avaliaram as propriedades adsorventes da lama vermelha para o uso em tratamento de águas residuárias.

No trabalho de Snars et al. (2004) foi analisado o potencial da lama vermelha como agente de adubação devido ao seu elevado pH e da alta capacidade de neutralização de ácido. O efeito da LV como adubo diminui com o aumento do pH do solo. Em todos os casos, CaCO_3 tinha uma capacidade de adubação muito maior do que a lama vermelha, as vantagens que estão associadas com a utilização de LV são, por exemplo, menor custo, menor lixiviação de fósforo e repelência de água reduzida.

Tsakiridis et al. (2004) investigaram a possibilidade de adicionar lama vermelha, numa proporção de 3,5%, no material utilizado para a produção de clínquer de cimento Portland. O efeito da reatividade do resíduo na mistura foi avaliado com base no teor de cal que não reagiu em amostras sinterizadas a altas temperaturas. O clínquer contendo 3,5% de LV foi produzido por uma sinterização a 1450°C, e de acordo com os resultados das análises químicas e mineralógicas concluiu-se que a LV não afetou as características mineralógicas do clínquer, e de acordo com os testes das propriedades mecânicas verificou-se que a adição de LV, para a proporção estudada, não afeta negativamente a qualidade do cimento produzido.

Silva Filho et al. (2005) utilizaram LV calcinada a 550°C como material adsorvente para remoção de corantes em efluentes de indústrias têxteis, após a calcinação a LV elimina as moléculas de água e material orgânico, aumentando a área superficial de contato. Os resultados indicaram uma remoção média de 70%, sendo a quantidade de lama vermelha e agitação utilizadas apontadas como as principais variáveis que influenciam no processo.

O trabalho desenvolvido por Paramguru et al. (2005) aponta uma série de aplicações para a LV em diversos ramos, como por exemplo:

- i. Aterro e recuperação de terras: minas de bauxita ou pedreiras podem ser preenchidas por LV, desde que a LV seja previamente neutralizada. Para neutralização podem ser usados, cal, gesso, água do mar, ou outros materiais que apresentem propriedades de neutralização semelhantes quando misturados com a LV;
- ii. Cobertura de aterros: para esse fim, também é necessário neutralizar anteriormente a LV e misturá-la com argila para cobertura de terras;
- iii. Alicerce de estrada e material para construção de diques: é necessário empilhar e comprimir a LV;
- iv. Alternativa para sedimento de pântano: um estudo realizado na Universidade de Tulane (PARAMGURU et al. apud GOLDSTEIN e REMIES, 1999) mostrou que mais de 25 milhas quadradas de Pântanos em Louisiana são perdidos por ano devido à falta de sedimentos, erosão litorânea e subsidência. A LV foi proposta como alternativa, desde que seja feita a retirada da quantidade de metais que possam ser prejudiciais para os organismos aquáticos;
- v. Neutralização de terras agrícolas/compostagem: a lama vermelha pode ser misturada com adubos compostos com o objetivo de neutralizar o solo onde este seja muito ácido;

A avaliação econômica de estratégia do processo específico para recuperar os teores de metais presentes na LV depende de sua composição, que varia conforme a planta de produção. Três estratégias podem ser trabalhadas: o ferro pode ser retirado por um processo básico para extração de ferro; o alto teor de titânio exigiria tratamento da escória para recuperá-lo; altos teores de Na_2O e de Al necessitam de uma sinterização prévia para serem recuperados (PARAMGURU et al, 2005).

No trabalho de Fois et al. (2007), foi estudada a absorção de SO_2 , com suspensões de LV utilizando um reator de borbulhamento em escala laboratorial com alimentação contínua de ambas as fases gasosa e líquida. A taxa de absorção foi medida para quatro concentrações diferentes de suspensão. O fenômeno da absorção foi estudado pelo desenvolvimento de um modelo baseado na teoria de filme. Os ensaios experimentais de absorção de SO_2 mostraram que a eficiência da absorção aumenta com o aumento da taxa de fluxo de gás, enquanto que é quase constante com o aumento da taxa de vazão de líquido. Os resultados obtidos mostram que o efeito da reação química é mais elevado quanto maior for a concentração da suspensão de LV.

Silva Filho et al. (2007) utilizaram lama vermelha como material adsorvente para o tratamento de efluentes, sendo neste caso, necessário ativá-la. Sua ativação pode ser feita através de tratamento térmico por calcinação em temperaturas próximas a 400°C, o que resulta em um aumento de 3 a 4 vezes em sua área superficial (SILVA FILHO et al., 2007 apud SUJANA et al., 1996). Essa temperatura é relativamente baixa quando comparada à necessária para a ativação (esfoliação) de outros materiais como, por exemplo, a vermiculita, que sofre expansão somente na faixa de 800 a 1000°C (SILVA FILHO et al., 2007 apud FRANÇA et al., 2002).

Foi estudada a possibilidade de utilizar a lama vermelha neutralizada por CO₂ e ativada como material adsorvente para a remoção de arsenato (Sahu et al., 2010b) e Zn (II) (Sahu et al., 2011) de soluções aquosas, foram obtidos bons resultados, principalmente por se tratar de um material de baixo custo.

Magalhães (2008), Souza (2010) e Santos (2011) estudaram a viabilidade de utilizar lama vermelha, em mistura com argila, sílica e biomassa, em variadas proporções na mistura, para produção de agregados leves a serem utilizados na indústria da construção civil, obtendo bons resultados quanto ao emprego de LV para este fim.

Pulford et al. (2012) utilizaram lama vermelha carbonizada por craqueamento catalítico de hidrocarbonetos, o que resulta em um material magnético com maior área superficial. Os testes mostraram que a LV carbonizada é 10 vezes mais eficiente na remoção de Cu²⁺ e Pb²⁺ em comparação com a LV não carbonizada.

Pérez-Villarejo et al. (2012) fabricaram materiais cerâmicos de uma mistura de lama vermelha e argila na proporção de 50-50%, e notaram que as propriedades físicas e mecânicas das peças cerâmicas melhoraram devido à capacidade da LV em formar fase vítrea.

Feigl et al. (2012) utilizaram LV como um estabilizador químico para solos contaminados com metais tóxicos, os resultados indicaram que a lama vermelha aplicada a solos agrícolas numa proporção de 5% (em peso) não tem efeitos negativos sobre as plantas e micróbios do solo e diminui os valores de alguns metais.

Sushil e Batra (2012) utilizaram amostras de lama vermelha ativada para realizar testes de remoção de monóxido de carbono no intervalo de temperatura de 100-500°C, obtendo conversões acima de 90% para temperaturas acima de 400°C.

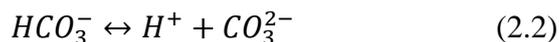
Ribeiro et al. (2012) utilizaram lama vermelha como aditivo para concreto, se mostrando promissor para inibir a corrosão do processo. O potencial de corrosão foi monitorada por medições eletroquímicas e a resistividade elétrica foi avaliada utilizando sensores incorporados em amostras de teste de concreto. Os resultados mostraram que a

adição da lama vermelha é benéfica ao concreto, reduzindo a sua taxa de migração de cloreto e o potencial de corrosão e aumentando a sua resistência elétrica.

2.2.2 Química da carbonatação da lama vermelha

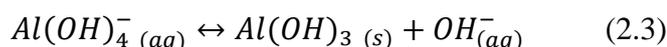
Em diversos estudos, encontrados na literatura, as reações de carbonatação que ocorrem entre compostos alcalinos e o CO_2 quando em contato são citadas e exemplificadas, na forma de equações químicas. As reações de carbonatação são exotérmicas e apresentam uma forma de captura de carbono segura na forma de carbonatos (BOBICKI et al., 2012).

Segundo Jones et al. (2006), a carbonatação que ocorre para neutralizar soluções cáusticas de aluminatos estão de acordo com as seguintes reações:



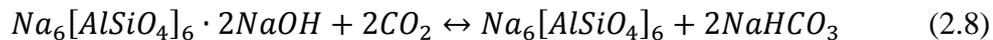
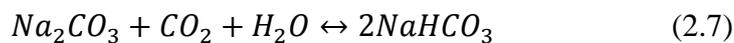
A reação final indica que existe um equilíbrio entre as taxas de bicarbonato/carbonato, porém, de acordo com o pH de equilíbrio da lama após o processo de carbonatação, o equilíbrio é fortemente deslocado em favor do íon bicarbonato. Portanto, o íon bicarbonato pode ser visto como o armazenador de dióxido de carbono que participa das reações à medida que ocorre a redução do pH enquanto ele é consumido (JONES et al., 2006).

Ainda segundo Jones et al. (2006), aluminato presente na solução pode precipitar como hidróxido de alumínio ou reagir com o dióxido de carbono na solução e formar dawsonita ($NaAl(OH)_2CO_3$). Depois da carbonatação, o licor é empobrecido de alumínio e hidróxido e se torna predominantemente uma solução de bicarbonato. O trialuminato de cálcio (TCA) é o componente alcalino predominante do resíduo da lama vermelha, e durante a carbonatação o TCA se dissolve para se combinar com o CO_2 e se precipita como calcita ($CaCO_3$) e hidróxido de alumínio.

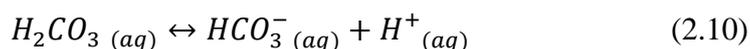
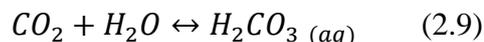


O pH em que a carbonatação se realiza afeta o grau de transformação do TCA. Em particular, se o pH da carbonatação for muito baixo (cerca de 7,0) a precipitação de calcita é inibida e o grau de transformação é baixo, portanto, controlando o pH de carbonatação é possível otimizar o processo de neutralização (JONES et al., 2006 apud SMITH et al., 2003).

Segundo Bonenfant et al. (2008), o processo de carbonatação consiste em várias reações de CO₂ com compostos alcalinos presentes na fase líquida, para formar espécies de carbonato, semelhante ao que ocorre nas Eq. 2.4 e 2.5, além de outras mostradas a seguir:



De acordo com Dilmore *et al.* (2008), a dissolução de CO₂ em água, resulta na formação de ácido carbônico (H₂CO₃) que se dissocia formando os íons HCO₃³⁻ e CO₃²⁻, liberando assim H⁺ para o fluido, dessa forma, ocorre a redução do pH da solução. A redução do pH é ainda intensificada devido à precipitação dos íons presentes na solução na forma de carbonatos.



2.2.3 Sequestro de carbono utilizando lama vermelha

Estão presentes na literatura vários trabalhos que visam utilizar a lama vermelha para o sequestro de carbono, para isso, cada um dos trabalhos citados, a seguir, utilizam um determinado método para este fim.

Enick et al. (2001) neutralizaram lama vermelha (proveniente da ALCOA) em experimentos que duraram entre 5 e 15 min. O pH de uma suspensão de 45% em peso de lama vermelha/55% em peso de água foi reduzido de 12,5 para 7. A elevação do pH, após o tratamento, para 9,5 foi atribuída às lentas reações de dessiliciação que ocorreram em um período de uma a duas semanas à temperatura e pressão ambiente.

Apenas a redução do pH e do consumo de CO₂ (sequestro) foram monitorados para a lama vermelha, porque não havia nenhum interesse industrial na recuperação dos carbonatos (Enick et al., 2001).

No trabalho de Enick et al. (2001), aproximadamente 900 g da suspensão foi introduzida ao reservatório, que foi então coberta com o dióxido de carbono líquido. A suspensão e o dióxido de carbono líquido foram misturados a 295 K e 6,7 MPa utilizando fluxo axial, vários rotores girando a 180 rpm. Durante a reação, a pressão do CO₂ caiu, pois foi transportada progressivamente a partir do fluido de modo a formar o carbonato. Portanto, o consumo de CO₂ foi monitorado através da medição da quantidade de dióxido de carbono adicionado à experiência para manter a pressão constante. A lama vermelha foi exposta à dióxido de carbono a alta pressão durante 5 a 15 min. Os resultados mostram que houve uma redução do pH para neutro (pH = 7) imediatamente a seguir à exposição ao CO₂ líquido. O pH se elevou lentamente após o tratamento e, em seguida, estabilizou, provavelmente devido à liberação de soda via dessilicificação. A suspensão chegou a um pH de equilíbrio de cerca de 9,5 a 10,0 após 1 a 2 semanas e cerca de 2,3 g de CO₂ foram sequestrados por cada 100 gramas de lama vermelha desidratada.

Jones et al. (2006) estudaram a viabilidade de capturar carbono em uma suspensão de lama vermelha e em uma suspensão de lama vermelha neutralizada anteriormente com água do mar (Bauxsol). Os experimentos foram realizados em recipientes de plástico com uma entrada para o dióxido de carbono e uma saída para aliviar a pressão. A suspensão continha 10 g de lama vermelha e Bauxsol e 150 mL de água destilada. O gás carbônico foi passado, em forma de bolhas, através das amostras em pressão constante de 68,9 kPa e uma velocidade de fluxo de 200 mL/min, durante um período de tempo de 5, 10, 20, 24, 30 e 60 minutos. Foram então analisados os pH's inicial e final das amostras após os períodos de tempos estabelecidos e foram feitas titulações nas soluções com 0,1M HCl, para determinar a quantidade de CO₂ que foi capturada pela lama vermelha e Bauxsol.

Os experimentos realizados com Bauxsol mostraram-se mais eficientes em relação a redução da alcalinidade em um menor intervalo de tempo e estabilização do pH. Com base nos experimentos realizados, foi estimado um valor de 15 milhões de toneladas de CO₂ que poderiam ser sequestrado. Obteve-se ao final uma taxa de 7,48g de CO₂/10g de lama vermelha.

Bonefant et al. (2008) utilizou uma suspensão de lama vermelha para avaliar o processo de carbonatação a 20°C, para isso foi utilizada uma corrente gasosa contendo 15% em volume de CO₂, a uma vazão de 5 mL/min, adicionada a um erlenmeyer contendo 200 mL

de água deionizada e aproximadamente 20 g de lama vermelha. Para o preparo da suspensão foi adotada uma proporção de 10 kg de água deionizada para cada 1 kg de lama vermelha pura, ou seja, sem tratamento prévio. O pH variou de 11,92 a 7,57 e a capacidade de carbonatação obtida para a suspensão de lama vermelha, foi de 4,15 g de CO₂/100 g de lama vermelha.

Dilmore et al. (2008) avaliaram a capacidade de carbonatação de uma mistura de lama vermelha (com aproximadamente 40% de sólido e 60% de líquido) com salmoura (proveniente de campos de petróleo) na proporção de 90/10 em volume, respectivamente. Os experimentos foram realizados em uma autoclave, após o carregamento de CO₂ (0,689 MPa) no reator, a mistura lama vermelha/salmoura/CO₂ foi então agitada a uma velocidade de 500 rpm para evitar a sedimentação de sólidos e para promover uma melhor transferência de massa entre a mistura. Após a análise dos resultados a mistura mostrou uma capacidade de sequestro de CO₂ de maior que 9,5 g/L, quando expostas a CO₂ puro em 20 °C e 0,689 MPa (100 psi). Dawsonita e calcita foram previstas como sendo os produtos formados em maior quantidade no processo de carbonatação da mistura. Trinta e três dias após a realização dos experimentos foram obtidos valores de pH de aproximadamente 9,7 para a mistura. A mistura de lama vermelha com salmoura já reduz inicialmente o pH do resíduo, no entanto, a carbonatação da mistura é utilizada para alcançar uma neutralização mais completa.

Khaitan et al. (2009) estudaram a extensão da neutralização de resíduo de bauxita (40 % de sólidos) por dióxido de carbono com diferentes pressões parciais. Para monitorar a neutralização de LV, com pH inicial de 12,5, foram colocados 5 gramas de LV em uma proveta de 50 mL e exposta a 0,00032, 0,01, 0,1 e 1 atm de pressão parcial de gás carbono dentro de um *glovebag* (saco de luvas) de 50 L. A pressão total em todos os casos foi de 1 atm. Os experimentos com pressões parciais de CO₂ de 0,01, 0,1 e 1 atm duraram cerca de 5 dias para estabilizar o valor de pH, enquanto que a pressão de 0,00032 atm foram necessários 12 dias para a estabilização. Os valores de pH obtidos mostram que quanto maior a pressão de CO₂ menor é o pH de equilíbrio atingido.

Usando CO₂ puro (P_{CO₂}= 1 atm) um pH estacionário de 7,7 foi obtido em 1 dia, enquanto que foram necessários 9 dias para que se alcançasse esse valor de pH para P_{CO₂}=0,00032 atm, o curto período de tempo necessário para a neutralização sugere que é um processo de equilíbrio gás-líquido, em vez de dissolução de minerais, o que normalmente ocorre em escalas de tempo mais longas e envolve a precipitação de minerais de carbonato. Foi realizado um experimento de longo prazo (30 dias), em P_{CO₂}=1 atm, para investigar como

o potencial de dissolução de minerais (em especial o aluminato tricálcico) afeta o equilíbrio do pH da lama vermelha a longo prazo.

O pH resultante do experimento a longo prazo foi 0,15 unidade de pH mais baixo que o valor obtido para a carbonatação em 1 dia, o que sugere que a dissolução do mineral ocorra durante uma exposição mais longa ao CO₂, visto que a análise de resíduo por difração de raios-x indicou a formação de calcita (CaCO₃) e o desaparecimento/dissolução de aluminato tricálcico. Foi investigado também o potencial de recuperação do pH da lama vermelha neutralizada com elevadas pressões parciais de CO₂ e em seguida exposta a P_{CO₂} = 0,00032atm, em todos os experimentos o pH chegou a um valor aproximado de 9,9 em apenas um dia.

Isto sugere que a carbonatação ocorrida nos experimentos foi efetivamente limitada a reações ácido-base com a água presente nos poros das espécies dissolvidas e que os sólidos não contribuem significativamente à neutralização observada em um curto período de tempo (KHAITAN et al., 2009).

A carbonatação, ocorrida na fase líquida, ocorre de forma relativamente rápida, no entanto, contribui menos para o sequestro de carbono que a carbonatação na fase sólida, que se trata de um processo lento que requer a dissolução/precipitação de sólidos (KHAITAN et al., 2009).

Um estudo de laboratório foi realizado por Sahu et al. (2010a) para investigar a capacidade de neutralização de lama vermelha utilizando sequestro de dióxido de carbono em condições ambientais. A suspensão de LV foi preparada da seguinte forma: misturou-se 10 g de LV com 100 mL de água destilada em um frasco plástico de 150 mL. As suspensões foram mantidas por 24 horas com agitação magnética constante. As reações de sequestro de carbono foram realizadas a uma taxa de um fluxo de gás de 5 mL/min. O gás passou pela solução de LV através de micro bolha durante 5,10, 20, 24, 48, 72 horas. O frasco plástico tinha uma entrada para o CO₂ e uma saída para aliviar a pressão. A solução foi agitada a 180 rpm para aumentar a solubilidade gás-líquido. O pH reduziu de 11,8 para 8,45. O CO₂ foi sequestrado na forma de Na₂CO₃, NaHCO₃, e H₂CO₃ como compostos sólidos estáveis. O processo com três ciclos mostrou-se mais eficiente que um processo de um único ciclo. Ao todo foi absorvido aproximadamente 7,02 g de CO₂ para cada 100 gramas de LV.

Yadav et al. (2010) utilizaram uma amostra de lama vermelha separada em três tamanhos diferentes como material adsorvente para sequestro de gás carbônico. A carbonatação de cada fração de lama vermelha foi conduzida separadamente em temperatura ambiente utilizando uma câmara de reação em aço inoxidável, a uma pressão fixa de 3,5 bar.

Efeito do tempo de reação (0,5-12 h) e razão de líquido para sólido (0,2-0,6) foram utilizados para analisar a carbonatação de lama vermelha. Ao final do trabalho foi determinada uma capacidade de sequestro de 5,3 g de CO₂/100 g de LV (fração II).

Venancio (2010) analisou e testou em laboratório a reação de uma suspensão de lama vermelha e água com os gases de combustão do calcinador de uma refinaria em uma torre mista de *spray* e recheios que foi adaptada para o experimento. Foi obtida uma redução do pH de 11,5 para até 7,8. A influência da temperatura também foi avaliada, ficando evidenciado o aumento da velocidade de reação com o aumento da temperatura.

2.2.4 Lama vermelha proveniente da Hydro-ALUNORTE

Particularmente a indústria de alumínio primário, na transformação da bauxita em alumina através do processo Bayer, na fábrica da Hydro-ALUNORTE do Grupo Vale, situada no município de Barcarena, no estado do Pará, a 45 km de Belém, a geração de resíduo é da ordem de 6,2 milhões de toneladas/ano de lama vermelha, a qual é armazenada em reservatórios especiais, revestidos com manta de PVC, e ocupa uma área de cerca de 4 km² (SOUZA, 2010). Na Fig. 2.2 tem-se uma vista aérea da fábrica da Hydro-ALUNORTE, destacando-se o depósito de rejeitos sólidos ao lado.



Figura 2.2 – Vista aérea da fábrica da Hydro-ALUNORTE.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2012.

Vários estudos já foram realizados na Universidade Federal do Pará objetivando utilizar a lama vermelha em algum processo com o intuito de reciclar esse resíduo, dentre eles pode-se citar os trabalhos de Magalhães (2008), Santos (2008), Souza (2010), Venâncio (2010), Santos (2011) e Magalhães (2012).

Segundo o trabalho de Magalhães (2012), a LV sem tratamento térmico foi submetida a análise de fluorescência de raios-X para determinar a composição química do rejeito, o resultado é mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição química média da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE.

Constituintes da lama vermelha	(%) peso
Fe ₂ O ₃	29,54
SiO ₂	17,24
CaO	1,08
Al ₂ O ₃	22,54
TiO ₂	4,56
Na ₂ O	12,51
V ₂ O ₅	0,28
MgO	0,15
K ₂ O	0,03
P.F. (perda ao fogo)	12,04

Fonte: Magalhães, 2012. (Adaptado)

Magalhães (2012) identificou e classificou os minerais presentes na amostra de lama vermelha, proveniente da Hydro-ALUNORTE, em duas categorias de acordo com o resultado obtido a partir da difração de raios-x (Figura 2.3):

- i. Minerais provenientes da bauxita, como a gibsita (G), hematita (H), goetita (Go), anatásio (A), quartzo (Q), caulinita (K);
- ii. Minerais formados durante o processo Bayer, tais como a sodalita (S) e cancrenita (C).

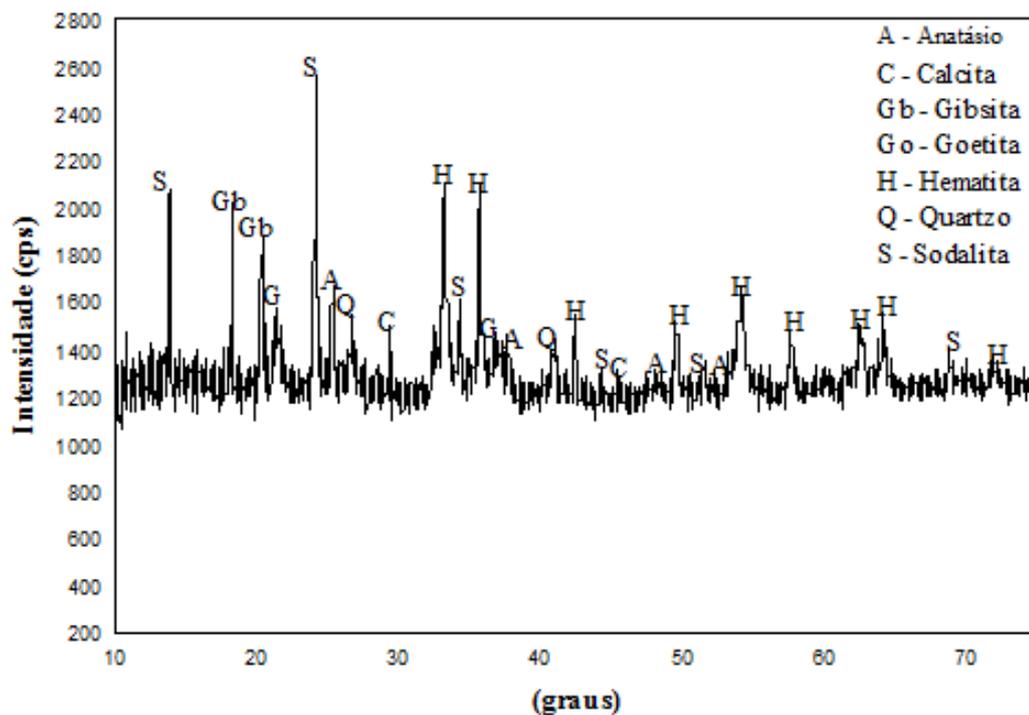


Figura 2.3 – Difração de raios-x da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE.
Fonte: Magalhães, 2012.

De acordo com Venâncio (2010), os valores do pH, teor de umidade e densidade real da LV estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas da LV proveniente da Hydro-ALUNORTE.

pH	Umidade (%-p)	Densidade real (g/cm ³)
12,80	48	2,13

Fonte: Venâncio, 2010. (Adaptado)

2.3 DIÓXIDO DE CARBONO

Dióxido de carbono (CO₂), um gás de caráter ácido, é gerado, principalmente, a partir de processos industriais que utilizam combustíveis fósseis como sua maior fonte de combustão (SOUZA, 2007).

Previsões de uso global de energia no século XXI sugerem um aumento contínuo de emissões de carbono e concentrações crescentes de CO₂ na atmosfera a menos que grandes mudanças sejam feitas na forma de produzir e utilizar energia, em particular, como gerenciar carbono (DOE, 1999).

Um cenário energético desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 1996) prevê que o futuro as emissões globais de CO₂ para a atmosfera

aumentem de 7,4 bilhões de GtC por ano em 1997 para aproximadamente 26 GtC por ano em 2100. Embora os efeitos de aumento dos níveis de CO₂ no clima global são incertos, há um consenso científico de que uma duplicação da concentração de CO₂ poderia causar uma variedade ambiental grave com consequências no próximo século (DOE, 1999).

De acordo com DOE (1999), para estabilizar as concentrações atmosféricas de CO₂ seria necessário reduzir as emissões antropogênicas de CO₂ e/ou emissões atmosféricas em 1 GtC/ano em 2025 e 4 GtC/ano em 2050.

Para que ocorra uma redução nas emissões de CO₂, DOE (1999) apresenta duas abordagens: a primeira abordagem é o de aumentar a eficiência da conversão de energia primária e da utilização final, de modo que menos unidades de energia primária com base em combustíveis fósseis sejam necessárias para fornecer o serviço de distribuição de energia, sendo assim, uma utilização de energia mais eficiente resulta em menores taxas de emissões de CO₂ por unidade de serviço de energia; a segunda abordagem é substituir fontes de energia com baixo teor de carbono (por exemplo, gás natural) por fontes de energias livres de carbono (fontes de energia renováveis), como a energia solar, eólica ou biomassa, ou aumentar o uso de energia nuclear.

2.3.1 Sequestro de carbono

Sequestro do carbono pode ser definido como a captação e o armazenamento seguro de carbono que seriam emitidos e permaneceriam na atmosfera. A ideia é conservar as emissões de carbono produzido pela atividade humana que atingiriam a atmosfera através da captura e desviando-as para fixar o armazenamento, ou remover o carbono da atmosfera através de vários meios e armazená-la. Um conjunto de opções de sequestro de carbono envolve a captura das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis, antes que atinja a atmosfera. O CO₂ capturado poderia ser concentrado em um líquido ou fluxo de gás que pode ser transportado e injetado no oceano ou em formações geológicas subterrâneas profundas, tais como petróleo e gás, reservatórios profundos, reservatórios salinos e camadas de carvão profundas. Processos biológicos e químicos podem converter CO₂ capturado diretamente em produtos estáveis. Carbono atmosférico também pode ser capturado e sequestrado para reforçar a capacidade dos ecossistemas terrestres ou oceano de absorvê-lo naturalmente e armazená-lo em uma forma estável (DOE, 1999).

DOE (1999) aponta várias razões pelas quais se torna importante o sequestro de carbono:

- i. O sequestro de carbono pode ser uma ferramenta importante para a redução das emissões de carbono a partir de combustíveis fósseis. No entanto, ainda há muito trabalho a ser feito para compreender a ciência e aspectos de engenharia e potencial de opções de sequestro de carbono;
- ii. Dada a magnitude das reduções de emissões de carbono necessário para estabilizar a concentração de CO₂ atmosférico, várias abordagens para a gestão de carbono serão necessárias. O sequestro de carbono deve ser pesquisado em paralelo com aumento da eficiência energética e descarbonização de combustível;
- iii. O sequestro de carbono é compatível com o uso contínuo em larga escala de combustíveis fósseis combustíveis, bem como as emissões muito reduzidas de CO₂ para a atmosfera;
- iv. O ciclo natural do carbono é equilibrado a longo prazo, mas dinâmico a curto prazo, historicamente, a aceleração dos processos naturais que emitem CO₂ é eventualmente equilibrada por uma aceleração dos processos que sequestram carbono e vice-versa. Desenvolvimento de técnicas novas de sequestro de carbono e otimização de técnicas já existentes ajudaria a diminuir o fluxo de carbono líquido positivo para a atmosfera.

De acordo com DOE (1999), seis “áreas de foco” científicas/técnicas relevantes para o sequestro de carbono foram identificadas, são elas:

- i. Separação e captura de CO₂;
- ii. Sequestro oceânico;
- iii. Sequestro de carbono em ecossistemas terrestres (solo e vegetação);
- iv. Sequestro de carbono em formações geológicas;
- v. Processos biológicos avançados para sequestro;
- vi. Processos químicos avançados para sequestro de carbono.

O sequestro de CO₂ é reconhecido pelo protocolo de Quioto como um dos meios de se conseguir as reduções das emissões atmosféricas. O aspecto ecológico da retirada de CO₂ do meio ambiente foi ainda mais contemplado pela valorização econômica do processo, por que a legislação de cada país vinculado a este Protocolo determina os volumes máximos de emissão do gás (CARVALHO et al., 2007).

Stolaroff et al. (2005) estudaram a possibilidade de capturar e armazenar de forma segura o CO₂ do ar ambiente em uma solução de Ca(OH)₂ e CaO provenientes de escória de aço ou de resíduos de concreto, formando assim carbonatos estáveis (CaCO₃).

Schütz et al. (2008) estudaram a carbonatação de soluções salinas preparadas através da mistura dos sais NaCl, KCl, MgCl₂ e CaCl₂ e o armazenamento de CO₂ nessas soluções, e

a partir dos resultados obtidos foi possível avaliar que o sequestro de CO₂ é eficiente nesse tipo de solução.

Huntzinger et al. (2009) analisaram a viabilidade de sequestro de carbono em pó de forno de cimento, um subproduto gerado durante a fabricação de cimento. Com base no consumo estequiométrico de CO₂ medido durante as experiências, os graus de carbonatação foram maiores que 70% sob condições de temperatura ambiente e pressão. A extensão total da carbonatação/sequestro foi maior em colunas com menor teor de água. O principal produto do sequestro parece ser a calcita, no entanto, a caracterização de material mais detalhada é necessária para amostras antes e depois da carbonatação para melhor elucidar as vias e os produtos de carbonatação.

A redução da emissão deste gás para o meio ambiente constitui-se em um desafio e em uma oportunidade de desenvolvimento tecnológico. Atualmente, a remoção de CO₂ tem sido realizada por absorção gasosa, no qual se define como uma operação unitária em que um ou mais de um componente de uma mistura gasosa é dissolvido num líquido (CARVALHO et al., 2007).

O processo de absorção química é extremamente utilizado em indústrias de petróleo e gás natural para separação de CO₂. A capacidade de absorção do solvente utilizado é dependente da pressão parcial do gás na unidade de absorção, e na absorção química a pressão parcial do gás vem a ser determinada pelo equilíbrio químico do sistema (CARVALHO et al., 2007).

2.4 ABSORÇÃO DE GASES

O contato de um gás com um líquido para efeitos de transferência de massa de um ou mais componentes é uma operação muito importante em engenharia química; frequentemente a transferência de massa é seguida por uma reação química. Uma ou ambas as fases são normalmente subdivididos em tal operação de contato. O propósito desta subdivisão de fase é duplicado, visto que aumentam a área interfacial e produz o movimento relativo entre as fases. Esses dois efeitos contribuem para um aumento da taxa global de transferência de massa (VALENTIN, 1967).

Absorção é usada para separar misturas gasosas; remover impurezas, contaminantes, poluentes, ou venenos de catalisadores; ou recuperar produtos químicos valiosos. Dessa forma, a espécie de interesse na mistura gasosa pode ser todos os componentes, apenas o

componente não transferido, ou apenas o componente transferido (SEADER e HENLEY, 1998).

No processo de absorção, uma mistura gasosa entra em contato com um líquido, denominado absorvente ou solvente, para dissolver seletivamente um ou mais componentes por transferência de massa entre o gás e o líquido. Os componentes transferidos para o líquido são denominados solutos ou absorbatos (SEADER e HENLEY, 1998).

Segundo Seader e Henley (1998), quando não ocorre reação química entre o absorvente e o soluto, o processo é geralmente denominado como absorção física, no entanto quando ocorre reação química na fase líquida o processo é denominado como absorção química.

Em geral, o efeito da reação química é o de aumentar a velocidade de absorção, bem como a capacidade do solvente líquido em dissolver o soluto (gás), comparado com os sistemas onde a absorção é puramente física (FLORES, 2011 apud ZARZYCKI e CHACUK, 1993).

A velocidade de absorção do gás é determinada pelas condições físico-químicas (solubilidade do gás; difusividades do gás dissolvido e do reagente da solução; cinética da reação; viscosidade e densidade do líquido) e pelas condições hidrodinâmicas do sistema (vazão e geometria do equipamento) (FLORES, 2011).

Segundo Brilhante (2012), a solubilidade de gases em líquidos é explicada da seguinte forma: quando se coloca um gás em contato com um líquido, num recipiente fechado numa certa condição de temperatura e pressão, parte das moléculas da fase gasosa passa, inicialmente, para a fase líquida, até que se atinja o ponto de equilíbrio para estas condições de temperatura e pressão. Neste ponto, a concentração do gás no líquido é denominada de “solubilidade de equilíbrio do gás neste líquido”, nas condições de temperatura e pressão em questão.

No trabalho de Lobato (1998) foi estudado o desempenho da absorção reacional de dióxido de enxofre, proveniente de uma caldeira, com solução alcalina de soda cáustica, foram obtidos resultados satisfatórios em relação às modificações que foram feitas nos diâmetros dos bicos de pulverização, sendo mais eficientes quando utilizou-se bicos de pulverização de maior diâmetro, fazendo a relação entre o processo de absorção e o tamanho das gotas da fase líquida, ocasionando alto valor da razão entre as vazões líquido-gás.

Badger e Banchemo (1955) apresentam um esquema do gradiente de concentração durante o processo de absorção, que pode ser visualizado na Fig. 2.4, onde y e y_i são as

concentrações de soluto na fase gasosa e na interface, respectivamente, e x e x_i são as concentrações de soluto na fase líquida e na interface, respectivamente.

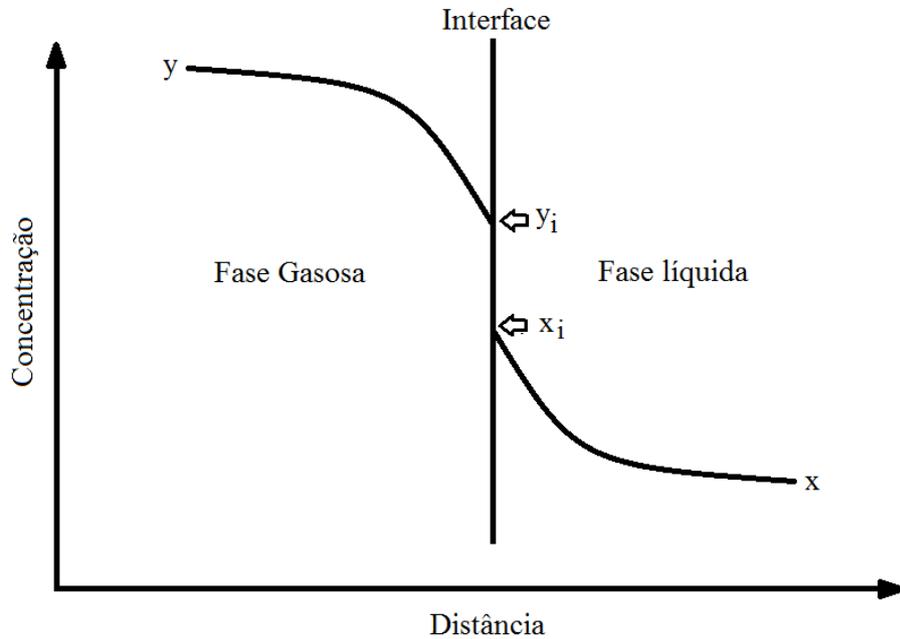


Figura 2.4 – Gradientes de concentração para fluxo de material de um gás para um líquido.

Fonte: BADGER e BANCHERO, 1955. (Adaptado)

Segundo Flores (2011), o fluxo de transferência de massa do soluto A (presente na fase gasosa) para a fase líquida é dado pela seguinte equação:

$$N_A = k'_G P (y_A^b - y_A^i) \quad (2.11)$$

$$N_A = k_L (x_A^i - x_A^b) \quad (2.12)$$

Onde:

N_A = fluxo de transferência de massa do componente A;

y_A^b = fração molar do componente A no seio do gás;

y_A^i = fração molar do componente A na interface gás-líquido;

x_A^i = concentração molar do componente A na interface no lado do líquido;

x_A^b = concentração molar de A dissolvido no seio do líquido;

k'_G = coeficiente de transferência de massa individual no lado do gás;

k_L = coeficiente de massa individual no lado do líquido;

P = pressão total do sistema.

Geralmente, o fluxo de transferência de massa é expresso em termos do coeficiente global de transferência de massa (k_G), e a fração molar do componente A (y'_A) que estaria em equilíbrio com a fase líquida (FLORES, 2011):

$$N_A = k_G(y_A^b - y'_A) \quad (2.13)$$

Ainda segundo Flores (2011), é possível calcular o fluxo de transferência de massa quando há reação química, de acordo com a Equação 2.12, levando-se em consideração o fator de aumento que é a relação entre a velocidade de absorção com reação química e a velocidade de absorção física, e pode ser expresso da seguinte forma:

$$E = \frac{(k_L)_{quím}}{(k_L)_{fís}} \quad (2.14)$$

Onde, $(k_L)_{quím}$ é o coeficiente global de transferência de massa com reação química e $(k_L)_{fís}$ é o coeficiente global de transferência de massa para absorção física. Logo, temos que o fluxo de transferência de massa (N_A) é expresso da seguinte forma:

$$N_A = E \cdot k_L(x_A^i - x_A^b) \quad (2.15)$$

O fator de aumento (E) indica a proporção do aumento da velocidade de transferência de massa no processo de absorção com reação química em relação à velocidade de transferência de massa por absorção física.

Quando um líquido e um gás estão em equilíbrio, nas condições de temperatura e pressão estabelecidas, não haverá mais alteração da concentração do gás absorvido no líquido. Porém, caso haja alteração, por exemplo, da pressão parcial do gás a ser absorvido pelo líquido, sem a alteração da variável temperatura, então ocorrerá a passagem de moléculas da fase gasosa para a fase líquida até a nova situação de equilíbrio.

2.4.1 Equipamentos utilizados para o processo de absorção

Segundo Seader e Henley (1998), o projeto de um absorvedor exige a consideração de alguns fatores, tais como:

- i. vazão de entrada de gás (líquido), composição, temperatura e pressão;
- ii. grau desejado de recuperação um ou mais solutos;
- iii. escolha do absorvente;
- iv. entrada mínima do absorvente e taxa de fluxo atual de absorvente como um múltiplo da taxa mínima necessária para fazer a separação;
- v. número de estágios de equilíbrio;
- vi. efeitos do calor e necessidade de refrigeração;
- vii. tipo de equipamento absorvedor;
- viii. altura do absorvedor;
- ix. diâmetro do absorvedor.

De acordo com Cremasco (2008), existem basicamente três tipos de equipamentos utilizados para essa finalidade, são eles: torre *spray*, torre de borbulhamento e torre de recheios.

Na situação em que a fase gasosa controla o processo, utiliza-se, por exemplo, as torres *spray* (CREMASCO, 2008). As torres *spray* são câmaras das quais escoam a fase gasosa, denominada fase contínua, e a líquida que é introduzida por meio de atomizadores na forma de *spray*, caindo por gravidade em contracorrente com o gás. A fase líquida, por ser constituída de gotas, é denominada dispersa. Pequenas gotas proporcionam maior área interfacial de contato, através da qual ocorre o fenômeno de transferência. No entanto, essas gotas não devem ser demasiadamente pequenas, pois correm o risco de serem arrastadas pela corrente gasosa (CREMASCO, 2008 apud WELTY et al., 1976).

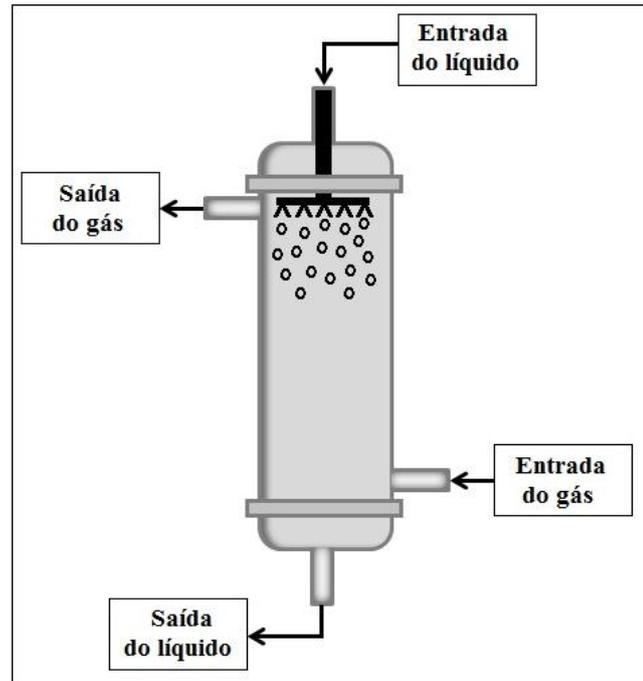


Figura 2.5 – Torre *spray*.

Quando a fase líquida controla o processo, pode-se utilizar as torres de borbulhamento (CREMASCO, 2008). As torres de borbulhamento operam exatamente ao contrário da torre *spray*. O gás é borbulhado na base da coluna e ascende em contracorrente ao líquido. O fenômeno da transferência de massa se dá na formação de bolhas (CREMASCO, 2008 apud WELTY et al., 1976).

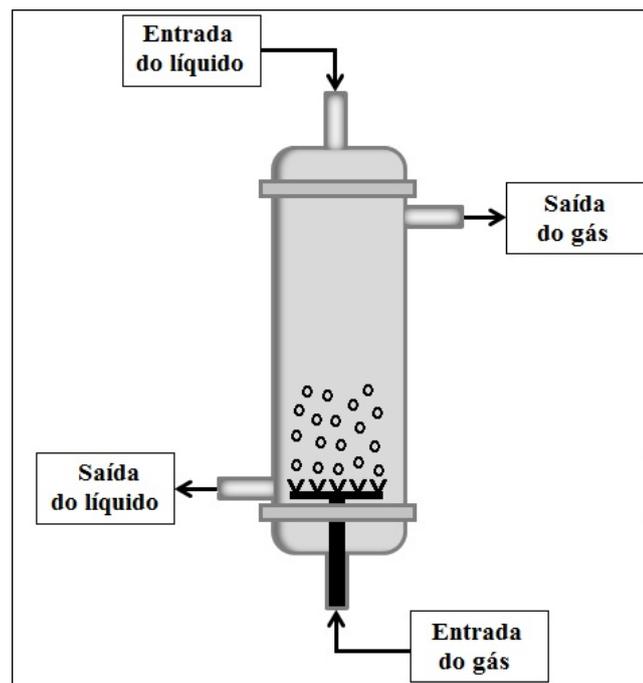


Figura 2.6 – Torre de borbulhamento.

De acordo com CREMASCO (2008), quando as duas fases controlam o processo de transferência ou quando se opera com elevadas taxas de vapor em relação às de líquido, bem como o inverso, utilizam-se torres de recheio. Existem dois modos de os recheios serem dispostos no interior da coluna: aleatoriamente (recheios randômicos) ou de maneira ordenada (recheios estruturados). No segundo modo, os recheios são montados de forma ordenada, criando canais preferenciais para o escoamento das fases.

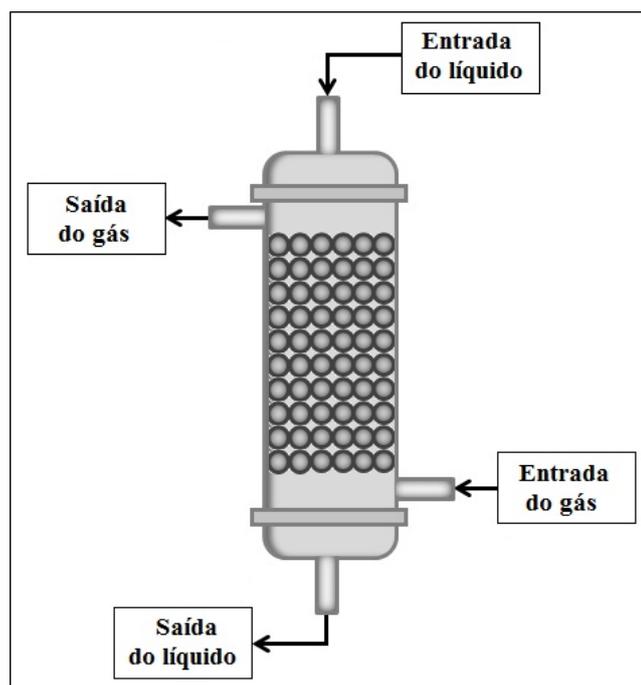


Figura 2.7 – Torre de recheios.

Segundo McCabe et al. (1993), os recheios randômicos podem ser: anel de Rasching, anel de Pall, sela de Berl e sela Intalox.

Os primeiros recheios estruturados foram fabricados a partir de telas metálicas; os mais usuais são feitos de chapas de metal onduladas e perfuradas, com placas adjacentes dispostas de modo que o líquido se espalhe ao longo das suas superfícies enquanto que os fluxos de vapor passam através dos canais formados pelas ondulações (McCABE et al., 1993).

2.4.2 Absorção de dióxido de carbono

O dióxido de carbono pode ser removido de correntes gasosas por absorção física e química. Absorção física é um processo regido pela lei de Henry (isto é, um processo dependente da temperatura e pressão ocorrendo a pressões elevadas e baixas temperaturas). Tipicamente, estes processos são usados quando a concentração (isto é, pressão parcial de

CO₂) é elevada (>525 kPa). A remoção de 0,1-6% de CO₂ a partir de poços de produção de gás natural por absorção química utilizando aminas podem ser implantado convenientemente na áreas remotas. Atualmente, essa abordagem representa a tecnologia comercial mais amplamente utilizada para a captura de CO₂. No entanto, em outras aplicações comerciais, os típicos solventes para absorção física de CO₂ incluem compostos à base de glicol (por exemplo, o éter dimetílico de polietilenoglicol) e metanol frio (DOE, 1999).

Absorção química é preferida para processos com baixas ou moderada pressões parciais de CO₂, visto que o CO₂ apresenta características ácidas, absorção química de CO₂ a partir de correntes gasosas tais como gases de combustão depende das reações de neutralização usando solventes básicos. Os solventes mais comuns de uso comercial para neutralização de CO₂ são alcanolaminas tais como MEA, DEA, e MDEA. Outros solventes químicos em uso são o amoníaco e o carbonato de potássio a quente. As correntes gasosas, das quais pretende-se absorver o CO₂, estão tipicamente a pressão atmosférica (DOE, 1999).

Dependendo do teor de CO₂ no gás de combustão, a pressão parcial de CO₂ pode variar de 3,5 a 21,0 kPa. Em tais pressões parciais baixas, alcanolaminas são os melhores solventes químicos para permitir a recuperação de CO₂ em boa quantidade, no entanto, a utilização destes solventes deve ser equilibrada com a alta quantidade de energia utilizada para regenerá-los (DOE, 1999).

Gases de combustão contêm tipicamente contaminantes como SO_x, NO_x, O₂, hidrocarbonetos e particulados. A presença dessas impurezas pode reduzir a capacidade de absorção por aminas, bem como criar problemas operacionais, tais como a corrosão. Para evitar tais problemas, estes contaminantes são muitas vezes reduzidos a níveis aceitáveis através do uso de técnicas adequadas de pré-tratamento. Alguns processos comerciais lidam com essas dificuldades através de pré-tratamento e/ou o uso de inibidores químicos no processo de absorção. No entanto, estes processos tendem a ser mais caros que os processos de absorção convencionais utilizando alcanolaminas (DOE, 1999).

Neste trabalho são apresentados diversos autores, tais como, Enick et al.(2001), Jones et al. (2006), Bonenfant et al. (2008), Dilmore et al. (2008), Khaitan et al. (2009), Sahu et al. (2010 a) e Venâncio (2010), que realizaram experimentos utilizando lama vermelha para absorver CO₂, citados anteriormente, devido à elevada alcalinidade desse resíduo pode-se considerar a LV como um solvente básico. Esse processo de absorção ocorrido é duplamente vantajoso, visto que além de sequestrar carbono, possibilita a redução do pH desse resíduo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Lama vermelha

A lama vermelha utilizada para o preparo da suspensão que passa pelas torres de absorção nos experimentos realizados foi fornecida pela empresa Hydro-ALUNORTE (Barcarena-Pará). Para o preparo da suspensão, a lama vermelha não passou por nenhum tratamento prévio, com o objetivo de avaliar se a suspensão preparada com o resíduo, a ser usada no processo de absorção, é eficiente utilizando o resíduo com as propriedades que o mesmo possui no final da etapa vermelha do processo Bayer, tornando, dessa forma, o processo mais prático e econômico.

3.1.2 Gases de combustão

Os gases de combustão utilizados nos experimentos são provenientes de uma caldeira situada no laboratório de engenharia química (LEQ/ITEC/UFPA), que utiliza óleo diesel como combustível, cujas propriedades estão presentes no Anexo B. Dentre os gases, dá-se destaque ao dióxido de carbono, pois a partir dos valores de entrada e saída desse gás será possível avaliar o sequestro de carbono ocorrido no processo.

3.2 EQUIPAMENTOS

A planta piloto existente no laboratório de engenharia química (LEQ/ITEC/UFPA) para estudo do sequestro de carbono e neutralização do resíduo do processo Bayer (a qual é visualizada na Fig. 3.1) contém três torres de absorção: Uma torre de aspersão (torre *spray*) e duas torres de recheio, sendo uma torre com recheios randômicos e uma contendo recheios estruturados. Neste trabalho fez-se um estudo da absorção de CO₂ e redução de pH da suspensão de LV em apenas dois desses três reatores, a torre de aspersão e a torre de recheios estruturados, suas características serão citadas nos tópicos seguintes.



Figura 3.1 – Planta piloto situada no LEQ.

3.2.1 Sistema de lavador de gases

O sistema de lavador de gases deste trabalho é constituído de dois reatores: uma torre de aspersão (torre spray) e uma torre de recheios estruturados, que operam em contracorrente com uma suspensão de LV de até 27%-p para a absorção de CO₂.

3.2.1.1 Torre *spray*

A torre *spray* (ou torre de aspersão) é constituída de um corpo cilíndrico de fibra de vidro com 10 mm de espessura na construção do lavador, que possui 2 metros de altura e 60 centímetros de diâmetro interno. O lavador é dividido em duas partes simétricas (1 metro), unidas por um flange que é vedado com 10 parafusos de aço inox de 3/8 in x 1 in e uma guarnição de borracha de 1/4 in de espessura. Na base do lavador estão localizadas duas portas de visita dos gases com 320 cm² de área. O reator ainda possui em sua base inferior uma tubulação de PVC de 40 mm que serve para recirculação da lama vermelha e saída da suspensão de lavagem.

A torre *spray* (TS) utilizada neste trabalho (Fig. 3.2) apresenta dois níveis de aspersão, e funciona da seguinte forma: A suspensão de lama vermelha escoa através de 10 bicos aspersores tipo oco, distribuídos de forma radial no lavador, feitos de material plástico com abertura de 2mm de diâmetro, através do qual o dióxido de carbono escoa em contracorrente. Foram adotadas duas formas de distribuição dos 10 bicos aspersores para as realizações dos experimentos, em um nível (com os 10 bicos aspersores dispostos na parte superior da torre) e em dois níveis (com 5 bicos aspersores na parte superior da torre e 5 bicos dispostos na metade da altura da torre). As medições de concentração de CO₂ são feitas antes e depois da entrada do gás no reator.



Figura 3.2 – Torre *spray*.

3.2.1.2 Torre de recheios estruturados

A torre de recheios estruturados (TRE) (Fig. 3.3) também é constituída de um corpo cilíndrico, e é preenchida por recheios estruturados, os quais possuem 500 m^2 de área superficial/ m^3 e são formados por lâminas verticais texturizadas, onduladas com 60° de inclinação, como pode ser visualizado na Fig. 3.4, montados com uma lâmina invertida da outra, com canais inclinados, provendo assim uma alta área superficial.

O cilindro vertical da coluna de absorção possui diâmetro interno de 380 mm por 1900 mm de altura total. Sua constituição é de aço inoxidável, com chapa de espessura de 2 mm, com visores de vidro de 6 mm de espessura são fixadas com parafusos e porcas borboleta e possuem duas cubas em inox para as extremidades superior e inferior com flanges adaptados para fixação com parafusos. Possuem ainda uma tubulação que serve para recirculação da lama vermelha e saída de suspensão de lavagem.



Figura 3.3 – Torre de recheios estruturados.



Figura 3.4 – Recheio estruturado.

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades dos recheios estruturados utilizados.

Tabela 3.1 – Propriedades dos recheios estruturados.

Área superficial m^2/m^3	Coefficiente de vazios	Densidade média Kg/m^3	Ângulo
500	93	450	60

Fonte: SERMAT. (Adaptado)

A geometria dos recheios estruturados proporciona uma maior área superficial, ou seja, maior área de contato entre gás e lama vermelha. As amostragens de concentração de CO_2 são feitas antes e depois da entrada do gás no reator.

3.2.2 Sistema de preparo e circulação da suspensão de lama vermelha

O sistema de preparo e circulação da suspensão a ser utilizada no lavador de gases é constituído por:

- i. Um reservatório (Fig. 3.5) de 500 litros de capacidade, onde a suspensão é preparada, e de onde ela é bombeada até os reatores, retornando para a mesma após percorrer o lavador de gases, e depois bombeada novamente até o reator, fazendo assim com que a suspensão circule até o final do experimento.



Figura 3.5 – Reservatório destinado à preparação e circulação da suspensão de LV.

- ii. Um reservatório em aço carbono, contendo duas telas e uma porta de visita (Fig. 3.6), utilizado para remoção de areia através do peneiramento pressurizado.



Figura 3.6 – Reservatório destinado ao peneiramento da suspensão de LV.

- iii. Uma bomba centrífuga autoescorvante (Fig. 3.7), marca THEBE, modelo AE1. A bomba transfere a suspensão durante o preparo para a caixa de aço carbono, e assim ser peneirada, e durante o processo de lavagem de gases é responsável pela circulação contínua da suspensão de LV no reator.



Figura 3.7 – Bomba centrífuga autoeskorvante THEBE.

3.2.3 Sistema de alimentação e distribuição de gases

Esse sistema é constituído de:

- i. Uma caldeira GERAMATIC, modelo GV1 (Fig. 3.8), geradora de gases de combustão, procurou-se buscar uma composição de gases similar à dos gases de combustão provenientes do processo de calcinação das refinarias. Há uma válvula na caldeira que permite controlar a vazão de gases que entram no trocador de calor, dessa forma foi feito o ajuste baseado no teor de CO_2 presente nos gases produzidos na caldeira entre 5% e 9% com o uso dos analisadores de gases, pois de acordo com Venancio (2010), a partir de 5% é possível verificar a absorção do CO_2 pela suspensão de lama vermelha, abaixo desse valor a absorção não é detectada.



Figura 3.8 – Caldeira GERAMATIC utilizada como fonte de gases de combustão.

- ii. Um trocador de calor de aço carbono (Fig. 3.9) de espessura de 1/8 in, 10 in de diâmetro e 4 metros de comprimento, de contato direto gás-névoa em contracorrente, em formato tubular, utilizado para resfriar os gases produzidos na caldeira para que possam entrar nas torres de absorção em temperatura compatível com os materiais de cada reator. A névoa é formada com uso de um bico aspersor (Fig. 3.10) com ar comprimido na parte superior do trocador, conectado ao regulador de pressão de ar e a alimentação de água. No mecanismo de produção de névoa de água, gás e água são injetados simultaneamente no bico aspersor (Fig. 3.11).



Figura 3.9 – Trocador de calor de contato direto em contracorrente.



Figura 3.10 – Bico gerador de névoa.



Figura 3.11 – Bico gerador de névoa montado no topo do trocador.

- iii. Um ventilador centrífugo ELAN, modelo VCE 08 (potência de 1,5 HP), que insufla os gases de combustão até a entrada direta do reator por meio de uma mangueira de 100 mm de diâmetro. Possui uma placa de orifício com área de 10%, visando restringir a entrada de gases no ventilador, visto que caso não tivesse essa restrição corria-se o risco de o ventilador acabar insuflando não somente os gases de combustão da caldeira, mas também os gases presentes no ambiente através da chaminé, o que acarretaria em erros para o experimento, devido à variação do teor de CO_2 . O trocador de calor é ligado ao ventilador como mostra a Fig. 3.12.



Figura 3.12 – Vista do ventilador ligado ao trocador de calor.

- iv. Um *manifold* utilizado para a distribuição dos gases de acordo com abertura das válvulas (Fig. 3.13).



Figura 3.13 – *Manifold* utilizado para distribuição de gases.

3.2.4 Sistema de medição de dados do experimento

Os equipamentos utilizados nas medições dos valores de pH, temperatura, vazão volumétrica entre outros, são:

- i. Um pHmetro de medição portátil HANNA (Fig. 3.14), modelo pHep+, calibrado no início de cada experimento e durante o experimento, caso houvesse algum valor fora do esperado, com soluções tampão de pH 7 e 10.

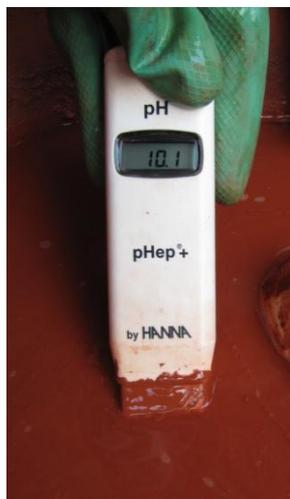


Figura 3.14– Phmetro portátil HANNA.

- ii. Um termômetro digital FTG, modelo FT – 266°C, (Fig. 3.15) utilizado para fazer medições sistemáticas da temperatura, para que fosse possível avaliar o processo de acordo com a temperatura dos gases na entrada das torres e da suspensão de LV que sai do reator.



Figura 3.15 – Termômetro digital FTG.

- iii. Um anemômetro TSI, modelo Velocicalc 9545, (Fig. 3.16) utilizado para obter a vazão volumétrica instantânea dos gases na saída da torre de absorção.



Figura 3.16 – Anemômetro TSI e sonda de medição.

- iv. Um analisador de gases Tempest 100, modelo TELEGAN, (Fig. 3.17) dotado de células eletroquímicas que permitem a leitura de O_2 , NO_x e SO_2 na entrada e saída das torres de absorção.



Figura 3.17– Analisador de gases TELEGAN.

- v. Um analisador de gases MRU, modelo Delta 1600-S, (Fig. 3.18) por infravermelho não dispersivo, utilizado para medição dos teores de CO₂ e O₂ na entrada e saída dos reatores.



Figura 3.18 – Analisador de gases MRU Delta.

- vi. Uma balança digital GEHAKA, modelo BG2000, (Fig. 3.19) utilizada para controlar o teor de sólidos na suspensão através do peso da proveta contendo 1000 mL da suspensão de LV.



Figura 3.19 – Balança digital GEHAKA.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 Preparo da suspensão de lama vermelha

Para preparar a suspensão a ser utilizada nos reatores eram adicionados, primeiramente, 80 litros de água no reservatório de fibrocimento de 500 litros, em seguida, adicionou-se lama vermelha, sem tratamento prévio, em quantidade suficiente para que fosse obtida a concentração de aproximadamente 1207 g/dm^3 , essa concentração era medida com ajuda de uma proveta de 1000 mL. Após adicionar o resíduo a bomba era acionada e após regular o sistema de válvulas era possível fazer com que a suspensão passasse pela caixa de peneiramento, para que fossem retiradas impurezas maiores, como por exemplo, pedras ou pedaços grandes de lama endurecidos, para que não houvesse interferência quando a suspensão passasse por dentro dos reatores e não tivesse o risco de entupimento dos bicos.

Esse valor de concentração (1207 g/dm^3) consiste em 27% em peso de lama vermelha na suspensão, esse valor foi determinado por Venâncio (2010) como o maior teor de sólido presente na suspensão sem que ocorresse entupimento dos bicos de aspersão.

3.3.1.1 Suspensão com defloculante

Para evitar que a suspensão de LV floculasse e dessa forma reduzir a quantidade de sólidos presentes que entram no reator em contato com a fase gasosa, foi necessário utilizar

0,16 gramas de hexametáfosfato de sódio como defloculante. Esse valor foi determinado por estudos feitos por Venâncio (2010).

3.3.1.2. Suspensão com floculante

Alguns experimentos foram realizados com uma quantidade bem reduzida de sólidos presentes na suspensão a ser utilizada no processo de absorção para determinar a capacidade de sequestro de CO₂ e redução do pH da lama vermelha para processos que utilizassem apenas o sobrenadante. Para isso foi utilizada 0,01 grama de sulfato de alumínio como floculante. Esse valor foi determinado a partir de um experimento de decantação, o qual determinou qual a melhor concentração de sulfato de alumínio para cada litro de suspensão. Após aproximadamente 24 horas do preparo da suspensão com o floculante eram realizados os experimentos. Para que fosse possível captar apenas o sobrenadante, foi necessário trabalhar com um captador operando em baixa turbulência, o mesmo ficava imerso na parte aquosa da suspensão do resíduo, de acordo com a Fig. 3.20.



Figura 3.20 – Captador de sobrenadante imerso na fase aquosa da suspensão de lama vermelha após decantação da parte sólida.

3.3.2 Temperatura inicial do experimento

Foram realizados experimentos em temperaturas diferentes na TRE e TS, com o objetivo de avaliar a absorção de CO₂ e redução de pH em função da temperatura.

Para a TRE foram realizados experimentos a uma temperatura baixa de aproximadamente 23°C, a temperatura ambiente (aproximadamente 27°C) e a temperatura elevada (aproximadamente 46°C). Para a TS foram realizados experimentos a temperatura ambiente e a temperatura elevada (aproximadamente 48°C).

3.3.2.1 Redução da temperatura

Para reduzir a temperatura para 23°C foi utilizado gelo (aproximadamente 90 kg), dentro de sacos plásticos em contato com a suspensão, bem como no preparo da suspensão, no entanto, com o passar do tempo, devido à troca térmica entre a fase líquida e a fase gasosa do processo a temperatura foi elevada para um valor máximo de 27°C, de qualquer forma ainda ficou abaixo do valor máximo dos experimentos realizados em outras temperaturas.

3.3.2.2 Elevação da temperatura

Para elevar a temperatura da suspensão de LV, foi necessário mergulhar resistências dentro do tanque em contato com a suspensão, após certo tempo de contato foi determinada a temperatura inicial de equilíbrio e então dado início ao processo de absorção. A Figura 3.21 mostra o conjunto de resistências utilizado para o aquecimento de resíduos mergulhado na suspensão de LV.



Figura 3.21 – Conjunto de resistências em contato com a suspensão de LV para elevar a temperatura inicial do experimento.

3.3.3 Procedimento experimental

A fornalha da caldeira produz gases provenientes da queima de óleo combustível, os gases a serem utilizados no experimento passam por um trocador de calor para redução da temperatura. Após a redução de temperatura os gases são transportados para o *manifold* através do ventilador, e a partir do *manifold* são levados até a torre de absorção selecionada, após passar pela torre o gás é então liberado pela chaminé. Paralelamente, ao trajeto realizado pelos gases de combustão, a fase líquida (suspensão de LV ou sobrenadante) é bombeada, pela bomba centrífuga, até a torre de absorção e após a saída da torre é levada de volta ao reservatório, para que ocorra a recirculação da fase líquida, como pode ser exemplificado na Figura 3.22, que mostra o fluxograma do processo.

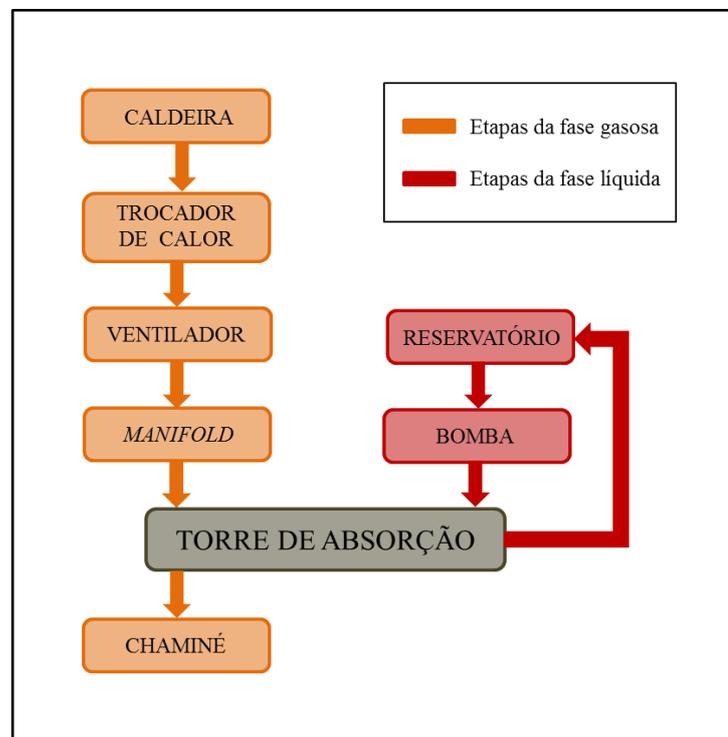


Figura 3.22 – Fluxograma do processo de absorção de gases.

A Fig. 3.23 apresenta um desenho esquemático do processo de absorção de gases que ocorre no interior da torre de absorção durante o experimento, bem como as válvulas existentes na planta piloto e os pontos de medição dos dados experimentais. Apesar de existirem três torres de absorção na planta piloto utilizada para a realização desse trabalho, será mostrada apenas uma torre para mostrar o trajeto da fase gasosa (gases de combustão) e da fase líquida (suspensão de LV ou sobrenadante) durante o experimento. Para a realização do experimento as válvulas **V.1**, **V.2**, **V.7** e **V.8** são mantidas fechadas, enquanto as demais permanecem abertas.

Como pode ser observado na Fig. 3.23, apenas parte dos gases, (aproximadamente 40%) produzidos na fornalha da caldeira são utilizados para o processo de absorção, enquanto que o restante é imediatamente liberado pela chaminé, essa quantidade de gases que passará pelas etapas do processo é definida de acordo com a placa de orifício existente no ventilador. Os gases passam pelo trocador de calor, e na saída do trocador são coletados, no ponto de coleta de dados 1, valores de temperatura e teor de CO_2 , O_2 , NO_x e SO_2 presentes na corrente gasosa que entra na torre de absorção, através dos analisadores de gases. Posteriormente, os gases seguem para o ventilador, de onde serão levados até o *manifolde* em seguida até a torre já selecionada. Os gases entram no reator pela parte inferior, e no seu interior entram em contato com a fase líquida, em contracorrente, saindo em seguida pela parte superior do reator. Antes de serem liberados pela chaminé, são medidos novamente, no ponto de coleta de dados 2, os teores de CO_2 , O_2 , NO_x e SO_2 presentes na corrente gasosa que sai da torre de absorção. Em paralelo, ocorre a recirculação da fase líquida, inicialmente a suspensão é bombeada até o topo do reator, onde passam pelo reator em contracorrente com a fase gasosa, e saem pela parte inferior da torre. Antes de retornar para o reservatório, são coletados valores de temperatura e pH, no ponto de coleta de dados 3.

Após a realização do experimento, o ventilador e a bomba centrífuga são desligados, interrompendo assim o fluxo da fase gasosa e da fase líquida, respectivamente. É coletada então uma quantidade da fase líquida, que será acondicionada em recipientes de vidro, para avaliar o pH de longo prazo, feito isso, a válvula **V.2** é então aberta para que a fase líquida seja retirada do reservatório. A válvula **V.8** também é aberta no final do experimento para retirada de parte da água que entra no trocador de calor através de bico gerador de névoa e condensa após a troca térmica com os gases. Para evitar a corrosão, o acúmulo de sólidos nos reatores (o que prejudicaria o processo de absorção devido à redução da área de troca térmica) e, no caso da TS, o entupimentos dos bicos aspersores, é necessário efetuar a lavagem das torres de absorção ao final de cada experimento, com a ajuda da bomba centrífuga, como mostra a Fig. 3.24.

Para o processo de lavagem do reator faz-se necessário fechar as válvulas **V.3** e **V.6**, e manter **V.1**, **V.4**, **V.5** e **V.7** abertas. A água proveniente do reservatório de água é bombeada até a parte superior da torre de absorção, e após percorrê-la sai pela parte inferior, sendo despejada após passar pela válvula **V.7**.

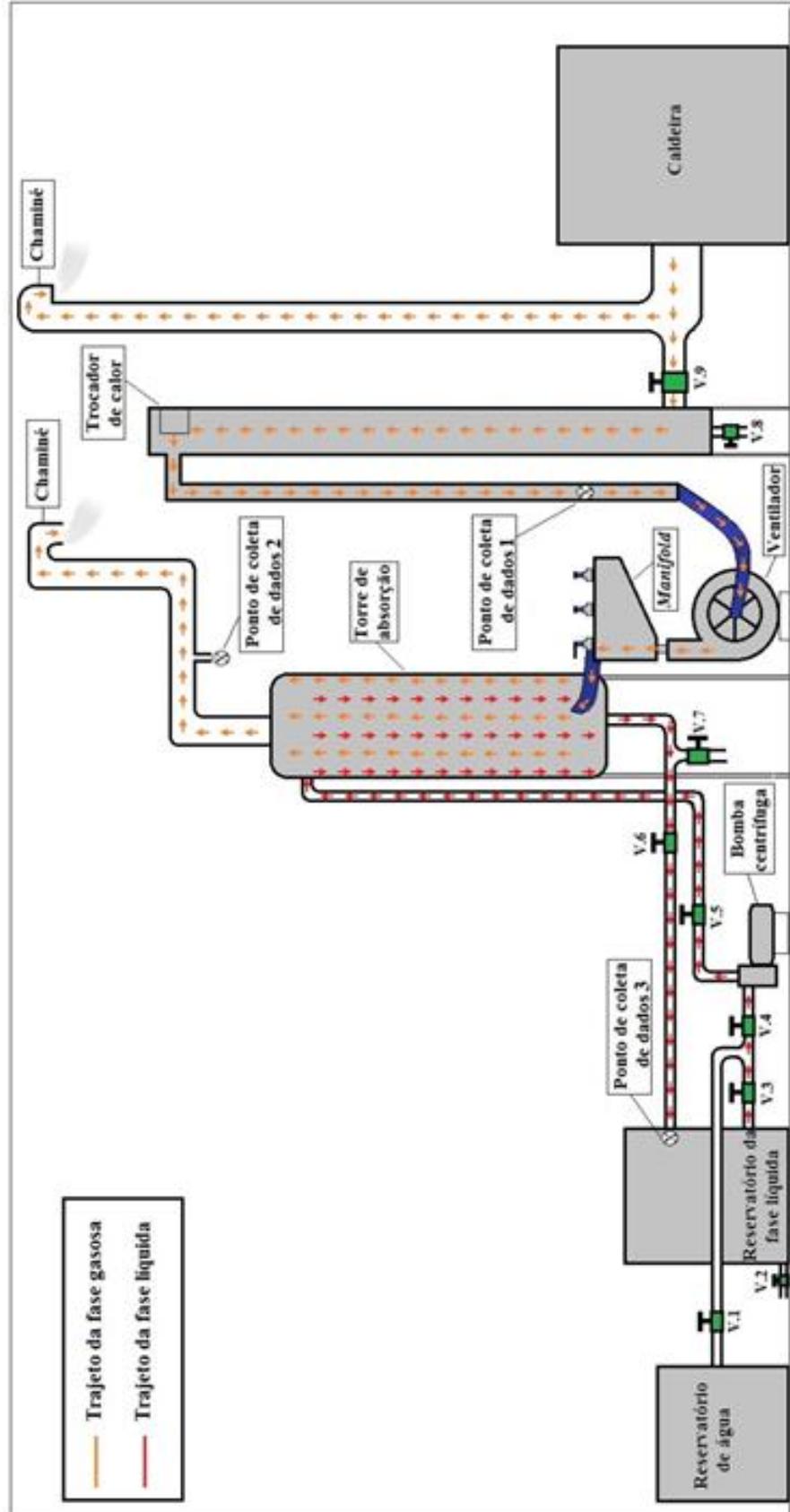


Figura 3.23 – Desenho esquemático do processo de absorção em contracorrente ocorrido nos experimentos.

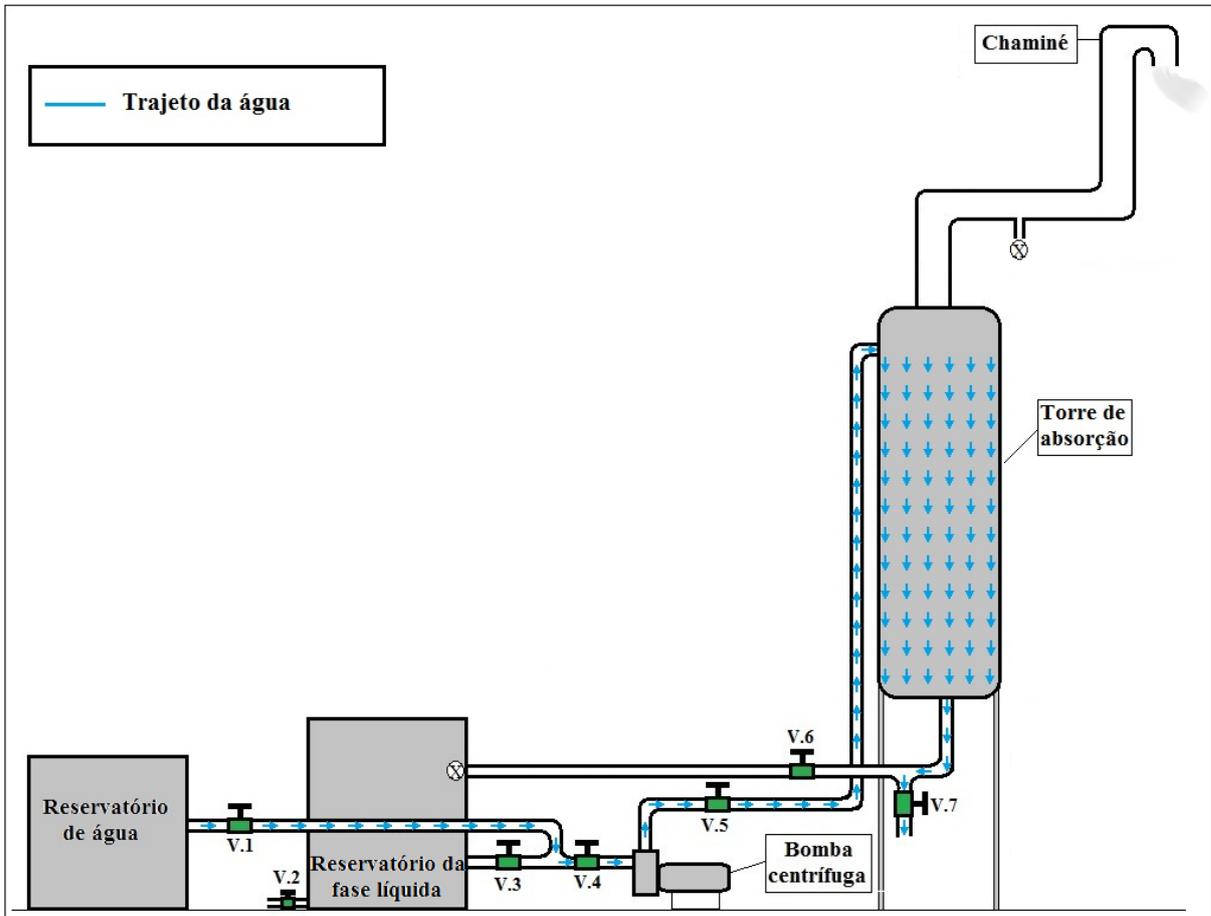


Figura 3.24 – Desenho esquemático da lavagem da torre de absorção ao final do experimento.

3.3.3.1 Experimentos com adição de SO_2

Objetivando-se avaliar a capacidade de absorção de SO_2 pela suspensão de LV, foram realizados experimentos com adição de SO_2 engarrafado injetado no tubo de entrada. Devido à dificuldade de estabilizar a taxa de SO_2 injetado nas torres de absorção as quantidades de SO_2 variaram de 137 a 411 ppm na TS e de 144 a 702 ppm para a TRE.

3.3.4 Tratamento dos dados experimentais obtidos

Após o término do procedimento experimental, os valores obtidos foram utilizados para avaliar o comportamento do pH em função do tempo de experimento, bem como a absorção de CO_2 e SO_2 .

3.3.4.1 Equações mássicas para o CO_2

Para calcular a quantidade em massa de CO₂ absorvida durante o processo, foram realizados cálculos com base na porcentagem de CO₂ presente na corrente de entrada e na corrente de saída dos gases, com o auxílio dos equipamentos analisadores de gases. Nessas equações mássicas, a massa específica do CO₂ é utilizada como valor da massa específica da corrente gasosa, e seu valor em função da temperatura está presente no Anexo A.

i. Cálculo da vazão mássica de CO₂ na saída do reator:

É possível calcular a vazão mássica de CO₂ na saída da torre de absorção, de acordo com a Equação 3.1.

$$\dot{m}_{CO_2(s)} = \frac{\%CO_{2(s)}}{100} \cdot \dot{Q}_{(s)} \cdot \rho_{(t)(s)} \quad (3.1)$$

Onde:

$\dot{m}_{CO_2(s)}$: vazão mássica de CO₂ presente na corrente gasosa que sai da torre de absorção;

$\%CO_{2(s)}$: porcentagem de CO₂ presente na corrente gasosa que sai da torre de absorção;

$\dot{Q}_{(s)}$: vazão volumétrica da corrente gasosa na saída da torre de absorção;

$\rho_{(t)(s)}$: massa específica da corrente gasosa em função da temperatura na saída da torre de absorção.

Análise dimensional da Eq. 3.1:

$$\left[\frac{kg}{s} \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right] \times \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

ii. Cálculo da vazão mássica de N₂ na saída do reator:

Desprezando-se o volume dos demais gases presentes na corrente gasosa, e considerando apenas o volume de N₂, CO₂ e O₂, tem-se que o teor de N₂ pode ser encontrado subtraindo-se os teores de CO₂ e O₂, obtidos a partir das leituras dos analisadores de gases, e de posse do teor de N₂ é possível encontrar sua vazão mássica, similar ao cálculo da vazão mássica de CO₂, mostrado anteriormente.

$$\dot{m}_{N_2(s)} = \left[1 - \left(\frac{\%CO_{2(s)} + \%O_{2(s)}}{100} \right) \right] \cdot \dot{Q}_{(s)} \cdot \rho_{(t)(s)} \quad (3.2)$$

Onde:

$\dot{m}_{N_2(s)}$: vazão mássica de N₂ presente na corrente gasosa que sai da torre de absorção;

$\%O_{2(s)}$: porcentagem de O₂ presente na corrente gasosa que sai da torre de absorção;

Análise dimensional da Eq. 3.2:

$$\left[\frac{kg}{s} \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right] \times \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

iii. *Cálculo da vazão volumétrica na entrada do reator:*

Como o gás N₂ não participa da reação, a vazão mássica do N₂ na entrada é igual à vazão mássica de N₂ na saída do reator, calculada pela Equação 3.2, portanto, a partir da vazão mássica de N₂ e da massa específica da corrente gasosa é possível encontrar a vazão volumétrica de entrada dos gases, de acordo com a Eq. 3.3.

$$\dot{Q}_e = \frac{\dot{m}_{N_2(s)}}{\left[1 - \left(\frac{\%CO_{2(e)} + \%O_{2(e)}}{100} \right) \right] \cdot \rho_{(t)(e)}} \quad (3.3)$$

Onde:

$\dot{Q}_{(e)}$: vazão volumétrica da corrente gasosa na entrada da torre de absorção;

$\%CO_{2(e)}$: porcentagem de CO₂ presente na corrente gasosa que entra na torre de absorção;

$\%O_{2(e)}$: porcentagem de O₂ presente na corrente gasosa que entra na torre de absorção;

$\rho_{(t)(e)}$: massa específica da corrente gasosa em função da temperatura na entrada da torre de absorção.

Análise dimensional da Eq. 3.3:

$$\left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{\left[\frac{kg}{s} \right]}{\left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

iv. *Cálculo da vazão mássica de CO₂ na entrada do reator:*

De posse dos valores de entrada, tais como, vazão volumétrica e teor de CO₂, pode-se calcular a vazão mássica de CO₂ na entrada do reator, similar ao cálculo feito na Eq. 3.1.

$$\dot{m}_{CO_2(e)} = \frac{\%CO_2(e)}{100} \cdot \dot{Q}_{(e)} \cdot \rho_{(t)(e)} \quad (3.4)$$

Onde:

$\dot{m}_{CO_2(e)}$: vazão mássica de CO₂ presente na corrente gasosa que entra na torre de absorção;

Análise dimensional da Eq. 3.4:

$$\left[\frac{kg}{s} \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right] \times \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

v. *Cálculo da vazão mássica de CO₂ absorvido:*

Para encontrar o valor da vazão mássica que foi absorvido durante o experimento no reator, basta calcular a diferença entre a vazão mássica de entrada e a vazão mássica de saída do CO₂, como mostra a Eq. 3.5.

$$\dot{m}_{CO_2(abs)} = \dot{m}_{CO_2(e)} - \dot{m}_{CO_2(s)} \quad (3.5)$$

Onde:

$\dot{m}_{CO_2(abs)}$: vazão mássica de CO₂ absorvida no reator.

vi. *Cálculo da massa de CO₂ que entra no reator em um determinado intervalo de tempo:*

Para encontrar o valor em massa de CO₂ que entra no reator para um determinado intervalo de tempo, faz-se uso da Eq. 3.6.

$$m_{CO_2(e)(t_1 \rightarrow t_2)} = \dot{m}_{CO_2(e)(média)(t_1 \rightarrow t_2)} \cdot (\Delta t) \quad (3.6)$$

Sabendo que:

$$\dot{m}_{CO_2(e)(média)(t_1 \rightarrow t_2)} = \frac{\dot{m}_{CO_2(e)(t_1)} + \dot{m}_{CO_2(e)(t_2)}}{2} \quad (3.7)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (3.8)$$

Onde:

t_1 : tempo 1;

t_2 : tempo 2;

Δt : intervalo de tempo entre t_1 e t_2 ;

$m_{CO_2(e)(t_1 \rightarrow t_2)}$: massa de CO_2 que entra no reator entre t_1 e t_2 ;

$\dot{m}_{CO_2(e)(média)(t_1 \rightarrow t_2)}$: vazão mássica média de CO_2 que entra no reator entre t_1 e t_2 ;

$\dot{m}_{CO_2(e)(t_1)}$: vazão mássica de CO_2 que entra no reator no tempo 1;

$\dot{m}_{CO_2(e)(t_2)}$: vazão mássica de CO_2 que entra no reator no tempo 2.

Análise dimensional da Eq. 3.6:

$$[kg] = \left[\frac{kg}{s} \right] \times [s]$$

vii. *Cálculo da massa de CO_2 que é absorvida no reator em um determinado intervalo de tempo:*

O cálculo do valor em massa de CO_2 que é absorvida no reator para um determinado intervalo de tempo é similar ao apresentado na Eq. 3.6, e é representado pela Eq. 3.9.

$$M_{CO_2(abs)(t_1 \rightarrow t_2)} = \dot{m}_{CO_2(abs)(média)(t_1 \rightarrow t_2)} \cdot (\Delta t) \quad (3.9)$$

Sabendo que:

$$\dot{m}_{CO_2(abs)(média)(t_1 \rightarrow t_2)} = \frac{\dot{m}_{CO_2(abs)(t_1)} + \dot{m}_{CO_2(abs)(t_2)}}{2} \quad (3.10)$$

Onde:

$M_{CO_2(abs)(t_1 \rightarrow t_2)}$: massa de CO₂ que é absorvida no reator entre t₁ e t₂;

$\dot{m}_{CO_2(abs)(média)(t_1 \rightarrow t_2)}$: vazão mássica média de CO₂ absorvida entre t₁ e t₂;

$\dot{m}_{CO_2(abs)(t_1)}$: vazão mássica de CO₂ que é absorvida no tempo 1;

$\dot{m}_{CO_2(abs)(t_2)}$: vazão mássica de CO₂ que é absorvida no tempo 2.

Análise dimensional da Eq. 3.9:

$$[kg] = \left[\frac{kg}{s} \right] \times [s]$$

3.3.4.2. Cálculo da eficiência da absorção de SO₂

Para realizar o cálculo da eficiência da absorção de SO₂ em porcentagem para cada torre, foi utilizada a mesma equação utilizada no trabalho de Lobato (1998), mostrada a seguir:

$$\% \eta_{(abs)SO_2} = \left[\frac{C_e - C_s}{C_e} \right] \cdot 100 \quad (3.11)$$

Onde:

$\% \eta_{(abs)SO_2}$: eficiência de absorção máxima de SO₂;

C_e : concentração de entrada de SO₂;

C_s : concentração de saída de SO₂.

3.3.4.3 Cálculo da massa de CO₂ absorvida por 100 gramas de lama vermelha

Com base na concentração e no volume aproximado da suspensão para cada experimento foi encontrado o valor médio de massa de LV existente na suspensão igual a 33,5 kg. Relacionando esse valor de LV com a quantidade de CO₂ total absorvida ao longo do experimento, encontra-se a quantidade de CO₂ absorvida para cada 100 g de LV de acordo com a Eq. 3.12:

$$\begin{array}{l} M_{tot.CO_2(abs)} \cdots \cdots \cdots 33,5 \text{ kg} \\ M_{CO_2(abs)/100 \text{ g de LV}} \cdots \cdots \cdots 100 \text{ g} \end{array}$$

$$M_{CO_2(abs)/100\text{ g de LV}} = \frac{(M_{tot.CO_2(abs)} \cdot 100\text{ g})}{33,5\text{ kg}} \quad (3.12)$$

Onde:

$M_{tot.CO_2(abs)}$: massa total de CO_2 absorvida ao final do experimento;

$M_{CO_2(abs)/100\text{ g de LV}}$: massa de CO_2 absorvida por cem gramas de LV.

Análise dimensional da Eq. 3.12:

$$[g] = \frac{[kg \times g]}{[kg]}$$

3.3.4.4 Cálculo da porcentagem de CO_2 absorvido durante o experimento

Para o cálculo da porcentagem de CO_2 absorvido ao final do experimento em porcentagem é necessário relacionar o valor total de CO_2 que entra nos reatores (equivalente a 100%) com a massa de CO_2 total absorvida, de acordo com a Eq. 3.13.

$$\begin{array}{l} M_{tot.CO_2(e)} \dots\dots\dots 100\% \\ M_{tot.CO_2(abs)} \dots\dots\dots \%CO_2(abs) \end{array}$$

$$\%CO_2(abs) = \frac{(M_{tot.CO_2(abs)} \cdot 100\%)}{M_{tot.CO_2(e)}} \quad (3.13)$$

Onde:

$M_{tot.CO_2(e)}$: massa total de CO_2 que entra no reator ao longo do experimento;

$\%CO_2(abs)$: porcentagem de CO_2 absorvida ao longo do experimento.

3.3.4.5 Cálculo da massa de CO_2 absorvida por ano

Considerando que um ano de 365 dias possui 525600 minutos é possível encontrar o valor mássico de CO_2 que pode ser absorvido anualmente (Eq. 3.14) caso o processo de absorção de CO_2 pela suspensão de LV seja realizado de maneira contínua, relacionando a quantidade de CO_2 absorvida durante o experimento com o tempo de duração do experimento.

$$M_{tot.CO_2(abs)} \cdots \cdots \cdots t_{exp}$$

$$M_{tot.CO_2(abs)ano} \cdots \cdots \cdots 525600 \text{ min}$$

$$M_{tot.CO_2(abs)ano} = \frac{(M_{tot.CO_2(abs)} \cdot 525600 \text{ min})}{t_{exp}} \quad (3.14)$$

Onde:

$M_{tot.CO_2(abs)ano}$: massa total de CO₂ absorvida durante um ano;

t_{exp} : tempo de duração do experimento.

Análise dimensional da Eq. 3.14:

$$[kg] = \frac{[kg \times min]}{[min]}$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização desse trabalho foram realizados treze experimentos variando-se os tipos de reatores, a fase que entrará em contato com os gases de combustão e a temperatura inicial da fase líquida. Os experimentos realizados na torre *spray* ainda tiveram mais uma variável, os níveis dos bicos aspersores (um nível e dois níveis), como já foi relatado anteriormente.

Os experimentos foram realizados de acordo com as informações contidas na Tab. 4.1, levando-se em consideração o tipo de reator utilizado, a concentração de sólidos e temperatura inicial da fase líquida que entra em contato com a fase gasosa.

Tabela 4.1 – Condições operacionais para realização dos experimentos.

Experimento	Tipo de reator		Fase líquida		Temperatura da fase líquida		
	TS	TRE	Suspensão	Sobrenadante	T _{baixa}	T _{amb.}	T _{alta}
EXP 01	X		X			X	
EXP 02	X			X		X	
EXP 03	X		X				X
EXP 04		X		X			X
EXP 05	X		X			X	
EXP 06	X			X			X
EXP 07		X	X			X	
EXP 08		X	X			X	
EXP 09		X	X		X		
EXP 10		X	X			X	
EXP 11	X		X			X	
EXP 12		X	X			X	
EXP 13	X		X			X	

Os resultados obtidos para cada experimento foram comparados para avaliar a influência de cada fator para a eficiência da absorção, as comparações de resultados foram feitas em uma faixa tempo comum aos dois experimentos, e as características consideradas mais importantes para avaliar o desempenho de cada experimento foram:

- i. Variação do pH durante o experimento;
- ii. Porcentagem de CO₂ absorvida durante o experimento;
- iii. Massa de CO₂ absorvida a cada 100 gramas de LV;
- iv. Massa de CO₂ absorvida em um ano caso o processo se dê de forma contínua.

Os experimentos 10 e 11 foram realizados com adição de SO₂ à corrente gasosa, a fim de avaliar a eficiência da absorção de SO₂ pela suspensão de LV. Nos experimentos 12 e 13 buscou-se encontrar o tempo, para cada torre especificamente, em que o teor de CO₂ na entrada fosse o mesmo da saída.

Após os experimentos 10, 11, 12 e 13 foram coletadas amostras da suspensão carbonatada para que fosse avaliado o pH de longo prazo em frascos fechados e também em frascos abertos.

A seguir, têm-se os dados obtidos em cada experimento individualmente, bem como as comparações realizadas de acordo com os fatores principais em um tempo comum para os experimentos comparados, bem como o raio-x da LV antes e depois da reação de carbonatação.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentadas as condições operacionais de cada experimento, levando-se em conta os fatores já citados anteriormente (tipo de reator, tipo e temperatura da fase líquida), vazões volumétricas, variações de pH, tempo de duração, bem como os valores obtidos após o tratamento dos dados experimentais.

4.1.1 Experimento 01(Data de realização: 31/10/2011)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 1 nível
- Vazão de gás = 1,5558 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0618m³/min
- pH inicial = 12,5
- pH final = 8,9
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 140 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 3,6942 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 5,49%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 4,646,16kg/ano

Observando a Tabela 4.2 percebe-se a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂ (a amostragem dos teores de O₂ é importante para que se possa visualizar que o CO₂ realmente está sendo consumido, visto que o aumento do teor de O₂ indica que com a absorção do CO₂ ocorre a redução de sua quantidade na corrente gasosa, e conseqüentemente a quantidade de O₂ presente será maior em porcentagem). Devido à concentração de SO₂ ser muito pequena não é possível analisar o processo de absorção desse gás, pois se encontra na forma de traços. A temperatura de saída no tempo zero é 32°C, superior à temperatura inicial do experimento (27°C), isso se deve ao fato de que na saída da suspensão da torre de absorção, quando foi medida a temperatura, já havia ocorrido troca térmica com os gases no interior do reator, ocasionando aumento na temperatura.

Tabela 4.2 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 01.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	6,0	12,76	12,9	0	55	40	5,6	13,22	13,6	0	53	32
10	6,2	12,02	12,5	0	30	47	5,8	12,39	13,0	0	30	34
20	6,2	12,15	12,8	0	21	60	5,8	12,58	13,2	0	19	36
40	6,2	12,05	12,8	0	27	66	5,8	12,57	13,2	0	27	40
60	6,2	11,92	12,7	0	27	67	5,7	12,50	13,1	0	27	39
80	5,8	12,55	13,3	0	34	64	5,7	12,67	13,6	0	31	39
100	5,7	12,56	13,4	0	35	64	5,3	13,10	13,8	0	41	39
120	5,9	12,20	12,8	0	32	55	5,6	12,65	13,4	0	33	40
140	5,8	12,17	13	0	30	58	5,7	12,61	13,4	0	31	40

É possível notar um aumento no valor do pH nos tempos 50 e 60 minutos na Tab. 4.3, isso ocorre devido à medição de pH ser realizada logo após a mistura da suspensão ser feita, ocorre que, em alguns instantes do experimento era necessário realizar uma mistura na suspensão presente no reservatório de fibrocimento, pois apesar do uso de defloculante ainda ocorre uma leve sedimentação da suspensão, ao misturá-la há um aumento na quantidade de sólidos presentes na suspensão que entrará em contato com a fase gasosa, e como a fase sólida da suspensão é responsável por grande parte da alcalinidade da lama vermelha isso implica no aumento do pH. Nota-se também que o pH tende a estabilizar em torno de 100 minutos.

Tabela 4.3 – Valores de pH obtidos no experimento 01.

Tempo (min)	pH
0	12,5
10	10,6
20	10,2
30	9,9
40	9,6
50	10,0
60	9,9
80	9,6
100	9,2
120	9,0
140	8,9

Na Tab. 4.4 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.2 por meio das equações mássicas já mostradas anteriormente, apesar de a quantidade mássica de CO₂ absorvido não ser sempre crescente ou decrescente ao longo do tempo, nos é mostrado que há sequestro de carbono de acordo com a diferença de massa que entra e sai do reator.

Tabela 4.4 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 01.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,15380	2,22956	1,59593	0,16466	0,01086	-	-
10	0,15824	2,23204	1,62305	0,16922	0,01098	1,66941	0,10920
20	0,15721	2,21227	1,67742	0,16799	0,01078	1,68602	0,10878
40	0,15517	2,18393	1,68402	0,16563	0,01046	3,33618	0,21238
60	0,15299	2,19558	1,69535	0,16625	0,01326	3,31882	0,23716
80	0,15299	2,19101	1,68146	0,15564	0,00265	3,21889	0,15904
100	0,14226	2,19021	1,67899	0,15273	0,01047	3,08369	0,13120
120	0,14982	2,18714	1,62823	0,15756	0,00774	3,10290	0,18211
140	0,15250	2,18554	1,63946	0,15453	0,00203	3,12090	0,09769
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						22,53681	1,23756

A partir do Gráf. 4.1 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 01.

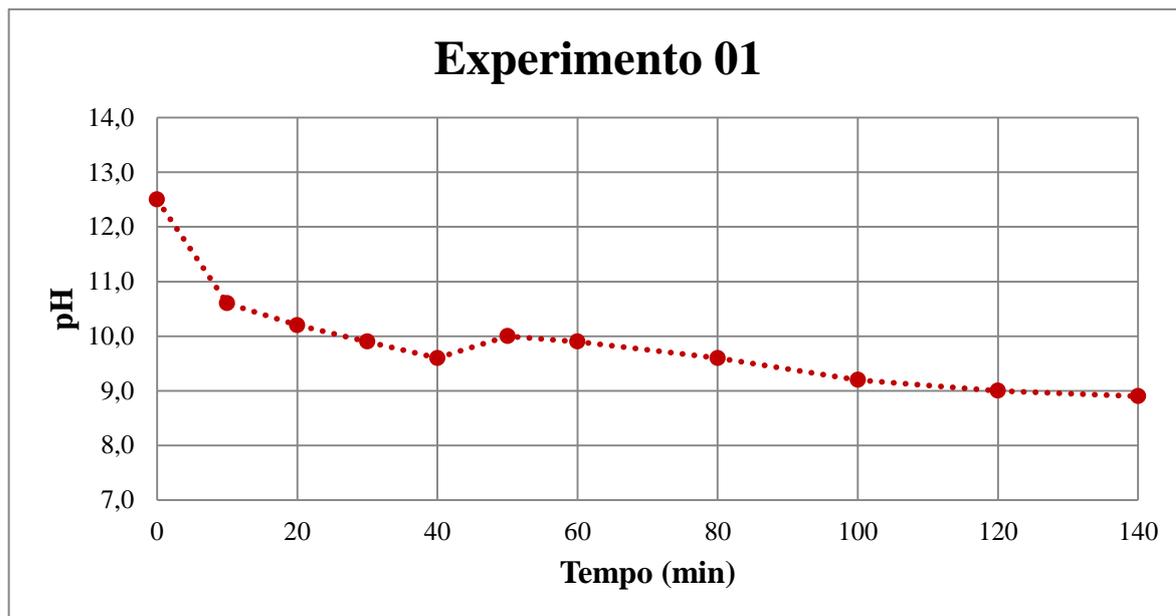


Gráfico 4.1 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 01.

4.1.2 Experimento 02(Data de realização: 18/11/2011)

- Sobrenadante (1,55%-p) em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 1 nível
- Vazão de gás = 1,3536m³/min
- Vazão de líquido = 0,0660m³/min
- pH inicial = 12,8
- pH final = 8,4
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 90 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 3,8170 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 9,26%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 8401,04kg/ano

Observando a Tabela 4.5 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂. Devido à concentração de SO₂ e NO₂ serem muito pequenas não é possível analisar o processo de absorção desses gases, pois se encontram na forma de traços, em alguns instantes a concentração desses gases na saída é maior do que na entrada, explica-se esse aumento da seguinte forma, durante as medições dos teores dos gases pelos analisadores é necessário um

tempo de estabilização dos valores para que se faça a anotação dos dados, nesse período pode ocorrer uma leve variação no teor do gás passante no momento, ocasionando assim a marcação do aumento.

Tabela 4.5 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 02.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	8,8	8,92	10,9	1	2	58	6,8	11,24	11,7	1	2	29
10	8,2	9,52	10,5	5	2	63	7,2	10,48	12,2	0	4	34
20	7,2	1,73	11,5	2	2	66	6,4	11,51	12,5	1	3	36
40	7,3	10,49	11,3	9	0	65	6,5	11,50	12,5	11	0	39
60	7,3	10,37	11,4	5	2	69	6,7	11,24	12,1	1	2	40
80	7,4	10,28	11,2	9	0	78	6,8	10,95	12,2	9	0	40

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.6, o pH tende a estabilizar em torno de 30 minutos.

Tabela 4.6 – Valores de pH obtidos no experimento 02.

Tempo (min)	pH
0	12,8
10	9,9
20	9,2
30	8,5
40	8,4
50	8,4
60	8,4
80	8,3
90	8,4

Na Tab. 4.7 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.5 por meio das equações mássicas já mostradas anteriormente, deve-se relacionar a aumento ou decréscimo da quantidade de CO₂ em um determinado tempo com as várias coisas que variam ao longo do experimento, tais como, temperatura, vazão de entrada, mistura da suspensão e quantidade de CO₂ que entra no reator, além do mais, também deve-se considerar que também ocorre adsorção de CO₂ por parte das partículas sólidas presentes na lama vermelha.

Tabela 4.7 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 02.

Tempo (min)	$\dot{m}. CO_2(sai)$ (kg/min)	$\dot{m}. N_2(sai)$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}. CO_2(ent)$ (kg/min)	$\dot{m}. CO_2(abs)$ (kg/min)	$\dot{m}_{médiaCO_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{médiaCO_2(abs)} \times \Delta t$ (kg)
0	0,16412	1,97812	1,47936	0,21156	0,04744	-	-
10	0,17091	1,95406	1,48369	0,19474	0,02383	2,03153	0,35638
20	0,15092	1,93584	1,33995	0,15305	0,00212	1,73894	0,12978
40	0,15179	1,91490	1,46393	0,17004	0,01825	3,23085	0,20370
60	0,15596	1,91010	1,47556	0,16936	0,01341	3,39402	0,31655
80	0,15828	1,91453	1,51844	0,17210	0,01382	3,41467	0,27229
$\Sigma(\dot{m}_{médiaCO_2} \times \Delta t)$						13,81000	1,27870

A partir do Gráf. 4.2 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 02.

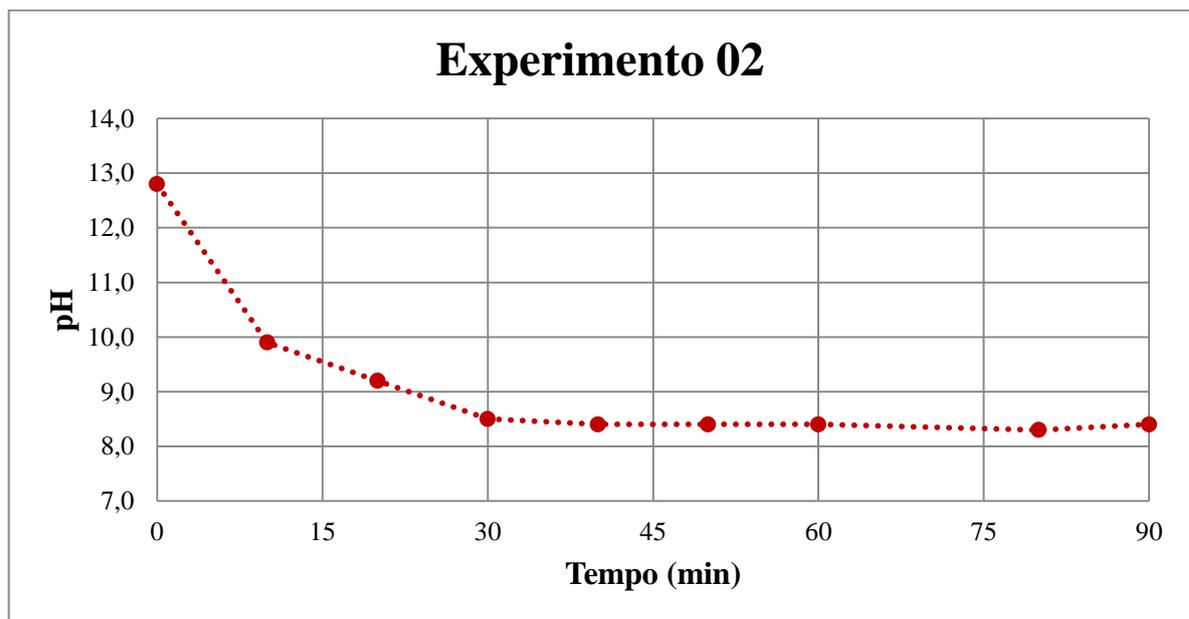


Gráfico 4.2 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 02.

4.1.3 Experimento 03 (Data de realização: 25/11/2011)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 1 nível
- Vazão de gás = 1,6440m³/min
- Vazão de líquido = 0,0756m³/min
- pH inicial = 12,3
- pH final = 8,9

- Temperatura inicial = 48°C
- Duração do experimento = 100 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 6,8552 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 11,46%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 12070,31kg/ano

Observando a Tabela 4.8 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂. Encontrase também SO₂ e NO₂ na forma de traços.

Tabela 4.8 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 03.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,2	10,84	11,5	4	9	48	6,1	11,27	12,2	1	10	48
10	7,6	9,92	11,0	4	0	48	6,6	10,98	11,8	4	0	52
20	7,5	9,92	10,9	4	0	48	6,5	10,71	11,7	4	0	54
40	8,1	8,89	10,2	5	0	63	7,2	8,92	10,9	1	1	56
60	6,8	10,84	11,5	4	14	63	6,3	11,35	12,4	4	13	56
80	7,2	10,57	11,7	4	10	65	6,4	11,16	12,3	4	10	56
100	7,4	10,42	11,5	5	10	65	6,6	11,2	12,0	4	10	57

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.9, o pH tende a estabilizar em torno de 80 minutos.

Tabela 4.9 – Valores de pH obtidos no experimento 03.

Tempo (min)	pH
0	12,3
10	10,5
20	10,2
30	10,0
40	9,7
50	9,2
60	9,3
80	9,0
100	8,9

Na Tab. 4.10 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.8 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.10 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 03.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,16811	2,27716	1,65744	0,20004	0,03194	-	-
10	0,17962	2,24309	1,62235	0,20669	0,02706	2,03365	0,29501
20	0,17581	2,23922	1,61759	0,20337	0,02756	2,05028	0,27314
40	0,19354	2,25476	1,69695	0,22002	0,02647	4,23385	0,54038
60	0,16935	2,21363	1,67914	0,18277	0,01342	4,02783	0,39893
80	0,17204	2,21605	1,69374	0,19404	0,02200	3,76803	0,35417
100	0,17687	2,20286	1,68469	0,19836	0,02149	3,92395	0,43486
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						20,03758	2,29648

A partir do Gráf. 4.3 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 03.

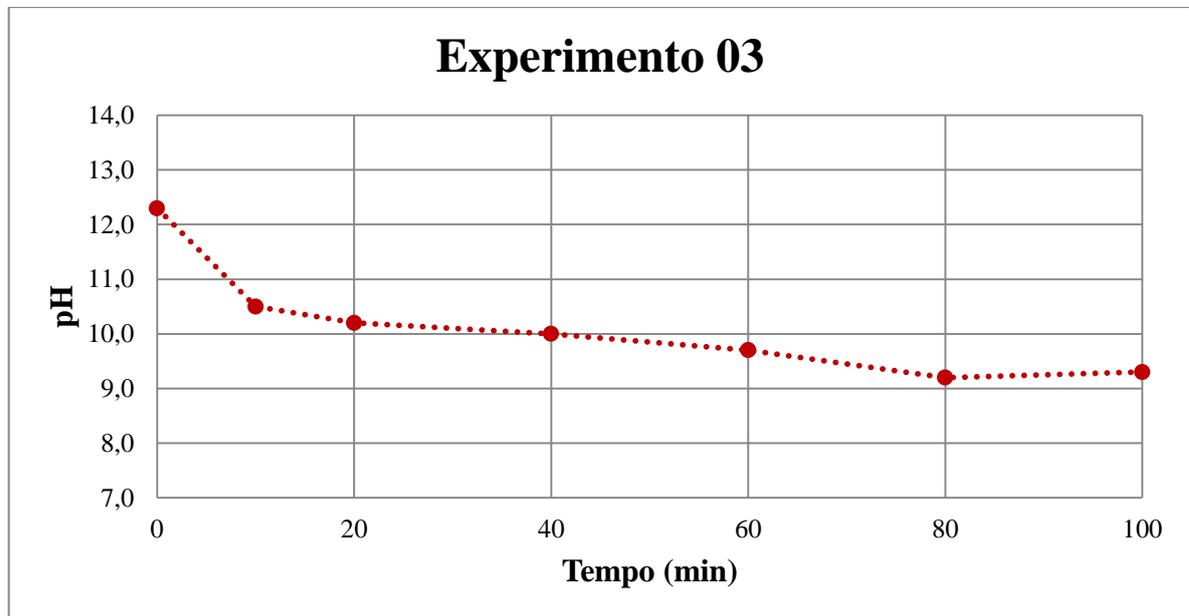


Gráfico 4.3 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 03.

4.1.4 Experimento 04 (Data de realização: 02/12/2011)

- Sobrenadante (1,55%-p) em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado
- Vazão de gás = 1,3530m³/min
- Vazão de líquido = 0,05280m³/min
- pH inicial = 12,5
- pH final = 8,3
- Temperatura inicial= 46°C
- Duração do experimento = 90 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 1,9190 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 4,56%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 3754,43kg/ano

Observando a Tabela 4.11 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂. Encontrase também SO₂ e NO₂ na forma de traços.

Tabela 4.11 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 04.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,0	11,28	12,1	0	15	46	5,8	12,09	12,6	0	15	46
10	6,5	11,65	12,3	9	10	48	6,0	12,01	12,6	5	10	48
30	6,8	11,11	11,8	5	2	49	6,4	11,66	12,2	5	2	50
40	6,8	11,07	11,9	0	6	65	6,4	11,58	12,5	1	6	51
60	6,2	11,90	12,9	9	2	67	6,0	12,10	13,1	9	1	53
80	8,4	8,91	10,2	9	0	72	7,9	9,40	10,4	9	0	53
90	8,2	8,98	9,9	4	2	73	7,7	9,60	10,9	9	0	53

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.12, o pH tende a estabilizar em torno de 20 minutos.

Tabela 4.12 – Valores de pH obtidos no experimento 04.

Tempo (min)	pH
0	12,5
10	8,8
20	8,4
30	8,3
40	8,3
50	8,3
60	8,3
80	8,3
90	8,3

Na Tab. 4.13 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.11 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.13 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 04.

Tempo (min)	$\dot{m}. CO_{2(sai)}$ (kg/min)	$\dot{m}. N_{2(sai)}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}. CO_{2(ent)}$ (kg/min)	$\dot{m}. CO_{2(abs)}$ (kg/min)	$\dot{m}_{médiaCO_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{médiaCO_2(abs)} \times \Delta t$ (kg)
0	0,13238	1,87410	1,35946	0,16053	0,02815	-	-
10	0,13608	1,85957	1,35531	0,14767	0,01159	1,54104	0,19872
30	0,14425	1,84679	1,34630	0,15298	0,00874	3,00656	0,10164
40	0,14380	1,84282	1,41020	0,15258	0,00878	1,52779	0,08759
60	0,13397	1,82871	1,41172	0,13844	0,00447	2,91015	0,06624
80	0,17640	1,84657	1,43284	0,18758	0,01119	3,26020	0,07826
90	0,17193	1,84657	1,43478	0,18283	0,01090	1,85206	0,11043
$\Sigma(\dot{m}_{médiaCO_2} \times \Delta t)$						14,09779	0,64288

A partir do Gráf. 4.4 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 04.

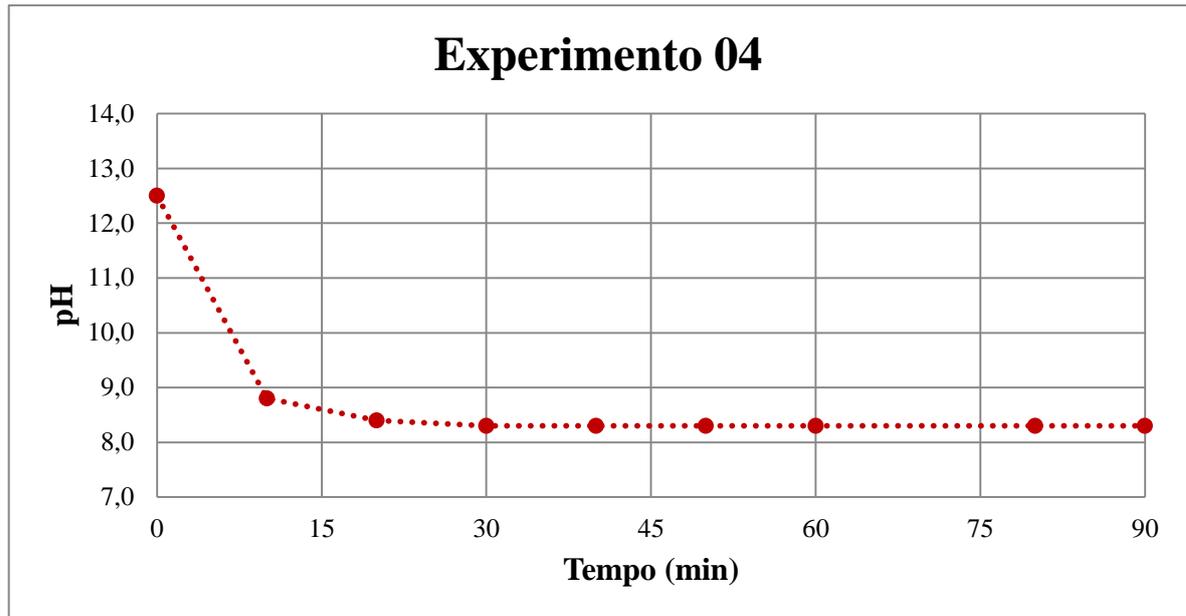


Gráfico 4.4 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 04.

4.1.5 Experimento 05 (Data de realização: 12/12/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 2 níveis
- Vazão de gás = 1,3680 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0444 m³/min
- pH inicial = 12,3
- pH final = 9,1
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 120 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 5,9271 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 10,36%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 8696,77 kg/ano

Observando a Tabela 4.14 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂. Encontra-se também SO₂ em concentração maior do que nos experimentos anteriores, pois nesse experimento foi adicionado um óleo com maior teor de enxofre ao óleo combustível normalmente utilizado, no entanto a concentração de SO₂ reduziu bastante em pouco tempo e somente nas medições do tempo 0 e 20 minutos foi possível observar a redução do teor de

SO₂ devido à absorção, em 30 minutos a concentração desse gás na corrente gasosa já estava baixa para avaliar a eficiência da absorção. Após esse experimento, foram realizados outros (experimento 10 e 11) para avaliar a absorção de SO₂, realizados como detalhado no item 3.3.3.1. Não houve medição dos teores de gases no tempo de 10 minutos com o equipamento Tempest 100 devido a problemas operacionais.

Tabela 4.14 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 05.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	6,4	12,12	12,5	0	45	55	5,7	12,67	13,1	0	46	30
10	6,5	12,02	12,5	0	29	56	5,7	12,52	12,9	0	31	34
20	6,3	11,95	12,7	0	39	58	5,7	12,69	13,2	0	29	35
40	7,2	10,64	11,6	4	2	60	6,4	11,51	12,2	4	3	38
60	7,1	10,75	11,5	4	9	65	6,4	11,53	12,4	4	3	41
80	7,0	11,07	11,6	0	11	64	6,3	11,61	12,4	3	9	46
100	6,2	12,16	12,9	4	43	63	5,6	12,73	13,1	4	24	47
120	7,6	8,31	-	-	-	63	6,8	9,18	-	-	-	47

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.15, o pH tende a estabilizar em torno de 30 minutos.

Tabela 4.15 – Valores de pH obtidos no experimento 05.

Tempo (min)	pH
0	12,3
10	10,6
20	10,4
30	10,3
40	10,1
50	9,8
60	9,7
80	9,4
100	9,2
120	9,1

Na Tab. 4.16 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.14 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.16 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 05.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,13857	1,98447	1,48496	0,15587	0,01730	-	-
10	0,13674	1,96189	1,47260	0,15651	0,01977	1,56191	0,18535
20	0,13629	1,95138	1,46882	0,15038	0,01409	1,53445	0,16927
40	0,15154	1,94370	1,46463	0,17033	0,01880	3,20716	0,32886
60	0,15007	1,92447	1,47232	0,16633	0,01625	3,36661	0,35049
80	0,14539	1,89442	1,44887	0,16186	0,01647	3,28183	0,32722
100	0,12882	1,87877	1,43770	0,14268	0,01386	3,04536	0,30325
120	0,15643	1,93283	1,43598	0,17469	0,01826	3,17367	0,32113
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						19,17099	1,98556

A partir do Gráf. 4.5 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 05.

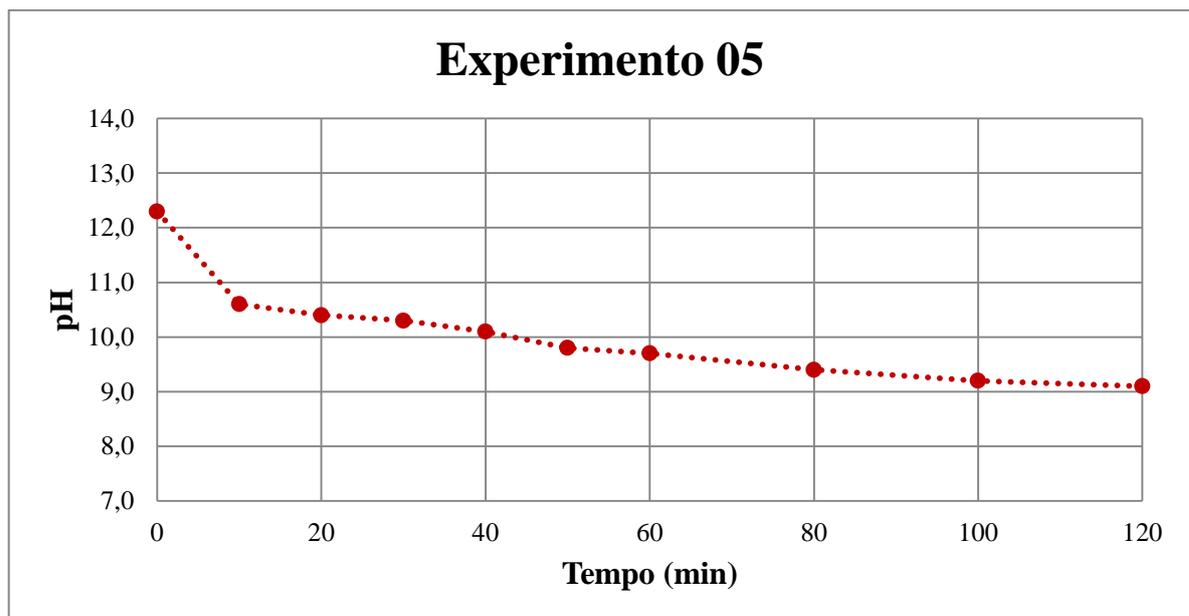


Gráfico 4.5 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 05.

4.1.6 Experimento 06 (Data de realização: 13/12/2011)

- Sobrenadante (1,55%-p) em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 2 níveis
- Vazão de gás = 1,2186 m³/min
- Vazão de líquido = 0,01680 m³/min
- pH inicial = 12,8

- pH final = 8,8
- Temperatura inicial = 43°C
- Duração do experimento = 80 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 2,7200 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 8,88%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 5986,67 kg/ano

Observando a Tabela 4.17 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂. Encontra-se também SO₂ e NO₂ na forma de traços. Não houve medição dos teores de gases no tempo de 120 minutos com o equipamento Tempest 100 devido a problemas operacionais.

Tabela 4.17 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 06.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,2	10,75	12,6	9	10	53	6,1	11,82	12,5	9	11	43
10	5,7	12,58	12,9	9	10	58	5,3	12,96	14,7	4	11	43
20	5,8	12,24	-	-	-	66	6,8	11,10	-	-	-	43
40	6,2	11,74	12,7	9	2	56	5,7	12,47	13,4	9	2	46
60	6,4	11,48	12,5	9	10	76	5,8	12,24	13,3	9	9	50
80	6,7	11,34	12,3	9	9	75	6,0	12,03	13,0	9	10	47

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.18, o pH tende a estabilizar em torno de 80 minutos.

Tabela 4.18 – Valores de pH obtidos no experimento 06.

Tempo (min)	pH
0	12,8
10	9,8
20	9,5
30	9,3
40	9,0
50	8,8
60	8,7
80	8,7
90	8,8

Na Tab. 4.19 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.17 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.19 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 06.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,12660	1,70353	1,25808	0,14949	0,02288	-	-
10	0,11000	1,69647	1,27742	0,11833	0,00833	1,33908	0,15608
20	-	-	-	-	-	-	-
40	0,11718	1,68218	1,25372	0,12710	0,00992	3,68139	0,27378
60	0,11774	1,66375	1,31516	0,12966	0,01193	2,56760	0,21848
80	0,12295	1,67973	1,32653	0,13731	0,01436	2,66977	0,26288
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						10,25784	0,91121

A partir do Gráf. 4.6 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 06.

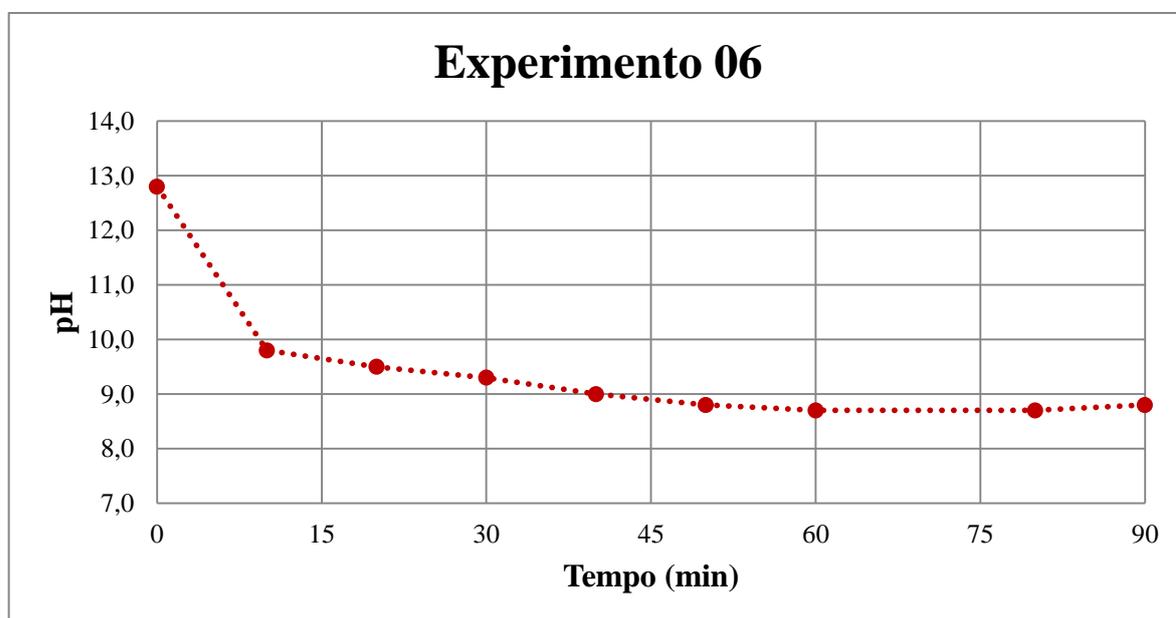


Gráfico 4.6 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 06.

4.1.7 Experimento 07 (Data de realização: 07/02/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado

- Vazão de gás = 0,9618 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0600 m³/min
- pH inicial = 12,9
- pH final = 8,5
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 90 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 4,5368 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 11,69%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 8875,70 kg/ano

Observando a Tabela 4.20 percebe-se em quase todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, exceto nas medições de 20 minutos, onde mostra que o teor de CO₂ na saída é maior do que na entrada, esse tipo de problema ocorre quando se leva um tempo longo para que o analisador de gás estabilize para a coleta de dados, portanto esse valor não será utilizado para cálculos de massa. Encontra-se também SO₂ e NO₂ na forma de traços. Não houve medição dos teores de gases no tempo de 20 minutos com o equipamento Tempest 100 devido a problemas operacionais.

Tabela 4.20 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 07.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	9,2	5,87	8,0	0	1447	48	7,2	7,94	9,2	0	1354	28
10	8,6	8,62	-	-	-	47	7,4	9,09	-	-	-	29
20	8,9	8,17	9,6	0	128	47	6,8	9,81	11,1	0	78	33
30	8,1	9,32	10,6	0	32	46	6,8	10,55	12,1	0	32	36
40	8,7	8,80	9,5	0	38	45	7,9	9,10	10,1	0	38	37
60	8,7	8,57	9,7	0	34	47	8,0	9,15	10,6	0	36	40
80	8,5	8,49	9,6	0	24	47	7,6	10,14	11,2	0	23	42
90	8,5	8,95	9,7	0	21	48	8,0	9,36	10,7	0	19	42

Houve um leve aumento no valor do pH no final do experimento, de acordo com a Tab. 4.21, explicado da mesma forma que no experimento 01 ao longo do experimento, o pH tende a estabilizar em torno de 40 minutos.

Tabela 4.21 – Valores de pH obtidos no experimento 07.

Tempo (min)	pH
0	12,9
20	9,7
30	9,2
40	9,0
60	8,8
80	8,6
90	8,5

Na Tab. 4.22 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.20 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.22 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 07.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,12389	1,46021	1,02565	0,15818	0,03428	-	-
10	0,12690	1,43214	1,02881	0,14878	0,02188	1,53480	0,28082
20	0,11507	1,41116	1,01190	0,15144	0,03637	1,50114	0,29126
30	0,11394	1,38489	0,99413	0,13584	0,02190	1,43642	0,29135
40	0,13194	1,38622	0,99288	0,14618	0,01424	1,41011	0,18070
60	0,13232	1,37029	0,98498	0,14410	0,01179	2,90284	0,13014
80	0,12489	1,35181	0,96842	0,13842	0,01353	2,82524	0,12657
90	0,13147	1,35806	0,98141	0,13984	0,00837	1,39129	0,21897
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						13,00185	1,51981

A partir do Gráf. 4.7 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 07.

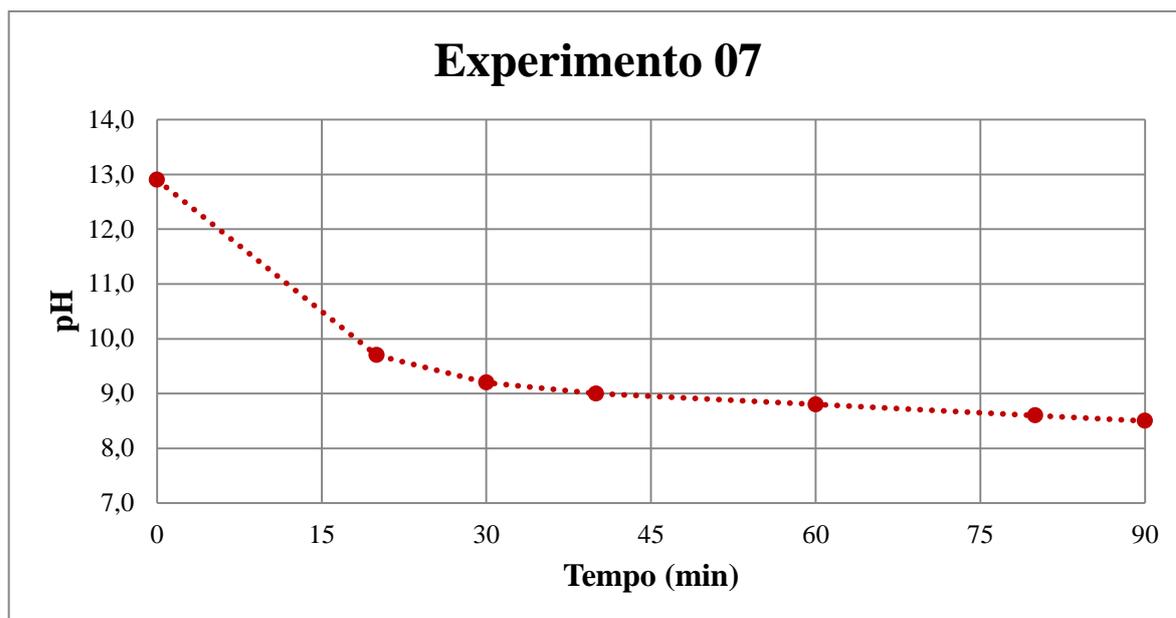


Gráfico 4.7 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 07.

4.1.8 Experimento 08 (Data de realização: 08/02/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado
- Vazão de gás = $0,9720\text{m}^3/\text{min}$
- Vazão de líquido = $0,0582\text{m}^3/\text{min}$
- pH inicial = 12,9
- pH final = 7,8
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 90 minutos
- Massa de CO_2 por 100g de LV = 3,9362 g
- Porcentagem de CO_2 absorvido durante o experimento = 16,82%
- Valor estipulado de CO_2 absorvido anualmente = 7712,10kg/ano

Observando a Tabela 4.23 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO_2 , bem como aumento do teor de O_2 , indicando que está ocorrendo absorção do CO_2 . Encontrase também SO_2 na forma de traços.

Tabela 4.23 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 08.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	4,7	14,42	14,7	0	35	43	3,7	14,56	15,1	0	34	30
10	5,0	13,82	14,6	0	22	43	4,1	14,44	14,9	0	22	33
20	5,8	12,80	15,7	0	50	46	4,8	13,39	15,5	0	50	35
40	5,0	13,57	14,6	0	19	48	4,2	14,35	14,7	0	18	37
60	5,1	13,30	14,3	0	13	45	4,1	13,70	15,0	0	13	40
80	5,1	13,39	14,6	0	15	44	4,5	13,88	15,0	0	16	41
90	5,0	13,34	14,6	0	15	44	4,5	13,82	15,1	0	14	41

Houve um leve aumento no valor do pH no final do experimento, de acordo com a Tab. 4.24, explicado da mesma forma que no experimento 01 ao longo do experimento, o pH tende a estabilizar em torno de 60 minutos.

Tabela 4.24 – Valores de pH obtidos no experimento 08.

Tempo (min)	pH
0	12,9
10	9,3
20	8,7
40	8,2
60	7,5
80	8,1
90	7,8

Na Tab. 4.25 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.23 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.25 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 08.

Tempo (min)	ṁ. CO ₂ (sai) (kg/min)	ṁ. N ₂ (sai) (kg/min)	Q̇ _{ent} (m ³ /min)	ṁ. CO ₂ (ent) (kg/min)	ṁ. CO ₂ (abs) (kg/min)	ṁ _{médiaCO₂(e)} × Δt (kg)	ṁ _{médiaCO₂(abs)} × Δt (kg)
0	0,06391	1,41191	1,02498	0,08205	0,01814	-	-
10	0,07012	1,39312	1,00760	0,08580	0,01569	0,83926	0,16912
20	0,08155	1,38991	1,01219	0,09904	0,01749	0,92420	0,16586
40	0,07089	1,37476	1,00714	0,08441	0,01352	1,83448	0,31009
60	0,06853	1,37396	0,99496	0,08587	0,01734	1,70286	0,30865
80	0,07498	1,35989	0,98272	0,08509	0,01011	1,70959	0,27453
90	0,07498	1,36089	0,98164	0,08333	0,00835	0,84207	0,09231
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						7,85246	1,32056

A partir do Gráf. 4.8 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 08.

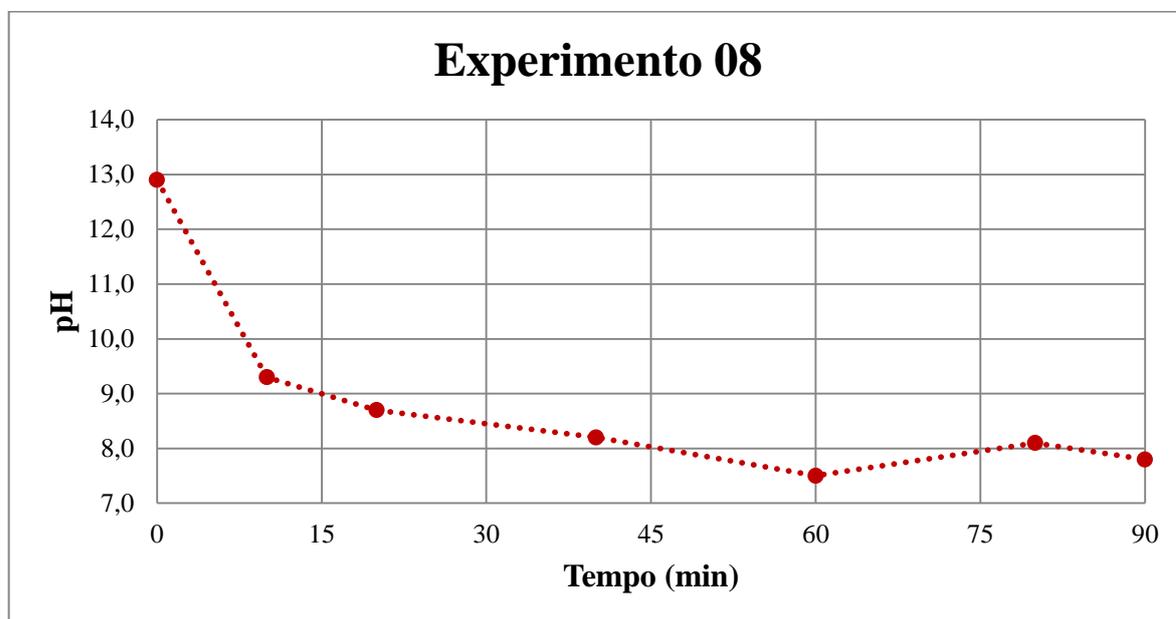


Gráfico 4.8 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 08.

4.1.9 Experimento 09 (Data de realização: 10/02/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado
- Vazão de gás = $0,6222\text{m}^3/\text{min}$
- Vazão de líquido = $0,0600\text{m}^3/\text{min}$
- pH inicial = 12,7
- pH final = 8,2
- Temperatura inicial = 23°C
- Duração do experimento = 90 minutos
- Massa de CO_2 por 100g de LV = 3,0470 g
- Porcentagem de CO_2 absorvido durante o experimento = 16,63%
- Valor estipulado de CO_2 absorvido anualmente = 5961,12kg/ano

Observando a Tabela 4.26 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO_2 , bem como aumento do teor de O_2 , indicando que está ocorrendo absorção do CO_2 . Encontram-se também NO_2 e SO_2 na forma de traços.

Tabela 4.26 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 09.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,2	10,78	11,8	1	2	39	5,3	11,77	12,4	1	2	23
10	7,0	11,30	12,2	0	5	41	5,4	12,20	13,3	1	2	24
20	6,6	11,70	12,8	1	2	41	5,2	13,02	13,6	1	0	27
30	7,0	10,74	12	1	11	41	5,8	12,00	13	0	7	27
40	6,6	11,04	12,3	1	4	40	5,6	12,35	12,9	1	2	27
60	5,9	12,54	13,6	1	2	39	5,2	13,28	14,2	0	5	27
80	4,5	14,49	15,8	5	2	37	4,0	15,60	16,2	1	2	26
90	4,3	14,70	15,9	0	6	37	3,7	15,39	16,2	0	5	26

Não houve aumento no valor do pH ao longo do experimento, somente redução de acordo com o que é observado na Tab. 4.27, o pH tende a estabilizar em torno de 40 minutos.

Tabela 4.27 – Valores de pH obtidos no experimento 09.

Tempo (min)	pH
0	12,7
10	10,1
20	9,4
30	8,9
40	8,5
60	8,3
80	8,4
90	8,2

Na Tab. 4.28 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.26 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.28 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 09.

Tempo (min)	$\dot{m}. CO_2(sai)$ (kg/min)	$\dot{m}. N_2(sai)$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}. CO_2(ent)$ (kg/min)	$\dot{m}. CO_2(abs)$ (kg/min)	$\dot{m}_{médiaCO_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{médiaCO_2(abs)} \times \Delta t$ (kg)
0	0,06001	0,93898	0,66359	0,08243	0,02242	-	-
10	0,06093	0,92979	0,66393	0,07966	0,01873	0,81045	0,20574
20	0,05808	0,91343	0,65225	0,07379	0,01571	0,76727	0,17220
30	0,06478	0,91812	0,65113	0,07813	0,01335	0,75959	0,14528
40	0,06255	0,91645	0,64708	0,07344	0,01089	0,75784	0,12119
60	0,05808	0,91051	0,64709	0,06587	0,00779	1,39306	0,18677
80	0,04483	0,90106	0,64054	0,05005	0,00522	1,15918	0,13009
90	0,04147	0,90677	0,64468	0,04814	0,00667	0,49095	0,05947
$\Sigma(\dot{m}_{médiaCO_2} \times \Delta t)$						6,13835	1,02074

A partir do Gráf. 4.9 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 09.

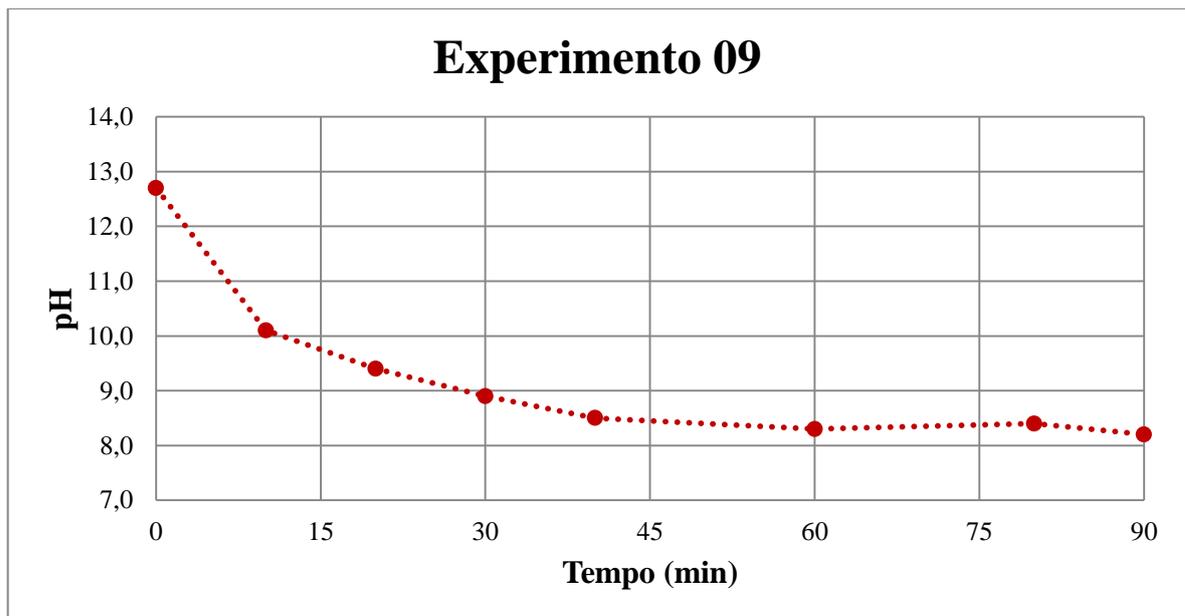


Gráfico 4.9 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 09.

4.1.10 Experimento 10 (Data de realização: 20/03/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado
- Vazão de gás = 1,1916 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0600m³/min
- pH inicial = 12,4

- pH final = 8,1
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 100 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 4,3736 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 11,46%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 7700,85 kg/ano

Observando a Tabela 4.29 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂, apesar de que no tempo zero a medição feita com o MRU indica menor teor de O₂ na saída em comparação ao valor de entrada, no entanto, a amostragem realizada com o Tempest 100 não alega a mesma coisa. Encontra-se também SO₂ em concentrações suficientemente altas para avaliar a absorção de SO₂ pela soda cáustica presente na lama vermelha.

Tabela 4.29 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 10.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,8	10,30	11,0	0	296	47	6,4	10,20	11,7	0	76	30
10	7,6	10,16	12,4	0	144	66	6,7	10,87	11,9	0	87	33
20	8,0	9,68	10,7	0	447	67	7,2	10,23	11,2	0	70	35
40	7,8	9,80	10,8	0	385	74	7,2	10,32	11,2	0	90	39
60	7,7	9,73	10,7	0	660	75	7,2	10,30	11,5	0	83	41
80	7,7	9,72	10,8	0	610	71	7,0	10,30	11,8	0	71	42
90	7,8	9,65	10,9	0	702	65	7,2	10,41	13,6	0	84	43
100	7,8	9,82	10,9	0	662	68	7,0	10,81	11,7	0	98	43

Houve um leve aumento no valor do pH no meio do experimento, mais precisamente no valor encontrado em 60 minutos, de acordo com a Tab. 4.30, explicado da mesma forma que no experimento 01, o pH tende a estabilizar em torno de 20 minutos.

Tabela 4.30 – Valores de pH obtidos no experimento 10.

Tempo (min)	pH
0	12,4
10	9,0
20	8,2
30	8,1
40	8,1
50	8,1
60	8,2
80	8,1
90	8,1
100	8,1

Na Tab. 4.31 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.29 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.31 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 10.

Tempo (min)	$\dot{m}. \text{CO}_2(\text{sai})$ (kg/min)	$\dot{m}. \text{N}_2(\text{sai})$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}. \text{CO}_2(\text{ent})$ (kg/min)	$\dot{m}. \text{CO}_2(\text{abs})$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(abs)} \times \Delta t$ (kg)
0	0,13552	1,76605	1,28232	0,16820	0,03267	-	-
10	0,14047	1,72819	1,32466	0,15971	0,01924	1,63951	0,25954
20	0,14996	1,71975	1,32084	0,16713	0,01717	1,63417	0,18203
40	0,14801	1,69557	1,32802	0,16050	0,01249	1,63816	0,14828
60	0,14706	1,68510	1,32094	0,15714	0,01008	1,58823	0,11284
80	0,14252	1,68376	1,30441	0,15700	0,01448	1,57071	0,12280
90	0,14612	1,67208	1,27303	0,15799	0,01187	1,57495	0,13175
100	0,14206	1,66802	1,28396	0,15793	0,01587	3,15925	0,27741
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						12,80497	1,23464

A partir do Gráf. 4.10 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 10.

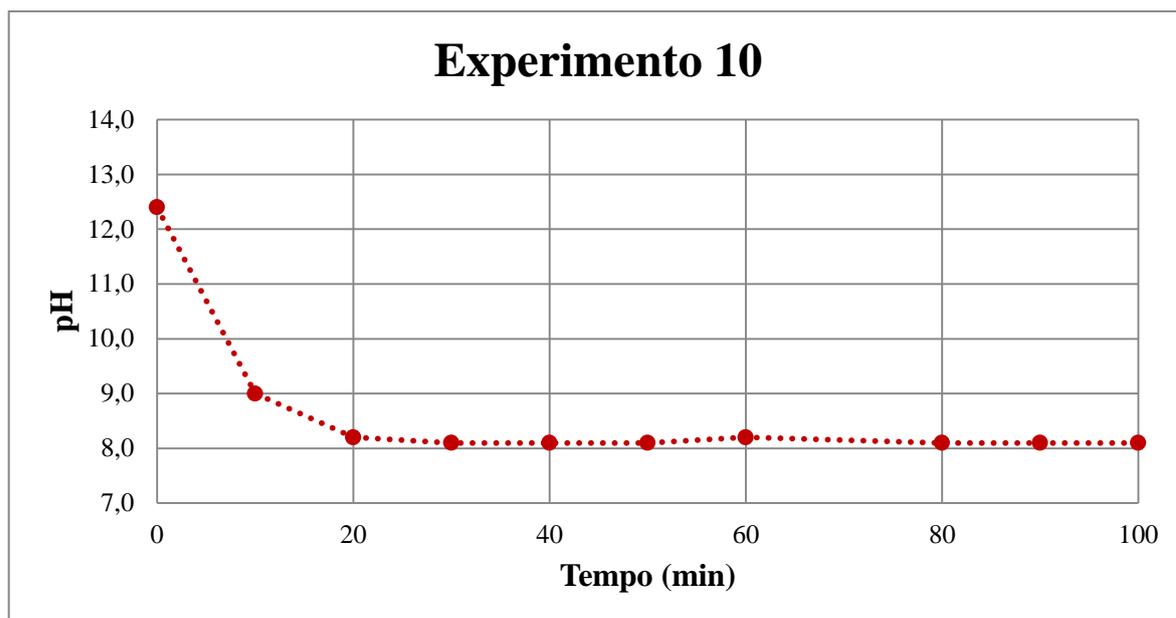


Gráfico 4.10 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 10.

4.1.11 Experimento 11 (Data de realização: 26/03/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 2 níveis
- Vazão de gás = 1,2420 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0480m³/min
- pH inicial = 12,7
- pH final = 8,3
- Temperatura inicial = 27°C
- Duração do experimento = 100 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 5,3069 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 10,76%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 9,344,16kg/ano

Observando a Tabela 4.32 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂, apesar de que a medição feita com o MRU em 40 minutos indica menor teor de O₂ na saída em comparação ao valor de entrada, no entanto, a amostragem realizada com o Tempest 100 não alega a mesma coisa. Encontra-se também SO₂ em concentrações suficientemente altas para avaliar a absorção de SO₂ pela soda cáustica presente na lama vermelha.

Tabela 4.32 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 11.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,9	10,06	11,0	0	137	58	7,0	10,7	11,6	0	12	28
10	7,8	10,06	11,0	0	170	56	6,9	10,86	11,6	0	25	30
20	7,8	10,08	11,0	0	250	67	6,9	10,88	11,7	0	17	32
40	7,6	11,20	11,1	0	253	68	6,8	10,96	11,9	0	15	37
60	7,6	10,17	11,1	0	411	63	6,8	11,01	12,0	0	13	39
80	7,5	10,25	11,2	0	276	67	6,8	11,00	12,1	0	11	40
100	7,5	10,42	11,2	0	222	83	6,8	10,98	12,1	0	11	45

Houve um leve aumento no valor do pH no meio do experimento, mais precisamente no valor encontrado em 30 e 40 minutos, de acordo com a Tab. 4.33, explicado da mesma forma que no experimento 01, o pH tende a estabilizar em torno de 90 minutos.

Tabela 4.33 – Valores de pH obtidos no experimento 11.

Tempo (min)	pH
0	12,7
10	9,9
20	9,1
30	9,4
40	9,2
50	9,0
60	8,8
80	8,6
90	8,4
100	8,3

Na Tab. 4.34 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.32 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.34 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 11.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,15554	1,82873	1,37163	0,17610	0,02055	-	-
10	0,15229	1,81515	1,35151	0,17237	0,02007	1,74231	0,20314
20	0,15128	1,80266	1,38789	0,17122	0,01994	1,71794	0,20007
40	0,14666	1,77367	1,38512	0,16601	0,01935	3,37231	0,39294
60	0,14570	1,76109	1,33799	0,16277	0,01706	3,28775	0,36415
80	0,14523	1,75561	1,34953	0,16009	0,01485	3,22853	0,31916
100	0,14293	1,72814	1,39436	0,15791	0,01498	3,17993	0,29835
$\Sigma(\dot{M}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						16,52878	1,77781

A partir do Gráf. 4.11 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 11.

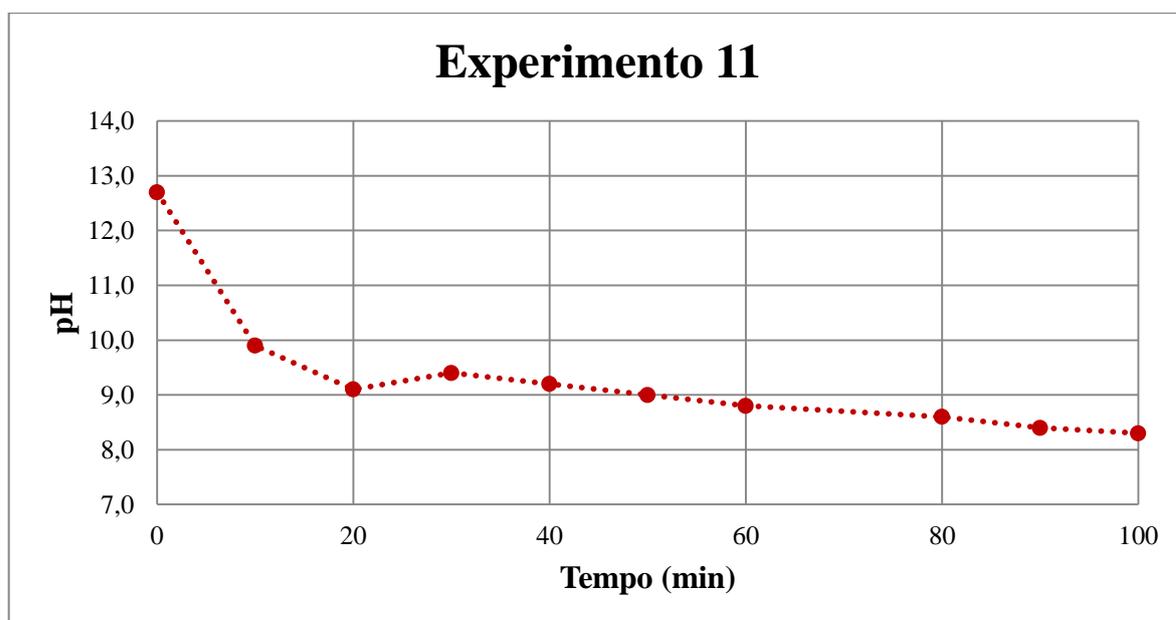


Gráfico 4.11 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 11.

4.1.12 Experimento 12 (Data de realização: 26/04/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre de recheio estruturado
- Vazão de gás = 0,9396 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0480 m³/min
- pH inicial = 11,7
- pH final = 8,4

- Temperatura inicial= 27°C
- Duração do experimento = 250 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 8,03480 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 9,05%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 5658,94kg/ano

Observando a Tabela 4.35 percebe-se em quase todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂, no entanto a medição feita com o MRU em 240 minutos indica menor teor de O₂ na saída em comparação ao valor de entrada, devido a problemas operacionais não foi possível realizar medições com Tempest 100. Encontra-se também NO₂ e SO₂ na forma de traços até 100 minutos, após esse tempo não foi possível mensurar a quantidade desses gases na corrente gasosa.

Tabela 4.35 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 12.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA						
	MRU			TEMPEST			T _E (°C)	MRU			TEMPEST		T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	%CO ₂		%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		
0	8,4	9,42	10,4	1	-	53	10	11	1	11	28	28	
10	8,0	9,68	10,8	4	13	56	10,23	11,4	1	2	34	34	
20	7,9	9,66	10,8	4	24	54	10,10	11,4	4	2	38	38	
40	8,0	9,71	10,7	4	2	53	7,2	10,40	11	4	2	42	
60	7,7	9,77	10,5	5	2	50	7,6	9,90	11,0	4	2	45	
80	7,8	9,72	10,9	5	2	51	7,2	10,27	11,3	4	2	44	
100	7,1	10,52	11,6	4	2	50	6,4	11,47	12,1	4	2	45	
120	7,3	10,43	-	-	-	49	7,0	10,6	-	-	-	44	
140	7,2	10,50	-	-	-	48	6,9	11,62	-	-	-	45	
160	7,3	10,27	-	-	-	47	6,9	11,23	-	-	-	45	
180	7,1	10,40	-	-	-	47	7,0	10,49	-	-	-	45	
200	7,3	10,40	-	-	-	45	7,1	10,5	-	-	-	45	
220	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	-	45	
240	7,0	11,00	-	-	-	45	7,0	10,79	-	-	-	45	
250	7,0	10,69	-	-	-	45	7,0	11,8	-	-	-	45	

Houve um leve aumento no valor do pH no meio do experimento, entre 70 e 100 minutos, de acordo com a Tab. 4.36, explicado da mesma forma que no experimento 01, o pH tende a estabilizar em torno de 30 minutos.

Tabela 4.36 – Valores de pH obtidos no experimento 12.

Tempo (min)	pH
0	11,7
10	9,3
20	8,7
30	8,6
40	8,6
50	8,5
60	8,5
70	8,6
80	8,7
90	8,7
100	8,7
120	8,4
140	8,4
160	8,4
180	8,4
200	8,4
220	8,4
240	8,4
250	8,4

Na Tab. 4.37 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.35 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental.

Tabela 4.37 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 12.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$M_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$M_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,11767	1,39524	1,02877	0,14261	0,02494	-	-
10	0,11699	1,36218	1,01202	0,13238	0,01539	1,37496	0,20167
20	0,11709	1,34493	1,56379	0,20325	0,08615	1,67813	0,50772
40	0,11559	1,32286	0,97410	0,12860	0,01301	3,31851	0,99169
60	0,12085	1,31182	0,95420	0,12239	0,00155	2,50997	0,14561
80	0,11485	1,31649	0,96117	0,12450	0,00965	2,46891	0,11192
100	0,10177	1,30594	0,95165	0,11255	0,01079	2,37052	0,20434
120	0,11166	1,31442	0,95610	0,11663	0,00497	2,29185	0,15758
140	0,10972	1,29561	0,93912	0,11335	0,00363	2,29977	0,08599
160	0,10972	1,30181	0,93915	0,11529	0,00557	2,28634	0,09201
180	0,11131	1,31198	0,94569	0,11291	0,00160	2,28198	0,07176
200	0,11290	1,31023	0,94074	0,11622	0,00332	2,29128	0,04925
220	-	-	-	-	-	-	-
240	0,11131	1,30721	0,94201	0,11159	0,00029	4,55618	0,07213
250	-	-	-	-	-	-	0,20167
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						29,72839	2,69166

A partir do Gráf. 4.12 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 12.

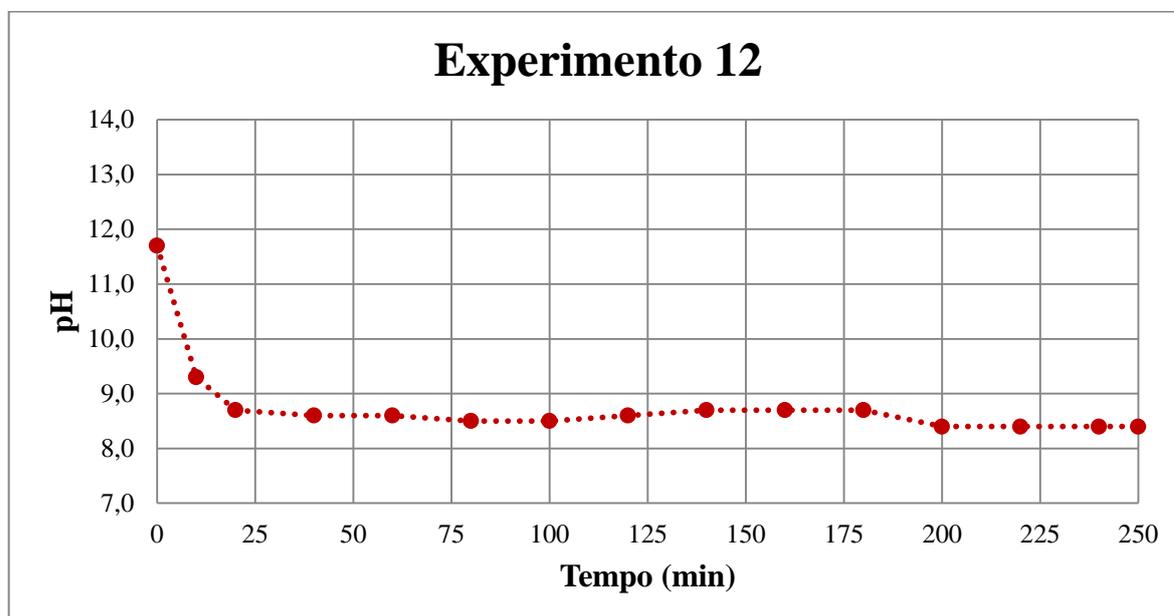


Gráfico 4.12 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 12.

No experimento 12 buscou-se encontrar um tempo aproximado para que não fosse detectada absorção de CO₂ pela suspensão de LV, portanto, foram realizadas amostragens até que o teor de CO₂ na entrada fosse o mesmo na saída da torre.

4.1.13 Experimento 13 (Data de realização: 06/06/2012)

- Suspensão de Lama vermelha a 27%-p em contra corrente com gases de combustão
- Torre tipo spray – 10 bicos – 2 níveis
- Vazão de gás = 1,2210 m³/min
- Vazão de líquido = 0,0480m³/min
- pH inicial = 11,7
- pH final = 8,7
- Temperatura = 27°C
- Duração do experimento = 520 minutos
- Massa de CO₂ por 100g de LV = 11,2417 g
- Porcentagem de CO₂ absorvido durante o experimento = 5,21%
- Valor estipulado de CO₂ absorvido anualmente = 3831,93 kg/ano

Observando a Tabela 4.38 percebe-se em todos os instantes a redução do teor de CO₂, bem como aumento do teor de O₂, indicando que está ocorrendo absorção do CO₂, e em 520 minutos não foi detectada nenhuma diferença no teor de CO₂ na entrada e saída da torre. Devido a problemas operacionais não foi possível realizar medições com Tempest 100, portanto, não houve medições de possíveis traços de NO₂ e SO₂ na corrente gasosa.

Tabela 4.38 – Valores de entrada e saída das temperaturas e dos teores de CO₂, O₂, NO₂ e SO₂ presentes nos gases de combustão do experimento 13.

Tempo (min)	ENTRADA						SAÍDA					
	MRU		TEMPEST			T _E (°C)	MRU		TEMPEST			T _S (°C)
	%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)		%CO ₂	%O ₂	%O ₂	NO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)	
0	7,3	10,80	-	-	-	45	6,5	11,57	-	-	-	29
10	7,7	10,14	-	-	-	49	7,1	10,68	-	-	-	32
20	7,6	10,13	-	-	-	51	7,1	10,62	-	-	-	38
40	7,5	10,31	-	-	-	51	6,8	10,88	-	-	-	39
60	6,5	11,75	-	-	-	48	6,0	12,14	-	-	-	41
80	7,1	10,90	-	-	-	49	6,6	11,27	-	-	-	42
100	7,2	10,52	-	-	-	49	6,9	10,88	-	-	-	43
120	7,3	10,51	-	-	-	49	7,0	10,77	-	-	-	43
140	7,6	10,01	-	-	-	49	6,9	10,79	-	-	-	44
160	7,9	9,74	-	-	-	49	7,4	10,12	-	-	-	44
180	8,0	9,40	-	-	-	49	7,7	9,79	-	-	-	43
200	7,5	10,07	-	-	-	52	7,2	10,22	-	-	-	46
220	7,9	9,76	-	-	-	52	7,6	10,07	-	-	-	46
240	6,9	11,09	-	-	-	51	6,6	11,34	-	-	-	46
260	6,8	11,27	-	-	-	49	6,4	11,51	-	-	-	46
280	6,9	11,08	-	-	-	49	6,7	11,11	-	-	-	46
300	6,8	10,73	-	-	-	49	6,5	11,11	-	-	-	46
320	7,1	10,77	-	-	-	49	6,8	10,84	-	-	-	46
340	7,1	11,07	-	-	-	49	6,8	11,38	-	-	-	47
360	6,4	12,15	-	-	-	49	6,1	12,42	-	-	-	46
380	6,5	12,12	-	-	-	48	6,2	12,44	-	-	-	44
400	6,6	11,95	-	-	-	48	6,3	12,29	-	-	-	44
420	6,3	12,34	-	-	-	48	6,1	12,50	-	-	-	44
440	6,0	12,83	-	-	-	47	5,8	12,97	-	-	-	44
460	6,0	12,89	-	-	-	47	5,7	13,32	-	-	-	43
480	5,7	13,16	-	-	-	45	5,5	13,44	-	-	-	41
500	6,2	12,57	-	-	-	46	6,0	12,90	-	-	-	41
520	5,3	13,86	-	-	-	44	5,3	13,91	-	-	-	40

Houve um leve aumento no valor do pH no meio do experimento, nas amostragens realizadas em 160 e 180 minutos, de acordo com a Tab. 4.39, explicado da mesma forma que no experimento 01, o pH tende a estabilizar em torno de 90 minutos.

Tabela 4.39 – Valores de pH obtidos no experimento 13.

Tempo (min)	pH
0	11,7
10	10,3
20	10,0
30	9,7
40	9,5
50	9,4
60	9,2
70	9,2
80	9,1
90	8,9
100	8,8
110	8,7
120	8,7
140	8,7
160	8,9
180	8,8
200	8,7
220	8,7
240	8,7
260	8,7
280	8,7
300	8,7
320	8,7
340	8,7
360	8,7
380	8,7
400	8,7
420	8,7
440	8,7
460	8,7
480	8,7
500	8,7
520	8,7

Na Tab. 4.40 estão presentes os valores obtidos após o tratamento dos dados apresentados na Tab. 4.38 por meio das equações mássicas mostrando a quantidade em massa de CO₂ que é absorvida durante o procedimento experimental. O valor encontrado para o tempo de 520 minutos para a massa de CO₂ absorvida após tratamento de dados foi negativo, e muito próximo de zero, portanto, não foi considerado.

Tabela 4.40 – Valores obtidos a partir das equações mássicas para o experimento 13.

Tempo (min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{N}_2(\text{sai})}$ (kg/min)	\dot{Q}_{ent} (m ³ /min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{ent})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{CO}_2(\text{abs})}$ (kg/min)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(e)} \times \Delta t$ (kg)	$\dot{m}_{\text{médiaCO}_2(\text{abs})} \times \Delta t$ (kg)
0	0,14151	1,78369	1,28694	0,15899	0,01747	-	-
10	0,15303	1,77218	1,29081	0,16609	0,01305	1,62537	0,15264
20	0,15005	1,73885	1,27278	0,16063	0,01059	1,63361	0,11820
40	0,14324	1,73405	1,27051	0,15824	0,01500	3,18869	0,25581
60	0,12558	1,71328	1,25022	0,13622	0,01065	2,94460	0,25643
80	0,13769	1,71341	1,25043	0,14836	0,01067	2,84580	0,21314
100	0,14349	1,70980	1,24355	0,14962	0,00613	2,97974	0,16795
120	0,14557	1,71000	1,24506	0,15188	0,00631	3,01498	0,12442
140	0,14303	1,70620	1,23928	0,15739	0,01436	3,09267	0,20670
160	0,15339	1,70973	1,24229	0,16400	0,01060	3,21385	0,24960
180	0,16012	1,71583	1,24310	0,16618	0,00606	3,30179	0,16660
200	0,14830	1,70094	1,24650	0,15476	0,00646	3,20944	0,12518
220	0,15654	1,69579	1,24408	0,16270	0,00616	3,17463	0,12620
240	0,13594	1,69023	1,24112	0,14221	0,00627	3,04910	0,12425
260	0,13182	1,69085	1,23502	0,14034	0,00851	2,82546	0,14778
280	0,13800	1,69291	1,23517	0,14242	0,00441	2,82754	0,12927
300	0,13388	1,69703	1,23142	0,13993	0,00604	2,82345	0,10457
320	0,14006	1,69641	1,23607	0,14665	0,00659	2,86579	0,12632
340	0,13962	1,67996	1,22857	0,14576	0,00614	2,92414	0,12731
360	0,12564	1,67829	1,23307	0,13187	0,00623	2,77635	0,12370
380	0,12852	1,68651	1,23628	0,13471	0,00619	2,66578	0,12413
400	0,13059	1,68755	1,23598	0,13674	0,00615	2,71450	0,12337
420	0,12645	1,68734	1,23720	0,13066	0,00421	2,67401	0,10362
440	0,12023	1,68382	1,23360	0,12447	0,00424	2,55123	0,08448
460	0,11853	1,68401	1,23466	0,12457	0,00604	2,49038	0,10276
480	0,11511	1,69654	1,23552	0,11918	0,00407	2,43752	0,10107
500	0,12558	1,69737	1,23869	0,12955	0,00398	2,48735	0,08046
520	-	-	-	-	-	-	-
$\Sigma(\dot{m}_{\text{médiaCO}_2} \times \Delta t)$						72,33776	3,76598

A partir do Gráf. 4.13 é possível observar a variação do pH ao longo do tempo de realização do experimento 13.

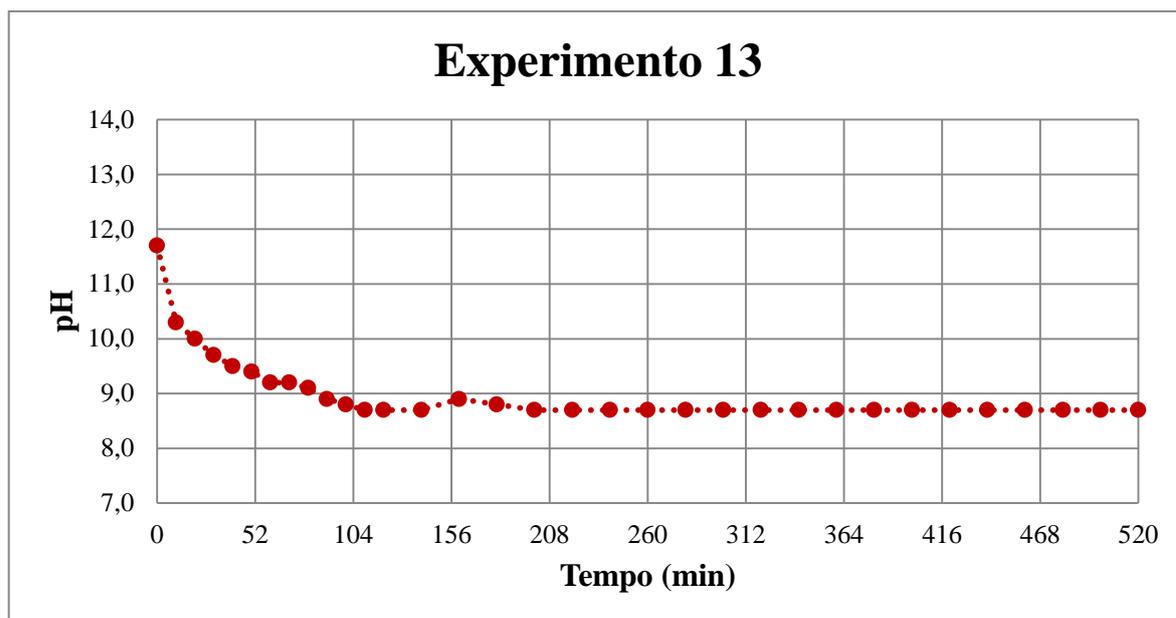


Gráfico 4.13 – Variação do pH em função do tempo para o experimento 13.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 02 QUANTO AO USO DE SUSPENSÃO OU SOBRENADANTE

Objetivando avaliar o uso de suspensão de LV (Experimento 01) ou do sobrenadante da suspensão de LV (Experimento 02) na torre *spray*, a temperatura ambiente, os dois experimentos foram comparados em um tempo comum aos dois igual a 80 minutos, os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

i. REDUÇÃO DO pH:

Exp 01: $12,5 - 9,6 = 2,9$

Exp 02: $12,8 - 8,3 = 4,5$

ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:

Exp 01:

Entrada: 13,23kg

Absorvida: 0,83kg

Porcentagem: 6,25%

Exp 02:

Entrada: 13,81kg

Absorvida: 1,28kg

Porcentagem: 9,26%

iii. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 01: 2,4673 g

Exp 02: 3,8170 g

iv. MASSADE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 01: 5430,45 kg/ano

Exp 02: 8401,04kg/ano

Como observado, o experimento 02, realizado com o sobrenadante da suspensão de LV, mostrou-se mais eficiente na absorção de CO₂. No entanto, deve-se levar em consideração que a concentração de sólidos é muito baixa no sobrenadante, portanto, o processo de absorção de CO₂ durante o procedimento experimental se dá basicamente pela reação do CO₂ com a NaOH existente na LV na fase líquida. Em relação à variação de pH, o experimento 02 apresentou melhores resultados, no entanto foi reduzido o pH apenas do sobrenadante enquanto que no experimento 01 foi reduzido o pH da suspensão, com maior teor de sólidos, dessa forma, uma análise mais detalhada é necessária para avaliar a contribuição da quantidade de sólidos na fase líquida para a redução do pH, isso pode ser avaliado no item 4.11 onde são apresentados os valores de pH a longo prazo, e é constatado que quando o sobrenadante utilizado no experimento 02 é misturado com a parte da suspensão sedimentada o valor do pH aumenta.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 03 QUANTO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Objetivando avaliar a eficiência da redução do pH e do processo de absorção de CO₂ por uma suspensão de LV com a variação da temperatura inicial da suspensão a ser usada no processo em TS, foram comparados os experimentos 01 (temperatura ambiente) e 03 (temperatura alta). Os dois experimentos foram comparados em um tempo comum aos dois igual a 100 minutos, os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

i. REDUÇÃO DO pH:

Exp 01: $12,5 - 9,2 = 3,3$

Exp 03: $12,3 - 8,9 = 3,4$

ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:

Exp 01:

Entrada: 16,31kg

Absorvida: 0,96kg

Porcentagem: 5,87%

Exp 03:

Entrada: 20,04 kg

Absorvida: 2,30kg

Porcentagem: 11,46%

iii. MASSADE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 01: 2,8590 g

Exp 03: 6,8552 g

iv. MASSADE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 01: 5033,96kg/ano

Exp 03: 12070,31kg/ano

O experimento 03, realizado a alta temperatura inicial da suspensão de LV, mostrou-se mais eficiente na absorção de CO₂ em relação ao experimento 01, apresentando resultados aproximadamente duas vezes maiores do que os resultados do experimento 01 acerca do processo de absorção. No entanto, a variação de pH nos dois casos foi praticamente a mesma.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 11 QUANTO À QUANTIDADE DE NÍVEIS DE BICOS DA TORRE *SPRAY*

Objetivando avaliar o desempenho do processo de absorção de CO₂ e redução do pH de uma suspensão de LV a temperatura ambiente, ocorrendo na TS, variando o nível da disposição dos bicos aspersores em seu interior, foram comparados os experimentos 01 (um nível) e 11 (dois níveis). Os dois experimentos foram comparados em um tempo comum aos dois igual a 100 minutos, os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

i. REDUÇÃO DO pH:

Exp 01: 12,5 – 9,2 = 3,3

Exp 11: 12,7 – 8,3 = 4,4

ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:

Exp 01:

Entrada: 16,31kg

Absorvida: 0,96kg

Porcentagem: 5,87%

Exp 11:

Entrada: 16,53kg

Absorvida: 1,78kg

Porcentagem: 10,76%

iii. MASSADE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 01: 2,8590 g

Exp 11: 5,3069 g

iv. MASSADE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 01: 5033,96kg/ano

Exp 11: 9344,16kg/ano

De acordo com os resultados apresentados, o experimento 11, realizado com dois níveis de bicos aspersores na TS, mostrou-se mais eficiente que o experimento 01 em todos os aspectos apresentados, isso se deve ao aumento da área superficial que ocorre com a utilização de dois níveis de bicos aspersores na TS e conseqüentemente aumento na absorção de CO₂ e redução mais acentuada no valor do pH quando comparado a utilização de apenas um nível de bicos aspersores.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 01 E 08 E ENTRE OS EXPERIMENTOS 05 E 08 QUANTO AO TIPO DE TORRE

Objetivando avaliar a eficiência da absorção de CO₂ e redução do pH de uma suspensão de LV a temperatura ambiente ocorrendo em reatores diferentes, foram comparados o experimento 01 (torre *spray* com um nível de bicos aspersores) com o experimento 08 (torre de recheio estruturado) e o experimento 05 (torre *spray* com dois níveis de bicos aspersores) com o experimento 08 (torre de recheio estruturado). Os experimentos foram comparados em um tempo comum aos três igual a 80 minutos, os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

4.5.1 Comparação entre o experimento 01 e experimento 08

- i. REDUÇÃO DO pH:
 - Exp 01:** $12,5 - 9,6 = 2,9$
 - Exp 08:** $12,9 - 8,1 = 4,8$
- ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:
 - Exp 01:**
 - Entrada: 13,23kg
 - Absorvida: 0,83kg
 - Porcentagem: 6,25%
 - Exp 08:**
 - Entrada: 7,01 kg
 - Absorvida: 1,23 kg
 - Porcentagem: 17,52%
- iii. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:
 - Exp 01:** 2,4673 g
 - Exp 08:** 3,6664 g
- iv. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:
 - Exp 01:** 5430,45kg/ano
 - Exp 08:** 8069,62kg/ano

4.5.2 Comparação entre o experimento 05 e experimento 08

- i. REDUÇÃO DO pH:
 - Exp 05:** $12,3 - 9,4 = 2,9$
 - Exp 08:** $12,9 - 8,1 = 4,8$
- ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:
 - Exp 05:**
 - Entrada: 12,95kg
 - Absorvida: 1,36kg
 - Porcentagem: 10,51%
 - Exp 08:**
 - Entrada: 7,01 kg
 - Absorvida: 1,23 kg
 - Porcentagem: 17,52%

iii. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 05: 4,0632 g

Exp 08: 3,6664 g

iv. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 05: 8943,01kg/ano

Exp 08: 8069,62kg/ano

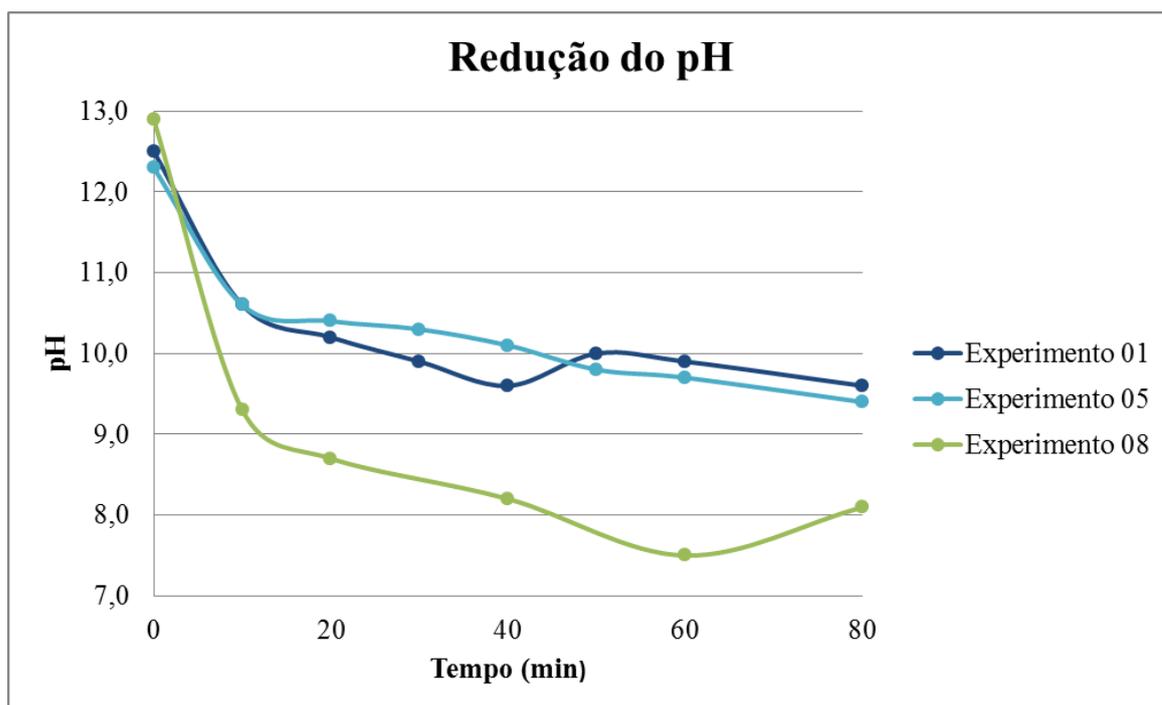


Gráfico 4.14 – Redução do pH ocorrida em experimentos realizados na TRE e na TS.

Os resultados apresentados nos itens 4.5.1 e 4.5.2 mostram que o experimento realizado na TRE obteve uma maior redução de pH e maior eficiência quanto à absorção de CO₂, pois apesar de os valores de massa absorvida por 100 gramas de LV e massa absorvida anualmente serem maiores no experimento 05, deve-se levar em consideração a quantidade de CO₂ que foi absorvida de acordo com a quantidade que entrou no reator, ou seja, a porcentagem de CO₂ absorvida foi sempre maior no experimento 08 do que nos demais.

É comparada, no Gráfico 4.14, a taxa de variação do pH do experimento realizado na TRE (experimento 08) com experimentos realizados na TS em diferentes níveis de bicos aspersores (experimentos 01 e 05), verifica-se uma inclinação inicial mais intensa no experimento 08, ou seja, uma redução mais intensa do pH no início do experimento, devido à maior taxa de absorção de CO₂ na TRE quando comparada aos experimentos realizados na TS ocasionada pela maior área superficial da TRE em comparação a TS.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 02 E 04 QUANTO AO TIPO DE TORRE UTILIZANDO SOBRENADANTE A TEMPERATURA ALTA

Os experimentos utilizando sobrenadante foram realizados com temperaturas diferentes para avaliar a eficiência da absorção e a variação de pH quanto à variação de temperatura, dessa forma foram comparados os experimentos 02 (temperatura ambiente) e 04 (temperatura alta) em um tempo comum aos dois experimentos igual a 80 minutos. Os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

i. REDUÇÃO DO pH:

Exp 02: $12,8 - 8,3 = 4,5$

Exp 04: $12,6 - 8,3 = 4,3$

ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:

Exp 02:

Entrada: 13,81kg

Absorvida: 1,28kg

Porcentagem: 9,26%

Exp 04:

Entrada: 12,24 kg

Absorvida: 0,53kg

Porcentagem: 4,35%

iii. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 02: 3,8170 g

Exp 04: 1,5894 g

iv. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 02: 8401,04kg/ano

Exp 04: 3498,21kg/ano

Como observado nos dados acima, em experimentos realizados com o sobrenadante da suspensão de LV, ou seja, com baixíssima concentração de sólidos, apresentam melhores resultados quando realizados a temperatura ambiente. Em relação à redução do pH do sobrenadante ao longo do procedimento experimental não foi observada grande diferença entre os experimentos comparados.

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS EXPERIMENTOS 07 E 09 QUANTO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Os experimentos 07 e 09 realizados na TRE utilizando suspensão de LV foram realizados em temperaturas diferentes para verificar a influência da redução de temperatura no processo. O experimento 07 foi realizado com baixa temperatura inicial da suspensão, enquanto que o experimento 09 foi realizado a temperatura ambiente. Os experimentos foram comparados em um tempo comum aos dois igual a 90 minutos, os resultados dos fatores levados em consideração para a comparação são mostrados a seguir.

i. REDUÇÃO DO pH:

Exp 07: $12,9 - 8,5 = 4,4$

Exp 09: $12,7 - 8,2 = 4,5$

ii. EQUAÇÕES MÁSSICAS PARA O CO₂:

Exp 07:

Entrada: 13,00 kg

Absorvida: 1,52kg

Porcentagem: 11,69%

Exp 09:

Entrada: 6,14 kg

Absorvida: 1,02kg

Porcentagem: 16,63 %

iii. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA POR 100 GRAMAS DE LAMA VERMELHA:

Exp 07: 4,5368 g

Exp 09: 3,0470 g

iv. MASSA DE CO₂ ABSORVIDA ANUALMENTE:

Exp 07: 8875,70kg/ano

Exp 09: 5961,12kg/ano

Não houve diferença considerável na variação de pH ocorrida nos dois experimentos, no entanto, em relação à absorção de CO₂ os melhores resultados foram obtidos no experimento 09, ou seja, com temperatura baixa da suspensão de LV utilizada no processo.

4.8 COMPARAÇÃO ENTRE EXP 10 E EXP 11 QUANTO À EFICIÊNCIA DA ABSORÇÃO DE SO₂

Os experimentos 10 (TRE) e 11 (TS) foram realizados com adição de SO₂ na corrente gasosa para observar a eficiência da absorção de SO₂ pela suspensão de LV em torres de absorção diferentes, visto que para dessulfurização dos gases de combustão em processos por via úmida são geralmente mais utilizados aqueles que utilizam soluções alcalinas como reagente principal, nesse caso, o NaOH presente na LV. Ambos os experimentos foram realizados a temperatura ambiente e com um tempo experimental de 100 minutos. As tabelas 4.41 e 4.42 apresentam os dados da eficiência da absorção de SO₂ nas duas torres utilizadas.

Tabela 4.41 – Valores da eficiência da absorção de SO₂ para o experimento 10.

Tempo	Concentração de SO ₂ na entrada (ppm)	Concentração de SO ₂ na saída (ppm)	Eficiência da absorção (%)
0	296	76	74,32
10	144	87	39,58
20	447	70	84,34
40	385	90	76,62
60	660	83	87,42
80	610	71	88,36
90	702	84	88,03
100	662	98	85,20
Eficiência média da absorção de SO₂			77,99

Tabela 4.42 – Valores da eficiência da absorção de SO₂ para o experimento 11.

Tempo	Concentração de SO ₂ na entrada (ppm)	Concentração de SO ₂ na saída (ppm)	Eficiência da absorção (%)
0	137	12	91,24
10	170	25	85,29
20	250	17	93,20
40	253	15	94,07
60	411	13	96,84
80	276	11	96,01
100	222	11	95,05
Eficiência média da absorção de SO₂			93,00

Como observado nas tabelas acima, o experimento 11, realizado na torre *spray* apresentou melhores resultados para a absorção de SO₂ pela suspensão de LV em temperatura ambiente, no entanto, comparando com os estudos realizados por LOBATO (1998), que absorveu SO₂ em torre de aspersão utilizando solução alcalina de soda cáustica com 60% de

eficiência, ambos os experimentos realizados nesse trabalho obtiveram valores acima do esperado.

4.9 PORCENTAGEM DE CO₂ ABSORVIDA DURANTE OS EXPERIMENTOS

Na Tabela 4.43 estão os valores da porcentagem de CO₂ absorvida em cada experimento em um tempo comum a todos de 80 minutos. Os melhores resultados obtidos foram em experimentos realizados na TRE com suspensão de LV, experimentos 08, 09 e 12, os valores são mostrados a seguir.

Tabela 4.43 – Absorção de CO₂ durante os experimentos em 80 minutos.

Experimento	Absorção de CO₂ (%)
01	6,25
02	9,26
03	11,55
04	4,35
05	10,51
06	8,88
07	11,20
08	17,52
09	16,98
10	10,23
11	11,08
12	17,26
13	8,14

4.10 VARIAÇÃO DO pH AO LONGO DO EXPERIMENTO

Os experimentos foram comparados em 80 minutos quanto à variação de pH ocorrida durante o experimento. O melhor resultado entre os experimentos realizados com sobrenadante foi uma redução de 4,5 unidades no valor de pH, obtido no experimento 02. Entre os experimentos realizados com a suspensão de LV o melhor resultado foi obtido no experimento 08, uma redução de 4,8 unidades. Mesmo quando comparado a outros experimentos realizados em diferentes condições operacionais e até mesmo com tempos de duração superiores, o experimento 08 apresenta os melhores resultados (redução de pH em 5,1 unidades para 90 minutos). Na Tabela 4.44 é possível observar os valores de redução de pH para todos os experimentos em 80 minutos.

Tabela 4.44 – Variação do pH durante os experimentos em 80 minutos.

Experimento	pH inicial	pH final	ΔpH
01	12,5	9,6	2,9
02	12,8	8,3	4,5
03	12,3	9,0	3,3
04	12,5	8,3	4,2
05	12,3	9,4	2,9
06	12,8	8,7	4,1
07	12,9	8,6	4,3
08	12,9	8,1	4,8
09	12,7	8,4	4,3
10	12,4	8,1	4,3
11	12,7	8,6	4,1
12	11,7	8,7	3,0
13	11,7	9,1	2,6

4.11 VARIAÇÃO DO pH A LONGO PRAZO

Ao final de cada experimento, foram coletadas amostras da suspensão de LV utilizada, nos experimentos realizados com sobrenadante, ao final, o sobrenadante foi misturado com a parte sedimentada e então coletada uma amostra em um recipiente tampado, para medição dos valores do pH de longo prazo, visto que na literatura é mostrado que o pH da LV aumenta seu valor após decorrido algum tempo da realização do experimento até que se atinja o equilíbrio. Foi coletado também uma amostra somente do sobrenadante do experimento 02, para avaliar a variação do pH a longo prazo em comparação com a suspensão já misturada. Para os experimentos 10, 11, 12 e 13 foram coletadas amostras em frascos abertos (FA), para comparar os valores de pH de longo prazo em frascos fechados (FF). Os resultados são mostrados a seguir em gráficos e tabelas.

Tabela 4.45 – Variação do pH a longo prazo para o experimento 01 em FF.

EXPERIMENTO 01	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,9
43	10,2
90	10,1
126	10,2
210	10,2
236	10,4
265	10,5
305	10,7
341	10,6
365	10,7
387	10,5

Tabela 4.46 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 02 em FF.

EXPERIMENTO 02		
Intervalo de tempo (dias)	pH (suspensão)	pH (sobrenadante)
0	8,4	8,4
72	12,6	10,0
108	12,8	10,0
218	12,2	10,4
247	12,2	10,4
287	11,8	10,4
323	11,7	10,5
347	11,7	10,6
369	11,5	10,5

Tabela 4.47 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 03 em FF.

EXPERIMENTO 03	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,9
18	10,1
65	10,1
101	10,2
185	10,4
211	10,6
240	10,6
280	10,6
316	10,7
340	10,6
362	10,6

Tabela 4.48 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 04 em FF.

EXPERIMENTO 04	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,3
11	12,3
58	12,5
94	12,6
204	12,4
233	12,7
273	12,7
309	12,4
333	12,3
355	12,4

Tabela 4.49 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 05 em FF.

EXPERIMENTO 05	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	9,1
1	10,0
48	10,2
84	10,3
168	10,4
194	10,5
223	10,6
263	10,8
299	10,7
323	10,7
345	10,6

Tabela 4.50 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 06 em FF.

EXPERIMENTO 06	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,8
47	12,8
83	13,0
193	13,0
222	13,0
262	12,9
298	12,9
322	12,9
344	12,5

Tabela 4.51 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 07 em FF.

EXPERIMENTO 07	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,5
6	9,5
29	9,8
113	10,2
139	10,3
168	10,4
208	10,5
244	10,5
268	10,6
290	10,6

Tabela 4.52 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 08 em FF.

EXPERIMENTO 08	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	7,9
5	9,8
28	10,1
112	10,2
138	10,4
167	10,7
207	10,6
243	10,6
267	10,6
289	10,8

Tabela 4.53 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 09 em FF.

EXPERIMENTO 09	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,2
3	9,7
26	10,0
110	10,1
136	10,7
205	10,6
241	10,7
265	10,6
287	10,7

Tabela 4.54 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 10 em FF.

EXPERIMENTO 10	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,1
70	9,8
96	10,2
125	10,3
165	10,2
201	10,2
225	10,2
247	10,3

Tabela 4.55 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 10 em FA.

EXPERIMENTO 10	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,1
3	9,7
9	10,2
42	10,7
61	11,1
96	11,1
165	11,3
201	11,2
247	11,2

Tabela 4.56 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 11 em FF.

EXPERIMENTO 11	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,3
64	10,5
90	10,5
119	10,8
159	10,8
195	10,7
219	10,6
241	10,7

Tabela 4.57 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 11 em FA.

EXPERIMENTO 11	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,3
3	9,8
36	10,4
55	10,5
90	10,7
159	10,9
195	11,0
241	11,0

Tabela 4.58 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 12 em FF.

EXPERIMENTO 12	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,4
34	9,7
60	10,1
89	10,3
129	10,4
165	10,5
189	10,5
211	10,6

Tabela 4.59 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 12 em FA.

EXPERIMENTO 12	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,4
6	9,4
25	10,2
60	11,0
129	11,0
165	11,1
211	10,8

Tabela 4.60 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 13 em FF.

EXPERIMENTO 13	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,7
49	9,8
89	9,7
125	9,7
149	9,9
171	10,0

Tabela 4.61 – Variação do pH de longo prazo para o experimento 13 em F.

EXPERIMENTO 13	
Intervalo de tempo (dias)	pH
0	8,7
20	10,2
125	10,7
171	10,8

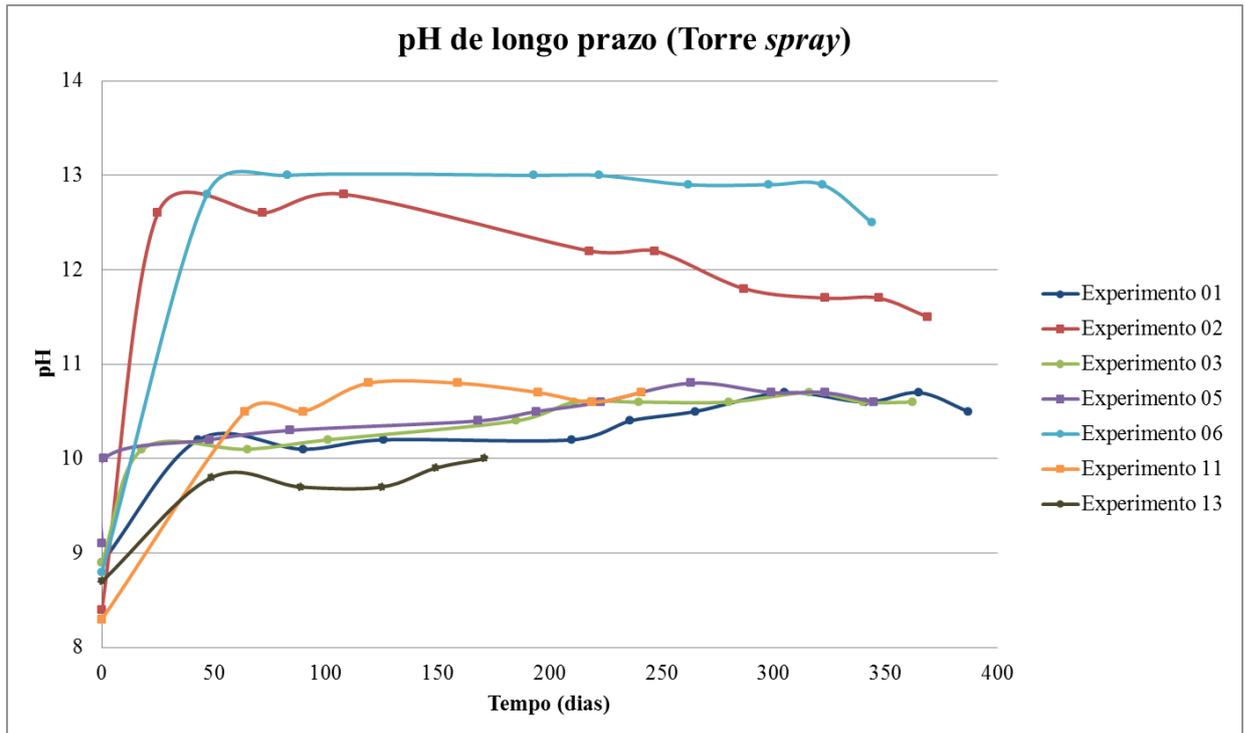


Gráfico 4.15 – Variação do pH a longo prazo para os experimentos realizados na TS.

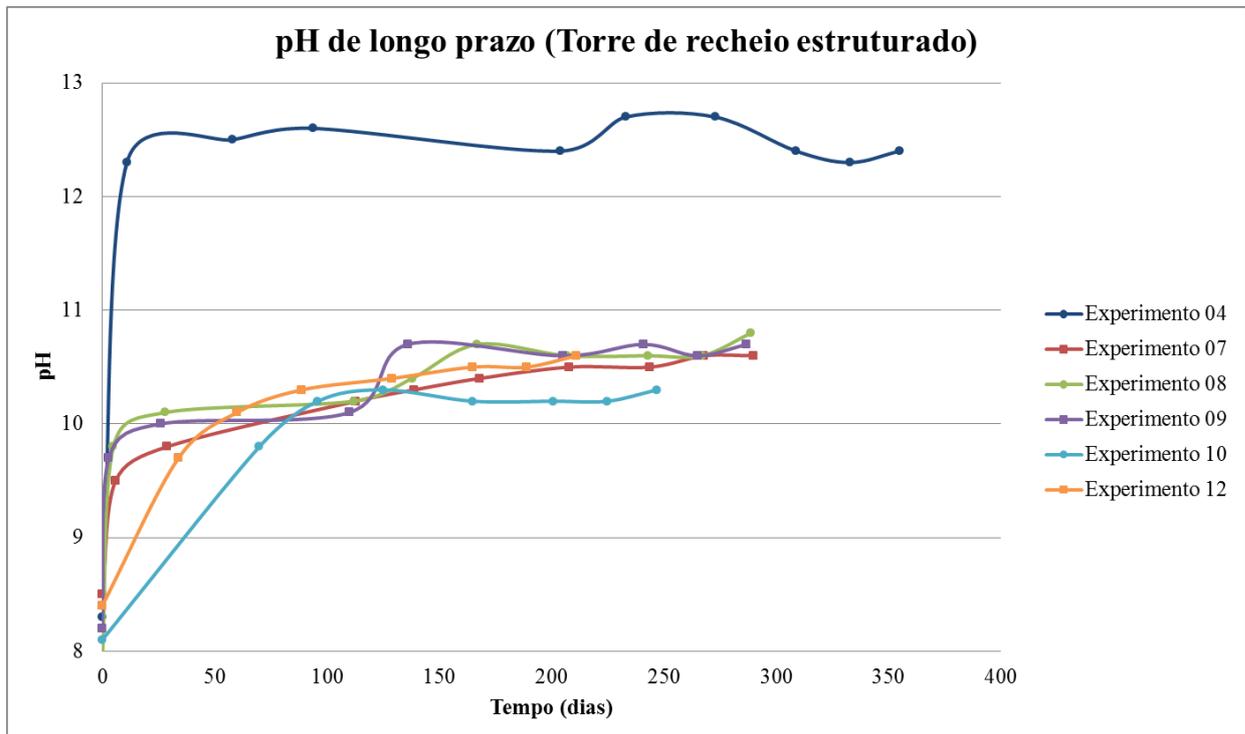


Gráfico 4.16 – Variação do pH a longo prazo para os experimentos realizados na TRE.

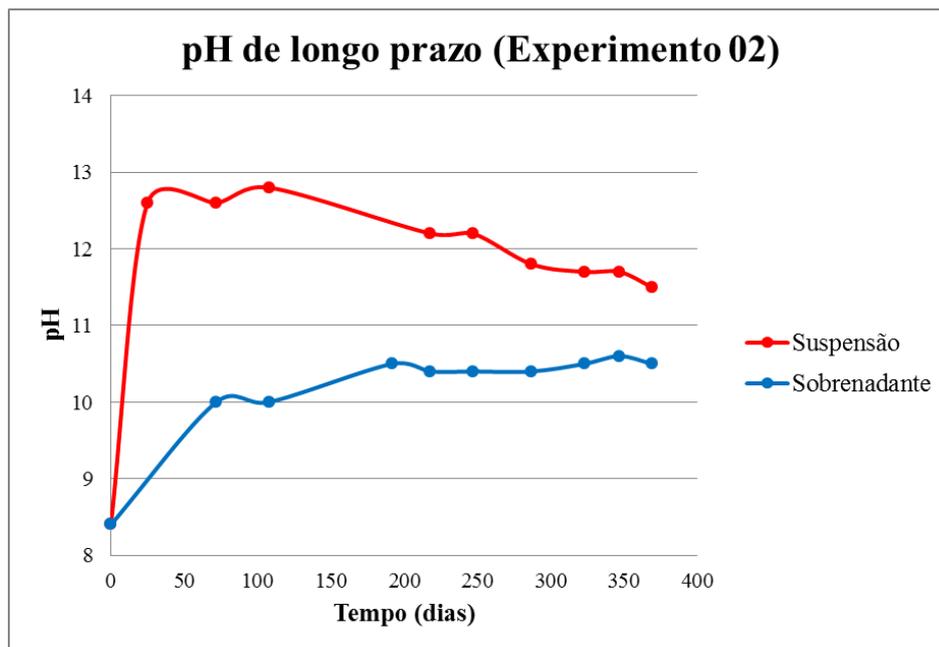


Gráfico 4.17 – Variação do pH a longo prazo no experimento 02.

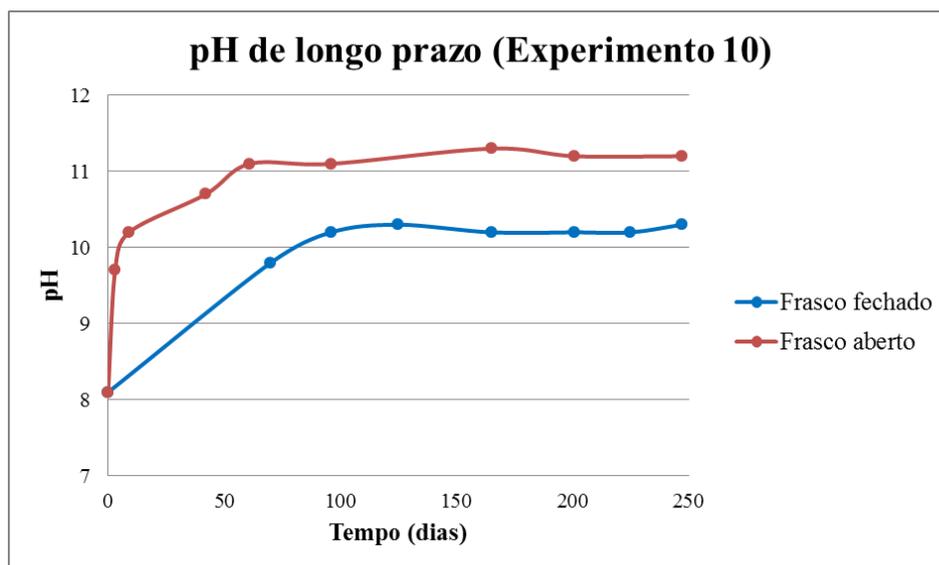


Gráfico 4.18 – Variação do pH a longo prazo para o experimento 10 em FF e FA.

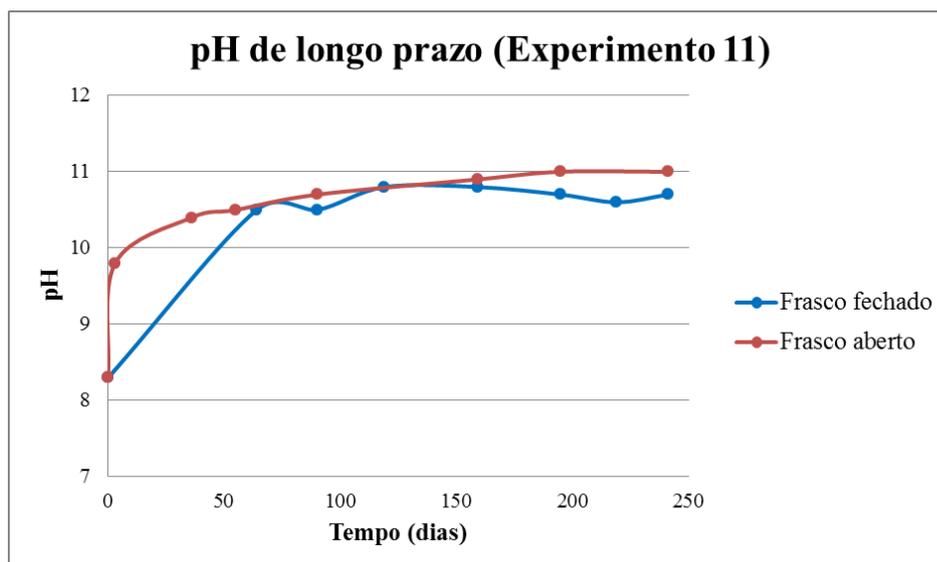


Gráfico 4.19 – Variação do pH a longo prazo para o experimento 11 em FF e FA.

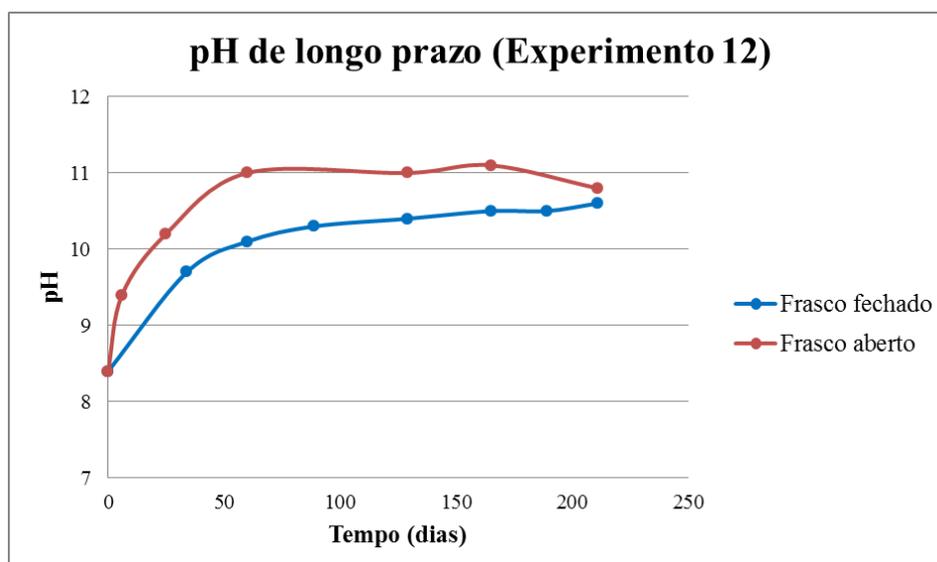


Gráfico 4.20 – Variação do pH a longo prazo para o experimento 12 em FF e FA.

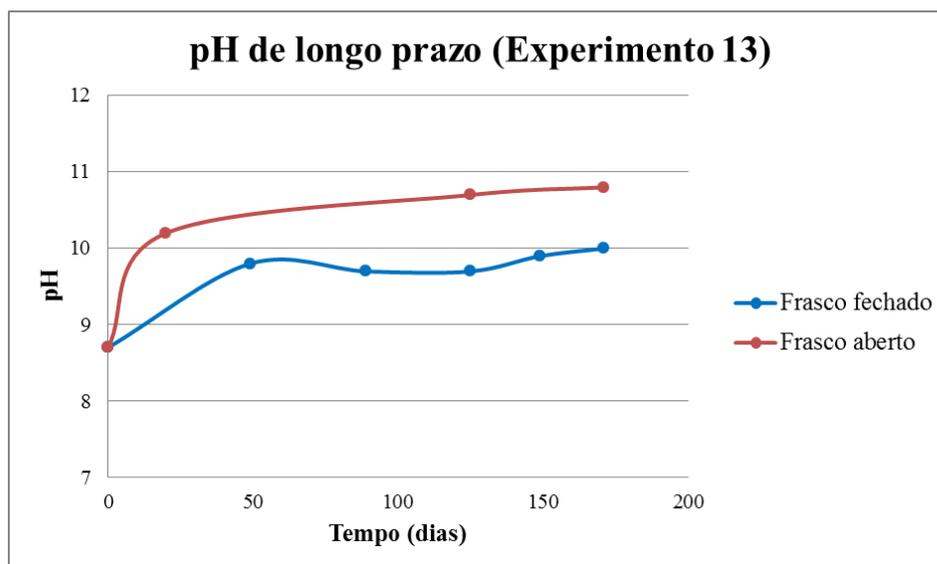


Gráfico 4.21 – Variação do pH a longo prazo para o experimento 13 em FF e FA.

Avaliando os dados de pH de longo prazo para os experimentos realizados na torre *spray* e na torre de recheio estruturado verifica-se que em todos os experimentos o pH da suspensão aumenta com o passar do tempo, no entanto, o aumento do pH das suspensões utilizadas em experimentos com sobrenadante apresentam um aumento mais acentuado em poucos dias e se mantém sempre maior que as corridas que utilizam a suspensão de LV, mostrando dessa forma que os sólidos presentes na suspensão participam do mecanismo de redução do pH, absorvendo OH e Na também na fase sólida. Após certo período de tempo é possível notar que ao invés de somente aumentar os valores do pH eles têm uma queda nos valores, isso se deve às reações de carbonatação, que levam um tempo maior que o tempo experimental para estabilizar, dessa maneira, em frascos fechados, quando ocorre a liberação de CO₂ presente na suspensão ele se acumula no espaço livre dentro dos frascos e com o aumento da pressão parcial de CO₂ na parte livre acontece o deslocamento da reação favorecendo a formação de carbonatos e reduzindo levemente o pH.

Analisando o Gráfico 4.15 nota-se que quando a suspensão sedimentada é misturada com o sobrenadante utilizado no processo ao final do experimento o pH aumenta consideravelmente, no entanto, quando mantido apenas o sobrenadante do processo, o pH não se eleva tanto e mantém-se inferior ao valor da suspensão quando misturada.

Avaliando os gráficos referentes à comparação entre pH de longo prazo em frascos abertos e fechados, percebe-se que o pH em FA após um certo período é sempre superior ao pH em FF, a explicação para esse fenômeno é que o CO₂ liberado pela suspensão após passado algum tempo do término do experimento é imediatamente liberado para a atmosfera e

não se acumula no espaço livre entre a suspensão e a tampa do frasco, como ocorre em FF, é possível que a suspensão reaja com o CO₂ atmosférico e reduza levemente o valor do pH.

4.12 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DA LAMA VERMELHA ANTES E DEPOIS DA CARBONATAÇÃO

A Figura 4.1 apresenta a análise mineralógica realizada por difração de raios-x realizada na LV utilizada para o preparo da suspensão antes e depois do procedimento experimental, dessa forma é possível identificar os minerais que participam do processo de carbonatação à longo prazo e os produtos formados a partir da reação desses minerais com o CO₂.

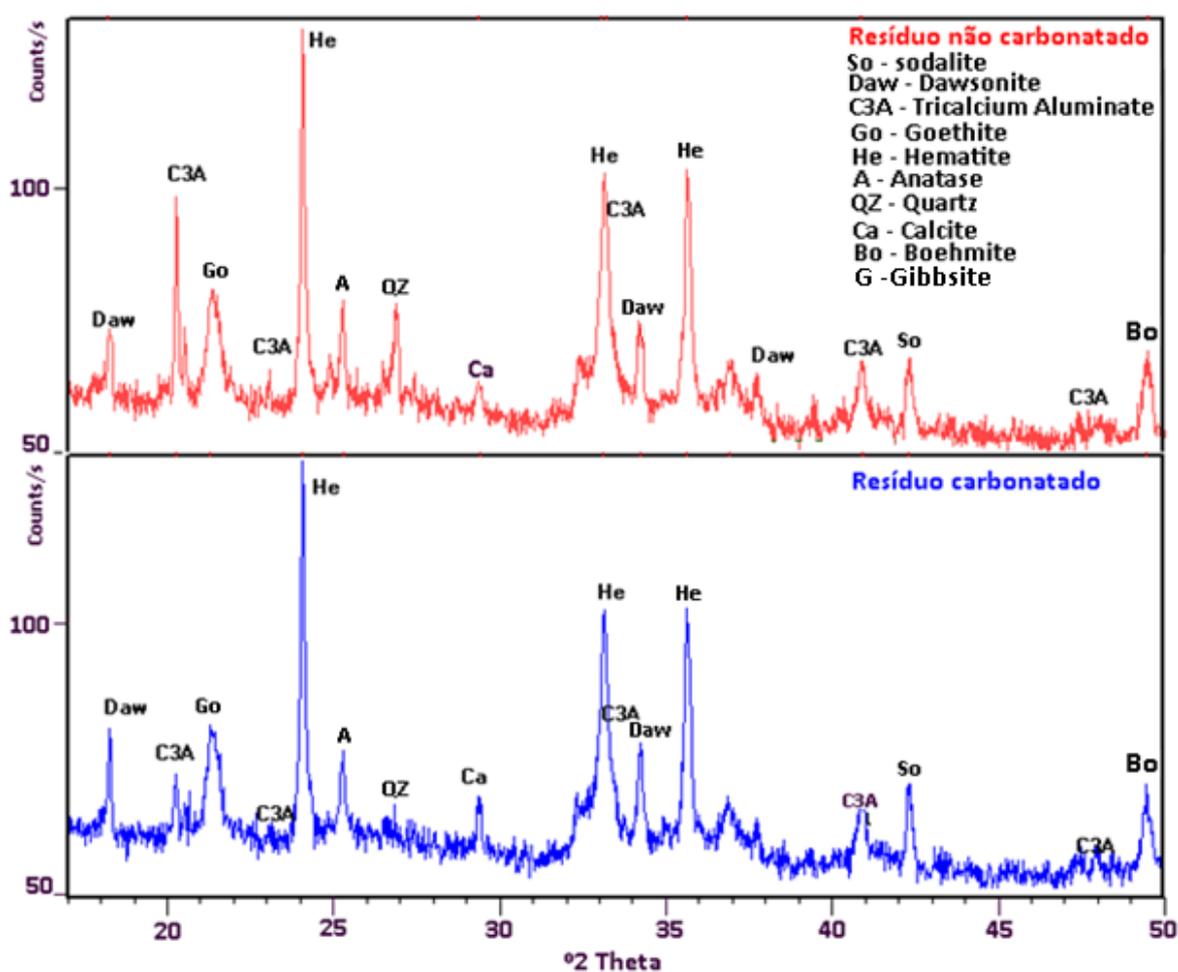


Figura 4.1 – DRX da LV presente na suspensão antes e depois do experimento.

Após analisar o DRX verifica-se que os principais minerais envolvidos no processo de carbonatação da LV utilizada nesse trabalho são o aluminato tricálcico (C3A), calcita (Ca) e dawsonita (Daw).

É observada uma diminuição nos picos de aluminato tricálcico, mostrando que o mesmo é consumido durante a carbonatação, enquanto que os picos de calcita e dawsonita sofrem um aumento na intensidade, comprovando assim a formação desses dois minerais durante as reações de carbonatação entre a suspensão de LV com o CO₂ existente na fase gasosa durante os experimentos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Ao final das análises dos resultados é possível concluir que os melhores resultados obtidos para redução de pH e absorção de CO₂ ocorreram com a utilização da suspensão de lama vermelha, e dependendo das características do processo ambas as torres são bastante eficientes, no entanto, em relação ao custo de construção e operação, a torre *spray* é mais vantajosa.

Em relação ao uso da torre *spray*, os melhores resultados encontrados foram os realizados com dois níveis de bicos aspersores. Experimentos realizados em torre *spray* utilizando suspensão de LV em temperatura ambiente absorveram durante 80 minutos, que foi o tempo comum a todos os experimentos, em média 10,80% do CO₂ proveniente dos gases de combustão, enquanto que em experimentos realizados em torre de recheio estruturado no mesmo intervalo de tempo a absorção média de CO₂ foi de aproximadamente 12,98%, mostrando que nessas condições a torre de recheio estruturado é mais eficiente.

Dentre todos os experimentos, o experimento 08 foi o que obteve os melhores resultados, absorvendo cerca de 17,52% de CO₂ durante o experimento e reduzindo o pH da suspensão em 4,8 unidades, quando comparado aos demais em tempo comum a todos.

As comparações realizadas entre experimentos mostram que a variação de pH não é muito sensível à variação de temperatura, visto que a diferença entre as variações de pH dos experimentos comparados não era muito acentuada, no entanto, a absorção de CO₂ se mostra bastante sensível.

Apesar de o valor do pH aumentar com o passar do tempo, significando que parte do CO₂ absorvido é liberado posteriormente, o processo apresentado nesse trabalho é eficiente, pois o pH não volta ao valor inicial e fica claro com isso que parte do CO₂ continua retido na suspensão. Dessa maneira, em todos os casos foram obtidos resultados positivos.

Os experimentos realizados com sobrenadante deixam evidente que a alcalinidade da lama vermelha se deve em sua maioria à parte sólida, pois quando o sobrenadante era misturado novamente com a parte sólida o pH aumentava significativamente, dessa forma é mais vantajoso realizar o procedimento experimental com a suspensão sem floculante.

O experimento 13 apresentou valor bem baixo de absorção de CO_2 ao final do experimento, devido esse experimento ter sido realizado por um longo período de tempo, quando comparado aos tempos de experimento dos demais, pois buscou-se avaliar um tempo aproximado de saturação da torre de absorção, com isso verifica-se que para obter resultados de absorção significativa seria necessário operar entre 80 e 120 minutos, dependendo do equipamento utilizado e das demais condições do processo seria necessário substituir a suspensão utilizada.

Em uma escala maior de projeto de engenharia serão necessários novos experimentos para definir o tempo de residência do ciclo de contato lama vermelha/gás, pois após certo tempo de operação, a eficiência de absorção de CO_2 é reduzida.

O principal objetivo desse trabalho é provar que ao reagir uma suspensão de lama vermelha com os gases provenientes da combustão de combustíveis fósseis sem tratamento prévio é possível reduzir a alcalinidade do resíduo, facilitando assim o seu armazenamento e até mesmo a utilização em outras áreas, bem como o sequestro de carbono, e de acordo com os dados coletados foi comprovado que esse processo é vantajoso e eficiente, além de apresentar um ganho duplo para o meio ambiente, pois é uma forma de reduzir o impacto ambiental causado por dois resíduos das refinarias de alumina.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. De acordo com as características da lama vermelha, sugere-se que se faça um estudo para avaliar se existe e como ocorre o processo de adsorção que ocorre paralelamente à absorção nesse processo.
- ii. Efetuar um estudo para avaliar a quantidade de CO_2 liberada após o experimento, para que seja possível precisar a quantidade realmente sequestrada de carbono.
- iii. Analisar qual o comportamento da lama vermelha se estocada após o processo de carbonatação.
- iv. Trabalhar em escala maior.
- v. Desenvolver métodos que possam aumentar a eficiência do sequestro de carbono nesse processo, como por exemplo, adicionando à lama vermelha materiais que possam auxiliar na captura efetiva de CO_2 e consequente redução do pH a longo prazo.
- vi. Adição de outros reagentes ao processo como o CaCO_3 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BADGER, Walter L.; BANCHERO, Julius T. **Introduction to chemical engineering**. 1 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1955. cap. 11, p. 418-465.

BÁNVÖLGYI, G. ; HUAN, T. M. **De-watering, disposal and utilization of red mud: state of the art and emerging technologies**. p. 1-15, 2010.

BOBICKE, E. R. et al. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 38, p. 302-320, 2012.

BONEFANT, D. et al. CO₂ sequestration by aqueous red mud carbonation at ambient pressure and temperature. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 47, p. 7617-7622, 2008.

BORGES, A. J. P. ; HAUSER-DAVIS, R. A. ; OLIVEIRA, T. F. Cleaner red mud residue production at an alumina plant by applying experimental design techniques in the filtration stage. **Journal of Cleaner Production**. v. 19, p. 1763-1769, 2011.

BRILHANTE, Adnaldo. **Apostila de Operações Unitárias** (Curso de Técnico Integrado em Química). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso. Pontes e Lacerda, 2012.

CARVALHO, L. S. et al. Estudo da tecnologia de separação do CO₂ de gases industriais por absorção com monoetanolamina-MEA. In: 4º PDPETRO, 2007, Campinas.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Fundamentos de transferência de massa**. 2 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. cap. 11, p. 625-690.

DILMORE, R. et al. Sequestration of CO₂ in mixtures of bauxite residue and saline wastewater. **Energy & Fuels**. v. 22, p. 343-353, 2008.

DOE. **Carbon sequestration research and development**. Washington, 1999. cap 1, p. 1-14.

ENICK, R. M. et al. Remediation of metal-bearing aqueous waste streams via direct carbonation. **Energy & Fuels**. v. 15, p. 256-262, 2001.

FEIGL et al. Red mud as a chemical stabilizer for soil contaminated with toxic metals. **Water Air Soil Pollut.** v. 223. p. 1237-1247, 2012.

FLORES, Henry Alexander Rodriguez. **Absorção de dióxido de carbono em soluções aquosas de aminas em uma coluna de parede molhada com promotor de película**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FOIS, E. ; LALLAI, A. ; MURA, G. Sulfur dioxide absorption in a bubbling reactor with suspensions of Bayer red mud. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 46, p. 6770-6776, 2007.

GRÄFE, M. ; POWER, G. ; KLAUBER, C. Review of bauxite residue alkalinity and associates chemistry. **Light Metals**. p. 1-60, 2009.

GOOGLE MAPS. Cidade de Barcarena. Disponível em <<https://maps.google.com.br/>> Acesso em: 06 dez. 2012.

HUNTZINGER, D. N. et al. Mineral carbonation for carbon sequestration in cement kiln dust from waste piles. **Journal of Hazardous Materials**. v. 168, p. 31-37, 2009.

ICSOBA. Summary and conclusions. In: Bauxite Residue Seminar, 2011.

IPT. Curso de balanço de massa e energia. São Paulo, 2005.

JONES, G. et al. Carbon capture and the aluminium industry-preliminary studies. **Environ. Chem.** v. 3, p. 297-303, 2006.

KHAITAN, S. ; DZOMBAK, D. A. ; LOWRY, G. V. Mechanisms of neutralization of bauxite residue by carbon dioxide. **Journal of Environmental Engineering**.v. 135, p. 433-438, 2009.

KLAUBER, C. ; GRÄFE, M. ; POWER, G. Review of bauxite residue “re-use” options. **Light Metals**. p. 1-77, 2009.

LI, L. Y. ; RUTHERFORD, G. K. Effect of bauxite properties and the settling of red mud. **Int. J. Miner. Process.** v. 48, p. 169-182, 1996.

LI, L. Y. Properties of red mud tailings produced under varying process conditions. **Journal of Environmental Engineering**. v. 124, p. 254-264, 1998.

LOBATO, Ivan da Costa. **Estudo do lavador de gases centrifugo no controle das emissões de SO₂**. 1998. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará. Belém, 1998.

LÓPEZ, E. et al. Adsorbent properties of red mud and its use for wastewater treatment. **Wat. Res.** v. 32, p. 1314-1322, 1998.

MACHADO, Nélio Teixeira. **Química industrial inorgânica: processo Bayer**, 26 de mai. A 14 de jun. de 2010. 6 f. Notas de aula.

MAGALHÃES, Edílson Marques. **Estudo da secagem utilizando resíduos do processo Bayer(lama vermelha) no processo de produção de agregados leves**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará.. Belém, 2008.

MAGALHÃES, Edílson Marques. **Estudo da extração dos compostos de ferro da lama vermelha visando a concentração e/ou extração dos compostos de titânio**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2012.

McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit operations of chemical engineering**. 5 ed. Singapore: McGraw-Hill chemical engineering series, 1993. cap. 25, p. 810-837.

PARAMGURU, R. K. ; RATH, P. C. ; MISRA, V. N. Trends in red mud utilization - a review. **Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.** v. 26, p. 1-29, 2005.

PÉREZ-VILLAREJO, L. et al. Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry. **Construction and Building Materials**. v. 35, p. 656-665, 2012.

PULFORD, I. D. et al. Carbonised red mud - a new treatment product made from a waste material. **Jornal of Environmental Management**. v. 100, p. 59-64, 2012.

REAL GAS MODEL. Disponível em <<http://www.thermofluids.net/>>. Acesso em 2012.

RIBEIRO, D. V. ; LANBRICHA, J. A. ; MORELLI, M. R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforces concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 42, p. 124-133, 2012.

SAHU, R. C. ; PATEL, R. K. ; RAY, B. C. Neutralization of red mud using CO₂ sequestration cycle. **Journal of Hazardous Materials**. v. 179, p. 28-34, 2010a.

SAHU, R. C. ; PATEL, R. K. ; RAY, B. C. Utilization of activated CO₂-neutralized red mud for removal of arsenate from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**. v. 179, p. 1007-1013, 2010b.

SAHU, R. C. ; PATEL, R. ; RAY, B. C. Adsorption of Zn(II) on activated red mud: Neutralized by CO₂. **Desalination**. v. 266, p. 93-97, 2011.

SANTOS, I. F. Estudo da cinética de secagem de agregados leves de uma mistura argila-lama vermelha para construção civil. In: XIX Seminário de Iniciação Científica, 2008, Belém. **Livro de resumos**. Belém: UFPA, 2008.

SANTOS, Diego Hildebrando. **Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados leves**. 2011. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

SCHÜTZ, M. K. et al. Estudo da carbonatação de soluções Salinas e o seu efeito sobre o armazenamento de CO₂. In: III Mostra de Pesquisa da Pós-Graduação. PUCRS, 2008.

SEADER, J. D.; HENLEY, Ernest J. **Separation process principles**. 1 ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 1998. cap. 6, p. 270-354.

SERMAT caldeiraria e montagens. Recheios. São Paulo, p. 1-2.

SILVA FILHO, E. B. et al. Tratamento de efluentes têxteis por adsorção em lama vermelha. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

SILVA FILHO, E. B. ; ALVES, M. C. ; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. v. 12, p. 322-338, 2007.

SNARS, K. E. ; GILKES, R. J. ; WONG, M. T. F. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils. **Australian Journal of Soil Research**. v. 42, p. 321-328, 2004.

SOFRÁ, F. ; BOGER, D. V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**. v. 86, p. 319-330, 2002.

SOUZA, Anderson Gomes. **Modelagem e simulação do processo de absorção reativa de CO₂ em módulos de membrana**. 125 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

SOUZA, José Antonio da Silva. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 154 f. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.

STOLAROFF, J. K. ; LOWRY, G. V. ; KEITH, D. W. Using CaO- and MgO- rich industrial waste streams for carbon sequestration. **Energy Conversion and Management**. v. 46, p. 687-699, 2005.

SUSHIL, S. ; BATRA, V. S. Modification of red mud by acid treatment and its application for CO removal. **Journal of Hazardous Materials**. v. 203-204, p. 264-273, 2012.

TSAKIRIDIS, P. E. ; AGATZINI-LEONARDOU, S. ; OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**. v. 116, p. 103-110, 2004.

VALENTIN, F. H. H. **Absorption in gas-liquid dispersions: some aspects of bubble technology**. 1 ed. London: E. & F. N. Spon Ltd., 1967. cap. 1, p. 1-4.

VENANCIO, Luis Carlos Alves. **Processo de neutralização de resíduo de bauxita com sequestro de carbono**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão. São Luis, 2010.

WAGH, A. S. ; JEONG, S. Y. ; SINGH, D. Development of value-added products from alumina industry mineral wastes using low temperature-setting phosphate ceramics. In: 4^o International Alumina Quality Workshop. Sarwin, Australia, 1996.

WHITTINGTON, B. I. The chemistry of CaO and Ca(OH)₂ relating to the Bayer process. **Hydrometallurgy**. v. 43, p. 13-35, 1996.

YADAV, V. S. et al. Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud. **Journal of Hazardous Materials**. v. 176, p. 1044-1050, 2010.

ANEXO A

Tabela A.1 – Valores de densidades dos gases CO₂, O₂ e N₂ em temperaturas diferentes.

T (°C)	Kg/m ³		
	CO ₂	O ₂	N ₂
23	1,81977	1,31784	1,15270
24	1,81353	1,31339	1,14880
25	1,80737	1,30897	1,14494
26	1,80122	1,30458	1,14110
27	1,79514	1,30020	1,13729
28	1,78907	1,29587	1,13350
29	1,78304	1,29157	1,12974
30	1,77708	1,28730	1,12600
31	1,77113	1,28305	1,12230
32	1,76529	1,27884	1,11861
33	1,75945	1,27465	1,11494
34	1,75365	1,27047	1,11130
35	1,74789	1,26634	1,10769
36	1,74216	1,26223	1,10409
37	1,73647	1,25815	1,10052
38	1,73082	1,25411	1,09697
39	1,72521	1,25008	1,09346
40	1,71963	1,24607	1,08995
41	1,71412	1,24210	1,08647
42	1,70861	1,23814	1,08301
43	1,70314	1,23422	1,07959
44	1,69771	1,23033	1,07617
45	1,69231	1,22645	1,07279
46	1,68694	1,22260	1,06943
47	1,68160	1,21877	1,06608
48	1,67631	1,21496	1,06276
49	1,67104	1,21120	1,05946
50	1,66581	1,20744	1,05617
51	1,66061	1,20370	1,05291
52	1,65544	1,19999	1,04967
53	1,65030	1,19630	1,04644
54	1,64520	1,19263	1,04324
55	1,64012	1,18900	1,04006
56	1,63508	1,18538	1,03689
57	1,63010	1,18178	1,03375
58	1,62512	1,17820	1,03063
59	1,62017	1,17465	1,02752
60	1,61525	1,17112	1,02443

61	1,61036	1,16761	1,02137
62	1,60550	1,16412	1,01831
63	1,60067	1,16064	1,01528
64	1,59589	1,15719	1,01227
65	1,59112	1,15378	1,00927
66	1,58637	1,15036	1,00629
67	1,58165	1,14697	1,00333
68	1,57699	1,14360	1,00038
69	1,57233	1,14025	0,99746
70	1,56769	1,13692	0,99455
71	1,56311	1,13362	0,99165
72	1,55853	1,13033	0,98878
73	1,55398	1,12705	0,98592
74	1,54947	1,12380	0,98307
75	1,54497	1,12056	0,98025
76	1,54050	1,11736	0,97744
77	1,53607	1,11416	0,97464
78	1,53165	1,11098	0,97186
79	1,52725	1,10781	0,96910
80	1,52290	1,10467	0,96635
81	1,51856	1,10154	0,96362
82	1,51423	1,09844	0,96091
83	1,50996	1,09535	0,95820
84	1,50568	1,09228	0,95552
85	1,50143	1,08922	0,95285

Fonte: REAL GAS MODEL, 2012 (Adaptado).

ANEXO B

Tabela B.1 – Análise elementar do óleo diesel.

ANÁLISE ELEMENTAR				
(% MASSA, BASE SECA)				
C	H	O	S	N
86,0	13,1	-	0,9	-

Fonte: IPT, 2005 (Adaptado).

Tabela B.2 – Poder calorífico do óleo diesel.

PODER CALORÍFICO	
(MJ/kg)¹⁷	
Superior	Inferior
45,5	42,6

Fonte: IPT, 2005 (Adaptado).