



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS — FEMat

GIOVANA ZAGALO DE FRANÇA

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NA RESISTÊNCIA COMPRESSIVA DE
GEOPOLÍMEROS PARA A APLICAÇÃO COMO AGREGADOS SINTÉTICOS**

ANANINDEUA

2025

GIOVANA ZAGALO DE FRANÇA

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NA RESISTÊNCIA COMPRESSIVA DE
GEOPOLÍMEROS PARA A APLICAÇÃO COMO AGREGADOS SINTÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva

ANANINDEUA-PA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

F814i França, Giovana Zagalo de.
INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NA RESISTÊNCIA
COMPRESSIVA DE GEOPOLÍMEROS PARA A APLICAÇÃO
COMO AGREGADOS SINTÉTICOS / Giovana Zagalo de França.
— 2025.
82 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia
de Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Geopolímero. 2. Cura Térmica. 3. Resistência à
Compressão. I. Título.

CDD 620.11

GIOVANA ZAGALO DE FRANÇA

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NA RESISTÊNCIA COMPRESSIVA DE
GEOPOLÍMEROS PARA A APLICAÇÃO COMO AGREGADOS SINTÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

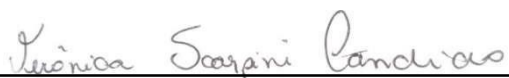
DATA DE APROVAÇÃO: 13/06/2025

CONCEITO: BOM

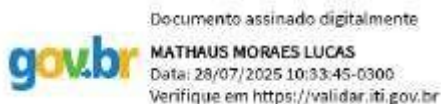
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva – FEMat – UFPA
(Orientador)



Prof. Dra. Verônica Scarpini Candido – FEMat – UFPA
(Examinador Interno)



Documento assinado digitalmente
MATHAUS MORAES LUCAS
Data: 28/07/2025 10:33:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Msc. Mathaus Moraes Lucas (Bravo Brasil)
(Examinador Externo)

ANANINDEUA-PA

2025

“O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo.”

José de Alencar

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos e por me guiar em todas as etapas desse curso, me mantendo centrada em busca do meu maior objetivo, não me deixando perder a fé e nem desanimar em nenhum momento. Obrigada senhor, por estar comigo em cada desafio da minha vida. A ti, toda honra e toda glória!

Aos meus pais, João França e Edilene Zagalo, que sempre foram meus maiores incentivadores durante toda essa jornada e por serem minha maior fonte de inspiração. Obrigada por sempre priorizarem minha educação e meu futuro. Não existe nada melhor do que chegar em casa depois de um dia cansativo e ser recebida por vocês, acolhida e amparada. Essa conquista é nossa. Amo vocês infinitamente.

Aos meus irmãos, Gustavo e Gabriel, e a todos os meus familiares que sempre torceram/torcem por mim.

Aos meus melhores e eternos amigos, Adailton Borges, Diego Santos, Paulo Aranha e Sarah Brandão, que se tornaram parte da minha família e que transformaram meus dias mais leves e fizeram cada momento motivos de risadas e aprendizado. A amizade que construímos aqui, é mais um diploma que levarei para toda minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alisson Rios, serei eternamente grata por toda orientação ao longo desses 3 anos de pesquisa, e por ser um excelente exemplo de pessoa e profissional. Registro aqui meu profundo respeito e agradecimento.

A Prof^a Dr^a. Verônica Scarpini, pelo suporte e conselhos acadêmicos, e por ser uma fonte de inspiração como pesquisadora.

A todos os docentes integrantes da FEMAT, agradeço pelos ensinamentos, auxílios e conselhos concedidos durante esses 5 anos de graduação.

A banca examinadora, ao Eng. Me. Mathaus Lucas e Prof^a. Dr^a. Verônica Scarpini por aceitarem compor a bancar de defesa desse trabalho.

Aos demais colegas do grupo de pesquisa GPMCOMP, em especial ao “grupinho geopol” por compartilharem comigo as experiências da pesquisa, nos bons e más momentos.

A Universidade Federal do Pará, *campus* Ananindeua, por ter sido minha segunda casa durante toda a trajetória acadêmica, juntamente com a Turma de 2020, em especial, ao Enrique Chaves, Manoel Vinícius e Paloma Suellen por compartilhar as experiências do aprendizado e todos os bons e más momentos vividos juntos.

A todos vocês, meus eternos agradecimentos!

RESUMO

Os geopolímeros apresentam um grande potencial de uso na indústria da construção civil. Trata-se de uma matriz geopolimérica composta por aluminossilicatos ativados por uma solução alcalina, que podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade adequada de silício (Si) e alumínio (Al) amorfos. Com excelentes propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade, os geopolímeros são uma alternativa ecológica e eficiente, alinhada à sustentabilidade na construção civil. Dessa forma, no presente trabalho, buscou-se desenvolver a produção de pastas geopoliméricas curadas termicamente em temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C por 1, 2, 3 e 4 horas com idades de cura de 3 e 7 dias, para determinar o melhor resultado de resistência à compressão. As matérias-primas utilizadas foram: escória de alto forno como fonte de cálcio, metacaulim fonte de silício (Si) e alumínio (Al), e hidróxido de sódio e silicato alcalino como solução ativadora. Foram realizadas caracterizações de Difração de Raio-X (DRX), Fluorescência de Raio-X (FRX) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e teste físico de Perda ao Fogo nas matérias-primas utilizadas. Por fim, foi realizado a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras rompidas após o ensaio de resistência à compressão. Os resultados mostram que a pasta geopolimérica curada sob temperatura de 40°C por 3 horas com idade de cura de 7 dias, obteve maior resistência à compressão, atingindo 45,5 MPa, sugerindo que nestas condições, a formação de géis N-A-S-H se intensifica e forma uma estrutura tridimensional mais coesa, além da possível formação complementar de gel C-A-S-H, advindo da fonte de cálcio presente na composição química da escória de alto forno. A análise morfológica por MEV, mostrou uma matriz compacta e densa para pastas com 7 dias de cura. Portanto, conclui-se que as matérias-primas utilizadas estão adequadas para a produção de geopolímero, e que as condições ideais de cura foram encontradas a 40°C com 3 horas e idade de cura de 7 dias. Tais resultados demonstram a eficácia dessa condição no desempenho mecânico dos geopolímeros. Assim, recomenda-se essa configuração como a mais eficiente para aplicação como agregados sintéticos.

Palavras-chave: Geopolímero. Cura Térmica. Resistência à Compressão.

ABSTRACT

Geopolymers have great potential for use in the construction industry. They are geopolymer matrixes composed of aluminosilicates activated by an alkaline solution, which can be manufactured with any material or residue that has an adequate amount of amorphous silicon (Si) and aluminum (Al). With excellent mechanical, thermal and durability properties, geopolymers are an ecological and efficient alternative, aligned with sustainability in civil construction. Thus, in this study, we sought to develop the production of geopolymer pastes thermally cured at temperatures of 40°C, 60°C and 80°C for 1, 2, 3 and 4 hours with curing ages of 3 and 7 days, to determine the best compressive strength result. The raw materials used were: blast furnace slag as a source of calcium, metakaolin as a source of silicon (Si) and aluminum (Al), and sodium hydroxide and alkaline silicate as the activating solution. X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) characterizations and physical Loss on Ignition test were performed on the raw materials used. Finally, Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis of the ruptured samples after the compressive strength test was performed. The results show that the geopolymer paste cured at a temperature of 40°C for 3 hours with a curing age of 7 days obtained greater compressive strength, reaching 45.5 MPa, suggesting that under these conditions, the formation of N-A-S-H gels intensifies and forms a more cohesive three-dimensional structure, in addition to the possible complementary formation of C-A-S-H gel, coming from the calcium source present in the chemical composition of the blast furnace slag. The morphological analysis by SEM showed a compact and dense matrix for pastes with 7 days of curing. Therefore, it is concluded that the raw materials used are suitable for geopolymer production, and that the ideal curing conditions were found at 40°C with 3 hours and a curing age of 7 days. These results demonstrate the effectiveness of this condition in the mechanical performance of geopolymers. Thus, this configuration is recommended as the most efficient for application as synthetic aggregates.

Keywords: Geopolymer. Thermal Curing. Compressive Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Representação esquemática dos geopolímeros.	18
Figura 2 — Mecanismo de geopolimerização.	19
Figura 3 — Influência do tempo de cura nas resistências à compressão do geopolímero curado em temperaturas elevadas.	29
Figura 4 — aplicação do geopolímero em Brisbane West Wellcamp Airport	30
Figura 5 — aplicação do geopolímero de acordo com sua razão Si/Al.	31
Figura 6 — Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.	32
Figura 7 — Metacaulim, fonte de silício e alumínio.	32
Figura 8 — escória de alto forno como fonte de cálcio.	33
Figura 9 — Calcinação do caulim para obtenção do metacaulim. (a) forno mufla; (b) cadinho incandescente.	36
Figura 10 — EAF (a) antes do beneficiamento; (b) após o beneficiamento.	37
Figura 11 — (a) cadinho com amostras de caulim, metacaulim e escória de alto forno; (b) cadinhos em forno mufla.	37
Figura 12 — Microscópio eletrônico de varredura.	39
Figura 13 — Procedimento de mistura para obtenção da pasta	40
Figura 14 — a) Molde metálico; b) Base de apoio para os moldes	41
Figura 15 — CP's moldados curando em estufa.	42
Figura 16 — (a) Máquina de ensaio Universal; (b) disposição do CP na prensa.	43
Figura 17 — Difractometria de Raio-X do caulim.	44
Figura 18 — Espectroscopia do Infravermelho (FTIR) do caulim e metacaulim.	46
Figura 19 — MEV do Caulim a 25°C. (a) com aumento de 18400X; (b) com aumento de 27000X.	47
Figura 20 — Difractograma de Raio-X do metacaulim.	49
Figura 21 — MEV do metacaulim. (a) com aumento de 5000X; (b) com aumento de 500X.	50
Figura 22 — Difractograma de raio-X da escória de alto forno.	52
Figura 23 — MEV da escória de alto forno. a) com ampliação de 2.770x; b) com ampliação de 11.000x.	54
Figura 24 — Resultados de resistência à compressão de geopolímeros curados a 40°C.	56
Figura 25 — Corpos de prova curado a 40°C por 3 horas. (a) e (b) ruptura cisalhada lateral.	58
Figura 26 — Resultados de resistência à compressão de geopolímeros curados a 60°C.	59
Figura 27 — Resultados de resistência à compressão de geopolímeros curados a 80°C por 7 dias de cura.	60

Figura 28 — Gráfico de resistência à compressão a 40°C com 3 dias de cura.	62
Figura 29 — Gráfico de resistência à compressão a 60°C com 3 dias de cura.	63
Figura 30 — Gráfico de resistência à compressão a 80°C com 3 dias de cura.	64
Figura 31 — Pasta curada a 25° por 24 horas. a) com ampliação de 300X; b) com ampliação de 1500X; com ampliação de 2000X; (d) análise de EDS	66
Figura 32 — Microscopia da pasta curada a 40°C por 3 horas. a) Com ampliação de 1000X; b) Com ampliação de 2000X.	68
Figura 33 — Microscopia da pasta curada a 60°C com 2 horas de cura; a) Com ampliação de 1000X; b) Com ampliação de 2500X.	69
Figura 34 — Microscopia da pasta curada a 40°C com 2 horas de cura; a) Com ampliação de 500X; b) Com ampliação de 1500X.	70
Figura 35 — Microscopia da pasta curada a 80°C com 1 hora de cura; a) com ampliação de 500X; b) com ampliação de 2000X.	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 GEOPOLÍMERO.....	17
2.2 ESTRUTURA DO GEOPOLÍMERO E A GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	17
2.3 MATÉRIAS-PRIMAS.....	19
2.3.1 Metacaulim.....	19
2.4 ATIVADORES ALCALINOS	21
2.5 RESÍDUOS INDUSTRIAIS	22
2.5.1 Escória de Alto Forno (EAF)	23
2.5.2 Escória de Aciaria	23
2.5.3 Cinza Volante.....	24
2.6 RESÍDUOS AGRÍCOLAS	24
2.6.1 Cinza da casca de arroz (CCA)	25
2.6.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	25
2.7 AGREGADOS	26
2.7.1 Agregados Naturais.....	27
2.7.2 Agregados Sintéticos.....	27
2.8 INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA EM GEOPOLÍMEROS	28
2.9 APLICAÇÕES	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 MATERIAIS	32
3.1.1 Metacaulim.....	32
3.1.2 Escória de Alto Forno	33
3.1.3 Solução alcalina	33
3.1.4 Hidróxido de Sódio	34
3.1.5 Silicato de Sódio	34
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	35

3.2.1 Calcinação do Caulim para Obtenção do Metacaulim.....	36
3.2.2 Beneficiamento da Escória de Alto Forno	36
3.2.3 Testes Físico.....	37
3.2.4 Perda ao fogo.....	37
3.3 ANÁLISES	38
3.3.1 Difratomia de Raio-X (DRX)	38
3.3.2 Espectroscopia do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	38
3.3.3 Fluorescência de Raio-X (FRX).....	38
3.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	39
3.4 DOSAGEM DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS.....	39
3.4.1 Obtenção e Moldagem das Pastas Geopoliméricas.....	40
3.4.2 Cura Térmica.....	42
3.4.3 Ensaio de Compressão Uniaxial.....	42
4 RESULTADOS	43
4.1 TESTES FÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	43
4.1.1 CAULIM.....	43
4.1.1.1 Perda ao Fogo.....	43
4.1.1.2 Difratomia de Raio-X (DRX).....	44
4.1.1.3 Espectroscopia do Infravermelho (FTIR).....	45
4.1.1.4 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV).....	47
4.1.2 Metacaulim.....	48
4.1.2.1 Perda ao Fogo.....	48
4.1.2.2 Difratomia de Raio-X (DRX).....	49
4.1.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
4.1.3 Escória de Alto Forno	51
4.1.3.1 Perda ao Fogo.....	51
4.1.3.2 Difratomia de Raio-X (DRX).....	51
4.1.3.3 Fluorescência de Raio-X (FRX).....	53
4.1.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da EAF.....	54
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS.....	55
4.2.1 Cura Térmica em 40°C com 7 dias de cura	55
4.2.2 Cura Térmica em 60°C com 7 dias de cura	58
4.2.3 Cura Térmica em 80°C com 7 dias de cura	60

4.2.4 Cura Térmica em 40°C com 3 dias de cura	62
4.2.5 Cura térmica em 60°C com 3 dias de cura.....	63
4.2.6 Cura térmica em 80°C com 3 dias de cura.....	64
4.2.7 MEV das Pastas	65
4.2.7.1 25°C com 7 dias de cura.....	65
4.2.7.2 40°C com 7 dias de cura.....	67
4.2.7.3 60°C com 7 dias de cura.....	69
4.2.7.4 40°C com 3 dias de cura.....	70
4.2.7.5 80°C com 3 dias de cura.....	72
5 CONCLUSÃO	74
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6 REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O geopolímero é um material cimentício desenvolvido pelo cientista Joseph Davidovits na década de 1970, e apresenta uma diversidade de aplicações na área da construção civil. Desde sua criação, tem sido reconhecido por suas propriedades mecânicas superiores em comparação aos cimentos convencionais, além de contribuir para a redução da emissão de CO₂ durante sua produção (Davidovits, 1994). Dessa forma, os geopolímeros, são reconhecidos como materiais de alta tecnologia, e apresentam excelentes propriedades de resistência térmica e mecânica. Devido a essas características, são amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo o interior de automóveis e aeronaves, onde atuam como isolantes térmicos, além de empregados como concretos, pastas e argamassas (Cruz, 2023).

A obtenção do geopolímero envolve a polimerização de matérias-primas aluminossilicasas (processo esse denominado de “geopolimerização”) que podem ser subprodutos ou resíduos industriais. Tais materiais são ativados por uma solução altamente alcalina, geralmente composta de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Durante o processo de geopolimerização, os aluminossilicatos, como o metacaulim, reagem para formar uma matriz sólida e estável (Davidovits, 2002). Essa abordagem não apenas valoriza resíduos que poderiam ser descartados inadequadamente, mas também contribui para a sustentabilidade na construção civil (Melo, 2022). Assim, os geopolímeros se destacam como uma alternativa ecológica e eficiente aos cimentos convencionais.

A cura térmica de geopolímeros é um processo fundamental que visa aprimorar as propriedades mecânicas e térmicas desses materiais. Durante a cura, os geopolímeros são expostos a temperaturas elevadas, o que acelera as reações de polimerização e promove uma melhor organização estrutural. Estudos de Rovináník (2010) mostram que a cura térmica pode resultar em aumentos significativos na resistência à compressão e na estabilidade térmica, com geopolímeros alcançando resistências superiores a 30 MPa após sete dias de tratamento térmico. Dessa forma, a resistência a altas temperaturas é uma propriedade distintiva dos geopolímeros, permitindo sua aplicação em ambientes que exigem materiais refratários. A cura térmica não apenas melhora essas propriedades, mas também garante que os geopolímeros mantenham suas características estruturais mesmo sob condições extremas (Wiecheteck *et al.*, 2022)

Em virtude desta perspectiva, o presente estudo visa explorar como a aplicação de temperaturas elevadas durante o processo de cura pode aprimorar as propriedades mecânicas e térmicas dos geopolímeros, potencializando seu desempenho e viabilidade para uso em diversas aplicações.

1.1 Justificativa

A escolha de investigar a cura térmica de geopolímeros, considerando variações de tempo, temperatura e idade de cura, é justificada pela crescente demanda por materiais de construção sustentáveis e de alto desempenho. Os geopolímeros, que podem ser produzidos a partir de resíduos industriais, oferecem uma alternativa viável ao cimento convencional, contribuindo para a redução da pegada de carbono na construção civil. No entanto, suas propriedades mecânicas e térmicas são fortemente influenciadas pelas condições de cura, o que torna indispensável compreender como diferentes parâmetros afetam esses resultados.

A variação do tempo e da temperatura durante a cura térmica pode impactar significativamente a microestrutura dos geopolímeros, resultando em alterações na resistência à compressão e durabilidade. Além disso, a idade de cura é um fator crítico que pode afetar a evolução das propriedades ao longo do tempo. Este estudo se justifica não apenas pela necessidade de desenvolver as condições de cura para potencializar o desempenho dos geopolímeros, mas também pela relevância prática que essas informações podem ter para engenheiros de materiais e profissionais da construção civil.

Ao fornecer dados concretos sobre como as variáveis de cura influenciam as propriedades dos geopolímeros, o presente trabalho poderá contribuir para o desenvolvimento de parâmetros mais eficazes para a aplicação desses materiais em projetos reais. Assim, a pesquisa não apenas avança o conhecimento acadêmico sobre geopolímeros, mas também promove práticas construtivas mais sustentáveis e eficientes, alinhadas com as exigências contemporâneas por soluções inovadoras na engenharia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Produzir pastas geopoliméricas curadas em diferentes tempos e temperaturas para obter o melhor resultado de resistência à compressão para aplicação em agregados sintéticos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar as variações de tempo, temperatura e idade de cura em que as pastas geopoliméricas foram curadas termicamente;
- Analisar a influência do tempo de cura de 1, 2, 3 e 4 horas;
- Analisar a influência da temperatura de cura de 40, 60 e 80°C;
- Realizar caracterização das matérias-primas utilizadas;
- Estudar o comportamento mecânico das pastas geopoliméricas através do ensaio de resistência à compressão;
- Realizar análise microestrutural das pastas geopoliméricas;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geopolímero

Na década de 50, o pesquisador ucraniano Vitor Glukhovsky, em seus estudos realizados através de amostras de construções antigas, desenvolveu uma nova classe de ligantes a partir de processos alcalinamente ativados. Portanto, o pesquisador foi o primeiro a concluir que, a partir de transformações geológicas de determinadas rochas vulcânicas transformadas em zeólitas, ocorre a formação de rochas sedimentadas em baixa pressão (Glukhovsky, 1994).

Em 1970, o pesquisador e engenheiro Joseph Davidovits, devido a vários incêndios ocorridos na França que envolveu plástico orgânico, teve iniciativa de produzir materiais resistentes ao fogo, iniciando assim, suas pesquisas em materiais inorgânicos. Foram realizadas pesquisas em fragmentos de Pirâmides do Egito, datadas de 7000 a.C., por possuir estrutura quase inalterada e pouco desgaste químico mesmo sendo expostas a ambientes físicos por longo período de tempo. Após as análises, Davidovits observou que concretos foram formados a partir de calcários caulíníticos com hidróxido de sódio. Em seguida, foram feitas as análises químicas e mineralógicas, onde foi identificado que na microestrutura das amostras existia material amorfo composto por aluminossilicatos. (Davidovits, 2002).

Em 1978, Davidovits patenteou o termo “geopolímero”, “geo” por apresentar semelhança com materiais geológicos e “polímero” baseado na química dos sílico-aluminatos (Davidovits, 2002).

Geopolímeros representam uma classe de materiais inorgânicos que oferecem uma alternativa ecológica ao cimento Portland tradicional. Enquanto o cimento Portland é produzido através de um processo que emite uma quantidade significativa de CO₂, os geopolímeros são fabricados a partir de materiais aluminossilicatos, como cinzas volantes, que reagem com soluções alcalinas para formar uma matriz sólida, reduzindo drasticamente a pegada de carbono. Além disso, os geopolímeros possuem excelente resistência ao fogo e à corrosão, o que os torna ideais para aplicações em ambientes agressivos. Sua durabilidade e estabilidade térmica superam as do cimento Portland, fazendo dos geopolímeros uma opção mais sustentável e duradoura para a construção civil (Paiva, 2020).

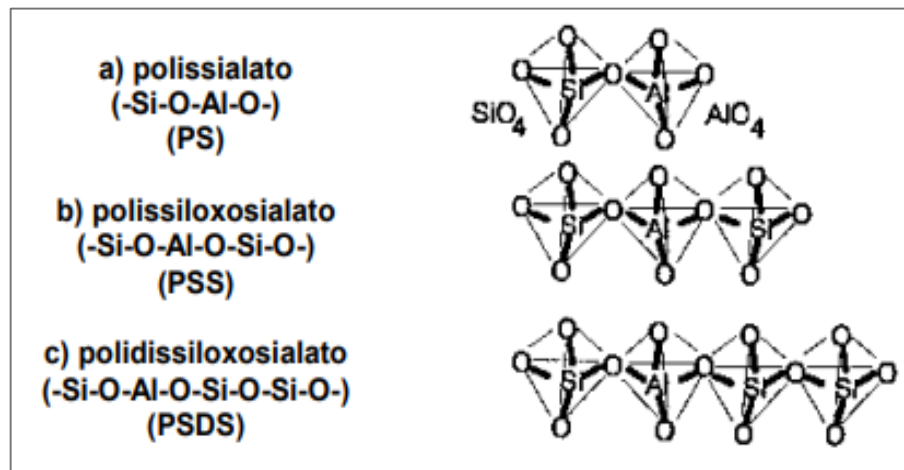
2.2 Estrutura do Geopolímero e a Geopolimerização

Os geopolímeros ou polissialatos, são formados por tetraedros de SiO₄ e AlO₄ ligados alternadamente pelo compartilhamento de todos os átomos de oxigênio, formando uma rede tridimensional. Sua síntese ocorre a partir de reações entre fontes de sílico-aluminatos em um

meio aquoso e alcalino, onde a estrutura do sólido é completamente amorfa (Siyal *et al.*, 2024). Os íons alcalinos, como Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , tem por função atuar como os agentes formadores da estrutura, compensando o excesso de cargas negativas como consequência da alteração da coordenação do alumínio com o oxigênio, que serão responsáveis por determinarem tais propriedades.

Segundo Paiva *et al.* (2020) os geopolímeros são classificados conforme a razão atômica de Si/Al, que são divididos em três classes com estruturas que variam de acordo com a composição química, são eles: Polissialato (-Si-O-Al-O-) com razão Si/Al=1, Polissiloxossilato (-Si-O-Al-O-Si-O-) com razão Si/Al=2 e Poldissiloxossilato (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) com razão Si/Al=3 (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), como representado na figura 1:

Figura 1 — Representação esquemática dos geopolímeros.



Fonte: Davidovits (1994).

Os polissialatos têm a fórmula empírica descrita pela equação (1) abaixo:

$$\text{Mn} [(\text{SiO}_2)_n \cdot \text{AlO}_2]_n, w\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

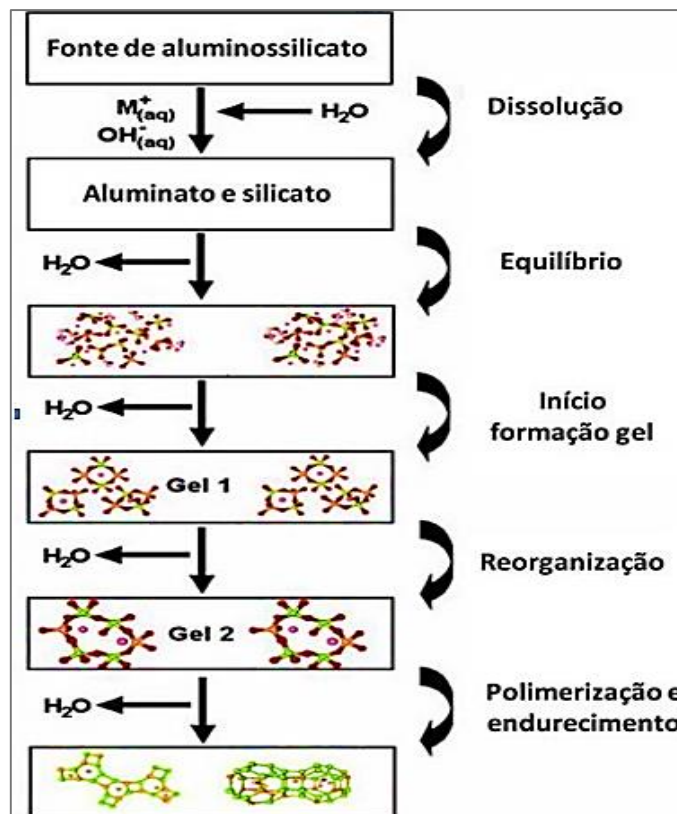
Onde, “M” é um íon positivo (Na^+ , k^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+), “n” é o grau de policondensação e “w” assume um valor em torno de 7 (Davidovits, 1992).

A geopolimerização ou mecanismo de reação do geopolímero envolve uma reação química produzida por uma solução aquosa de elevada alcalinidade designada por ativador, ocorrendo uma reação exotérmica ao entrar em contato com materiais de origem geopolimérica compostas por certos minerais como a sílica e a alumina, criando assim, polímeros com ligações do tipo polissialato (Silva, 2024; Davidovits, 2002).

Segundo Glukhovsky (1994), o processo de ativação alcalina subdivide-se em três etapas. Na primeira etapa ocorre uma quebra das ligações da matéria-prima original, provocado pelo aumento do pH da solução devido à adição de metais alcalinos. Ou seja, é a dissolução do

alumínio (Al) e silício (Si) no meio alcalino. Na segunda fase, há uma agregação dos componentes destruídos, que ao reorganizarem-se formam uma estrutura mais densa ocorrendo assim os processos de policondensação. Nesta fase, após a policondensação, ocorre a formação de um gel que é transformado em uma rede tridimensional de estrutura sílico-aluminato (Raiza, 2021). E finalmente, a terceira etapa conduz à polimerização, causando o endurecimento da estrutura geopolimérica, como mostra na figura 2.

Figura 2 — Mecanismo de geopolimerização.



Fonte: Duxon (2006).

2.3 Matérias-Primas

2.3.1 Metacaulim

O metacaulim é um material de origem pozolânico amorfo, obtido pelo processo de desidroxilação (perda de água) de argilas caulinísticas e caulins de alta pureza em temperaturas que variam entre 600°C a 850°C. A matéria-prima para produção do metacaulim é o caulim, que é um tipo de minério argiloso, onde sua obtenção se dá através do beneficiamento de argilas caulinísticas, que são compostos por silicatos de alumínio hidratado $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$, e tem como um dos principais constituintes a caulinita (Funahashi *et al*, 2022; Lermen *et al*, 2022).

A desidroxilação é uma transformação que ocorre na estrutura cristalina da caulinita, um dos principais argilominerais que compõem o caulim. A caulinita tem a fórmula química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e é um filossilicato de camada 1:1. Quando submetida a altas temperaturas, a caulinita perde as hidroxilas (OH) e se torna uma fase amorfa chamada metacaulinita, que tem a fórmula empírica $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (Pires, 2024).

O processo de desidroxilação do caulim para metacaulim pode ser descrito pela equação 2:



Segundo Davidovits (1994), quando o caulim é transformado em metacaulim, o material torna-se bem mais reativo, com propriedades pozolânica. Portanto, o produto obtido pode ter diferentes graus de finuras, colorações diferentes e superfície específica.

O Metacaulim é um produto resultante da ativação térmica de argilas caulinitas e caulins, que possuem uma composição química variada, expressa em forma de óxidos. Esse material se destaca pela sua cor branca e pelo seu alto ponto de fusão, que varia entre 1650°C e 1775°C . Em comparação com outras argilas, o caulim apresenta menor resistência, maior granulometria e uma estrutura cristalina hexagonal (Silva, 2023).

Em temperaturas mais elevadas, como por exemplo, entre 1000°C e 1100°C , ocorrem transformações de fases de metacaulim para mulita. Porém, de acordo com Santos *et al.*, (2020), tais transformações de fase não são satisfatórias para sintetizar o geopolímero durante o processo de cura, pois compromete a estabilidade dimensional e a reatividade do sistema.

As temperaturas ideais de calcinação do caulim está entre 500°C a 800°C , dependendo da pureza, composição química e cristalinidade do caulim (Funahashi *et al*, 2022; Lermen *et al*, 2022). Dessa forma, haverá a quebra da estrutura semicristalina da caulinita, tornando-se amorfa e mais reativa para a reação de ativação alcalina.

Santos et al (2020), afirmam que a polimerização depende da presença de íons de silício e alumínio extraídos da estrutura por meio de um processo de lixiviação. Portanto, a resistência mecânica do geopolímero é proporcional à quantidade de íons que podem participar da reação. Dessa forma, o metacaulim, que possui muito silicoaluminato amorfo, é uma matéria-prima essencial para a produção do polissialato, pois é uma das fontes desses íons (Brito, 2018; Lermen *et al.*, 2022; Azevedo e Lombardi, 2018).

2.4 Ativadores Alcalinos

Os materiais geopoliméricos são geralmente sintetizados usando soluções ativadoras a base de álcalis de sódio ou potássio, (soluções de hidróxidos alcalinos ou uma mistura de soluções de silicato alcalino e de hidróxido alcalino), a diferença entre estes dois ativadores é que o primeiro não adiciona sílica ao sistema, enquanto o segundo tem essa concentração elevada (Lucas, 2021; Cruz, 2023). A síntese do geopolímero ocorre pela mistura de material reativo a aluminossilicatos com soluções alcalinas fortes. Dessa forma, a solução alcalina é uma importante etapa da produção do geopolímero, resultando na dissolução de átomos de Si e Al, formando precursores dos geopolímeros (Rosetto, 2017).

A preparação da solução para ativação alcalina envolve a mistura de: água, hidróxido de sódio ou potássio e silicato de sódio, porém podem ser utilizados outros sistemas de metais alcalinos ou misturas de álcalis diferentes. Esta solução precisa ser concentrada para evitar que o produto seja um zeólito cristalino em vez de um geopolímero (Jonhson, 2024).

A ativação alcalina é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (amorfos, parcialmente amorfos ou metaestáveis) em um compactado material cimentício (Cruz, 2023). A dissolução dos aluminossilicatos em solução alcalina é um fenômeno que envolve a remoção de íons de alumínio e silício da estrutura cristalina (processo denominado “lixiviação”), o que requer uma alta concentração do agente ativador para que o processo ocorra com êxito (Lucas, 2021).

A resistência mecânica dos geopolímeros é influenciada pelo tipo de ativador utilizado. O silicato de sódio (Na_2SiO_3) proporciona maior resistência do que o silicato de potássio, porém, essa resistência se reduz quando submetida a altas temperaturas. Portanto, o ativador mais adequado varia de acordo com o material e o desempenho mecânico desejado para os geopolímeros (Trincal, *et al.*, 2022 apud Cruz, 2023).

Dentre os ativadores, o hidróxido de sódio está entre os mais utilizados na preparação do geopolímero quando comparado com o hidróxido de potássio, por apresentar o melhor custo financeiro e ser o mais acessível e disponível no mercado para obtenção, o que praticamente define sua escolha (Brito *et al.*, 2019). Segundo Yun-Ming (2016) os geopolímeros produzidos com KOH apresentam uma resistência à compressão 42% maior que aqueles produzidos com NaOH. Tal diferença é explicada devido à presença de cátions de potássio (K^+) que aumenta a desordem na fase gel (Zhang *et al.*, 2017).

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) é a fonte complementar utilizada na reação de geopolimerização. É formado pela reação entre carbonato de sódio e dióxido de silício quando

fundidos, sendo um sólido branco que é solúvel em água, produzindo uma solução alcalina (Cruz, 2023). A reação do geopolímero depende da rapidez dos ativadores à base de silicato, pois a sílica presente na solução reage com a alumina disponível. O silicato favorece o processo de polimerização, resultando em um material com maior teor de Si e maior resistência mecânica (Partschefeld, 2020).

Segundo os estudos de Silva (2025), a presença de silicato de sódio na pasta de geopolímero à base de escória de alto forno aumenta em grande parte a trabalhabilidade e resulta no aumento da resistência à compressão. A solução de silicato de sódio melhora a taxa de dissolução de Si e Al, pois as ligações Al–O são mais fracas que as ligações Si–O na matéria-prima, o Al se dissolve rapidamente em solução alcalina. Portanto, se o íon Si for fornecido antes de estar disponível através da dissolução da matéria-prima, pode aumentar o grau de geopolimerização e melhorar as propriedades mecânicas (Cruz, 2023).

2.5 Resíduos Industriais

Os resíduos industriais tem se destacado como alternativas sustentáveis para a produção de geopolímeros, especialmente por sua abundância e elevado potencial reativo. Materiais como cinzas volantes, escória de alto-forno, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos cerâmicos e resíduos da construção civil possuem elevada concentração de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), elementos essenciais para a formação da matriz geopolimérica (Shukla *et al.*, 2023). O aproveitamento desses subprodutos reduz significativamente o consumo de recursos naturais e contribui para a diminuição da emissão de CO_2 em comparação aos materiais tradicionais, como o cimento Portland. Além disso, o uso de resíduos contribui para minimizar os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado de resíduos sólidos industriais (Shukla *et al.*, 2023).

Na prática, a utilização de resíduos industriais na formulação de geopolímeros promove não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também pode melhorar propriedades técnicas do material, como resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica (Shukla *et al.*, 2023). Por exemplo, a adição de escória de alto-forno pode acelerar o processo de ativação alcalina, enquanto cinzas volantes contribuem para uma maior trabalhabilidade da pasta. No contexto da economia circular, o desenvolvimento de geopolímeros com resíduos industriais representa uma estratégia eficaz para transformar passivos ambientais em produtos de alto valor agregado, possibilitando sua aplicação em diversas áreas.

2.5.1 Escória de Alto Forno (EAF)

A escória de alto-forno é produzida a partir do subproduto do ferro gusa. Porto (2019) cita que, a produção do ferro gusa ocorre em unidades industriais designado Altos Fornos, nos quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam das impurezas que os acompanham. No processamento do minério de ferro, o óxido de ferro é reduzido pela reação do carbono do carvão, e a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) se fixam com a cal e o óxido de magnésio do fundente, formando a escória que sobrenada no ferro gusa.

O aproveitamento das escórias de alto forno, depende do tipo de resfriamento a que elas são submetidas. No resfriamento lento, a escória é depositada em pilhas e resfriada naturalmente, o que leva à formação de fases cristalinas na sua estrutura. Essas fases diminuem a reatividade da escória e, conseqüentemente, o seu potencial de uso como material cimentício suplementar. No resfriamento rápido, a escória é resfriada de forma brusca, por meio de jatos de água ou ar, o que impede a formação de cristais e mantém a sua estrutura amorfa. Essa estrutura confere à escória uma alta reatividade e a capacidade de reagir com a água, formando compostos hidratados similares aos do cimento Portland. Dessa forma, a escória de resfriamento rápido pode ser utilizada como substituto ou complemento do cimento em concretos e argamassas, trazendo benefícios ambientais, econômicos e de desempenho. Portanto, o resfriamento das escórias é um fator determinante para o seu aproveitamento na construção civil (Nehring *et al*, 2021; Silva *et al*, 2019; Souza, 2020).

Davidovits (2011) afirma que a reatividade da escória a torna apta para sofrer ativação alcalina, pois as escórias são rentáveis e é possível produzir materiais poliméricos a partir de escórias em pequena variação de tempo e em temperatura ambiente. A escória granulada de alto forno possui alto índice de cálcio, e será responsável por produzir um gel do tipo C-A-S-H, e quando o precursor tiver baixo índice de cálcio, como exemplo a cinza volante, será produzido um gel do tipo N-A-S-H. O endurecimento dos géis forma o geopolímero, que serão responsáveis por fornecer ganho de resistência (Singh, 2019; Ozcan e Karakoc, 2019).

2.5.2 Escória de Aciaria

A escória de aciaria é um subproduto oriundo da conversão de minério de ferro ou rejeitos de ferro produzidos pelas indústrias siderúrgicas. O grande volume gerado e a forma de armazenamento justificam a utilização das escórias de aciaria para o desenvolvimento sustentável.

Por possuírem uma textura superficial mais porosa quando comparados aos agregados naturais, as escórias de aciaria são mais suscetíveis à retenção de umidade, que somada com a presença de óxidos hidratáveis provoca a instabilidade volumétrica (Freitas, 2018). O principal fator de estabilização dos óxidos reativos, é a umidade. Portanto, ganham importância as propriedades de absorção de água, porosidade e superfície específica. A superfície específica é usada para determinar a finura de moagens. Sendo assim, quanto maior a finura do cimento, maior a quantidade de componentes hidratados, e conseqüentemente, maior a resistência da pasta (Freitas, 2018).

2.5.3 Cinza Volante

A cinza volante é um subproduto industrial da produção de energia, sendo um resíduo oriundo da combustão de carvão, produtos de petróleo ou outros materiais em usinas termelétricas (Al-Ghouti *et al.*, 2021). É considerado um resíduo proveniente da produção do alumínio que pode gerar vários impactos ao meio ambiente (Abdullah *et al.*, 2021; Hager *et al.*, 2018). Portanto, nas últimas décadas foram buscadas alternativas para reutilização desse resíduo, principalmente na construção civil, afins de reduzir os impactos ambientais gerados pelo mesmo. Dessa forma, a cinza volante vem sendo alvo de estudos por vários autores com o intuito de utilização como ligante polimérico na síntese de geopolímero (Shane *et al.*, 2020).

A cinza volante é responsável por fornecer aluminossilicato na formação de geopolímeros. Na fase de endurecimento, as propriedades do geopolímero são influenciadas pela utilização de cinzas volantes, que melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência mecânica. Além disso, a utilização de cinza volante como material de partida na produção dos geopolímeros minimizam os problemas de armazenamento e possível contaminação do ar com materiais particulados (Shane *et al.*, 2020)

2.6 Resíduos Agrícolas

A indústria da construção civil é um dos ramos mais poluente, tratando-se da emissão de CO₂. Apesar de que, a emissão de CO₂ pelo concreto geopolimérico ser de até 3,6 vezes menor do que a emissão pelo concreto tradicional (Davidovits, 2002). Sendo assim, a síntese de geopolímeros pode ser ainda mais ecológica se forem utilizadas matérias-primas mais limpas para sua produção.

Uma forma de aproveitar os resíduos orgânicos que são gerados pela agroindústria é transformá-los em materiais que possuem alto teor de Silício (Si), um elemento químico essencial para a fabricação do geopolímero. Para isso, é necessário que esses resíduos, como a

cinza que sobra da queima da casca de arroz e o bagaço que resta da extração do caldo da cana-de-açúcar, sejam submetidos a um processo de carbonização eficaz, que os torne aptos para serem misturados com a solução alcalina (Paiva, 2020).

2.6.1 Cinza da casca de arroz (CCA)

Em 2014, o Brasil acumulou mais de 12 milhões de toneladas de arroz com casca, aproximadamente 2,4 milhões de toneladas de casca de arroz, transformados em 485 mil toneladas de cinza de casca de arroz (Lima, 2018). Neste mesmo ano, o Brasil ocupou a 10ª colocação dos países que mais produzem este grão (Lima, 2018).

A cinza da casca de arroz (CCA) é um material rico em SiO_2 amorfo (entre 80 e 95%), que pode ser utilizado como fonte complementar de sílica na produção de geopolímeros. A CCA pode ser dissolvida em hidróxido de sódio, gerando um silicato de sódio alternativo (ASW), que pode ser usado para ativar o metacaulim. A casca de arroz é um resíduo abundante da agroindústria, que pode ser transformado em cinza por meio de um processo de combustão controlada. A utilização da CCA na produção de silicato de sódio e geopolímeros representa uma forma de aproveitamento sustentável do resíduo, reduzindo o impacto ambiental e o custo dos materiais (Lima *et al*, 2020).

Diversos estudos como, Lima (2018), apontam o silicato de sódio obtido através de CCA como um ativador alcalino eficiente para produção de geopolímeros, apresentando valores de resistência mecânica semelhante aos valores obtidos com silicatos de sódio comerciais. Porém, faltam estudos mais aprofundados referentes a substituição total do silicato de sódio comercial pelo silicato de sódio produzido através da dissolução de CCA em hidróxido de sódio para produção de geopolímeros.

2.6.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

O Brasil é atualmente o principal país produtor de cana-de-açúcar no mundo, gerando aproximadamente cerca de 460 milhões de toneladas em 2006 (Casado, 2024). Durante a moagem da cana-de-açúcar para extração do caldo, há geração do resíduo sólido, o bagaço. Esse subproduto é geralmente queimado como combustível em caldeiras que geram o vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool e em processos de co-geração de energia. A cinza do bagaço é gerada como subproduto, assim como méis, torta de filtro e vinhaça (Casado, 2024).

A cinza do bagaço possui composição química predominantemente de dióxido de silício e alumina, que exercem atividades pozolânicas que influenciam nas propriedades

químicas e mecânicas das pastas, argamassas e concretos (Farías, 2018). A influência nas propriedades está relacionada ao tamanho da partícula deste material e a quantidade de material amorfo (aluminossilicatos), além de conter também, hidróxido de cálcio e teor de umidade adequado, exercendo potencial para ser aplicados no concreto como preenchimento de vazios na estrutura (Porto, 2019).

2.7 Agregados

As rochas são aplicadas em diversas finalidades na área da construção civil e geralmente são utilizados como agregados para concreto e pavimentação asfáltica, para produção de pedras britadas, em revestimento, fundação, entre outras aplicações (Fournari e Ioannou, 2019).

Os agregados são definidos como material granular, sem forma ou volume definidos, geralmente como inerte e que possuem dimensões e propriedades adequadas para aplicação em obras da construção civil (DING *et al*, 2020). Segundo a ABNT NBR 7211 (2022) os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, estáveis, compactos e resistentes, além de apresentar uma resistência superior a massa do cimento, caso contrário, os grãos se romperiam antes da pasta. As características das partículas dos agregados dependem da rocha de origem e do processo de produção, visto que é durante o processo de britagem que resulta na forma final dos agregados (Cruz, 2023). Os agregados influenciam em muitas propriedades do concreto em seu estado fresco, como trabalhabilidade, retração por secagem, desgaste por abrasão e propriedades mecânicas.

Segundo Cruz (2023), três quartos do concreto é composto por agregados, sendo de grande importância o conhecimento de sua qualidade. Os agregados de má qualidade podem limitar a resistência do concreto e suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural o concreto.

Os agregados são classificados de acordo com sua origem, em naturais e artificiais. Os naturais são aqueles encontrados na natureza e não necessitam de nenhum processo de fragmentação e os artificiais são extraídos da rocha de origem e carecem de processos mecanizados para sua fragmentação, como britagem ou moagem (Cruz, 2023).

A maioria dos agregados encontram-se disponíveis na natureza, como é o caso das areias e seixo. Em alguns casos, é necessário passar pelo processo de beneficiamento como é o caso das britas, cuja rocha é extraída diretamente da jazida e precisa passar por diversos processos de beneficiamento para atingir tamanhos granulometricamente adequados para torna-se aptos em aplicações.

Para aplicação na construção civil, as dimensões dos agregados são classificadas de acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2022):

- Agregados miúdos: os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm.

- Agregados graúdos: os grãos passam pela peneira com abertura de malha 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

De acordo com a norma técnica NBR 7211 (2009), a areia natural ou agregado miúdo é o material formado por partículas minerais que têm principalmente quartzo e tamanhos entre 0,06 e 2,0 mm, que são filtradas pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,75 mm.

A distribuição dos tamanhos das partículas do agregado miúdo é uma propriedade relevante e existem várias razões para definir limites granulométricos dos agregados, sendo o mais significativo a sua influência no custo e na trabalhabilidade. Por exemplo, areias muito grossas resultam em misturas de concreto rígidas e difíceis de trabalhar, e areias muito finas exigem mais água, aumentando o consumo de cimento para manter a relação água/cimento adequada, o que é desvantajoso economicamente. Em geral, agregados com uma granulometria variada favorecem a produção de misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas (Lucas, 2021).

2.7.1 Agregados Naturais

Os grãos que compõem os agregados naturais são oriundos da modificação das rochas pela ação dos agentes climáticos e produzidos por processos de fragmentação mecânica, como os pedregulhos, os seixos, britas, areais, etc. Já os agregados artificiais requerem uma alteração física e química do material natural para que possam ser utilizados, como a escória de alto forno e a argila expandida, que são submetidos a elevadas temperaturas (Kekanović *et al*, 2020). O conhecimento das características e a seleção crítica dos agregados graúdos, possibilita um maior controle das propriedades do concreto, produzindo um material de melhor qualidade mais resistente e durável (Cruz, 2023).

2.7.2 Agregados Sintéticos

As atividades industriais e da construção civil têm se destacado na atualidade por suas interações com a questão ambiental e o conceito de sustentabilidade. Diante disso, é fundamental que os resíduos produzidos por essas atividades sejam destinados de forma correta e adequada ao meio ambiente, a fim de reduzir os danos causados à natureza e à sociedade.

Dessa forma, a reciclagem e a transformação de resíduos como a escória de alto forno e a cinza volante, em materiais úteis, se apresentam como uma opção possível para uso na construção civil, convertendo esses materiais em agregados sintéticos (Oliveira *et al.*, 2019; Mohammed *et al.*, 2021; Santos, 2019).

Os agregados sintéticos vêm sendo empregados na construção civil como uma medida de reciclagem de resíduos industriais. Podem ser resíduos industriais granulares, que possuem propriedades que os tornem adequados ao uso como agregado (Ulugöl *et al.*, 2021; Mesgari *et al.*, 2020). Este tipo de agregado também pode ser oriundo do beneficiamento de Resíduos de Construção e Demolição, os denominados RCD's. São exemplos de agregados reciclados a escória de alto forno, entulhos de construção/demolição, escória de aciaria, entre outros.

Segundo os estudos de Figueiredo (2020), a reciclagem dos resíduos de construção e demolição é encorajada dentro dos novos preceitos de sustentabilidade e economia, onde os benefícios se estendem ao aumento da vida útil de jazidas minerais, à conservação dos recursos naturais e à eliminação da deposição ilegal dos resíduos nas cidades (Ulugöl *et al.*, 2021). Dessa forma, para produção de agregados reciclados com propriedades adequadas às aplicações, é necessário o controle das operações de cominuição no beneficiamento do RCD (Naggar *et al.*, 2019; Angelo *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2020).

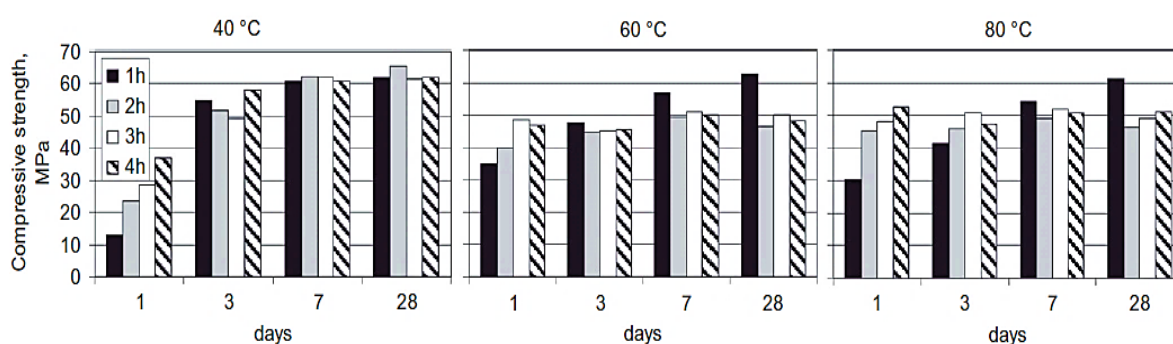
2.8 Influência da Cura Térmica em Geopolímeros

A cura térmica está interligada com todas as etapas da geopolimerização, e como consequência, com a resistência mecânica do geopolímero formado. Estudos recentes, tal como Lima (2018) indica que os parâmetros críticos para a eficácia do processo de cura de geopolímero incluem não apenas a temperatura, mas também a umidade relativa e a circulação de ar adequada. A cura térmica é particularmente benéfica, pois pode acelerar significativamente a resistência mecânica e a durabilidade desses materiais. Pesquisadores observaram que temperaturas em torno de 30°C, comumente encontradas em regiões tropicais, são suficientes para promover uma cura eficiente, contribuindo assim para a sustentabilidade e a viabilidade econômica do uso de geopolímeros em construções civis (Lima, 2018).

A elevação da temperatura de cura acelera a dissolução das partículas, a difusão e a formação do gel, resultando na diminuição do tempo de pega, redução da porosidade e aumento da resistência mecânica. No entanto, elevadas temperaturas aumentam o tamanho dos poros e a distribuição dos mesmos, afetando adversamente as propriedades mecânicas do material (Maturana, 2023).

Rovnaník (2010) analisou amostras submetidas a diferentes temperaturas e tempo de cura caracterizadas por ensaio de resistência a compressão. As amostras foram expostas a temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C em tempos de exposição que variaram de uma a quatro horas, ou seja, 1, 2, 3 e 4 horas com idade de cura de 1, 3, 7 e 28 dias. A figura 3 mostra os resultados obtidos pelo autor quanto ao ensaio mecânico de resistência a compressão, que demonstra os ganhos iniciais de resistência com aumento de temperatura e a deterioração das amostras submetidas ao aumento de temperatura em função da idade de cura.

Figura 3 — Influência do tempo de cura nas resistências à compressão do geopolímero curado em temperaturas elevadas.



Fonte: Rovnaník (2010).

Estudos realizados por Mavila *et al* (2021), afirmam que períodos de cura extensos alteram as reações química durante o processo de geopolimerização. Tal fator ocorre devido à evaporação parcial de água, originando-se à formação de microcavidades que podem consequentemente causar fissuras nas amostras. Portanto, é recomendável manter a umidade no aglomerante para preservar a integridade na mistura, comprometendo a microestrutura do produto final, tornando-o granular, poroso e com baixa propriedades mecânicas.

2.9 Aplicações

Os materiais geopoliméricos são materiais com características similares aos materiais à base de cimento. São considerados produtos atrativos em termo de mercado, possuem baixo custo e menor agressão ao meio ambiente, sendo um material propício para substituir o cimento Portland, tendo uma vasta aplicabilidade (Araújo, 2017).

Os geopolímeros podem ser aplicados em altas temperaturas, onde o desempenho termomecânico do geopolímero apresenta resultados excelentes em elevadas temperaturas e tempos de exposição, sem apresentar mudanças significativas em sua estrutura e sem apresentar o surgimento de partículas Portlandita (Porto, 2019). Tais materiais podem ser aplicados também na indústria automobilística, aérea, indústria naval e de submarinos, infraestrutura e

aplicações em construções, cimentação de poços de óleo e gás, armazenamento e encapsulação de materiais tóxicos e radioativos, entre outros (Davidovits, 2002).

Atualmente, um dos maiores exemplos de construção geopolimérica é o Brisbane West Wellcamp Airport (figura 4), localizado na Austrália. Nesta aplicação foram utilizados 40.000 m³ (100.000 toneladas) de concreto geopolimérico, tornando-se a maior aplicação no mundo, até então.

Figura 4 — aplicação do geopolímero em Brisbane West Wellcamp Airport

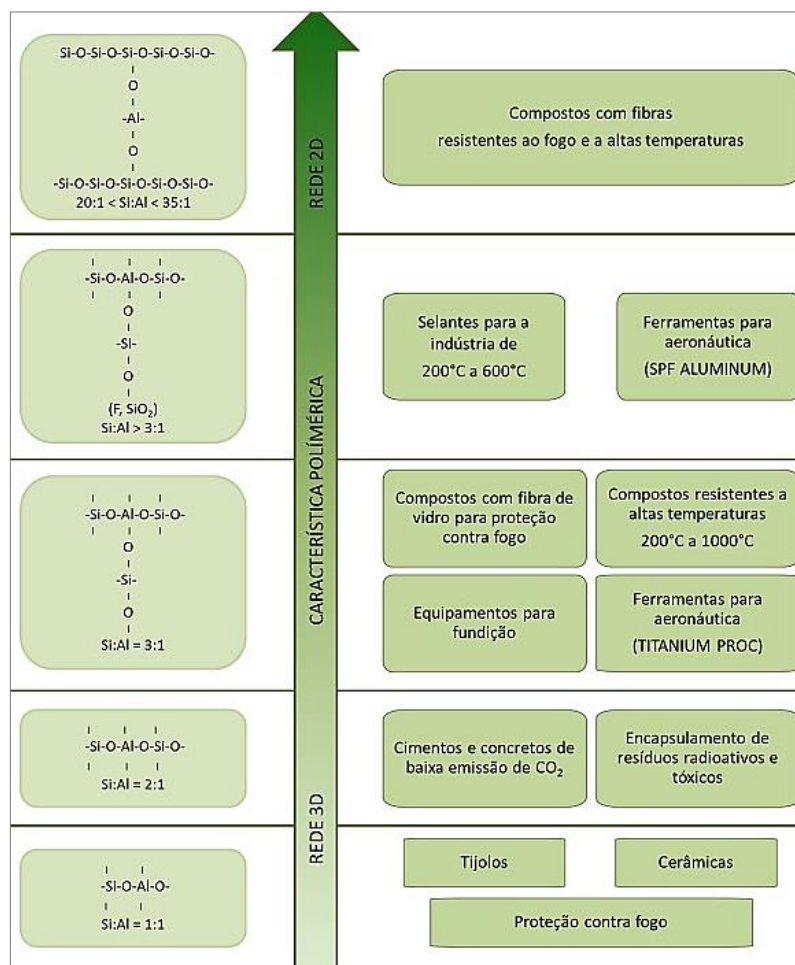


Fonte: Toowooba Wellcamp Airport (2019).

Devido à boa resistência ao calor, os geopolímeros têm sido estudados como parte integrante de compósitos e pode se aplicar em diferentes áreas, onde a resistência ao calor é fundamental, como é o caso dos aviões comerciais, plataformas marinhas, dos barcos e dos transportes terrestres, onde o risco de incêndio é um dos principais fatores em termo de design devido as saídas restritas (Davidovits, 1997).

A síntese empregada e a relação Si/Al determinam diretamente os produtos formados pela reação de geopolimerização. Relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, geram geopolímeros usados em materiais cerâmicos com qualidades de proteção contra fogo, elevando essa relação para $2 < \text{Si}/\text{Al} < 6$, é viável obter geopolímero, com propriedades de fixação de metais, equipamentos para fundição, aeronáutica e cerâmicas e concretos com reduzida emissão de CO_2 . As relações $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, entre 6 e 40 originam selantes industriais, e relações maiores que 40 são aplicadas para produção de geopolímeros com altíssima resistência ao fogo (Mohd *et al.*, 2020; Abdel-Ghani *et al.*, 2018).

Figura 5 — aplicação do geopolímero de acordo com sua razão Si/Al.



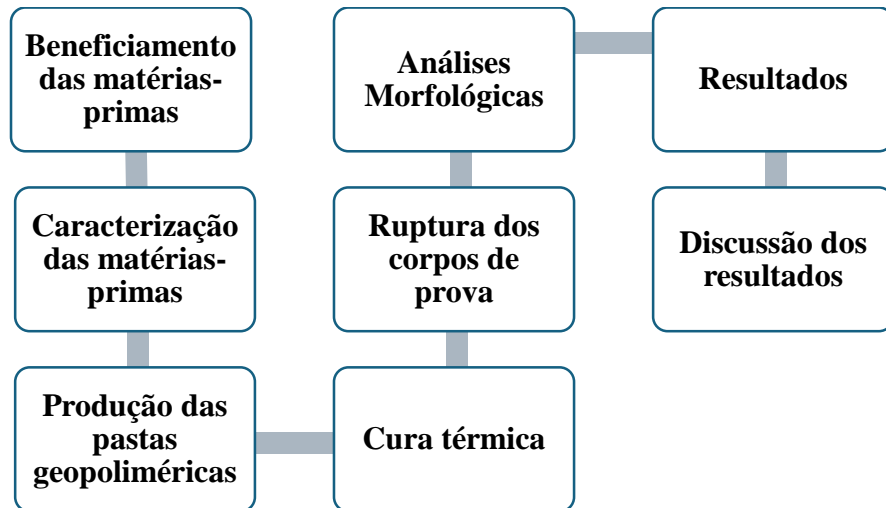
Fonte: Adaptado de Davidovits (1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão apresentados os materiais utilizados para obtenção das pastas geopoliméricas curadas termicamente. Os procedimentos para caracterização, mistura, moldagem e ruptura dos corpos-de-prova foram realizados conforme as normativas para cada situação. A realização da etapa experimental, bem como o beneficiamento de matéria-prima e

a produção das pastas geopoliméricas foram realizadas no Laboratório de Práticas Tecnológicas (LAPTEC) da Faculdade de Engenharia de Materiais – UFPA (Campus de Ananindeua). As etapas do desenvolvimento do trabalho estão apresentadas no fluxograma 1.

Figura 6 — Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: autora (2025).

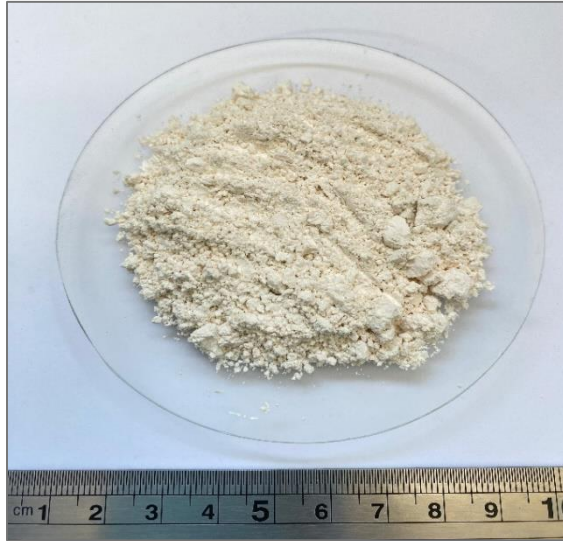
3.1 Materiais

Para elaboração das pastas geopoliméricas, foram utilizados como matérias-primas o metacaulim, escória de alto forno e a solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3).

3.1.1 Metacaulim

A matéria-prima metacaulim foi utilizado como a principal fonte de Alumínio e Silício através da calcinação do caulim. O material foi disponibilizado pela empresa Mineral Mix S.A.

Figura 7 — Metacaulim, fonte de silício e alumínio.



Fonte: autora (2025).

3.1.2 Escória de Alto Forno

O resíduo utilizado para produção do geopolímero foi a escória de alto forno aplicada como fonte de cálcio, fornecida pela empresa Sinobrás - Siderúrgica Norte Brasil, localizada em Marabá, no Pará. A figura 8 apresenta amostra de escória de alto forno.

Figura 8 — escória de alto forno como fonte de cálcio.



Fonte: autora (2025).

3.1.3 Solução alcalina

A solução alcalina é composta por H_2O (água), KOH (hidróxido de sódio) e $Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$ (silicato de sódio alcalino). A água utilizada na solução foi do tipo destilada.

3.1.4 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (escama) puro, foi utilizado com intuito de manter o pH básico da solução, o que é necessário para ocorrer a reação de geopolimerização. As características do hidróxido de sódio estão presentes na tabela 1, conforme especificações do fabricante.

Tabela 1: Especificações do Hidróxido de Sódio.

Determinação	Especificação
Aparência	Escamas
Cor	Branco
Concentração Mín.	97,5%
Carbonato de Sódio Máx.	0,6%
Cloreto de Sódio Máx.	0,03%

Fonte: Êxodo Científica (2025).

3.1.5 Silicato de Sódio

O silicato de Sódio contribui para o processo de geopolimerização, sendo uma fonte complementar de SiO_2 . A composição do silicato de sódio utilizado foi o comercial. As especificações do material estão apresentadas na tabela 2, conforme informações do fabricante.

Tabela 2: Especificações do Silicato de Sódio.

Determinação	Especificação
Aparência	Pó
Cor	Branco
Voláteis	0%
PH	11 – 13
Solubilidade em água	Total
Na_2O	23 – 26%
SiO_2	56 – 60%
$\text{SiO}_2/\text{NaO}_2$	2,8 – 2,4%

Fonte: Êxodo Científica (2025).

3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na primeira etapa da metodologia experimental, as matérias primas (escória de alto forno, caulim e metacaulim) foram beneficiadas, e em seguida, foram feitos estudos de caracterização física e química. Após essa etapa, foram produzidas as pastas geopoliméricas com as seguintes variações: temperatura (40°C, 60°C e 80°C), tempo (1 hora, 2 horas, 3 horas e 4 horas) e idade de cura (3 e 7 dias), conforme as tabelas 3 e 4. As variações utilizadas foram com base nos estudos de Rovinanić (2010). Após a completa idade de cura dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, segundo a norma NBR 5738 (2016), seguido de análises morfológicas dos fragmentos do material ensaiado.

Tabela 3: Variação de temperatura e tempo de pastas geopoliméricas, com 3 dias de cura.

3 DIAS DE CURA		
40°C/1h	60°C/1h	80°C/1h
40°C/2h	60°C/2h	80°C/2h
40°C/3h	60°C/3h	80°C/3h
40°C/4h	60°C/4h	80°C/4h

Fonte: autora (2025).

Tabela 4: Variação de temperatura e tempo das pastas geopoliméricas, com 7 dias de cura.

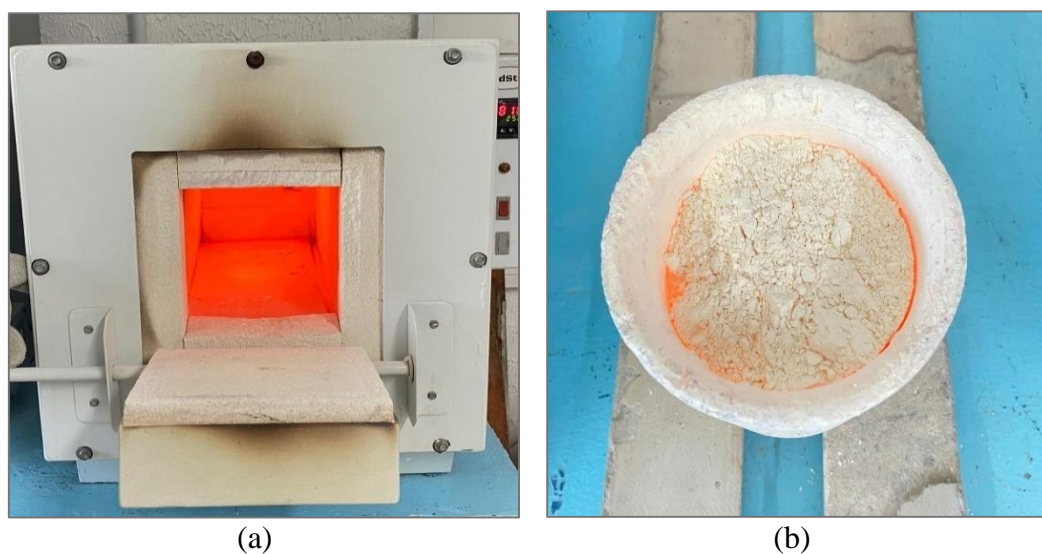
7 DIAS DE CURA		
40°C/1h	60°C/1h	80°C/1h
40°C/2h	60°C/2h	80°C/2h
40°C/3h	60°C/3h	80°C/3h
40°C/4h	60°C/4h	80°C/4h

Fonte: autora (2025).

3.2.1 Calcinação do Caulim para Obtenção do Metacaulim

A calcinação do caulim ocorreu em um forno mufla, modelo SSFm, da marca SOLIDSTEEL, com capacidade de aquecimento de 1200°C. O processo de calcinação ocorreu em temperatura de 850°C por 2 horas, com base nos estudos de Cruz (2023). A Figura 9 demonstra o forno mufla utilizado e o cadinho com metacaulim logo após sua retirada.

Figura 9 — Calcinação do caulim para obtenção do metacaulim. (a) forno mufla; (b) cadinho incandescente.

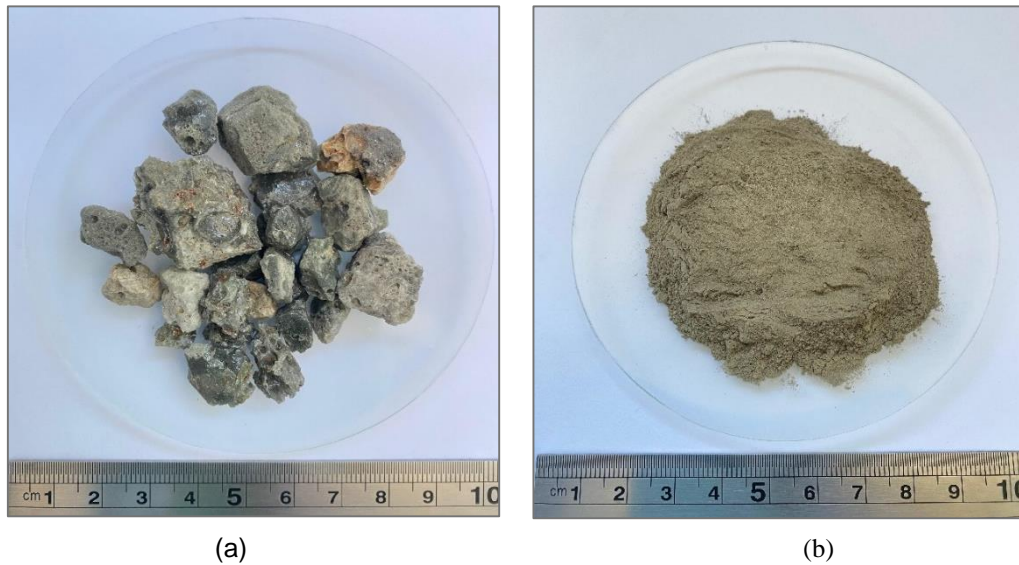


Fonte: autora (2025).

3.2.2 Beneficiamento da Escória de Alto Forno

O processo de beneficiamento da escória de alto forno envolveu inicialmente a secagem na estufa de marca QUIMIS, a uma temperatura controlada de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas. Após a secagem, a escória foi submetida a um processo de moagem utilizando um jarro de marca CHIAROTTI com capacidade de 3 L e um moinho de bolas, onde o material foi submetido por 2 horas até a completa moagem. Para alcançar a granulometria desejada, foi utilizado a peneira de #200 mesh (abertura de 75 μm). A Figura 10 demonstra a escória antes e após o beneficiamento.

Figura 10 — EAF (a) antes do beneficiamento; (b) após o beneficiamento.



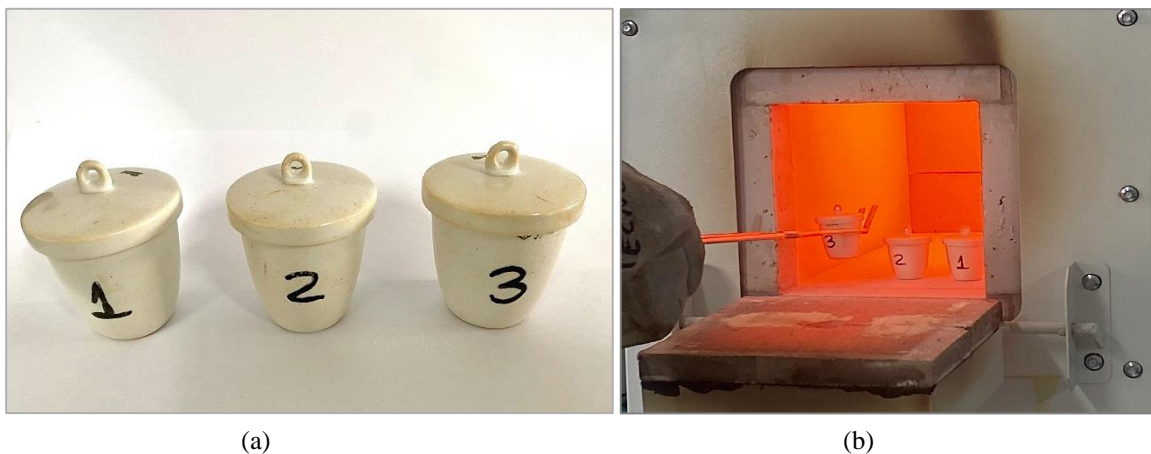
Fonte: autora (2025).

3.2.3 Testes Físico

3.2.4 Perda ao fogo

O ensaio foi determinado através da norma ABNT NBR NM18 (2012) Cimento portlant – análise Química – Determinação de Perda ao Fogo. O processo consistiu em pesar 5 g das amostras de caulim, metacaulim e escória de alto forno. As amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana e submetidas a um processo de calcinação em forno mufla, com temperatura controlada entre 950 ± 50 °C, durante um período mínimo de 50 minutos. Após a calcinação, os materiais foram resfriados em temperatura ambiente, em seguida, pesados novamente. Ressalta-se que foi realizado triplicata para cada material. A Figura 11 demonstra os procedimentos do ensaio.

Figura 11 — (a) cadinho com amostras de caulim, metacaulim e escória de alto forno; (b) cadinhos em forno mufla.



Fonte: autora (2025).

O cálculo de perda ao fogo, expresso em porcentagem, é calculado através da fórmula abaixo:

$$PF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Onde,

m_1 = Massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada (g)

m_2 = Massa do cadinho mais a amostra, após a calcinação (g)

3.3 Análises

Para analisar a microestrutura das matérias-primas, foi realizado análises mineralógicas de caracterização de Difração de Raio-X (DRX), Espectroscopia do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Fluorescência de Raio-X (FRX) e Microscopia eletrônica de Varredura (MEV).

3.3.1 Difratomia de Raio-X (DRX)

As análises de DRX das matérias-primas caulim, metacaulim e escória de alto forno foram realizadas no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal do Maranhão – IFMA. O difratômetro utilizado foi da marca Bruker D2 phaser. Software: DIFFRAC SUITE: gerador de radiação Cu-Ka de 30kV e 10mA, precisão de angular de aproximadamente 0,02° com faixa de ângulo de 2θ de 0° a 160°.

3.3.2 Espectroscopia do Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise foi aplicada às matérias-primas caulim e metacaulim em pó para avaliar o grau de desordem das bandas características do material. A técnica foi realizada através de um espectrômetro Thermo Electron, modelo Nicolet S10 do Laboratório de Física da UFPA, com objetivo de realizar a varredura espectral de infravermelho médio das amostras, com 32 varreduras ao longo do intervalo de números de ondas de 4000 cm⁻¹ e resolução de 4 cm⁻¹.

3.3.3 Fluorescência de Raio-X (FRX)

A análise de Fluorescência de Raio-X foi realizada em amostras de escória de alto forno, no Laboratório de Análises Mineraias – CTRN (UFRN), para identificar e quantificar os elementos químicos presentes. A análise foi realizada utilizando um Espectrômetro de Bancada

de Energia Dispersiva (EDX), da marca Thermo Fisher Scientific, modelo ARL QUANT'X, utilizando o método a vácuo para leitura de elementos leves.

3.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises micrográficas foram executadas na superfície das amostras após a realização dos ensaios mecânicos das pastas geopoliméricas e nos pós do caulim, metacaulim e escória de alto forno. As análises foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios do Instituto Federal do Pará (IFPA), utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca TESCAN, equipado com EDS da marca OXFORD INSTRUMENTS X-MAN^N, ilustrado na Figura 12.

Figura 12 — Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: autora (2025).

3.4 Dosagem das Pastas Geopoliméricas

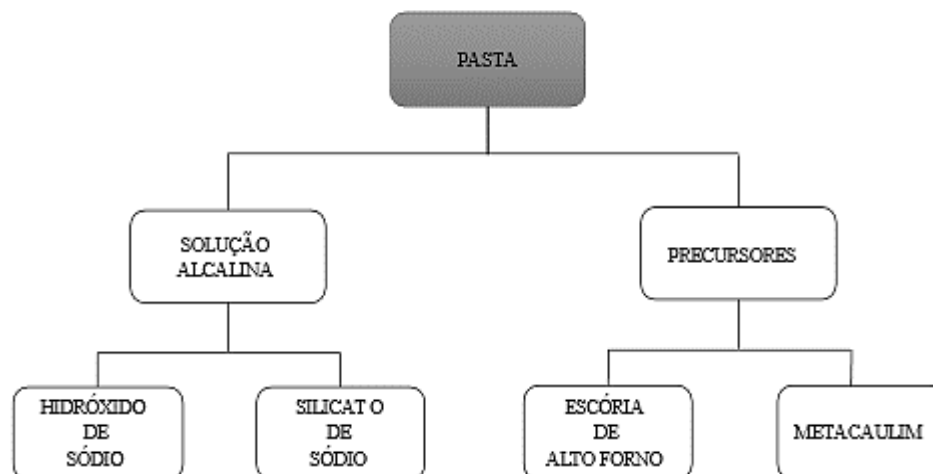
A dosagem de matéria-prima para produção das pastas geopoliméricas teve como base o estudo de Cruz (2023), que produziu os CP's com variação em percentual de escória de alto forno entre 0%, 10%, 20%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% e 60%, e obteve a melhor composição em 35%, alcançando uma resistência mecânica de 36 MPa para corpos de prova com 7 dias de cura. Quanto a solução alcalina, também foi utilizado os estudos de Cruz (2023) como referência, visto que os resultados de pasta obtidos foram satisfatórios, atingindo 44,79

MPa, utilizando concentração alcalina de NaOH com 10 molar, juntamente com o melhor resultado da variação de escória de alto forno, com 35%.

3.4.1 Obtenção e Moldagem das Pastas Geopoliméricas

A obtenção das pastas geopoliméricas foi realizada de acordo com a relação de proporção entre os precursores metacaulim/escória de alto forno, juntamente com a solução alcalina, onde o hidróxido de sódio foi dissolvido em solução aquosa, e em seguida, foi misturado ao silicato de sódio, resultando na solução alcalina de molaridade 10. Ressalta-se que a solução foi produzida em capela para a correta exatidão dos gases liberados durante as reações, visto que as reações são exotérmicas. A Figura 13 demonstra o procedimento de mistura para obtenção das pastas geopoliméricas.

Figura 13— Procedimento de mistura para obtenção da pasta



Fonte: autora (2025).

O método de mistura dos materiais foi através do misturador elétrico de bancada do Laboratório de Práticas Tecnológicas da UFPA (Campus de Ananindeua), onde foi adicionado o material seco (metacaulim e escória) e a solução alcalina, e misturado por 10 minutos. Logo em seguida, a partir da obtenção das pastas geopoliméricas, foram moldados 5 (cinco) CP's cilíndricos com dimensões de ($\text{Ø}2,5 \times 5$) cm de comprimento, utilizando uma base de madeira, para em seguida, ser exposto na estufa. A Figura 14 mostra os CP's moldados prontos para serem expostos na estufa.

Figura 14 — a) Molde metálico; b) Base de apoio para os moldes



(a)

(b)

Fonte: autora (2025).

O mesmo processo foi realizado para todas as variações (temperatura, tempo e idade de cura) de pasta a ser investigado no presente estudo. Com uma (1) formulação de pasta, produz-se 5 corpos de prova geopolimérico. Dessa forma, o processo foi repetido 24 vezes, originando em 120 corpos de prova no total.

3.4.2 Cura Térmica

Após a etapa de moldagem, os corpos de prova foram expostos em estufa na temperatura, tempo e idade de cura a ser investigado. Ao completar a idade de cura, os corpos de prova foram retirados da estufa e sobrepostos na bancada em temperatura ambiente (25°C), e após 24 horas, foram desmoldados. Após a completa idade de cura, foi realizado o ensaio mecânico de resistência à compressão e análises microestruturais. A Figura 15 demonstra os CP's na estufa curando termicamente.

Figura 15 — CP's moldados curando em estufa.



Fonte: autora (2025).

3.4.3 Ensaio de Compressão Uniaxial

Antes do ensaio de compressão, os corpos de prova foram lixados utilizando uma politriz metalográfica para uniformizar as extremidades, e posteriormente, foram submetidos ao ensaio mecânico, no laboratório de Práticas Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, Campus de Ananindeua, seguindo as normas estabelecidas pela ABNT NBR 5739 (2018) para determinação da resistência à compressão. O ensaio foi realizado utilizando uma prensa hidráulica elétrica, de marca Contenco, que possui capacidade máxima de carga de 100 toneladas. O equipamento é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 — (a) Prensa Hidráulica elétrica; (b) disposição do CP na prensa.



(a)

(b)

Fonte: autora (2025).

4 RESULTADOS

4.1 TESTES FÍSICOS E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 CAULIM

4.1.1.1 Perda ao Fogo

A Tabela 5 demonstra o resultado em percentual, do teste de perda ao fogo do caulim, obtendo um valor de 13,5 %.

Tabela 5 – Perda ao fogo do Caulim.

Massa Cadinho	M_1 (g)	M_2 (g)	Resultado (%)
31,74	33,80	32,48	13,5

Fonte: autora (2025).

No presente estudo, o caulim analisado apresentou perda ao fogo de 13,5%. A elevada perda ao fogo é proveniente da eliminação da água de hidroxilas dos argilominerais, um valor considerado elevado, porém compatível com materiais ricos em caulinita pura. Junior (2018) relata em seus estudos valores de perda ao fogo de 11,8%

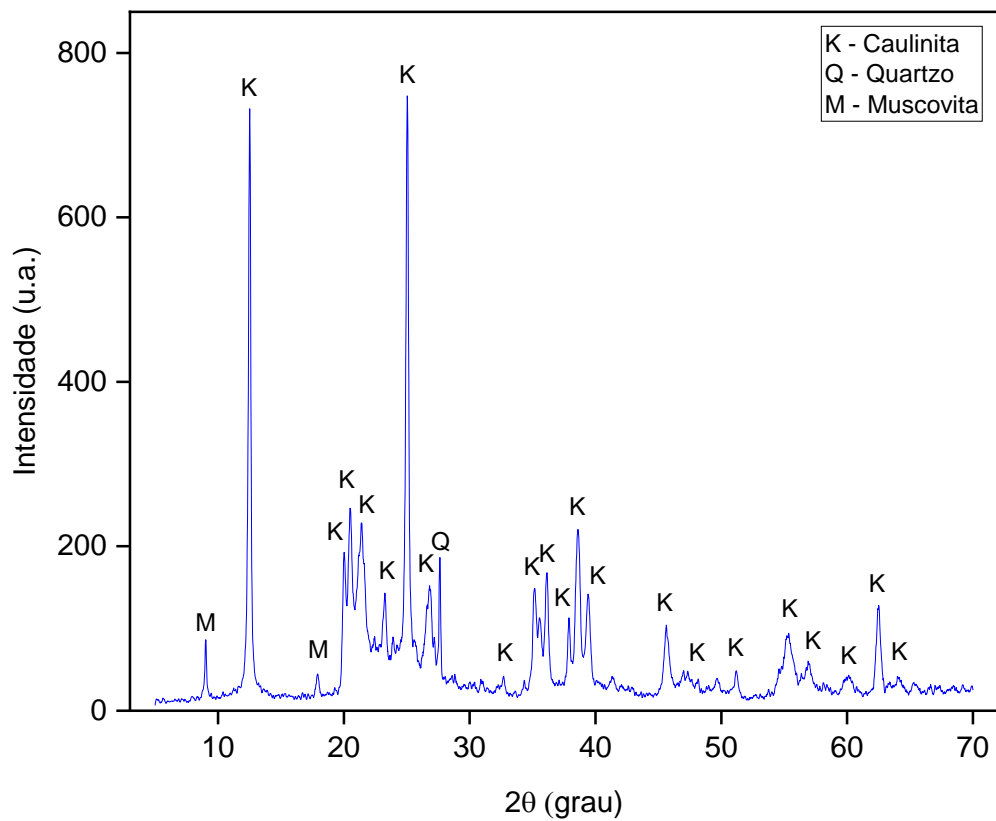
Dana (1981) encontrou um percentual de 13,96% de H_2O , 39,50% de Al_2O_3 e 46,54% de SiO_2 . Com esses valores, a perda de massa (hidroxila estrutural) varia em torno de 13,96%. Dessa forma, pressupõe-se que o material analisado no presente estudo, possui alta pureza

mineralógica, ou ao menos, um teor significativo de caulinita, com baixos teores de outros minerais encontrados, como por exemplo, a muscovita, ratificando os resultados encontrados nas análises química e mineralógica.

4.1.1.2 Difratomia de Raio-X (DRX)

A Figura 17 demonstra o Difratograma de Raio-X do caulim (DRX).

Figura 17 — Difratomia de Raio-X do caulim



Fonte: autora (2025).

O DRX apresentado mostra a análise de uma amostra de caulim, com picos identificados como pertencentes aos minerais caulinita, quartzo e muscovita. A presença de picos intensos e bem definidos indica a cristalização significativa desses minerais, sendo a caulinita o componente principal, como evidenciado pelos picos mais intensos em 2θ ao redor de 12° e 25° . O quartzo e a muscovita aparecem em menor intensidade, sugerindo que são componentes minerais sob forma de impurezas, conforme Ferreira (2020).

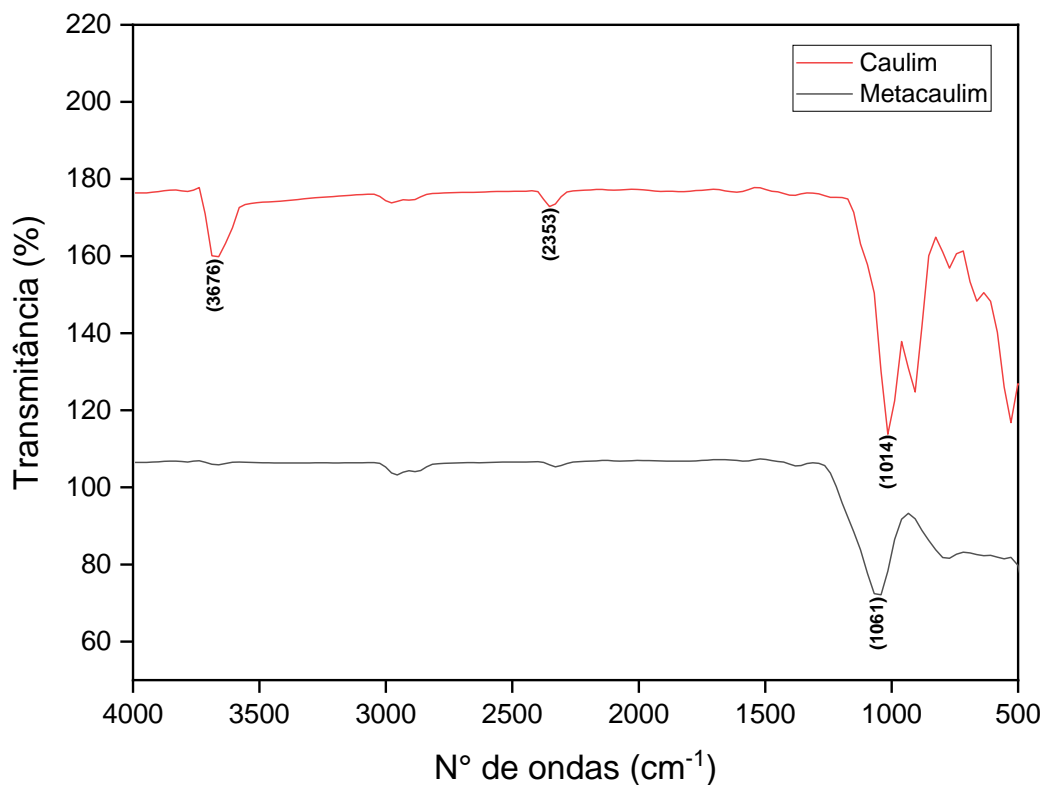
O principal componente do caulim é a caulinita, geralmente encontrada associada a minerais como feldspatos, mica, quartzo e óxidos de ferro e titânio, que atuam como impurezas (Ferreira, 2020). Tal mineral é responsável por conferir plasticidade ao material e possuir comportamento refratário durante a queima. O quartzo, considerado a principal impureza nos argilominerais, age como uma matéria-prima inerte e não plástica no processo de queima. Já a muscovita, devido à presença de óxidos alcalinos, como o K_2O , pode atuar como fundente, especialmente quando apresenta partículas de tamanho reduzido (Ferreira, 2020).

Estudos de Almeida (2023) e Cruz (2023) demonstraram resultados semelhantes.

4.1.1.3 Espectroscopia do Infravermelho (FTIR)

As transformações ocorridas no material após a calcinação podem ser identificadas por meio das diferenças nas frequências de absorção observadas nos espectros FTIR das amostras de caulim e metacaulim, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 18 — Espectroscopia do Infravermelho (FTIR) do caulim e metacaulim.



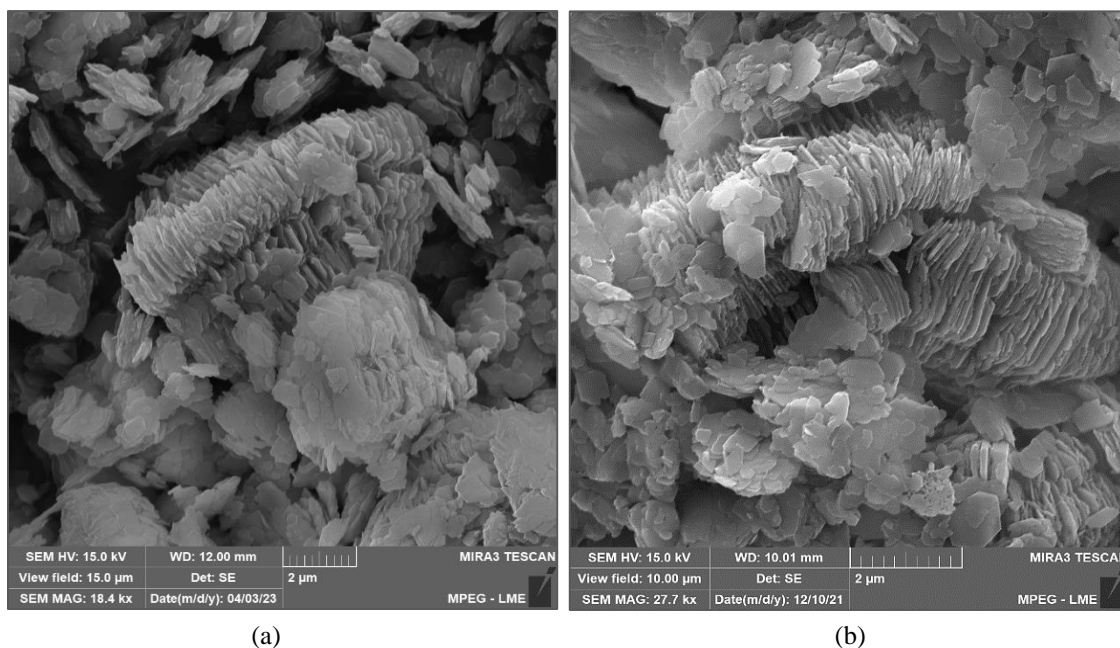
Fonte: autora (2025).

Na Figura 18, observa-se diferenças significativas entre as curvas de transmitância do caulim e do metacaulim, indicando as alterações estruturais devido à calcinação. No caulim, os picos mais nítidos, especialmente na região de 1000-1100 cm^{-1} , correspondem às vibrações de estiramento Si-O e Al-OH, características de sua estrutura cristalina bem definida (Alencar, 2023). Após a calcinação, no metacaulim, nota-se a redução da intensidade desses picos e o desaparecimento de bandas relacionadas aos grupos hidroxila (Al-OH) a aproximadamente 3676 cm^{-1} e 2353 cm^{-1} , evidenciando a desidroxilação e a conversão para uma fase amorfa (Almeida, 2023).

4.1.1.4 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 19 mostra através de MEV, as características microestruturais do caulim *in natura*, utilizado no trabalho.

Figura 19 — MEV do Caulim a 25°C. (a) com aumento de 18400X; (b) com aumento de 27000X.



Fonte: autora (2025).

A Figura 19, (a) e (b), revelam a presença de folhas tetraédricas e octaédricas contínuas, alinhadas em determinadas direções cristalográficas e empilhadas umas sobre as outras. Segundo Rosário *et al.*, (2022), a estrutura do caulim é caracterizada por lamelas compostas de um lado por átomos de alumínio coordenados octaedricamente com oxigênio e grupos hidroxila, e do outro, por átomos de silício coordenados tetraedricamente com oxigênio. Essa morfologia está diretamente relacionada à estrutura cristalina da caulinita, um filossilicato de camadas 1:1, composto por folhas tetraédricas de sílica (SiO_4) e folhas octaédricas de alumina ($\text{Al}_2(\text{OH})_6$), unidas por interações de Van der Waals e ligações de hidrogênio.

Através das imagens, evidencia-se que a amostra de caulim exibiu uma estrutura formada por micropelotas organizadas em arranjos empilhados, além de grãos de caulinita com formatos irregulares. Observou-se a presença de partículas com tamanhos variados, abrangendo desde dimensões finas até grossas, em todas as amostras analisadas, sendo os cristais caracterizados por uma morfologia pseudo-hexagonal típica da caulinita (Santos, 1989). As partículas mais finas se apresentam na forma de grandes aglomerados, típicos da caulinita,

conforme indicado na literatura (Souza Santos, 1992). Resultados semelhantes foram observados por Almeida (2023) e Feltrin (2021).

Portanto, essas características químicas influenciam diretamente a reatividade do metacaulim no processo de geopolimerização, resultando em geopolímeros com propriedades mecânicas e térmicas desejáveis.

4.1.2 METACAULIM

4.1.2.1 Perda ao Fogo

A Tabela 6 demonstra o resultado, em percentual, do teste de Perda ao Fogo do metacaulim, obtendo um resultado de 1,3%.

Tabela 6: Perda ao Fogo do metacaulim.

Massa Cadinho	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Resultado (%)
36,43	38,62	37,58	1,3

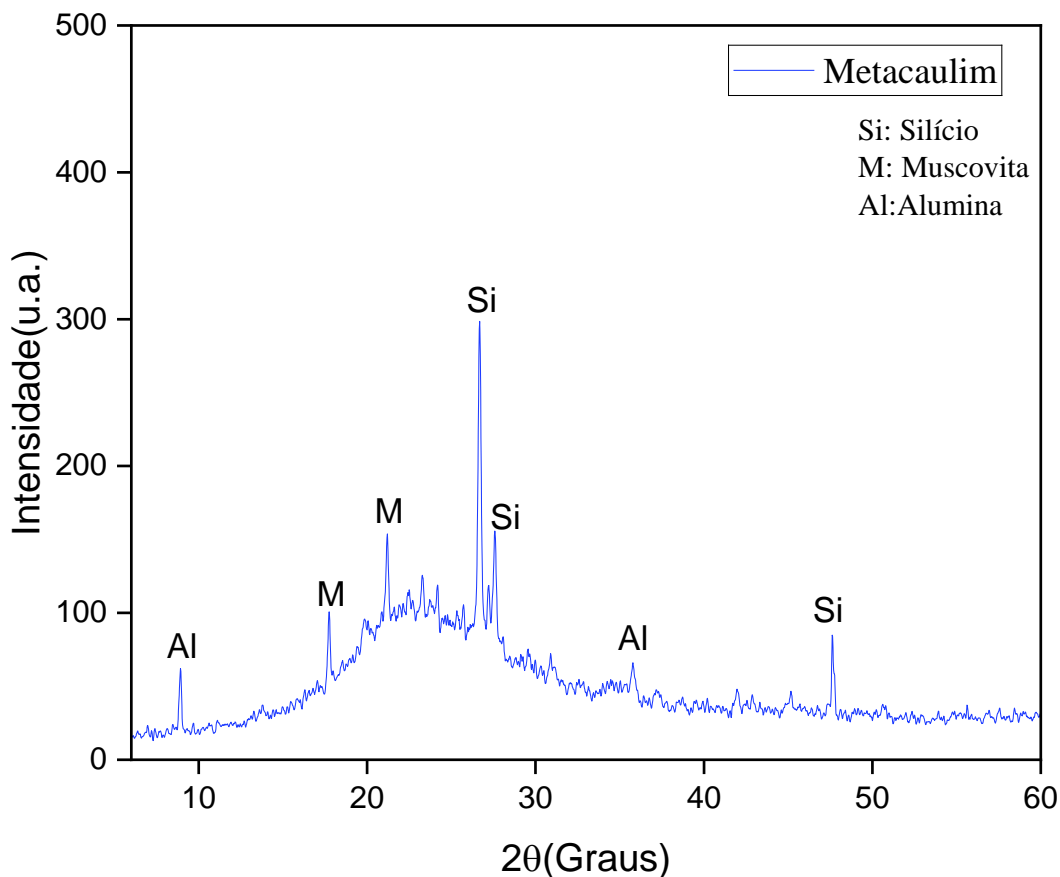
Fonte: autora (2025).

O metacaulim analisado apresentou perda ao fogo de 1,3%, um valor consideravelmente inferior ao observado para o caulim in natura. Essa redução está associada ao processo de calcinação, responsável pela desidroxilação das partículas e consequente eliminação da água estrutural. O resultado evidencia a eficácia do procedimento térmico adotado. Além disso, o valor obtido foi inferior ao reportado por Rezende *et al.* (2012), que obtiveram perda ao fogo de 2,62% em metacaulim submetido à mesma temperatura de calcinação. Resultados muito próximos também foram encontrados nos estudos de Cruz (2023) e Almeida (2023) com 1,2% de perda ao fogo.

4.1.2.2 Difractometria de Raio-X (DRX)

A Figura 20 demonstra o Difratoograma de Raio-X do Metacaulim.

Figura 20 — Difratoograma de Raio-X do metacaulim.



Fonte: autora (2025).

Através da análise mineralógica de Difração de Raio-X do metacaulim, é possível observar na Figura 20, a ausência de picos intensos a aproximadamente $2\theta \approx 12,5^\circ$, indicando que nesta temperatura ocorreu uma desorganização na estrutura da caulinita, o qual observa-se um material com estrutura predominantemente amorfa, característico do metacaulim.

Os picos de cristalinidades observados no difratograma, são oriundos das concentrações de aluminohidrocalcita ($\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2) e mica ($\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$). A aluminohidrocalcita presente, está relacionado ao teor de cálcio e alumínio, o quartzo deriva das concentrações de silício e a mica está ligado a presença de potássio e alumínio presentes. Esses resultados também foram encontrados no estudo de Porto (2019).

Após o processo de calcinação, os picos característicos da caulinita apresentaram redução de intensidade devido à desidroxilação das folhas octaédricas, resultando na

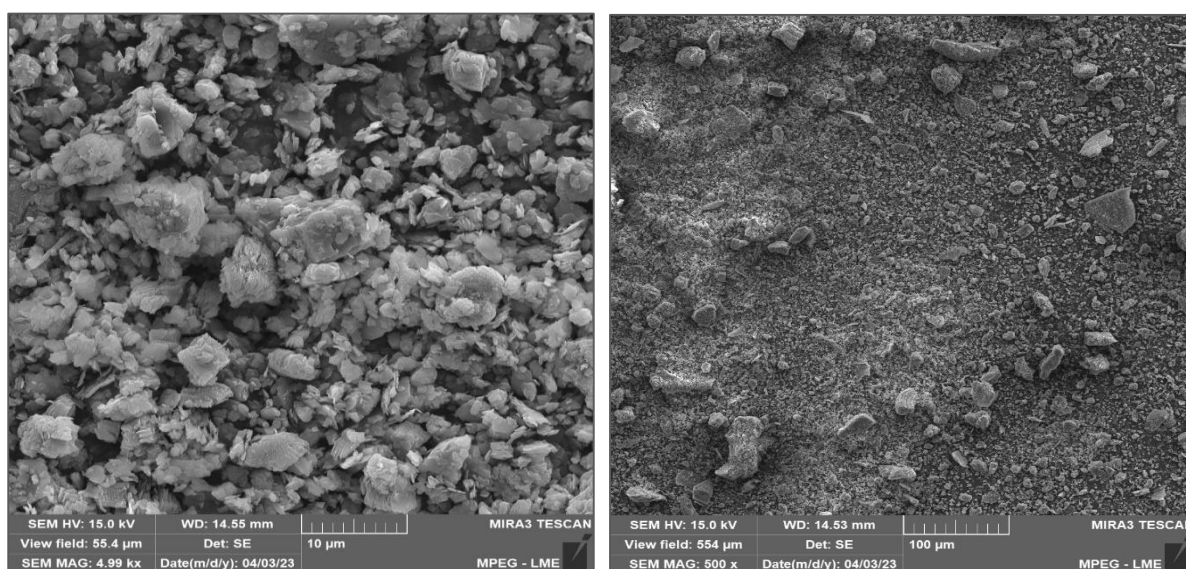
desorganização da estrutura cristalina. Como consequência, o material tornou-se amorfo e altamente reativo, em função das alterações na energia livre armazenada (Almeida, 2023).

De acordo com os resultados obtidos no DRX, é possível confirmar que a calcinação ocorreu de forma eficiente a 850°C por 2 horas.

4.1.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia do pó de metacaulim é demonstrada conforme a Figura 21, através das micrografias de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura 21 — MEV do metacaulim. (a) com aumento de 5000X; (b) com aumento de 500X.



Fonte: autora (2025).

A Figura 21 (a) e (b) revelam as transformações estruturais do metacaulim, resultantes da calcinação do caulim em temperatura de 850°C por 2 horas. Esse processo promove a desidroxilação da caulinita, desorganizando as microplacas empilhadas e confirmando o processo de desestruturação (Morsy *et al*, 2018). Essa desordem aumenta a área superficial, ilustrado na Figura 20 (b), e a reatividade do material, tornando-o um excelente precursor para reações de geopolimerização.

A Figura 21 também destaca partículas com estrutura em formato pentagonal e tetragonal, ilustrado na Figura 21 (a), que podem estar associadas a resquícios de caulinita não completamente calcinada ou à formação de novas fases metaestáveis. Essas transformações estruturais demonstram a conversão do material cristalino em um sistema amorfo e altamente reativo.

Segundo Davidovits (1994) a estrutura desordenada do metacaulim favorece sua interação com soluções alcalinas, permitindo a rápida dissolução de silicatos e aluminatos, fundamentais para a formação de ligações Si-O-Al. Além disso, a fragmentação das placas lamelares melhora o empacotamento granular, reduzindo a porosidade e aumentando a resistência mecânica do geopolímero.

4.1.3 ESCÓRIA DE ALTO FORNO

4.1.3.1 Perda ao Fogo

A tabela 5 demonstra o resultado em percentual, do teste de perda ao fogo da escória de alto forno, obtendo um valor de 0,032%.

Tabela 7 — Perda ao fogo da EAF.

Massa cadinho (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Resultado (%)
34,96	40,53	40,56	0,032

Fonte: autora (2025).

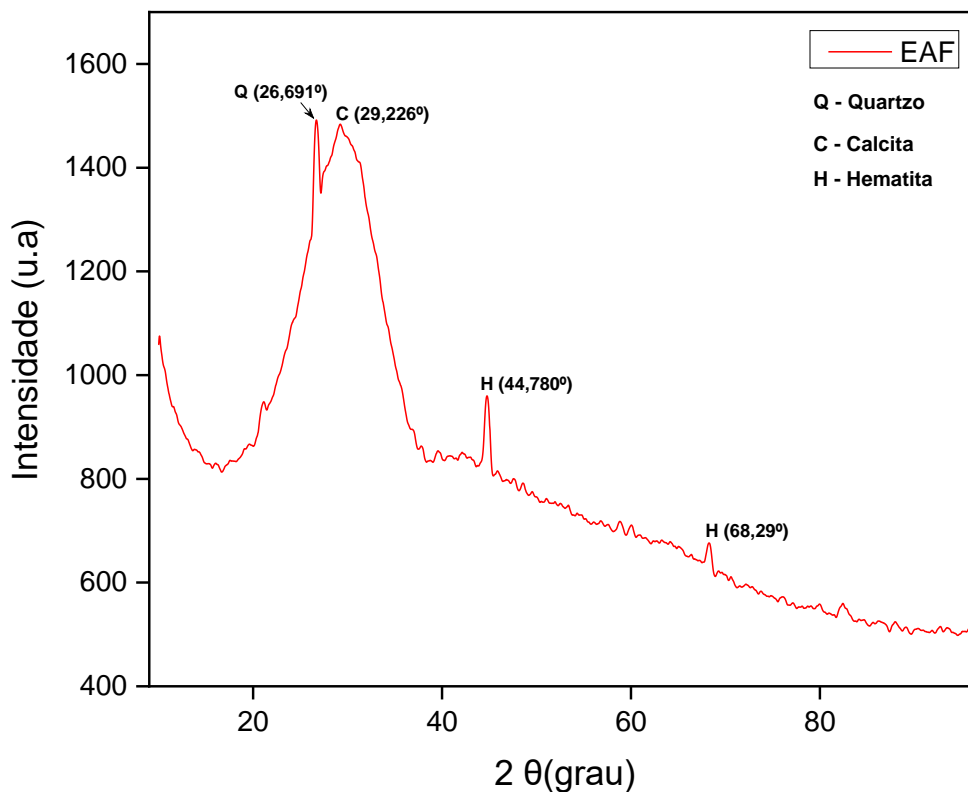
O resultado obtido sugere que, a escória de alto forno por ser um resíduo siderúrgico, possui uma baixa quantidade de água em sua estrutura. Ressalta-se também, que o resultado de perda ao fogo pode estar relacionado à descarbonetação da calcita, discutido acima no DRX.

Resultado aproximado foi encontrado nos estudos de Baki *et al.*, (2020) em que a escória de alto forno apresentou perda ao fogo de 0,17%.

4.1.3.2 Difratomia de Raio-X (DRX)

A Figura 22 demonstra a análise mineralógica da escória de alto forno através do difratograma de raio-X.

Figura 22 — Difratograma de raio-X da escória de alto forno.



Fonte: autora (2025).

No difratograma analisado, foram identificadas fases cristalinas de quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e hematita (Fe_2O_3), além de uma fração amorfa considerável, característica fundamental para a ativação alcalina e posterior polimerização. Segundo Porto (2019), a análise estrutural desses materiais permite identificar as fases cristalinas e amorfas presentes, sendo um fator determinante para sua reatividade.

O pico identificado em aproximadamente $26,691^\circ 2\theta$, atribuído ao quartzo, pode estar relacionado à presença de impurezas silicosas na escória. Embora o quartzo seja um mineral de baixa reatividade, sua presença pode influenciar a estabilidade dimensional do material final, conforme discutido por Porto (2019). Já a calcita, detectada em torno de $29,226^\circ 2\theta$, indica que processos de carbonatação ocorreram, o que pode afetar a reatividade do material e modificar suas propriedades mecânicas ao longo do tempo, conforme estudos de Beltrame (2023). Esse processo ocorre naturalmente durante o resfriamento ou armazenamento da escória e pode impactar sua capacidade de reação em sistemas cimentícios ou geopoliméricos. Além disso, a calcita está relacionada com o calcário presente durante a produção do ferro gusa, e o cálcio

provém do carbonato de cálcio que é usado como fundente para baixar o ponto de fusão do minério de ferro, conforme relatado nos estudos de Corrêa (2021).

Outro pico significativo é identificado em $44,780^\circ 2\theta$, corresponde à hematita, seguido de outro pico menor em $68,29^\circ 2\theta$, também correspondente à hematita. Segundo Corrêa (2021), a presença de óxidos de ferro geralmente é formado por processos de oxidação durante o resfriamento da escória, além de contribuir para o comportamento térmico do material em aplicações específicas. Lucas (2021) afirma que a hematita, embora pouco reativa, pode alterar aspectos visuais, como a coloração dos materiais finais.

A análise da composição mineralógica confirma que a escória de alto-forno apresenta alto potencial reativo, tornando-se um material adequado para aplicações geopoliméricas. Lucas (2021), destaca que a significativa fração amorfa favorece a obtenção de matrizes densas e resistentes, enquanto as fases cristalinas, apesar de menos reativas, podem contribuir para a estabilidade estrutural. Estudos recentes conforme Cruz (2023) e Almeida (2023) demonstram que a incorporação de escória de alto-forno em geopolímeros não apenas melhora as propriedades mecânicas dos compósitos, mas também representa uma alternativa sustentável ao cimento Portland, reduzindo as emissões CO_2 , conforme estudos de Cruz (2023) e Almeida (2023).

4.1.3.3 Fluorescência de Raio-X (FRX)

Os resultados de fluorescência de raios X indicaram a presença de elementos, normalmente esperados, considerando os componentes provenientes do minério, dos fundentes e do coque que formam a escória como um dos produtos da metalurgia do ferro em alto-forno. Os resultados da análise de Fluorescência de Raio-X da escória de alto forno são demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7 — Resultados da Fluorescência de Raios-X da EAF.

Óxidos	Percentual em massa (%)
SiO_2	41,92
CaO	25,26
Al_2O_3	20,18

Fe₂O₃

2,76

Fonte: autora (2025).

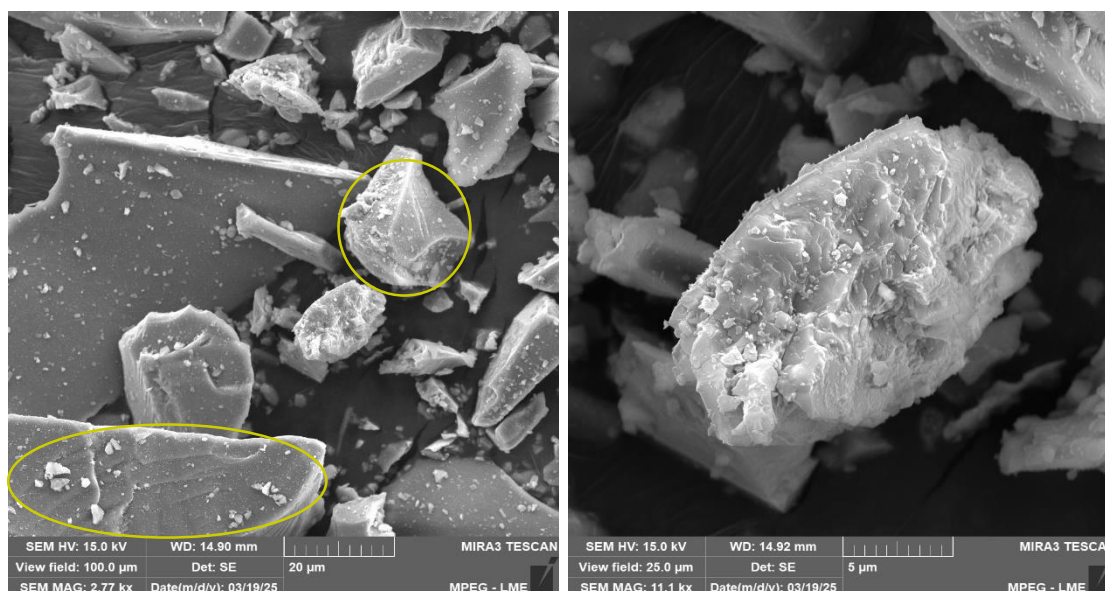
O FRX da escória de alto forno, baseado nos percentuais acima, evidencia a predominância de óxidos de silício (SiO₂), de cálcio (CaO) e alumina (Al₂O₃), respectivamente. Esses componentes são fundamentais para a reatividade química da escória quando em contato com a solução alcalina, conforme Da Silva (2017). A sílica é fundamental na formação de ligações químicas com o alumínio durante a ativação alcalina, resultando em uma matriz cimentícia densa e resistente.

Através do óxido de cálcio, obtém-se a formação de fases híbridas, como o C-A-S-H e o gel de aluminossilicato geopolimérico (N-A-S-H), além de ser responsável por aumentar a reatividade inicial do geopolímero, resultando em tempos de pega mais rápidos e desenvolvimento precoce da resistência mecânica, conforme os estudos de Kim (2021).

4.1.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da EAF

A Figura 23 mostra a morfologia do pó da escória de alto forno após passar pela peneira de 200 mesh.

Figura 23 — MEV da escória de alto forno. a) com ampliação de 2.770x; b) com ampliação de 11.000x.



Fonte: autora (2025).

Observou-se nas micrografias da escória de alto forno que, mesmo tendo passado por peneiramento, as partículas apresentaram variados padrões morfológicos, incluindo texturas indefinidas, diferentes tamanhos e formatos, que podem ser justificados pelo processo de

beneficiamento do material, onde a escória de alto forno foi triturada utilizando um moinho de bolas. Resultados análogos foram encontrados em estudos de Cechin (2021) e Sun *et al.*, (2022).

A microestrutura complexa da escória revela uma coexistência de domínios vítreos e regiões cristalinas bem definidas, evidenciado através do círculo amarelo, onde também é possível observar uma textura multifacetada. Essa heterogeneidade se manifesta em superfícies que variam do liso ao rugoso, como evidenciado na Figura 23 (b), com maior ampliação.

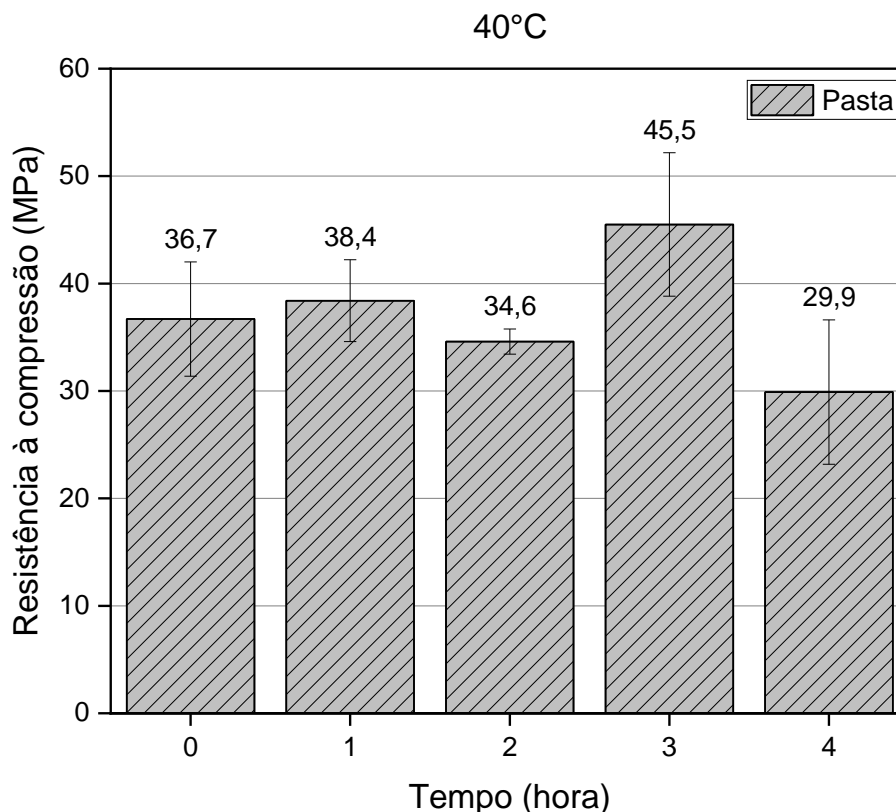
Também é possível observar que a escória de alto forno é composta por partículas mais claras, que podem estar relacionadas ao quartzo, e partículas mais escuras que podem estar associadas ao ferro, conforme Da Silva (2017).

4.2 Resistência à Compressão das Pastas Geopoliméricas

4.2.1 Cura Térmica em 40°C com 7 dias de cura

É ilustrado na Figura 24 o gráfico de resistência à compressão das pastas geopoliméricas curada em temperatura ambiente (25°C) e 40°C por 1, 2, 3 e 4 horas com idade de cura de 7 dias.

Figura 24 — Resultados de resistência à compressão de geopolímeros curados a 40°C.



Fonte: autora (2025).

A resistência à compressão da pasta geopolimérica, analisada em diferentes tempos de cura a 40°C, revela um padrão interessante. Inicialmente, a pasta exibe uma resistência a compressão de 36,7 MPa curada em temperatura ambiente por 24 horas, indicando uma boa resistência mecânica, e ao atingir 1 hora de cura, obteve-se um leve aumento na resistência, com 38,4 MPa, sugerindo que desta forma, já ocorre a formação inicial de géis N-A-S-H (sódio-alumínio-silicato-hidratado), que são os principais responsáveis pela estruturação da matriz geopolimérica em sistemas com ativação alcalina, conforme Azimi *et al.*, (2020). Esses géis crescem e se interligam rapidamente com a disponibilidade de água e íons móveis na fase líquida. Entretanto, ao atingir 2 horas, a resistência apresenta uma leve queda (34,6 MPa), o que pode estar relacionado a uma interrupção momentânea no processo de polimerização. Isso pode ocorrer por redistribuição de água ou até formação parcial de géis menos estruturados, conforme os estudos de Azimi *et al.*, (2020).

O ponto fundamental ocorre com três horas de cura, quando a resistência atinge o pico máximo de 45,5 MPa. Tal resultado pode ser atribuído à formação mais intensa e coesa de géis N-A-S-H, além da possível formação complementar de géis C-A-S-H (cálcio-alumino-silicato

hidratado), advindo da elevada fonte de cálcio presente na composição química da escória de alto forno, comprovado através do FRX. Borges *et al.*, (2016) afirmam que materiais ricos em cálcio ativados alcalinamente produzem gel de $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (C-A-S-H), semelhante à composição da pasta de cimento Portland, cuja estrutura assemelha-se a um gel C-S-H. Assim, a inclusão da escória pode gerar benefícios diversos, tais como aumento de resistência mecânica, melhor fluidez, redução de porosidade e permeabilidade (Mehta, 2018). A presença desses dois tipos de gel pode gerar uma matriz híbrida, onde o N-A-S-H garante a estrutura tridimensional e o C-A-S-H contribui com preenchimento de poros e maior compactação, resultando em melhor desempenho mecânico.

Bing-hui *et al.*, (2014) em seus estudos de cura térmica, também relaciona o aumento de resistência com o aumento da dissolução dos elementos de Si e Al.

No entanto, a extensão da cura além de três horas leva a uma diminuição drástica na resistência, caindo para 29.9 MPa após quatro horas. Esse fenômeno pode ser atribuído à desidratação excessiva da pasta, que é fundamental para a continuidade das reações de geopolimerização. A perda excessiva de água pode gerar tensões internas, levando à formação de microfissuras que comprometem a resistência. A otimização do tempo de cura é fundamental para garantir o máximo desempenho do geopolímero, e os resultados deste estudo sugerem que, para a pasta geopolimérica em questão, o tempo ideal de cura a 40°C é de aproximadamente três horas.

De acordo com a Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses – ISRM (1977), as rochas são classificadas de acordo com a resistência à compressão. Essa classificação varia de extremamente branda, atingindo MPa menor que 1, resistência média de 25 a 100 MPa, até extremamente resistente com tensão em MPa superior a 250. Dessa forma, a resistência à compressão da pasta geopolimérica atendeu os padrões do ISRM (1977), com resistência de 45,5 MPa, enquadrando o geopolímero como resistência média, tornando-o aplicável para agregados sintéticos.

Na Figura 25 (a) e (b), é identificado o tipo de ruptura dos CP's após ensaio de compressão uniaxial dos geopolímeros curados a 40°C por 3 horas, sendo caracterizado por ruptura cisalhada lateral, indicando que não houveram concentrações de tensões provenientes de falhas durante a moldagem. O bom acabamento superficial dos CP's antes do ensaio de compressão, também é um dos fatores que pode ter ocasionado em um bom resultado mecânico, visto que, quando não há um bom acabamento nas extremidades dos CP's durante o ensaio, as tensões aplicadas não se distribuem uniformemente, comprometendo áreas específicas na superfície do material, reduzindo a resistência final.

Figura 25 — Corpo de prova curado a 40°C por 3 horas. (a) e (b) ruptura cisalhada lateral.



(a)

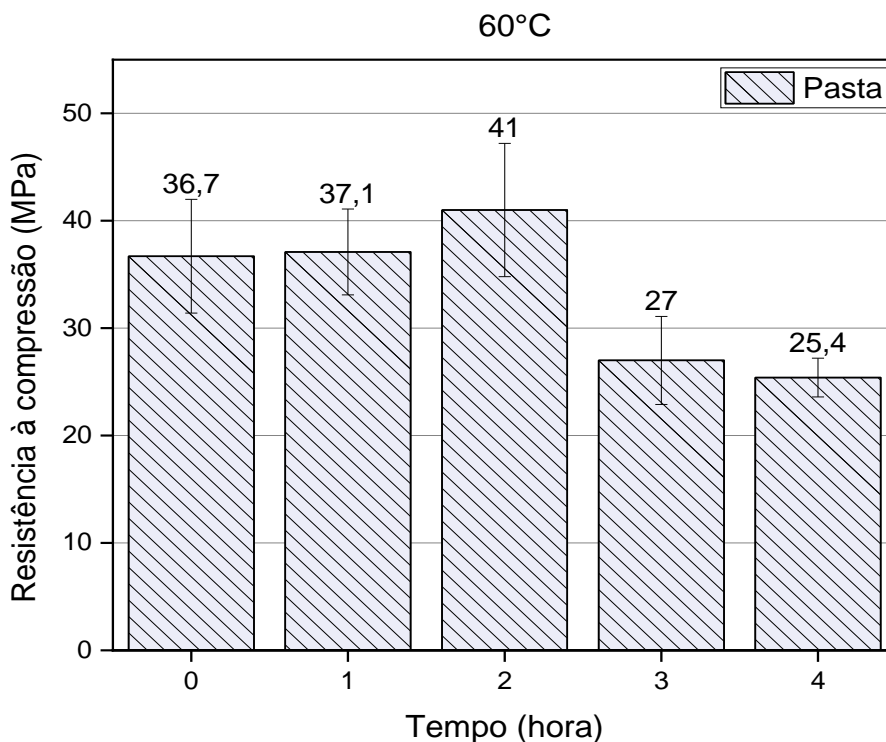
(b)

Fonte: autora (2025).

4.2.2 Cura Térmica em 60°C com 7 dias de cura

A Figura 26 mostra o gráfico de resistência à compressão das pastas geopoliméricas curada em temperatura ambiente (25°C) e 60°C por 1, 2, 3 e 4 horas com idade de cura de dias.

Figura 26 — Resultado de resistência à compressão de geopolímeros curados a 60°C.



Fonte: autora (2025).

A resistência à compressão das pastas geopoliméricas apresentadas no gráfico mostra uma variação significativa em função do tempo de cura a 60°C. No tempo 0 horas (temperatura ambiente), a resistência à compressão é de 36,7 MPa, indicando que o processo inicial de polimerização já confere uma boa coesão estrutural ao material. Após 1 hora, observa-se um pequeno aumento para 37,1 MPa, sugerindo que o ganho adicional de resistência é lento nesse intervalo inicial. No entanto, com 2 horas de cura, a resistência atinge seu pico de 41,07 MPa. Este aumento pode ser atribuído à intensificação das reações de polimerização a alta temperatura, promovendo uma solubilização dos precursores aluminossilicatos, favorecendo a formação de ligações Si-O-Al e Si-O-Si, resultando no endurecimento mais rápido e no desenvolvimento precoce da resistência mecânica, quando comparado a pasta geopolimérica curada a 40°C, onde obteve o melhor resultado mecânico com 3 horas de cura atingindo 45,5 MPa. Palomo *et al.*, (2024) em seus estudos observou que a resistência mecânica aumentava exponencialmente com a temperatura, reduzindo substancialmente o tempo necessário para atingir determinado valor.

A 60°C com de 3 horas, a resistência à compressão diminui significativamente para 27 MPa e continua caindo para 25,4 MPa com 4 horas. Essa redução pode estar relacionada à

formação de microfissuras ou à retração térmica devido ao excesso de calor e prolongado tempo de exposição. Esse comportamento evidencia que há um tempo benéfico de cura a 60°C para potencializar a resistência mecânica, sendo este em torno de 2 horas.

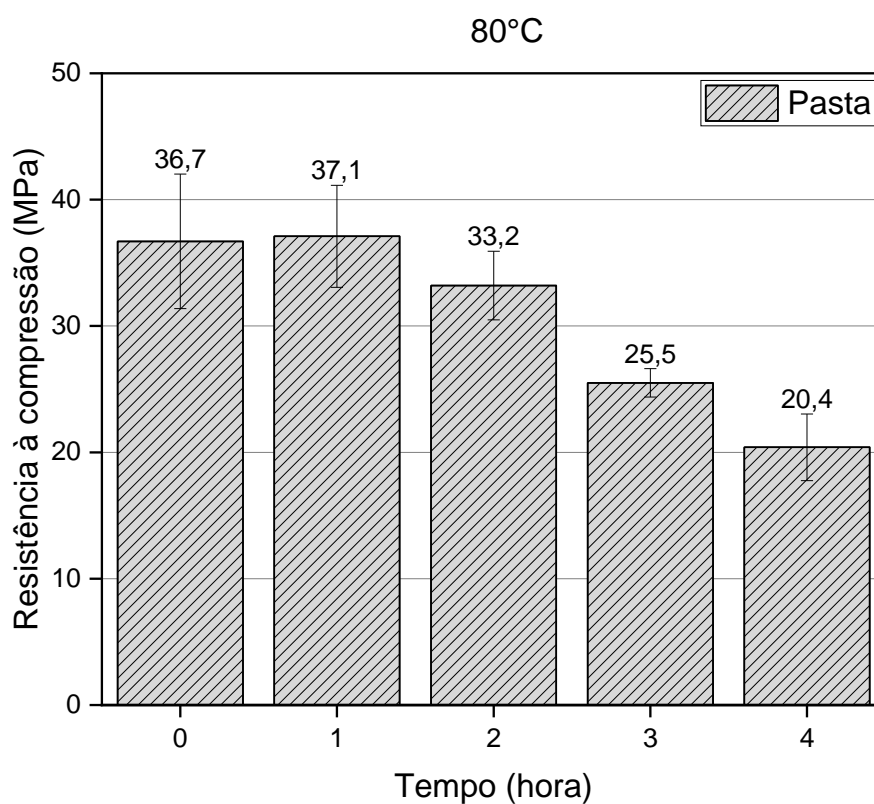
Muñiz *et al.*, (2011) em seus estudos sobre o efeito da temperatura no processo de geopolimerização, obteve o melhor resultado de 17,87 MPa para geopolímeros curados em 60°C com 7 dias de cura, adquirindo excelentes propriedades físicas e mecânicas quando comparados com as demais temperaturas de cura estudadas pelo autor.

Al Bakria (2011) encontrou em seus estudos a temperatura de 60°C ideal para a cura térmica de geopolímeros produzidos com cinza volantes.

4.2.3 Cura Térmica em 80°C com 7 dias de cura

Na Figura 27, é observado os resultados de resistência à compressão das pastas curadas em temperatura ambiente (25°C) por 24 horas e a 80°C por 1, 2, 3 e 4 horas com idade de cura de 7 dias.

Figura 27 — Resultados de resistência à compressão de geopolímeros curados a 80°C por 7 dias de cura.



Fonte: autora (2025).

Os resultados de resistência à compressão dos geopolímeros curados a 80°C apresentam uma tendência inicial de alta resistência, com 1 hora de cura térmica atingindo 37,1 MPa, seguida por uma redução gradual ao longo do tempo, chegando a 20,4 MPa com 4 horas de cura, resultando esse, menor quando comparado com as pastas curadas em temperaturas de 40 e 60°C.

A elevada resistência inicial pode ser atribuída à rápida formação de gel geopolimérico e à densificação da matriz, que ocorre devido à aceleração das reações de dissolução e polimerização em temperaturas mais altas. A cura térmica a 80°C promove uma ativação mais eficiente dos precursores aluminossilicatos, resultando em uma estrutura inicialmente coesa e resistente nas primeiras horas de cura. Rovinaník (2010) afirma em seus estudos que temperatura de cura elevada (60°C e 80°C) acelera a formação de estrutura dura, especificamente na fase inicial da reação de geopolimerização. No entanto, a exposição prolongada a essa temperatura pode levar a fenômenos como desidratação e retração, que comprometem a integridade da matriz geopolimérica ao longo do tempo. Bakria *et al* (2011), encontrou um resultado de 27,87 MPa para geopolímeros curados a 80°C por 24 horas, afirmando que para estudo de pasta, por se tratar de um volume menor de material quando comparado a estudos de argamassa, por exemplo, a pasta é mais suscetível ao calor de cura e a perda de umidade, o que pode levar a uma redução na resistência para cura em altas temperaturas.

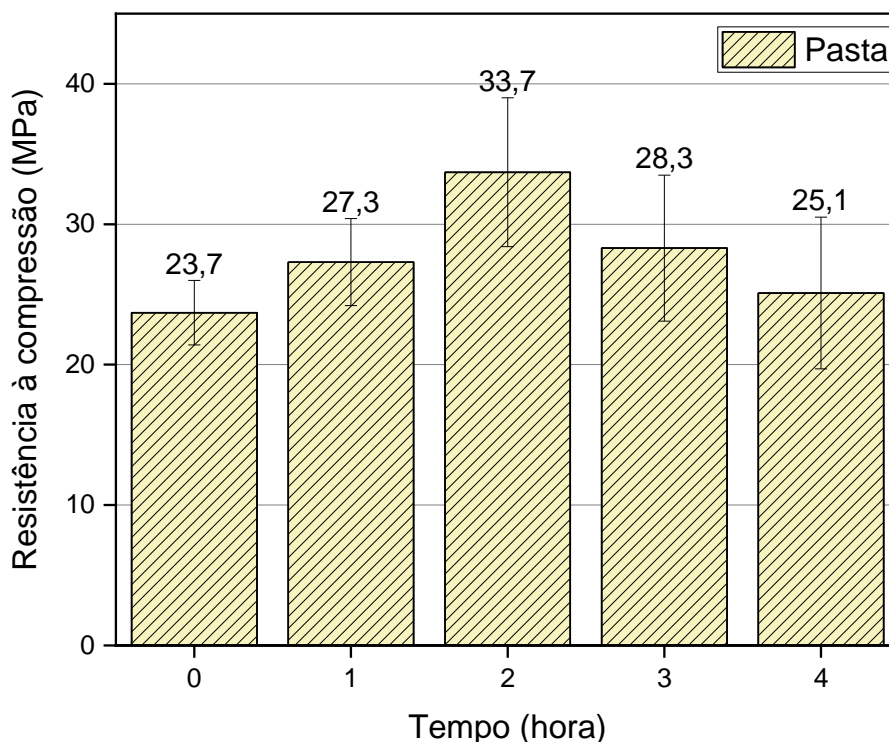
Maturana (2023) afirma em seus estudos sobre cura térmica de pastas geopoliméricas à base de metacaulim, que houve uma tendência, em termos gerais, de redução da resistência em função do aumento da temperatura em função do tempo, concluindo que temperatura de cura afeta diretamente a resistência mecânica da pasta, fator este, consistente com os resultados descritos na literatura.

A redução da resistência à compressão observada após 1 hora, também pode ser explicada por processos microestruturais e químicos que ocorrem durante a cura térmica. Um dos principais fatores é a perda de água da matriz, que pode ocasionar em retração e formação de microfissuras, reduzindo a coesão interna do material. Marvila *et al.*, (2021), em seus estudos afirmam que tempos de cura prolongados distorcem as reações químicas, causando evaporação parcial da água e a formação de microcavidades que levam à fissuração das amostras, comprometendo a integridade do material. Discussões semelhantes também foram encontrados nos estudos de Hardjito *et al.*, (2018).

4.2.4 Cura Térmica em 40°C com 3 dias de cura

A Figura 28 mostra o gráfico de resistência à compressão das pastas curadas a 40°C com idade de cura de 3 dias.

Figura 28 — Gráfico de resistência à compressão a 40°C com 3 dias de cura.



Fonte: autora (2025).

A resistência à compressão aumenta com o tempo de cura até 2 horas, atingindo um valor máximo de 33,7 MPa. Após esse ponto, ocorre uma redução gradual da resistência, chegando a 25,1 MPa após 4 horas de cura. Segundo Provis *et al.*, (2009), o tempo de cura em temperatura ambiente antes da cura térmica permite que reações iniciais de dissolução da aluminossilicato ocorram, promovendo uma melhor formação do gel N-A-S-H.

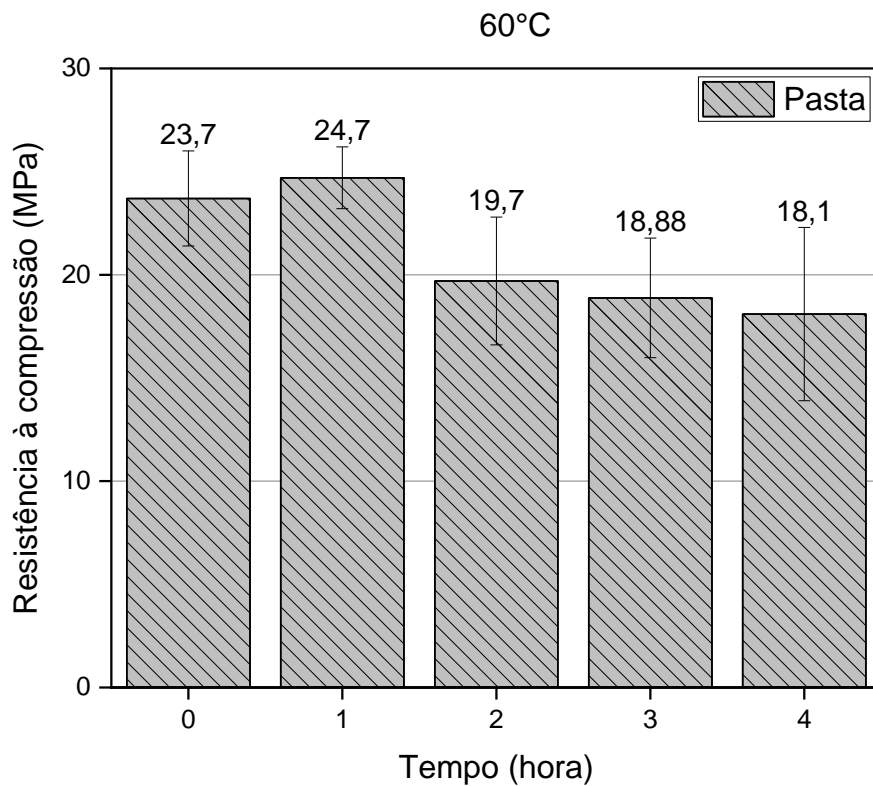
A temperatura de 40 °C, embora considerada baixa em comparação com curas térmicas mais agressivas (60 e 80 °C), ainda é suficiente para acelerar as reações de polimerização e melhorar a compactação da matriz. Rovináník (2010) encontrou resultados de aproximadamente 50 MPa para pastas curadas em temperatura de 40°C por 1 hora e idade de cura de 3 dias, sendo este, o melhor resultado obtido para a idade de cura de 3 dias.

A queda na resistência observada para tempos de cura superiores a 2 horas pode estar relacionada à formação prematura de géis mal estruturados ou à perda de umidade interna necessária para o avanço das reações, conforme relatado por Davidovits (2000).

4.2.5 Cura térmica em 60°C com 3 dias de cura

A Figura 29 demonstra o gráfico de resistência à compressão das pastas curadas a 60°C com 3 dias de cura.

Figura 29 — Gráfico de resistência à compressão a 60°C com 3 dias de cura.



Fonte: autora (2025).

O gráfico acima, demonstra que os resultados de resistência à compressão das pastas curadas a 60°C com 3 dias de cura obteve comportamento diferente das pastas curadas a 60°C com 7 dias de cura. A resistência máxima atingida foi 24,7 MPa com 1 hora de cura, indicando que a cura térmica a 60° foi capaz de acelerar o processo de geopolimerização e diminuir o tempo de pega. Por outro lado, a cura térmica não alcançou ganhos significativos de resistência, quando comparado as pastas curadas a 60°C com 7 dias de cura, atingindo seu pico máximo de 41 MPa, com 2 horas de cura.

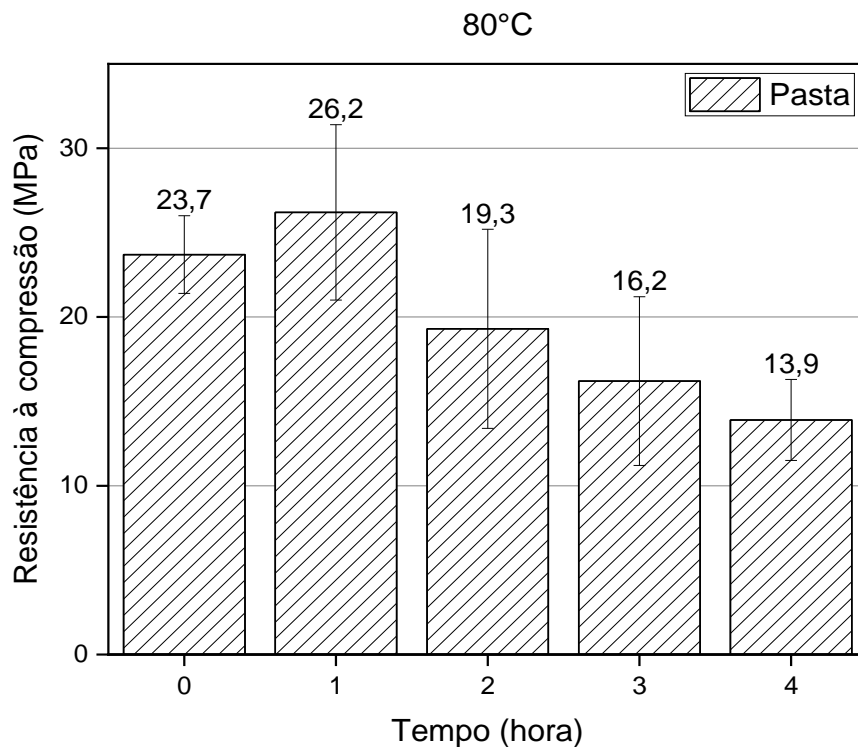
Após 1 hora de cura térmica, a resistência foi decaindo de forma gradual, atingindo resistência mínima de 18,4 MPa, com 4 horas de cura. Tais resultados podem ser justificados pelo mesmo processo no qual ocorreu nas pastas estudadas sob cura térmica de 7 dias, onde ocorre o desequilíbrio hídrico e a fragilização do material, conforme relatado por Marvila *et al.*, (2021).

A baixa resistência também pode estar relacionada a possibilidade de mudanças estruturais indesejadas durante a reestruturação do gel amorfo, induzindo a formação de fases semicristalinas, conhecidas como “zeólitas”, que não contribuem significativamente para o aumento da resistência. Essas alterações resultam em uma matriz menos densa e mais suscetíveis a falhas. Segundo Souza *et al.*, (2020), a temperatura representa uma variável de síntese com forte efeito na formação das zeólitas, sobretudo, em temperaturas elevadas.

4.2.6 Cura térmica em 80°C com 3 dias de cura

A Figura 30 demonstra o gráfico de resistência à compressão das pastas curadas a 80°C com 3 dias de cura.

Figura 30 — Gráfico de resistência à compressão a 80°C com 3 dias de cura.



Fonte: autora (2025).

A análise dos resultados de resistência à compressão da pasta geopolimérica curada a 80°C mostra que o tempo de cura exerce grande influência na evolução das propriedades mecânicas. Observa-se que a resistência aumenta de 23,7 MPa (em temperatura ambiente) para 26,2 MPa com 1 hora de cura, atingindo seu pico máximo e comprovando mais uma vez, que o aquecimento em curto prazo favorece a polimerização dos íons silicato e aluminato, promovendo uma estrutura de gel mais densa e coesa (N-A-S-H), conforme Palomo *et al.*, (2024). Esse aumento inicial é típico em sistemas geopoliméricos, pois a elevação da temperatura acelera a reação de ativação alcalina e consolida a rede tridimensional responsável pela resistência mecânica. Por outro lado, é notável a baixa resistência mecânica ao atingir o tempo de 4 horas de cura, obtendo 13,9 MPa, sendo está a menor resistência adquirida no presente estudo. Essa condição pode estar interligada com a mudança estrutural do geopolímero, fator semelhante observado com as pastas curadas a 60°C com 3 dias de cura, que também apresentaram baixa resistência após 1 hora de cura.

Rovinaník (2010) em seus estudos sobre cura térmica de geopolímeros com idade de cura de 3 e 7 dias, utilizou as mesmas temperaturas analisadas no presente estudo e obteve o resultado de resistência a compressão maior para geopolímeros com idade de cura de 7 dias.

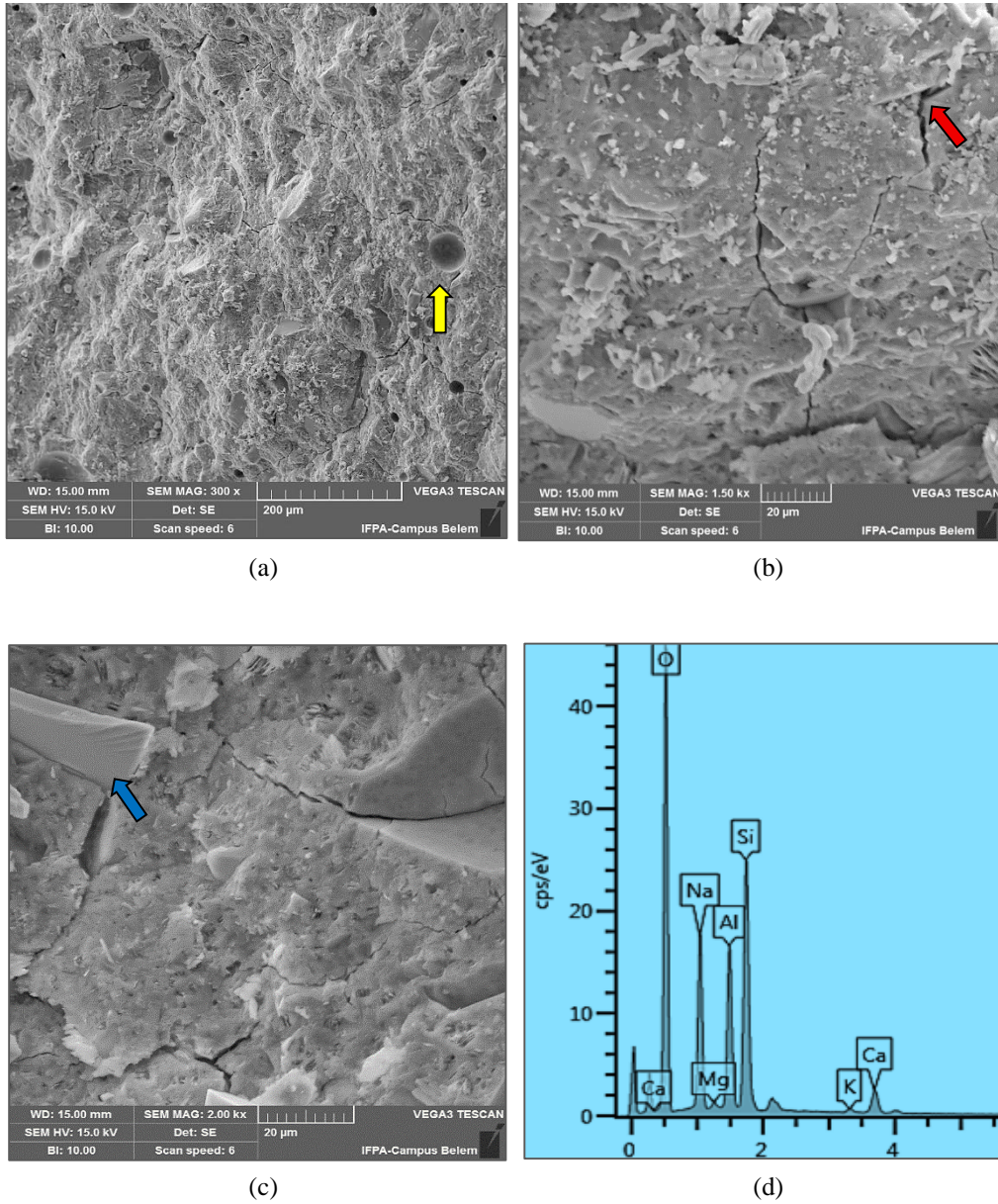
Os valores de resistência à compressão obtidos no presente estudo, são consistentes e reportados na literatura. Mesmo os valores mais baixos obtidos ainda se encontram dentro de uma faixa aceitável, enfatizando que as pastas geopoliméricas quando curadas sob temperaturas elevadas, em determinados tempos e idade de cura, influencia no processo de geopolimerização, adquirindo efeitos significativos nos resultados mecânicos. Além de proporcionar o aproveitamento de um subproduto industrial (escória de alto forno), contribuindo para a sustentabilidade no setor da construção civil.

4.2.7 MEV das Pastas

4.2.7.1 25°C com 7 dias de cura

A Figura 31 (a), (b) e (C) apresentam as microestruturas da pasta curada em temperatura ambiente (25°C) por 24 horas com idade de cura de 7 dias. Na Figura (d) demonstra a análise por EDS ilustrando os principais elementos químicos presentes na região da pasta analisada.

Figura 31 — Pasta curada a 25° por 24 horas. a) com ampliação de 300X; b) com ampliação de 1500X; com ampliação de 2000X; (d) análise de EDS



Fonte: autora (2025).

A microestrutura da pasta geopolimérica curada a 25°C revela características importantes que influenciam na resistência mecânica de 37,7 MPa. A Figura 31 (a) e (b) mostram uma matriz densa e relativamente homogênea, indicando um bom grau de polimerização. A presença de regiões compactas sugere que a ativação alcalina ocorreu de forma eficiente, promovendo a formação de uma estrutura coesa. No entanto, também são observadas microfissuras (identificado pelas setas vermelhas) que podem ser decorrentes do ensaio de compressão do CP, e vazios (identificado pelas setas amarelas), que pode estar relacionado à ausência de vibração da pasta após a moldagem e ao aprisionamento das bolhas

de ar dentro do geopolímero, o que pode justificar uma resistência mecânica inferior à de amostras submetidas à cura térmica mais intensa. Fator análogo pode ser constatado nos estudos de Melo *et al.*, (2022).

Na Figura 31 (c), é possível observar uma estrutura em forma de lamelas (identificado pela seta azul), característico da caulinita, o que pode evidenciar que o processo de mistura não ocorreu de forma homogênea e que a calcinação não foi 100% eficiente, apesar dos picos de caulinita reduzirem bastante (demonstrado no DRX), ainda assim, surgiram picos menores que não foram identificados, havendo a possibilidade de ser caulinita. Além de haver a presença de material não reagido (identificado pelas setas verdes), também observado por região de tom mais claro. Tal fator é justificado devido a inconsistências no processo de mistura, comprometendo a completa dissolução dos aluminosilicatos. Assim, a microestrutura observada confirma que a cura a 25°C resulta em uma matriz resistente, porém, com algumas limitações devido à presença de fissuras, vazios e materiais não reagidos.

A Figura 31 (d), demonstra a análise por EDS onde os principais elementos presentes são oxigênio, silício, sódio e alumínio, sendo o alumínio e silício os principais precursores para que o processo de geopolimerização ocorra de forma eficiente, juntamente com a solução alcalina, além de comprovar que a reação N-A-S-H (sódio, alumínio e silício hidratado) inicia-se nas primeiras 24 horas de cura.

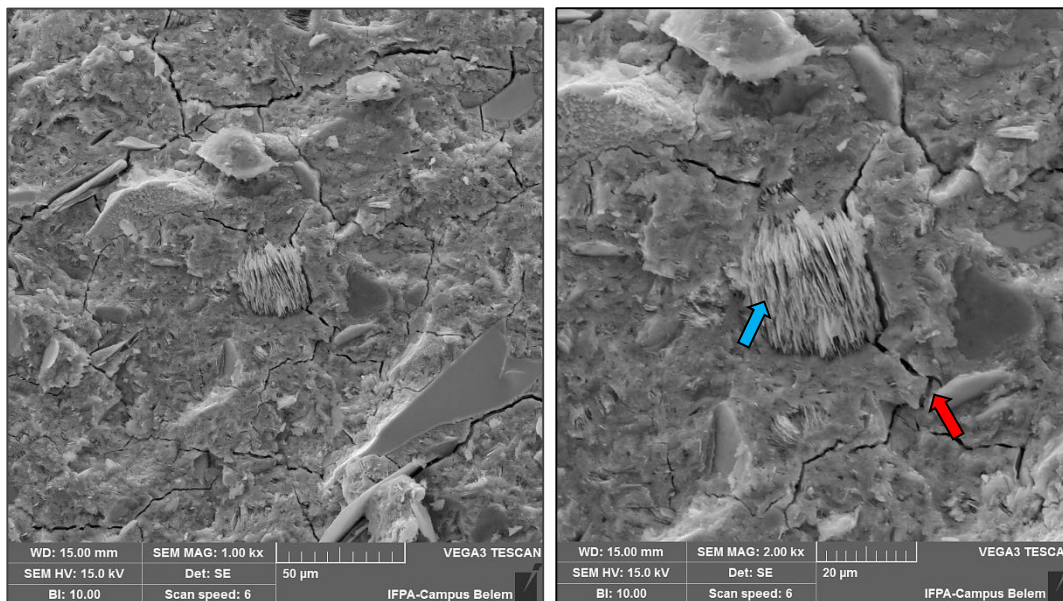
Cruz (2023) em seus estudos de pasta curado em temperatura ambiente, obteve uma microestrutura com presença de microfissuras e vazios, além da presença de regiões com material não reagido, sendo justificado pelo processo de mistura que não ocorreu de forma homogênea.

Com base nas investigações de Almeida (2023), onde foi utilizado a mesma formulação para produção das pastas geopoliméricas, a microestrutura obteve características semelhantes com do atual estudo, obtendo uma estrutura coesa e densa, apesar da presença de poros, em menor quantidade, fator este relacionado a influência da escória de alto forno, que proporciona um efeito de preenchimento, e conseqüentemente, o menor número de poros.

4.2.7.2 40°C com 7 dias de cura

A Figura 32 (a) e (b) apresentam imagens microscópica da pasta geopolimérica curada em temperatura de 40°C com 7 dias de cura.

Figura 32 — Microscopia da pasta curada a 40°C por 3 horas. a) Com ampliação de 1000X; b) Com ampliação de 2000X.



(a)

(b)

Fonte: autora (2025).

Na Figura 32 (a) e (b), observa-se uma matriz densa, característica da formação de produtos de reação típicos da geopolimerização. A temperatura de 40°C favoreceu o aumento da cinética das reações de geopolimerização, promovendo uma formação mais rápida dos produtos de reação (gel N-A-S-H e C-A-S-H). É possível evidenciar regiões de fratura e a presença de feixes de partículas lamelares no centro da matriz (indicado pela seta azul), indicativas de formação não completamente homogênea dos produtos de reação, como a caulinita. A fissuração superficial observada pode estar relacionada ao processo de retração autógena devido à perda de água interna e à densificação da estrutura durante a cura térmica.

A Figura 32 (b), com maior ampliação, permite identificar detalhes adicionais da microestrutura: as setas azuis apontam para regiões com feixes alinhados de partículas, sugerindo ser caulinita não totalmente amorfa. Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Simões *et al.*, (2021). A seta vermelha destaca uma fissura mais pronunciada, potencialmente associada à tensão interna desenvolvida pela diferença de contração entre a matriz consolidada e áreas parcialmente reativas, que também pode ser decorrente do ensaio de compressão. A presença dessas trincas, embora comum em materiais geopoliméricos, pode impactar negativamente a durabilidade mecânica, especialmente se conectarem-se formando redes contínuas.

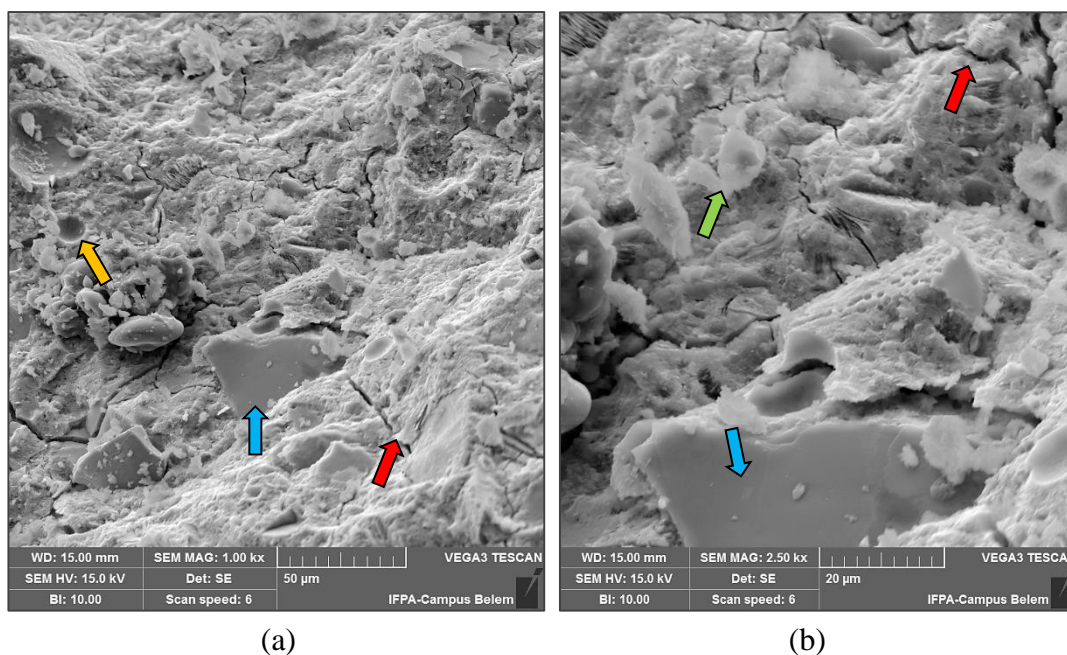
De forma geral, a microestrutura da pasta geopolimérica curada a 40°C por 3 horas com idade de cura de 7 dias, revela uma matriz predominantemente consolidada e compacta, mas

ainda assim, com heterogeneidades que refletem a complexidade da reação de geopolimerização sob temperaturas elevadas.

4.2.7.3 60°C com 7 dias de cura

Na Figura 33 (a) e (b) apresentam as micrografias da pasta geopolimérica curada a 60°C com 7 dias de cura.

Figura 33 — Microscopia da pasta curada a 60°C com 2 horas de cura; a) Com ampliação de 1000X; b) Com ampliação de 2500X.



Fonte: autora (2025).

As imagens de MEV da pasta geopolimérica curada a 60 °C por 2 horas com idade de cura de 7 dias, revelam uma microestrutura composta por regiões densificadas de gel de reação (indicadas pela seta azul), sendo necessário a análise por EDS para comprovar se nesta região concentra-se gel N-A-S-H ou C-A-S-H.

Também é possível observar através da Figura 33 (b), mediante as setas verdes, regiões com partículas não totalmente reagidas e presença de porosidade aberta, evidenciado por intermédio das setas amarelas. A formação do gel N-A-S-H ou C-A-S-H foi favorecida pela elevação da temperatura, acelerando a reação de geopolimerização, mas também promoveu a rápida evaporação de água da mistura, resultando em vazios e microfissuras (seta vermelha).

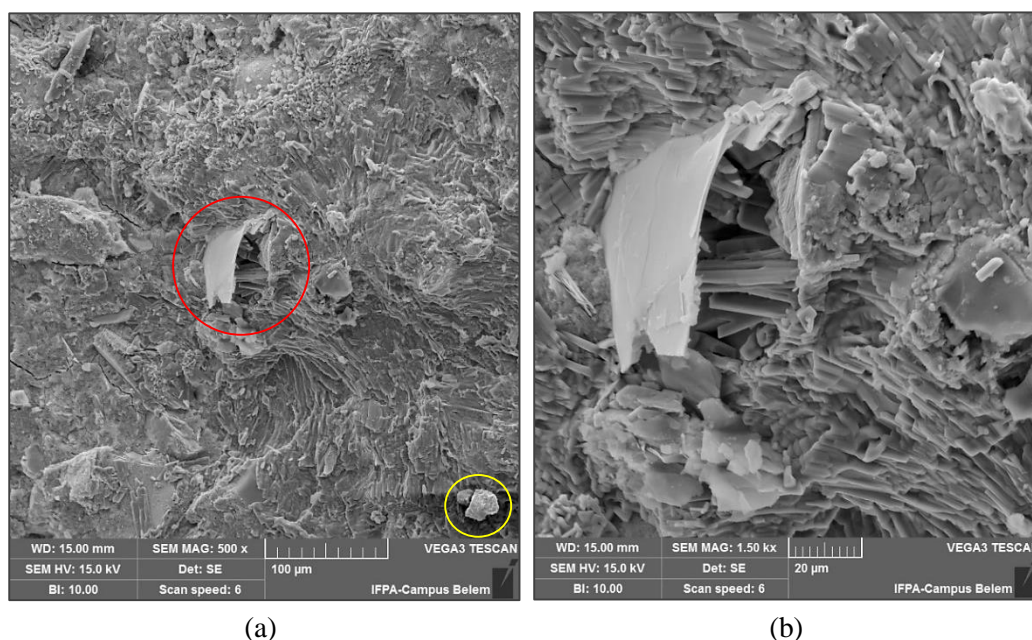
Os estudos de Santana (2025) obtiveram análises de MEV semelhantes ao do presente estudo.

A temperatura investigada foi suficiente para consolidar a matriz em algumas áreas, mas a curta duração da cura inicial (2 horas) contribuiu para a existência de partículas precursoras que não participaram completamente da reação, indicando uma geopolimerização ainda em desenvolvimento.

4.2.7.4 40°C com 3 dias de cura

A Figura 34 demonstra a microestrutura das pastas curadas em temperatura de 40°C por 2 horas e idade de cura de 3 dias, sendo (a) e (b) as ampliações utilizadas, 500X e 1500X, respectivamente.

Figura 34 — Microscopia da pasta curada a 40°C com 2 horas de cura; a) Com ampliação de 500X; b) Com ampliação de 1500X.



Fonte: autora (2025).

Observa-se na Figura 34 (a), através do círculo de cor vermelha, uma estrutura lamelar ou em placas, e uma estrutura em formato pseudo-hexagonal, ilustrado através do círculo amarelo, onde ambos são característicos da caulinita. Esses resíduos são comuns quando a ativação alcalina é incompleta, conforme Cruz (2023).

Estruturas em formato de “bastonetes” ou zonas de crescimento direcional é visível em uma parte da superfície da pasta, sendo observado na Figura 34 (b), com maior ampliação, uma região com maior aglomerado. Esse tipo de microestrutura é característico de material zeolítico. Segundo Souza *et al.*, (2023) em suas análises morfológicas de MEV do material zeolítico, observou uma estrutura com cristais em formato arredondado, que posteriormente

criaram e se aglomeraram como “novelos de lã”, que são característicos de zeólita do tipo sodalita.

Johnson (2024) afirma que as zeólitas podem ser sintetizadas a partir de geopolímeros por meio de conversão hidrotérmica, onde a estrutura amorfa do geopolímero é transformada em uma rede cristalina zeolítica sob condições controladas de temperatura, meio alcalino e tempo. Esse processo permite a formação de diferentes tipos de zeólitas (como Zeólita A, X ou sodalita), dependendo da relação Si/Al e das condições de síntese.

A possível formação de zeólitas pode ser inferida a partir da presença das zonas de crescimento direcional, que podem ser cristais secundários. Segundo Souza *et al.*, (2020), em seus estudos sobre a síntese e caracterização de zeólita obtida a partir de resíduo de caulim, afirma que a formação de zeólitas em geopolímeros é influenciada por fatores como a composição química da matéria-prima (especialmente a relação Si/Al), a alcalinidade do ativador, a temperatura de cura e o tempo de reação. Neste caso, a cura a 40°C pode ter acelerado a polimerização, favorecendo a nucleação de fases zeolíticas, enquanto a idade de cura de 3 dias permitiu um desenvolvimento parcial dessas estruturas.

A alcalinidade elevada exerce um fator importante na formação de zeólitas em geopolímeros, atuando em múltiplos aspectos da reação de polimerização. Primeiramente, a alta concentração de íons OH^- acelera a dissolução das partículas precursoras, liberando espécies reativas de sílica e alumina na solução. Essa disponibilidade de SiO_4 e AlO_4^- é fundamental para a nucleação e crescimento de estruturas zeolíticas, uma vez que zeólitas são aluminossilicatos cristalinos que requerem proporções específicas desses elementos. Além disso, o pH extremamente alcalino favorece a condensação dessas espécies em arranjos tridimensionais ordenados, característicos das zeólitas, em vez de formar apenas o gel amorfo típico dos geopolímeros. Características semelhantes foram relatadas nas investigações de Silveira (2021).

No entanto, a alcalinidade excessiva (10 M) também pode induzir competição entre a formação do gel geopolimérico e a cristalização de zeólitas. Condições tão agressivas podem levar à precipitação rápida de fases zeolíticas metastáveis, como a sodalita ou a zeólita A, que são comuns em ambientes altamente alcalinos. Resultados análogos foram constatados nos estudos de Souza (2020). As fases podem surgir preferencialmente em regiões locais com alta saturação de íons, explicando a formação de uma estrutura em formato de “bastonetes”. A temperatura de cura (40°C) amplifica esse efeito, pois acelera tanto a polimerização quanto a transformação de gel em zeólitas.

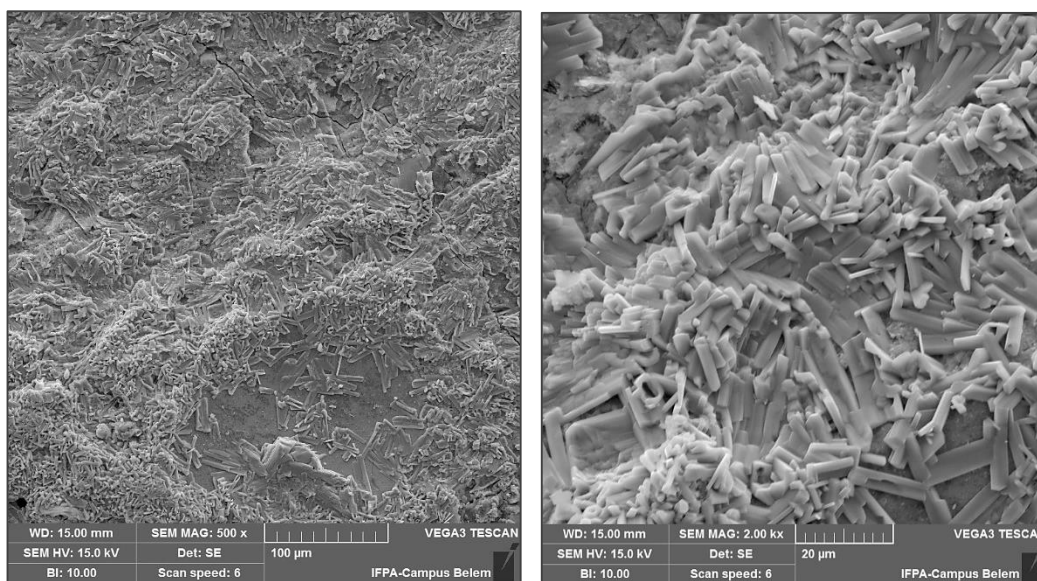
De acordo com os estudos de Tang *et al.*, (2016), os autores afirmam que as condições iniciais de cura para obtenção da Zeólita do tipo ZSM-20 a partir do geopolímero, é de 40°C com idade de cura de 3 dias, indicando que os cristais de zeólita ZSM-20 apresentaram melhor cristalinidade sob essa condição.

Portanto, a pasta geopolimérica curada a 40°C por 1 hora e idade de cura de 3 dias, obteve característica microestrutural, parcial, típico de material zeolítico.

4.2.7.5 80°C com 3 dias de cura

A Figura 35 demonstra a microestrutura das pastas curadas em temperatura de 80°C por 1 hora e idade de cura de 3 dias, sendo (a) e (b) as ampliações utilizadas, 500X e 2000X, respectivamente.

Figura 35 — Microscopia da pasta curada a 80°C com 1 hora de cura; a) com ampliação de 500X; b) com ampliação de 2000X.



(a)

(b)

Fonte: autora (2025).

Observa-se na Figura 35 (a), uma microestrutura densa e coesa, característica típica de geopolímeros bem consolidados, com formação predominante do gel amorfo. Essa estrutura densa é compatível com a literatura, que aponta que temperaturas elevadas de cura aceleram o processo de polimerização e promovem o desenvolvimento rápido da matriz amorfa (Van Deventer, 2014). Entretanto, ao analisar a Figura 35 (b), com maior ampliação, torna-se ainda, possível identificar estruturas em formato de “bastonetes” dispersas na matriz, morfologicamente compatíveis com fases zeolíticas em estágio inicial de cristalização. Essa

condição sugere que, apesar da rápida formação da matriz geopolimérica amorfa, a temperatura de 80 °C por si só não impede completamente a formação de fases cristalinas, como as zeólitas, mas pode apenas limitá-las em quantidade e grau de organização, conforme relatado por estudos de Dal Pont *et al.*, (2023).

A formação simultânea de gel N-A-S-H e fases zeolíticas é um fenômeno já reportado em sistemas alcalinos ricos em Si e Al, especialmente quando há excesso de íons solúveis e disponibilidade de água suficiente para mobilidade iônica local. Segundo Duxson *et al.*, (2007), mesmo em condições de cura acelerada, microambientes locais podem apresentar taxas de reação mais lentas ou heterogeneidades, permitindo que núcleos cristalinos de zeólitas se desenvolvam antes que a completa gelificação aconteça.

Portanto, os indícios morfológicos observados indicam que, embora a maior parte da microestrutura seja dominada por uma fase amorfa consolidada, existem sinais iniciais de nucleação de zeólitas, que podem evoluir dependendo das condições de umidade, tempo de cura e disponibilidade química residual. Esse comportamento reforça que a formação de zeólitas e geopolímeros pode ocorrer simultaneamente, sendo fortemente modulada por condições cinéticas e termodinâmicas locais do sistema geopolimérico.

Resultados microestruturais semelhantes foram encontrados em estudos de Dou *et al.*, (2023) e Onutai *et al.*, (2023).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs fazer um estudo nas pastas geopoliméricas curadas em diferentes temperaturas, tempo e idade de cura com objetivo de obter o melhor resultado de resistência à compressão para aplicações em agregados sintéticos. Portanto, conclui-se que:

- Os testes de perda ao fogo confirmaram a eficácia da calcinação do caulim, reduzindo a perda de 13,5% para 1,3%, e a escória de alto forno por se tratar de um resíduo siderúrgico, possui baixa quantidade de água em sua estrutura (0,032%).
- Foi comprovado através do DRX do metacaulim, o processo de calcinação ocorreu de forma eficiente a 850°C por 2 horas, onde os picos característicos de caulinita apresentaram redução de intensidade devido à desidroxilação das folhas octaédricas, resultando na desorganização da estrutura cristalina, e como consequência o material tornou-se amorfo e altamente reativo.
- O FTIR demonstrou a redução da intensidade dos picos e o desaparecimento das bandas relacionadas aos grupos hidroxilas, evidenciando a desidroxilação e a conversão para uma fase amorfa
- O melhor resultado de resistência à compressão foi obtido a 40 °C por 3 horas com idade de cura de 7 dias, atingindo um pico máximo de 45,5 MPa. Temperaturas e tempo de cura acima dessas condições, demonstraram decréscimo na resistência mecânica das pastas.
- A resistência à compressão da pasta geopolimérica atendeu os padrões do ISRM (1977), com resistência de 45,5 MPa, enquadrando o geopolímero como resistência média, tornando-o aplicável para agregados sintéticos.
- Para pastas curadas com 3 dias, obteve-se resistência máxima de 33,7 MPa sob temperatura de 40°C por 2 horas, enquanto a menor resistência encontrada no estudo foi de 80°C por 4 horas, sendo justificado pela incompleta formação da matriz geopolimérica e pela desidratação excessiva.
- O MEV das pastas curadas a 40°C por 3 horas e idade de cura de 7 dias, demonstrou uma matriz compacta, mas ainda assim, com heterogeneidade que refletem a complexidade da geopolimerização sob temperaturas mais elevadas.
- O MEV das pastas com 3 dias de cura, identificou-se a formação parcial de estruturas com características de material zeolítico.

- A escória de alto forno demonstrou ser excelente fonte de cálcio, contribuindo para a formação de géis C-A-S-H, enquanto o metacaulim se destacou como um precursor altamente reativo.
- O estudo evidenciou que a cura térmica influencia diretamente na resistência mecânica dos geopolímeros, sendo fundamental para aprimorar o desempenho do material.
- Os resultados obtidos coincidem com os demais resultados encontrados na literatura

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Produzir pastas geopoliméricas com 28 dias de cura sob diferentes temperaturas e tempo de cura;
- Estudar a formação de zeólitas em matrizes geopoliméricas sob diferentes condições de cura;
- Explorar o uso de outros resíduos industriais como fontes de aluminosilicatos para produção de geopolímeros;
- Produção de concreto geopolimérico a partir do melhor resultado de resistência a compressão da pasta curada

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ALMEIDA, Bianca Mendes et al. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto forno**. 2023.

AZEVEDO, Adriano Galvão Souza et al. Effect of curing temperature, activator solution composition and particle size in Brazilian fly-ash based geopolymer production. **Materials Research**, v. 22, p. e20180842, 2019.

ALMEIDA, Gyselle Maciel de et al. Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto. 2014.

ALENCAR, Wemerson José. Análise por espectroscopia vibracional, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura de conchas fósseis das Formações Jandaíra e Itaituba. 2023.

AL-GHOUTI, M. A. et al. **Development of industrially viable geopolymers from treated petroleum fly ash**. Journal of Cleaner Production, v. 280, n. 124808, 2021

AZIMI, E. A., ABDULLAH, M. M., MING, L. Y., YONG, H. C., HUSSIN, K., & AZIZ, I.H. **Processing and Properties of Geopolymers of Geopolymers as Thermal Insulating Materails: A Review**. Reviws on Advanced Materials Science, Vol. 44 - Nº 3, 273-285, 06 de AGOSTO de 2016.

AZIMI, E. A. et al. Strength development and elemental distribution of dolomite/fly ash geopolymer composite under elevated temperature. *Materials*, v. 13, p. 1015, 2020.

BELTRAME, Neusa Aparecida Munhak et al. Estudo preliminar do efeito da cura por carbonatação em geopolímeros. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 17, p. e17110, 2023.

BITENCOURT, C. S. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita**. São Paulo, v. 58, n. 345, Mar. 2012.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. 280 p. Tese (Doutorado)- Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BRITO, Woshington Da Silva, André Luis Mileo Ferraioli Silva, Kristoff Svensson, Herbert Pöllmann, Rozineide Aparecida Antunes Boca Santa, Humberto Gracher Riella, and José Antônio Da Silva Souza. **"Influência da concentração de naoh na síntese de geopolímero com reaproveitamento de resíduo industrial."** Tecnologia Em Metalurgia, Materiais E Mineração 16.1 (2019): 45. Web.

BRITO, Woshington da Silva. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduos industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/15010>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2024.

CASCAES, M.E.L. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz.** Trabalho de conclusão de curso em curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville, 2016.

CASADO, Lucas Devetak; BARBOSA, Andréa Teresa Riccio. Avaliação da eficiência energética nos processos de queima do bagaço da cana-de-açúcar em usinas sucroalcooleiras. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 10, n. 2, p. 16962-16962, 2024

CHAGAS, G. C.; DIAS, R.T.F. **Caracterização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios.** Quim.Nova, V. 32. 2009

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, SP, 2013.

CRUZ, K. S. P. **Produção de agregados sintéticos para construção civil a partir de materiais geopoliméricos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, PA, 2023.

DAVIDOVITS, J. **“Properties of Geopolymeric Cements”**, Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, pp. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Cement. A review**, Geopolymer Institute Library. Jan. 2013.

DA SILVA, Maria Célis Pinheiro et al. **CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO PARA FABRICAÇÃO DE TELHAS.**

DING, Zhan, Peilong Li, Xu Wu, Peng Gao, Jinfei Su, and Shengfei Sun. **"Evaluation of the Contact Characteristics of Graded Aggregate Using Coarse Aggregate Composite Geometric Indexes."** Construction & Building Materials 247 (2020): 118608. Web.

DOS SANTOS PINHEIRO, Bruno Filipe. **Influência da Temperatura de Cura na Resistência à Compressão dos Geopolímeros.** 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra (Portugal).

DOU, Huaiyuan et al. In-situ transformation of li-abw zeolites based on li-geopolymer. **Gels**, v. 9, n. 5, p. 392, 2023.

DE SOUZA SANTOS, Helena; DE SOUZA SANTOS, Persio. Pseudomorphic formation of aluminas from fibrillar pseudoboehmite. **Materials Letters**, v. 13, n. 4-5, p. 175-179, 1992.

FAO, **“The state of food and agriculture: innovation in family farming”**, Food Agric. Org. UN, Rome (2017).

FERREIRA, Ludimilla da Silveira. Aplicação de caulim como ligante em moldes de areias a verde de fundição. 2020.

FARIAS, O. O., RANGEL, J.M.M., ZAMORA, M. A. B., **“Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre a compactação, CBR e resistência à compressão de um material de granulometria fina”**, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>. 2018.

FELTRIN, Ana Carolina. Síntese e troca iônica de zeólitas produzidas a partir de caulim para separação de oxigênio do ar atmosférico. 2021.

FREITAS, C. A. M. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável**. 2018. 128 p. Tese (doutorado)-Curso de Doutorado em Ciência dos Materiais, programa de Pós-graduação em engenharia de materiais da REDEMAT, Ouro Preto, 2018.

FOURNARI, Revecca, and Ioannis IOANNOU. "**Correlations between the Properties of Crushed Fine Aggregates.**" *Minerals (Basel)* 9.2 (2019): 86. Web.

FUNAHASHI Júnior, Eduardo Issamu, Patrícia Guedes Gambale, Solanda Oliveira, and Nicole 99Pagan Hasparyk. "**Influência Do Metacaulim na Elevação da Temperatura e na Formação de Etringita Tardia em Compósitos Cimentícios.**" *Matéria* 27.2 (2022): Matéria, 2022, Vol.27 (2). Web.

GARDOLINSKI, José E.; WYPYCH, Fernando; CANTÃO, Maurício P. Esfoliação e hidratação da caulinita após intercalação com uréia. *Química Nova*, v. 24, p. 761-767, 2001.

GLUKHOVSKY, V. D., ROSTOVSKAJA, G. S., RUMYNA, G. V. **High strength slag alkaline cements**. 7th International Congress Chemical Cement, Vol.3, Paris, Theme 5, 164 – 168, 1980.

HASSAN, Amer, Mohammed Arif, and M. Shariq. "**Use of Geopolymer Concrete for a Cleaner and Sustainable Environment – A Review of Mechanical Properties and Microstructure.**" *Journal of Cleaner Production* 223 (2019): 704-28. Web

ILIC, B., R.; MITROVIC, A. A.; MILICIC, L. R., **Thermal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin**. *Hem. Ind.* Vol. 64, P. 351-356, 2010.

ISRM -International Society Rock Mechanics (1977). **Suggest methods for determining tensile strength of rock materials**. *Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech Abstr.* Vol 15, N°3, pag:99 - 103.

JUNIOR, Nelson de Assis Medeiros. **Desenvolvimento de massa de revestimento cerâmico, relacionando o desempenho do Caulim e Argila Mataraca**. Universidade Federal da Paraíba - JOÃO PESSOA, 2018.

JOHNSON, E. B. G.; ARSHAD, Sazmal E. Hydrothermally synthesized zeolites based on kaolinite: A review. *Applied Clay Science*, v. 97, p. 215-221, 2014.

KIM, Byoungkwan et al. Setting behavior and phase evolution on heat treatment of metakaolin-based geopolymers containing calcium hydroxide. *Materials*, v. 15, n. 1, p. 194, 2021.

KOMNITSAS K.; ZAHARAKI D. **Geopolymerisation: A Review and Prospects for the mineral**. *Industry Minerals Engineering*. Volume 20, Issue 14, November 2007, Pages 1261-1277.

Lima, J. S. **Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica**. *Cerâmica* 66 (2020) 172-178. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/LQ3BSnLnpXjDBRHQ4DcKgbf/#>. Acesso: 14 de fevereiro de 2024.

LIMA, J. S. **Efeito da relação molar SiO₂/Al₂O₃ e das condições de cura nas propriedades de geopolímeros obtidos com silicato de cinza da casca de arroz**. 2018. 96 f. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2018.

LUCAS, M. M. **Materiais cimentícios geopoliméricos a partir de escória de alto forno: um estudo morfológico preliminar.** 2021. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2021.

Leandro, A. P.; Viera, E. V. (2022). **Estudo da dispersão da caulinita, do nordeste brasileiro, por meio do controle de pH e adição de dispersantes.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.9, p. 65434-65455, out., 2022.

Lima, J. S. **Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica.** Cerâmica 66 (2020) 172-178. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/LQ3BSnLnpXjDBRHQ4DcKgbf/#>. Acesso: 14 de fevereiro de 2024.

LIMA, Jofre Silva. **Efeito da Relação Molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e das Condições de Cura nas Propriedades de Geopolímeros Obtidos com Silicato de Cinza da Casca de Arroz.** Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental) - Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

MASUELA, F. B. **Estudo da água não evaporável na hidratação do cimento Portland com escória de alto forno por meio de análise térmica.** Dissertação de mestrado em Engenharia civil, área de construção. Universidade Estadual de Campinas, 2016.

MATURANA, Murilo de Carvalho. **Influência da cura térmica em geopolímeros à base de metacaulim.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

MELO, Eduardo Lucas Procópio; FIGUEIREDO, Ricardo Augusto Martins; MAZZINGHY, Douglas Batista. **AVALIAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE GEOPOLÍMEROS PRODUZIDOS UTILIZANDO RESÍDUOS DE MINERAÇÃO.** HOLOS, v. 8, 2022.

MELO, M. L. **Desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria e metacaulim ativado com adição de cinza de ossos bovinos.** 53p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Instituto de Geociências e Engenharias, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2016.

MEHTA, A.; RAFAT, S. Sustainable Geopolymer Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag and Rice Husk Ash: Strength and Permeability Properties. Journal of Cleaner Production, v. 205, p. 49-57, 2018.

MORSY, M.s. *et al.* Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 172, p.243-250, maio 2018.

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S. et al. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, v. 65, n. 6, p. 995-998, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, Herbet Alves De, Cochiran Pereira Dos Santos, Rosane Maria Pessoa Betânio Oliveira, Edilson De Jesus, and Zélia Soares Macedo. **"Produção de agregado sintético de argila com reaproveitamento de resíduo de vidro."** Matéria 24.1 (2019): Matéria, 2019, Vol.24 (1). Web.

OZCAN, Ahmet, and Mehmet B KARAKOC. "Evaluation of Sulfate and Salt Resistance of Ferrochrome Slag and Blast Furnace Slag-based Geopolymer Concretes." *Structural Concrete : Journal of the FIB* 20.5 (2019): 1607-621. Web.

ONUTAI, Sujitra; SATO, Junya; OSUGI, Takeshi. Possible pathway of zeolite formation through alkali activation chemistry of metakaolin for geopolymer–zeolite composite materials: ATR-FTIR study. *Journal of Solid State Chemistry*, v. 319, p. 123808, 2023.

PAIVA, Mayanne Vieira de; CARVALHO, Carlos Mavíael; SIMAS, Tarciso Binoti. **Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil**. In: Congresso Nacional De Arquitetura E Urbanismo, 2020, Marabá: Unifesspa, 2020. p. 1-10

Palomo A, Alonso S, Fernández-Jiménez A, Sobrados I, Sanz J. Ativação alcalina de cinzas volantes: estudo de RMN dos produtos de reação. *J Am Ceram Soc* 2004;87:1141–5.

PAIVA, Mayanne Vieira de et al. Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil. In: congresso araguaense de ciências exata, tecnológica e social aplicada, p. 1- 11, 2020, Santana do Araguaia. Anais Santana do Araguaia: II CONARA, 2020.

PORTO, A. B. R. **Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto forno**. 2019. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019

PODE, R. **Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass powerplant**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1468-1485, 2016

PIRES, J. A. **Estudo da reatividade da metacaulinita obtida a partir do caulim calcinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

PREZA, C. R. A. S. **síntese e caracterização de geopolímeros, a partir de argila, caulim ferruginoso e cinzas volantes - classe c**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, 2021.

PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jan Stephanus Jakob (Ed.). *Geopolímeros: estruturas, processamento, propriedades e aplicações industriais*. Elsevier, 2009.

ROSARIO, Luiz Ângelo de Paula; FERREIRA, Ludimilla da Silveira; OLIVEIRA, Ivanir Luiz de. Propriedades em areias a verde com caulim para moldes de fundição. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, p. e13065, 2022.

ROSSETTO, A. M. **Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil**. *Revista Matéria*, v. 22, n. 4, 2017.

SANTOS, R. M. dos et al. **Influência da temperatura de cura na formação de mulita em geopolímeros à base de metacaulim**. In: Congresso Brasileiro De Cerâmica, 64., 2020, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCeram, 2020. p. 123-130

SANTANA, Rayanne Oliveira Leão et al. **Estudo das propriedades de argamassa geopolimérica produzida com resíduos de caulim e escória de alto-forno da Região Amazônica.** 2025.

SANTOS, R. A. et al. **Caracterização e avaliação do potencial de uso do caulim da região de São Domingos do Araguaia-PA.** Revista Matéria, v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: <[<https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0579>]>.

SANTOS, R. M. dos et al. **Influência da temperatura de cura na formação de mulita em geopolímeros à base de metacaulim.** In: Congresso Brasileiro De Cerâmica, 64., 2020, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCeram, 2020. p. 123-130

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. Fundamentos.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1975. V. 1. 340 p.

SANTOS, BS, DDM ALBUQUERQUE, and DV RIBEIRO. **"Efeito da Adição de Metacaulim na Carbonatação de Concretos de Cimento Portland."** Revista IBRACON De Estruturas E Materiais 13.1 (2020): 1-18. Rede.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Catarina, 135p, 2012.

SILVA, A. C. R., **Compósitos geopolimérico com fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto.** Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, João Paulo Carvalho da. **Concreto Geopolimérico-Uma Revisão Bibliográfica.** 2025.

SIYAL, Ahmer Ali et al. Uma revisão abrangente da cinética de síntese e do mecanismo de formação de geopolímeros. **RSC Advances** , v. 14, n. 1, p. 446-462, 2024.

SILVEIRA, Andresa Rodrigues da et al. **Desenvolvimento de materiais compósitos geopolímero-zeólita derivados de resíduos industriais para adsorção de CO₂.** 2021.

SEVERO, C. G. S. et al. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente.** 2013. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v 8.2, p. 55-67. 2013.

SINGH, Jagmeet; SINGH, S. P. **Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review.** Journal of Environmental Management. Vol. 251. 2019

SIMÕES, Ana Luisa Abrantes et al. Síntese de geopolímeros a partir da caulinita, metacaulinita e espodumênio e sua aplicação como adsorvente de amoxicilina. 2021.

SOUZA, José et al. **Materiais Cimentícios Suplementares: Histórico e Novas Tendências.** Núcleo do Conhecimento, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/materiais-cimenticios>. Acesso em: 14 fevereiro de 2024.

SOUSA, B. B. et al. Síntese e caracterização de zeólita tipo sodalita obtida a partir de resíduo de caulim. **Cerâmica**, v. 66, p. 404-412, 2020.

TRINCAL, G. et al. **Caracterização estrutural de geopolímeros produzidos a partir de resíduos de mineração de bauxita**. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, e-12976, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/FVwQshPhPh5ZbSJ3ygvBNYD/>. Acesso em: 04 fevereiro de 2024.

TRINCAL, Vincent, Stéphane Multon, Virginie Benavent, Hugo Lahalle, Bastien Balsamo, Amélie Caron, Raphaël Bucher, Laura Diaz Caselles, and Martin Cyr. **"Shrinkage Mitigation of Metakaolin-based Geopolymer Activated by Sodium Silicate Solution."** *Cement and Concrete Research* 162 (2022): 106993. Web.

WIECHETECK, Blenda Litaiff et al. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA SOBRE AS PROPRIEDADES DE UM NOVO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO A BASE DE VIDRO RECICLADO. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 14, n. 1, 2022.