



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

GIOVANNA PEREIRA DE ABREU

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE AREIA RESIDUAL DA
PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO NO PROCESSO PRODUTIVO**

Recife
2024

GIOVANNA PEREIRA DE ABREU

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE AREIA RESIDUAL DA
PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO NO PROCESSO PRODUTIVO**

Monografia apresentada à coordenação do curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado (a) em Química.

Orientador: Prof(a). Dr(a). MARIA JOSÉ DE FILGUEIRAS GOMES

Recife

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

A162e Abreu, Giovanna Pereira de.
Estudo de viabilidade do uso de areia residual da
produção de silicato de sódio no processo produtivo /
Giovanna Pereira de Abreu. – Recife, 2024.
21 f.; il.

Orientador(a): Maria José de Filgueiras Gomes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Licenciatura
em Química, Recife, BR-PE, 2016.

Inclui referências.

1. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) . 2. Areia. 3.
Sílica. 4. Resíduos industriais 5. Redução de resíduos. I.
Gomes, Maria José de Filgueiras, orient. II. Título

CDD 540

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

GIOVANNA PEREIRA DE ABREU

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO USO DE AREIA RESIDUAL DA
PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO NO PROCESSO PRODUTIVO**

Aprovado em: 23/09/2024.

Banca Examinadora

Prof. Dr(a). Maria José de Filgueiras Gomes – Orientador (a)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Hécio José Batista – 1º avaliador (a)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr(a). Fabíola Soraia Vital Campos Barbosa Da Silva – 2º avaliador (a)

Instituto Federal de Pernambuco - Campus Recife

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter conduzido cada passo dessa trajetória e por ter colocado pessoas maravilhosas em minha vida.

A minha mãe, Maria Lúcia, por todo apoio, ensinamento, todo cuidado e conforto que pôde me proporcionar ao longo da vida, foi definitivamente minha base e meu porto seguro. Esse diploma também é seu.

A minha irmã, Géssica Abreu, por sempre me incentivar e apoiar.

Ao meu sobrinho, Arthur Abreu, por ser minha alegria nos momentos difíceis, tornando os dias mais leves e felizes.

A minha orientadora, Dra. Maria José, pela disponibilidade e suporte neste trabalho. Ao meu querido amigo, Thiago Cavalcanti, que sempre me acolheu quando precisei, por todo suporte e orientação para a elaboração deste trabalho, que sempre acreditou no meu potencial e competência.

Ao meu amigo, David Silva, que foi fundamental nessa trajetória da minha vida, que passou comigo momentos felizes e tristes, que me deu suporte emocional e acadêmico, e que me motivou durante todo o curso. Com certeza as dificuldades foram mais leves tendo o seu apoio e incentivo.

As minhas colegas de trabalho, Ceres Melo, Krisley Damásio e Marilene Azevedo, que por diversas vezes me ajudaram a solucionar os problemas que apareceram durante a pesquisa, que tiveram paciência comigo toda vez que eu me desesperava com algum imprevisto e que me deram apoio e suporte na elaboração deste trabalho.

A minha psicóloga, Daiana Nascimento, pelo amparo e suporte emocional, não me deixando desistir deste trabalho, estando ao meu lado em diversos momentos importantes. Você foi fundamental nesse processo.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento a todos os professores que de alguma forma contribuíram na minha formação acadêmica.

A todos os amigos feitos durante o curso, que de algum modo me ajudaram a continuar e prosseguir nos momentos difíceis, em especial Ariadne Souza, que esteve ao meu lado em vários momentos importantes.

Enfim, a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A areia é a principal matéria-prima empregada na produção de silicato de sódio, no entanto, o resíduo de areia gerado pelas indústrias de silicato é uma problemática constante e significativa, com um descarte anual médio de 142 toneladas. Diante disso, torna-se necessário promover a redução desses resíduos através de práticas disponíveis para o descarte adequado ou, quando possível, reaproveitá-lo, tendo em vista que este pode causar impactos negativos ao meio ambiente. Além disso, o reaproveitamento da areia também tem como benefício reduzir o custo de produção, uma vez que poderá ser reinserida no processo sem comprometer o rendimento. Nesse sentido, é de grande relevância criar soluções sustentáveis capazes de abordar de forma eficiente os desafios sociais, ambientais e econômicos envolvidos e que possam ser aplicados nas indústrias. O objetivo deste trabalho foi avaliar o reaproveitamento desse resíduo industrial e estudar a sua reutilização em novas reações voltadas à produção de silicato de sódio. Para isso, o resíduo foi submetido a um processo de lavagem, seguido de ensaios titulométricos, em triplicata, para determinação do teor de Na_2O na água de lavagem, utilizando HCl 2,0N como titulante, resultando em um valor médio de 12,80%. Ensaio de fluorescência de raios-x também foram realizados na parte sólida após lavagem, indicando um percentual de SiO_2 de 99,009%, valor comparável ao da areia virgem, cujo teor de SiO_2 varia entre 98,00% e 100,00%, o que demonstra que os resultados obtidos no resíduo apresentaram resultados satisfatórios. Baseado numa formulação sugerida neste trabalho, pode-se concluir que o reaproveitamento da areia no processo de produção de silicato de sódio, poderá promover uma redução de custos de R\$9.870 por batelada, representando uma economia anual de R\$259.670,4, integrando práticas sustentáveis e redução de custos na produção de silicato.

Palavras-chave: Reaproveitamento. Resíduo de areia. Sílica. Silicato de Sódio.

ABSTRACT

Sand is the main raw material used in the production of sodium silicate. However, the sand waste generated by the silicate industries is a constant and significant problem, with an average annual disposal of 142 tons. Therefore, it is necessary to promote the reduction of this waste through available practices for proper disposal or, when possible, reuse it, given that it can cause negative impacts on the environment. In addition, reusing sand also has the benefit of reducing production costs, since it can be reincluded in the process without compromising yield. In this sense, it is of great relevance to create sustainable solutions capable of efficiently addressing the social, environmental and economic challenges involved and which can be applied in industries. The aim of this work was to evaluate the reuse of this industrial waste and study its reuse in new reactions aimed at the production of sodium silicate. For this purpose, the residue was subjected to a washing process, followed by titrimetric tests, in triplicate, to determine the Na₂O content in the water washing, using 2.0N HCl as titrant, resulting in an average value of 12.80%. X-ray fluorescence tests were also performed on the solid part after washing, indicating a SiO₂ percentage of 99.009%, a value comparable to that of virgin sand, whose SiO₂ content varies between 98.00% and 100.00%, which demonstrates that the results obtained in the residue presented satisfactory results. Based on a formulation suggested in this research, it can be concluded that the reuse of sand in the sodium silicate production process could promote a cost reduction of R\$9,870 per batch, representing an annual saving of R\$259.670,4, integrating sustainable practices and cost reduction in silicate production.

Keywords: Reuse. Sand residue. Silica. Sodium silicate.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos	10
2 REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1 Histórico do Processo de Produção de Silicatos	11
2.2 Processos de Obtenção do Silicato de Sódio	11
2.3 Cenário Mundial de Produção do Silicato de Sódio	13
2.4 Principais Matérias-Primas para a Produção do Silicato de Sódio	13
2.4.1 Areia	14
2.4.2 Hidróxido de sódio	14
2.4.3 Carbonato de sódio	15
2.5 Composição Química Do Silicato De Sódio	17
2.6 Problemática Dos Resíduos Industriais	17
3 METODOLOGIA	19
3.1 Materiais	19
3.1.1 Preparação das amostras dos resíduos de areia	20
3.2 Caracterização da amostra	21
3.2.1 Titulação	21
3.2.2 Fluorescência de Raio-X	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5 CONCLUSÃO	28
REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

A areia é um produto natural largamente utilizado em diversos setores industriais devido à sua facilidade de obtenção e às suas propriedades, podendo ser empregada na produção de cerâmicos, tintas, construção civil, vidrados, indústria química, por exemplo (Luz e Lins, 2008 *apud* Ferreira e Daitx, 2003; BGS, 2004). Tem sua origem proveniente da degradação de rochas que se formam na superfície da Terra, e pode ser dividida de acordo com a granulometria, sendo assim classificada como: fina (entre 0,06 mm e 0,2 mm), média (entre 0,2 mm e 0,6 mm) e grossa (entre 0,6 mm e 2,0 mm) (Souza *et al*, 2014). Seu principal constituinte é a sílica (SiO_2) na forma de quartzo, podendo também integrar outros minerais na sua composição, como é exemplo o feldspato, mica e magnetita (Luz e Lins, 2008 *apud* Ferreira e Daitx, 2003; BGS, 2004).

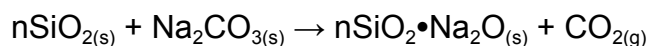
As características que a areia deve apresentar depende da sua finalidade, e, por esse motivo, dependendo da sua aplicação, precisa passar por um processo de beneficiamento, que tem como objetivo o melhoramento da qualidade dessa matéria-prima. O beneficiamento típico é, basicamente: (i) a remoção da vegetação e carga orgânica presentes; (ii) lavagem; (iii) classificação da granulometria de acordo com a destinação; (iv) atrição (Luz e Lins, 2008 *apud* Ferreira e Daitx, 2003; BGS, 2004).

As areias industriais recebem suas denominações em função de suas aplicações na indústria, determinadas pelas suas características e propriedades, tais como teor de sílica, pureza, composição química, teor de óxidos de ferro, álcalis, matéria orgânica, perda ao fogo, umidade, distribuição granulométrica, forma dos grãos e teor de argila (Azevedo e Ruiz, 1990 *apud* Luz e Lins, 2008).

Na indústria química, a areia industrial tem seu uso, por exemplo, aplicado na produção de silicato de sódio (Na_2SiO_3), também denominado como vidro líquido. O silicato de sódio é uma solução de SiO_2 (dióxido de silício) e Na_2O (óxido de sódio), considerado um produto amplamente utilizado em diversas aplicações, como por exemplo: matéria-prima na produção de detergentes, defloculante na indústria cerâmica e na purificação de minérios, fabricação de pigmentos, tratamento de superfícies de pisos de concreto, entre outros (Diatom, 2023). A razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ está entre uma das características mais importantes do

silicato de sódio, pois é a partir dela que podemos obter diversos tipos de silicato de sódio, cada um com características específicas (Diatom, 2023).

O processo de fabricação do silicato de sódio pode ocorrer de diferentes formas, sendo as principais por fusão e por via hidrotérmica. A forma tradicional é por fusão, e acontece através da calcinação da mistura da areia na forma de quartzo (SiO_2) e do carbonato de sódio (Na_2CO_3) em um forno com temperaturas superiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (Link, 2013). A reação de formação do silicato pode ser descrita a seguir:



Entretanto, esse processo torna-se pouco viável do ponto de vista ambiental por liberar 1,5 Kg de CO_2 por Kg de silicato (J. S. Lima, *et al*, 2021) e do ponto de vista econômico pela variação do preço do carbonato de sódio, e pelos custos com gás natural para manter o forno aceso. Por isso, a produção de silicato de sódio por vias menos onerosas e destrutivas torna-se interessante. Uma alternativa possível é a via hidrotérmica, que consiste na dissolução de quartzo em solução de NaOH, onde a reação é feita em reatores do tipo autoclave sob alta pressão e temperatura (Prates, 2022).

Contudo, uma problemática presente na produção de silicato por via hidrotérmica é a geração do resíduo de areia, pois este não consegue atingir a temperatura de fusão da sílica (que é superior a $1000\text{ }^\circ\text{C}$) e, por não atingir essa temperatura, ela permanece como um resíduo, na forma de areia. Sendo assim, estudos para otimizar a produção de silicato e reutilizar o resíduo de areia produzido no processo é de grande importância para indústrias e meio ambiente. Diante do exposto, este trabalho visa estudar esse resíduo que permaneceu após o processo de produção do silicato de sódio e determinar os teores de SiO_2 e Na_2O presentes, de modo a reaproveitá-lo em novas produções de silicato de sódio, reduzindo a quantidade de areia e NaOH utilizados, e, conseqüentemente, o custo da produção de silicato de sódio. Portanto, tendo em vista a problemática apresentada e a escassez de trabalhos na literatura que aborde esse tema, essa pesquisa visa realizar a caracterização analítica deste resíduo sólido para avaliar a viabilidade do reuso em novas reações para produção de silicato de sódio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o processo de reaproveitamento da areia residual na produção de silicato de sódio visando uma maior eficiência produtiva e redução de custos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal deste estudo foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar o teor de Na_2O (óxido de sódio) e SiO_2 (dióxido de silício) na água de lavagem da areia;
- Determinar os teores de SiO_2 na areia residual;
- Avaliar o potencial alcalino do resíduo de areia como alternativa para redução de custos;

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Histórico Do Processo De Produção De Silicatos

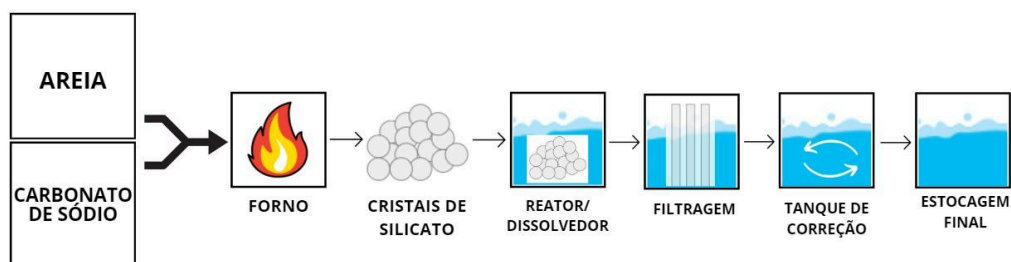
De acordo com Rochow (1987 *apud* Fawer, Concannon e Rieber, 1999) as porções sólidas da Terra são compostas predominantemente por átomos de silício e oxigênio na mesma forma de sílica e silicatos. A utilização de sílica e silicatos pelos seres humanos remonta às mais antigas tecnologias conhecidas na história da humanidade. Com a domesticação do fogo, foram introduzidos os primeiros silicatos antropogênicos.

Segundo Sharif (2018) o vidro líquido foi definido no Manual de Tecnologia Química de Von Wagner (1892) como qualquer um dos silicatos alcalinos solúveis, observados pela primeira vez por Jean Baptist van Helmont por volta de 1640 como uma substância fluida feita pelo derretimento de areia com excesso de álcali. Entretanto, foi na década de 1830, com a produção do cimento Portland que iniciou a produção de silicato através de reações químicas. Nas décadas seguintes foram desenvolvidos cristais de silicato, além do surgimento comercial de silicones e silicatos (Fawer, Concannon e Rieber, 1999).

2.2 Processos De Obtenção Do Silicato De Sódio

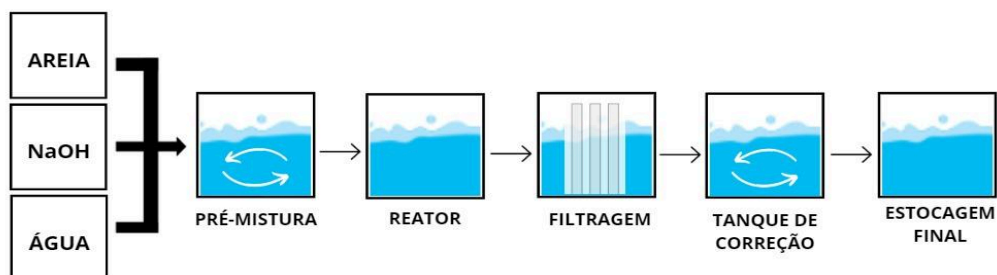
O silicato de sódio líquido é uma solução aquosa de sódio e sílica, e pode ser obtido dissolvendo os cristais de silicato em reatores sob altas temperatura e pressão, conforme ilustrado na Figura 1, ou por via hidrotérmica dissolvendo o quartzo em solução de NaOH (Link, 2013), conforme Figura 2.

Figura 1: Produção de silicato de sódio via fusão.



Fonte: Autora, 2024.

Figura 2: Produção de silicato de sódio por via hidrotérmica.

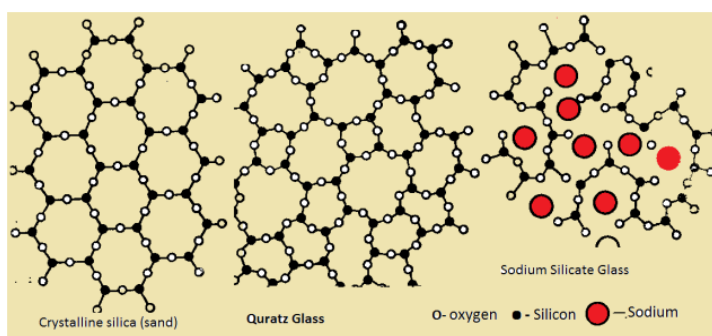


Fonte: Autora, 2024.

A obtenção de Na_2SiO_3 em forno acontece quando ocorre a fusão direta de areia beneficiada (SiO_2) e a barrilha (Na_2CO_3), medidas cuidadosa e precisamente, em temperaturas superiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$. A areia funde-se ao Na_2O (oriundo da decomposição da barrilha que acontece por volta de $850\text{ }^\circ\text{C}$), formando um polímero sintético consistente (Link, 2013).

Outra forma de obter silicato de sódio é de maneira hidrotérmica, que consiste em um ataque cáustico da sílica, onde a reação ocorre em reatores do tipo autoclave (Link, 2013). Nessa reação, o hidróxido de sódio é adicionado com a água, seguido da areia, logo após, é colocado vapor para que a sílica alcance a temperatura de excitação, tornando-se suscetível ao ataque da hidroxila (OH^-) e liberando calor após o rompimento do cristal de sílica, passando a se tornar sílica amorfa. Finalizada a reação, o reator é despressurizado e o material é filtrado e estocado. (Link, 2013). A Figura 3 mostra a estrutura molecular e o arranjo dos íons em sílica cristalina (areia), quartzo e silicato de sódio.

Figura 3: Estrutura molecular e o arranjo dos íons na sílica cristalina, quartzo e no silicato de sódio.



Fonte: Sharif, 2018.

2.3 Cenário mundial e nacional de produção do silicato de sódio

O mercado de silicato de sódio é dividido por tipo, aplicações e geografia (Mordor Intelligence, 2024). No que se refere ao tipo, o mercado de silicato de sódio divide-se em sólido e líquido. O silicato de sódio líquido possui uma maior variedade de aplicações em relação ao sólido, dentre elas estão o craqueamento catalítico, transesterificação para produção do biodiesel e tratamento de água, por exemplo (Mordor Intelligence, 2024).

Observando a variedade de aplicações, o segmento de produtos saneantes aumentou em 2021 a demanda por silicato de sódio devido à procura de produtos como sabões, detergentes, fabricação de papel higiênico (UnivDatos, 2024). A demanda por detergente líquido vem crescendo devido à praticidade e facilidade de aplicação em relação ao detergente em pó.

Do ponto de vista geográfico, a Ásia-Pacífico possui um crescimento significativo no mercado de silicato de sódio devido à presença de diversas indústrias (UnivDatos, 2024). A China, por ser o maior consumidor de água a nível mundial, está a impulsionar a procura por silicato de sódio, já que utiliza-o para o tratamento de água (UnivDatos, 2024).

Na América Latina, o Brasil é um dos maiores produtores de silicato de sódio. O país possui várias fábricas dedicadas à produção desse composto, que atende tanto ao mercado interno quanto à exportação. As principais regiões produtoras estão concentradas no Sudeste, onde há grande demanda da indústria química e de outros setores (Abiquim, 2024).

2.4 Principais Matérias-Primas Para A Produção Do Silicato De Sódio

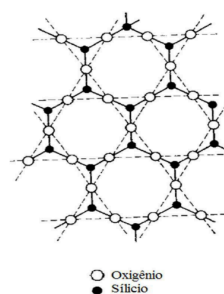
2.4.1 Areia

A areia, popularmente conhecida como quartzo, é um mineral que apresenta uma estrutura cristalina trigonal empregada como matéria-prima com alto teor de sílica ($\text{SiO}_2 > 90\%$), fundamental para obter o silicato, podendo apresentar algumas impurezas como óxido de ferro, minerais pesados e argila (Santos, 2018). Tem origem proveniente da degradação das rochas e tamanho variando entre 60 e 2000 μm (Souza *et al*, 2014). É um material que tem seu uso aplicado em diversos segmentos industriais, como na indústria de fundição, cerâmicas, vidros, isoladores

elétricos e louças (Luz e Lins, 2008 *apud* Davis e Tepordei, 1985; Ferreira, 1997; BGS, 2004). Essa variedade no uso se dá devido às propriedades da areia: dureza, estabilidade química e resistência à altas temperaturas (Souza *et al*, 2014).

Entre as propriedades da areia, dois aspectos importantes definem a finalidade da areia: pureza e tamanho das partículas. Segundo Santos *et al* (2018), a norma NBR 6502/93 estabelece três classificações quanto ao tamanho das partículas: areia fina (partículas com tamanhos entre 60 e 200 μm), areia média (partículas entre 200 e 600 μm) e areia grossa (entre 600 e 2000 μm). Ainda segundo Santos *et al* (2018) as areias grossas podem ser utilizadas em indústrias de fundição de metais e construção civil, areias médias podem ser utilizadas em indústrias vidreiras e na fabricação de fritas cerâmicas para produção de vidrados. Areias finas são utilizadas na indústria de tintas, plástico e borracha. A estrutura cristalina da sílica pode ser observada conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Estrutura cristalina da sílica (quartzo) em temperatura ambiente.



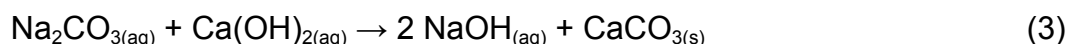
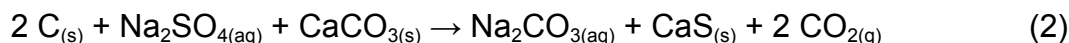
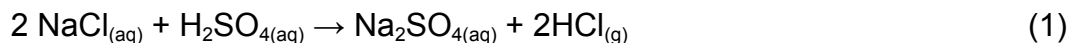
Fonte: Santos, 2018

2.4.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) é uma base muito forte, e que pode ser comercializada em diferentes formas: líquida, em escamas, pó, lentilhas, pérolas e micropérolas. Além disso, tem como características ser higroscópico, inorgânico e com alto poder corrosivo (Silva, 2012).

O processo de produção industrial de soda cáustica a partir de marinho foi desenvolvido em 1791 pelo químico francês Nicolas LeBlanc (1742-1806) e baseava-se nas reações de Glauber. Este processo consiste em reagir o sal marinho com ácido sulfúrico, formando sulfato de sódio (reação 1), que, por sua vez, é transformado em carbonato de sódio após a reação com carvão e calcário (reação

2). Por último, o carbonato de sódio reage com hidróxido de cálcio para a formação do hidróxido de sódio e carbonato de cálcio (reação 3), conforme descrito nas reações a seguir.



O processo de produção de soda cáustica passou anos dependendo exclusivamente da produção do carbonato de sódio, e só foi substituído em 1890, quando a técnica eletrolítica passou a ser utilizada industrialmente (Silva, 2012).

Nos dias de hoje, praticamente toda a produção de hidróxido de sódio é proveniente de métodos eletrolíticos, utilizando para isso uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl). Três processos de eletrólise são utilizados para a produção do hidróxido de sódio, são eles: o de mercúrio, o de diafragma e membrana, sendo este último o mais utilizado (Silva, 2012).

2.4.3 Carbonato de sódio

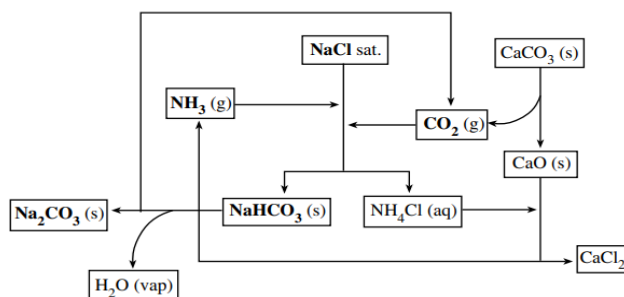
O carbonato de sódio (Na_2CO_3), mais conhecido como barrilha, é um pó branco, inorgânico, que possui aplicações tanto em segmentos industriais (vidro, sabão e têxtil, por exemplo) quanto domésticos (comumente empregado para aumentar o pH em piscinas).

A produção da barrilha deu-se historicamente por três importantes processos, sendo eles: processo LeBlanc, processo Solvay, e o processamento do mineral trona (Nunes, 2013).

O processo de produção do carbonato de sódio utilizando o método LeBlanc descrito neste trabalho no tópico 2.4.2, tornou-se inviável por ter causado diversos problemas ambientais, como chuva ácida e contaminação de rios, fauna e flora, por exemplo. Foi diante deste cenário que outras rotas produtivas precisaram ser desenvolvidas, e então no século XIX o químico belga Ernest Solvay desenvolveu o método que substituiu o de LeBlanc. Solvay empregava o calcário e a salmoura para produzir a barrilha. O ponto chave deste processo é a amônia (NH_3) e

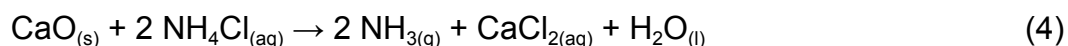
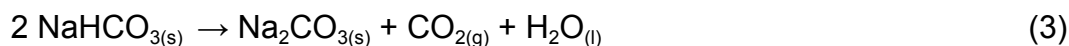
o gás carbônico que são utilizados para saturar a salmoura, e a diferença de solubilidade entre bicarbonato de amônio e bicarbonato de sódio produzidos na reação (Nunes, 2013 *apud* Araújo *et al*, 1998). O esquema simplificado do processo Solvay pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Esquema simplificado do processo Solvay.



Fonte: Araújo, 1998.

O esquema ilustrado na Figura 5 mostra o CaCO_3 (calcário) se decompondo em óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2) após aquecimento (reação 1). Com isso, o CO_2 obtido é utilizado para reagir com o cloreto de sódio (NaCl) em solução e com o gás amônio (NH_3), resultando na formação do bicarbonato de sódio precipitado e cloreto de amônio em solução (reação 2). Em seguida, o bicarbonato de sódio é aquecido, e é a partir disso que é possível obter a barrilha, água e regenerar parte do CO_2 (reação 3). Concomitante a isto, o óxido de cálcio e o cloreto de amônio (NH_4Cl) reagem entre si para gerar cloreto de cálcio (CaCl_2) e recuperar parte do gás amônio (reação 4) (Nunes, 2013). As reações descritas no processo estão apresentadas a seguir.



Mesmo o processo Solvay gerando apenas um único subproduto sem reúso, que é o cloreto de cálcio, por ser lançado nos corpos d'água, e por haver grandes reservas de mineral trona, o processo Solvay tornou-se economicamente inviável (Nunes, 2013).

O mineral trona é composto de carbonato e bicarbonato de sódio hidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Na}_3\text{HCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este processo apresenta vantagens econômicas e ambientais, e por este motivo vem sendo o substituto do processo Solvay (Nunes, 2018 *apud* Osório e Maria, 2003; Demirbas, 2002).

2.5 Composição Química Do Silicato De Sódio

Os silicatos de sódio, pós ou líquidos, possuem diversas fórmulas químicas variando as concentrações de Na_2O e SiO_2 . A fórmula geral dos silicatos solúveis de sódio, potássio e lítio é: $x \text{SiO}_2 \cdot \text{M}_2\text{O}$ [onde M é Na, K ou Li e x é razão molar (MR) definindo o número de mols de sílica (SiO_2) pelo mol do óxido metálico (M_2O)] (Fawer, Concannon e Rieber, 1999).

Industrialmente, os silicatos são divididos em alcalinos, semi-alcalinos e neutros, de acordo com a razão de massa $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, que pode ser convertida para razão molar se multiplicada por 1,032 (Sharif, 2018). Silicatos com razão variando entre 2,00 e 2,30 recebem o nome de alcalinos, razões entre 2,30 e 2,70 são os semi-alcalinos, e razões acima de 2,70 são descritos como neutros.

2.6 Problemática Dos Resíduos Industriais

A areia residual gerada durante o processo de produção de silicato por via hidrotérmica constitui um problema constante e significativo neste processo. A responsabilidade pelo descarte adequado desse resíduo recai sobre a empresa produtora. A quantidade de resíduos gerados acentua a necessidade de desenvolver soluções sustentáveis que possam atender de maneira eficaz às questões sociais, ambientais e econômicas associadas.

No Brasil existe a Lei de Crimes Ambientais que prevê penalidades contra pessoas físicas e jurídicas que cometem qualquer crime ambiental. Para Scheunemann (2005) “os poluidores (pessoa física ou jurídica) são obrigados, independentemente da existência de culpa (responsabilidade objetiva) a indenizar ou reparar os danos causados no meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade”.

Nesse sentido, a realização de pesquisas voltadas para a reutilização desses resíduos contribui para uma gestão mais eficiente, além de reduzir os custos associados ao tratamento e ao descarte adequado dos resíduos.

3 METODOLOGIA

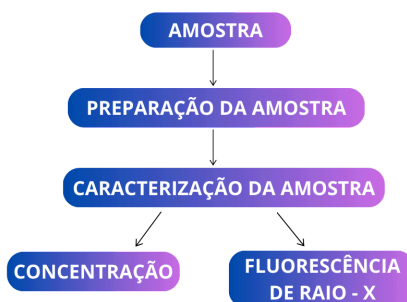
A metodologia empregada teve como objetivo viabilizar o reaproveitamento da areia residual proveniente da produção de silicato de sódio (Na_2SiO_3). Para a realização deste trabalho estudaram-se os resíduos de areia coletados em uma indústria na região de Jaboatão dos Guararapes - PE.

3.1 Materiais

Foram utilizadas seis amostras distintas de resíduo de areia para a realização dos ensaios analíticos. As amostras foram coletadas no momento de seu descarte, e nomeadas como: AM01, AM02, AM03, AM04, AM05 e AM06.

Na Figura 6 é apresentado um fluxograma da preparação e caracterização dos resíduos estudados.

Figura 6: Fluxograma da preparação e caracterização do resíduo de areia.



Fonte: Autora, 2024.

3.1.1 Preparação das amostras dos resíduos de areia

As amostras contendo os resíduos oriundos das bateladas, foram retiradas do interior dos reatores da empresa parceira, momentos antes da lavagem dos reatores. A metodologia foi desenvolvida considerando lotes-padrão dos fornecedores de areia e soda.

Após a coleta, as amostras foram preparadas por meio de lavagem, de modo a tornar possível a realização de ensaios analíticos. O aspecto visual do resíduo pode ser observado na Figura 7.

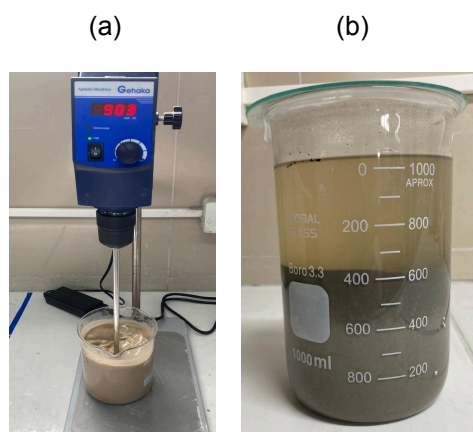
Figura 7: Amostra do resíduo de areia.



Fonte: Autora, 2024.

Para realização da lavagem foi necessário um béquer de vidro de 1000 mL, as amostras foram pesadas em uma balança semi-analítica com precisão de 0,01 g da marca *Ohaus Corporation*, modelo PX5202BR. Em seguida, foi adicionada água destilada na proporção de 1:2 em relação à quantidade de massa de resíduo pesada, e colocada para homogeneizar em um agitador mecânico da marca *Gehaka* por 30 minutos, conforme Figura 8 (a). Passados os 30 minutos, as amostras ficaram em repouso por 24h para que toda a areia ficasse decantada no fundo do béquer, conforme Figura 8 (b). Este sobrenadante chamamos de primeira água de lavagem. O sobrenadante foi transferido para outro recipiente para posterior análise físico-química.

Figura 8: Homogeneização do resíduo da areia. Em (a) resíduo de areia homogeneizando com água; em (b) resíduo após a homogeneização e repouso de 24h.



Fonte: Autora, 2024.

O processo acima descrito foi realizado três vezes. Cada água de lavagem foi analisada conforme o tópico 3.2.1.

3.2 Caracterização da amostra

Para determinar as concentrações de Na_2O e SiO_2 presentes no sobrenadante foram realizadas análises titulométricas. Para a quantificação do teor de sílica presente no resíduo, foram empregadas análises por fluorescência de raios-X.

3.2.1 Titulação

Os teores de Na_2O e SiO_2 foram determinados segundo a metodologia do Projeto de Norma Mexicana para determinação de silicato de sódio para uso industrial (PROY-NMX-K-240-SCFI-2009) com modificações.

Conforme citado no tópico 3.1.1, nos resíduos foram consideradas três águas de lavagens, e para cada água de lavagem foi feita uma triplicata de titulações.

Para a determinação dos teores de Na_2O e SiO_2 na primeira água de lavagem, foi necessário pesar 10,00 g do sobrenadante em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g da marca *Shimadzu*, modelo AY220. A amostra foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, completando-se o volume até o menisco e homogeneizando-se a solução. O restante do sobrenadante foi reservado para possíveis análises posteriores.

Para quantificar o teor de dióxido de silício, pesaram-se 10,00 g de fluoreto de sódio (NaF) em um Erlenmeyer de plástico de 500 mL. Em seguida, adicionam-se 100 mL de água destilada, 3 mL da solução indicadora de vermelho de metila a 1% e 1 mL de solução de ácido clorídrico (HCl) 2N, com fator de correção 1,000. Posteriormente, adicionou-se uma alíquota de 50 mL da solução preparada, conforme Figura 9 (a), e titulou-se com a solução de HCl 2N até a mudança de coloração de amarelo para vermelho, conforme mostrado na Figura 9 (b).

Para determinar o teor de óxido de sódio, adicionou-se uma alíquota de 50 mL da solução preparada a um Erlenmeyer de vidro de 250 mL, juntamente com

1 mL da solução indicadora de vermelho de metila a 1%. A titulação foi realizada com solução de HCl 2N até a mudança de coloração de amarelo para vermelho.

Para a segunda água de lavagem, pesou-se 50,00 g do sobrenadante, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. As determinações de dióxido de silício e óxido de sódio foram realizadas da mesma maneira que para a primeira água de lavagem. Os volumes obtidos foram anotados e utilizados para cálculos dos teores. O restante do sobrenadante foi reservado para possíveis análises subsequentes. A areia que ficou decantada no béquer foi transferida para um cadinho de porcelana para a realização da análise descrita no tópico 3.2.2. Os cálculos envolvidos para a determinação dos teores de Na_2O e SiO_2 podem ser observados conforme fórmulas a seguir.

$$\% \text{Na}_2\text{O} = \frac{F * A * 62}{PA}$$

Sendo:

A: volume de HCl 2N gasto na titulação de Na_2O

F: fator de correção do HCL 2N

PA: peso da amostra

62: Constante que representa a massa molar do Na_2O

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{(S-A) * F * 30}{PA}$$

Sendo:

S: volume de HCl 2N gasto na titulação de SiO_2

A: volume de HCl 2N gasto na titulação de Na_2O

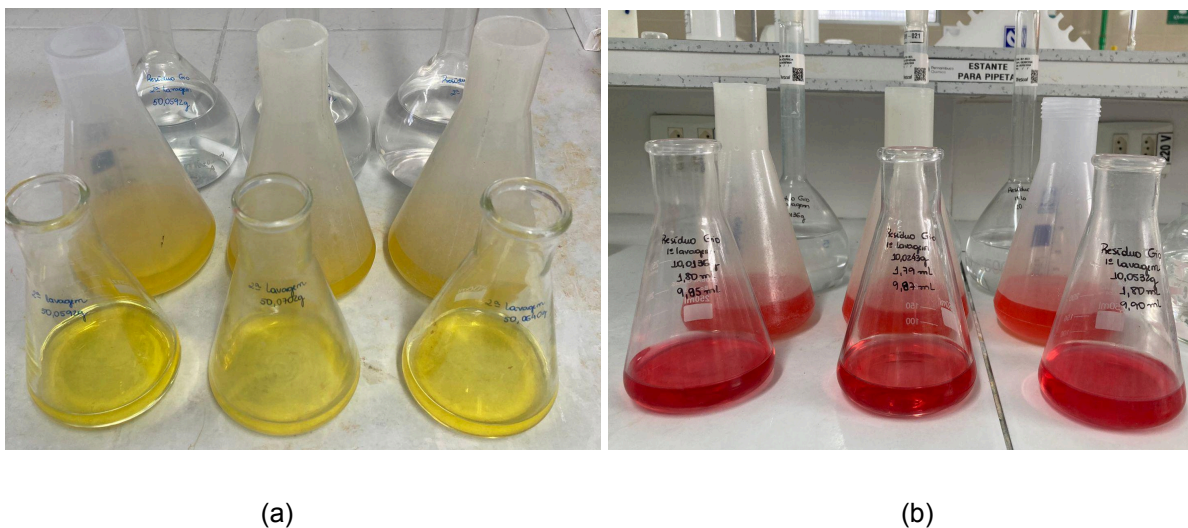
F: fator de correção do HCL 2N

30: Constante que representa a massa equivalente do SiO_2

PA: peso da amostra

As soluções de HCl 2N utilizadas nos ensaios foram da marca Dinâmica e foram fatoradas pelo fornecedor, já a solução indicadora de vermelho de metila foi preparada no laboratório da empresa.

Figura 9: Triplicatas das amostras da água de lavagem do resíduo de areia. Em (a) mostra como ficam as amostras antes da titulação; em (b) tem-se as amostras após o término das titulações.



Fonte: Autora, 2024.

3.2.2 Fluorescência de Raio-X

A análise por fluorescência de raios-X foi conduzida para determinar o teor de sílica presente na areia residual. Para esse fim, a areia decantada no béquer foi transferida para um cadinho de porcelana e submetida à secagem em estufa da marca *Fanem*, modelo 311 CG, por 24 horas a 150 °C. Após esse período, a amostra foi colocada em um dessecador por 30 minutos. Posteriormente, uma porção dessa areia foi separada para a análise por fluorescência de raios-X, enquanto o restante do material foi reservado para possíveis análises subsequentes. As análises de raio-x foram realizadas pela indústria fornecedora de areia da empresa parceira, utilizando o equipamento *RX Epsilon3 XL*, da marca Panalytical.

Este equipamento utilizou a técnica de fluorescência de raios-x por energia dispersiva para a análise de materiais. A EDXRF é uma técnica não-destrutiva que permite a análise qualitativa e quantitativa dos elementos presentes em uma amostra. Os parâmetros utilizados para a análises da areia virgem podem ser vistos na Tabela 01.

Tabela 01: Parâmetros analíticos da areia virgem.

Composto	Teor mínimo (%)	Teor máximo (%)
SiO₂	98,00	100,00
Al₂O₃	-	2,200
Fe₂O₃	0,002	0,048
TiO₂	-	-

Fonte: Autora, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 02 apresenta os resultados do valor médio obtido após a realização de triplicatas de análises para determinar os teores de óxido de sódio presentes nas águas de lavagem. Observa-se que as concentrações desse composto são elevadas em comparação àquelas encontradas em silicatos produzidos com areia virgem. Considerando que o teor de Na_2O em silicatos fabricados com areia virgem pode variar, em média, entre 8,00% e 15%, dependendo do tipo de silicato a ser produzido. A última lavagem não apresentou um resultado significativo, por isso, consideramos apenas as duas primeiras lavagens. Os teores de SiO_2 presentes na água de lavagem não apresentaram valores relevantes e, por este motivo, não foram considerados para discussão.

Tabela 02: Resultado médio das águas de lavagem.

AM01	AM02	AM03	AM04	AM05	AM06	MÉDIA
% Na_2O	% Na_2O	% Na_2O	% Na_2O	% Na_2O	% Na_2O	% Na_2O
14,11	10,85	13,75	14,19	12,23	11,69	12,80

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 03 apresenta os resultados do somatório médio obtido após a realização de análises para determinar os teores de dióxido de silício. As amostras apresentaram valores satisfatórios em relação à quantidade de SiO_2 , considerando que esse teor presente na areia virgem apresenta valores variando entre 98% a 100%.

Tabela 03: Resultado médio das análises de fluorescência de raio-x

Composto	Teor (%)
Al_2O_3	0,148
SiO_2	99,009
TiO_2	0,344

Fe₂O₃	0,291
C\$	0,208

Fonte: Autora, 2024.

Ao analisarmos os resultados apresentados na Tabela 02, observamos que as amostras possuem uma alcalinidade significativa, com uma média de 12,80%. Já a Tabela 03 mostra que há 99,009% de sílica para reagir. Se considerarmos 100 g de resíduo, temos que 83,08% corresponde a areia recuperada, e 16,92% de solução alcalina. Normalmente, esse resíduo de areia é descartado e, ao mesmo tempo, é comprado matéria-prima para nova fabricação. A ideia central é que, em vez de descartar o resíduo, ele possa ser reaproveitado, reduzindo a quantidade de compra de areia e soda cáustica.

Uma fórmula padrão de silicato de sódio, para uma produção de 7.200 Kg de silicato são necessários:

- 3.000 Kg de areia;
- 3.000 Kg de soda cáustica líquida;
- 1.200 Kg de água

Devemos considerar que da quantidade total de soda cáustica líquida utilizada no processo, apenas 1.500 Kg é NaOH. Portanto, se utilizarmos 1000 Kg de água de lavagem com uma média de 12,80% de alcalinidade, teremos 128 Kg de NaOH. Logo, em vez de serem necessários 1.500 Kg de NaOH, teremos que usar apenas 1.372 Kg, mas como utilizamos uma solução de NaOH, então serão necessários 2.744 Kg.

Uma formulação proposta com a utilização do resíduo é a seguinte:

- 2.744 Kg de soda cáustica líquida;
- 2.000 Kg de areia virgem;
- 1.000 Kg de areia recuperada;
- 1.000 Kg de água de lavagem (com 12,80% de alcalinidade);
- 200 Kg de água limpa

Considerando o custo para a produção de silicato, podemos calcular utilizando o preço médio por tonelada das matérias-primas.

- NaOH: R\$3.100/tonelada;

- Areia: R\$190/tonelada;
- Água: consideramos custo zero.

Portanto, com base nesses valores, a produção de silicato sódio sem a utilização do resíduo custa, aproximadamente, R\$9.870/batelada. Já a produção de silicato com a formulação proposta utilizando o resíduo de areia custará, aproximadamente, R\$8.886,4/tonelada. Ou seja, teremos uma economia de R\$983,6/batelada. Se tivermos produção de 22 bateladas/mês, por ano teremos 264 bateladas. Ou seja, se em uma batelada produzimos 7.200 Kg de silicato, em um ano teremos 1.900.800 Kg de silicato.

Anualmente são gerados aproximadamente 142.000 Kg de resíduo e este não recebe nenhum tratamento antes do descarte. Conforme estudo, o resíduo apresenta 83,08% de areia e 16,92% de solução alcalina. Ou seja, 118.000 Kg corresponde a areia e 24.026,4 Kg de solução alcalina. Portanto, com a formulação proposta é possível fazer 24 bateladas com areia recuperada e solução alcalina, e 94 bateladas apenas com a areia recuperada.

5 CONCLUSÃO

Apesar de ser uma alternativa precursora ao adotar o processo de lavagem como uma alternativa para reutilizar a areia descartada na produção de silicato de sódio, os resultados obtidos após estudo nos mostram que o resíduo é possível de ser reaproveitado pelas características químicas que possui.

Para os resultados do teor de Na_2O presente nas águas de lavagem, a média dos valores se mostrou bem próxima do resultado de alcalinidade do silicato de sódio produzido com areia virgem. Assim como o teor de SiO_2 presente no resíduo apresentou um valor médio em que é possível compreender que ainda há no material uma grande quantidade de sílica que não reagiu.

Após a finalização da pesquisa, foi possível constatar que é viável a reutilização deste resíduo de areia em novas produções de silicato de sódio. Para isto tornar-se real, será necessário realizar alguns ajustes no processo de produção. Uma alternativa para o reaproveitamento deste resíduo é montar um sistema de lavagem em série, fazendo uso de big bag para armazenar a areia lavada, e uma tubulação que bombeie a água de lavagem para um tanque de armazenagem para posterior uso em produções.

De modo a confirmar as informações levantadas na pesquisa, deve ser realizado um estudo-piloto que contribuirá para os resultados encontrados. Os testes a serem realizados nesse estudo-piloto devem avaliar a eficiência da reação e a qualidade do silicato de sódio produzido com a adição do resíduo.

Do ponto de vista econômico, poderíamos pensar neste reaproveitamento uma vez que o custo da formulação sugerida fornece uma redução de R\$983,6/batelada de silicato, isso representa uma economia de R\$259.670,4/ano.

Por fim, a reutilização deste resíduo de areia no processo de produção do silicato de sódio não só traz uma economia considerável, mas também alinha a empresa com práticas sustentáveis, o que pode agregar valor à sua imagem e abrir novas oportunidades de negócios. Além disso, a empresa poderá economizar em custos de descarte e transporte de resíduos. Isso sem contar o benefício ambiental, uma vez que a reutilização diminui o volume de resíduos enviados para aterros ou para outras formas de descarte.

REFERÊNCIAS

- ABIQUIM. *In: Desempenho anual da Indústria Química Brasileira*. [S. l.]. Disponível em: <https://abiquim.org.br/industriaQuimica>. Acesso em: 10 jul. 2024
- BRAGA, P.F.A. *et al.* **Areia quartzosa para aplicações industriais: beneficiamento**. *In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, n° 18, 2019, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2019, p. 1-8.
- FAWER, Matthias; CONCANNON, Martin; RIEBER, Wolfram. Life Cycle Inventories for the Production of Sodium Silicates. **LCA Case Studies**, Landsberg, Alemanha, p. 207-212, 23 jun. 1999.
- LIMA, L. L. V. **Fundição de precisão: produção de casca cerâmica a partir de óxido de alumínio e silicato de sódio com aplicação de CO₂**. 2022. Monografia (Bacharel em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- LINK, M. **Influência da razão SiO₂/Na₂O do silicato de sódio na defloculação de suspensões aquosas empregadas na conformação por colagem de barbotinas**. 2013. Dissertação (Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- LUZ A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais**. 2 ed. Parte II: Rochas e minerais industriais: usos e especificações. Cap. 5: Areia Industrial. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.
- MORDOR Intelligence. *In: Tamanho do mercado de silicato de sódio e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029)*. [S. l.], 1 jan. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/sodium-silicate-market>. Acesso em: 29 jul. 2024
- NUNES, Shirlle. **Tratamento de água de produção de petróleo visando o aproveitamento na obtenção de barrilha**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2013.
- PRATES, C. D. **Transformação de rejeitos da mineração de ferro e serpentinito em silicatos e outros produtos de valor agregado**. 2022. Tese (Departamento de Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

PRODANOV, C. C. **Metodologia do trabalho científico** [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico / Cleber Cristiano Prodanov, Ernani Cesar de Freitas. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SHARIF, Samia. Fabrication Of Water Glass Adhesive Silicate From Amorphous Silica Of Rice Husk Ash. *In*: SHARIF, Samia. **Fabrication Of Water Glass Adhesive Silicate From Amorphous Silica Of Rice Husk Ash**. 2018. Dissertação (Master Of Science In Glass And Ceramic Engineering) - Bangladesh University Of Engineering And Technology Dhaka, Bangladesh, [S. l.], 2012.

SANTOS, M. L. V. **Reutilização da areia residual de fundição para fabricação de moldes para peças metálicas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade do Sul de Santa Catarina, [S. l.], 2018.

SILICATO DE SÓDIO. **Diatom**, 2023. Disponível em: <http://www.diatom.com.br/pt-BR/produtos/silicato/silicato-de-sodio>. Acesso em: 11 de julho de 2023.

SILVA, Illana. Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos. **Revista Virtual de Química ISSN 1984-6835**, [s. l.], v. 4, ed. 1, p. 73-82, 7 set. 2024. DOI 10.5935/1984-6835.20120005. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/pdf/v4n1a05>. Acesso em: 9 jul. 2024

SOUZA, M. T. Caracterização de areias de quartzo do estado de Mato Grosso do Sul para aplicações industriais. **Cerâmica**, [s. l.], v. 60, n. 356, p. 569-574, 2014. DOI <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/sQnCJsVcCN4w3CHZ8qCbwrC/#>. Acesso em: 11 jul. 2023.

VOGT, J.C.; LAMEIRAS, F.S. **Processo de obtenção do silicato de sódio em pó a partir de rejeito arenoso oriundo do processo de concentração de minério de ferro** WO2021035318A1. Depósito: 15 jul. 2020. Concessão: 4 mar. 2021. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/14/22/6f/3891ccda1ab2b4/WO2021035318A1.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2023.