UNIVERSIDADE DE SOROCABA

PRÓ REITORIA DE GRADUAÇÃO E ASSUNTOS ESTUDANTIS

CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

Andressa Gasparini Brito

CAPTURA DE POLUENTES EM LAMA VERMELHA DECORRENTE DO PROCESSO BAYER

Sorocaba/SP

2024

Andressa Gasparini Brito

CAPTURA DE POLUENTES EM LAMA VERMELHA DECORRENTE DO PROCESSO BAYER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Química Industrial, da Universidade de Sorocaba.

Orientador: Profª Dra. Ana Carolina de Oliveira Plens.

Sorocaba/SP

2024

Andressa Gasparini Brito

CAPTURA DE POLUENTES EM LAMA VERMELHA DECORRENTE DO PROCESSO BAYER

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Química Industrial, da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA:

Profª Dra. Ana Carolina de Oliveira Plens.
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Edgard Robles Tardelli
Universidade de Sorocaba

Profª. Dra. Maria Eduarda Gonçalves Lousada
Universidade de Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram, de maneira direta ou indireta, para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder saúde e força para enfrentar cada etapa dessa jornada.

À minha família, meu alicerce, por seu amor, paciência e apoio incondicional, especialmente nos momentos mais difíceis. Obrigada por nunca desistirem de mim, me oferecerem as oportunidades e por acreditarem no meu potencial. “Meus pais caminharam no sol para que eu pudesse caminhar na sombra.”

Aos meus orientadores e professores, pela dedicação e orientação valiosa que foram essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal. Aos amigos, pelo suporte e pelas alegrias que trouxeram leveza à jornada. Por fim, a todos que participaram dessa conquista, minha eterna gratidão.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Este estudo investiga a viabilidade do uso da lama vermelha, um resíduo industrial altamente alcalino do processo Bayer de produção de alumina, como adsorvente e absorvente de CO_2. A pesquisa busca realizar uma revisão bibliográfica acerca do objetivo de mitigar emissões poluentes quanto valorizar a lama vermelha, transformando-a em uma solução para a redução de gases de efeito estufa. Os experimentos estudados avaliaram a capacidade de captura de CO_2 em ambiente controlado e testaram modificações na lama vermelha para melhorar sua adsorção/absorção. Os resultados indicaram uma capacidade significativa de captura inicial, com saturação em tempos curtos. Também se compreendeu que aumentar a área superficial do material por tratamentos químicos ou térmicos pode melhorar a eficiência de captura, sugerindo que a lama vermelha, após modificações, pode ser uma alternativa viável para reduzir poluentes industriais.

Palavras-chave: lama vermelha; alumínio; processo Bayer; resíduos.

ABSTRACT

This study investigates the feasibility of using red mud, a highly alkaline industrial residue from the Bayer process for alumina production, as an adsorbent and absorbent for CO_2. The research conducts a literature review aiming to mitigate pollutant emissions while adding value to red mud by transforming it into a solution for reducing greenhouse gases. The analyzed experiments evaluated CO_2 capture capacity in controlled environments and tested modifications to red mud to enhance its adsorption/absorption performance. The results indicated a significant initial capture capacity, with saturation occurring in short timeframes. It was also observed that increasing the material's surface area through chemical or thermal treatments can improve capture efficiency, suggesting that modified red mud could be a viable alternative for industrial pollutant reduction.

Keywords: red mud; aluminum; Bayer process; residues.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Barragem da Hydro Alunorte em Barcarena AM 15
Figura 2: Quimissorção e Fisissorção.....17
Figura 3- Diagrama da planta piloto de absorção de gases.....24
Figura 4: Fluxograma do ensaio de absorção.....26

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Taxa de diminuição do pH.....27
Gráfico 2: Massa de CO_2 acumulada em função do tempo 27
Gráfico 3: Diminuição do pH do sobrenadante 28
Gráfico 4: Estabilização da concentração de CO_2 em função do tempo.....28
Gráfico 5: Variação do percentual de CO_2 adsorvido com o tempo de contato30
Gráfico 6:Superfície de contorno para capacidade de adsorção 30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições operacionais do sistema de adsorção.....25
Tabela 2: Condições operacionais das colunas de borbulhamento.....26
Tabela 3: Percentual de Absorção e Concentração de CO_2.....29

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO 10

2- OBJETIVO 12

Objetivo geral 12

Objetivos específicos 12

3- **REFERENCIAL TEÓRICO** 13

4.1- Processo Bayer 13

4.2- Lama vermelha 14

4.3 Processo de absorção/adsorção na lama vermelha 15

4.4- Desafios e impactos da aplicação 18

4- MATERIAIS E MÉTODOS 21

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES 23

6- CONCLUSÃO 33

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 34

1- INTRODUÇÃO

A produção de alumina (Al_2O_3), matéria-prima do alumínio metálico, se baseia na dissolução/digestão da bauxita, minério que contém quantidades de alumínio a serem extraídas, em solução de soda cáustica (NaOH) altamente concentrada sob pressão e temperaturas elevadas. Esse processo pode ser realizado através do Processo Bayer.

Este processo químico é conhecido como refino e a técnica praticada atualmente é a tecnologia Bayer, patenteada em 1887 pelo austríaco Karl Joseph Bayer.

O Processo Bayer pode ser classificado em etapas de digestão, clarificação, precipitação e calcinação. A bauxita, contém grãos irregulares, os quais são moídos até se transformarem em um pó fino, pronto para ser digerido em uma solução quente e alcalina de hidróxido de sódio. Essa mistura, cozida sob alta pressão, dissolve a alumina presente na bauxita, liberando-a de impurezas como ferro e sílica. Após a digestão, a solução é decantada, separando a solução rica em alumina (licor de aluminato de sódio) dos resíduos de bauxita, a lama vermelha. A alumina é então precipitada da solução através da adição de gás carbônico ou hidróxido de alumínio, formando um gel branco gelatinoso. O gel de alumina é cuidadosamente filtrado, lavado e seco, transformando-se em um pó branco e fino. Em seguida, em fornos a altas temperaturas, a alumina hidratada perde suas moléculas de água, transformando-se na alumina anidra, a matéria-prima pura para a produção de alumínio metálico (ANDRADE, 2006).

O Processo Bayer, apesar de sua extrema importância para a produção de alumínio, apresenta grandes desafios. A geração de grandes volumes de lama vermelha, um material com potencial tóxico, exige alternativas para evitar impactos ao meio ambiente. O alto consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa são pontos de atenção que demandam soluções inovadoras. A indústria do alumínio investe em pesquisa e desenvolvimento para aperfeiçoar o Processo Bayer, buscando reduzir o consumo de energia e água, minimizar a geração de resíduos e desenvolver métodos mais eficientes para a recuperação de soda da lama vermelha.

A lama vermelha, é um resíduo industrial gerado na produção de alumina pelo Processo Bayer, é um material complexo que apresenta desafios. Sua cor avermelhada característica é resultado da presença de óxidos de ferro, e sua composição varia de acordo com a qualidade da bauxita utilizada e as condições do processo. Em todo mundo, cerca de 70 milhões de toneladas de lama vermelha são geradas anualmente na produção de alumina a partir de bauxita (PEIXIN DU et al, 2024).

O dióxido de carbono (CO_2) é um dos principais gases do agravamento do efeito estufa (GEE). “A produção de alumínio primário gera quantidades significativas de CO_2, a média mundial de emissões do processo de produção de alumínio primário é de 7,1 toneladas de CO_2 equivalente por tonelada (eq/t) de alumínio. No Brasil esta média é de apenas 2,7 toneladas de CO_2 eq/t de alumínio, principalmente pelo fato da matriz principal de energia ser de origem hídrica” (CETEM/MCTIC, 2017).

Um emprego promissor para grandes quantidades de lama vermelha é o abatimento de CO_2 com a alcalinidade contida nesse resíduo. A utilização da lama vermelha, como meio absorvedor de gases ácidos (ou que geram produtos ácidos), pode ser uma alternativa na mitigação dos efeitos dos gases gerados, com benefícios ao meio ambiente.

Segundo Licks (2008), os processos de absorção e adsorção ainda não são considerados atrativos para o abatimento, em grande escala, do CO_2, devido ao limite da capacidade e baixa seletividade do material em relação ao CO_2. A absorção, contudo, poderá ser bem-sucedida quando utilizada em combinação com outras tecnologias de captação. Porém todo resíduo começa a ser considerado uma nova matéria-prima, que foi, até alguns anos atrás, ignorada, inexplorada ou mal aproveitada pelos processos produtivos, nesse caso, temos a lama vermelha.

Logo, o presente trabalho tem como objetivo, uma sistemática de revisão bibliográfica onde é possível estudar a caracterização das propriedades físicas, químicas e composição mineralógica da lama vermelha objeto do presente estudo e avaliar a viabilidade técnica da utilização da lama vermelha como agente adsorvente/absorvente de remoção de poluentes originado nos processos industriais da produção de alumínio.

2- OBJETIVO

Objetivo geral

O presente trabalho visa revisar e analisar a viabilidade do processo de adsorção de gases poluentes através da lama vermelha no meio industrial, com base em estudos científicos publicados

Objetivos específicos

- Levantar e revisar estudos que investigam a utilização de lama vermelha como adsorvente;
- Identificar as propriedades físico-químicas da lama vermelha que favorecem sua aplicação como material adsorvente e absorvente;
- Comparar diferentes tratamentos para melhorar o desempenho da lama vermelha no processo;
- Avaliar os impactos ambientais e econômicos relatados na literatura relacionados ao uso da lama vermelha para captura de gases poluentes.

3- REFERENCIAL TEÓRICO

4.1- Processo Bayer

O processo Bayer é o método industrial mais utilizado para a extração da alumina (óxido de alumínio) a partir da bauxita, a principal matéria-prima para a produção de alumínio metálico. Desenvolvido pelo químico austríaco Karl Bayer em 1888, o processo envolve várias etapas que têm como objetivo a separação do óxido de alumínio dos demais componentes presentes na bauxita, principalmente a sílica, os óxidos de ferro e de titânio que permanecem insolúveis e são removidas na forma de lama vermelha.

O Processo Bayer pode ser dividido em quatro etapas principais, sendo elas: digestão, clarificação, precipitação e calcinação.

Primeiramente na fase de digestão, a bauxita é misturada com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em altas temperaturas e pressão. Esse procedimento permite que o óxido de alumínio (Al_2O_3) se dissolva, formando o aluminato de sódio ($NaAlO_2$), também chamado de licor, enquanto os outros compostos da bauxita, como a sílica e os óxidos de ferro, permanecem insolúveis. Segundo Andrade (2006), “durante a etapa de digestão, a reação entre o hidróxido de sódio e a bauxita é crítica para garantir a eficiência do processo de extração da alumina”.

Após a digestão, a mistura é então submetida a um processo de clarificação, onde os sólidos insolúveis como a lama vermelha são removidos por sedimentação. O licor de aluminato de sódio é então filtrado para eliminar as impurezas. A clarificação é uma etapa essencial para garantir que as impurezas não interfiram na fase de precipitação.

A precipitação é a etapa onde o licor clarificado é resfriado e semeado com cristais de hidrato de alumina. Isso permite que a alumina hidratada ($Al(OH)_3$) precipite e seja separada da solução de hidróxido de sódio (NaOH).

A etapa final é a calcinação, o hidrato de alumina precipitado é aquecido em fornos rotativos a temperaturas acima de 1000°C, onde ocorre a decomposição do $Al(OH)_3$ em alumina (Al_2O_3) anidra, pronta para ser usada na produção de alumínio. “A calcinação remove a água presente no hidrato de alumina, resultando em um produto com alta pureza” (AUTHIER-MARTIN et. al, 2001).

4.2- Lama vermelha

Embora o processo Bayer seja eficiente para a extração de alumina, ele também gera subprodutos indesejados, como a lama vermelha, um resíduo altamente alcalino. “A gestão adequada da lama vermelha é um dos maiores desafios ambientais da indústria de alumínio” (BONENFANT et al., 2008). Recentemente, pesquisas têm se concentrado em alternativas para reduzir a geração de resíduos e reutilizar a lama vermelha em outras aplicações industriais

A produção de alumina por meio do processo Bayer resulta na formação de um grande volume de resíduo conhecido como "lama vermelha". Esse resíduo é gerado após a extração da alumina da bauxita, que é realizada com o uso de uma solução de hidróxido de sódio sob condições de alta temperatura e pressão. A fase em que essa dissolução ocorre é na digestão.

A lama vermelha contém uma variedade de compostos, sendo os principais óxidos de ferro (Fe_2O_3), óxidos de alumínio (Al_2O_3) não extraído, dióxido de titânio (TiO_2), sílica (SiO_2), além de traços de metais pesados como vanádio, cromo e zircônio. Em estudo sobre a caracterização de lama vermelha, foi identificado que os óxidos de ferro são responsáveis pela sua coloração característica e representam aproximadamente 30 a 60% da composição total (BONENFANT et al. 2008). A presença de alcalinidade residual, oriunda do uso de hidróxido de sódio no processo, também é um fator relevante, pois pode atingir valores de pH superiores a 12, o que torna a lama altamente corrosiva e ambientalmente perigosa se não gerida adequadamente.

As propriedades físicas da lama vermelha variam dependendo da composição da bauxita de origem e das condições de operação do processo Bayer. Geralmente, a lama vermelha é uma suspensão de partículas finas com granulometria na faixa de micrômetros. Sua densidade varia de 2,7 a 3,6 g/cm³, e sua porosidade pode ser alta, o que dificulta o processo de sedimentação e a compactação dos resíduos. A cor avermelhada, derivada do elevado teor de óxido de ferro, também influencia a refletância solar da lama, o que pode causar variações térmicas nas áreas onde é armazenada (DU PEIXIN et al, 2024).

Devido à sua composição rica em óxidos de ferro e alumínio, a lama vermelha tem sido alvo de estudos que buscam alternativas de reaproveitamento. A lama vermelha é um resíduo considerado problemático do ponto de vista ambiental, principalmente devido à sua alcalinidade e aos grandes volumes produzidos. O manejo inadequado desse resíduo pode levar à contaminação de solo e água, além de representar riscos à saúde humana. A sedimentação lenta e o grande volume de material gerado tornam necessária a utilização de grandes áreas de armazenamento, o que representa um desafio logístico para as indústrias.

As barragens de lama vermelha são estruturas destinadas ao armazenamento de resíduos gerados durante o processo de refinamento da bauxita para produção de alumina, matéria-prima do alumínio. Em países como o Brasil, as barragens de resíduos industriais, incluindo as de lama vermelha, são regulamentadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM) e precisam atender a requisitos específicos de segurança. No entanto, o cumprimento e fiscalização dessas normas são desafios constantes.

Figura 1: Barragem da Hydro Alunorte em Barcarena AM

4.3 Processo de absorção/adsorção na lama vermelha

Absorção e adsorção são processos de interação de moléculas, que diferem significativamente no modo como essas moléculas interagem com as superfícies ou com os materiais.

Segundo Atkins e De Paula (2012) no processo de absorção as moléculas de uma substância (o absorvato) penetram e se distribuem uniformemente por todo o volume de outra substância (o absorvente). Este é um fenômeno de volume, o que significa que o material absorvido é integrado e distribuído por toda a massa do absorvente. Um exemplo comum de absorção é o comportamento de uma esponja ao absorver água. A água penetra na estrutura da esponja, espalhando-se por todo o seu volume. Do ponto de vista físico-químico, na absorção, a substância absorvida é incorporada na fase sólida ou líquida de outro material.

Por outro lado, a adsorção é um fenômeno de superfície, em que as moléculas de um fluido (gás ou líquido) se acumulam na superfície de um sólido ou líquido, sem penetrar em seu interior. Esse processo é restrito à interface entre as duas fases, onde as moléculas adsorvidas se ligam ao adsorvente por interações físicas (como forças de Van der Waals) ou químicas (como ligações covalentes ou iônicas) (LOUSADA, et al, 2023). Um exemplo típico é o carvão ativado, que adsorve gases ou contaminantes da água em sua superfície porosa. Atkins e De Paula (2012) explicam que esse processo pode ser dividido em adsorção física (fisissorção), que envolve forças de Van der Waals, e adsorção química (quimisorção), que envolve a formação de ligações químicas na superfície do adsorvente. Na adsorção física o processo é geralmente reversível e ocorre em temperaturas mais baixas, enquanto adsorção química é um processo que geralmente envolve mais energia e é menos reversível do que a fisissorção.

Ambos os processos são fundamentais em diversas áreas da ciência e tecnologia, como na filtração de contaminantes, tratamento de efluentes, e em processos biológicos, onde desempenham papéis críticos na regulação de substâncias e interações entre diferentes fases.

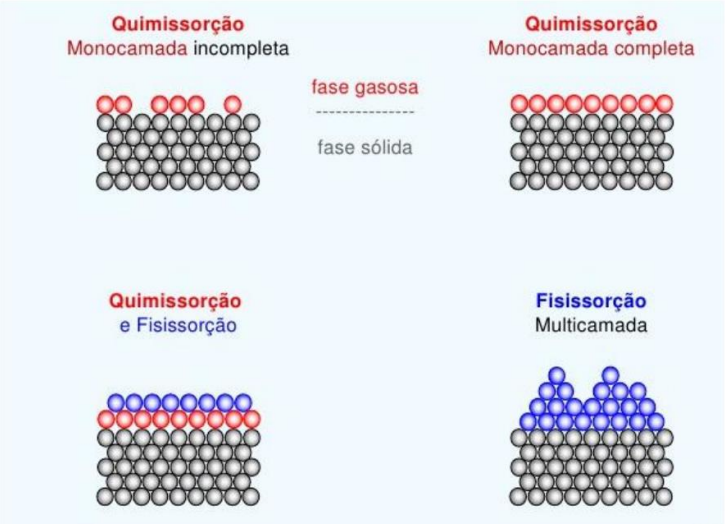

Figura 2: Quimissorção e Fisissorção

Absorção e adsorção são processos relacionados à interação de substâncias, mas diferem fundamentalmente em como ocorre essa interação.

Durante o processo Bayer a lama vermelha possui potencial de adsorção e absorção de diversos contaminantes, incluindo gases poluentes. Devido à sua composição rica em óxidos de ferro e alumínio, esse material apresenta características que o tornam útil na captura de poluentes atmosféricos, como dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), e óxidos de nitrogênio (NO_x).

A lama vermelha é composta majoritariamente por óxidos de ferro (Fe_2O_3), sílica (SiO_2), óxidos de alumínio (Al_2O_3), e traços de metais pesados. Sua estrutura porosa e a presença de óxidos metálicos conferem à lama vermelha uma elevada área superficial específica, o que favorece a adsorção de gases. A capacidade de adsorção está associada à interação dos gases poluentes com a superfície da lama vermelha, principalmente através de forças de Van der Waals e interações químicas (JIE WANG et al. 2024).

Quando modificada ou ativada termicamente, a lama vermelha pode aumentar sua capacidade de adsorção de CO_2, SO_2 e outros gases poluentes. Essa ativação por tratamento térmico ou químico cria mais sítios ativos em sua superfície, aumentando a capacidade de captura dos poluentes gasosos (JIE WANG et al. 2024).

A interação dos gases poluentes com a superfície da lama vermelha pode ocorrer por adsorção física, um processo no qual os poluentes gasosos aderem à superfície por forças intermoleculares fracas. Gases como o CO_2 e SO_2 podem ser

adsorvidos dessa maneira, especialmente quando a lama vermelha é ativada (PEIXIN DU et al, 2024).

Na adsorção química há a formação de ligações químicas entre os poluentes e os componentes da lama vermelha. Isso é comum para gases como SO_2, que reagem com os óxidos de ferro e alumínio presentes na lama, formando compostos estáveis. A quimissorção geralmente ocorre a temperaturas mais elevadas, resultando em uma fixação mais eficiente dos poluentes (ATKINS e DE PAULA. 2012).

Além da adsorção, a lama vermelha pode atuar como um absorvente em condições específicas. Isso significa que os gases podem penetrar no material, interagindo não apenas com a superfície, mas também sendo incorporados em sua estrutura interna. Esse fenômeno é mais limitado em comparação à adsorção, mas pode ser relevante em situações em que o gás é capturado de forma difusa na matriz do material (PEIXIN DU et al, 2024).

Em aplicações práticas, a lama vermelha pode ser usada como um material adsorvente em filtros de gás, como em sistemas de captura de CO_2. Também há estudos que investigam sua aplicação na remoção de SO_2 de gases de combustão, com resultados promissores em termos de eficiência (PEIXIN DU et al, 2024).

Além disso, a modificação da lama vermelha por métodos químicos, como impregnação com metais alcalinos, tem mostrado aumentar significativamente sua capacidade de captura de CO_2, tornando-a um possível agente mitigador em processos de sequestro de carbono.

4.4- Desafios e impactos da aplicação

A lama vermelha, devido à sua composição mineralógica e estrutura porosa, apresenta um potencial significativo para a adsorção de gases poluentes como CO_2 e SO_2, especialmente após modificações químicas ou térmicas que aumentam sua reatividade e área de superfície. Seu uso pode contribuir para a mitigação de poluentes atmosféricos em processos industriais. No entanto, desafios relacionados à sua alcalinidade e gestão de resíduos ainda precisam ser abordados antes que essa tecnologia possa ser amplamente implementada (JIE WANG et al. 2024).

Embora a lama vermelha tenha potencial como adsorvente de gases poluentes, sua alta alcalinidade e a presença de metais pesados representam desafios ambientais no manejo e uso contínuo desse material. O processo de adsorção é limitado pela quantidade de sítios ativos na superfície, e a capacidade de regenerar a lama vermelha após a saturação com poluentes ainda está em fase de desenvolvimento (PEIXIN DU et al, 2024).

A lama vermelha é um resíduo abundante e de baixo custo, gerado em grandes volumes durante a produção de alumina. Aproveitar este subproduto como material adsorvente pode reduzir significativamente os custos associados à compra de outros adsorventes, como carvão ativado ou zeólitas, que são tradicionalmente usados para captura de poluentes gasosos. Isso representa uma vantagem econômica importante para indústrias de grande porte. Para que a lama vermelha tenha uma performance adequada na adsorção de gases como CO_2 e SO_2, ela precisa passar por modificações, como tratamentos térmicos ou químicos, que aumentam sua capacidade de adsorção. Esses tratamentos podem envolver custos adicionais relacionados à energia, produtos químicos e infraestrutura, tornando o processo mais oneroso. Contudo, esses custos podem ser compensados a longo prazo pelos benefícios econômicos na mitigação de emissões e possíveis créditos de carbono (JIE WANG et al. 2024).

A captura de gases como o CO_2, utilizando lama vermelha, pode resultar em benefícios econômicos significativos. Muitas indústrias que participam de sistemas de comércio de emissões ou que estão sujeitas a regulamentações ambientais podem obter créditos de carbono ao reduzir suas emissões, o que pode gerar receitas adicionais ou evitar multas e taxas ambientais (PEIXIN DU et al, 2024).

O uso de lama vermelha para adsorção de gases poluentes ajuda a lidar com dois problemas ambientais ao mesmo tempo: a gestão desse resíduo altamente alcalino e a redução de emissões de gases de efeito estufa (como CO_2) e poluentes atmosféricos (como SO_2). A lama vermelha, se não for reutilizada ou tratada corretamente, pode causar sérios danos ambientais, incluindo a contaminação do solo e dos recursos hídricos devido à sua alta alcalinidade e a presença de metais pesados. Embora o uso da lama vermelha traga benefícios ambientais ao reduzir a quantidade de poluentes gasosos na atmosfera, o próprio material ainda carrega riscos. Por

exemplo, após a adsorção dos poluentes, o resíduo modificado pode se tornar mais tóxico, exigindo métodos específicos para disposição final ou regeneração. Isso inclui o tratamento adequado para evitar que metais pesados ou compostos perigosos se lixiviem para o meio ambiente (PEIXIN DU et al, 2024).

O reaproveitamento da lama vermelha para fins de adsorção de gases poluentes promove a sustentabilidade e a economia circular, diminuindo a necessidade de novas matérias-primas e oferecendo uma solução para a gestão de resíduos industriais. Essa abordagem também contribui para a redução da pegada ecológica da indústria do alumínio, um dos setores com maior geração de resíduos sólidos industriais.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo tem como objeto de pesquisa a captura de poluentes utilizando lama vermelha, com o objetivo explicativo de avaliar a implementação do processo de adsorção/absorção em ambiente industrial e verificar seus impactos econômicos e ambientais. A natureza desta pesquisa é classificada como básica, pois visa contribuir com conhecimentos sobre o tema abordado.

A abordagem adotada na pesquisa será qualitativa, buscando compreender a viabilidade do processo de adsorção e absorção em lama vermelha e os impactos ambientais decorrentes de sua aplicação. Para tanto, será realizada uma pesquisa bibliográfica, a revisão de literatura, consiste no levantamento, análise e interpretação de informações e conhecimentos previamente publicados em livros, artigos científicos, teses, dissertações e outros materiais documentais. Esse procedimento permite explorar um tema de maneira aprofundada, acessando diversas perspectivas para construção de uma base sólida e fundamentada de conhecimento.

Este trabalho utilizou a metodologia de revisão sistemática da literatura para identificar e analisar publicações relevantes sobre o uso da lama vermelha como adsorvente/absorvente de gases poluentes. Foram consultadas as bases de dados Science Direct, SciELO, CAPES, e outros repositórios acadêmicos, utilizando as palavras-chave: “lama vermelha”, “adsorção de CO_2”, “resíduos industriais”, “tratamento de poluentes” e “processo Bayer”.

Os critérios de inclusão adotados foram: Artigos publicados entre 2011 e 2024, estudos disponíveis em português ou inglês, pesquisas que descrevem as características físico-químicas da lama vermelha e sua aplicação para adsorção/absorção de gases, e trabalhos que apresentem comparações de diferentes tratamentos para aprimorar a capacidade de captura.

Após a triagem inicial, os artigos foram analisados quanto aos seguintes aspectos: Metodologia utilizada para avaliar a adsorção/absorção, eficiência da captura de CO_2 e outros gases, impactos ambientais associados ao uso da lama vermelha e viabilidade econômica da aplicação.

Os dados foram organizados e discutidos com base nas propriedades do material adsorvente e/ou absorvente, tratamentos aplicados e condições experimentais relatadas nos estudos. Essa metodologia permitiu uma análise crítica e

abrangente acerca do tema proposto, fornecendo subsídios para a compreensão da eficácia do uso de lama vermelha em processos de captura industrial de gases.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos analisados nesta revisão investigaram o potencial da lama vermelha, resíduo do processo Bayer, como material adsorvente/absorvente para a mitigação de poluentes gasosos, principalmente o dióxido de carbono (CO_2). Para garantir a clareza e o caráter bibliográfico do trabalho, são comparados três estudos relevantes que abordam a mesma temática, destacando metodologias, resultados e conclusões: Absorção do dióxido de carbono por resíduo de bauxita em torres de absorção (BOTELHO, et al, 2013), Adsorção de CO_2 em lama vermelha (NUNES LIMA, 2011) e Absorção de CO_2 em colunas de borbulhamento empregando lama vermelha (BRAGA, et al. 2015).

Os dados coletados foram interpretados a partir dos princípios de absorção/adsorção e as interações entre a fase gasosa e o material sólido. A avaliação da eficiência de remoção de CO_2, junto com a comparação das condições experimentais, proporciona percepções sobre a viabilidade da lama vermelha como um potencial adsorvente/absorvente em aplicações ambientais. Portanto é apresentado os resultados quantitativos e qualitativos, seguidos de uma análise crítica das implicações dessas informações.

Quanto a metodologia, o primeiro estudo analisado (BOTELHO, et al, 2013) aplica a lama vermelha em suspensão (27% de sólidos) e no sistema de absorção foram utilizados dois tipos de torres: torre de aspersão, onde o líquido é pulverizado por bicos tipo cone oco, e torre de recheios randômicos, que contém maior área de contato gás-líquido. O gás contendo CO_2 foi injetado em fluxo contínuo e em contracorrente com a suspensão de lama vermelha.

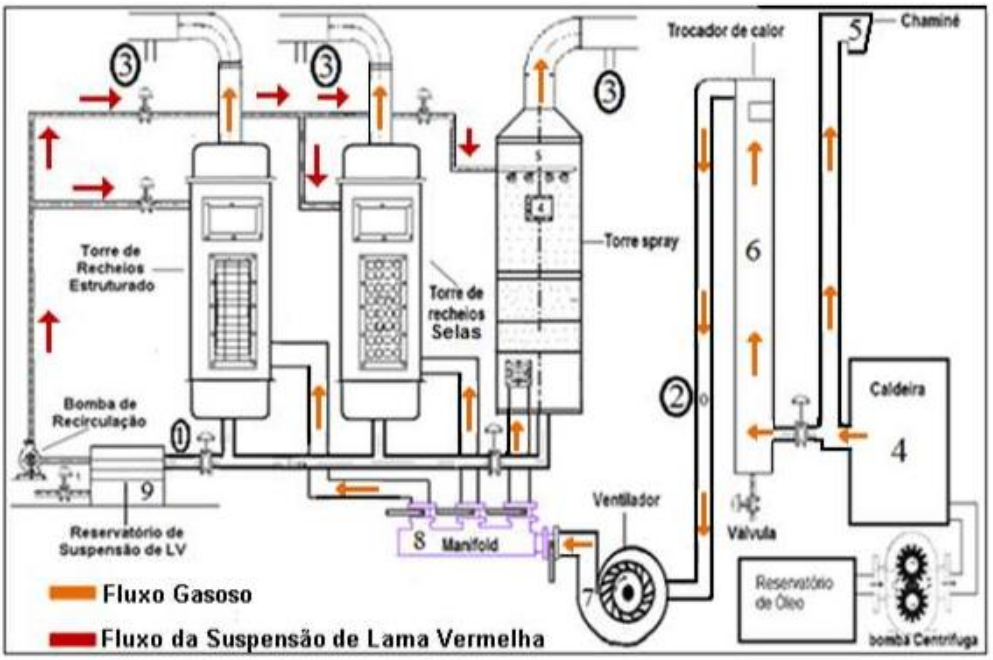

Figura 3- Diagrama da planta piloto de absorção de gases

As variáveis analisadas foram taxas de absorção, medida pela quantidade de CO_2 capturado e o pH do sistema monitorado durante e após os experimentos.

O segundo estudo analisado (NUNES LIMA, 2011), aplicou a lama vermelha seca como adsorvente em uma coluna de leito fixo, as variáveis ajustadas foram a concentração de CO_2 (6%-34%), massa de lama vermelha (200-1000 g) e vazão de gás (2,5-10 L/min). A mistura gasosa de CO_2 e ar foi injetada na base da coluna e na saída foi monitorada com um analisador de gases (Testo 350 M/XL).

Teste	Condições Operacionais		
	Conc. CO_2 (%)	Massa de Lama (g)	Vazão (l/mim)
1	10	600	6,0
2	10	600	4,0
3	15	400	2,5
4	15	1000	5,0
5	10	200	4,0
6	15	400	5,0
7	34	400	5,0
8	15	400	10,0
9	6	400	5,0
10	15	400	5,0
11	15	120	5,0
12	20	600	4,0
13	20	200	6,0
14	20	600	6,0
15	20	200	4,0
16	10	200	6,0

Tabela 1: Condições operacionais do sistema de adsorção

O terceiro e último estudo (BRAGA, et al. 2015) aplica a lama vermelha (25% de sólidos) em colunas de absorção em borbulhamento com 6 m de altura, operando em regime contínuo e em contracorrente. O absorvente foi alimentado na parte superior da coluna, enquanto o gás contendo CO_2 foi injetado por uma placa porosa na base, a concentração de CO_2 na entrada e na saída foi medida com um analisador de gases (Testo 350-S). As vazões de gases e suspensão foram controladas por rotâmetros e bombas peristálticas, e os parâmetros experimentais foram 3,56 L/min de vazão do gás e 10,57% de teor de CO_2.

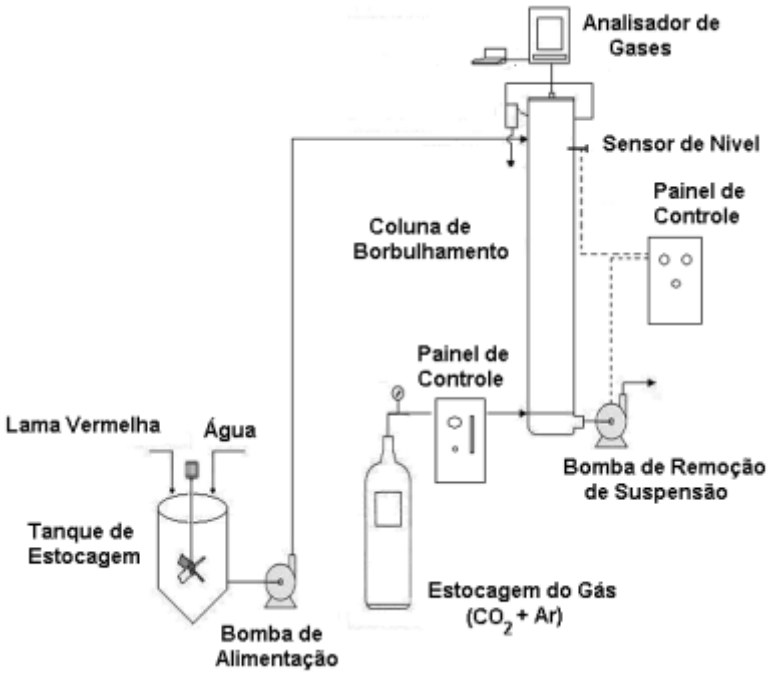

Figura 4: Fluxograma do ensaio de absorção

Parâmetros operacionais empregados nos ensaios de absorção de CO_2.

Principais Parâmetros Operacionais		
Corrente Gasosa	Temperatura (°C)	25
	Vazão (L/min)	3,56
	Velocidade superficial (m/s)	0,03
	Concentração de CO_2 (%)	10,57
	Pressão (bar)	2,0
Polpa – Lama Vermelha	Vazão (L/min)	0,7 – 1,0
	Teor de sólidos (%)	25

Tabela 2: Condições operacionais das colunas de borbulhamento

Quanto a eficiência, a lama vermelha, resíduo do processo Bayer, demonstrou potencial significativo tanto para adsorção quanto absorção de CO_2 em diferentes configurações experimentais. A eficiência varia dependendo das condições operacionais:

- Torres de absorção (BOTELHO, et al, 2013): Uma capacidade de 33,3 kg de CO_2 por tonelada foi registrada em suspensão de 27% de sólidos, com maior eficiência observada em torres de recheios devido à ampliação da área de contato gás-líquido.

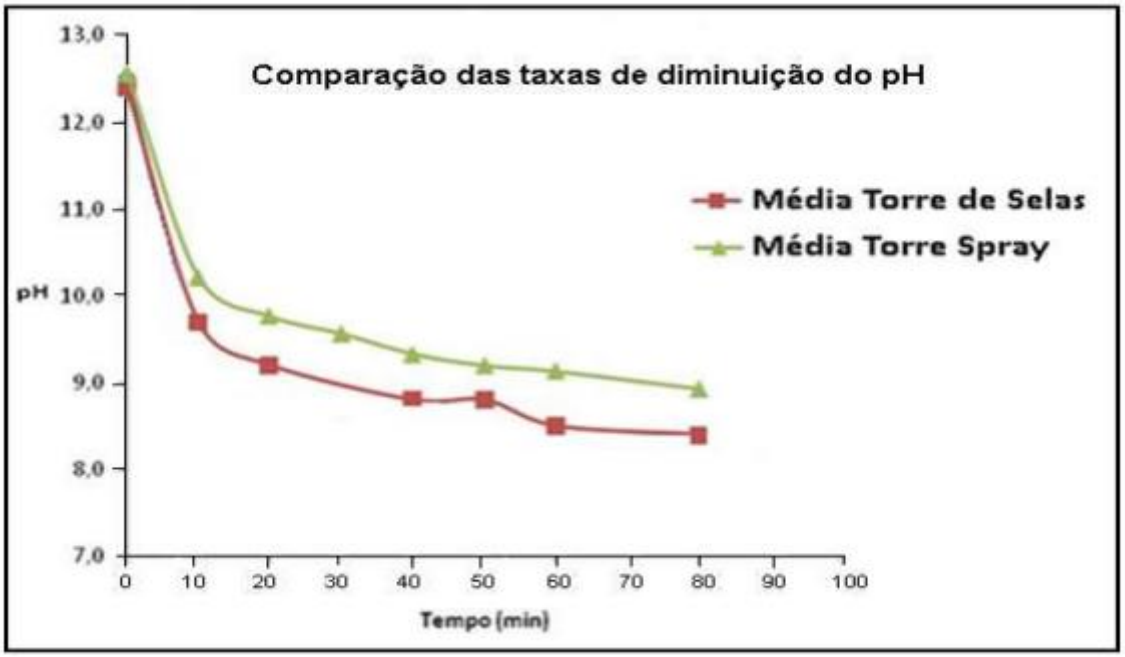

Gráfico 1: Taxa de diminuição do pH

A maior área de contato na torre de recheios promove maior eficiência de absorção de CO_2, resultando em uma redução mais rápida do pH e maior captura de gás em comparação à torre de aspersão. A queda no pH está associada ao processo de carbonatação, no qual o CO_2 reage com a alcalinidade presente na lama vermelha, formando carbonatos ou bicarbonatos, que são menos alcalinos do que o material inicial. Quando o CO_2 entra em contato com a lama, ele se dissolve na fase líquida, formando ácido carbônico (H_2CO_3).

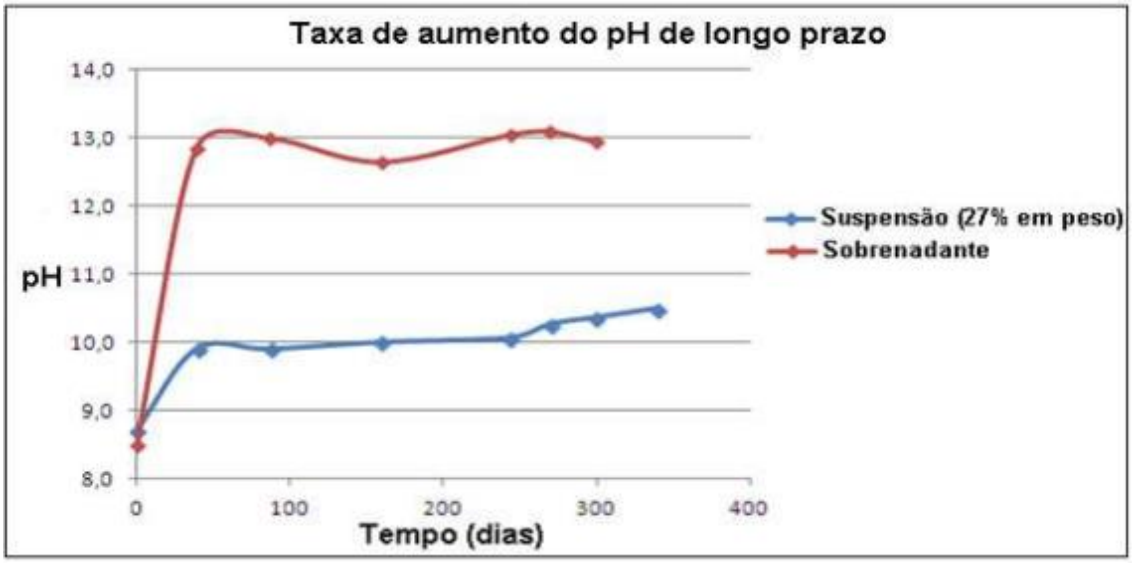

Gráfico 2: Massa de CO_2 acumulada em função do tempo

O pH estabilizado em torno de 10,5 evidencia que a liberação lenta de íons da fase sólida da lama continua promovendo reações de carbonatação, mesmo após o esgotamento inicial do NaOH.

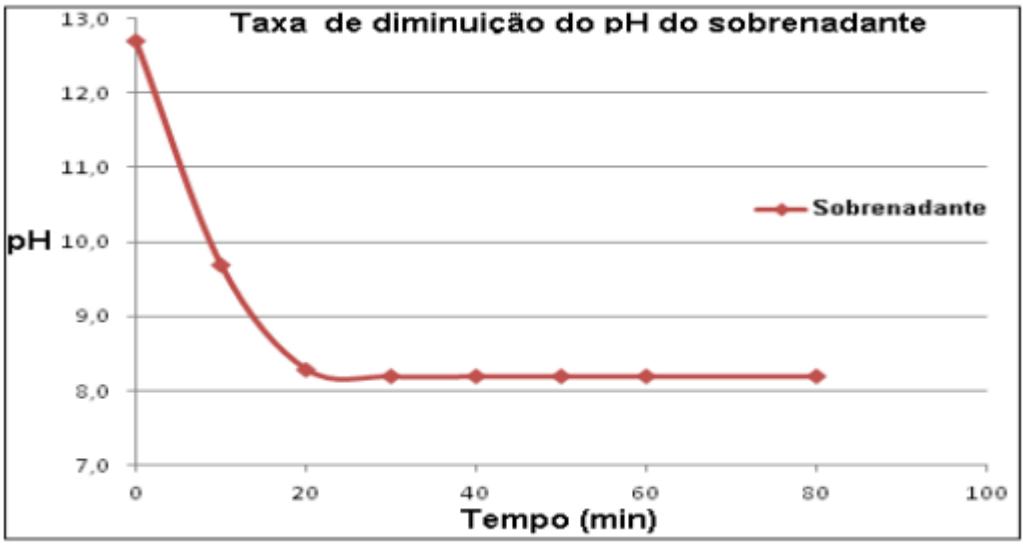

Gráfico 3: Diminuição do pH do sobrenadante

O uso do sobrenadante é uma alternativa eficaz para absorção química inicial, com desempenho rápido na redução do pH.

- Colunas de borbulhamento: Eficiência média de 96,8% e capacidade de absorção de 34,18 kg de CO_2/t, com tempo de estabilização de aproximadamente 7 minutos e alta constância nos resultados mesmo após armazenamento do material.

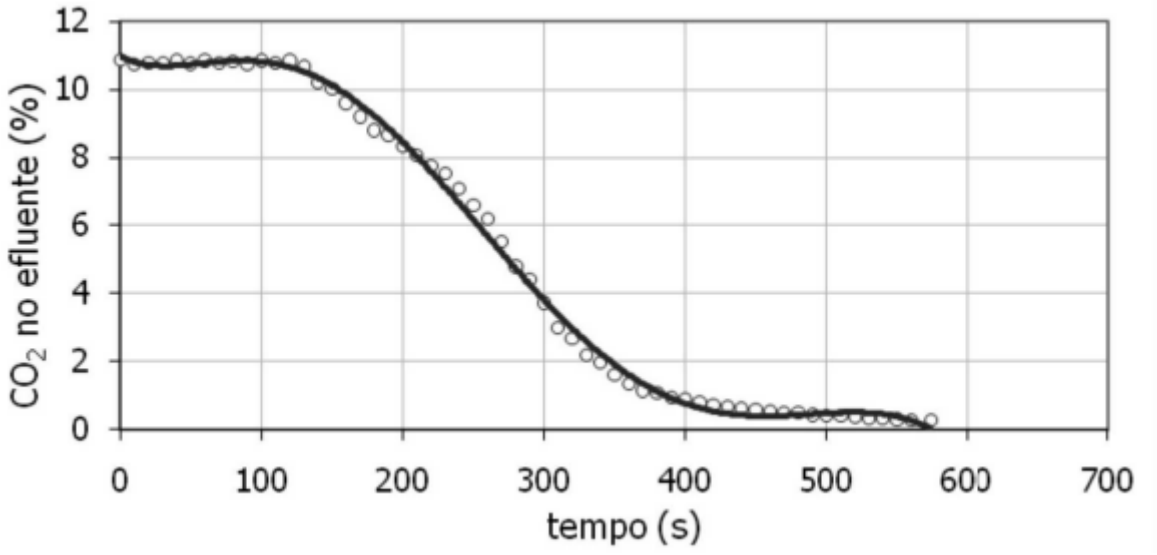

Gráfico 4: Estabilização da concentração de CO_2 em função do tempo

O gráfico mostra a variação da concentração de CO_2 na saída da coluna ao longo do tempo após o início da alimentação de polpa de lama vermelha. Nos primeiros 7 minutos, ocorre uma estabilização da concentração de CO_2 no efluente, indicando que o sistema alcançou um equilíbrio operacional, antes desse período, a concentração de CO_2 diminui rapidamente, evidenciando que a interação inicial gás-líquido é altamente eficiente no sequestro de CO_2. Após a estabilização, a concentração do gás no efluente permanece quase constante, refletindo a manutenção de um regime contínuo de absorção.

Resultados de percentual de absorção e concentração de CO_2 na corrente gasosa obtidos nos ensaios em regime contínuo.

Teste	Parâmetros	Média	Desvio Padrão
1	Eficiência de Absorção	94,99	4,541
	CO_2 no efluente	0,53	0,480
2	Eficiência de Absorção	95,64	0,778
	CO_2 no efluente	0,46	0,082
3	Eficiência de Absorção	96,16	1,695
	CO_2 no efluente	0,41	0,179
4	Eficiência de Absorção	93,51	9,560
	CO_2 no efluente	1,11	1,010

Tabela 3: Percentual de Absorção e Concentração de CO_2

Os testes 1 a 3 mostram consistência na eficiência, com valores médios acima de 94%. Isso reflete a estabilidade do sistema em condições controladas. A eficiência reduzida no teste 4 (93,51%) está associada a flutuações na vazão da polpa, possivelmente devido a problemas na bomba peristáltica. A concentração de CO_2 no efluente aumenta significativamente no teste 4 (1,11%), reforçando que a estabilidade operacional é crucial para manter a eficiência.

- Leito fixo (NUNES LIMA, 2011): Captura limitada a 1,6 kg de CO_2/t devido à saturação rápida, atribuída à reduzida área superficial do material.

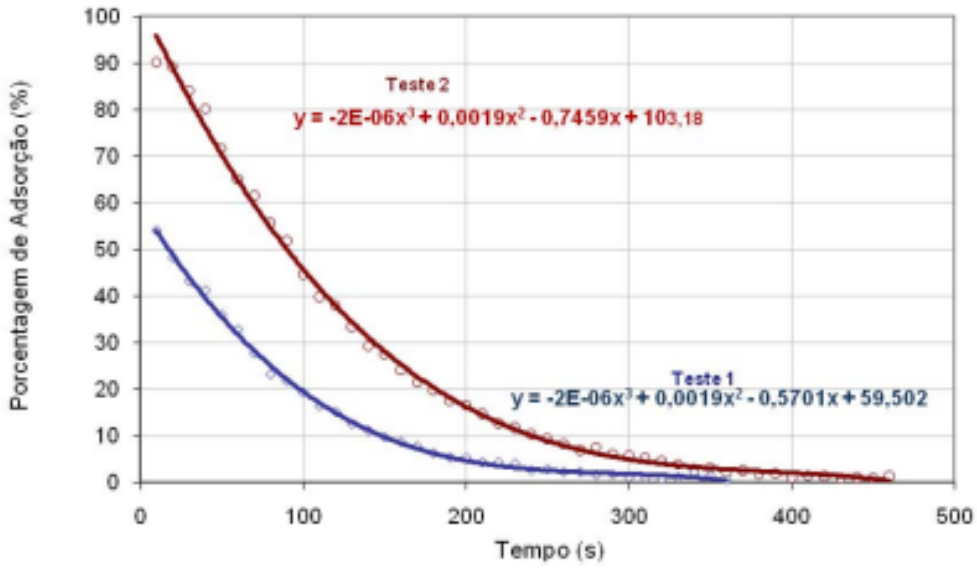

Gráfico 5: Variação do percentual de CO_2 adsorvido com o tempo de contato

O gráfico apresenta curvas que mostram a eficiência de adsorção em função do tempo para diferentes condições experimentais. Em ambos os testes, a porcentagem de CO_2 adsorvido decai rapidamente nos primeiros minutos, isso ocorre porque a superfície da lama vermelha satura rapidamente devido à sua baixa área superficial específica. Comparando os dois testes, a vazão mais baixa (4 L/min no Teste 2) apresenta maior eficiência inicial de adsorção, isso ocorre porque a menor vazão aumenta o tempo de contato entre o gás e o material adsorvente, favorecendo o processo.

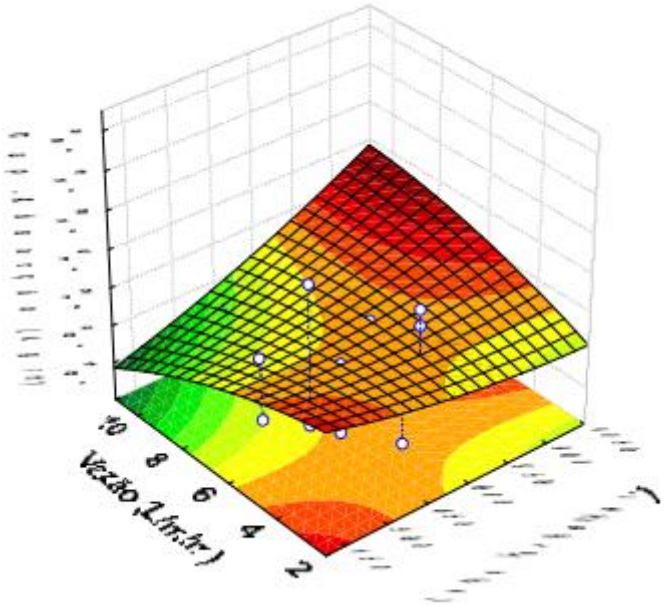

Gráfico 6:Superfície de contorno para capacidade de adsorção

O gráfico tridimensional correlaciona a capacidade de adsorção (kg de CO_2/t de lama) com a vazão do gás e a massa de lama vermelha usada. O valor máximo de adsorção previsto foi de 1,6 kg de CO_2 por tonelada de lama vermelha, alcançado com maior vazão e maior massa de adsorvente, o aumento da massa de lama melhora significativamente a capacidade de adsorção, pois mais sítios ativos estão disponíveis para capturar o CO_2. Quanto à influência da vazão, a capacidade de adsorção cresce com o aumento da vazão até um certo ponto, mas taxas muito altas podem reduzir a eficiência devido ao menor tempo de contato gás-sólido. O gráfico evidencia que o sistema atinge rapidamente a saturação, sugerindo a necessidade de modificações para aumentar a área superficial do material.

Quanto as propriedades físico-químicas, a composição da lama vermelha, rica em óxidos metálicos e alta alcalinidade (pH 10-13), favorece interações químicas e físicas que potencializam sua aplicação como adsorvente/absorvente.

Quanto aos desafios operacionais, a saturação rápida em sistemas de leito fixo destaca a necessidade de tratamentos para ampliar a área superficial específica da lama. Já a absorção em sistemas líquidos demonstra maior eficiência, mas requer gestão cuidadosa dos resíduos tratados, devido à sua toxicidade potencial.

Em relação à viabilidade e sustentabilidade a reutilização da lama vermelha oferece uma solução sustentável para a gestão de resíduos industriais e captura de gases de efeito estufa. O processo alinha-se aos princípios da economia circular, transformando passivos ambientais em ativos tecnológicos.

As perspectivas de aplicação do emprego da lama vermelha em sistemas industriais para mitigação de emissões de CO_2 é promissor. Tecnologias como torres de recheios e colunas de borbulhamento demonstram resultados eficientes e escaláveis, superando limitações de métodos como o leito fixo. A aplicação industrial pode reduzir emissões de CO_2 e promover economias com créditos de carbono. Contudo, é necessário o desenvolvimento de métodos seguros para disposição do resíduo saturado.

Para possível continuidade é necessário pesquisas adicionais para tratamento químico e térmico da lama vermelha que podem aumentar sua eficiência e versatilidade, experimentos em leitos fluidizados também são sugeridos como alternativa para superar problemas de saturação e aumentar a interação gás-sólido.

Com base nos estudos analisados sobre a captura de CO_2 por lama vermelha utilizando diferentes métodos e configurações experimentais, os resultados indicam que este resíduo industrial apresenta potencial de uso em processos de adsorção e absorção, dependendo do enfoque metodológico, porém a aplicações de tratamentos possibilitando resultados mais significativos.

6- CONCLUSÃO

Diante das evidências apresentadas, é importante enfatizar o potencial da lama vermelha como um absorvente/adsorvente viável para gases poluentes, como o dióxido de carbono, em ambientes industriais. A pesquisa demonstrou que a lama vermelha, um subproduto da produção de alumina pelo processo Bayer, possui propriedades de captura que podem ser otimizadas e aplicadas para mitigar emissões gasosas, especialmente o CO_2. Essa abordagem contribui não apenas para reduzir a poluição atmosférica, mas também para a reutilização de um resíduo industrial em larga escala, promovendo a sustentabilidade e uma economia mais circular na indústria do alumínio.

No entanto, o estudo também ressalta alguns desafios, incluindo a necessidade de tratamentos adicionais para aumentar a capacidade de adsorção da lama vermelha e o manejo cuidadoso do resíduo após a saturação com poluentes, devido à sua alta alcalinidade e possíveis impactos ambientais. Apesar desses desafios, os resultados indicam que a utilização da lama vermelha pode representar uma solução promissora para a captura de poluentes, desde que acompanhada de políticas adequadas de gestão e regulamentação ambiental.

Essa pesquisa abre caminho para estudos futuros, focados na otimização e aplicação prática em larga escala, que possam transformar a lama vermelha de um resíduo problemático em um recurso valioso para o controle de emissões. Para dar continuidade a esta pesquisa, sugere-se a realização de experimentos que justifiquem a produção em nível industrial do resíduo após tratamento, essa abordagem pode aumentar ainda mais a capacidade de adsorção e absorção.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, H. O. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMINA. São Luis: Apostila Departamento Técnico Alumar- Rev 2. Sao Luis - MA, 2006.

AUTHIER-MARTIN et. al. THE MINERALOGY OF BAUXITE FOR PRODUCING SMELTER GRADE ALUMINA. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Volume 53, Numero 12, p. 36-40. Dez, 2001.

ATKINS, P. W. PAULA, J. de. Físico-Química, volume 2. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; NASCIMENTO, Christine Rabello; LEMOS, Flávio de Almeida; SANTOS, Ronaldo Luiz Corrêa. ABSORÇÃO DE CO2 EM COLUNAS DE BORBULHAMENTO EMPREGANDO LAMA VERMELHA. Poços de Caldas-MG, 2015. Disponível em: https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2015/CAC00240015.pdf Acesso em 10 nov. 2024.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; LEMOS, Flávio de Almeida; SANTOS, Ronaldo Luiz Corrêa; NASCIMENTO, Christine Rabello; BERTOLINO, Luiz Carlos. LAMA VERMELHA: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES. Rio de Janeiro: CETEM, 2017. Disponível em: https://www.cetem.gov.br/antigo/series/serie-tecnologia-ambiental/item/download/2465_14575a3ebe7ff5bb454d286bf472658c. Acesso em 25 mai. 2024.

BONENFANT, D.; KHAROUNE, L.; SAUVÉ, S.; HAUSLER, R.; NIQUETTE, P.; MIMEAULT, M. & KHAROUNE, M. CO2 Sequestration by Aqueous Red Mud Carbonation at Ambient Pressure and Temperature. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 47, p. 7617 – 7622, 2008.

BOOTH, N. J. Secondment to the International Test Centre for CO2 Capture (ITC), University of Regina, Canada. Report No COAL R303 DTI/Pub URN 06/798, Mai. 2005.

BOTELHO, F. A.; SOUZA, J. A. S.; MACÊDO, E. N.; VENANCIO, L. C. A. ABSORÇÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO POR RESÍDUO DE BAUXITA EM TORRES DE ABSORÇÃO. Pará, 2013. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/57/PDF/13-071.pdf. Acesso em 25 mai. 2024.

JIE WANG, XIAOMING LIU, ZENGQI ZHANG, YU LIU. Synergistic utilization, critical mechanisms, and environmental suitability of bauxite residue (red mud) based multi-solid wastes cementitious materials and special concrete, Journal of Environmental Management, Volume 361, 2024, 121255, ISSN 0301-4797. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724012416 Acesso em 14 nov. 2024

LICKS, L A dos S. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO POR ABSORÇÃO QUÍMICA, VISANDO A APLICAÇÃO EM TERMELÉTRICAS A CARVÃO NO BRASIL. Rio Grande do Sul: PUCRS. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3116. Acesso em 25 mai. 2024

LOUSADA. E María, Eduardo A. Lopez Maldonado, Lebea N. Nthunya, Alseno Mosai, María Lucia Pereira Antunes, Leonardo F. Fraceto, Estefanía Baigorria, Nanoclays and mineral derivates applied to pesticide water remediation, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 259, 2023, 104264, ISSN 0169-7722. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772223001341 Acesso em 02 dez. 2024

NUNES LIMA, Thaise. ABSORÇÃO DE CO2 EM LAMA VERMELHA. Rio de Janeiro: IFRJ PIBIC/CETEM , 2011. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/451/1/XIX_JIC2011_thaise_nunes_lima.pdf. Acesso em Acesso em 10 out. 2024.

PEIXIN DU, PENG WANG, XUEQIAN ZHANG, GUANGWU WEN, YISHAN WANG. Properties, hazards and valuable metal recovery technologies of red mud: A review, Particuology, Volume 93, 2024, Pages 328-348, ISSN 1674-2001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674200124001378 Acesso em 14 nov. 2024

SANTOS, I. F.; VENANCIO, L. C. A.; CÉSAR, G. P. C.; SOUZA, J. A. S.; SOUZA, C. A. G de. ABSORÇÃO DE GASES DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS EM TORRE DE RECHEIO ESTRUTURADO UTILIZANDO LAMA VERMELHA. p. 8884-8891 . In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]. São Paulo: Blucher, 2015. Disponível em: https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/absoro-de-gases-da-queima-de-combustveis-fsseis-em-torre-de-recheio-estruturado-utilizando-lama-vermelha-17747. Acesso em 25 mai. 2024.

STRAGEVITCH, A. S. E. X. ABSORÇÃO COM REAÇÃO QUÍMICA EM PROCESSOS DE BORBULHAMENTO: CASOS ISOTÉRMICOS E NÃO-ISOTÉRMICOS. 1996. 248 p. Dissertação (Doutorado) – Programa de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/109311. Acesso em mai. 2024