

Universidade Federal De Minas Gerais

Instituto de Ciências Exatas

Departamento de Química

Yasmin Alves De Carvalho

**PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO A PARTIR DE AREIA
PARA A APLICAÇÃO NA SÍNTESE DE GEOPOLÍMEROS**

Belo Horizonte

2025

Yasmin Alves De Carvalho

**PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO A PARTIR DE AREIA
PARA A APLICAÇÃO NA SÍNTESE DE GEOPOLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Química do Instituto de
Ciências Exatas, da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientadora: Ana Paula De Carvalho Teixeira

Coorientador: Rochel Montero Lago

Belo Horizonte

2025

UFMG

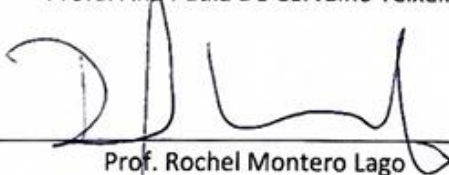
COLEGIADO DE QUÍMICA
Instituto de Ciências Exatas
Fone: (031) 3409-5799/6386
E-mail: colgradqui@icex.ufmg.br

Ata da sessão de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Química Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais, da aluna Yasmin Alves De Carvalho, nº de registro 2020052754.

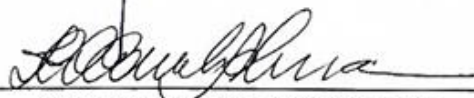
O Trabalho de Conclusão de Curso da aluna **Yasmin Alves De Carvalho**, intitulado **"Produção de silicato de sódio a partir de areia para a aplicação na síntese de geopolímero"**, foi avaliado e aprovado pela Banca Examinadora constituída por Profa. Flávia Cristina Camilo Moura (DQ - UFMG), Me. Ana Luisa Abrantes Simões (DQ - UFMG), Prof. Rochel Montero Lago (DQ - UFMG), coordenador do trabalho de conclusão de curso, e Profa. Ana Paula De Carvalho Teixeira (DQ - UFMG), orientadora do trabalho de conclusão de curso, no dia 03 de dezembro de 2025.



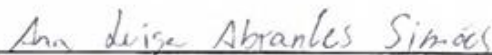
Profa. Ana Paula De Carvalho Teixeira



Prof. Rochel Montero Lago



Profa. Flávia Cristina Camilo Moura



Me. Ana Luisa Abrantes Simões



Documento assinado digitalmente
DALVA ESTER DA COSTA FERREIRA SANTOS
Data: 10/12/2025 14:09:40-0300
Verifique em <https://validar.jc.gov.br>

Prof. Dario Windmöller / Profa. Dalva Ester Costa Ferreira
Coordenador / Vice coordenadora dos Cursos de Graduação em Química e Química Tecnológica
ICEx -UFMG

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão à minha família por toda a paciência, apoio e compressão incondicional ao longo destes anos. Agradeço também aos meus amigos, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, e aos meus companheiros de laboratório. Vocês me ajudaram de diversas formas, oferecendo um ombro amigo, um ouvido atento, uma mãozinha quando tudo parecia demais, um chocolate para alegrar e, às vezes simplesmente sendo *kindred spirits* nessa jornada.

Também agradeço aos meus orientadores pelos conselhos, mentoria, paciência e empatia não somente durante a construção deste trabalho, mas ao longo de todo o tempo em que convivemos e em que pude aprender com vocês em diversos projetos.

Não poderia deixar de agradecer à FAPEMIG, pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa, ao Centro de Microscopia da UFMG, pelas imagens de MEV que enriqueceram este trabalho e ao Escalab pela disponibilização do espaço e infraestrutura.

Enfim, a cada pessoa e instituição que, de alguma forma, contribuiu para que eu chegasse até aqui, deixo meu sincero agradecimento. Sou verdadeiramente grata.

Dedico este trabalho a todos que estiveram
ao meu lado durante esta caminhada.

RESUMO

Apesar de haver inúmeros estudos que destacam as vantagens do emprego de geopolímeros, sua aplicação ainda enfrenta impedimentos, principalmente devido ao elevado custo de sua produção em comparação com os materiais usualmente empregados nas áreas no qual este possui potencial de uso. Observa-se que o silicato de sódio, um dos principais constituintes do geopolímero, contribui consideravelmente nas emissões de dióxido de carbono e consumo energético associado à sua cadeia produtiva, além de contribuir no alto custo final do produto. Assim, este trabalho propõe uma investigação de condições reacionais de síntese de silicato de sódio ao propor um método alternativo de síntese de silicato de sódio que utiliza um rejeito de areia industrial como fonte de sílica, dispensa altas temperaturas e não gera CO_2 como produto de reação. Para isto, realizou-se experimentos variando a relação molar SiO_2/NaOH (1,7 e 2,5), a temperatura (450°C e 550°C), o tempo de reação (150 min e 300 min), além da adição controlada de água de forma a avaliar as condições ideais para a obtenção de um material sólido com um rendimento mínimo de 90%. A partir da reação ideal (relação molar SiO_2/NaOH de 2,5, 450°C, 150 minutos e com adição de 40 mL de água), se obteve um produto final com rendimento de 95,5%. Este silicato de sódio foi submetido a um estudo de suas características por meios de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), difração de raios X (DRX), além de uma titulação de determinação de teores de óxido de sódio (Na_2O) e dióxido de silício (SiO_2), permitindo determinar o módulo de sílica do produto obtido. Ainda, o silicato de sódio produzido pôde ser aplicado para a produção de geopolímeros em uma formulação com adição de escória, gerando geopolímeros com resistência a compressão de aproximadamente 30MPa. Em vista disto, o método proposto demonstrou ser uma possibilidade para aplicabilidade na indústria para sintetizar um silicato de sódio ambientalmente e financeiramente factível.

Palavras-chave: Silicato de sódio, Geopolímero, areia, rejeito.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Emissão anual de dióxido de carbono na América do Sul e no Brasil no período de 2000-2022.....	9
Figura 1.2 – Gráfico de emissão de kg CO ₂ /t cimento ao redor do mundo de 1990-2022.....	10
Figura 1.3 – Mercado de silicato de sódio – crescimento por região.....	11
Figura 2.1 - Representação esquemática da camada de alumina e sílica na caulinita.....	15
Figura 3.1 – Etapas de produção de silicato de sódio a) pasta obtida na mistura de areia, hidróxido de sódio e água; b) silicato de sódio obtido.....	18
Figura 3.2 – Montagem da titulação de determinação do teor de Na ₂ O.....	19
Figura 3.3 – Corpos de prova durante o processo de cura.....	20
Figura 4.1.1 - Resultado de DRX de uma amostra de areia comparado com uma referência..	21
Figura 4.1.2 – Espectro de FTIR de uma amostra de areia.....	22
Figura 4.1.3 –Imagens de MEV de uma amostra de areia.....	23
Figura 4.1.4 - Resultado de DRX de uma amostra de caulinita antes da calcinação comparado com uma referência.....	23
Figura 4.1.5 - Resultado de DRX de uma amostra de metacaulinita comparado com duas referências.....	24
Figura 4.1.6 – Espectros de infravermelho antes (caulinita) e depois (metacaulinita) o processo de calcinação.....	25
Figura 4.1.7 – Imagens de MEV da amostra de caulinita antes do processo de calcinação.....	25
Figura 4.1.8 – Imagens de MEV da amostra de metacaulinita após o processo de calcinação....	26
Figura 4.2.1 – Diagrama de fases de teste de condições reacionais de silicato de sódio.....	27
Figura 4.2.2 - Resultado de DRX de silicato de sódio (EXP5) comparado com uma referência.....	29
Figura 4.2.3 – Espectro de FTIR de silicato de sódio (EXP5).....	30
Figura 4.2.4 – Imagens de MEV de silicato de sódio (EXP5).....	30
Figura 4.3.1 – Geopolímeros produzidos. a) geopolímeros no molde com presença de eflorescência; b) aparência após retirada dos moldes; c) geopolímero desfeito.....	32
Figura 4.3.2 – Geopolímeros produzidos. a) geopolímero de proporção SiO ₂ /Na ₂ O de 1,4; b) geopolímero de proporção SiO ₂ /Na ₂ O de 1,7.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação da influência da relação molar de NaOH/SiO ₂	28
Tabela 4.2 – Comparação da influência da temperatura.....	28
Tabela 4.3 – Comparação da influência do tempo de reação.....	28
Tabela 4.4 – Comparação da influência de adição de água.....	29
Tabela 4.5– Resultados de titulação de óxido de sódio para a reação EXP5.....	31
Tabela 4.6 – Resultados de titulação de dióxido de silício para a reação EXP5.....	31
Tabela 4.7 – Resultados de teste de resistência à compressão.....	33

LISTA DE ABREVIACÕES

DRX: Difro de raios X.

Escalab: Centro de Escalonamento de Tecnologias e Modelagem de Negócios

GRUTAM: Grupo de Tecnologias Ambientais

FTIR: Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

PVC: Policloreto de vinila

SNIC: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

UFMG: Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 SILICATO DE SÓDIO	13
2.2 CAULINITA E METACAULINITA	14
2.3 GEOPOLÍMEROS.....	15
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	17
3.1 CALCINAÇÃO DA CAULINITA	17
3.2 PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO	17
3.3 DETERMINAÇÃO DE SiO_2 E NaO_2	18
3.4 PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMERO	19
3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	20
3.7 CARACTERIZAÇÃO INSTRUMENTAIS	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS	21
4.1.1 <i>Areia</i>	21
4.1.2 <i>Caulinita</i>	23
4.2 PRODUÇÃO DE SILICATO DE SÓDIO	26
4.2.1 <i>Caracterização do silicato de sódio</i>	29
4.3 PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS.....	32
5. CONCLUSÃO.....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

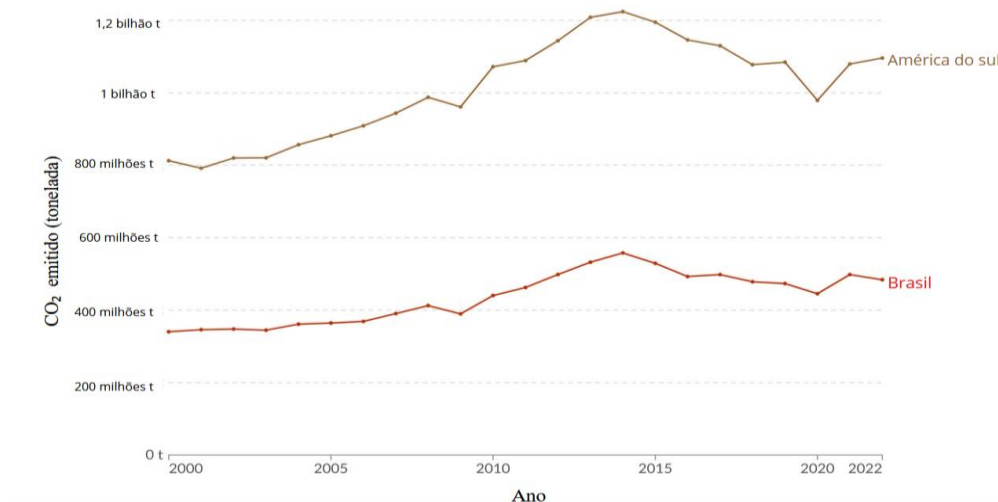
1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da preocupação mundial com questões ambientais, éticas e sociais, como o consumo de energia limpa e o esgotamento de recursos, o mercado passa a se adequar às atuais exigências. Desta forma, surge o mercado sustentável, um conceito que impulsiona diversos setores à busca por reemprego de materiais, além de inovações tecnológicas e metodológicas que se alinhem com a ideologia prevalente (SILVA *et al.*, 2025).

Na química, em específico, a ideia do sustentável se manifestou de forma mais ativa aproximadamente nos anos 80. Devido a acidentes e contaminações graves, houve uma pressão civil e governamental para a adoção de práticas de sustentabilidade (POPI; PINSKY; KULAY, 2020) e esta tendência, mais especificamente nos últimos anos, se comprova, com o desenvolvimento de tecnologias alinhadas com os 12 princípios da química verde publicado em 1998 (HISTORY[...], 2017).

Entre os diversos interesses atuais, um que se destaca fortemente é a redução de gases de efeito estufa, em particular do dióxido de carbono (CO₂). Somente em 2023, o Brasil chegou a emitir 486,47 milhões de toneladas de CO₂, chegando a contribuir com aproximadamente 44% de todo o gás carbônico emitido na América latina, mostrado no gráfico da figura 1.1. Também em 2023, o Brasil figurou entre os maiores emissores de gases de efeito estufa do mundo, com uma emissão per capita de 6,0 toneladas de CO₂ — um aumento de 0,1% em relação a 2022 —, ocupando a sexta posição global de maiores emissores, ao lado de países como China, Estados Unidos, Índia e Rússia (CRIPPA *et al.*, 2024).

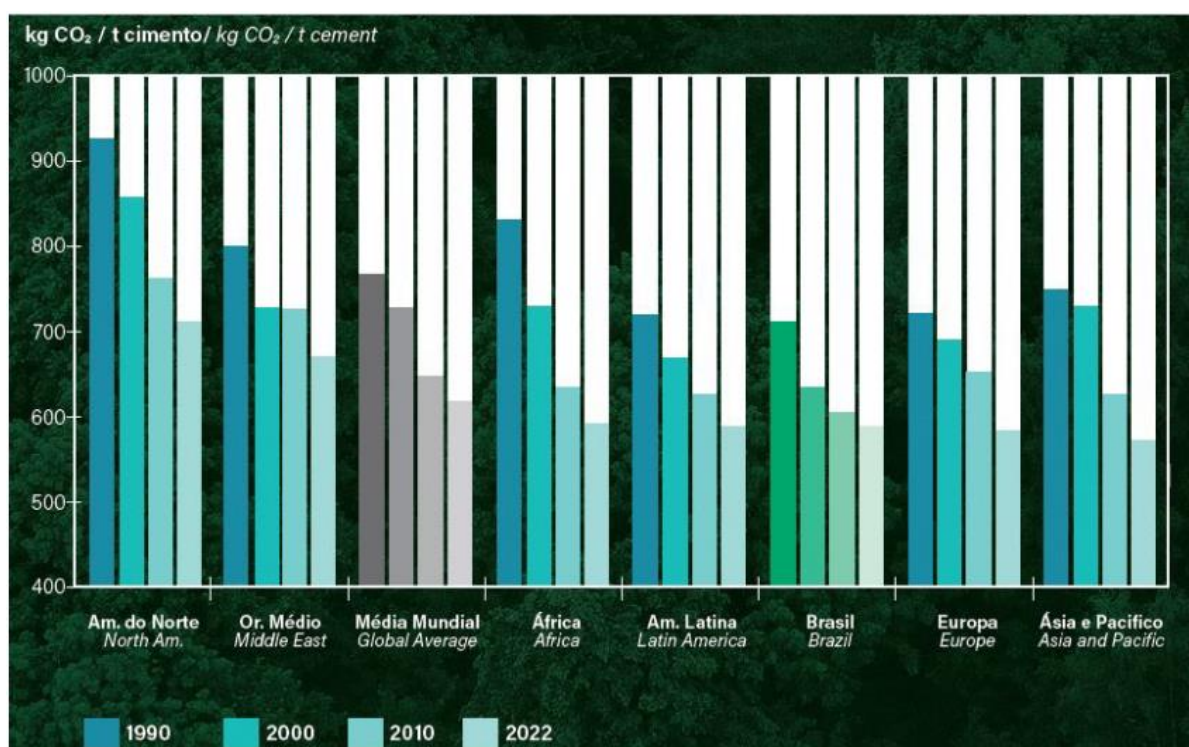
Figura 1.1 – Emissão anual de dióxido de carbono na América do Sul e no Brasil no período de 2000-2022



Fonte: (RITCHIE; ROSER, 2020).

Nesta conjectura, é necessário prosseguir com a busca por soluções que reduzam o impacto ambiental dos diversos setores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, dentre eles, a indústria cimentícia se torna um foco. De acordo com o Relatório Anual de 2023 do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), em 2022 o Brasil registrou emissões de 580 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzida. Resultado notavelmente menor se comparado à média mundial de 608 kg CO₂/t cimento, representado no gráfico da figura 1.2. Este desempenho, por sua vez, foi obtido sem afetar a eficiência energética do processo e melhorando a relação clínquer/cimento (SNIC, 2023), no entanto, apesar de esforços do setor voltados à sustentabilidade, ainda há muito a ser feito.

Figura 1.2 – Gráfico de emissão de kg CO₂/t cimento ao redor do mundo de 1990-2022.



Fonte: Relatório Anual 2023. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2023. 48 p.)

Neste cenário em que, juntamente com o esgotamento de recursos e aumento do aquecimento global – devido à crescente emissão de gás carbônico –, a adoção de diferentes estratégias para a gradual substituição do cimento Portland na construção civil é uma opção notória. Nisto, geopolímeros, materiais de aluminossilicato ativados por um álcali se tornam uma alternativa atraente (FURTOS *et al.*, 2024). Isto por possuir uma pegada de carbono menor e pela capacidade de reaproveitar recursos, o que atende a nova economia circular, que nada mais se trata do que a reintegração de resíduos na cadeia produtiva a fim de diminuir os seus

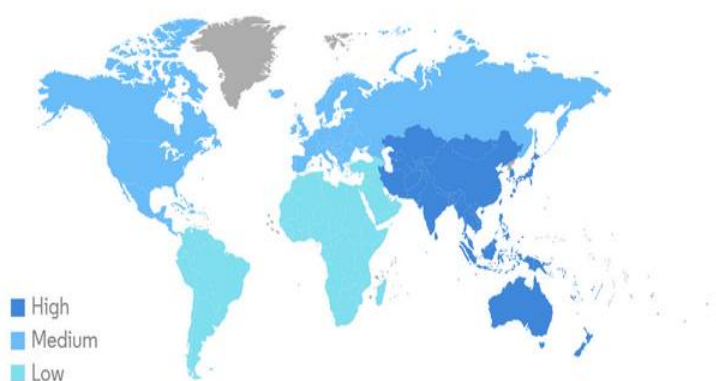
impactos, além de repensar novos meios produtivos (MICHELIN; GRUBA, 2025). Todavia, seu custo de produção e a liberação de dióxido de carbono de um de seus insumos principais impactam na sua possível execução diária e industrial (TURNER e COLLINS, 2013).

Sabe-se que o geopolímero pode ser produzido com diversos materiais precursores, em que cada um destes ao final do processo garantirá propriedades diferentes ao material produzido (DAVIDOVITS, 2015). Na produção de materiais geopoliméricos, um dos possíveis precursores que podem ser usados em formulações é o silicato de sódio. Com uma enorme versatilidade, o silicato de sódio também pode ser empregado na mineração auxiliando em processos de moagem e flotação, nas indústrias de papel, vidro e chapas metálicas. Além de atuar também como um agente aglomerante, em processos que envolvem lavagem, isto devido à sua capacidade de atuar como um ativo de detergente. Além disso, ele também é muito aplicado na produção de sílica-gel (KUDAPA, KUMAR, 2023).

Em 2023, o mercado global de silicato de sódio atingiu um valor de US\$6,62 bilhões e há uma estimativa de crescimento para US\$9,11 bilhões até 2032 (Fortune Business Insights, 2023). Atualmente, o mercado de silicato de sódio, dividido por categoria geográfica e de aplicação, demonstra um crescimento alto, principalmente na Ásia-Pacífico, visualizado na figura 1.3. A China, por exemplo, somente na indústria de papel arrecadou mais de US\$217,5 bilhões em 2022 (SILICATO[...], 2023), o que representa uma oportunidade para o mercado de silicato de sódio, não somente neste ramo, mas também com o crescimento global em sua busca como detergente, tendo os Estados Unidos como maior demanda.

Figura 1.3 – Mercado de silicato de sódio – crescimento por região

Sodium Silicate Market - Growth Rate by Region



Fonte: Silicato de Sódio Tamanho do Mercado (2023).

Na área de construção civil o silicato de sódio pode ser aplicado como impermeabilizante de pisos e paredes, além de atuar no processo de cura do cimento. Todavia, algo ainda pouco mencionado, até por se tratar de um mercado ainda em consolidação, é o seu uso como fonte de sílica amorfa na produção de geopolímeros. Entre todas as suas aplicações, na produção de geopolímero, ele atua como um reagente responsável por determinar a basicidade do meio e causar a despolimerização do metacaulim - um precursor essencial - por hidrólise alcalina, além de também poder atuar como uma fonte complementar de sílica (MOHAMED ISMAIL *et al.*, 2020).

Este insumo, em análise, representa a maior parte da composição de um geopolímero e consequentemente a maior parte da emissão de gás carbônico, sendo responsável por 67,2 % do gás carbônico total emitido (APOLONIO *et al.*, 2020). Entre os pontos que podem ser abordados, o silicato de sódio é uma opção para avaliação da possibilidade de produção de forma mais ambientalmente viável sem negligenciar a necessidade que também seja um forma economicamente e industrialmente possível. O silicato é um composto inorgânico constituído basicamente por sílica e oxigênio, é um material de aplicação industrial abrangente, cuja produção pode ser adaptada para seguir rotas mais sustentáveis em termos ambientais e financeiros.

Tendo isto em mente, em um cenário mundial com tendência ao avanço do efeito estufa nas últimas décadas, e com receptividade de medidas sustentáveis, emerge o aumento da procura e a descoberta de novas aplicações para o silicato de sódio. Além do método proposto, para alcançar os objetivos delineados foi utilizado como fonte de sílica, areia cedida por uma empresa parceira. Esta areia é proveniente de um processo de peneiramento, no qual a fração fina que não é usada no processo e normalmente é descartada foi utilizada para a produção de silicato de sódio como uma forma de agregação de valor a este rejeito. Sendo assim, este trabalho se manifesta como uma forma nova de sintetizar um silicato de sódio em condições reacionais brandas industrialmente viável, que atenda às demandas atuais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Sintetizar silicato de sódio a partir de areia para a produção de geopolímeros.

1.1.2 Objetivos específicos

- Tratar termicamente uma amostra de caulinita para a obtenção de metacaulinita;
- Caracterizar insumos utilizados para a produção do silicato de sódio e do geopolímero por DRX, MEV e FTIR;
- Produzir silicato de sódio por meio de uma rota sólida adaptada, com um rendimento mínimo de 90%;
- Caracterizar o melhor silicato produzido por meio de DRX, MEV e FTIR;
- Aplicar o silicato de sódio produzido para a produção preliminar de geopolímeros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

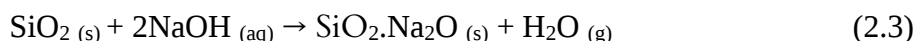
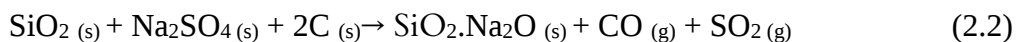
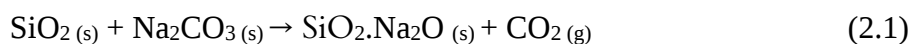
2.1 Silicato de sódio

O silicato de sódio é um composto inorgânico de fórmula geral $(\text{Na}_2\text{O})_x \cdot \text{SiO}_2$, comumente conhecido pelo nome “waterglass”, isto porque por ser um sólido solúvel em água e comumente vendido como uma solução concentrada viscosa, que se parece bastante com vidro líquido. Apesar de ter suas origens documentadas ainda no início do império romano (FONSECA, 2021), por muitos anos não se tinha interesse em estudar silicatos, então, foi somente em 1964, com o trabalho de Charles W. Lentz, que as estruturas de espécies aniônicas de silicato em soluções alcalinas foram elucidadas apropriadamente (MATINFAR; NYCHKA, 2023). Devido às suas inúmeras vantagens como, alcalinidade, abundância e inúmeras aplicabilidades e a possibilidade de ser comercializado em forma líquida, sólida ou até mesmo em gel, o silicato de sódio passou a ter visibilidade na indústria.

Em razão de suas múltiplas características, suas aplicações também são diversas. Por sua capacidade de emulsificação de óleos e gorduras, o uso de silicato de sódio em detergente tem crescido constantemente (MATINFAR; NYCHKA, 2023). Por seu potencial de defloculação, ele também pode ser empregado no tratamento de água, além de ajudar a manter a integridade do revestimento de tubulações e parar o fornecimento de água em operações de gás e óleo (KUDAPA; KUMAR, 2023). Sua capacidade de regular pH e agir como branqueador também faz com que tenha um uso extenso em indústrias de papel (KURNIAWAN *et al.*, 2022), além de diversos outros usos como estabilizador de solos, revestimento, ligante e adesivo (SHARIF, 2012).

Apesar de haver outros meios, industrialmente, o silicato de sódio pode ser produzido pelas seguintes rotas: primeiramente pela fusão da sílica, geralmente areia, com carbonato de

sódio ou sulfato de sódio, reações representadas pelas eq. (2.1) e (2.2), em temperaturas que variam de 1300° a 1400°C (FOLETTTO *et al.*, 2006). Também pela rota hidrotérmica, neste caso a fonte de sílica é adicionada a uma autoclave juntamente com uma solução de hidróxido de sódio e altos valores de temperatura e pressão (RABELLO, 2014), assim se obtendo o silicato de sódio, como representado na eq. (2.3).

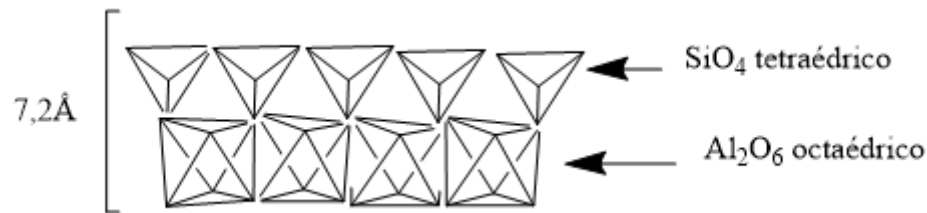


Vale ressaltar, que em ambas as rotas apresentadas, é possível se obter diferentes tipos de silicato de sódio dependendo da proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ empregada no processo, também chamado de módulo de sílica (FERREIRA, 2013). De modo geral, os silicatos de sódio podem ser classificados em três tipos, que diferem em propriedades como solubilidade em água, viscosidade e densidade, conforme a razão molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Sendo estas classificações: Metassilicato (razão = 1), dissilicato ou silicato alcalino (razão = 2), trissilicato ou silicato semi alcalino (razão = 3) (SANTOS FLÔR, 2004).

2.2 Caulinita e metacaulinita

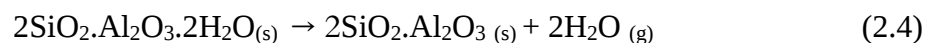
A caulinita é um mineral hidro-aluminossilicato formado naturalmente por meio do processo de intemperismo por acidificação, também conhecido como acidólise, de rochas de aluminossilicato. Sua estrutura apresenta camadas 1:1 sobrepostas de SiO_4 tetraédrica (Si^{4+}) e Al_2O_6 octaédrica (Al^{3+}), figura 2.1, em que tetraedros adjacentes se ligam por oxigênio compartilhado e os octaedros de alumina, igualmente, por meio de seis oxigênios ou hidroxilas compartilhadas (JACOB; ALISI; SURAJO, 2025). As camadas então são conectadas por meio de ligações de hidrogênio realizadas entre os oxigênios internos e grupos hidroxila compartilhados, garantindo estabilidade (NAWAZ *et al.*, 2022). A estrutura química deste mineral concede características como capacidade de troca iônica, estabilidade química, facilidade de obtenção e entre outros (CHEN *et al.*, 2023). E são esses alguns dos atributos, que despertam a atenção do uso da caulinita, para a aplicação em geopolímeros.

Figura 2.1 - Representação esquemática da camada de alumina e sílica na caulinita



Fonte: adaptado de (CHENG *et al.*, 2024)

Em difratogramas de raios X observa-se que a caulinita possui uma estrutura cristalina, o que não é muito interessante do ponto de vista de aplicação para geopolímeros já que estruturas de sílica amorfa são preferenciais por possuírem maior reatividade, o que facilita o processo de geopolimerização. Para isto, a caulinita pode ser submetida a um processo de conversão térmica em temperaturas entre 500° a 800°C, eq. (2.4) (LONGHI, 2015), em que há a retirada de seus grupos hidroxilas, transformando a caulinita em metacaulinita, sua versão amorfa.



2.3 Geopolímeros

Na década de 50, nas pesquisas de Victor Glukhovsky e Pavel Krivenko, foi criado um sistema de silicato de cálcio hidratado ativado por um álcali como sistema cimentício. Esta proposta, inspirada na formação de zeólitas a partir da sedimentação de rochas vulcânicas sob baixa temperatura e pressão, marcou o início da concepção dos geopolímeros. Entretanto, o geopolímero como conhecemos atualmente é o resultado de crescentes estudos ao redor do mundo e aprimoramentos durante várias décadas (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007).

Dentre as contribuições mais significativas nesse campo, destaca-se o trabalho de Joseph Davidovits, iniciado em 1972. Motivado por uma série de incêndios ocorridos na França nos anos anteriores, Davidovits buscava desenvolver materiais não inflamáveis (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007). Seus esforços culminaram na formulação de polímeros inorgânicos de aluminossilicato, com estrutura tridimensional amorfa a semicristalina, geralmente obtidos a temperaturas inferiores a 100 °C (DAVIDOVITS, 2015).

Desde a publicação do trabalho feito por Davidovits, inúmeros outros foram publicados explorando as possíveis aplicações destes materiais como revestimentos, material ligante, isolante térmico, material refratário, adesivos, entre outros, isso devido a características como resistência a ácido, fogo, compressão, baixa retração e condutividade térmica. No entanto, sua aplicação mais óbvia e na qual têm-se grande interesse é no campo da engenharia civil como uma alternativa para o cimento Portland utilizado atualmente e com uma diminuição significativa de emissão de CO₂ nesse setor (DAVIDOVITS, 2015).

Esses materiais são produzidos por meio de uma reação denominada de geopolimerização, em que ocorre a reação entre o silício e o alumínio de uma fonte natural amorfa como a metacaulinita juntamente com uma solução ativadora alcalina, geralmente, de silicato ou hidróxido seja de sódio ou potássio (ALBIDAH *et al.*, 2021), formando um sistema semi cristalino tridimensional de ligação covalente de unidade sialato ([Si-O-Al-O]_n) (AMRITPHALE; BHARDWAJ; GUPTA, 2019).

O processo de geopolimerização é complexo e depende de vários fatores, dentre os quais pode-se destacar a razão molar SiO₂/Al₂O₃, determinado pela composição dos precursores de geopolímero e responsável pelo tipo de monômeros sialato formados durante o processo (KRÄNZLEIN *et al.*, 2019). A razão Si/Al é importante também pelo seu papel na formação do gel sílica-alumina, responsável por promover a interação entre partículas e garantir a resistência física do geopolímero (KHALE; CHAUDHARY, 2007). Essas características estão em concordância com o que é afirmado por Davidovits, isto é que para um geopolímero tenha uma boa estabilidade é necessário que esta razão esteja em valores entre 1,6 a 2,3.

Outro fator importante é que a razão SiO₂/Na₂O, pode ser controlada por meio do acréscimo de hidróxido de sódio ou pela retirada da sílica disponível. Relações SiO₂/Na₂O maiores, assim como a relação Si/Al, tendem a aumentar a resistência do geopolímero produzido (CHO, *et al.* 2017), no entanto, um excesso de sódio na formulação pode acarretar na aparição de eflorescência. Este processo ocorre quando a água presente no composto ou a umidade absorvida na atmosfera forma uma solução com os sais dissolvidos no composto e então evapora a água deixando estes sais cristalizados na superfície do material (RIBEIRO, 2018). Isso pode causar problemas estruturais no material e consequentemente diminui sua resistência.

3. PARTE EXPERIMENTAL

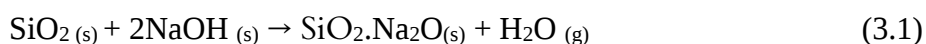
3.1 Calcinação da caulinita

A metacaulinita foi obtida a partir de um processo de tratamento térmico da caulinita Unigloss 300 fornecido pela empresa Kymera Minerals Beneficiamento e Comércio. No forno rotativo industrial Sanchis, disponibilizado pelo Centro de escalonamento de tecnologias (Escalab), a caulinita foi levada ao forno em temperatura de 700°C por duas horas e então armazenada para o uso.

3.2 Produção de silicato de sódio

O método utilizado para a produção de silicato de sódio sólido a partir de um rejeito arenoso neste trabalho é uma adaptação ao método descrito na patente WO2021/035318A1 concedida a Jordanna Vogt e Fernando Lameiras em março de 2021.

Em uma balança semi-analítica, foi pesado separadamente 100 g de areia e 170 g de hidróxido de sódio em escamas. Em um recipiente de aço inox misturaram-se os dois insumos juntamente com 40 mL de água deionizada, adicionada aos poucos, pois há um aumento de temperatura e pode ocorrer projeções, até a obtenção de uma pasta homogênea, visualizado na figura 3.1.a. Em seguida o recipiente foi levado à mufla por tempo (150 min e 300 min) e temperatura controlada (450 °C e 550 °C). Após o tempo estipulado, obteve-se o silicato de sódio sólido, por meio da reação representada na eq. (3.1), que após resfriado, foi pesado.



Foram separados aproximadamente 10 g do sólido obtido para solubilizar com 100 mL de água deionizada. É relevante destacar que ao se solubilizar o silicato de sódio, parte da areia restante do processo se deposita ao fundo, facilmente separada por filtração. A areia separada na filtração é levada à estufa em 80 °C por 7h, e após a secagem é pesada. Esta etapa é necessária para realizar-se o cálculo de rendimento da reação eq. (3.2). O líquido com silicato de sódio solubilizado restante foi armazenado para ser utilizado na determinação de dióxido de sílica (SiO₂) e óxido de sódio (Na₂O) e o silicato de sódio sólido obtido foi reservado para caracterização e uso posterior para a produção de geopolímero.

$$\text{Rendimento (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Areia}_{\text{filtrada}}}{\text{Areia}_{\text{inicial}}}\right) \times 100 \quad (3.2)$$

Em que: $\text{Areia}_{\text{filtrada}}$ = massa de areia lavada e seca restante após reação

$\text{Areia}_{\text{inicial}}$ = massa de areia utilizada para a reação

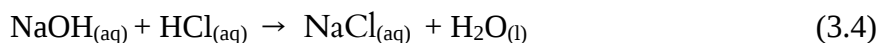
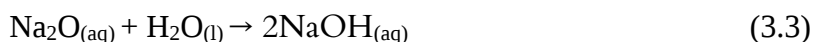
Figura 3.1 – Etapas de produção de silicato de sódio. a) pasta obtida na mistura de areia, hidróxido de sódio e água; b) silicato de sódio obtido



Fonte: Autoral

3.3 Determinação de SiO_2 e Na_2O

Para ambas as titulações, foi feita uma solução mãe de 250 mL a partir de 8 g do líquido de solubilização do silicato de sódio. Para a determinação de óxido de sódio eq. (3.3) e eq. (3.4), titulou-se 25,00 mL de solução mãe com ácido clorídrico (HCl) 1 mol/L, usando vermelho de metila como indicador, figura 3.2. A partir da equação, e os volumes obtidos a partir das titulações, se obtém a porcentagem de Na_2O na amostra eq. (3.5).



$$\% \text{Na}_2\text{O} = \frac{C \times \bar{V}_{\text{Na}_2\text{O}} \times FD \times MM}{2 \times m_{\text{amostra}} \times 1000} \quad (3.5)$$

Em que: C = concentração do titulante;

$\bar{V}_{\text{Na}_2\text{O}}$ = volume gasto de titulante;

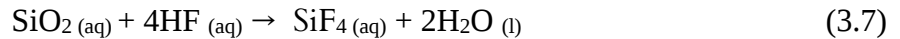
FD = fator de diluição (neste caso, 10 vezes);

MM = massa molar de Na_2O (61,98 g/mol);

m_{amostra} = massa de silicato de sódio solubilizado;

Para a determinação de dióxido de silício eq. (3.6) e eq. (3.7), pesou-se em um erlenmeyer 2,5 g de fluoreto de sódio na balança analítica, então adicionaram-se 100mL de

água deionizada e 1,0mL de ácido clorídrico 1 mol/L e então misturou até que o fluoreto de sódio dissolvesse completamente, em seguida, adicionou-se 25,00ml de solução mãe e vermelho de metila. Novamente, a partir da equação, e os volumes obtidos a partir das titulações, se obtém a porcentagem de SiO₂ na amostra eq. (3.8).



$$\% \text{SiO}_2 = \frac{C \times (\bar{V}_{\text{SiO}_2} - \bar{V}_{\text{Na}_2\text{O}}) \times FD \times MM}{4 \times m_{\text{amostra}} \times 1000} \quad (3.8)$$

Em que: C= concentração do titulante;

$\bar{V}_{\text{SiO}_2}$ = volume gasto de titulante na determinação de SiO₂;

$\bar{V}_{\text{Na}_2\text{O}}$ = volume gasto de titulante na determinação de Na₂O;

FD = fator de diluição (neste caso, 10 vezes);

MM = massa molar de SiO₂ (60,08 g/mol);

m_{amostra} = massa de silicato de sódio solubilizado;

Figura 3.2 – Montagem da titulação de determinação do teor de Na₂O



Fonte: Autoral

3.4 Produção de geopolímero

Para a produção de um geopolímero de boa qualidade, é essencial desenvolver uma formulação baseada nos resultados obtidos nas caracterizações e na determinação dos teores de dióxido de silício e óxido sódio do silicato de sódio. Essa formulação deve considerar

adequadamente as proporções de metacaulim e silicato de sódio a serem utilizados, assim como a se há necessidade de adição de hidróxido de sódio, água ou outros componentes. Como esta etapa se trata de um processo complexo e por não se tratar do foco deste trabalho, esta etapa não será discutida em detalhes.

No geral, para a produção do geopolímero, seguindo as formulações elaboradas em outros trabalhos do grupo, adicionaram-se em proporções definidas de silicato de sódio sólido produzido e metacaulim, além de água, misturando-se primeiramente os secos para em seguida se adicionar água aos poucos, misturou-se até que se obtivesse uma massa lisa e brilhante. Em seguida, em formas de PVC, previamente untadas com um óleo vegetal, despejou-se a massa. Para garantir que não houvesse bolhas de ar na massa, algo que pode atrapalhar na resistência do material após a cura, levou-se a forma preenchida para uma mesa vibratória por aproximadamente 2 minutos. Após este processo as formas podem ser guardadas em um lugar fresco, cobertas por um saco plástico - importante para que as formulações não percam água rápido demais - durante 7 dias.

Figura 3.3 – Corpos de prova durante o processo de cura



Fonte: Autoral

3.6 Resistência à compressão

As medidas de resistência à compressão foram realizadas em uma prensa hidráulica digital 100T, modelo I-3001-C da marca Contenco, utilizado para ensaios de compressão axial e diametral conforme a ABNT NBR 5739, em que corpos de prova de 10cmx20cm são submetidos a valores graduais de força até que ocorra o seu rompimento.

3.7 Caracterização instrumentais

Para este trabalho foram realizadas caracterizações instrumentais como difração de raios X realizados pelo departamento de química da UFMG, no difratômetro de raios X Anton Paar

XRDynamic 500 com geometria Bragg-Brentano e detector tubo de Cobre de voltagem de 40kV com a coleta dos difratogramas realizada com passo angular de $0,05^\circ$ e o tempo por passo de 24,982 s). A microscopia eletrônica de varredura foi realizada pelo Centro de Microscopia da UFMG, no Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 200 FEG a voltagem de 15KV. E espectroscopia de infravermelho realizado no laboratório GRUTAM Tecnologias Ambientais, no Bruker ALPHA equipado com o Módulo Universal de Amostragem ATR, operando no modo de transmissão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

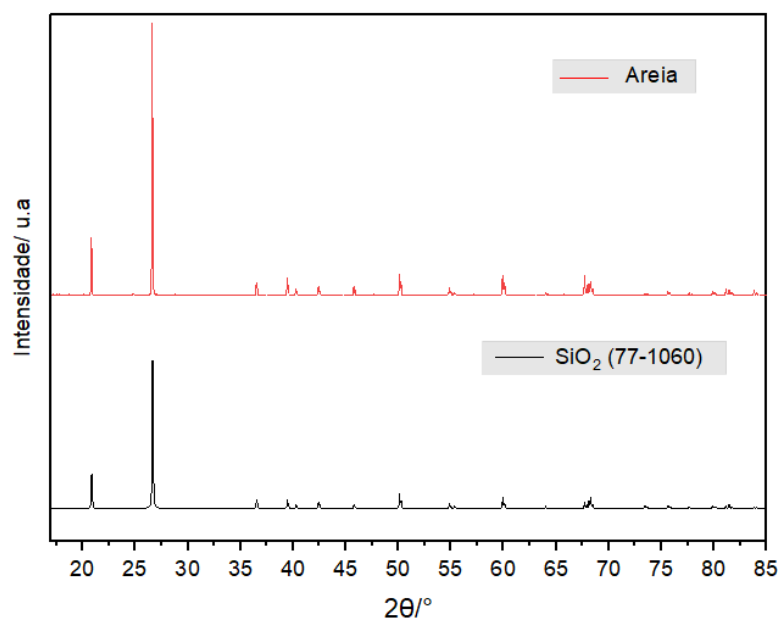
4.1 Caracterização dos insumos

As análises de caracterização são de suma importância para se avaliar as características morfológicas, químicas e estruturais não somente dos insumos, mas também do material obtido para certificar suas características, ordenar as informações reunidas e relacioná-las com o desempenho esperado.

4.1.1 Areia

A areia utilizada para a produção do silicato de sódio foi caracterizada por DRX (figura 4.1.1), FTIR (figura 4.1.2) e MEV (figura 4.1.3), demonstrados abaixo.

Figura 4.1.1 - Resultado de DRX de uma amostra de areia comparado com uma referência



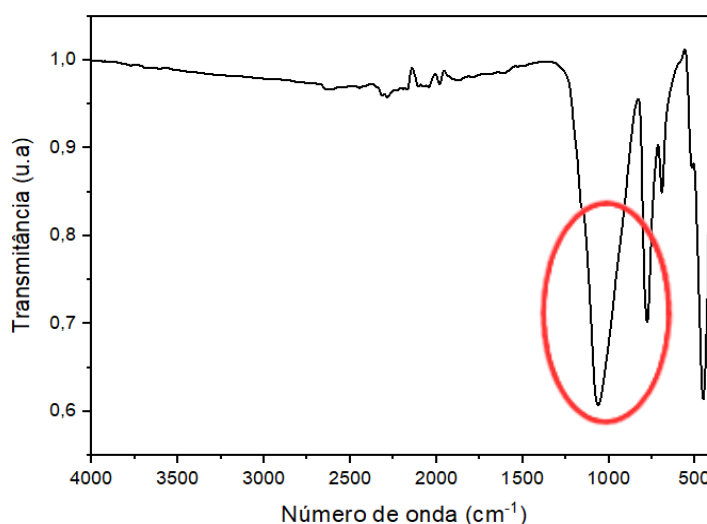
Fonte: Autoral

A técnica de DRX oferece informações sobre a cristalinidade da amostra, algo que é necessário determinar para a amostra de areia. O difratograma apresentado na figura 4.1.1,

demonstra a presença de uma amostra totalmente cristalina, constatado a partir da clareza dos picos observados quando comparados com a referência do banco de dados, principalmente dos picos em $2\theta = 26,7^\circ$ e $2\theta = 21^\circ$ que são mais intensos e na literatura são indicados como referente a fase de quartzo (MOHAMED ISMAIL *et al.*, 2020).

A análise de infravermelho, observada na figura 4.1.2, também contribuiu para a confirmação da presença de sílica na amostra, sendo comprovado pelo aparecimento de picos próximos de 1100 cm^{-1} e 797 cm^{-1} , circutados na imagem, que são picos relacionados à ligação entre silício e oxigênio, presente em quartzo (SALAMONI *et al.*, 2025). Em relação a outras possíveis fases, não foram observados modos vibracionais.

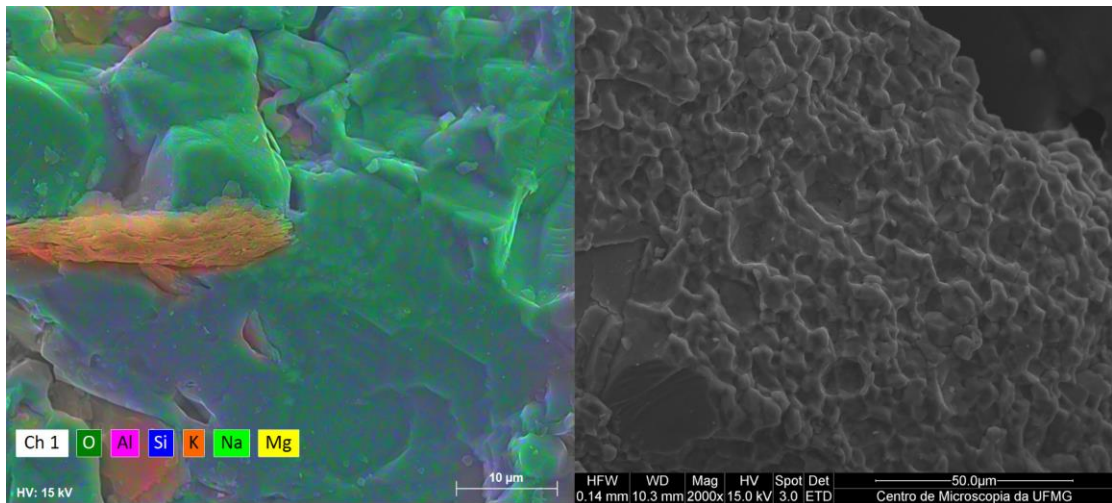
Figura 4.1.2 – Espectro de FTIR de uma amostra de areia



Fonte: Autoral

As imagens de MEV apresentadas a seguir - figura 4.1.3 - mostram a morfologia de grãos de areia aglomerados e seus constituintes, que apesar da presença de alguns metais, ainda apresenta SiO_2 em maior parte, o que corrobora com as caracterizações feitas anteriormente.

Figura 4.1.3 –Imagens de MEV de uma amostra de areia

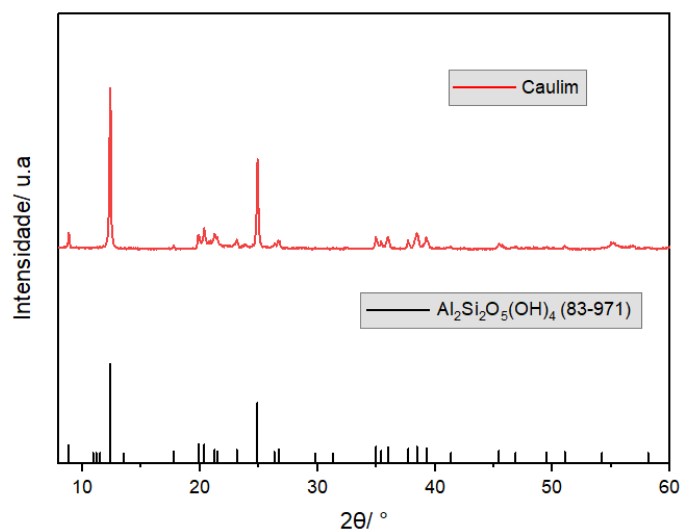


Fonte: Autoral

4.1.2 Caulinita

A caulinita é um insumo utilizado na produção do geopolímero e assim como a areia é necessário realizar sua caracterização. As propriedades desse material influenciam diretamente as características físico-químicas do geopolímero (ALGHANNAM *et al.*, 2020). A figura 4.1.4 apresenta o difratograma de raios X da amostra de caulinita utilizada neste trabalho. É possível observar picos bem definidos ($2\theta = 7^\circ$; $12,5^\circ$ e 25°) que caracterizam uma amostra cristalina de caulinita.

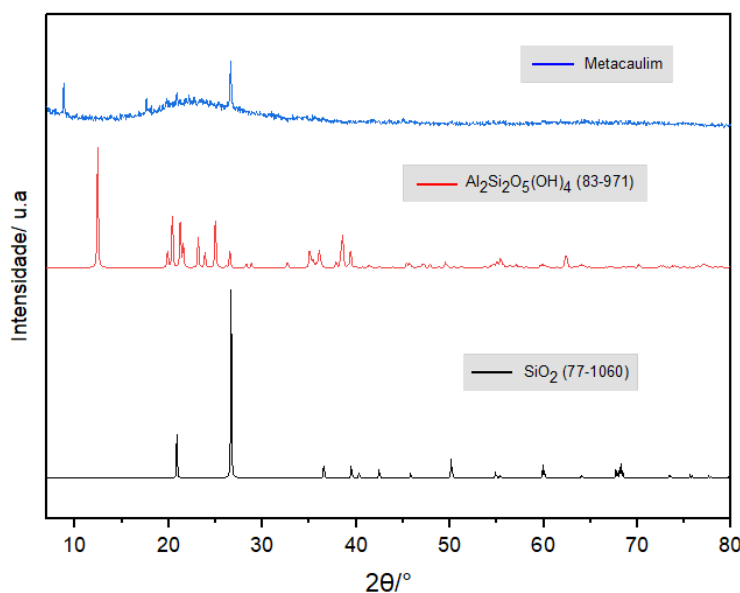
Figura 4.1.4 - Resultado de DRX de uma amostra de caulinita antes da calcinação comparado com uma referência



Fonte: Autoral

Para ser utilizado na produção de geopolímero, a caulinita deve estar amorfa, algo que aumenta a sua reatividade e para isto ela deve passar por um processo de tratamento térmico em que ocorre sua conversão em metacaulinita. É possível observar a efetividade deste processo pela mudança do padrão de difratograma em uma comparação direta com a caulinita antes do tratamento térmico, figura 4.1.5.

Figura 4.1.5 - Resultado de DRX de uma amostra de metacaulinita comparado com duas referências

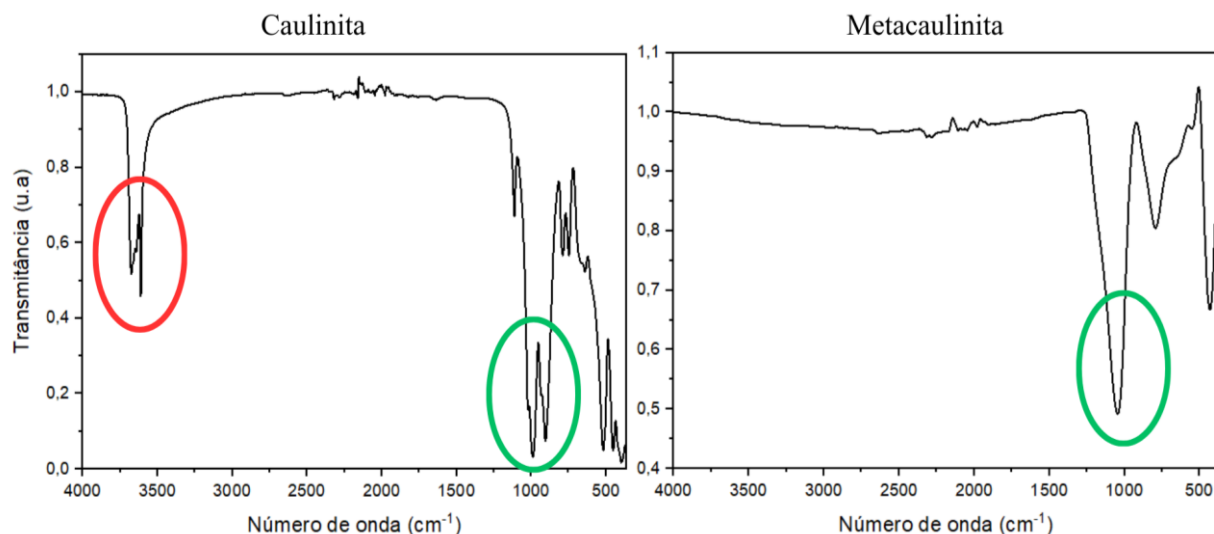


Fonte: Autoral

Posterior ao processo de calcinação, a caulinita antes em uma estrutura cristalina passa a ser amorfa e transforma-se em metacaulinita. Pelo difratograma de raios X é possível observar que a calcinação da caulinita usado foi efetiva pois apenas os picos relacionados à presença de SiO_2 ($2\theta = 26,7^\circ$ e 21°) nos compostos são identificáveis (SÁNCHEZ *et al.*, 2020), além da presença do halo difuso, indicando uma matriz amorfa da metacaulinita (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

A transformação da caulinita em metacaulinita também foi possível de ser observada pelos espectros de infravermelho das amostras antes e após o tratamento térmico. No espectro da caulinita (figura 4.1.6) na região próxima de 3600 cm^{-1} destacam-se duas bandas intensas, circulas em vermelho, associadas ao estiramento simétrico da ligação O-H internas e externas (KUMAR; LINGFA, 2020). Estas bandas desaparecem no espectro da metacaulinita, indicando que a desidroxilação da caulinita foi efetiva (FAN *et al.*, 2024).

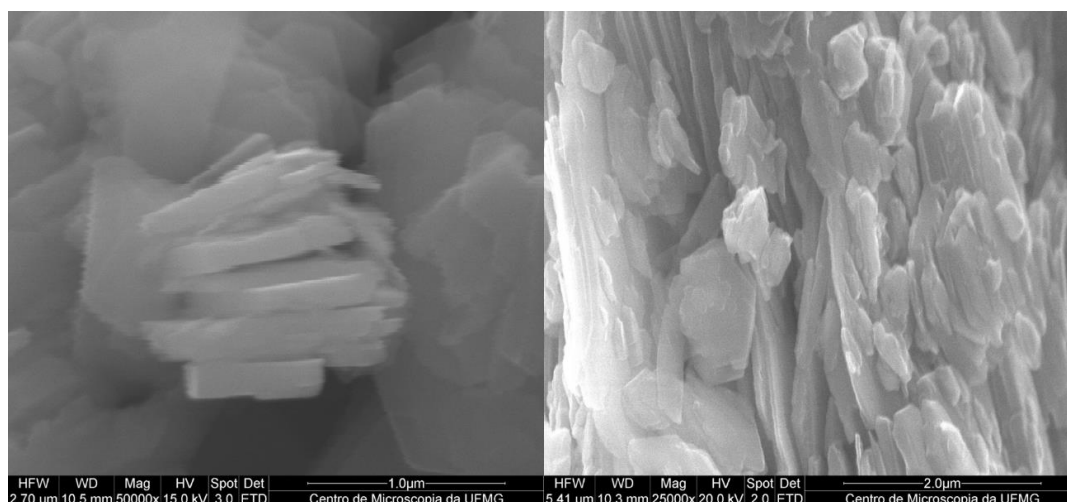
Figura 4.1.6 – Espectros de infravermelho antes (caulinita) e depois (metacaulinita) do processo de calcinação



Fonte: Autoral

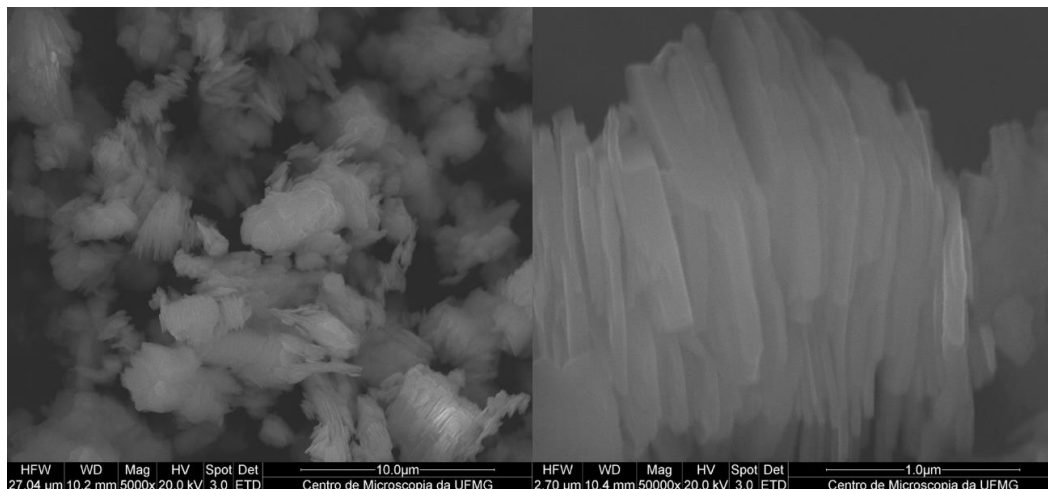
As bandas situadas em torno de 1000 cm^{-1} e 1100 cm^{-1} , destacadas em verde, estão relacionadas ao estiramento da ligação Si-O. Esta presença em ambos os espectros sugere que, durante o processo de conversão térmica do caulim, a ligação Si-O do quartzo permanece inalterada, o que condiz com o difratograma obtido após a calcinação. Já as bandas próximas de 936 cm^{-1} e 910 cm^{-1} possuem uma alta intensidade por estarem associadas às vibrações do grupo OH interno e externo das ligações Al-O-H (ALVAREZ-COSCOJUELA *et al.*, 2024). Os picos intensos observados na região de 500 cm^{-1} e 450 cm^{-1} correspondem ao estiramento das ligações Si-O-Si (KUMAR; LINGFA, 2020). É perceptível também que as intensidades relativas das bandas citadas diminuem com o tratamento térmico (FAN *et al.*, 2024).

Figura 4.1.7 – Imagens de MEV da amostra de caulinita antes do processo de calcinação



Fonte: Autoral

Figura 4.1.8 – Imagens de MEV da amostra de metacaulinita após o processo de calcinação



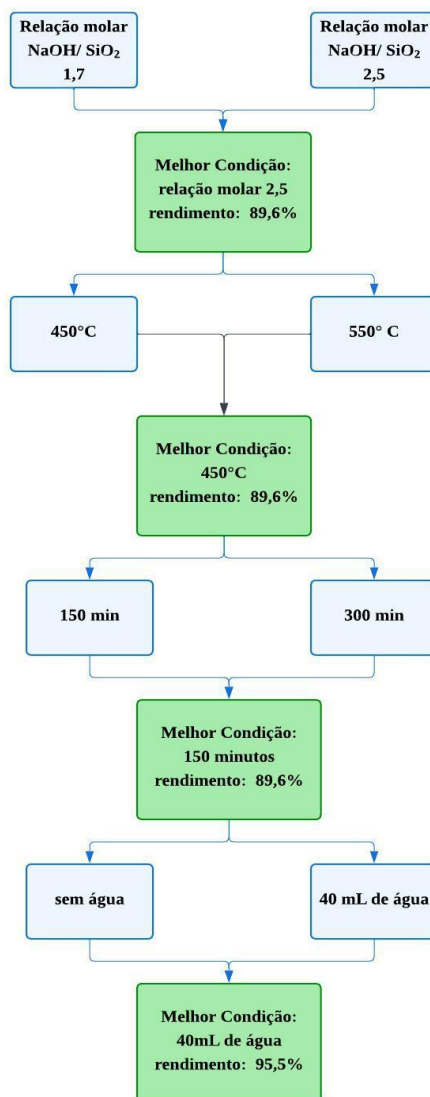
Fonte: Autoral

A conversão de caulinita para metacaulinita, apesar de não ser a técnica ideal para tal, também pode ser vista pela comparação das imagens de antes e depois obtidas pelo MEV (figura 4.1.7 e 4.1.8), que demonstra uma leve modificação da morfologia. Na figura 4.1.7 observa-se um empilhamento de partículas em formato hexagonal, característico da caulinita. Após o processo de calcinação, figura 4.1.7, observa-se que o formato das partículas se deteriora ligeiramente apresentando formatos mais irregulares (LONGHI, 2015).

4.2 Produção de silicato de sódio

Para se obter um silicato de sódio que pudesse ser cogitado para possível escalonamento industrial era necessário primeiramente que se obtivesse um bom rendimento, no mínimo 90%. Portanto, diversos parâmetros foram avaliados em etapas sucessivas, considerando-se o rendimento obtido em cada uma delas. A cada etapa, o parâmetro que apresentou o melhor resultado era fixado, prosseguindo-se então para a avaliação do parâmetro seguinte. Em um primeiro momento, definiu-se que a primeira reação seria a 450°, por 150 minutos em uma relação molar de 2,5 NaOH/SiO₂. Para o melhor entendimento, na figura 4.2.1, temos um diagrama de fase em que de azul temos os balões com a condição reacional testada em cada etapa e nos balões verdes está qual foi a melhor condição e seu rendimento para a respectiva etapa. Os resultados obtidos e a escolha da melhor condição em cada uma das etapas são discutidos abaixo.

Figura 4.2.1 – Diagrama de fases de teste de condições reacionais de silicato de sódio



Fonte: Autoral

Na primeira etapa, foi avaliada a relação molar entre o hidróxido de sódio e a areia. Conforme pode-se aferir na tabela 4.1, no intuito de examinar se a relação molar de 2,5 (EXP1) seria mais adequada, realizou-se uma reação com relação molar 1,7 (EXP2). Esta relação molar subestequiométrica foi escolhida por esperar que a quantidade de NaOH empregada na relação de 2,5 fosse muito grande e pudesse aumentar significativamente a alcalinidade do silicato de sódio produzido. Isso consequentemente, pode causar problemas de eflorescência no geopolímero no qual esse silicato de sódio foi empregado.

Levando em consideração o objetivo de no mínimo de 90% de rendimento, a EXP1 apresentou um rendimento mais satisfatório, 89,6%, assim mantendo-se a relação molar em 2,5 para as próximas reações.

Tabela 4.1 – Comparação da influência da relação molar de NaOH/SiO₂

Código	NaOH/SiO ₂	Temperatura (°C)	Duração (min)	Rendimento (%)
EXP1	1,7	450	150	70,5
EXP2	2,5	450	150	89,6

Fonte: Autoral

Na segunda etapa, foi avaliada a melhor temperatura, isto devido ao fato da temperatura ser comumente usada para deslocar o equilíbrio de uma reação. Sendo assim, confrontamos o resultado de rendimento obtido pelo EXP2 com uma nova reação à 550 °C (EXP3). A partir dos resultados apresentados na tabela 4.2, vemos que EXP3 apresentou um rendimento (90,6%) maior que EXP2 (89,6%), no entanto, considerando os objetivos do trabalho, o aumento de 1% no rendimento não compensa o aumento de gasto energético. Portanto, a temperatura de 450 °C continuou sendo a temperatura usada nas reações.

Tabela 4.2 – Comparação da influência da temperatura

Código	NaOH/SiO ₂	Temperatura (°C)	Duração (min)	Rendimento (%)
EXP2	2,5	450	150	89,6
EXP3	2,5	550	150	90,6

Fonte: Autoral

Na etapa seguinte, para aumentar o rendimento, avaliou se a reação estava se completando totalmente em até 150 minutos. Para isto se realizou uma reação em 300 minutos (EXP4) para avaliar se com um tempo de reação afetaria positivamente o rendimento, tabela 4.3. Neste caso, como o tempo não causou diferença visto que o rendimento obtido na EXP4 foi similar ao obtido na EXP2, continuou-se as reações em 150 minutos.

Tabela 4.3 – Comparação da influência do tempo de reação

Código	NaOH/SiO ₂	Temperatura (°C)	Duração (min)	Rendimento (%)
EXP2	2,5	450	150	89,6
EXP4	2,5	450	300	89,3

Fonte: Autoral

Considerando que até este momento o rendimento não havia aumentado até os 90% estipulados, supõe-se que devido ao fato dos reagentes estarem em estado sólido sem nenhum tipo de agitação, o contato entre eles estava limitado a uma mesma área que se satura com o tempo. Para solucionar este problema sem recorrer a soluções de engenharia, adicionou-se um

pouco de água à reação, de forma a melhorar a interação entre os reagentes, neste caso foram adicionados 40mL.

Tabela 4.4 – Comparação da influência de adição de água

Código	NaOH/SiO ₂	Temperatura (°C)	Duração (min)	Quant. água (mL)	Rendimento (%)
EXP2	2,5	450	150	-	89,6
EXP5	2,5	450	150	40	95,5

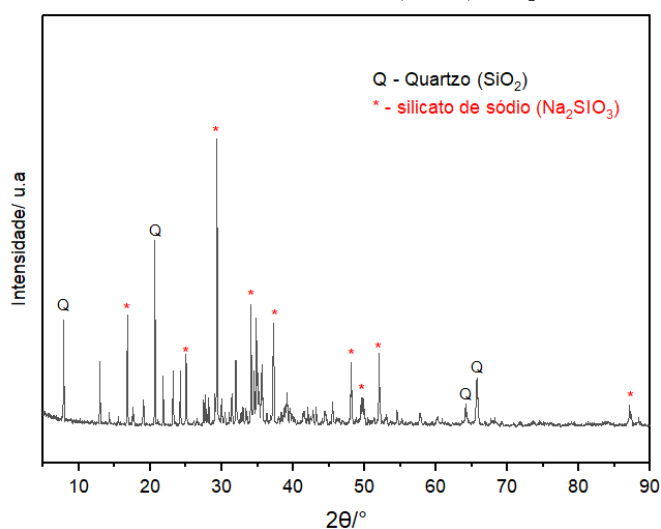
Fonte: Autoral

Considerando os resultados obtidos em todas as etapas, definiu-se relação NaOH/SiO₂ de 2,5, 450°C, 150 min e com adição de 40 mL de água como as melhores condições de obtenção de silicato de sódio com um rendimento total de 95,5%.

4.2.1 Caracterização do silicato de sódio

A partir do cumprimento do rendimento mínimo escalável, o silicato de sódio obtido, na melhor condição, foi caracterizado por DRX, FTIR, MEV e titulado para a obtenção das porcentagens de dióxido de silício e de óxido de sódio. No difratograma da figura 4.2.2 é possível observar que a reação foi efetiva na formação de silicato de sódio, devido principalmente à formação do pico em $2\theta = 29^\circ$, referente à fase do silicato de sódio. Apesar disso ainda foi possível observar picos referentes à fase de quartzo residual ($2\theta = 7^\circ, 21^\circ, 64^\circ$ e 66°), o que condiz com o que é encontrado na literatura (SUBASRI; NÄFE, 2008) o que indica reação incompleta.

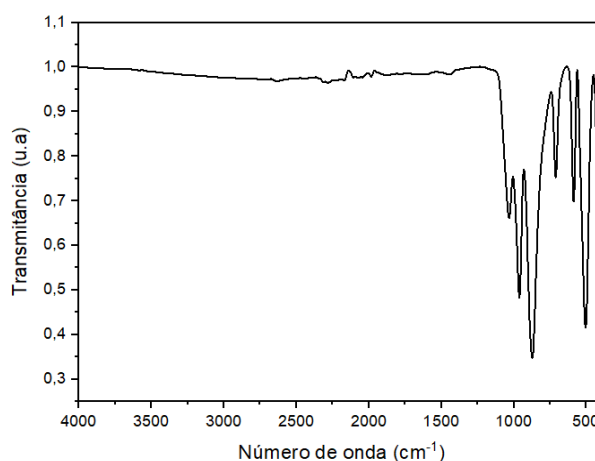
Figura 4.2.2 - Resultado de DRX de silicato de sódio (EXP5) comparado com uma referência



Fonte: Autoral

O espectro obtido pelo infravermelho, figura 4.2.3, também se apresentou como o esperado pela literatura. Um pico bem evidente em aproximadamente 1000cm^{-1} , proveniente do estiramento assimétrico das ligações O-Si-O e picos próximos de 800 e 785cm^{-1} do estiramento simétrico destas mesmas ligações (RAHMAT *et al.*, 2016).

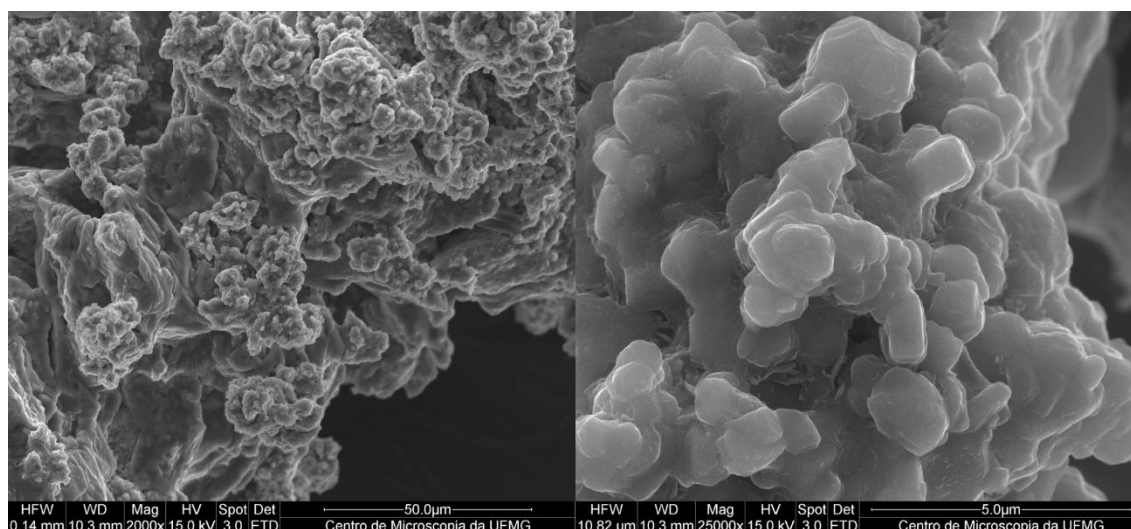
Figura 4.2.3 – Espectro de FTIR de silicato de sódio (EXP5)



Fonte: Autoral

As imagens de MEV, figura 4.2.4, indicam a possível a efetividade do ataque alcalino à areia, por meio da transformação da estrutura antes cristalina (figuras 4.1.1 e 4.1.3) a uma estrutura porosa amorfa, caracterizada por suas partículas de formatos irregulares. Em relação à trabalhabilidade do composto formado, suas partículas em formatos irregulares e sua característica amorfa propicia o aumento da fricção interna e demanda líquida (HANDAYANI *et al.*, 2022).

Figura 4.2.4 – Imagens de MEV de silicato de sódio (EXP5)



Fonte: Autoral

Após a realização das análises instrumentais de caracterização, foram realizadas titulações para determinar os teores de Na_2O e SiO_2 no silicato de sódio obtido. Esta análise volumétrica se faz necessária para que se possa determinar o módulo de sílica do produto, característica relevante para a aplicação do silicato de sódio no geopolímero. Nestas determinações obtiveram-se valores de 5,13% de Na_2O e 7,39% de SiO_2 respectivamente, apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5– Resultados de titulação de óxido de sódio para a reação EXP5

Titulação	Massa solução mãe (g)	Volume final (mL)	% Na_2O	Média (%)	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)
1	8,1018	1,40	5,38	5,13	0,18	0,20
2		1,30	5,00			
3		1,30	5,00			

Fonte: Autoral

Tabela 4.6 – Resultados de titulação de dióxido de silício para a reação EXP5

Titulação	Massa solução mãe (g)	Volume final (mL)	% SiO_2	Média (%)	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)
1	8,1018	5,20	7,20	7,39	0,16	0,54
2		5,40	7,58			
3		5,30	7,39			

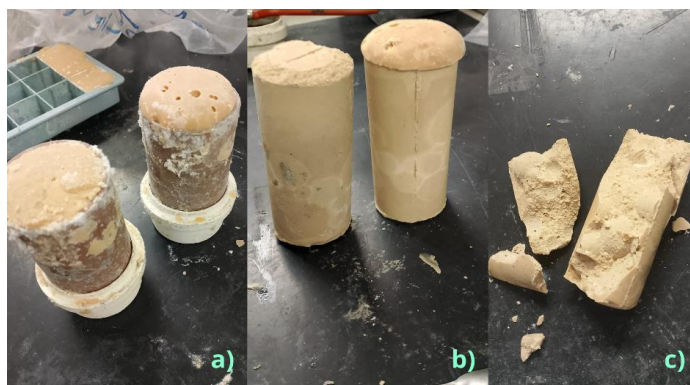
Fonte: Autoral

O silicato de sódio sólido comercial tem suas concentrações de dióxido de silício e óxido de sódio resultando em um módulo de sílica na faixa de 1,6 a 4,9. Em uma comparação com a referência comercial, os resultados apresentados demonstram um valor de um módulo de sílica de 1,4, um valor abaixo da faixa comumente empregada (FERREIRA, 2013). Isto pode ser atribuído ao fato que foi estabelecido uma razão molar SiO_2/NaOH alta para as reações pois para realizar o ataque à sílica durante a reação é necessária uma grande quantidade de NaOH. Nisto, o silicato de sódio produzido além de estar com porcentagens de sílica menor do que o esperado se comparado com o produto comercial, há um teor de Na_2O alto se comparado ao teor de SiO_2 disponível. Apesar de que na produção de geopolímeros, em maiores concentrações de Na_2O há um incremento na resistência a compressão destes materiais, em abundância, o excesso de sódio ocasiona na diminuição significativa da resistência do material (CHO *et al.*, 2017).

4.3 Produção de geopolímeros

Foram realizadas diversas bateladas de produção de silicato de sódio da reação nas melhores condições para que houvesse material suficiente para a produção de geopolímero. As primeiras tentativas de produção feitas usando o método *one-part*, que se trata da mistura dos componentes secos da formulação seguida da adição de água (FIGUEIREDO, 2021), não foram bem-sucedidas. Os corpos de provas produzidos após 7 dias de cura, ao ar em temperatura ambiente, apresentaram eflorescência e se desfizeram facilmente com um leve impacto, figura 4.3.1.

Figura 4.3.1 – Geopolímeros produzidos. a) geopolímeros no molde com presença de eflorescência; b) aparência após retirada dos moldes; c) geopolímero desfeito.



Fonte: Autoral

Considerando os resultados obtidos nas titulações, pelo teor de Na_2O era esperado que se ocorresse a eflorescência, que pode ser vista pela formação de sais nas bordas dos moldes, figura 4.3.1a, e principalmente no aparecimento de manchas esbranquiçadas nas superfícies do material, visto na figura 4.3.1b (RIBEIRO, 2018). Neste caso, podemos ver que a eflorescência também causou um dano extenso na estrutura do geopolímero, causando sua expansão e diminuindo sua resistência mecânica devido ao excesso de sódio na formulação, fazendo com que quebrasse facilmente (CHO, *et al.* 2017).

Uma das formas possíveis para equilibrar a quantidade de sódio no geopolímero é ajustando a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Para isto foram pesquisadas outras fontes de sílica amorfa para serem adicionadas à formulação de geopolímero e realizar uma nova tentativa. Nesse projeto, a fonte de sílica escolhida foi a escória de alto forno. A escória por ser um resíduo industrial de aluminossilicato apresenta diversas vantagens em ser empregado em formulações de geopolímero, como aumentar a resistência, melhorar fluidez, trabalhabilidade e tempo de pega, como já visto em diversas pesquisas, (SONG *et al.*, 2019) (VILLAQUIRÁN-CAICEDO; DE GUTIÉRREZ, 2018) (RAKHIMOVA; RAKHIMOV, 2015) além de também fornecer a sílica

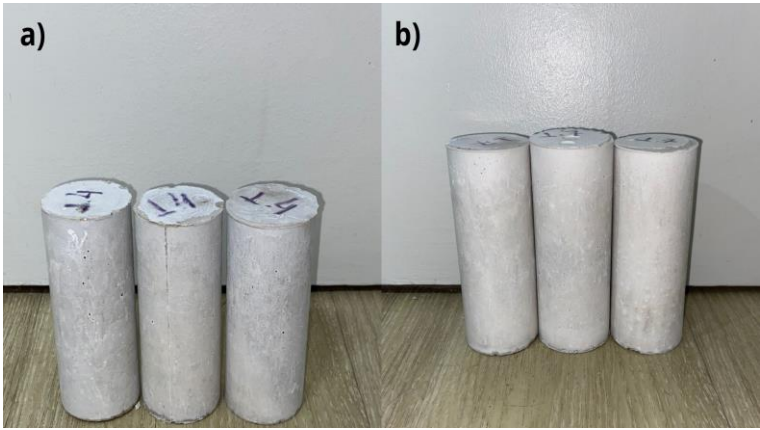
que irá equilibrar a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Para isto adicionou-se uma porcentagem de escória em relação à massa de silicato de sódio e sua porcentagem de Na_2O já presente na formulação de forma a balancear a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ no geopolímero. Assim, foram elaborados geopolímeros de razões de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ após a adição de escória de 1,4 e 1,7, os seus resultados de resistência à compressão estão na tabela 4.7 abaixo.

Tabela 4.7 – Resultados de teste de resistência à compressão

Razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	Adição de escória (%)	Testes após 7 dias (Mpa)			Média (MPa)	Desvio Padrão
1,4	13,7	33,84	26,54	31,42	30,60	3,72
1,7	20,5	37,44	36,80	28,68	34,31	4,89

Fonte: Autoral

Figura 4.3.2 – Geopolímeros produzidos. a) geopolímero de proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 1,4; b) geopolímero de proporção $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 1,7



Fonte: Autoral

Considerando estes resultados de resistência inicial após a cura de 7 dias, vemos que para razões maiores e com maior porcentagem de escória, há o aumento da resistência, sendo o melhor resultado para a razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 1,7 uma resistência média de 34,31 MPa, um resultado bom, comparável a um concreto estrutural C35 do grupo I (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Também acima do que encontrado na literatura para geopolímeros com 7 dias de cura e adição de um aditivo de aluminossilicato 15,28 MPa (SONG *et al.*, 2019), 11,5 MPa (LUO *et al.*, 2024). Isto ocorre devido ao fato de haver quantidades maiores de sílica reativa, o que contribui para a melhora a densidade dos grupos sialato formados durante a geopolimerização, causando uma maior resistência (ALBIDAH *et al.*, 2021), algo que também pode ser atingido caso fosse aumentada a porcentagem de escória em uma formulação de menor razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a produção de silicato de sódio em condições reacionais brandas (450 °C, 150 min e relação molar de 2,5), sem a formação de CO₂ como produto secundário de reação foi altamente eficiente, alcançando rendimento de 95,5%. A utilização desse silicato na formulação de geopolímeros com razões SiO₂/Na₂O final de 1,4 e 1,7 resultou em materiais com resistências à compressão de 30,60 MPa e 34,31 MPa, respectivamente, comprovando o sucesso na consecução dos objetivos propostos neste trabalho. Apesar disso, a elevada razão SiO₂/Na₂O observada durante o processo trouxe limitações à elaboração das formulações, evidenciando perspectivas futuras para um estudo aprofundado que explore esta relação na produção de silicato de sódio em diversos módulos de sílica sem diminuir seu rendimento. Além disso, também é interessante realizar um estudo de viabilidade financeira, juntamente com um estudo da quantidade de CO₂ total emitido durante toda a cadeia produtiva para uma comparação com os métodos industriais disponíveis atualmente. No entanto, apesar da necessidade de mais estudos, este trabalho apresenta uma possibilidade plausível para a obtenção de silicato de sódio e para sua aplicação na produção geopolímeros de forma mais sustentável e econômica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIDAH, Abdulrahman *et al.* Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 84-98, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.104>.

ALGHANNAM, Mohammed *et al.* Influence of Critical Parameters of Mix Proportions on Properties of MK-Based Geopolymer Concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 29 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04970-0>.

AMRITPHALE, Sudhir Sitaram; BHARDWAJ, Pooja; GUPTA, Rainy. Advanced geopolymerization technology. *Geopolymers and Other Geosynthetics*, v. 10, 2019.

ALVAREZ-COSCOJUELA, Adrian *et al.* Structural characterisation and reactivity measurement of chemically activated kaolinite. **Journal of Building Engineering**, p. 109051, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109051>. Acesso em: 7 dez. 2025.

APOLONIO, P.H. *et al.* Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. *Cerâmica*, v. 66, n.378, p. 172-178, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663782914>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:2015**: concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. [S. l.: s. n.], 2015. 3 p. ISBN 978-85-07-05418-4.

CHEN, Meijuan *et al.* The Application of Mineral Kaolinite for Environment Decontamination: A Review. **Catalysts**, v. 13, n. 1, p. 123, 5 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal13010123>.

CHENG, Hongfei *et al.* Kaolinite-based form-stable phase change materials for thermal energy storage. **Journal of Energy Storage**, v. 87, p. 111349, maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111349>.

CRIPPA, M., *et al.* European Commission, Joint Research Centre, GHG emissions of all world countries. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>.

CHO, Young-Keun *et al.* Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 253-260, ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.004>.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymer chemistry and applications. [S.l.]: Institut Géopolymère, 2015. ISBN 9782951482098.

FAN, Jiahang *et al.* Characterization of thermal behavior of two types of kaolin in China by ultrafast Joule heating combined with XRD, FT-IR, TG-DSC and SEM. **Thermochimica Acta**, v. 742, p. 179894, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2024.179894>.

FERREIRA, Michel Jean. **Obtenção de silicato de sódio por lixívia alcalina a partir da cinza da casca de arroz (cinza da casca de arroz) para uso como defloculante**. 2013. reponame:Repositório Institucional da UFSC, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107112>.

FIGUEIREDO, Ricardo Augusto Martins. **Rejeitos de Minério de Ferro na Produção de Geopolímeros one-part**: utilização como filler e na produção de silicato de sódio alternativo. 2021. Dissertação de Doutorado — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

FOLETTTO, Edson Luiz *et al.* Conversion of rice hull ash into soluble sodium silicate. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 335-338, set. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1516-14392006000300014>.

FONSECA, Juliana M. M.. Estudo da adição de silicato de sódio alcalino em componentes cimentícios. 2021. 121 p. Dissertação de mestrado — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26141>

FURTOS, Gabriel *et al.* The Precursors Used for Developing Geopolymer Composites for Circular Economy—A Review. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1696, 7 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17071696>.

HABERT, G.; D'ESPINOSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, jul. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>.

HANDAYANI, Lia *et al.* Sodium Silicate from Rice Husk Ash and Their Effects as Geopolymer Cement. **Polymers**, v. 14, n. 14, p. 2920, 19 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14142920>.

HISTORY of Green Chemistry | Center for Green Chemistry & Green Engineering at Yale. 2017. Disponível em: <https://greenchemistry.yale.edu/about/history-green-chemistry>.

HOPPE FILHO, Juarez *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 10 ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170003.0206>.

JACOB, Adikwu Gowon; ALISI, Ikechukwu Ogadimma; SURAJO, Jikamshi Mustapha. Kaolinite clay as green and sustainable raw material for zeolites production: a review. **FUDMA JOURNAL OF SCIENCES**, v. 9, p. 18-35, 26 abr. 2025. Disponível em: [https://doi.org/10.33003/fjs-2025-09\(ahbsi\)-3496](https://doi.org/10.33003/fjs-2025-09(ahbsi)-3496).

KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 3, p. 729-746, fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>.

KRÄNZLEIN, E. *et al.* Influence of the Si/Al ratio in geopolymers on the stability against acidic attack and the immobilization of Pb²⁺ and Zn²⁺. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116634, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.015>.

KOMNITSAS, Kostas; ZAHARAKI, Dimitra. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, 2007. Disponível em: <https://doi.org/doi:10.1016/j.mineng.2007.07.011>.

KUDAPA, Vamsi Krishna; KUMAR, Shaswat. Applications of sodium silicate in oil and gas well operations. **Materials Today: Proceedings**, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.086>.

KUMAR, Awinash; LINGFA, Pradip. Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 737-742, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.037>.

LONGHI, Márlon Augusto. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015. reponame: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFRGS, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/127773>.

LORENZINI, Lucas et al. Reuse of iron ore tailing to potassium silicate synthesis and to the production of geopolymers. *New Journal of Chemistry*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d3nj03992g>.

LUO, Xiaofeng *et al.* A technique for preparing one-part geopolymers by activating alkali-fused lithium slag with solid sodium silicate. **Construction and Building Materials**, v. 435, p. 136817, jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136817>.

MARIA M. DA FONSECA, Juliana. Estudo da adição de silicato de sódio alcalino em componentes cimentícios. 2021. 121 p. Dissertação de mestrado — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26141>.

MICHELIN, Luis Gustavo; GRUBA, Marcia Cristiane. Economia Circular: Uma Revisão Bibliométrica À Luz Da Sustentabilidade. **Revista Eletrônica Polidisciplinar Voos**, v. 21, n. 2, 2025. Disponível em: <http://www.doi/10.69876/rv.v21i2.312/>.

MOHAMED ISMAIL, Abdul Aleem *et al.* Synthesis and characterisation of sodium silicate from spent foundry sand: Effective route for waste utilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121689, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121689>.

NAWAZ, Sumra *et al.* Phyllosilicate derived catalysts for efficient conversion of lignocellulosic derived biomass to biodiesel: A review. **Bioresource Technology**, v. 343, p. 126068, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126068>.

POPI, Maria da Graça Carraro Busica; PINSKY, Vanessa Cuzziol; KULAY, Luiz. The role of green chemistry in corporate innovation strategies outlined by the Brazilian chemical sector. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 3042-3062, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34140/bjbv2n3-078>.

RABELLO, Marina Brino. Proposta de um plano de gerenciamento de resíduos químicos para o laboratório de controle de qualidade de uma indústria produtora de silicato de sódio. 2014. 98 p. Trabalho de conclusão de curso — Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

RAHMAT, Norhasyimi *et al.* Sodium silicate as source of silica for synthesis of mesoporous SBA-15. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 133, p. 012011, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/133/1/012011>.

RAKHIMOVA, Nailia R.; RAKHIMOV, Ravil Z. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste. **Materials & Design**, v. 85, p. 324-331, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.182>.

RELATÓRIO Anual 2023. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, São Paulo, 2023. 48 p. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>.

RIBEIRO, Iracira José da Costa *et al.* Implantação de métodos de tratamento para combater as eflorescências. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 38, p. 43, 15 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n38p43-53>.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. CO₂ emissions. 10 jun. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>.

SALAMONI, Natália *et al.* Análise comparativa e comportamento temporal da areia descartada de fundição incorporada em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, v. 25, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100896>.

SÁNCHEZ, Isabel *et al.* Evolution of Metakaolin Thermal and Chemical Activation from Natural Kaolin. **Minerals**, v. 10, n. 6, p. 534, 12 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min10060534>.

SANTOS FLÔR, Ronaldo. Utilização do Silicato de Sódio no Processo de Beneficiamento do Caulim. **Cêramica Industrial**, v. 9, n. 4, 2004.

SILICATO de Sódio Tamanho do Mercado | Mordor Intelligence. 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/sodium-silicate-market>.

SILVA, Cleber Amancio da *et al.* MARKETING SUSTENTÁVEL E O USO DE NOVAS TECNOLOGIAS. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 6, p. 2783-2792, 13 jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v11i6.19776>.

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.

SONG, Weilong *et al.* Effect of steel slag on fresh, hardened and microstructural properties of high-calcium fly ash based geopolymers at standard curing condition. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116933, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116933>.

SUBASRI, Raghavan; NÄFE, Helfried. Phase evolution on heat treatment of sodium silicate water glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 354, n. 10-11, p. 896-900, fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.08.037>.

TAMANHO do mercado de silicato de sódio, participação | Relatório de Crescimento [2032]. [S. l.]: Fortune Business Insights, 2025. 250 p. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/pt/sodium-silicate-market-104600>.

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 125-130, jun. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M.A.; DE GUTIÉRREZ, R. Mejía. Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors. *Materials Letters*, v. 230, p. 300-304, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.07.128>.

VOGT, C. Jordanna; LAMEIRAS, S. Fernando. Processo de obtenção de silicato de sódio em pó a partir de rejeito arenoso oriundo do processo de concentração de minério de ferro. WO2021/035318A1. Depósito: 30 ago. 2019. Concessão: 4 mar. 2021.