



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVESITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DIEGO JOSÉ DA SILVA SANTOS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TELHAS
GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE POLIÉSTER**

ANANINDEUA - PA

2025

DIEGO JOSÉ DA SILVA SANTOS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TELHAS
GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE POLIÉSTER**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais, 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)**

S237a Santos, Diego José da Silva.
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
TELHAS GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS
DE POLIÉSTER / Diego José da Silva Santos. — 2025.
99 f. : il.

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. Telhas de Fibras Sintéticas. 2. Desempenho
Mecânico. 3. Microestrutural. I. Título.

CDD 620.11

DIEGO JOSÉ DA SILVA SANTOS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TELHAS
GEOPOLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE POLIESTER**

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 – Orientador (FEMAT – UFPA)



Profa. Dra. Veronica Scarpini Candido - Examinador interno (FEMAT – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br MATHAUS MORAES LUCAS
Data: 18/08/2025 10:14:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Msc. Mathaus Moraes Lucas - Examinador externo (Bravo Brasil)

ANANINDEUA/ PA

2025

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, que foi meu refúgio e minha fortaleza em todos os momentos desta caminhada. Foi Ele quem me concedeu força nos dias difíceis, sabedoria para tomar decisões, disciplina para manter o foco e resiliência para não desistir. Durante esses cinco anos de jornada acadêmica, senti Sua presença constante me guiando e sustentando, mesmo quando as circunstâncias pareciam querer me fazer parar. A Ele, toda a minha gratidão e honra.

À minha família, que mesmo estando longe fisicamente jamais deixou de estar presente em espírito, deixo minha eterna gratidão. Em especial, à minha mãe, Maria Dulcineia Alves da Silva, e ao meu pai, José Jurandir Melo dos Santos, que sempre acreditaram em mim e me ofereceram amor, apoio e coragem para continuar, mesmo diante das dificuldades. Também agradeço com muito carinho aos meus irmãos, Dalton e Geovani, por cada palavra de incentivo, exemplo e apoio nos momentos em que mais precisei. Amo vocês com todo o meu coração, e cada conquista aqui alcançada carrega um pedaço de tudo o que vocês representam para mim.

Aos amigos que o tempo e o curso me presentearam, minha sincera gratidão. Vocês se tornaram uma segunda família, com quem compartilhei não apenas as dificuldades, mas também momentos de alegria, descontração e companheirismo. Em especial, agradeço a Adailton Borges e Giovana Zagalo, que estiveram comigo nos momentos mais marcantes, dividindo não apenas os desafios, mas também as vitórias e as risadas que tornaram essa jornada mais leve e significativa. Obrigado por fazerem parte dessa história e por torná-la inesquecível.

Ao meu orientador, Professor Dr. Alisson Clay Rios da Silva, expresso minha mais profunda gratidão pela orientação precisa, pela paciência e pela dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, rigor acadêmico e incentivo constante foram fundamentais para que eu pudesse crescer como pesquisador e concluir esta etapa com segurança e aprendizado. Muito obrigado por acreditar no meu potencial e por me conduzir com sabedoria nesse percurso desafiador.

À minha namorada, Gabrielle Silva de Oliveira, com todo o carinho e amor, dedico este parágrafo. Desde o início, você esteve ao meu lado, torcendo, apoiando e acreditando em mim até mesmo quando eu não acreditava. Não há palavras que sejam capazes de expressar minha gratidão por tudo o que você fez e representa na

minha vida. Obrigado por me acolher nos dias mais difíceis, por me ouvir, aconselhar e me lembrar da minha força. Seu amor foi luz em muitos momentos de escuridão, e este capítulo da minha vida também é seu.

.

RESUMO

A adoção de tecnologias alternativas nas pesquisas relacionadas à construção civil tem ganhado destaque, priorizando a utilização de materiais e compostos renováveis. Essa abordagem é fundamental para promover a sustentabilidade e mitigar os impactos ambientais, especialmente em um cenário onde a poluição atinge níveis alarmantes. O uso de matérias-primas renováveis oferece a vantagem de serem reabastecidas, garantindo sua disponibilidade quando necessário. Para enfrentar os desafios ambientais, este estudo apresenta uma solução inovadora: a síntese de uma mistura cimentícia geopolimérica baseada em materiais álcali-ativados (MAA), que não apenas demonstra desempenho mecânico promissor, mas também contribui para a conservação de recursos naturais. O presente trabalho propõe a criação de telhas geopoliméricas com percentuais de fibra de poliéster, utilizando um processo de formulação que inclui metacaulim, escória de alto forno, solução alcalina de hidróxido de sódio, silicato e fibra de poliéster. A metodologia da pesquisa foram a criação de quinze telhas em escala reduzida, utilizando um molde de polipropileno de fibrocimento na proporção 1:10, com dimensões de 11 cm x 24 cm x 6 cm de espessura. foram fabricadas com percentuais de 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3% em massa de fibra de poliéster no cimento sustentável, permitindo avaliar a influência dessa incorporação. Os ensaios realizados foram, resis

tência à tração e flexão e a caracterização por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Nos resultados, pode-se perceber que o aumento das concentrações de fibra influencia na integridade do corpo de prova. A partir da pasta com 3% de fibra a concentração do ativador alcalino não é suficiente o que acarreta no aparecimento de muitas partículas não reagidas e um decaimento de resistência mecânica. Pode-se concluir que as matérias-primas utilizadas estão adequadas para o uso em geopolímeros, com o aumento de fibra de poliéster até 2% a resistência mecânica se mostra adequada ao uso e o material utilizado tem grande potencial na indústria cimentícia.

Palavras-chave: Telhas de Fibras Sintéticas. Desempenho Mecânico.
Microestrutural

ABSTRACT

The adoption of alternative technologies in research related to civil construction has gained prominence, prioritizing the use of renewable materials and compounds. This approach is essential to promote sustainability and mitigate environmental impacts, especially in a scenario where pollution levels are alarmingly high. The use of renewable raw materials offers the advantage of being replenishable, ensuring their availability when needed. To address environmental challenges, this study presents an innovative solution: the synthesis of a geopolymeric cementitious mixture based on alkali-activated materials (AAM). This solution not only demonstrates promising mechanical performance but also contributes to the conservation of natural resources. Specifically, this work proposes the creation of geopolymeric tiles with varying percentages of polyester fiber, using a formulation process that includes metakaolin, blast furnace slag, sodium hydroxide alkaline solution, silicate, and polyester fiber. The research methodology involved creating fifteen small-scale tiles using a polypropylene fibrocement mold at a 1:10 scale, with dimensions of 11 cm x 24 cm x 6 mm thickness. The tiles were manufactured with 0%, 0.5%, 1%, 2%, and 3% by mass of sustainable cement, allowing for an evaluation of the influence of this incorporation. The tests conducted included tensile and flexural strength assessments, as well as characterization through Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results revealed that increasing fiber concentrations influences the integrity of the test specimens. From the mixture containing 3% fiber onward, the concentration of the alkaline activator proved insufficient, leading to the appearance of many unreacted particles and a decline in mechanical strength. It can be concluded that the raw materials used are suitable for application in geopolymers. With polyester fiber content up to 2%, mechanical strength is adequate for use, and the material shows great potential for application in the cement industry.

Keywords: Synthetic Fiber Tiles. Mechanical Performance. Microstructural Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ESQUEMA ESTRUTURAL DE COMPOSTOS GEOPOLIMÉRICOS	19
FIGURA 2 – MECANISMO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO SO GEOPOLIMERIZ DEGEOPOLIMERIZAÇÃO.....	20
FIGURA 3 – APLICAÇÃO DO GEOPOLÍMERO DE ACORDO COM SUA RAZÃO SI/AL.....	29
FIGURA 4 – ETAPAS E SEQUÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	34
FIGURA 5 – METACAULIM.....	35
FIGURA 6 – ESCÓRIA DE ALTO-FORNO	36
FIGURA 7 – FIBRA DE POLIÉSTER PROVENIENTE DA MICHELIN PNEUS	38
FIGURA 8 – PRENSA HIDRÁULICA ELÉTRICA. CONTENCO	47
FIGURA 9 – PRENSA HIDRÁULICA ELÉTRICA. ITERMETRIC LINHA IM	50
FIGURA 10 – POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA NOS APOIOS	51
FIGURA 11 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DO MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI	40
FIGURA 12 – FORNO UTILIZADO PARA CALCINAÇÃO.....	41
FIGURA 13 – MOINHO DE BOLAS	41
FIGURA 14 – PROCEDIMENTO DE MISTURA PARA PREPARAÇÃO DA PASTA GEOPOLIMÉRICA.	42
FIGURA 15 – PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO DE NAOH.....	43
FIGURA 16 – MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DO GEOPOLÍMERO: (A) METACAULIM, (B) EAF, (C) SILICATO DE SÓDIO E (D) ÁGUA E (E) FIBRA DE POLIÉSTER.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 17 – DISPOSIÇÃO DOS MOLDES DE (Ø2,5X5) CM	45
FIGURA 18 – DISPOSIÇÃO DOS MOLDES COM PASTA GEOPOLIMERICA	45
FIGURA 19 – ADIÇÃO DAS FIBRAS DE POLIÉSTER NO GEOPOLIMERO E APARÊNCIA FÍSICA DOS COMPÓSITOS	46
FIGURA 20 – MOLDES PREVIAMENTE MOLDADOS COM GEOPOLIMERO MAIS A ADIÇÃO DE FIBRA DE POLIÉSTER	46
FIGURA 21 – MARCAÇÕES PARA O DEVIDO POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA.....	47
FIGURA 22 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX) CAULIM.....	54
FIGURA 23 – IMAGENS DE MEV CAULIM: (A) AUMENTO DE 1000X (B) AUMENTO DE 5000X	55
FIGURA 24 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX) METACAULIM.....	57
FIGURA 25 – IMAGENS DE MEV METACAULIM: (A) COM AUMENTO DE 4.999X (B) COM AUMENTO DE 18.400X.....	59
FIGURA 26 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX) DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	60
FIGURA 27 – IMAGENS DE MEV ESCÓRIA DE ALTO-FORNO: (A) COM AUMENTO DE 1.011X (B) CAULIM COM AUMENTO DE 2.077X.....	62
FIGURA 28 – RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS COM AS VARIAÇÕES EM PERCENTUAIS DE FIBRA DE POLIÉSTER.	64
FIGURA 29 – ANÁLISE COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICA E CIMENTO PORTLAND COM VARIAÇÃO DE 0% E 2% DE FIBRA.....	66
FIGURA 30 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS COM AS VARIAÇÕES EM PERCENTUAIS DE FIBRA DE POLIÉSTER.	68
FIGURA 31 – ROMPIMENTO DOS CPS COM FIBRA DE POLIÉSTER: A) CP DE PASTA COM 0% DE FIBRA, B) CP DE PASTA COM 0,5% DE FIBRA, C) CP DE PASTA COM 1% DE FIBRA, D) CP DE PASTA COM 2% DE FIBRA E E) CP DE PASTA COM 3% DE FIBRA	48
FIGURA 32 – ROMPIMENTO DOS 3 CP COM FIBRA DE POLIÉSTER: A) CP DE PASTA COM 0% DE FIBRA, B) CP DE PASTA COM 0,5% DE FIBRA, C) CP DE PASTA COM 1% DE FIBRA, D) CP DE PASTA COM 2% DE FIBRA E E) CP DE PASTA COM 3% DE FIBRA.....	51
FIGURA 33 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DA PASTA GEOPOLIMERICA COM 0% DE FIBRA NA FIGURA 33(A) COM AUMENTO DE 5.054X E NA FIGURA 33(B) COM 11.001X	70

FIGURA 34 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DA PASTA GEOPOLIMERICA COM 0,5% DE FIBRAS. A FIGURA 34(A) COM AUMENTO DE 1.011X E A FIGURA 34(B) COM AUMENTO DE 2.077X	72
FIGURA 35 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DA PASTA GEOPOLIMERICA COM 1% DE FIBRA COM 7 DIAS. (A) AUMENTO DE 250X (B) AUMENTO DE 500X	74
FIGURA 36 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DA PASTA GEOPOLIMERICA COM 2% DE FIBRA COM 7 DIAS. (A) AUMENTO DE 200X (B) AUMENTO DE 500X	76
FIGURA 37 – MICROGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DA PASTA GEOPOLIMERICA COM 3% DE FIBRA. (A) AUMENTO DE 500X (B) AUMENTO DE 1000X	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SILICATO	37
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICA DO SILICATO DE SÓDIO.....	37
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO KOH.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
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
2.1.1 Estrutura Do Geopolímero E Geopolimerização.....	18
2.1.2 Matérias-Primas Utilizadas Na Produção Do Geopolímero	21
2.2 APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS.....	28
2.3 FIBRAS SINTÉTICAS	30
2.4 CONFORTOTÉRMICO	31
2.4.1 Telha De Fibrocimento	31
2.4.2 Telha De Cerâmica	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	35
3.1.1 Metacaulim.....	35
3.1.2 Escória De Alto Forno	36
3.1.3 Solução Ativadora	36
3.1.4 Fibras De Poliéster	38
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
4.1.1 Técnicas De Caracterização	39
4.1.2 Calcinação Do Caulim Para Obtenção Do Metacaulim	40
4.1.3 Escória De Alto Forno	41
4.1.4 Metodologia Da Obtenção Da Pasta Geopolimérico Com Fibras De Poliéster	42
4.1.5 Síntese Das Matrizes Geopoliméricas	42
4.1.6 Formulação Dos Cps Cilíndricos.....	44
4.1.7 Formulação Dos Cps Ondulados	46
4.2 ENSAIO DESTRUTIVO DE COMPRESSÃO.....	47
4.2.1 Resistência À Compressão Axial	48
4.2.2 Resistência À Tração Na Flexão.....	50
4.3 RESISTÊNCIA A FLEXÃO	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	54
5.1.1 Caulim.....	54
5.1.2 Escória De Alto Forno	60
5.2 PASTAS GEOPOLIMÉRICAS	63
5.2.1 Resistência À Flexão	64
5.2.2 Análises Comparativos De Geopolímero E Cimento Portland.....	66
5.2.3 Resistência À Compressão.....	67

5.3	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS CPS COM VARIAÇÕES DE FIBRA (MEV).....	69
5.3.1	Pasta Geopolimerica Com 0% De Fibra	69
5.3.2	Pasta Geopolimerica Com 0,5 % De Fibra	71
5.3.3	Pasta Geopolimerica Com 1 % De Fibra	73
5.3.4	Pasta Geopolimerica Com 2 % De Fibra	75
5.3.5	Pasta Geopolimerica Com 3 % De Fibra	77
6	CONCLUSÃO.....	80
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A busca por cimentos ecoeficientes tem sido uma prioridade para a indústria global de materiais de construção, visando promover um futuro mais sustentável. Nesse contexto, os cimentos gerados a partir da ativação alcalina de matérias-primas ricas em sílica e alumina se destacam, pois apresentam características que se aproximam das propriedades do cimento Portland.

Estudos recentes propõem uma classificação mais abrangente dos aglutinantes ativados por álcalis, com base na composição química dos precursores e nos tipos de géis formados. Walkley et al. (2022) identificam três categorias principais: a primeira corresponde a sistemas ricos em cálcio, originados de precursores como a escória de alto-forno, que formam géis do tipo C–A–S–H, proporcionando cura acelerada e elevada resistência mecânica; a segunda abrange materiais com baixo teor de cálcio, como metacaulim, cinzas volantes classe F e argilas calcinadas, nos quais predominam géis N–A–S–H, caracterizados por uma estrutura altamente reticulada e excelente estabilidade química (Bernal et al., 2023); por fim, Rovnaník et al. (2024) descrevem os sistemas híbridos ou ternários, compostos por misturas de precursores com teores intermediários de cálcio, como escória combinada com metacaulim ou cinza volante, que resultam na formação conjunta de géis C–A–S–H e N–A–S–H, também denominados (N,C)–A–S–H, os quais aliam resistência mecânica elevada, durabilidade e viabilidade ambiental, tornando-se uma alternativa promissora para a produção de ligantes cimentícios sustentáveis.

A estrutura fundamental dos geopolímeros consiste em unidades tetraédricas de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ conectadas por meio de pontes de oxigênio, formando uma rede tridimensional covalente altamente estável, cuja carga negativa gerada pelos átomos de alumínio tetraédricos é equilibrada por cátions alcalinos (como Na^+ , K^+ ou Ca^{2+}) intercalados na estrutura (MATSIMBE et al., 2022). Esse arranjo estrutural, denominado “sialato” ou “polissialato-siloxo” conforme a razão Si/Al, é o componente amorfo predominante nos geopolímeros, embora se observem fases zeolíticas em algumas formulações (Luha, 2022). Além disso, análises por RMN (^{27}Al e ^{29}Si) confirmam que essas redes tetraédricas se organizam em diferentes ambientes de conectividade ($\text{Q}^n(\text{nAl})$), os quais influenciam diretamente a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas do material (N’Cho et al., 2024)

Nos últimos anos, os geopolímeros têm ganhado destaque tanto no meio acadêmico quanto na indústria da construção civil, devido às suas propriedades superiores. Dentre essas características, destacam-se a elevada resistência térmica, suportando temperaturas entre 1000 e 1200 °C, excelentes propriedades mecânicas, com resistência à compressão acima de 100 MPa e resistência à flexão de até 25 MPa, além de estabilidade dimensional e resistência química contra soluções ácidas (Abdullah et al., 2021; YOST *et al.*, 2020).

Entretanto, apesar de seus benefícios ambientais, a produção de materiais ativados por álcalis depende fortemente de ativadores como hidróxido de sódio e silicato de sódio, o que impacta significativamente os custos e o perfil de emissões. Estudos apontam que os ativadores podem representar até 80% do custo total do material, contribuindo para preços mais elevados em comparação ao cimento Portland convencional (Matsimbe, 2022). Em termos de emissões, a produção de 1 kg de hidróxido de sódio gera entre 0,63 e 1,27 kg de CO₂ equivalente, enquanto o silicato de sódio varia entre 0,43 e 0,99 kg CO₂ equivalente (Nikravan, 2023). Além disso, estudos de análise de ciclo de vida indicam que o uso desses ativadores pode elevar o custo inicial do geopolímero em até 48% e aumentar as emissões de gases de efeito estufa em relação ao cimento Portland convencional. Alternativas mais recentes, como o uso de silicato de sódio obtido a partir de resíduos agrícolas, especialmente cinza de casca de arroz, têm apresentado reduções significativas de custo, entre 50% e 70%, e reduções nas emissões, variando de 60% a 62%, tornando-se uma solução promissora para aumentar a viabilidade econômica dos materiais ativados por álcalis (Umer, 2024).

A incorporação de fibras de poliéster em cimentos geopoliméricos representa uma alternativa viável para o reaproveitamento desse resíduo. Considerando as melhorias que essas fibras podem proporcionar à matriz geopolimérica, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma telha de fibrocimento geopolimérico utilizando metacaulim e fibra sintética. A investigação buscou analisar as propriedades mecânicas e microestruturais do material resultante, fornecendo subsídios para sua possível aplicação em escala industrial.

1.1 Justificativa

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado a busca por materiais alternativos que aliem desempenho técnico, viabilidade econômica e redução dos impactos ambientais. Nesse contexto, os geopolímeros se destacam como materiais cimentícios inovadores, produzidos a partir da ativação alcalina de precursores ricos em sílica e alumina, como o metacaulim e a escória de alto-forno. Além de proporcionarem significativa redução na emissão de CO₂ em comparação ao cimento Portland tradicional, os geopolímeros apresentam boas propriedades mecânicas e resistência a ambientes agressivos.

Outro desafio enfrentado pela sociedade atual é a destinação adequada de resíduos industriais, como as fibras de poliéster, frequentemente descartadas sem o devido reaproveitamento. A incorporação dessas fibras sintéticas em matrizes geopoliméricas representa uma alternativa promissora, pois além de conferir reforço mecânico ao compósito, promove a reutilização de resíduos, contribuindo para a economia circular.

A escolha pela produção de telhas geopoliméricas se justifica por seu amplo uso na construção civil, principalmente em habitações populares, onde a demanda por materiais de baixo custo e alto desempenho é constante. A substituição de materiais convencionais por alternativas mais sustentáveis é urgente, especialmente em regiões onde há abundância de resíduos industriais e disponibilidade de matérias-primas como o caulim.

Dessa forma, este estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver e avaliar tecnicamente telhas geopoliméricas reforçadas com fibras de poliéster, oferecendo uma proposta concreta para o reaproveitamento de resíduos industriais e a diminuição do impacto ambiental causado pelo setor da construção. Além disso, busca-se contribuir para o avanço científico na área de materiais de construção sustentáveis, com potencial aplicação em larga escala no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo produzir telhas de fibrocimento e caracterizar compósitos geopoliméricos de metacaulim ativados com silicato e hidróxido de sódio, reforçados com fibras de poliéster, avaliando suas resistências mecânicas e microestrutural a partir de diferentes percentuais de fibras e com o maior valor comparam as resistências a flexão com o cimento Portland.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Produção de telhas geopoliméricas com diferentes teores de fibra de poliéster (0%, 0,5%, 1%, 2% e 3%), visando analisar o efeito do reforço nas propriedades mecânicas como de flexão e compressão. Serão comparados os resultados obtidos para o compósito sem adição de fibra (0%) e para o teor que apresentar o maior valor de resistência a flexão, ambos em relação a uma amostra equivalente de cimento Portland.
- Avaliação do desempenho mecânico das matrizes (compressão e flexão).
- Análise de microscópio de varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX) do Caulim, metacaulim, escória de alto forno e compósitos geopoliméricos
- Avaliação da microestrutura dos compósitos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geopolímero

Glukhovsky foi o precursor dos estudos sobre materiais cimentícios produzidos por meio de processos alcalinamente ativados, que se baseiam na reação de materiais silicoaluminosos com soluções alcalinas. Esses materiais apresentam vantagens ambientais e técnicas em relação aos cimentos convencionais, pois utilizam resíduos industriais como matérias-primas e reduzem as emissões de CO₂. O autor se inspirou nas formações naturais de rochas sedimentares, que ocorrem em condições de baixa pressão e temperatura. Santos, (2019).

O pesquisador Joseph Davidovits começou, nos anos 70, seus estudos sobre materiais inorgânicos que não pegam fogo, devido a vários incêndios graves na França, que tinham plástico orgânico comum envolvido. Ele examinou alguns pedaços das Pirâmides do Egito e algumas amostras de Jericó, que eram de 7000 a.C., que mostravam pouco desgaste e mudanças químicas, mesmo sendo expostas a ambientes físicos e hostis por muito tempo. A pesquisa mostrou que os concretos eram feitos de calcários caulíníficos com hidróxido de sódio. As análises químicas e mineralógicas dos materiais mostraram que havia material amorfo formado por aluminossilicatos nas microestruturas Davidovits, (2002).

De acordo com estudos recentes, os geopolímeros macroporosos são materiais promissores para aplicações em filtração, catálise e adsorção, graças à sua elevada porosidade, grande área superficial e alta estabilidade térmica. Por exemplo, (Sang *et al.* 2024) desenvolveram um geopolímero poroso à base de escória de aço com porosidade superior a 90 % e capacidade de adsorção de Cu²⁺ de 36,8 mg·g⁻¹, mostrando performance comparável a peneiras moleculares comerciais. Além disso, (Wenkai *et al.* 2025) destacam que esses materiais, quando sintetizados por técnicas físico-químicas de formação de poros, também apresentam potencial para aplicações em isolamento térmico e controle acústico, mantendo estabilidade térmica e resistência mecânica. (Xu *et al.* 2022), em uma revisão abrangente sobre adsorção, confirmam que os geopolímeros porosos exibem grande capacidade de adsorção de corantes, metais pesados e gases, atribuindo isso à sua rede tridimensional de pores bem conectados com alta área superficial.

Por fim, artigos sobre geopolímeros porosos mostram também aplicações promissoras em fotocatalise, com inclusão de TiO_2 e capacidade para decomposição de corantes sob luz UV, aliando propriedades porosas com funcionalização catalítica (Ettahiri, 2024)

De acordo com Pelisser (2022), o material geopolimérico é um tipo de cimento inorgânico que possui propriedades semelhantes aos polímeros, mas é composto por cadeias de átomos de silício, alumínio e oxigênio. Ele é formado por uma reação química entre um material aluminossilicato, como metacaulinita, cinzas volantes ou escórias, e um ativador alcalino, como silicato ou hidróxido de sódio. Essa reação resulta em uma matriz sólida com alta resistência mecânica, durabilidade, baixa porosidade e excelente estabilidade térmica.

2.1.1 Estrutura do geopolímero e geopolimerização

Consoante Preza, (2021) afirma que os geopolímeros são materiais que se assemelham aos polímeros orgânicos, mas que são formados por unidades de silício e alumínio que se conectam por meio dos seus oxigênios, formando uma estrutura tridimensional. Essa estrutura precisa de cátions de carga simples para se manter estável. Os geopolímeros são produzidos pela reação de compostos que contêm silício e alumínio em uma solução aquosa e alcalina, e podem ter uma estrutura que vai desde totalmente amorfa até parcialmente cristalina.

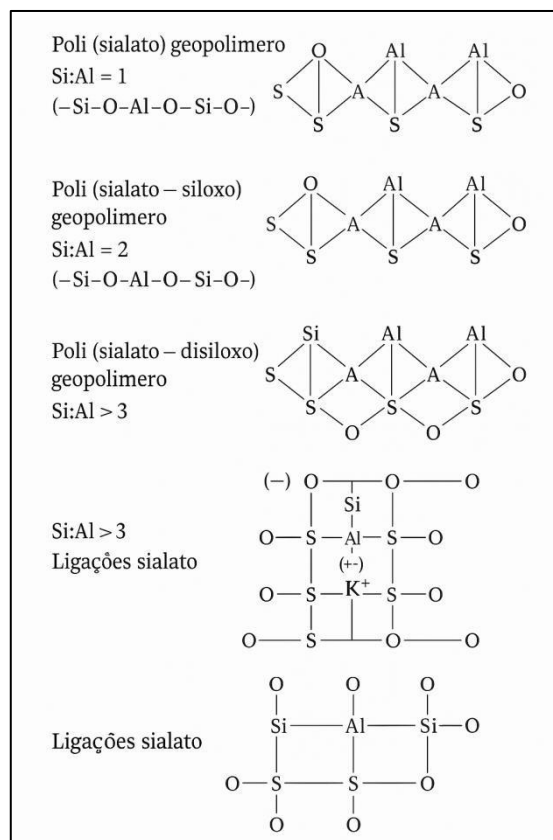
Os poli-sílico-aluminatos (Si-O-Al), também denominados “polissialatos”, consistem em anéis poliméricos formados pela ligação entre átomos de silício (Si^{4+}) e alumínio (Al^{3+}) em estado de valência tetra coordenado com quatro oxigênios. Essa estrutura foi proposta por Davidovits (2002) e caracteriza-se por sua elevada estabilidade e resistência. De acordo com Zhang et al. (2023), a geosíntese refere-se à reação química entre aluminossilicatos naturais e ativadores alcalinos, resultando na formação de uma rede tridimensional de polímeros polissilicatados, cuja estrutura é responsável pelas propriedades mecânicas e químicas dos geopolímeros.

Os silicatos são compostos que apresentam diferentes arranjos de tetraedros de SiO_4 , que são as unidades básicas de sua estrutura. Esses arranjos dependem da razão entre os átomos de silício e alumínio, que podem substituir parcial ou totalmente o silício nos tetraedros. Os arranjos podem ser classificados em seis

grupos: nesossilicatos, sorossilicatos, inossilicatos, filossilicatos, ciclossilicatos e tectossilicatos Souza *et al.*, (2019, p. 15). Conforme revisado por Maged et al. (2023), os geopolímeros são classificados em três tipos principais — poli-sialato (PS), poli-sialato-siloxo (PSS) e poli-sialato-disiloxo (PSDS) — baseados na razão molar Si/Al e na estrutura das ligações entre os tetraedros de SiO_4 e AlO_4 , influenciando diretamente suas propriedades mecânicas e químicas.

Na Figura 1 mostra as estruturas moleculares desses tipos de geopolímeros.

Figura 1 – Esquema estrutural de compostos geopoliméricos.

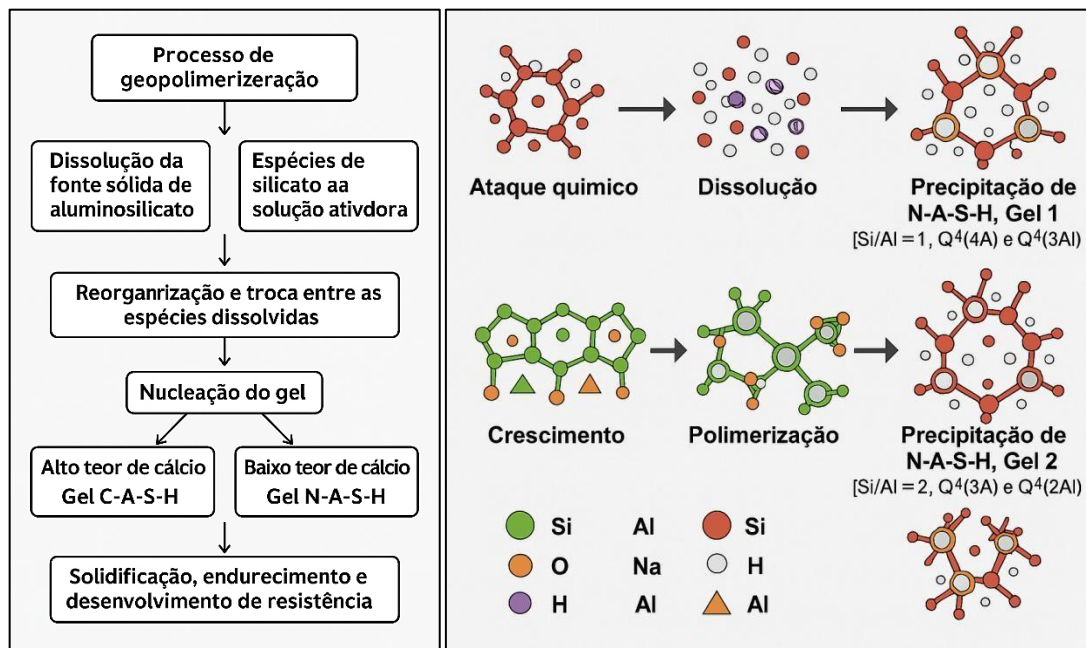


Fonte: Jwaida adaptado, 2023

A geopolimerização é uma reação exotérmica que ocorre entre aluminossilicatos e soluções alcalinas, formando um gel de silico-aluminato que se transforma em uma estrutura tridimensional estável e durável. O metacaulim é um precursor adequado para a síntese de geopolímeros, pois possui alta reatividade e baixa cristalinidade. O mecanismo de reação envolve a hidrólise e a dissolução parcial de alumínio e silício no meio alcalino, seguida pela formação de cadeias poliméricas que se ligam por pontes de oxigênio (Silva, 2019).

Segundo (Paiva *et al.*, 2020), os geopolímeros e as zeólitas são materiais aluminossilicatos que se formam por meio da ativação alcalina de precursores ricos em sílica e alumina, como metacaulim, cinzas volantes e escória de alto-forno. A formação desses materiais envolve três etapas principais: dissolução dos precursores, que libera os íons Si e Al na solução; organização dos íons Si e Al em unidades estruturais poliméricas; e recombinação dessas unidades em uma rede tridimensional. A diferença entre os geopolímeros e as zeólitas está no tempo de reação, que é menor para os primeiros, resultando em uma estrutura amorfa ou semicristalina, e maior para as segundas, resultando em uma estrutura cristalina. Conforme ilustrado na Figura 2, a cinética de formação dos geopolímeros foi proposta por Glukhosky. A matriz apresenta um rápido endurecimento e origina uma estrutura amorfa, que é um dos principais aspectos que diferenciam os geopolímeros da estrutura cristalina das zeólitas.

Figura 2 – Mecanismo de geopolimerização so geopolimeriz dEgeopolimerização.



(a)

(b)

Fonte: Jwaida adaptado, 2023

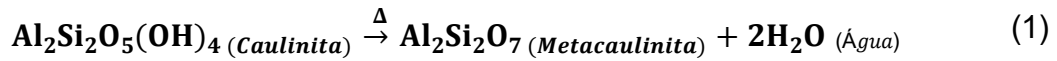
Segundo Kheimi *et al.* (2023), a fabricação de geopolímeros pode utilizar uma ampla variedade de materiais naturais ou resíduos que contenham sílica e alumina na forma amorfa ou semiamorfa como cinzas de casca de arroz, resíduos de bagaço

de cana, escórias, cinzas volantes e resíduos de vidro os quais, após ativação alcalina, liberam alumínio e silício de forma reativa para formar a estrutura polimérica do geopólmero. Assim, os materiais ecológicos são aqueles que utilizam em sua composição recursos naturais e resíduos provenientes de atividades industriais e agrícolas, diminuindo assim o impacto ambiental e os custos de sua produção Silva, (2018, p. 47).

2.1.2 Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero

2.1.2.1 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico composto principalmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa, obtido pela calcinação de argilas caulinitas em temperaturas que variam entre 600 °C e 850 °C, seguida de moagem. Sua elevada reatividade permite que ele reaja com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gerado durante a hidratação do cimento Portland, formando produtos hidratados semelhantes aos produzidos pelo clínquer. Estudos recentes evidenciam os benefícios do uso do metacaulim em matrizes cimentícias, destacando o trabalho de Batista et al. (2021), que observou aumentos significativos na resistência à compressão em concretos com substituição parcial de cimento por metacaulim, especialmente na faixa de 20%, além de redução na absorção de água. Complementarmente, Souza (2025) demonstrou que a combinação de 10% de metacaulim com polímero superabsorvente em microconcretos contribuiu para elevação de até 59,8% na resistência à compressão aos 28 dias e redução da retração autógena. Estudo de Cristiano Quintão (2018), em concreto exposto a biogás também constatou que a adição de metacaulim aumenta a resistência mecânica e melhora a durabilidade, embora com avanço da frente de carbonatação proporcional aos teores utilizados esses resultados reforçam o potencial do metacaulim como aditivo funcional em concretos leves e ambientes agressivos, com benefícios comprovados até pelo menos 2022.



O metacaulim é um produto resultante da ativação térmica de argilas caulinitas e caulins. Esses materiais são compostos por diversos elementos químicos, que podem ser expressos em termos de óxidos, mas que também podem apresentar formas mais complexas e desconhecidas. Entre as principais características do caulim, destacam-se: a coloração branca e o ponto de fusão entre 1650 e 1775°C. Em relação a outras argilas, o caulim possui menor resistência, maior granulometria e uma estrutura cristalina de lamelas hexagonais Brito, (2019).

O metacaulim é uma fonte amplamente utilizada de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) reativas, sendo obtido pela calcinação de caulim em temperaturas entre 600 °C e 800 °C. Por apresentar estrutura amorfa, o metacaulim favorece reações de ativação alcalina, contribuindo para a formação de geopolímeros com boas propriedades mecânicas e estabilidade química. Além de sílica e alumina, pequenas quantidades de impurezas como quartzo, feldspato e óxidos metálicos também podem estar presentes (Viola et al., 2024).

Segundo Costa *et al.*, (2021), o metacaulim é um material que apresenta alta reatividade na formação de geopolímeros, que são materiais inorgânicos com propriedades semelhantes às dos polímeros, mas compostos por cadeias de átomos de silício, alumínio e oxigênio. Os autores utilizaram metacaulim como fonte de aluminossilicato e hidróxido de potássio e silicato de potássio como ativadores alcalinos para produzir geopolímeros com diferentes razões de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$.

2.1.2.2 Ativadores

O processo de geopolimerização envolve a reação de aluminossilicatos ativados termicamente com soluções alcalinas fortes, como as de potássio e sódio, em um ambiente de alta alcalinidade Andrade, (2019). O hidróxido de sódio (NaOH) continua sendo o ativador alcalino mais utilizado na síntese de geopolímeros devido ao seu baixo custo e fácil disponibilidade comercial quando comparado ao hidróxido de potássio (KOH), que é mais caro e menos acessível, especialmente em aplicações em larga escala (Nanthini et al., 2022). No entanto, a resistência à compressão dos geopolímeros depende de vários fatores, como o tipo de ligante, o

ativador e os agregados utilizados. Em seu estudo, ela comparou geopolímeros produzidos com metacaulim e cinza volante, ativados com NaOH e KOH, e com diferentes proporções de areia e brita. Ela concluiu que os geopolímeros com KOH apresentaram uma resistência à compressão superior aos geopolímeros com NaOH, em média 28% maior Pereira, (2018). Isso está relacionado ao do cátion de potássio (K^+) que afeta a organização molecular dos géis de sílica, tornando-os mais desordenados e porosos Valadares e Silva, (2019).

Para a ativação alcalina de geopolímeros, a solução ativadora geralmente consiste em uma mistura de água, silicato de sódio e hidróxido de sódio ou potássio. Alternativamente, podem ser utilizados outros álcalis ou combinações destes metais alcalinos, ajustando-se a concentração para evitar a formação indesejada de zeólitos cristalinos e garantir a síntese adequada do geopolímero (Wang et al., 2023; Zhang & Li, 2022).

De acordo com Brito, (2018), um processo químico chamada ativação alcalina permite transformar estruturas vítreas (que podem ser amorfas, parcialmente amorfas ou metaestáveis) em um material cimentício compactado. Neste estudo Ulloa, (2024) investigou como a concentração do ativador alcalino, especificamente a molaridade da solução de NaOH ou KOH, afeta a dissolução dos aluminossilicatos e, conseqüentemente, a formação de gel geopolymerizado. Os resultados indicam que concentrações mais altas de ativador alcalino promovem uma dissolução mais eficiente dos materiais, resultando em uma estrutura mais densa e maior resistência à compressão.

O equilíbrio das cargas entre os tetraedros de Si^{4+} e Al^{3+} depende da adequada concentração do ativador, pois o grupo AlO_4^- neutraliza os íons Na^+ e/ou K^+ . No entanto, concentrações excessivas do ativador podem levar ao surgimento de álcalis não reativos no poro, migrando para a superfície e reagindo com CO_2 da atmosfera, gerando carbonatos — um fenômeno conhecido como eflorescência (Shariati et al., 2022; Xie et al., 2024).

A presença de K^+ nos géis úmidos não apenas promove a formação de oligômeros, mas também altera a dinâmica de migração dentro da rede do gel, facilitando a movimentação de moléculas. Em contraste, o Na^+ tende a facilitar a migração através da rede, o que pode influenciar a eficiência e a estabilidade do gel em diferentes aplicações, Silva, (2019).

De acordo com Valadares, (2019), a concentração de NaOH influencia na formação e na resistência dos geopolímeros, sendo que valores entre 8-12 mols/l são os mais adequados. Além disso, o uso de peróxido de hidrogênio como agente surfactante permite a obtenção de geopolímeros macroporosos com propriedades térmicas e acústicas melhoradas.

2.1.2.3 Resíduos agrícolas

A indústria da construção civil é responsável por uma grande parcela da degradação ambiental, o que demanda a busca por alternativas mais ecológicas e econômicas. Nesse contexto, diversos resíduos agroindustriais, como a casca de arroz, a madeira e o bagaço de cana, têm sido aproveitados como fontes de biomassa para a produção de adubos orgânicos, biocombustíveis e materiais de construção. Esses resíduos apresentam vantagens como baixo custo, disponibilidade, renovabilidade e redução do impacto ambiental Vaz Júnior, (2020).

2.1.2.3.1 Cinza de casca de arroz (CCA)

A casca de arroz, um resíduo da produção de arroz, pode ser usada como fonte de energia ao ser queimada em um processo de incineração. A cada tonelada de arroz com casca, obtém-se cerca de 200 kg de casca, 90 kg de farelo (em média) e 700 kg de arroz branco. A queima da casca de arroz resulta em um material chamado CCA, que corresponde a 18-20% da massa da casca. A CCA é composta principalmente por sílica amorfa (80-95%), além de pequenas quantidades de outros óxidos metálicos Ant3nio, *et al.*, (2020). Este alto teor de sílica na CCA deriva da membrana sílico-celul3sica que se forma pela polimeriza33o do 3cido monossilc3ico (H_4SiO_4) quando a 3gua evapora da estrutura da planta Apolonio *et al*, (2018).

Na investiga33o do efeito do teor de sílica amorfa na rea33o pozol3nica das CCA, que s3o obtidas pela queima controlada da casca de arroz. O autor destacou as vantagens da CCA como adi33o mineral, tais como: baixo custo, grande disponibilidade, elevada superf3cie espec3fica, alta reatividade e finura Martins, (2022).

De acordo com estudos contempor3neos, a incorpora33o de agregados reciclados de concreto (RCA ou CCA) n3o apenas melhora a durabilidade do concreto, mas tamb3m reduz a absor33o de 3gua e a porosidade, resultando em

uma matriz mais densa e menor consumo de cimento, com significativo benefício ambiental (Dundar *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2024).

2.1.2.3.2 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar continua sendo a base de uma indústria sólida de etanol e açúcar, mas o foco tem se expandido para a valorização de subprodutos. Resíduos como palha, bagaço, vinhaça, torta de filtro, melaço, cinzas e CO₂ são agora reconhecidos como insumos estratégicos em biorrefinarias, sendo aproveitados para produção de bioenergia (biogás, bio-hidrogênio, biometano), biofertilizantes, bioplásticos e energia elétrica. Essas práticas, intensificadas em pesquisas recentes, promovem ganhos de eficiência, reduzem emissões de GEE e fortalecem a economia circular no campo e na indústria (Melo *et al.*, 2024).

Após o processo de extração do suco, é gerado um subproduto sólido conhecido como bagaço. Este material residual possui potencial para ser reprocessado em bagaço hidrolisado, que serve como insumo para ração animal, ou pode ser incinerado em caldeiras para a geração de energia. A combustão do bagaço resulta na produção de cinzas, as quais são compostas majoritariamente por dióxido de silício (SiO₂) e alumina, conforme documentado por Farias, (2019).

2.1.2.4 Resíduos Industriais

De acordo com Wang (2022), a incorporação de cálcio em geopolímeros à base de metacaulim e/ou cinzas volantes promove a formação de gel C-S-H e C-A-S-H, densificando a matriz e elevando significativamente a resistência à compressão, principalmente em condições de cura a temperaturas ambientes ou inferiores. Por exemplo, a adição de Ca(OH)₂ aumentou a resistência compressiva dos geopolímeros curados a 20 °C de 11,8 MPa para 29,2 MPa aos 7 dias, evidenciando a otimização da microestrutura por redução da porosidade.

De acordo com Buruberry (2021), a valorização de resíduos industriais na produção de geopolímeros não apenas contribui para a redução do impacto ambiental associado ao descarte desses materiais, mas também possibilita a criação de composições com propriedades mecânicas e durabilidade que podem ser comparáveis ou até superiores às do cimento Portland tradicional. A pesquisa

destaca que a utilização de materiais como cinzas de biomassa e resíduos de alumínio pode ser otimizada para melhorar a reatividade e as características finais dos geopolímeros, promovendo assim uma alternativa sustentável e inovadora para a construção civil.

relatam que a combinação de cinzas volantes (fly ash) e escória de alto forno (slag) leva a geopolímeros com excelente performance mecânica: a cada acréscimo de 10% de GGBFS, há um aumento de cerca de 10 MPa na resistência à compressão em 28 dias. Além disso, a presença de cálcio estimula a formação de gel C–A–S–H, densificando a matriz — um resultado comparável ou superior ao cimento Portland convencional (Amer *et al.*, 2024)

2.1.2.4.1 Escória de Aciaria

A escória de aciaria, um resíduo sólido gerado em grandes quantidades durante a produção de aço, vem despertando crescente interesse em relação ao seu reaproveitamento e destinação adequada. Estudos têm demonstrado o potencial desse material para diversas aplicações sustentáveis, como agregado em concretos e pavimentação, material cimentício suplementar e adição ao clínquer, dependendo de suas características físicas, químicas e mineralógicas. A utilização da escória de aciaria alinha-se com práticas de economia circular, contribuindo para a redução da disposição em aterros e a diminuição do impacto ambiental da indústria siderúrgica Oliveira *et al.*, (2018).

Nas usinas integradas, que envolvem as fases de redução, refino e laminação, forma-se a escória de aciaria do convertedor LD. Há três processos principais, que se distinguem pelos tipos de fornos de refino usados: o Siemens-Martin (OH), o convertedor (LD ou BOF) no processo integrado e o forno elétrico a arco (EAF) nas usinas semi-integradas Araújo, (2018).

Para preparar, formar e obter as propriedades dos geopolímeros que utilizam resíduos industriais, é essencial considerar a composição química e física da escória, a natureza e concentração dos ativadores alcalinos (como NaOH e Na_2SiO_3), o tipo de ativador (sólido ou líquido), as condições de cura (temperatura e tempo), além da inclusão de aditivos como metacaulim ou resíduos com teor de CaO, que juntos afetam a reatividade, estrutura do gel e propriedades finais do material” (Kolade *et al.*, 2025; Gökçe *et al.*, 2024; Skane *et al.*, 2025)

2.1.2.4.2 Escória de Alto Forno

A escória de alto-forno, um subproduto gerado na produção de ferro gusa em altos-fornos, tem sido amplamente estudada pelo seu potencial como material cimentício na construção civil. Sua utilização como adição mineral ao cimento Portland contribui para a redução do consumo de clínquer e, conseqüentemente, das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento. Além disso, a escória pode ser ativada alcalinamente para a produção de geopolímeros, ampliando suas aplicações em materiais sustentáveis de alta performance. O ferro gusa é obtido pela redução dos óxidos de ferro presentes nos minérios, utilizando coque ou carvão vegetal, juntamente com fundentes que facilitam a fusão e purificação do metal no alto-forno. A escória resultante, composta principalmente por impurezas e fundentes, é separada do ferro pela diferença de densidade e submetida ao resfriamento controlado para obtenção de propriedades adequadas. Essa escória representa uma matéria-prima importante para a fabricação de aço e para o desenvolvimento de materiais cimentícios de baixo impacto ambiental (Silva et al., 2023; Zhang & Li, 2022).

formando um cimento alternativo com propriedades similares ou superiores ao cimento Portland. A ativação alcalina da escória de alto-forno depende de vários fatores, como a composição química da escória, o tipo e a concentração do ativador, a relação água/sólidos, a temperatura e o tempo de cura Arcanjo, (2019).

A escória de alto forno é um material resultante da fusão do minério de ferro e do gotejamento do ferro gusa líquido no interior dos fornos. Ela possui propriedades aglomerantes hidráulicas quando resfriada rapidamente e moída, podendo ser utilizada como substituto parcial do cimento Portland em concretos e argamassas Farias *et al.*, (2023).

O uso de escória de alto forno no concreto endurecido pode trazer benefícios para a resistência à compressão, desde que sejam observados os cuidados necessários com o tipo de cimento e o método de cura. No entanto, a escória também pode comprometer a resistência do concreto se for adicionada de forma inadequada. Por isso, é importante que o concreto com escória de alto forno seja submetido a uma cura em temperatura próxima de 23°C, para que possa ter um desempenho similar ao do concreto convencional, Gomes *et al.* (2020).

2.1.2.4.3 Cinza Volante

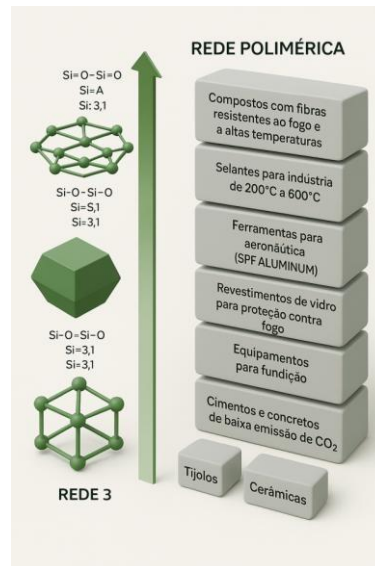
Os materiais geopoliméricos são uma classe de materiais inorgânicos que podem ser obtidos a partir da ativação alcalina de fontes ricas em sílica e alumina, como a cinza volante, um resíduo da queima de carvão mineral em usinas termelétricas. Esses materiais apresentam vantagens ambientais e técnicas em relação aos cimentos convencionais, como menor emissão de CO₂, maior resistência mecânica e durabilidade Santos *et al.*, (2019).

2.2 Aplicações dos geopolímeros

Os geopolímeros foram inicialmente concebidos como alternativas aos polímeros termofixos em aplicações que exigem resistência ao fogo. Com o tempo, consolidaram-se como materiais promissores na construção civil, sobretudo pela capacidade de substituir o concreto à base de cimento Portland. Entre suas principais vantagens, destacam-se as excelentes propriedades mecânicas, elevada durabilidade e notável aderência ao aço e ao concreto tradicional (Salahuddin *et al.*, 2015; Rocha *et al.*, 2018).

Como na Figura 3, podemos visualizar diversos métodos de aplicação para geopolímero devido as subdivisões em a molaridade e suas dosagens. Estudos recentes reforçam a viabilidade do concreto geopolimérico como um material de construção sustentável, enfatizando sua capacidade de incorporar subprodutos industriais e melhorar a eficiência energética e a redução da pegada de carbono, ao mesmo tempo em que mantém ou até melhora as propriedades mecânicas e de durabilidade do material (Parathi *et al.*, 2020)

Figura 3 – Aplicação do geopolímero de acordo com sua razão Si/Al.



Fonte: Adaptado de Davidovits, 1999.

Os geopolímeros vêm ganhando destaque como alternativas tecnológicas e sustentáveis aos materiais cimentícios tradicionais, sobretudo devido ao seu menor impacto ambiental, elevada durabilidade e capacidade de incorporar resíduos industriais em sua formulação. Isso se deve à ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina, como metacaulim, escória de alto-forno e caulim calcinado, que permite a produção de compósitos com excelente desempenho mecânico e estabilidade química. Dessa forma, essa versatilidade torna os geopolímeros aplicáveis em concretos, argamassas, blocos estruturais e elementos expostos a ambientes agressivos, reforçando seu potencial na construção civil (Provis, 2023).

Nesse contexto, diversos estudos têm contribuído significativamente para o avanço do conhecimento sobre esse tipo de material, especialmente no que diz respeito ao aproveitamento de precursores alternativos e resíduos regionais. Por exemplo, Santana (2022) e Almeida (2022) destacam a eficiência da combinação entre metacaulim e escória de alto-forno na formação de matrizes geopoliméricas densas e com boa resistência mecânica. Eles indicam que a escolha e proporção adequada dos precursores influenciam diretamente a formação dos produtos de reação e a microestrutura final, elementos fundamentais para garantir a durabilidade e a aplicabilidade do compósito.

Além disso, Lucas (2021) reforça a importância da caracterização morfológica desses materiais, evidenciando que a escória de alto-forno, mesmo quando utilizada

como único precursor, é capaz de gerar fases gelificadas bem distribuídas, baixa porosidade e boa coesão na matriz. Essa abordagem ajuda a consolidar o uso da escória como um insumo tecnicamente viável e abundante, especialmente em regiões industriais, o que contribui para a sustentabilidade e economia local.

Ademais, no contexto da valorização de resíduos e desenvolvimento regional, Porto (2019) demonstra que o reaproveitamento de resíduos de caulim da região amazônica, em conjunto com escória, pode resultar em argamassas geopoliméricas com propriedades satisfatórias para uso em revestimentos e assentamentos. Isso mostra claramente como o geopólímero se adapta a diferentes realidades e materiais disponíveis, mantendo um desempenho técnico adequado enquanto promove benefícios ambientais e econômicos.

2.3 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas são produzidas a partir de compostos macromoleculares, sendo caracterizadas por sua elevada resistência mecânica, leveza e durabilidade. A utilização dessas fibras em compósitos cimentícios foi proposta pela primeira vez em 1965, marcando o início de uma linha de pesquisa voltada à melhoria do desempenho do concreto por meio da incorporação de materiais poliméricos. Desde então, seu uso tem se expandido consideravelmente, principalmente devido às vantagens técnicas e econômicas que oferecem, como o baixo custo, resistência à corrosão e facilidade de manuseio Wongsa, (2020).

Nos últimos anos, as fibras sintéticas têm ganhado destaque no reforço de concretos, substituindo de forma eficiente fibras metálicas e inorgânicas em diversas aplicações da engenharia civil. Sua incorporação em matrizes cimentícias tem se mostrado eficaz na contenção da propagação de fissuras, promovendo aumento da tenacidade, ductilidade e durabilidade do material. Aplicações práticas incluem obras de infraestrutura como rodovias, pontes e sistemas subterrâneos, nas quais o desempenho estrutural e a durabilidade são essenciais, Al-majidi, (2019).

As fibras de poliéster (PF) continuam mostrando grande potencial como reforço em compósitos de cimento Portland. Ensaio recentes indicam que adicionando 0,2–0,3 % de fibras de poliéster, observa-se redução significativa na absorção de água (até ~20 %), contribuindo para maior durabilidade e controle de microfissuras (Christopher et al., 2023). Além disso, revisões de 2025 ressaltam que, embora essas fibras não aumentem a resistência à primeira fissura, melhoram

consideravelmente a ductilidade pós-fissuração e a capacidade de deformação, especialmente em médias de 2 kg/m^3 , estabilizando tensões residuais após o pico de flexão (Neto et al., 2023).

Para que os compósitos cimentícios possam alcançar um desempenho superior em termos de resistência e rigidez, é fundamental que as fibras utilizadas como reforço tenham um módulo de elasticidade mais alto do que o da matriz cimentícia, que geralmente oscila entre 15 e 40 GPa, Neto,(2018).

2.4 Confortotérmico

Niza e Broday (2021) discutem que o conforto térmico é um reflexo do contentamento das pessoas com o clima de seu ambiente imediato. A insatisfação é frequentemente resultado de uma sensação de desconforto devido a temperaturas extremas, seja calor ou frio. Eles enfatizam a relevância de considerar o conforto térmico no projeto de sistemas de climatização, visando não apenas o bem-estar humano, mas também a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

Segundo Gimin et al. (2023), o equilíbrio entre a produção térmica interna e as trocas térmicas com o ambiente mediado por condução, convecção e radiação é vital para a homeostase, com o hipotálamo coordenando respostas como vasorregulação, sudorese e tremores. Conforme Aminoff et al. (2022) complementam, destacando que a perfusão sanguínea superficial e a sudorese, além das respostas musculares, são fundamentais para manter a temperatura corporal estável entre $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $37,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.4.1 Telha de fibrocimento

Em estudos recentes sobre habitações de interesse social no Brasil, Geraldi et al. (2024) destacam que, embora as telhas onduladas de fibrocimento sejam opções econômicas, composições leves de cobertura (como fibrocimento combinado a forro com isolamento) oferecem desempenho térmico superior e custos competitivos. A autoconstrução continua prevalente entre famílias de baixa renda, sendo identificada como estratégia essencial para reduzir custos e promover autonomia na edificação das próprias moradias.

Certamente. A normativa NBR 15210-1:2023 especifica que as telhas produzidas sem a inclusão de amianto, utilizando fibrocimento, são elaboradas a partir de uma composição que inclui cimento Portland, aditivos selecionados e

agregados, sendo reforçadas com fibras sintéticas. A norma brasileira que regula a substituição do amianto por fibras artificiais em produtos de fibrocimento é relativamente nova, datando de 2005, e é conhecida como NBR 15210-1, emitida pela ABNT, e refere-se especificamente ao “cimento reforçado com fibras sintéticas”.

Com base em estudos recentes, pode-se afirmar que a reciclagem de plásticos, como o polipropileno, tem se mostrado uma prática sustentável com potencial para aplicação na fabricação de produtos de fibrocimento. Pesquisas indicam que processos como a pirólise podem ser eficazes na transformação de resíduos plásticos em novos materiais, contribuindo para a economia circular e reduzindo o impacto ambiental Torres, (2021).

2.4.2 Telha de Cerâmica

Estudo relevante é o de que caracterizou argilas provenientes da indústria de cerâmica vermelha do município do Crato, Ceará. O estudo conclui que as argilas desenvolvidas possuem potencial para produção de aplicações industriais como telhas, tijolos e blocos cerâmicos devido à sua composição química e mineralógica, contendo principalmente caulinita, montmorilonita e quartzo, Lima e Silva, (2021),

Dessa forma as telhas cerâmicas desempenham um papel fundamental na proteção da estrutura de uma edificação, atuando como uma barreira eficaz contra os elementos naturais. Além de resguardar a construção da água da chuva, elas também exercem a função crucial de direcionar o escoamento pluvial, evitando acúmulos indesejados. Sua natureza modular permite a adaptação a diferentes áreas de cobertura, possibilitando a criação de soluções arquitetônicas personalizadas que atendem às necessidades específicas de cada projeto. Com uma ampla variedade de modelos disponíveis no mercado, as telhas cerâmicas são flexíveis para atender aos requisitos estéticos e específicos da construção Almeida, (2020).

De acordo com a NBR 15210-1:2023, as telhas cerâmicas devem atender a diversos requisitos de fabricação, identificação, características visuais, sonoridade, dimensões, retilineidade e planaridade, a fim de garantir a qualidade e o desempenho adequado no telhado. especifica que as telhas cerâmicas devem apresentar características dimensionais, físicas e mecânicas dentro dos limites estabelecidos, para que possam ser corretamente instaladas e proporcionar um desempenho dominado no telhado.

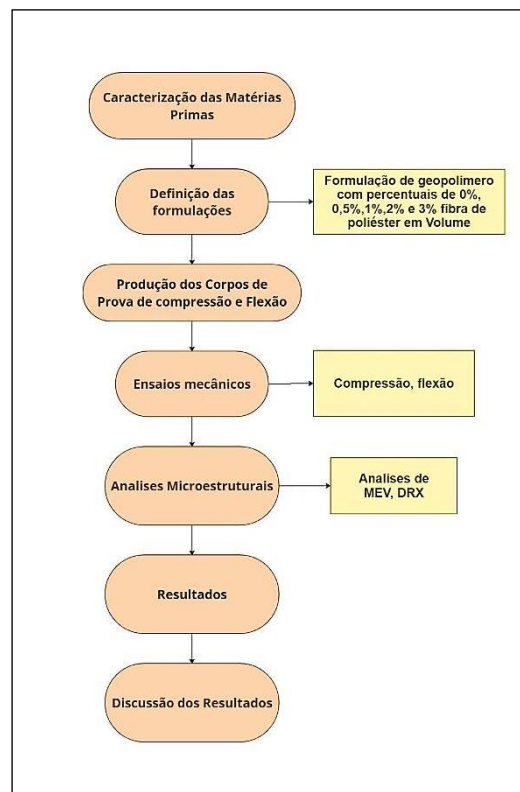
Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo contribuir para o avanço acadêmico ao desenvolver e avaliar telhas produzidas com geopolímero à base de metacaulim, fabricadas com dimensões equivalentes às das telhas de fibrocimento convencionais. A metodologia envolve a preparação de misturas geopoliméricas contendo diferentes percentuais de fibras sintéticas, visando aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do material. As telhas serão moldadas por gravidade e cura controlada, seguidas de ensaios de resistência à flexão, compressão e análise microestrutural para caracterizar o desempenho do compósito.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nas estruturas experimentais foram definidas as etapas que são chave para a análise do devido estudo, com a metodologia experimental que vai mostrar de maneira clara a formulação das pastas junto as fibras de poliéster e procedimento de incorporação da fibra até a sua saturação na pasta geopolimérica.

Os procedimentos para caracterização, mistura e moldagem, assim como para a ensaios destrutivos de ruptura dos corpos-de-prova, que seguiu conforme as normas técnicas para cada método. As etapas e sequência de desenvolvimento do trabalho estão resumidas na Figura 4. Os preparos dos métodos experimentais e os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua), e a caracterização das matérias-primas no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal do Pará – IFPA, Belém.

Figura 4 – Etapas e sequência de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor, (2025).

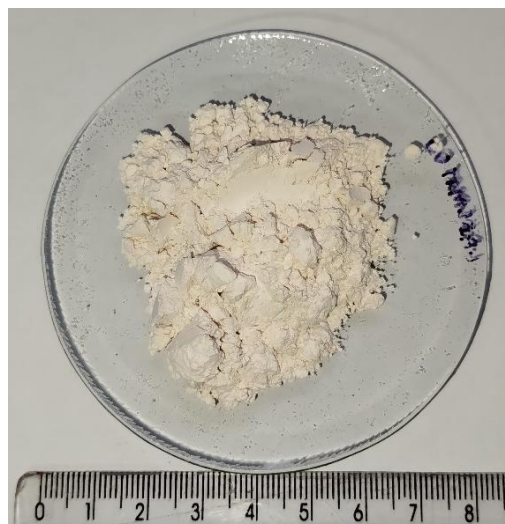
3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Metacaulim

A matéria-prima selecionada comercialmente proveniente do interior do estado do Pará como base para formulação das pastas foi o metacaulim rico em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) visto na Figura 5, com teores típicos de aproximadamente 51% de SiO_2 e 38% de Al_2O_3 que se torna um precursor ideal para a formação de redes tridimensionais de aluminossilicatos durante a geopolimerização, segundo Aguilar *et al* (2019).

Devido o processo de calcinação do subproduto da mineração do caulim promove transformações físico-químicas e elimina substâncias voláteis contido no material, formando assim uma desestabilização química pela mudança de coordenação de alumínio VI para IV. Com a análise mineralógicas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) através de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS),

Figura 5 – Metacaulim.



Fonte: Autor, (2025).

3.1.2 Escória de Alto Forno

O resíduo sólido para a devida pesquisa foi a escória de alto forno básica na Figura 6, oriundo de processos metalúrgicos no Norte Brasil, situada no distrito Industrial, Marabá – PA. Com adição de escória na formulação ocasiona-se a formação de gel na mistura, facilitando assim o processamento que se transforma em uma rede tridimensional ao longo do tempo, essencial para as propriedades mecânicas do geopolímero, devido a fonte de cálcio presente. A escória de alto-forno é composta principalmente por óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), cálcio (CaO) e ferro (Fe_2O_3). As proporções desses componentes podem variar dependendo do minério utilizado e das condições do processo de fusão. Essa composição a torna um material pozolânico, capaz de reagir quimicamente com soluções alcalinas.

Figura 6 – Escória de alto-forno



Fonte: Autor, (2025).

3.1.3 Solução Ativadora

Uma fonte de silicato frequentemente adicionada como complemento às soluções alcalinas, não só fornece silício adicional, mas também melhora a reatividade, a concentração da solução alcalina e a relação entre os componentes como $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, são fatores críticos que influenciam as propriedades finais do

material a resistência mecânica do geopolímero. A Tabela 1 e 2 apresenta as características físicas, que foram disponibilizados pelo fornecedor.

Tabela 1 – Características físicas do silicato.

ESTADO FÍSICO	LÍQUIDO
Voláteis	0%
Solubilidade em água	Total
PH	12,51
Massa específica	26 g/cm ³
Cor	Transparente
Aparência	Viscoso

Fonte: Poll, 2025.

Tabela 2 – Características química do silicato de sódio.

ÓXIDOS	PORCENTAGEM
SiO ₂	33,15
Na ₂ O	14,81
H ₂ O	52,04

Fonte: Poll, 2024

Hidróxido de Sódio (KOH) comercial serve como o principal ativador alcalino (básico) mostrando na Tabela 3. O KOH dissocia-se em íons K⁺ e OH⁻, aumentando a alcalinidade da solução e promovendo a dissolução de aluminossilicatos, segundo Lima, (2018). As informações sobre as características físicas estão disponíveis na Tabela 3. O íon hidroxila (OH⁻) é crucial para a quebra das ligações Si-O-Al nos materiais de partida, facilitando a liberação de íons silício e alumínio. A escolha foi fundamentada na sua capacidade de promover uma interação mais eficaz na formação de sílica reativa.

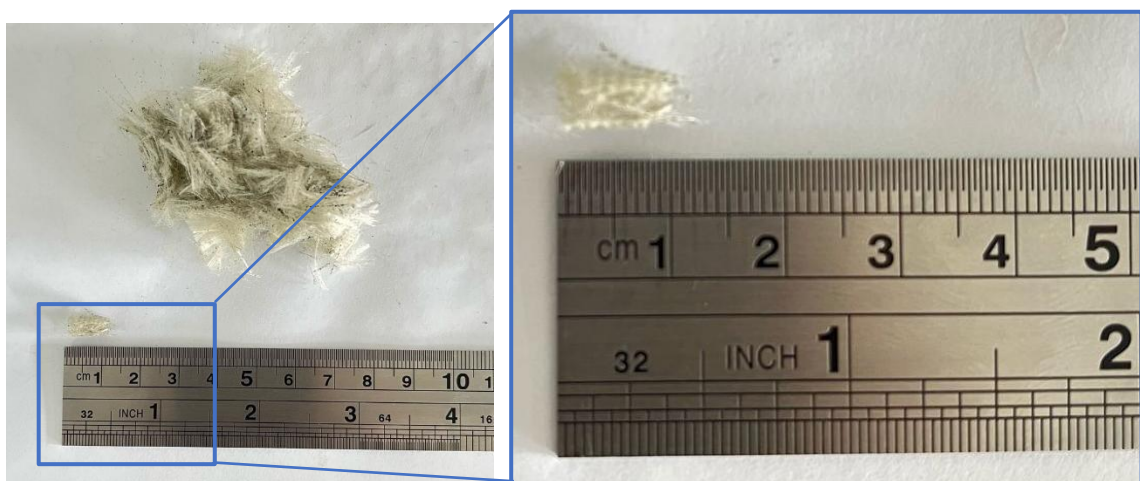
Tabela 3 – Características físicas do KOH

Estado físico	Sol. Hidroscópico
Aparência	Lentilhas
Cor	Branças
Massa específica	2,04 g/cm ³
pH	14
Solubilidade em água	Total

Fonte: Êxodo.

3.1.4 Fibras de poliéster

A fibra de poliéster utilizada neste estudo é proveniente de um resíduo industrial gerado durante o processo de fabricação de fios, que são utilizados na produção de tecidos para reforço na construção de pneus. As fibras estavam dispostas em feixes longos e foram cortadas manualmente com uma tesoura, resultando em um comprimento médio de $(0,5 \pm 1)$ cm. O material foi disponibilizado por uma unidade da multinacional de fabricação de pneus, localizada em Belém, no Pará. A Figura 7 apresenta uma imagem das fibras de poliéster empregadas na pesquisa.

Figura 7 – Fibra de poliéster proveniente da Michelin pneus

Fonte: Autor, (2025).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1.1 Técnicas de Caracterização

4.1.1.1 Difractometria de Raios-X

A técnica de Difractometria de Raios-X (DRX) foi utilizada para caracterizar as fases cristalinas presentes nas amostras de caulim, metacaulim e escória de alto-forno. A análise foi realizada em Marabá-PA, utilizando um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, equipado com um tubo metálico de cobre. O experimento foi conduzido com um ângulo de varredura de 10° a 120° e um passo de $0,02 \text{ s}^{-1}$, garantindo uma resolução adequada para a identificação das fases minerais.

O caulim, uma argila rica em caulinita, pode apresentar transições estruturais após calcinação, resultando na formação de metacaulim, um material amorfo com potencial para reações pozolânicas. Já a escória de alto-forno, um resíduo da siderurgia, contém fases vítreas e cristalinas que influenciam suas propriedades cimentícias.

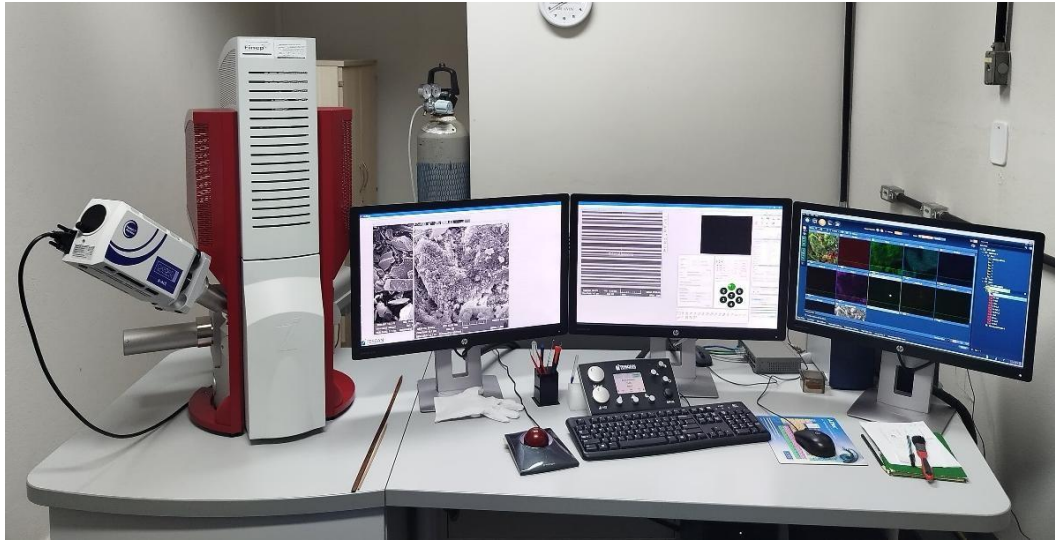
Os difratogramas obtidos foram processados com o software X'pert High Score Plus, da Panalytical, permitindo a identificação precisa das fases minerais presentes em cada material. Essa análise é essencial para compreender a reatividade dos materiais e suas possíveis aplicações em compósitos cimentícios e geopoliméricos

4.1.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os fragmentos retirados destinado do ensaio de compressão foram coletados e preparados para a análise no MEV, para ter a devida visualização da sua superfície e com o objetivo de visualizar matérias não reagido, fraturas, aderência entre a matriz e o reforço para o devido estudo.

As imagens foram obtidas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, utilizando-se um microscópio eletrônico Tescan Mira3, com canhão de elétrons tipo FEG, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 – Microscópio eletrônico de varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi



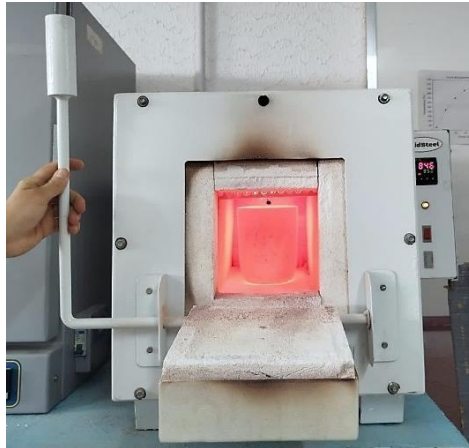
Fonte: Autor, (2025)

Com muita cautela as amostras foram montadas em suportes de alumínio com 12 mm de diâmetro, através de fita adesiva dupla face de carbono. Em seguida, a fim de se tornarem condutivas, foram metalizadas com Au por 2' 30", o que deposita sobre a amostra uma película com espessura média de 10 a 15 nm. As imagens foram geradas por detecção de elétrons secundários (SE), utilizando-se aceleração de voltagem de 5 kV e distâncias de trabalho entre 10 e 15 mm.

4.1.2 Calcinação do caulim para obtenção do metacaulim

Em decorrer das etapas da pesquisa foi realizado o método de calcinação que tem como objetivo de eliminar impurezas vinda da matéria prima inicial que foi definido com tempo de 2 horas com uma temperatura de 850°C no forno SOLIDSTEEL com a capacidade térmica de 1200 °C ilustrado na Figura 9. Esses parâmetros foram escolhidos devido à sua eficácia na ativação do metacaulim, promovendo a desidratação e a transformação do caulim em metacaulim reativo. A escolha desses valores foi fundamentada em experimentos anteriores que demonstraram que essa combinação otimiza as propriedades físicas e químicas do material, resultando em um produto final com características desejáveis para aplicações em materiais de construção, segundo Botelho (2024).

Figura 9 – Forno utilizado para calcinação.



Fonte: Autor, (2025).

4.1.3 Escória de Alto Forno

O processo de obtenção de finos de escória para a formulação, decorre de uma series de etapas como secagem do material com o auxílio de uma estufa (marca QUIMIS), com um tempo de 24 horas e com uma taxa de aquecimento de 100°C, passando assim para a moagem no moinho de bolas de marca MARCONI que mostra na Figura 10, no laboratório de Práticas Tecnológicas da Faculdade de Engenharia de Materiais - UFPA (Campus de Ananindeua). Para o tal processo de moagem, conduzir-se as orientações: foi posto 1/3 de EAF no moinho de com duração de 3 (três) horas e posteriormente foi peneirado em peneirador da marca ROTAP, utilizando o passante na peneira de #200 mesh (abertura de 75 µm) segundo o estudo de Farias (2023).

Figura 10 – Moinho de bolas.



Fonte: Autor, (2025).

4.1.4 Metodologia da obtenção da pasta geopolimérica com fibras de poliéster

No processo de mistura, buscamos a homogeneização da pasta geopolimérica com as fibras previamente selecionadas, a fim de garantir uma junção ideal entre a matriz e o reforço. Para isso, realizamos testes de formulação variando as porcentagens de fibras em 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3% durante a mistura da pasta. O objetivo dessas variações é alcançar uma mistura de qualidade que proporcione uma resistência mecânica ideal conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Procedimento de mistura para preparação da pasta geopolimérica.



Fonte: Autor, (2025).

4.1.5 Síntese das matrizes geopoliméricas

As soluções de hidróxido de sódio foram preparadas pesando as quantidades de escamas em um Becker de vidro Figura 12, adicionando a seguir o volume de água, requerida para obter as duas concentrações preparadas. As escamas foram completamente dissolvidas mediante a homogeneização manual, mediante o uso de

um bastão de vidro. As soluções foram homogeneizadas até a total dissolução das escamas e foram colocadas em repouso, para esfriar até atingir a temperatura da sala ($\sim 25^{\circ}\text{C}$).

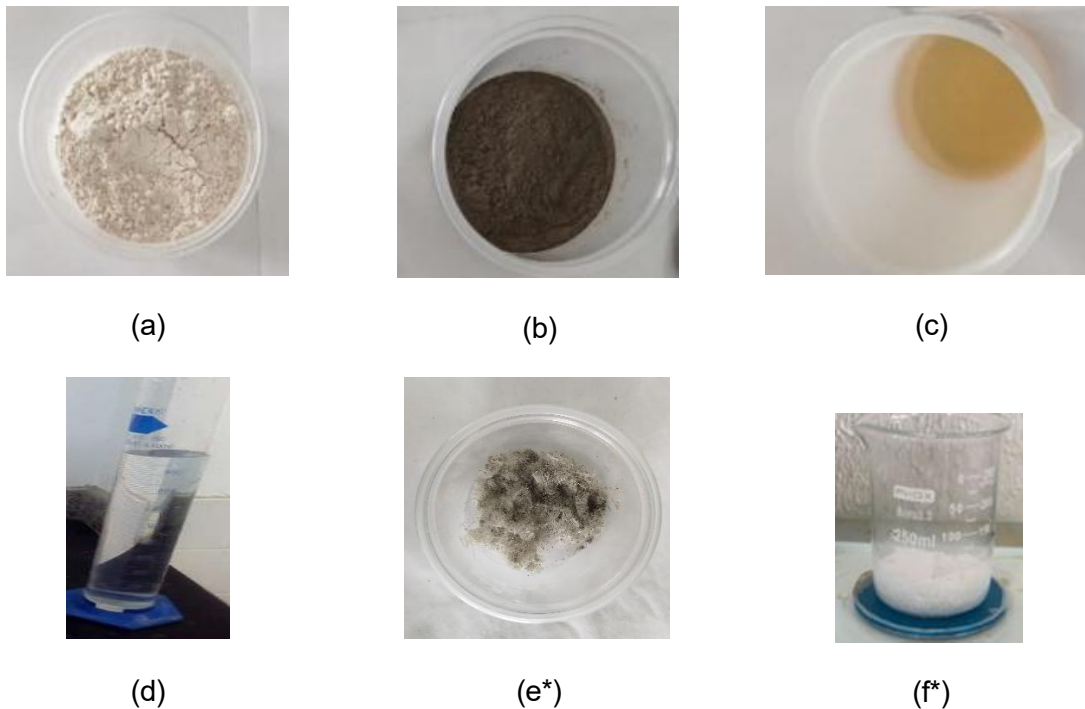
As quantidades utilizadas para cada material foram medidas em massa, de acordo com a formulação definida na Figura 11. Foi utilizada uma balança BEL equipamentos Ltda., com precisão de 0,1 gramas Figura 12. A solução ativadora foi preparada colocando em um Becker de vidro, previamente tarado na balança, o silicato de sódio, logo após a quantidade de água, e finalmente a solução de NaOH (dado que a reação é exotérmica o NaOH foi adicionado ao final, para evitar que o aumento da temperatura provocasse alterações na massa da solução). A solução ativadora foi homogeneizada usando um bastão de vidro e foi colocada para esfriar nas condições descritas para a soluções de NaOH. Homogeneizou-se novamente, prévio à realização das misturas.

Figura 12 – Preparação da solução de NaOH



Fonte: Autor, (2025).

Figura 13 – Matérias-primas utilizadas na produção do geopolímero: (a) metacaulim, (b) EAF, (c) Silicato de sódio, (d) água, (e) fibra de poliéster e Hidróxido de Sódio (f).



Fonte: Autor, (2025).

As misturas iniciais foram realizadas em um misturador de industrial colocando a solução ativadora, numa forma de silicone, com capacidade de aproximadamente 2L. Seguidamente foi gradualmente adicionado o metacaulim junto com a escória de alto forno, sem deixar de misturar com uma espátula de plástico com movimentos circulares, até obter uma mistura homogênea, num tempo total de mistura de 5 minutos.

4.1.6 Formulação dos CPs cilíndricos

A mistura foi colocada em moldes metálicos cilíndricos de diâmetro 2,5mmx5mm de altura de acordo na Figura 14. Para cada mistura moldaram-se 5 corpos de prova previsto na Figura 15. Os moldes foram colocados durante 7 dias em repouso numa temperatura ambiente de ($\sim 25^{\circ}\text{C}$). Após completar o período de cura, os corpos foram medidos, e faceados para garantir o paralelismo entre as faces do corpo de prova, e que a carga fosse aplicada de maneira perpendicular às faces.

Figura 14 – Disposição dos moldes de ($\varnothing 2,5 \times 5$) cm.



Fonte: Autor, (2025).

Figura 15 – Disposição dos moldes com pasta geopolimérica.



Fonte: Autor, (2025).

Para preparar o compósito, os materiais sólidos foram pesados e homogeneizados manualmente em um recipiente de plástico. Depois, foram transferidos para um misturador HOBART de 3L e misturados em velocidade lenta por 2 minutos. Sem interromper a mistura, a solução ativadora foi adicionada lentamente por 1 minuto. Em seguida, o misturador foi pausado por 1 minuto para remover material aderido às bordas e fundo do recipiente com uma espátula de plástico. Após essa etapa, a velocidade do misturador foi aumentada para rápida, e as fibras foram incorporadas gradativamente e de maneira uniforme por 3 minutos. A mistura continuou nessa velocidade por mais 3 minutos, totalizando 9 minutos para a produção do compósito no misturador segundo a Figura 16,

Figura 16 – Adição das fibras de poliéster no geopolímero e aparência física dos compósitos



Fonte: Autor, (2025).

4.1.7 Formulação dos CPs ondulados

A mistura foi colocada em molde de polipropileno de fibrocimento na proporção 1:10, com dimensões de 11 cm x 24 cm x 6 cm de espessura. Para cada mistura moldaram-se 3 corpos de prova segundo a Figura 17 os quais foram preenchidos em duas camadas, vibrando cada uma durante 60 min nos compósitos. Os moldes foram colocados durante 7 dias em repouso numa temperatura ambiente de ($\sim 25^{\circ}\text{C}$). Após completar o período de cura, os corpos foram medidos, previamente marcados com distanciamento de 21,6 cm de acordo com os pontos de apoio e seguida marcando a metade do valor que foi de 10,8 cm para centralizar a força que será submetido ao ensaio de flexão na Figura 18.

Figura 17 – Moldes previamente moldados com geopolímero mais a adição de fibra de poliéster



Fonte: Autor, (2025).

Figura 18 – Marcações para o devido posicionamento do corpo de prova



Fonte: Autor, (2025).

4.2 Ensaio destrutivo de compressão.

Os ensaios mecânicos de compressão e tração na flexão foram realizados nos CP's com idade de 7 dias. Os ensaios para determinação da resistência à compressão axial seguiram as diretrizes da NBR 5739 (2018).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Práticas Tecnológicas da UFPA campus Ananindeua, em Prensa Hidráulica Elétrica, de marca Contenco com capacidade 100 tf, com duas calibrações. O equipamento é disponibilizado em dois módulos funcionais: Estrutura de Ensaio e Gabinete de Comando, como mostra na Figura 19.

Figura 19 – Prensa Hidráulica Elétrica. Contenco

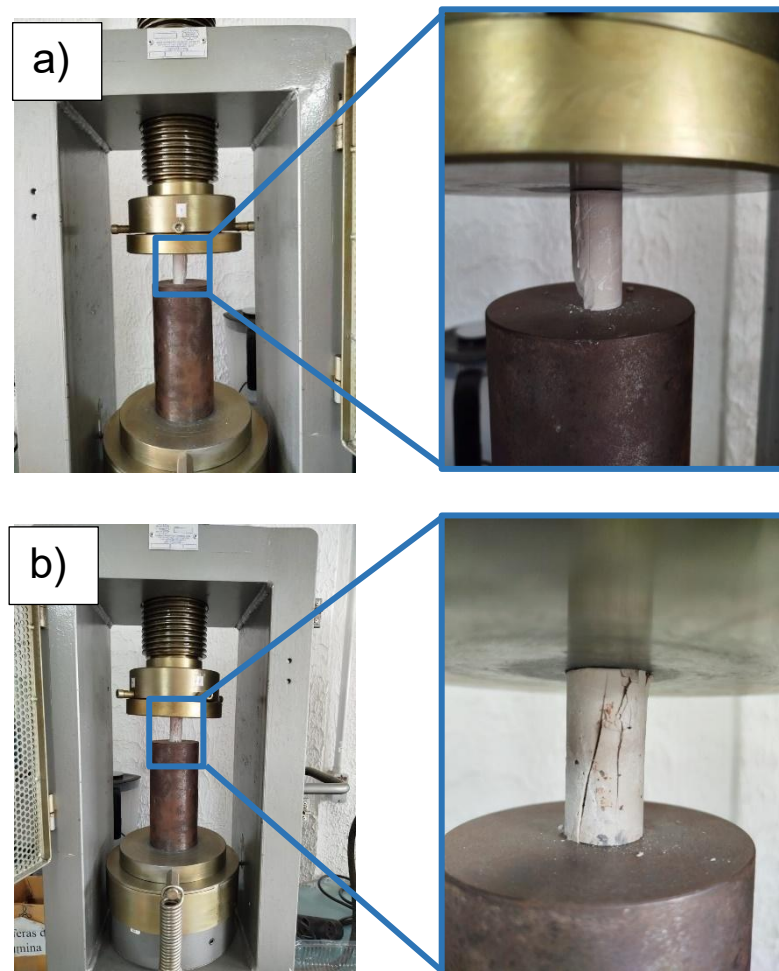


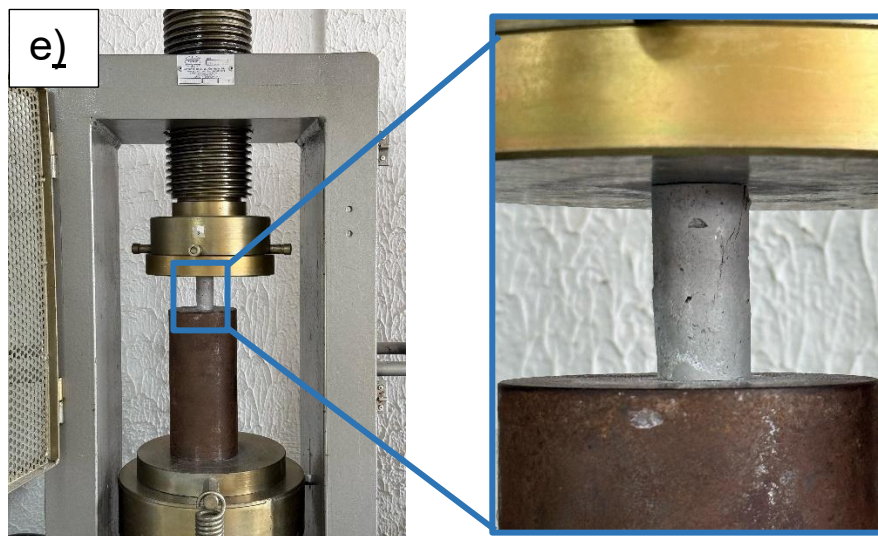
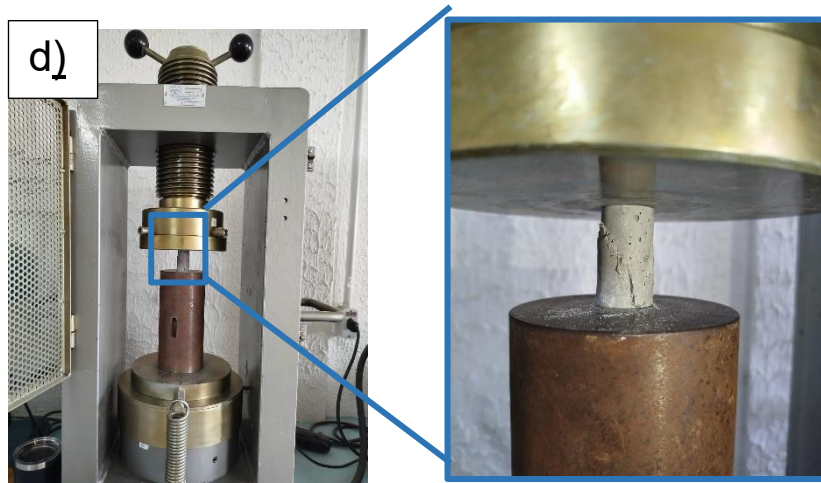
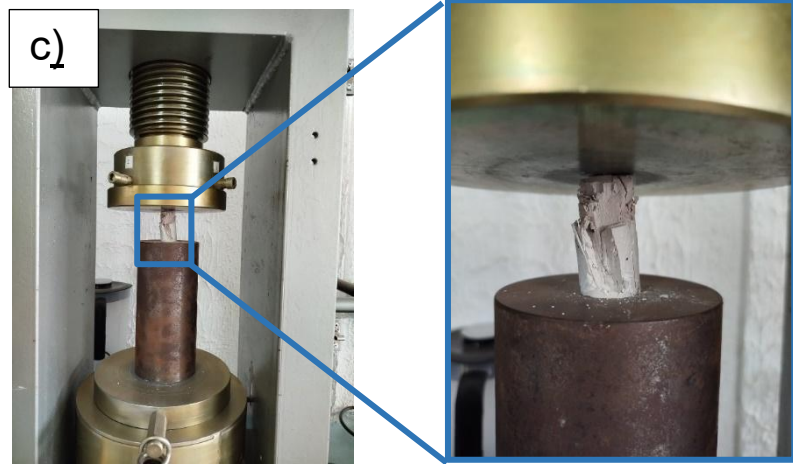
Fonte: Autor, (2025)

4.2.1 Resistência à Compressão Axial

Este ensaio compreende a medida da resistência aos esforços de compressão, suportados pelas superfícies do corpo de prova quando submetido a uma força axial dirigida para o interior da peça. Os corpos de prova para os testes de resistência à compressão foram confeccionados com diâmetro de 2,5 cm por 5 cm de altura. A máquina utilizada foi a CONTENCO, universal, capacidade de 100 KN. A taxa de compressão utilizada no ensaio foi de 0,01mm/s e aplicação da carga ocorreu até o colapso dos CP's Figura 20. Os ensaios de resistência a compressão foram realizados após 24hs, 7 dias depois do seu período de moldagem.

Figura 20 – Rompimento dos CPs com fibra de poliéster: a) CP de pasta com 0% de fibra, b) CP de pasta com 0,5% de fibra, c) CP de pasta com 1% de fibra, d) CP de pasta com 2% de fibra e e) CP de pasta com 3% de fibra





4.2.2 Resistência à Tração na Flexão

Foi utilizada uma prensa INTERMETRIC LINHA IM, com capacidade de carga de 5 kN e velocidade de aplicação da carga de 1,5 mm/min. O Setup para acoplar o corpo de prova para o ensaio com a Figura 21 a descrita a seguir. A distância do apoio superiores tem 108 mm de acordo a parte central do corpo de prova entre os apoios inferiores tem 216 mm da sua distância entre si como mostrASTMa na Figura 22, de acordo com as especificações da norma ASTM C674-13 (2023) para ensaio de flexão de cerâmica, para estes parâmetros. O software Tesc700 foi utilizado para adquirir a carga e a deflexão no meio do vão, por meio do sensor da prensa e um LVDT acoplado ao dispositivo e ajustado no meio da face inferior do CP.

Figura 21 – Prensa Hidráulica Elétrica. INTERMETRIC LINHA IM



Fonte: Autor, (2025)

Figura 22 – Posicionamento do corpo de prova nos apoios



Fonte: Autor, (2025)

4.3 Resistência a flexão.

Os corpos de provas foram flexionados de acordo com a norma e organizados com suas medidas e localização das fraturas nos parâmetros de terço médio em cada corpo de prova de acordo com a Figura 23.

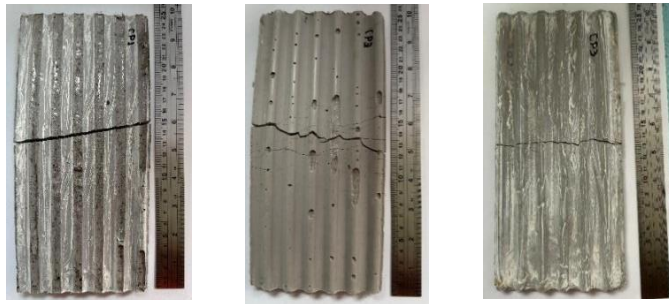
Figura 203 – Rompimento dos 3 CP com fibra de poliéster: a) CP de pasta com 0% de fibra, b) CP de pasta com 0,5% de fibra, c) CP de pasta com 1% de fibra, d) CP de pasta com 2% de fibra e e) CP de pasta com 3% de fibra.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Foi calculada a média entre os valores do módulo de elasticidade, de cada corpo-de-prova, sendo encontrado o módulo de elasticidade médio para cada material. Calculou-se também a tensão de flexão no limite de proporcionalidade, a partir da tensão, obtida do diagrama tensão/deformação, para cada corpo-de-prova, no ponto a partir do qual a curva foge da linearidade, obteve-se a média aritmética dos valores do limite de proporcionalidade na Figura 28 que mostra claro os resultados

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

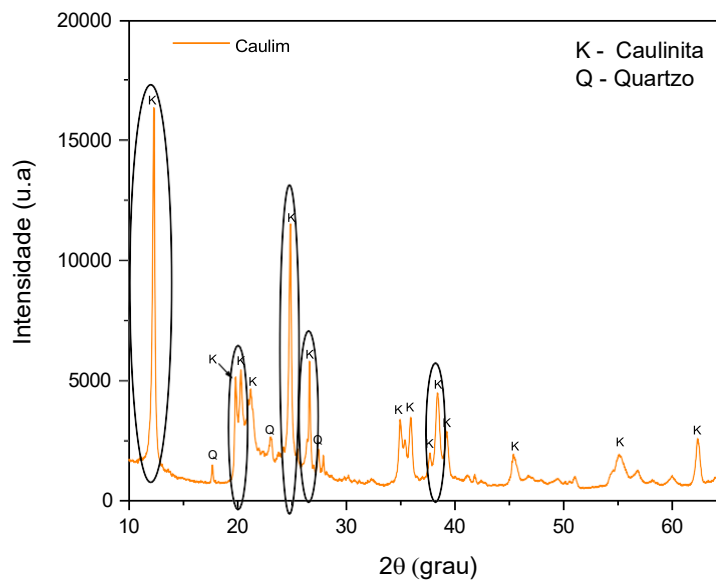
5.1 Caracterização das Matérias-Primas

5.1.1 Caulim

5.1.1.1 Difratomia de Raios-X do Caulim

As análises de DRX foram realizadas em amostras de caulim, evidenciando a presença predominante das fases cristalinas de caulinita (K) e quartzo (Q). e os resultados estão apresentados nas Figura 24.

Figura 24 – Difratoograma de raio-X (DRX) caulim



Fonte: Autor (2025)

Segundo Garcia-Valles (2020) os picos mais intensos e bem definidos de acordo com os círculos pretos na Figura 22 entre os ângulos de $2\theta \approx 12,3^\circ$, $20,3^\circ$, $24,8^\circ$, $25,5^\circ$ e $38,5^\circ$ são característicos da caulinita, principal mineral argiloso presente no caulim. O pico em torno de $12,3^\circ$ (001) é especialmente indicativo da estrutura lamelar ordenada da caulinita, reflexo de seu empilhamento cristalino regular firmado pelas pesquisas de Bergaya *et al.*, (2006).

Além disso, a presença de quartzo é confirmada por reflexões bem definidas nas regiões de $2\theta \approx 20,8^\circ$, $26,6^\circ$ e $50,1^\circ$, sendo o pico em $26,6^\circ$ (101) o mais intenso e característico dessa fase (Moore; Reynolds, 1997). A presença de quartzo é

comum em caulins naturais, especialmente aqueles com origem sedimentar, podendo influenciar significativamente as propriedades térmicas e mecânicas do material (Kalil *et al.*, 2020).

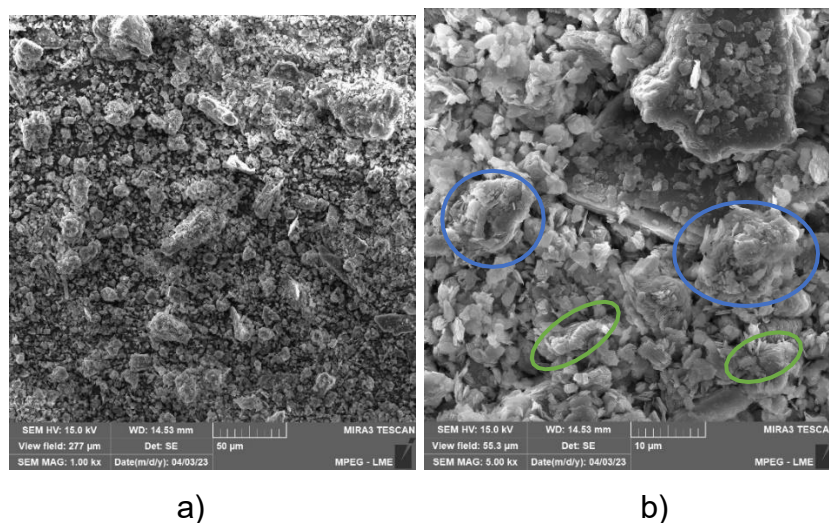
Apesar da presença de fases cristalinas identificáveis, o difratograma revela picos alargados e sobrepostos, especialmente na faixa entre 15° e 30° , o que sugere um elevado grau de desordem estrutural na amostra. Essa desordem pode estar associada à presença de impurezas, defeitos no empilhamento das lamelas da caulinita ou à ocorrência de partículas extremamente finas com baixa cristalinidade (D Christopher *et al.*, 2016). Tal comportamento é típico de caulins com elevado conteúdo de material amorfo ou pobremente cristalino, o que afeta diretamente a definição e a simetria dos picos no difratograma (Kalil *et al.*, 2020).

Essa característica estrutural desordenada é particularmente relevante para aplicações industriais, pois influencia diretamente a reatividade do material em processos como a ativação térmica para obtenção de metacaulim, utilizado como pozolana na indústria cimenteira (Abdelli *et al.*, 2017).

5.1.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura do Caulim.

A morfologia do pó do caulim pode ser observada na Figura 25(a) e 25(b), através das micrografias de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com isso as suas morfologias são definidas com marcações no qual os círculos verdes apresenta seu empilhamento ordenado e os círculos azuis destaca os empilhamentos desordenados.

Figura 25 – Imagens de MEV Caulim: (a) aumento de 1000x (b) aumento de 5000x.



A análise das imagens 25(a) e 25(b) obtidas por MEV revelou estruturas predominantemente lamelares, características do mineral caulinita. As imagens indicam que as partículas apresentam formato pseudo-hexagonal e tendem a se organizar em aglomerados conhecidos como "booklets", formações comuns nesse tipo de argilomineral. 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 (Brantley *et al.*, 2022).

A organização das folhas de caulinita pode ocorrer de forma ordenada ou desordenada, influenciando diretamente as propriedades físico-químicas do material. No caso do empilhamento ordenado, indicado pelos círculos verdes, observa-se uma disposição regular das camadas, resultando em um material mais cristalino e com menor reatividade superficial. Por outro lado, empilhamentos desordenados, destacados pelos círculos azuis, podem surgir devido a defeitos estruturais ou à presença de impurezas, o que modifica a plasticidade e a capacidade de adsorção de água do caulim (Liu *et al.*, 2023). Esse fenômeno tem impactos diretos em sua aplicação industrial, especialmente na produção de cerâmicas, papel e catalisadores, (Fiore *et al.*, 2022).

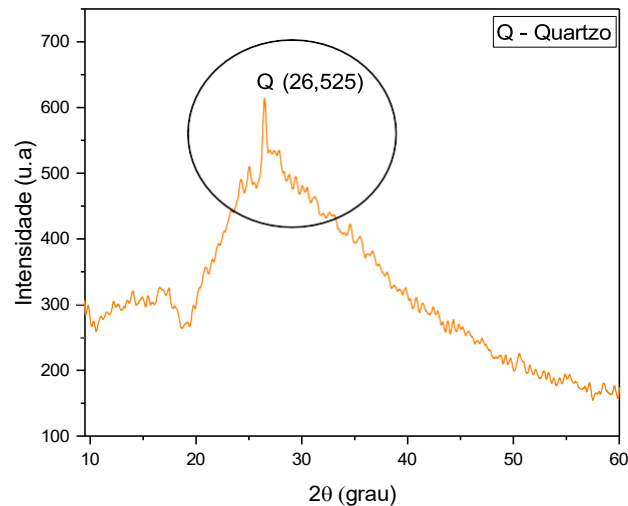
As imagens processadas também permitiram a observação de estruturas de bordas bem definidas, indicando cristais relativamente bem desenvolvidos. A presença de partículas com tamanhos variados pode estar relacionada ao processo de formação geológica ou aos procedimentos de beneficiamento do material (Padilha, 2021).

Os resultados obtidos estão alinhados com estudos anteriores sobre a morfologia da caulinita (Murphy e Helmke 1984). Descreveram a cristalografia da caulinita em solos e observaram que o empilhamento das folhas afeta diretamente suas propriedades reológicas. Murray (2007) ressaltou que a estrutura lamelar da caulinita é um fator determinante na expansibilidade e na capacidade de retenção de fluidos, aspectos fundamentais para sua utilização industrial. Destacaram a influência do empilhamento na definição das propriedades físicas das argilas, confirmando que alterações na disposição das camadas impactam sua aplicação tecnológica. metacaulim (Guggenheim e Martin, 1995).

5.1.1.3 Difractometria de Raios-X do Metacaulim

A detecção de picos de baixa intensidade associados ao Caulim sugere que devido a temperatura de 850°C ocorreu uma desidroxilação completa perdendo assim a intensidade dos picos ficando de forma ampla e difuso mostrando assim um material amorfo, permanecendo inalterada no produto final. Adicionalmente, o Quartzo identificado no círculo preto na figura 26 é considerada uma contaminação no metacaulim, devido à sua presença indesejada na composição impróprio como matéria orgânica ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Difratograma de raio-X (DRX) metacaulim



Fonte: Autor (2025).

A técnica de Difração de Raios X (DRX) é amplamente utilizada para a caracterização estrutural de materiais policristalinos, permitindo a identificação de fases cristalinas com base nos padrões de difração característicos de cada composto.

No difratograma apresentado, observa-se um pico intenso em aproximadamente 26,525° 2θ, o que confirma a presença predominante de quartzo cristalino no material analisado. Esse pico está relacionado ao reflexo do plano cristalográfico (101), amplamente reconhecido como característico do quartzo, conforme descrito por Angela, (2017) e confirmado por Kang *et al.* (2019), que destacam esse pico como um dos mais intensos e diagnósticos em amostras ricas

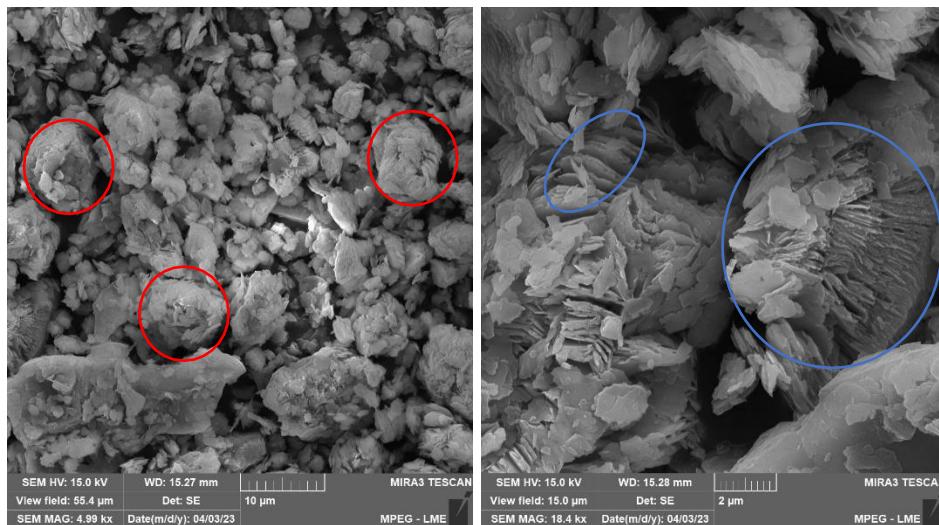
em SiO_2 . A intensidade e a nitidez desse pico são indicativas de um alto grau de cristalinidade. Essa característica é fundamental, pois, segundo Khemis *et al.* (2021), materiais altamente cristalinos, como o quartzo bem ordenado, tendem a apresentar maior estabilidade térmica e resistência mecânica, em comparação a fases amorfas, que por sua vez são mais suscetíveis a transformações e reatividade química devido à sua estrutura desordenada.

Além do pico principal, nota-se uma base alargada na região entre 15° e 35° 2θ , o que pode sugerir a presença de fases amorfas ou de minerais com baixa cristalinidade, como o caulim desordenado ou sílica amorfa. Essa observação é particularmente relevante, pois a coexistência de fases amorfas e cristalinas influencia significativamente o desempenho do material em aplicações cerâmicas. De acordo com Dianguang Liu *et al.* (2024), a proporção entre fases com diferentes graus de ordenamento estrutural pode afetar a densificação, a retração e a resistência mecânica durante o processo de sinterização. Além disso, conforme argumentado por Lavínia, (2018) a presença de quartzo em formulações cerâmicas contribui para a rigidez e estabilidade dimensional, mas também pode induzir tensões internas e trincas, especialmente quando há dilatação térmica diferencial entre fases cristalinas (como o quartzo) e fases vítreas ou amorfas. Esse comportamento foi corroborado por Zhong *et al.* (2023), que relacionaram a quantidade e a distribuição de quartzo nas peças cerâmicas com o surgimento de microtrincas após ciclos térmicos, afetando diretamente a durabilidade do material.

5.1.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura do Metacaulim

Na Figura 27, pode-se observar a morfologia do pó de metacaulim, em que a Figura 27(a) mostra partículas aglomeradas e não reagidas, destacadas pelos círculos vermelhos, e a Figura 27(b) apresenta estruturas lamelares organizadas, indicadas pelos círculos azuis.

Figura 27 – Imagens de MEV Metacaulim: (a) com aumento de 4.999x (b) com aumento de 18.400x.



Fonte: Autor (2025).

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelam características microestruturais distintas entre as amostras. A figura 27(a), sob uma escala de 4,99 μm , apresenta uma aglomeração de partículas com morfologia irregular e tamanhos variados demonstrado com círculos vermelhos. A superfície das partículas exibe uma textura rugosa e porosa, sugerindo uma elevada área superficial e potencial para adsorção. Estudos indicam que materiais com alta área superficial tendem a apresentar maior reatividade química, favorecendo processos de adsorção e interação com fluidos segundo Sing *et al.*, (1985). A aglomeração observada indica a presença de interações interpartículas, como forças de Van der Waals ou ligações eletrostáticas, que contribuem para a formação dos agregados, fenômeno comumente relatado em sistemas coloidais e argilosos comprovado por (Murray, 2007).

Em contraste, a figura 27(b), capturada sob um aumento de 18,4 μm , demonstra uma estrutura mais organizada, caracterizada por partículas com morfologia lamelar ou em forma de placas como mostra nos círculos azuis. A alta resolução permite visualizar detalhes da microestrutura, revelando que as lamelas são finas e empilhadas umas sobre as outras. Segundo Grim (1968), esse tipo de organização é típico de minerais argilosos como a caulinita, nos quais as camadas cristalinas se empilham de maneira ordenada, influenciando propriedades mecânicas e térmicas do material. Essa organização lamelar pode resultar em propriedades anisotrópicas, como resistência mecânica direcional e condutividade

térmica preferencial, características frequentemente observadas em materiais estruturados em camadas sendo comprovada por Guggenheim & Banfield, (1993). Além disso, a orientação preferencial das lamelas pode influenciar nas propriedades ópticas, como a birrefringência, um comportamento descrito em estudos sobre argilominerais e suas aplicações industriais (Drits *et al.*, 1997).

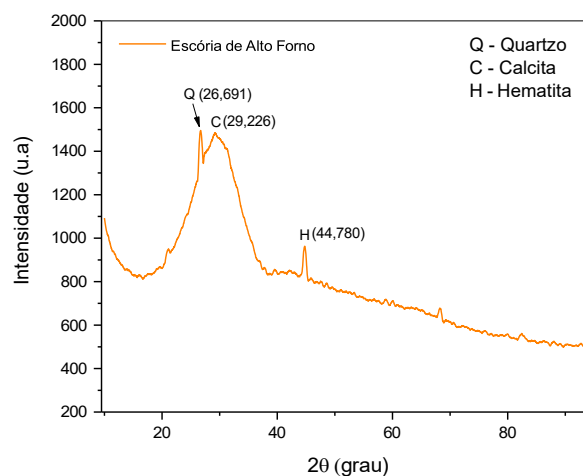
A comparação entre as Figuras 27(a) e 27(b) evidencia as diferenças microestruturais entre as amostras. Enquanto a primeira amostra exibe uma morfologia mais aleatória e aglomerada na Figura 25(a), a segunda apresenta uma organização lamelar mais definida na Figura 27(b). Essas variações podem estar relacionadas a diferenças na composição química, nas condições de processamento ou no histórico térmico das amostras. A microestrutura observada na Figura 27(b) um processo de cristalização ou orientação preferencial das partículas durante a formação do material, aspecto que pode ser influenciado pela temperatura e pelo tempo de sinterização, conforme discutido por Brindley & Brown (1980).

5.1.2 Escória de Alto Forno

5.1.2.1 Difractometria de Raios-X da Escória de Alto Forno

A análise mineralógica realizada por DRX no pó da escória de alto forno pode ser vista picos cristalinos de quartzo (Q), calcita (C) e hematita (H) na Figura 26.

Figura 28 – Difratograma de raio-X (DRX) da escória de alto-forno.



Fonte: Autor (2025).

A técnica de DRX é amplamente utilizada na caracterização de materiais sólidos, permitindo a identificação de compostos cristalinos com base nos ângulos de difração específicos de cada fase mineral. No difratograma, observam-se três picos principais, localizados aproximadamente em $2\theta = 26,69^\circ$, $29,23^\circ$ e $44,78^\circ$, os quais correspondem, respectivamente, às fases de quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e hematita (Fe_2O_3). A atribuição dessas fases foi realizada com base em padrões de referência da base de dados JCPDS.

O pico em torno de $26,69^\circ$ é característico do plano (101) do quartzo, uma fase silicatada comum em escórias, oriunda de resíduos dos minérios utilizados nos altos-fornos. O quartzo é considerado uma fase inerte em sistemas alcalinos, podendo, contudo, contribuir para a estabilidade dimensional do compósito cimentício, conforme apontado por Porto (2019). Já o pico em $29,23^\circ$, associado ao plano (104) da calcita, indica a presença de carbonato de cálcio, que pode estar relacionado à utilização de calcário como fundente no processo siderúrgico ou à carbonatação secundária da escória durante seu armazenamento. A calcita, segundo Almeida (2023), pode influenciar negativamente a durabilidade dos compósitos, especialmente quando expostos a ambientes agressivos. O terceiro pico, em $44,78^\circ$, corresponde ao plano (110) da hematita, um óxido de ferro trivalente geralmente formado por processos de oxidação durante o resfriamento da escória. Embora pouco reativa, a hematita pode alterar aspectos visuais, como coloração, dos materiais finais (Lucas, 2021).

Além das fases cristalinas citadas, o difratograma evidencia um halo difuso entre 20° e 35° em 2θ , característico da presença de material amorfo. Esse halo indica que a escória apresenta uma fração significativa de fase vítrea, formada devido ao resfriamento rápido do material, o que impede a ordenação cristalina. Essa porção amorfa é altamente desejável para aplicações em geopolímeros, visto que representa a fração mais reativa da escória, capaz de interagir com ativadores alcalinos e formar produtos cimentantes.

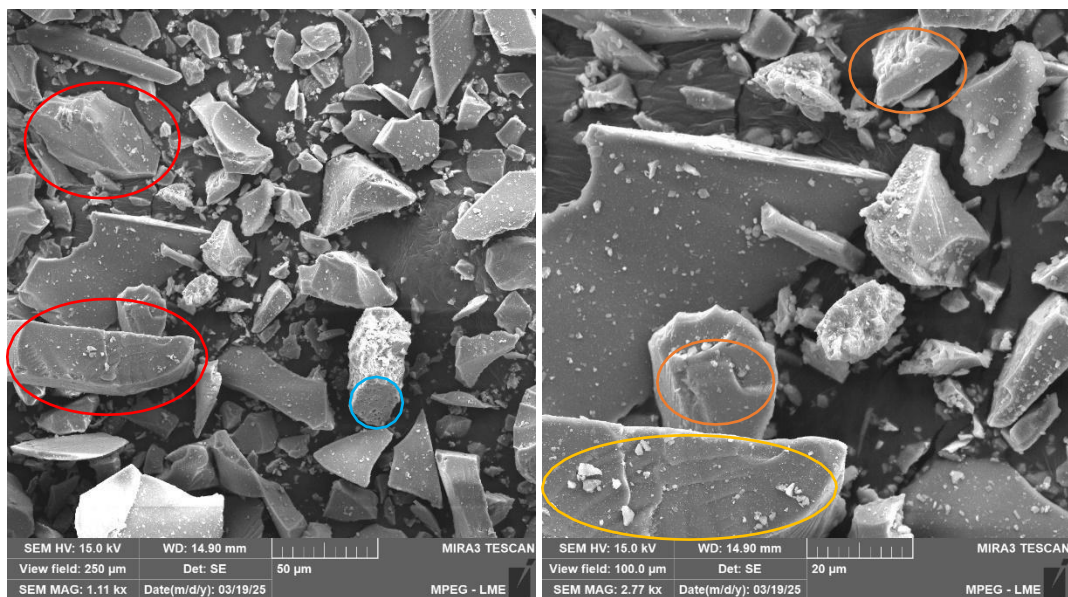
De acordo com Almeida (2023), a fase amorfa é essencial para o desenvolvimento de uma matriz geopolimérica resistente e durável. Portanto, os resultados obtidos por meio da análise de DRX indicam que a escória de alto-forno avaliada possui características mineralógicas compatíveis com sua aplicação em ligantes cimentícios alternativos. A presença conjunta de fases cristalinas inertes e de fase vítrea reativa reforça sua viabilidade como precursor em formulações

geopoliméricas, conforme também demonstrado por estudos anteriores de Porto (2019), Lucas (2021) e Almeida (2023).

5.1.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura da Escória de Alto Forno

A morfologia da escória de alto forno pode ser observada na Figura 27 através de imagens em alta definição feitas do pó passante na peneira de 200 mesh.

Figura 29 – Imagens de MEV Escória de alto-forno: (a) com aumento de 1.011x (b) caulim com aumento de 2.077x.



Fonte: Autor (2025).

Com base nos estudos de Alharbi *et al.* (2020) e complementado por Zawrah *et al.* (2016), a escória de alto-forno, analisada por meio de (MEV) nas Figuras 29(a) e 29(b), a microestrutura complexa revela uma coexistência de domínios vítreos e regiões cristalinas bem definidas marcados em círculos vermelhos, conferindo assim, ao material uma textura multifacetada que está localizado com círculo amarelo. Essa heterogeneidade se manifesta em superfícies que variam do liso ao rugoso visto com círculos laranja e com a presença marcante de poros localizado com círculos azuis, vestígios de um resfriamento abrupto que aprisionou fases distintas. A análise morfológica das partículas revela processos distintos que moldaram o material. A presença de partículas angulares indica fratura mecânica, enquanto partículas arredondadas sugerem resfriamento acelerado. Adicionalmente, a agregação de partículas menores a superfícies maiores, observada possivelmente

durante o resfriamento ou manuseio, aponta para a ocorrência de processos de aglomeração.

Pimentel *et al.* (2017) em seus trabalhos de investigação, constatou-se que a estrutura da escória revela partículas de formatos angulares e dimensões variadas, distribuídas de maneira heterogênea e com textura irregular. Essa diversidade estrutural, juntamente com a presença de fases cristalinas, como os silicatos de cálcio e aluminosilicatos, explicita uma complexidade química e microestrutural semelhante àquela descrita por Kunhi Mohamed *et al.* (2020). A escória é formada durante processos metalúrgicos e também na produção de ferro gusa, com o objetivo principal de reter óxidos e outros componentes indesejáveis presentes nos minérios

No estudo de materiais geopoliméricos ativados demonstraram o desenvolvimento de fases como C-S-H e hidrotalcita, o que indica uma reatividade superior em comparação com a escória não ativada. As características estruturais e químicas da escória, conforme apontado pelos autores, tornam-na especialmente adequada para sistemas de ativação alcalina. Essa aplicação permite explorar benefícios como o aumento da reatividade e a obtenção de propriedades mecânicas otimizadas.

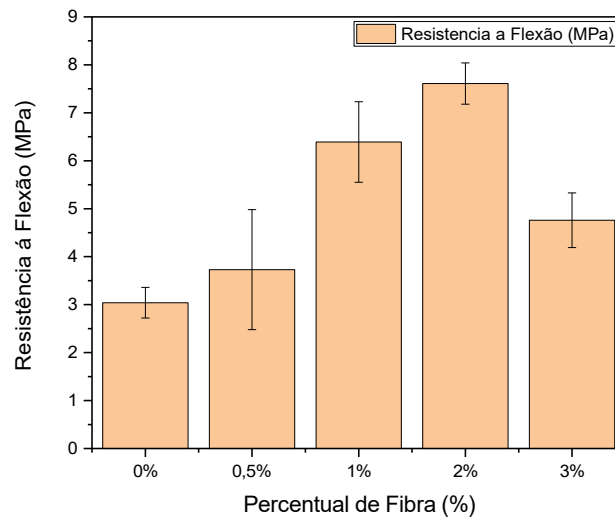
5.2 Pastas Geopoliméricas

Os resultados do estudo de dosagem realizado em pastas geopoliméricas reforçadas com fibra de poliéster, com teores de 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3%, são apresentados nas Figuras 30 e 32. Os dados incluem a análise da resistência à compressão e à flexão, permitindo avaliar a influência da adição de fibras nas propriedades mecânicas finais do geopolímero e na Figura 31 apresenta a análise comparativa entre geopolímero e cimento portland com os teores de 0 a 2% de fibra de poliéster. Além disso, a microestrutura dos corpos de prova rompidos foi examinada para compreender a influência das variações de fibra na coesão da matriz e no desempenho mecânico do material.

5.2.1 Resistência à flexão

A Figura 30 apresenta os valores de resistência à flexão dos compósitos geopoliméricos com diferentes teores de fibra

Figura 30 – Resistência à flexão das pastas geopoliméricas com as variações em percentuais de fibra de poliéster.



Fonte: Autor (2025).

. Observa-se que o compósito sem fibras (0%) apresenta a menor resistência, com valor médio de aproximadamente 3,5 MPa. Este comportamento está alinhado com o relatado por Korpa *et al.* (2014), A fratura é predominantemente frágil, com propagação linear da trinca e ausência de elementos de reforço que pudessem desviar ou dissipar a energia da trinca. Essa observação é compatível com as imagens de MEV da Figura 33, que mostram uma matriz densa, porém quebradiça, sem barreiras estruturais para o avanço da trinca.

Com a adição de 0,5% de fibra, a resistência à flexão aumenta para cerca de 4,5 MPa, indicando que mesmo pequenas quantidades de fibra já contribuem positivamente para o reforço do material. Segundo Abd Elmoaty (2022), a presença de fibras em matrizes frágeis promove a formação de pontes de trinca (crack bridging), o que impede a propagação de fissuras e melhora significativamente a capacidade de absorção de energia do compósito sendo confirmada pelas micrografias da Figura 34, onde se nota a presença das fibras incorporadas e interagindo com a matriz geopolimérica.

O aumento contínuo da resistência observado com 1% de fibra, que atinge cerca de 6,5 MPa, pode ser atribuído à boa distribuição das fibras na matriz e à aderência adequada entre matriz e reforço. De acordo com Shilang Xu (2018), a eficiência do reforço depende diretamente da interface entre a fibra e a matriz geopolimérica. Quando essa interface é bem desenvolvida, ocorre uma transferência eficaz de tensões, o que explica o ganho de resistência mecânica.

O ponto máximo de resistência, próximo de 7,5 MPa, é observado com 2% de fibra, indicando o teor ideal para o sistema avaliado. Esse comportamento está de acordo com os resultados de Prabua (2019), que identificaram um incremento nas propriedades mecânicas de compósitos geopoliméricos com o aumento gradual da fração volumétrica de fibras até um limite ideal, geralmente situado entre 1% e 2%, dependendo do tipo de fibra utilizada. Esse comportamento está diretamente ligado às características microestruturais reveladas pelas imagens da Figura 36, onde se observa uma matriz densa, com baixa porosidade e fibras bem incorporadas à estrutura. A distribuição das fibras é razoavelmente homogênea, e a adesão interfacial é satisfatória, o que favorece a formação de pontes de trinca e retarda o processo de fratura.

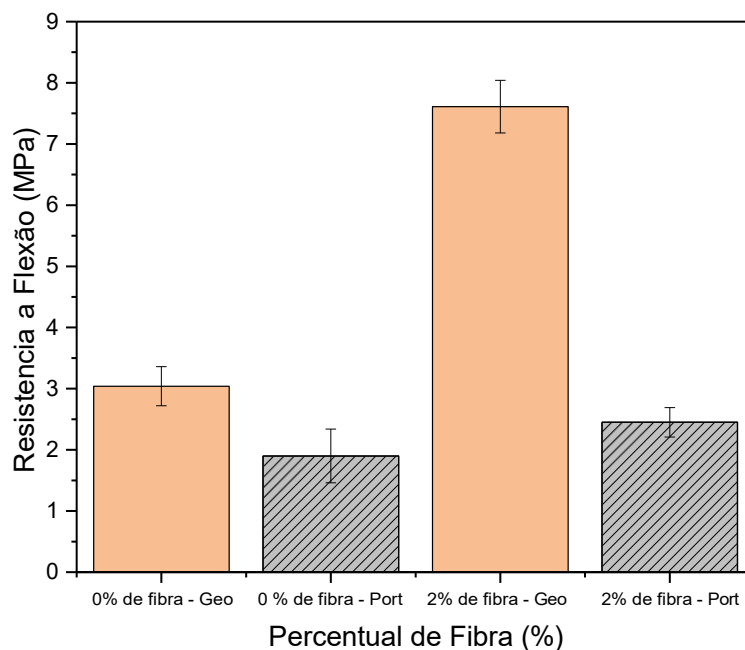
Por outro lado, a queda observada com 3% de fibra (aproximadamente 5 MPa) indica que o excesso de reforço pode comprometer a integridade do compósito. Essa redução pode estar relacionada à aglomeração de fibras e ao aumento da porosidade, o que dificulta a compactação da matriz e favorece a formação de zonas de fraqueza (Prabua *et al.*, 2019). Além disso, a elevada quantidade de fibra pode dificultar a distribuição homogênea do reforço, prejudicando a aderência interfacial e reduzindo a eficácia da transferência de carga (Mirgozar *et al.*, 2025). Em que pode ser diretamente associado às características microestruturais observadas na Figura 37. Nelas, nota-se a presença de porosidade elevada, aglomeração de fibras e partículas não reagidas sinais claros de que houve saturação da matriz e insuficiência na quantidade de ativador alcalino para promover uma geopolimerização completa. A má distribuição das fibras e a interface pouco aderente entre matriz e reforço comprometem a integridade estrutural do compósito. Assim, os resultados mecânicos mais baixos refletem diretamente as falhas morfológicas evidenciadas nas análises de MEV, reforçando a importância de um equilíbrio entre conteúdo de reforço e qualidade da matriz.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância do controle do teor de fibra em compósitos geopoliméricos. A adição de fibras é eficaz até determinado limite, sendo que, no presente estudo, o valor de 2% representa o ponto ótimo, promovendo o melhor desempenho mecânico sem comprometer a coesão do material.

5.2.2 Análises comparativos de geopolímero e cimento Portland

A Figura 31 apresenta os resultados de resistência à flexão (MPa) de compósitos à base de geopolímero (Geo) e de pasta de cimento Portland (Port), com adição de 0% e 2% de fibra de poliéster. Observa-se que a adição de fibras influenciou significativamente a resistência à flexão dos materiais analisados.

Figura 31 – Análise comparativo da resistência à flexão das pastas geopolimérica e cimento portland com variação de 0% e 2% de fibra



Fonte: Autor (2025).

O compósito geopolimérico sem fibra apresentou resistência à flexão média de aproximadamente 3,5 MPa, valor superior ao da amostra de cimento Portland sem fibra, que foi de cerca de 2,4 MPa. Essa diferença destaca o potencial dos geopolímeros como alternativa ao cimento Portland, especialmente em aplicações que demandam maior resistência mecânica. De acordo com Qu *et al.* (2022), a

elevada resistência mecânica dos geopolímeros está relacionada à sua estrutura tridimensional de aluminossilicatos, que confere maior estabilidade estrutural, além de resistência térmica e química superiores às de materiais cimentícios convencionais.

Quando foram adicionados 2% de fibra de poliéster à matriz de geopolímero, observou-se um aumento expressivo na resistência à flexão, atingindo cerca de 7,8 MPa — mais do que o dobro do valor da amostra sem fibras. Esse resultado evidencia o papel fundamental das fibras na contenção da propagação de trincas e na distribuição de tensões ao longo da matriz. Hussein *et al.* (2023) observaram comportamento semelhante ao estudarem a adição de fibras de poliéster em geopolímeros, destacando que esse reforço promove a formação de uma microestrutura mais densa e uma matriz menos suscetível à absorção de água, contribuindo diretamente para o ganho de resistência mecânica e durabilidade do material.

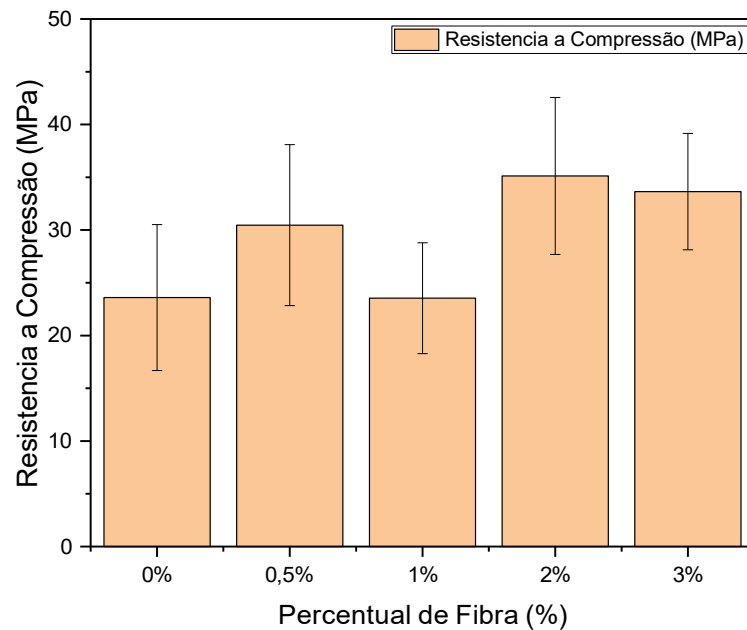
Por outro lado, a adição da mesma proporção de fibra na matriz de cimento Portland não resultou em melhorias significativas, mantendo a resistência em torno de 2,6 MPa. Esse resultado pode estar associado à fraca adesão interfacial entre a fibra de poliéster e a matriz cimentícia, o que compromete a eficiência na transferência de esforços entre os constituintes do compósito. Łach *et al.* (2021) reforçam essa observação ao afirmarem que o desempenho mecânico de compósitos reforçados com fibras depende fortemente da qualidade da interface entre matriz e reforço. Em sistemas com baixa compatibilidade, como é o caso de algumas fibras poliméricas em pastas de cimento, o reforço pode não exercer sua função de forma eficaz.

Diante disso, os resultados obtidos demonstram que o uso de fibras de poliéster é significativamente mais eficaz em matrizes geopoliméricas do que em cimentícias, evidenciando a maior compatibilidade entre os componentes e reforçando o potencial do geopolímero como uma matriz promissora para o desenvolvimento de compósitos com desempenho mecânico superior.

5.2.3 Resistência à compressão

A Figura 32 apresenta os valores de resistência à compressão (MPa) de compósitos geopoliméricos com diferentes percentuais de fibra de poliéster: 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3%. A análise mostra que a adição de fibras influencia significativamente as propriedades mecânicas do material.

Figura 32 – Resistência à compressão das pastas geopoliméricas com as variações em percentuais de fibra de poliéster.



Fonte: Autor (2025).

A amostra de referência, sem adição de fibras (0%), apresentou resistência média de aproximadamente 24 MPa. Com a adição de 0,5% de fibra, houve um aumento considerável na resistência, atingindo cerca de 30 MPa. Esse ganho pode ser atribuído à atuação das fibras como elementos de reforço, capazes de inibir a propagação de microtrincas e melhorar a tenacidade do compósito, como discutido por Łach *et al.* (2021), que destacam a eficácia das fibras em melhorar as propriedades mecânicas de geopolímeros mesmo em pequenas proporções.

No entanto, ao aumentar o teor de fibra para 1%, observa-se uma redução da resistência à compressão para níveis semelhantes aos da amostra sem reforço. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de aglomerados de fibras ou à má dispersão dentro da matriz geopolimérica, o que compromete a integridade do material. Qin *et al.* (2023) apontam que a má distribuição de fibras, especialmente em teores mais altos, pode resultar em descontinuidades estruturais, afetando negativamente a resistência mecânica.

A maior resistência foi alcançada com a incorporação de 2% de fibra, atingindo aproximadamente 35 MPa, o que representa um aumento de mais de 45%

em relação à amostra sem fibra. Este resultado evidencia a existência de um ponto ótimo de adição de fibras, em que há uma boa interação entre a matriz e o reforço, promovendo maior capacidade de redistribuição de tensões e retardamento de falhas frágeis. De acordo com Wang *et al.* (2021), a presença de fibras em proporções adequadas permite que elas atuem como pontes de transferência de carga, o que melhora a resistência à compressão e a flexão dos compósitos geopoliméricos.

Por outro lado, na amostra com 3% de fibra, houve uma ligeira redução da resistência em comparação ao compósito com 2%, indicando um possível ponto de saturação. O excesso de fibras pode levar ao aumento da porosidade, formação de vazios e dificuldades no processo de moldagem e compactação do material. Esse efeito é corroborado por Moujoud *et al.* (2023), que destacam que o excesso de fibras em compósitos cimentícios ou geopoliméricos pode comprometer a coesão da matriz e gerar perdas de desempenho mecânico.

Dessa forma, os resultados indicam que a adição de fibras ao compósito geopolimérico pode ser uma estratégia eficaz para a melhoria da resistência à compressão, desde que seja respeitado um limite técnico de incorporação. Neste estudo, o teor de 2% demonstrou ser o mais eficiente, equilibrando ganho mecânico com integridade estrutural.

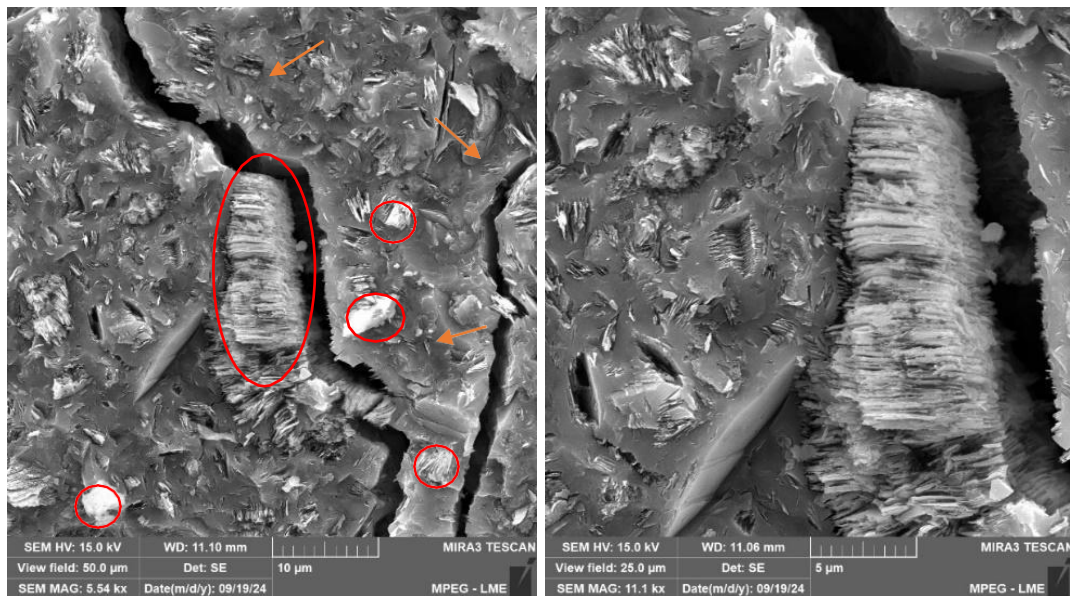
5.3 Análise microestrutural dos CPs com variações de fibra (MEV)

A codificação por cores entre setas e círculos contribui para a compreensão dos mecanismos que atuam na resistência e tenacidade do compósito.

5.3.1 Pasta geopolimérica com 0% de fibra

As imagens da mostra das superfícies, obtidas por MEV dos CPs rompidos por compressão, foram analisadas para avaliar as características das superfícies externa e interna, com o objetivo de identificar a homogeneidade, a presença de microfissuras e materiais não reagidos. A Figura 33 apresenta as imagens dos corpos de prova com 0% de fibra no qual as setas laranjas mostram fraturas presente na amostra e os círculos vermelhos mostram materiais não reagidos.

Figura 21 – Micrografias das superfícies da pasta geopolimérica com 0% de fibra na Figura 33(a) com aumento de 5.054X e na Figura 33(b) com 11.001x.



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

As análises de MEV das pastas geopoliméricas são apresentadas na Figura 33. Nela, observa-se a amostra com 0% de fibra, confirmando a formação de um gel denso e uma matriz uniforme, sem vazios. Além disso, foram identificadas partículas não reagidas, cuja presença se mostrou significativa ao longo da matriz.

A presença desse material não reagido pode estar relacionada a possíveis falhas no processo de mistura da pasta, que pode ter sido insuficiente para solubilizar completamente as partículas sólidas. Esse fator pode influenciar os resultados de resistência mecânica do compósito, sendo perceptível na fratura ilustrada pela seta laranja ao redor do empilhamento de caulinita, indicado pelo círculo vermelho. Estudos recentes mostram que uma dispersão inadequada de nanoclays (como caulinita) leva à formação de aglomerados que, por concentrar tensões, prejudicam o módulo de Young e a resistência mecânica. Por exemplo, em nanocompósitos de biopoliamida reforçados com 10 % em peso de nanoclay, o módulo de Young aumentou quase 93 % quando a dispersão das partículas foi otimizada por meio de maior esforço de cisalhamento durante o processamento, em comparação com amostras com menor dispersão (Voicu et al., 2024). Isso confirma que a eficiência da mistura é fundamental para evitar defeitos estruturais — como o

aglomerado de caulinita visível na fratura — e assegurar o desempenho mecânico ideal do compósito.

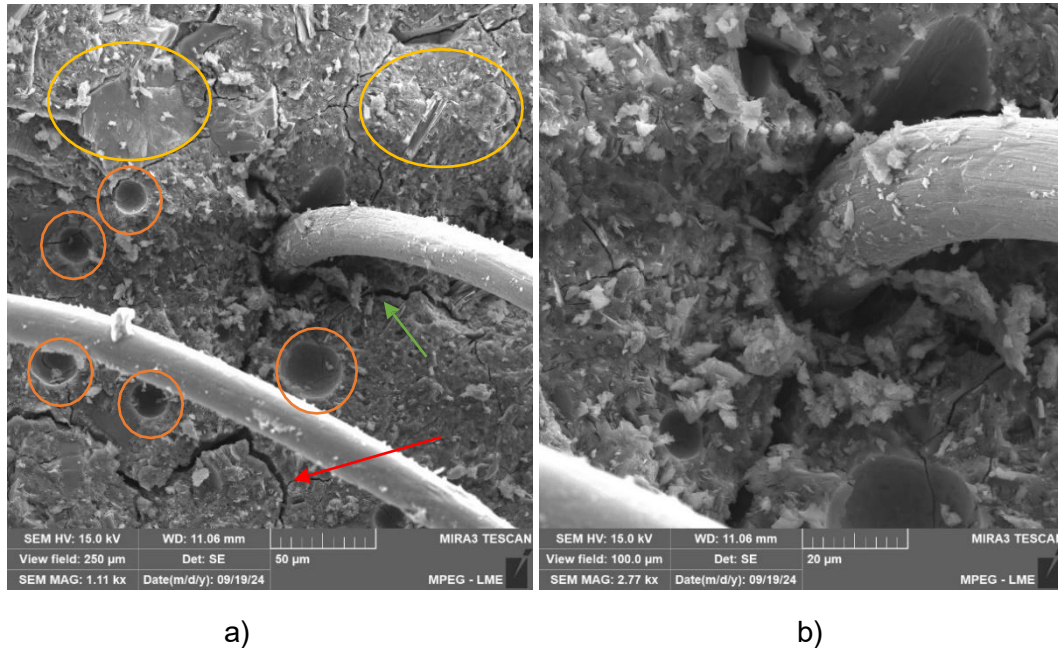
Devido à interação fragilizada entre as lamelas empilhadas, a energia de propagação da trinca foi incisiva fazendo que rompesse devido o material não reagido, fazendo com que a fratura contornasse o empilhamento e fragilizasse a peça devido à presença do material não reagido.

Esse tipo de fragilização é um fenômeno amplamente discutido na literatura, pois a presença de partículas não reagidas na matriz geopolimérica pode atuar como pontos de concentração de tensões, comprometendo significativamente a resistência mecânica do material. De acordo com as observações de Zhang *et al.* (2023), essas regiões não apenas reduzem a coesão da estrutura, mas também favorecem a nucleação e propagação de trincas, resultando em um desempenho mecânico inferior.

5.3.2 Pasta geopolimérica com 0,5 % de fibra

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentadas na Figura 34, ilustram a morfologia de uma matriz geopolimérica incorporando fibras de poliéster como reforço. A análise foi realizada em duas ampliações: a Figura 34(a) oferece uma visão geral da distribuição estrutural, enquanto a Figura 34(b) permite examinar com maior detalhe a interface entre a fibra e a matriz. Nas micrografias, destacam-se, por círculos laranja, bolhas causadas por falhas de compactação; por círculos amarelos, partículas mal consolidadas, indicativas de geopolimerização incompleta; pela seta verde, a boa infiltração da fibra de poliéster; e pela seta vermelha, falhas na interface fibra-matriz com sinais de fratura.

Figura 22 – Micrografias das superfícies da pasta geopolimérica com 0,5% de fibras. A Figura 34(a) com aumento de 1.011X e a Figura 34(b) com aumento de 2.077x.



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

Na Figura 34(a) de menor ampliação, diversas bolhas estão destacados com círculos laranja, indicando falhas de compactação ou reação incompleta durante o processo de cura. Essas bolhas representam regiões vulneráveis à concentração de tensões, o que pode comprometer significativamente as propriedades mecânicas do compósito, como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Além disso, a formação de bolhas pode estar associada à liberação de água ou outros voláteis durante a cura térmica, além de possíveis bolhas de ar incorporadas na mistura (Zhang *et al.*, 2022).

Na mesma imagem, observam-se regiões indicadas com círculos amarelos, que apresentam partículas finas com aspecto mal consolidado. Esse tipo de estrutura pode ser indício de zonas onde a geopolimerização foi incompleta, resultando em áreas com menor coesão estrutural. A má distribuição dos reagentes ou a alcalinidade insuficiente são fatores que podem afetar diretamente a formação dos geles N-A-S-H característicos dos geopolímeros, prejudicando a resistência química e mecânica da matriz. Estudos recentes mostram que o controle da granulometria dos precursores e das condições de síntese é essencial para garantir a homogeneidade do material (Burduhos Nergis *et al.*, 2020).

Um aspecto positivo identificado na micrografia é a boa infiltração da fibra de poliéster, apontado pela seta verde. Essa interação eficaz entre matriz e reforço é

essencial para promover a transferência de tensões mecânicas durante o carregamento do compósito, além de contribuir para a tenacidade do sistema. Quando a fibra está fortemente ancorada na matriz, ocorrem mecanismos de reforço como o travamento mecânico e a fricção interfacial, os quais aumentam a resistência ao impacto e a propagação de trincas (Yazid *et al.*, 2022).

Por outro lado, a seta vermelha evidencia uma falha na interface fibra-matriz, onde há sinais de fratura. Essa separação pode estar relacionada a tensões internas provocadas por solicitação mecânica diferencial ou à baixa afinidade química entre o poliéster e os silicatos presentes na matriz geopolimérica. A presença de tal descontinuidade prejudica a transferência de carga e pode resultar em falhas prematuras no material, sobretudo sob carregamentos cíclicos (Alves *et al.*, 2021).

Na Figura 34(b) reforça esses achados ao mostrar com mais clareza a textura da matriz ao redor das fibras. Nota-se uma superfície rugosa, o que é desejável do ponto de vista da aderência mecânica. Esse tipo de topografia aumenta a área de contato com a fibra, favorecendo o ancoramento físico e melhorando a resistência à tração e ao cisalhamento. Compósitos com boa interação interfacial demonstram melhor desempenho geral, tanto em aplicações estruturais quanto em exposições a ambientes agressivos (Bai *et al.*, 2024).

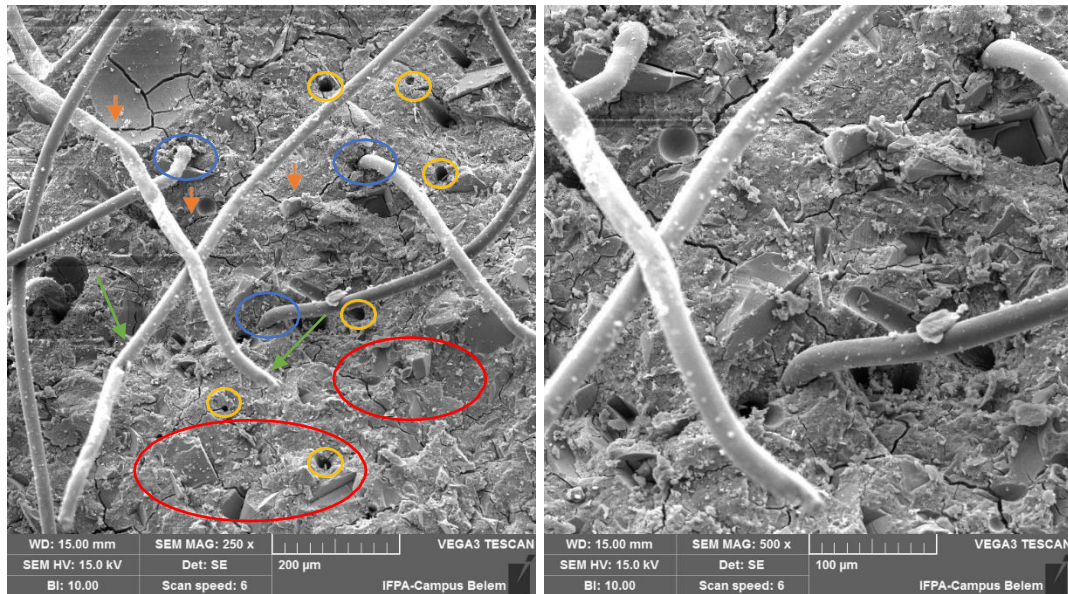
Dessa forma, a análise das micrografias revela uma matriz geopolimérica com características estruturais típicas de um compósito cimentício alternativo, com pontos fortes e fragilidades visíveis. As fibras de poliéster demonstraram potencial para atuar como reforço eficiente, mas os poros e as falhas de aderência ainda representam desafios que podem ser otimizados por meio do ajuste das condições de processamento.

5.3.3 Pasta geopolimérica com 1 % de fibra

A Figura 35 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, MEV, de um compósito geopolimérico reforçado com 1% em massa de fibra de poliéster, nas ampliações mostradas na Figura 35(a) e Figura 35(b). As micrografias evidenciam a presença de fibras de poliéster distribuídas na matriz, destacadas em círculo vermelho, com regiões de boa adesão interfacial, destacadas em círculo azul. Observa-se ainda o redirecionamento de trincas pelas fibras, indicado por setas laranjas, o que contribui para o aumento da tenacidade do material por meio dos mecanismos de pull-out e crack bridging, indicados por setas

verdes. Contudo, é possível notar a presença de vazios próximos às fibras, destacados em círculos amarelos, os quais podem comprometer a resistência mecânica do compósito.

Figura 23 – Micrografias das superfícies da pasta geopolimérica com 1% de fibra com 7 dias. (a) Aumento de 250x (b) Aumento de 500x.



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

Nota-se uma matriz densa, típica de geopolímeros, com fibras de poliéster distribuídas de maneira relativamente uniforme, marcadas em círculo vermelho. A presença dessas fibras introduz uma heterogeneidade estrutural esperada, associada à função de reforço mecânico.

As fibras estão visivelmente incorporadas à matriz e, em algumas regiões, observa-se boa adesão interfacial destacada em círculo azul, fator determinante para a eficácia do reforço. A literatura recente tem destacado que a incorporação de fibras sintéticas, como o poliéster, pode melhorar significativamente a resistência mecânica de geopolímeros, desde que a interface entre a fibra e a matriz seja bem consolidada. Hussein *et al.* (2023) demonstraram que a adição de fibra de poliéster, especialmente quando combinada com nano sílica, melhora as propriedades de resistência química e contribui para o refinamento da microestrutura, favorecendo o desempenho global do compósito.

Além disso, observa-se que as fibras atuam como elementos de redirecionamento da propagação de trincas marcadas com setas laranjas,

característica já identificada em compósitos cimentícios e geopoliméricos com reforço fibroso. Wang *et al.* (2023) reforçam que a função da fibra não se limita ao ganho de resistência, mas também atua no controle da fissuração e na absorção de energia por mecanismos como pull-out e crack bridging indicados com setas verdes, o que melhora a tenacidade do material.

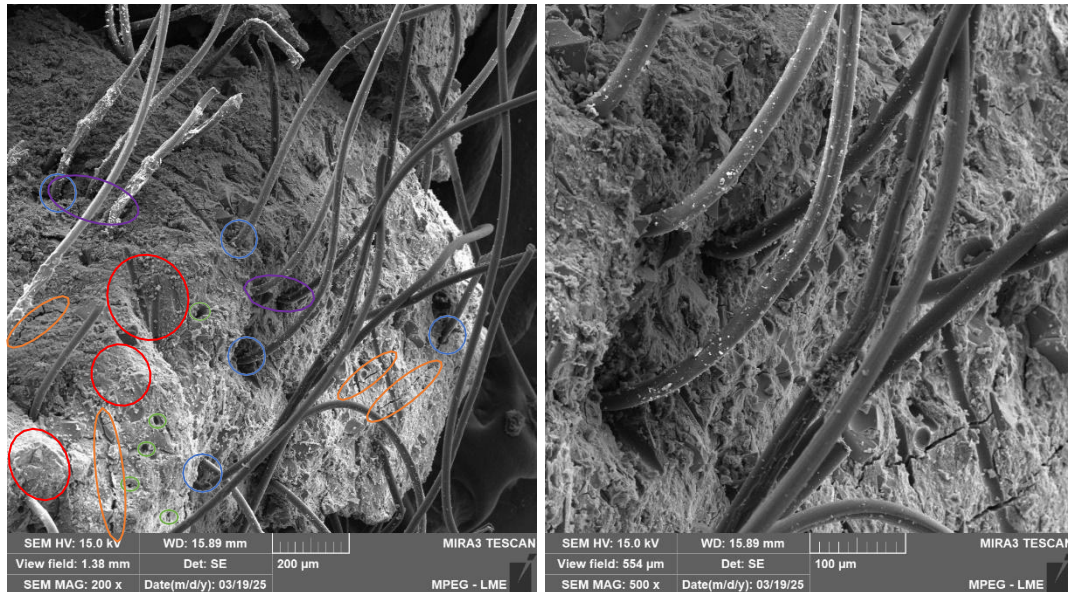
No entanto, alguns vazios ao redor das fibras são visíveis em círculos amarelos, possivelmente relacionados a falhas de adesão ou à dispersão incompleta das fibras na matriz. Tais defeitos podem comprometer localmente a resistência mecânica e servir como pontos de nucleação de trincas sob carregamento. Wang *et al.* (2023) também discutem esse aspecto e alertam para a importância do controle rigoroso da distribuição e da interface para alcançar um desempenho ótimo.

Assim, mesmo em baixa proporção (1%), a fibra de poliéster promove alterações visíveis na microestrutura do geopolímero, com potencial para melhorar suas propriedades, desde que as condições de mistura, cura e dispersão sejam bem controladas.

5.3.4 Pasta geopolimérica com 2 % de fibra

A micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliações de 200X na Figura 36(a) e 500X na Figura 36(b) da matriz geopolimérica contendo 2% de fibra de poliéster. As cores destacam regiões de interesse para facilitar a interpretação microestrutural: círculo vermelho para áreas densas da matriz, círculo verde para zonas porosas ou com porosidade interconectada, círculo azul para fibras bem ancoradas, círculo laranja para fratura frágil da matriz e círculo roxo para ponteamto de trincas pelas fibras.

Figura 24 – Micrografias das superfícies da pasta geopolimérica com 2% de fibra com 7 dias. (a) Aumento de 200x (b) Aumento de 500x



a)

b)

Fonte: Autor (2025).

A análise morfológica revelou uma microestrutura heterogênea, composta por regiões densas e áreas porosas, características típicas de materiais geopoliméricos devido à sua formação via reação de ativação alcalina (Provis & van Deventer, 2014). A presença destas porosidades pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade do compósito, aumentando sua permeabilidade e afetando a resistência à compressão (Saeed *et al.* 2022).

Uma observação importante foi a distribuição das fibras de poliéster na matriz geopolimérica. A Figura 36(a) destaca fibras embutidas na matriz, evidenciando uma interface relativamente aderente. A boa interação matriz-reforço é essencial para a transferência eficiente de tensões entre a matriz geopolimérica e as fibras poliméricas, o que pode contribuir para uma melhora na resistência à tração e na tenacidade do material, (Korniejenkoi *et al.* 2016). Por outro lado, em algumas regiões, foi possível identificar espaços vazios ao redor das fibras, sugerindo potencial falha na aderência matriz-fibra. Esse fenômeno ocorre porque os geopolímeros, compostos primariamente por uma fase amorfa rica em sílica-alumina, possuem interação limitada com fibras hidrofóbicas, como as de poliéster (Mohammed *et al.* 2022).

Além disso, evidências de porosidade interconectada e microfissuras foram observadas, que pode indicar que o processo de cura e endurecimento do

geopolímero resultou na geração de tensões internas e, conseqüentemente, microfissuração da matriz segundo Hongzhi *et al.*, (2023). A presença de microfissuras pode comprometer o desempenho estrutural do material, pois atuam como pontos de concentração de tensões, facilitando a propagação de falhas sob carregamento mecânico (Yoosuk *et al.*, 2020).

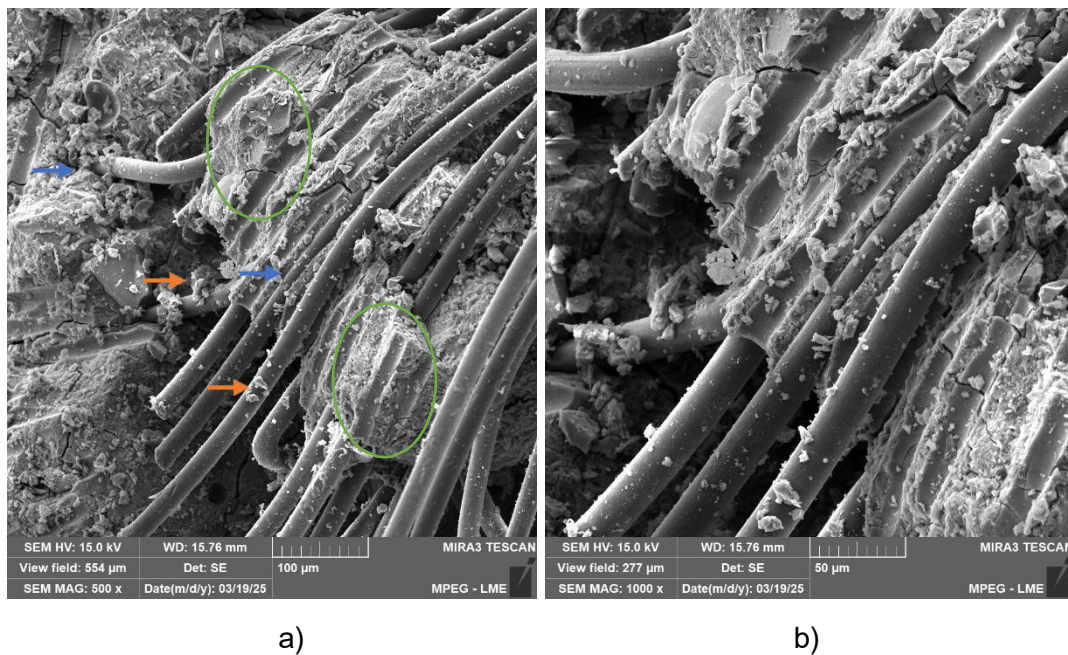
Outro aspecto relevante está relacionado aos mecanismos de fratura observados. As imagens de MEV sugerem um mecanismo misto de fratura, dado que em algumas regiões a matriz apresenta fratura frágil, caracterizada por superfícies lisas e seções pouco deformadas, enquanto outras áreas mostram indicações de mecanismos de reforço fibrilar, como ponteamto de trincas e extração de fibras ("pull-out"), (Saeed *et al.*, 2022.). Estes mecanismos ocorrem quando as fibras atuam retardando a propagação das trincas, absorvendo energia antes da ruptura completa, resultando em um aumento da tenacidade do material (Ranjbar *et al.*, 2016).

Dessa forma, os resultados microestruturais confirmam que a incorporação de fibras de poliéster no geopolímero influenciou a formação da matriz e seus mecanismos de falha, sendo um fator determinante para a melhora do desempenho mecânico, desde que haja boa aderência interfacial entre os constituintes. Ajustes na formulação e no tratamento superficial das fibras podem ser estratégias para otimizar essa interação, conforme sugerido por estudos recentes (Olajesu *et al.*, 2025).

5.3.5 Pasta geopolimerica com 3 % de fibra

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentadas nas Figuras 37(a) e 37(b), revelam importantes aspectos morfológicos da matriz geopolimérica contendo 3% de fibra de poliéster. Observa-se uma distribuição relativamente homogênea das fibras ao longo da matriz com setas laranjas, com alinhamento parcial e boa ancoragem física visto nas setas azuis. Essa organização favorece a formação de interfaces bem definidas entre as fibras e a matriz localizado nos círculos em verde, aspecto essencial para garantir uma eficiente transferência de tensões durante o carregamento mecânico do material.

Figura 25 – Micrografias das superfícies da pasta geopolimérica com 3% de fibra. (a) Aumento de 500x (b) Aumento de 1000x



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 37(b), nota-se a presença de uma camada aderida às superfícies das fibras, indicando a formação de um filme contínuo de gel geopolimérico (principalmente gel N-A-S-H), que é o principal produto da reação de ativação alcalina. Segundo Davidovits (2013), esse gel é responsável por conferir coesão e resistência ao compósito, e sua boa aderência às fibras sugere uma interface consolidada, com potencial para melhorar a resistência à tração e o controle da propagação de fissuras. Esse tipo de adesão é fundamental para o desempenho mecânico, pois impede o deslizamento livre das fibras dentro da matriz, conforme demonstrado por Chun *et al.* (2023), que associaram tal comportamento à eficiência do reforço em geopolímeros reforçados com fibras.

Além disso, percebe-se que o contorno das fibras está recoberto por produtos da matriz endurecida, o que indica uma boa molhabilidade da fibra pelo material geopolimérico ainda fresco. Boumehraz *et al.* (2024) observaram que quando a superfície da fibra é bem envolvida pela matriz, há uma melhora significativa no comportamento mecânico do compósito, especialmente em relação à ductilidade e à capacidade de absorver energia antes da fratura. Essa ancoragem reduz a formação de micro vazios na interface, o que é coerente com a imagem apresentada, na qual não se observam descontinuidades relevantes entre a fibra e a matriz.

Por outro lado, a matriz ao redor das fibras mostra-se densa e com poucos poros visíveis. Pequenas falhas ou microtrincas podem ser notadas, mas estão restritas a regiões pontuais. Esse aspecto indica que a adição de 3% de fibras não comprometeu significativamente a integridade estrutural da matriz, o que está em conformidade com os resultados encontrados por Peigang *et al.* (2028), os quais destacam que baixos teores de fibras, como 2% a 3%, promovem ganhos mecânicos sem induzir grandes heterogeneidades na microestrutura do geopolímero.

Arredondo *et al.* (2022) também enfatizam que a interface fibra/matriz exerce papel crucial na dissipação de energia mecânica durante a propagação de fissuras. No caso das imagens analisadas, a íntima ligação entre as fases parece favorecer justamente esse mecanismo, permitindo que as fibras atuem como pontes de transferência de carga e como obstáculos ao crescimento de trincas. Isso é especialmente importante em matrizes frágeis, como as geopoliméricas, que naturalmente apresentam comportamento pseudo-frágil sob tensão.

Portanto, com base na análise morfológica, pode-se afirmar que a adição de 3% de fibras de poliéster resultou em uma microestrutura coerente, com boa interface, distribuição relativamente homogênea das fibras e formação adequada do gel geopolimérico ao redor. Tais características apontam para um compósito com bom desempenho mecânico potencial, especialmente em termos de resistência à tração e tenacidade.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu desenvolver e avaliar telhas geopoliméricas reforçadas com fibras de poliéster, utilizando como principais matérias-primas o metacaulim e a escória de alto-forno, ambos ativados por solução de silicato de sódio e hidróxido de sódio. As matérias-primas foram devidamente caracterizadas por DRX e MEV, demonstrando que o metacaulim apresentou estrutura amorfa com elevada reatividade, enquanto a escória apresentou fases vítreas e conteúdo significativo de óxidos de cálcio e silício, contribuindo para a formação de géis C-A-S-H na matriz geopolimérica. As análises morfológicas também mostraram partículas finas, de formato irregular, com potencial para promover boa interação com a solução ativadora.

Do ponto de vista mecânico, os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram aplicados tanto em pastas geopoliméricas cilíndricas quanto em telhas em escala reduzida. Os melhores resultados foram observados nas amostras com 2% de fibra de poliéster, que apresentaram melhoria significativa na integridade estrutural e resistência à flexão, confirmando a eficácia do reforço com fibras na matriz geopolimérica. Por outro lado, a adição de 3% de fibras comprometeu a homogeneidade da pasta, possivelmente devido à saturação da matriz e à deficiência da ativação alcalina, o que resultou em partículas não reagidas e perda de desempenho mecânico.

A metodologia aplicada para produção das pastas permitiu observar, de forma controlada, o comportamento das diferentes formulações sob compressão axial e flexão, sendo uma etapa fundamental para validar a resistência do material em laboratório. Já a produção das telhas geopoliméricas, moldadas com fibras nas mesmas proporções, simulou a aplicação prática e evidenciou o potencial uso do compósito como substituto sustentável ao fibrocimento tradicional.

Em termos de formulação, a metodologia que apresentou o melhor desempenho foi aquela com 2% de fibra de poliéster, associada à cura a temperatura ambiente e relação adequada de ativadores, proporcionando boa coesão interna, aderência fibra-matriz e menor incidência de porosidade. As micrografias obtidas por MEV confirmaram a formação de uma matriz densa, com boa distribuição das fibras e aderência em níveis satisfatórios. Assim, conclui-se que:

As matérias-primas utilizadas são adequadas para a formação de geopolímeros de qualidade, sendo a escória uma fonte eficaz de cálcio e o metacaulim, uma fonte altamente reativa de alumino-silicato.

A adição de fibras de poliéster até 2% em volume é eficiente no reforço da matriz, promovendo melhoria das propriedades mecânicas, sobretudo na resistência à flexão.

A metodologia de produção das telhas e pastas foi adequada para avaliação de desempenho, sendo os ensaios destrutivos essenciais para comprovação da viabilidade técnica do material proposto.

Em vista disso, as telhas geopoliméricas produzidas neste estudo apresentam viabilidade como alternativa sustentável às telhas convencionais de fibrocimento, com o diferencial de reutilizar resíduos industriais (fibras) e reduzir impactos ambientais, representando um avanço no desenvolvimento de materiais ecoeficientes para a construção civil. A partir dos resultados, pode-se concluir:

- Desempenho Mecânico com Diferentes Teores de Fibra

As telhas com 1% e 2% de fibra de poliéster apresentaram os melhores resultados em ensaios de flexão, suportando cargas superiores às amostras sem fibra. Isso se deve à capacidade das fibras de controlar a formação e propagação de microtrincas, funcionando como um reforço estrutural eficiente.

- Resistência à Flexão e Comparação com Cimento Portland

Os compósitos com 2% de fibra mostraram desempenho satisfatório e comparável ao cimento Portland, com destaque para a maior tenacidade e capacidade de deformação antes da ruptura.

- Limite técnico da adição de fibra

A composição com 3% de fibra apresentou perda de desempenho. A quantidade elevada de fibras provocou desuniformidade na mistura, dificultando a reação completa dos componentes e aumentando a porosidade — o que se refletiu na queda da resistência mecânica.

- Resistência à Compressão

A resistência à compressão apresentou tendência decrescente com o aumento de fibra, sendo o melhor desempenho observado com 0,5% e 1% de fibra.

- **Análise Microestrutural (MEV)**

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram essenciais para entender o comportamento interno das pastas geopoliméricas:

- Nas amostras sem fibra (0%), observou-se uma matriz densa e contínua, mas com microfissuras características de retração ou fragilidade típica de materiais cerâmicos.
- Já nas amostras com 0,5% a 2% de fibra, as imagens revelaram boa interação entre a matriz e as fibras, com regiões de contato bem aderidas e menos espaços vazios. Essa aderência é importante para que as fibras de fato reforcem a matriz, absorvendo tensões durante esforços mecânicos.
- Em contrapartida, nas amostras com 3% de fibra, as micrografias mostraram falhas como bolhas, aglomerados de fibras mal distribuídas e áreas com partículas não reagidas. Esses defeitos comprometem a coesão da estrutura e explicam a perda de resistência observada nos ensaios.

- **Potencial para aplicação real**

Considerando os resultados obtidos, é possível afirmar que telhas geopoliméricas com até 2% de fibra de poliéster apresentam desempenho técnico viável para uso na construção civil, oferecendo uma alternativa sustentável ao cimento Portland e ao fibrocimento convencional.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Dada a abrangência do tema e os bons resultados preliminares, algumas possibilidades de continuidade e aprofundamento da pesquisa são:

- Estudos de durabilidade em ambientes reais

Submeter as telhas a condições externas, como chuva, radiação UV, variações de temperatura e umidade, para avaliar seu desempenho a longo prazo.

- Análise do conforto térmico e acústico

Verificar se o uso de fibras pode melhorar o isolamento térmico e sonoro, algo importante em regiões com clima quente ou construções de baixo custo.

- Uso de outras fibras ou resíduos

Investigar o efeito de outras fibras sintéticas ou naturais (como sisal ou juta), além de estudar misturas híbridas entre diferentes resíduos.

- Modelagem computacional das propriedades mecânicas

Simular o comportamento das telhas sob diferentes cargas usando softwares de elementos finitos, otimizando sua geometria e composição.

- Modelagem numérica

Avaliar custos de produção, logística e instalação em comparação com as telhas tradicionais, incluindo impactos ambientais e ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C674-13 (2023): **Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials**. West Conshohocken: ASTM International, 1988.
- ABD ELMOATY, A.E.M.; MORSY, A.M.; HARRAZ, A.B. **Effect of Fiber Type and Volume Fraction on Fiber Reinforced Concrete and Engineered Cementitious Composite Mechanical Properties**. Buildings 2022, 12, 2108.
- ABDELLI, Kamal; MAHFOUD, Tahlaiti; BELARBI, Rafik; OUDJIT, Mohamed Nadjib. **Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars**. Energy Procedia, v. 139, p. 230–235, dez. 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.201.
- AGUILAR, M. T. P. **Synthesis and characterization of geopolymers based on metakaolin and microparticles of granulated blast furnaces slag**. ,2019.
- AHMAD L. ALMUTAIRI, BASSAM A. TAYEH, ADEYEMI ADESINA, HAYTHAM F. ISLEEM, ABDULLAH M. ZEYAD. **Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review, Case Studies in Construction Materials**. Volume 15, 2021, e00733,ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>.
- AL-MAJIDI, M.H.; OLIVEIRA, A.P.; CUNDY, A.; TSILOULOU, O.T.; ALREKABI, S. **Desempenho à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com concreto geopolimérico reforçado com fibras sob corrosão acelerada**. Estruturas 2019, 19, 394–410.
- ALMEIDA, B. M. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto-forno**. 2023. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.
- ALVES, F.; FERRAZ, J. M. G.; PINTO, L. F. G.; SZMRECSÁNYI, T. **Certificação Socioambiental para a Agricultura. Desafios para o Setor Sucrialcooleiro**. São Carlos, S.P., 2008.

ALVES, L. et al. Fiber-matrix bond strength by pull-out tests on slag-based geopolymer with embedded glass and carbon fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 35, n. 18, p. 2035–2045, 2021.

ANDRADE, BRUNA DIAS. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

ANGELA ALTOMARE, CORRADO CUOCCI, G. DIEGO GATTA, ANNA MOLITERNI and ROSANNA RIZZI. **Methods of crystallography: powder X-ray diffraction** (2017).

ANTÓNIO, J.; TADEU, A.; MARQUES, B.; ALMEIDA, J. A. S. **A casca de arroz como fonte de energia em empresas beneficiadoras do grão**. *Revista Exacta*, 2020.

APOLONIO, H. A., PAES, H. C., RIBEIRO, A. G., & PINHEIRO, L. A. (2018). **O efeito do treinamento resistido de alta intensidade sobre a capacidade oxidativa muscular em ratos Wistar**. Repositório Institucional UNESP, 1-22

ARREDONDO, S.P.; CORRAL, R.; VALENCIANO, A.; ROSAS, C.A.; GÓMEZ, J.M.; MEDINA, T.J.; SOTO, M.; BERNAL, J.M. **Strength, Elastic Properties and Fiber–Matrix Interaction Mechanism in Geopolymer Composites**. *Polymers* **2022**, 14, 1248.

ASSAAD, J.; DAOU, M.; ISSA, C. **Effect of fiber surface characteristics on the bond performance of fiber-reinforced geopolymer composites**. *Construction and Building Materials*, v. 126, p. 688-698, 2016.

AMER, ISMAIL; ABDELKHALIK, AMR; MAYHOUB, OLA A.; KOHAIL, MOHAMED. **Development of sustainable slag-based geopolymer concrete using different types of chemical admixtures**. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 18, n. 27, 2024. Disponível em: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1186/s40069-024-00672-1>. Acesso em: 16 jul. 2025.

AZIMI, E., RAHIMI, A., AZIMI, A. (2016). **Alkali-activated geopolymer binders from industrial wastes.** *Journal of Cleaner Production*, 111, 317-327

BAI, CHENGYING; ZHENG, KANKAN; WANG, BIN; LI, BOZHI; SUN, GAOHUI; LI, XINYU; WANG, XIAODONG; QIAO, YINGJIE; COLOMBO, PAOLO. **Facile construction of porous epoxy resin/geopolymer composites using red mud and slag by well-distributed dual-blending.** *International Journal of Applied Ceramic Technology*, [S. l.], 20 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ijac.14833>. Acesso em: 26 maio 2025.

BAKLOUTI, S.; KOMNITSAS, K. **Morphology of Modified Biochar and Its Potential for Phenol Removal from Aqueous Solutions.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 146-155, mar. 2016.

Dundar, B., Tugluca, M.S., Ilcan, H. *et al.* **Valorização de agregados de concreto reciclado de baixa qualidade em sistemas à base de cimento por meio da carbonatação: avaliação do desempenho de engenharia.** *J Aust Ceram Soc* (2025). <https://doi.org/10.1007/s41779-025-01208-w>

KANG, SUNG-GYU; JEONG, WONSEOK; KIM, HWANGSUN; PAENG, JEONGIN; HAN, SEUNGWU; HAN, HEUNG NAM; CHOI, IN-SUK. **Amorificação mecânica de estado sólido de quartzo alfa intensificada por feixe de elétrons: reduzindo a barreira de deformação por meio de excesso de elétrons localizados como ânions móveis.** *arXiv preprint*, arXiv:2212.13098, 26 dez. 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2212.13098>. Acesso em: 26 maio 2025.

BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. **Handbook of Clay Science.** Elsevier, 2006.

BHARATH, K. **Geopolímeros: Materiais Sustentáveis para a Construção Civil.** São Paulo: Editora CRV, 2017.

BOUMEHRAZ, M.-A., GOUDJIL, K., MELLAS, M., HAMAIDIA, A., BOUCETTA, F., & BAALI, B. (2024). **Mechanical behavior of glass fiber-reinforced polyester in a humid environment.** *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, 5(2), e6274.

BRANTLEY, S. L., WHITE, A. F., & MOORE, J. N. (2022). **Fundamentals of Soil Clay Mineralogy**. Iowa State University Digital Press.

BRITO, WASHINGTON DA SILVA. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduos industriais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Orientador: José Antônio da Silva Souza.

BURDUHOS NERGIS, D.D.; VIZUREANU, P.; ARDELEAN, I.; SANDU, A.V.; CORBU, O.C.; MATEI, E. **Revealing the Influence of Microparticles on Geopolymers Synthesis and Porosity**. *Materials* 2020, 13, 3211. <https://doi.org/10.3390/ma13143211>

BATISTA, RODOLFO LUÍS. **Estudo físico-mecânico de concreto com adição mineral de Metacaulim**. 2021. 57 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2021.

KLIKA, Z.; VALÁŠKOVÁ, M.; BARTOŇOVÁ, L.; MAIEROVÁ, P. **Quantitative Evaluation of Crystalline and Amorphous Phases in Clay-Based Cordierite Ceramic**. *Minerals* 2020, 10, 1122. <https://doi.org/10.3390/min10121122>

CASTRO, PALOMA BRITO. **Avaliação do comportamento mecânico e da durabilidade de argamassas álcali-ativadas para uso como material de reparo**. Universidade Federal da Bahia, 2017.

STEVENSON, CHRISTOPHER M.; GURNICK, MARY. Structural collapse in kaolinite, montmorillonite and illite clay and its role in the ceramic rehydroxylation dating of low-fired earthenware. *Journal of Archaeological Science*, [S.l.], v. 69, p. 54–63, maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.03.003>. Acesso em: 26 maio 2025.

CORRÊA, T. C. (2021). **Estudo morfológico preliminar de materiais geopoliméricos com escória de alto-forno submetidos a altas temperaturas**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará.

COSTA, RAYARA PINTO; PY, LUCAS GOLDENBERG; SACARDO, LUCAS EDUARDO PERIN; LONGHI, MARLON AUGUSTO; KIRCHHEIM, ANA PAULA. **Geopolímero à base de metacaulim: medidas de impedância eletroquímica e**

resistência à compressão. In: Anais do ENARC, Porto Alegre, RS, Brasil, 3, 4 e 5 de novembro de 2021.

DAVIDOVITS, JOSEPH. 2015. **Geopolymer Chemistry and Applications.** 4th edition. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère.de Engenharia.

DIANGUANG LIU, XUANHAO DU, KE ZHAO, ZONGBEI HE, YONGHONG LU, XINCHAO ZHANG, **JINLING LIU.** **Sintering behavior and mechanical properties of β -SiC ceramics under oscillatory pressure.** *Ceramics International*, Volume 50, Issue 1, Part A, 2024, Pages 1231-1238.

Dutrow, B. L., & Clark, C. M. (2019). X-ray Diffraction Analysis in Mineralogy. *Journal of Geoscience Education*, 67(2), 132-145.

FALL, D.; ESKOLA, M.; LILLQVIST, K.; OLLI, J. **The impact of controlled porosity on the mechanical performance of geopolymers.** *Materials Science and Engineering A*, v. 758, p. 1-11, 2019.

FARÍAS, EVILANE CÁSSIA. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de agentes agressivos em concretos com resíduos da biomassa da cana-de-açúcar.** 2019.

GARCIA-VALLES, M.; AFONSO, P.; OLIVEIRA, S.; ROCA, N. **Caracterização Mineralógica e Térmica de Argilas Caulínicas de Terra Alta (Catalunha, Espanha).** *Minerais* 2020, 10, 142. <https://doi.org/10.3390/min10020142>

GUGGENHEIM, S., & MARTIN, R. T. (1995). **Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA and CMS nomenclature committees.** *Clays and Clay Minerals*, 43(2), 255–256.

GÖKÇE, H. S. **Durability of slag-based alkali-activated materials: a critical review.** *Journal of the Australian Ceramic Society*, [S. l.], v. 60, p. 885–903, 1 abr. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41779-024-01011-z>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GIFT, CHELLA; CHRISTOPHER, RAMESH GOPAL; SADASIVAM, SASIVARADHAN; ESAKKI, A. K. DEVI KEERTHIKA; KURUNJI, P. DINESH.

Avaliação experimental de tenacidade e durabilidade de compósito FRC reforçado com combinação de fibra de aço-poliéster. *Revista Internacional de Estruturas e Materiais de Concreto*, v. 17, n. 39, 2023. Disponível em: <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1186/s40069-023-00599-z>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GIMIN, PARQUE; KIM, JIYONG; WOO, SEUNGJAI; YU, JINWOO; KHAN, SALMAN; KIM, SANG KYU; LEE, HOTAIK; LEE, SOYOUNG; KWON, BOKSOON; KIM, WOOCHUL. **Modelagem da transferência de calor em humanos para coleta de calor corporal e gerenciamento térmico pessoal.** *Energia Aplicada*, v. 323, p. 119609, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119609>. Acesso em: 16 jul. 2025.

HONGZHI ZHANG, YADING XU, YIDONG GAN, ERIK SCHLANGEN, BRANKO ŠAVIJA. **Experimentally validated meso-scale fracture modelling of mortar using output from micromechanical models.** *Cement and Concrete Composites*, Volume 110, 2020, 103567, ISSN 0958-9465.

HUSSEIN TA, MOSABER PANAH MA, KURDA R. **Synergic effect of polyester fiber and nano silica on chemical resistance of geopolymer mortar.** *PLoS One*. 2023 Sep 26;18(9):e0289497. doi: 10.1371/journal.pone.0289497 ISSN 0272-8842.

JEANS CV. MOORE, D. M. & REYNOLDS, R. C., JR. 1997. **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd ed. xviii + 378 pp.** Oxford, New York: Oxford University Press. Price £27.95 (spiral-bound paperback). ISBN 0 19 508713 5. *Geological Magazine*. 1998;135(6):819-842. doi:10.1017/S0016756898501501

JIAJIN ZHONG, NA LI, XIAOXUAN XU, LIMIN WEI, HUIJIAN LIU, HUIJUAN LI, ZHENG FANG, HAIFENG BAO. **The effects of multiphase composition on structure and mechanical properties of ZrO₂/Si-C-O ceramic fibers by sol-gel process.** *Ceramics International*, Volume 49, Issue 10, 2023, Pages 16283-16289.

JWAIDA, Z.; DULAIMI, A.; MASHAAN, N.; OTHUMAN MYDIN, M.A. **Geopolymers: The Green Alternative to Traditional Materials for Engineering Applications.** *Infrastructures* 2023, 8, 98.

KALIL, SARAH ACATAUASSÚ; BERTOLINO, LUIZ CARLOS; CAMPOS, VICTOR MATHEUS JOAQUIM SALGADO. **Caracterização mineralógica de uma ocorrência de caulim halloysítico em pegmatito no município de Paraíba do Sul, Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro / CETEM, 2020.

KHAN, K.; AMIN, M.N.; USMAN, M.; IMRAN, M.; AL-FAIAD, M.A.; SHALABI, F.I. **Effect of Fineness and Heat Treatment on the Pozzolanic Activity of Natural Volcanic Ash for Its Utilization as Supplementary Cementitious Materials.** Crystals 2022, 12, 302.

KLUG, H. P., & ALEXANDER, L. E. (1974). **X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials.** John Wiley & Sons.

KORNIEJENKO, KINGA; FRĄCZEK, E.; PYTLAK, E.; ADAMSKI, MICHAŁ. **Propriedades mecânicas de compósitos de geopolímero reforçados com fibras naturais.** Procedia Engenharia, v. 151, p. 388–393, dez. 2016.

KUNHI MOHAMED, A.; MOUTZOURI, P.; BERRUYER, P.; WALDER, B. J.; SIRAMANONT, J.; HARRIS, M.; NEGRONI, M.; GALMARINI, S. C.; PARKER, S. C.; SCRIVENER, K. L.; EMSLEY, L.; BOWEN, P. **The Atomic-Level Structure of Cementitious Calcium Aluminate Silicate Hydrate.** J. Am. Chem. Soc. 2020, 142, 11060–11071.

KHEIMI, MARWAN, IKMAL HAKEM AZIZ, MOHD MUSTAFA AL BAKRI ABDULLAH, MOHAMMAD ALMADANI E RAFIZA ABD RAZAK. 2022. **Resíduos por geopolimerização para aplicações pesadas: uma revisão,** Materiais 15, nº 9: 3205. <https://doi.org/10.3390/ma15093205>

ŁACH, M.; KLUSKA, B.; JANUS, D.; KABAT, D.; PŁAWECKA, K.; KORNIEJENKO, K.; GUIGOU, M.D.; CHOIŃSKA, M. **Effect of Fiber Reinforcement on the Compression and Flexural Strength of Fiber-Reinforced Geopolymers.** Appl. Sci. 2021, 11, 10443.

KOLADE, ANUOLUWAPO SOLA; IKOTUN, BOLANLE DEBORAH; OYEJOBI, DAMILOLA OYEWUMI. **A review of the chemistry, waste utilization, mix design and performance evaluation of geopolymer concrete.** *Iranian Journal of Science*

and Technology, Transactions of Civil Engineering, [S. l.], v. –, p. –, 25 mar. 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40996-025-01801-w>. Acesso em: 16 jul. 2025.

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**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29786>. Acesso em: 26 maio 2025.

LUCAS, M. M. **Materiais cimentícios geopoliméricos a partir de escória de alto-forno: um estudo morfológico preliminar**. 2021. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

LV, CHUN, DAN WU, GUOLIANG GUO, YANMING ZHANG, SHUANG LIU, ENXIANG QU, AND JIE LIU. 2023. **Effect of Plant Fiber on Early Properties of Geopolymer** *Molecules* 28, no. 12: 4710.

LUHAR, I.; LUHAR, S. **Uma revisão abrangente sobre o geopolímero à base de cinzas volantes**. *J. Compos. Sci.* **2022**, 6, 219. <https://doi.org/10.3390/jcs6080219>.

LIU, Wenkai; JU, Shenghong. **Condutividade térmica sintonizável de geopolímeros sustentáveis pela razão Si/Al e teor de umidade: insights de simulações atomísticas**. arXiv, [s. l.], 21 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.11522>. Acesso em: 15 jul. 2025.

MARTINS, GABRIEL LIMA OLIVEIRA. **Microestrutura de pastas de cimento Portland contendo nanossílica funcionalizada com diferentes proporções de aminosilano**. Brasília: Universidade de Brasília, 2022.

MIRGOZAR LANGAROUDI, M.A.; MOHTASHAM MOEIN, M.; SARADAR, A.; KARAKOUZIAN, M. **Investigation of the Mechanical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Geopolymer Mortars Containing Metakaolin and Glass Powder**. *Infrastructures* 2025, 10, 25.

MOHAMMED, MOHAMMED; RASIDI, M. S. M.; MOHAMMED, AESHAH M.; RAHMAN, ROZYANTY; OSMAN, AZLIN F.; ADAM, TIJJANI; BETAR, BASHIR O.; DAHHAM, OMAR S. **Interfacial bonding mechanisms of natural fibre-matrix composites: an overview.** *BioResources*, v. 17, n. 3, p. 7031–7090, 2022.

MOUJOURD, Zineb; SAIR, Said; OUSALEH, Hanane Ait; AYOUCHE, Ikrame; EL BOUARI, Abdeslam; TANANE, Omar. Compósitos de geopolímero reforçados com fibras naturais: uma revisão dos avanços recentes no processamento e nas propriedades. **Construction and Building Materials**, v. 388, art. 131666, 24 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131666>.

MUDHAVALLI, N.K.; POOVIZHISELVI, M. Relationship between Compressive Strength and Flexural Strength of Polyester Fiber Reinforced Concrete. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 45, n. 4, p. 158–160, 2017.

MURRAY, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays.* Elsevier.

MUHAMMAD UMER, JUNAID AHMAD, HINA MUKHTAR, **Innovative valorization of biomass waste-derived sodium silicate for geopolymer concrete synthesis: Sustainability assessment and circular economy potential**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 452, 2024.

MINGMING SANG, HENGZE ZHAO, YE LI E LINGQI ZHU, **Preparação de um Geopolímero Poroso (SPG) para Uso como adsorvente para²⁺ Remoção** *Langmuir* **2024** 40 (17), 8851-8861 DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c04013

MAGED A, EL-FATTAH HA, KAMEL RM, KHARBISH S, ELGARAHY AM. **Uma revisão abrangente sobre geopolímeros sustentáveis à base de argila para tratamento de águas residuais: economia circular e perspectivas futuras.** *Environ Monit Avaliar.* 2023 19 de maio; 195(6):693.

MODA, C., HIGASIARAGUTI, K. M., ARAUJO, L. S., & SCHIAVETO, A. P. S. (2023). **Neurofisiologia da termorregulação: uma breve revisão.** *Manuscripta Medica*, 6, 3–10. <https://doi.org/10.59255/mmed.2023.84>

NIKRAVAN, Morteza; FIRDOUS, Rafia; STEPHAN, Dietmar. **Avaliação do ciclo de vida de materiais alcalino-ativados: uma revisão sistemática da literatura.** *Low-carbon Materials and Green Construction*, v. 1, n. 13, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44242-023-00013-7>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NANTHINI, M.; GANESAN, R.; JAGANATHAN, V. **Estudos sobre ativador alcalino, métodos de fabricação e propriedades mecânicas do concreto geopolimérico – uma revisão.** *Jornal de Nanotecnologia Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 52-72, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.13074/jent.2024.09.242753>. Acesso em: 15 jul. 2025.

MATSIMBE J, DINKA M, OLUKANNI D, MUSONDA I. **Geopolímero: Uma Revisão Sistemática de Metodologias.** *Materiais (Basileia)*. 2 de outubro de 2022

N'CHO, Wilfried Cyrille; GHARZOUNI, Ameni; SOBRADOS, Isabel; JOUIN, Jenny; AIMABLE, Anne; ROSSIGNOL, Sylvie. **Extrudabilidade de geopolímeros e controle das redes formadas por potencial zeta e espectroscopia de RMN.** *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, v. 7, n. 1, e10244, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ces2.10244>. Acesso em: 15 jul. 2025.

OLAJESU, OLANREWAJU F.; OLADELE, ISIAKA OLUWOLE; ADELANI, SAMSON OLUWAGBENGA. **Recent advances in natural fiber reinforced metal/ceramic/polymer composites: an overview of the structure-property relationship for engineering applications.** *Hybrid Advances*, v. 8, p. 100378, 2025. DOI: 10.1016/j.hybadv.2025.100378.

PAIVA, M. V. de; CARVALHO, C. M.; SIMAS, T. B. **Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil.** In: **CONGRESSO NACIONAL DE ARQUITETURA E URBANISMO**, 2., 2020, Santana do Araguaia. Anais. Santana do Araguaia: Unifesspa, 2020. p. 1-10.

PEIGANG HE, LINGYU JIA, GUORU MA, RUIFEI WANG, JINGKUN YUAN, XIAOMING DUAN, ZHIHUA YANG, DECHANG JIA. **Effects of fiber contents on the mechanical and microwave absorbent properties of carbon fiber felt**

reinforced geopolymer composites. *Ceramics International*, Volume 44, Issue 9, 2018, Pages 10726-10734,

PEREIRA, A. M., SILVA, C. A. R. D., QUEIROZ, D. C. D. A., MORAES, M. J. B. D., MELGES, J. L. P., & AKASAKI, J. L. (2015). **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz.** *Matéria* (Rio de Janeiro), 20, 227-238.

PEREIRA, DAMIÃO DE CARVALHO. **Desenvolvimento de isolantes cerâmicos a base de geopolímeros de silicato de alumínio com resíduos de madeira para controle da densidade e porosidade após queima.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2018.

PIMENTEL, Maurílio Gomes et al. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. *Brazilian Applied Science Review*, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2017.

PORTO, A. B. R. **Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto-forno.** 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

PRABUA, B.; R KUMUTHAB & K VIJAI. **Effect of fibers on the mechanical properties of fly ash and GGBS based geopolymer concrete under different curing conditions.** *Materials Today: Proceedings*, v. 17, p. 357–363, 2019.

PREZA, A. L. **Geopolímeros: uma alternativa sustentável ao cimento Portland.** *Revista Brasileira de Engenharia Civil e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 35-45, 2021.

PROVIS, J. L., & VAN DEVENTER, J. S. J. (2014). **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**, RILEM TC 224-AAM. Springer.

QAIDI, Shaker; ATRUSHI, Dawood Sulaiman; MOHAMMED, Ahmed Salih; AHMED, Hemn Unis; et al. **Concreto geopolimérico de ultra-alto desempenho: uma revisão.** *Construction and Building Materials*, v. 346, p. 128495, jul. 2022.

QIN, L.; YAN, J.; ZHOU, M.; LIU, H.; WANG, A.; ZHANG, W.; DUAN, P.; ZHANG, Z. **Mechanical properties and durability of fiber reinforced geopolymer composites: a review on recent progress.** Engineering Reports, 2023. DOI: 10.1002/eng2.12708.

Quintão, C. M. (2018, julho 25). **Influência da adição do metacaulim nas propriedades do concreto em contato com atmosferas agressivas em estruturas de tratamento anaeróbio de esgoto,** (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte).

RANJBAR, Navid; MEHRALI, Mehdi; BEHNIA, Arash; PORDSARI, Alireza Javadi; MEHRALI, Mohammad; ALENGARAM, U. Johnson; JUMAAT, Mohd Zamin. **Um estudo abrangente do geopolímero à base de cinzas volantes reforçado com fibra de polipropileno.** PLOS ONE, San Francisco, v. 11, n. 1, p. 1–19, 25 jan. 2016.

RODRIGUES, D. A. E (2014). **Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos.** Dissertação (Mestrado de engenharia química), Universidade federal de minas gerais.

S BEN KHEMIS, E. BUROV, H. MONTIGAUD, D. SKRELIC, E. GOUILLART, *et al.* **Structural analysis of sputtered amorphous silica thin films: A Raman spectroscopy investigation.** Thin Solid Films, 2021, 733, pp.138811.

SAEED, Ahmed; NAJM, Hadee Mohammed; HASSAN, Amer; SABRI, Mohanad Muayad Sabri. Properties and applications of geopolymer composites: a review study of mechanical and microstructural properties.

SAVERIO FIORE, F. JAVIER HUERTAS, FRANCISCO HUERTAS, AND JOSÉN LINARES (1995). **Morphology of kaolinite crystals synthesized under hydrothermal conditions.** 32(6), 483–490.

SHILANG XU, MALIK, M., A.; ZHANG, Q.; LI. Q.; SARKAR, M. **Influence of the PVA fibers and SiO₂ NPs on the structural properties of fly ash based sustainable geopolymer.** Construction and Building Materials, v. 148, p. 276–284, 2018.

SHINZATO, MIRIAN CHIEKO; MONTANHEIRO, T. J.; JANASI, V. A.; NEGRI, F. A.; YAMAMOTO, J. K. **Remoção de Pb²⁺ e Cr³⁺ em solução por zeólitas naturais associadas a rochas eruptivas da formação Serra Geral, bacia sedimentar do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 3, p. 525-532, 2008.

SILVA NETO, João Trajano da. **Compósito cimentício reforçado com fibras poliméricas de alta resistência mecânica.** 2018. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11360>.

SILVA, A. C. (2019). **Desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria e metacaulim ativado com adição de cinza de ossos bovinos.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

SILVA, A. C. R. da; CORRÊA, T. C. (2020). **Materiais cimentícios geopoliméricos a partir de escória de alto-forno.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará.

SILVA, J. **Sustentabilidade na Construção: Uso de Resíduos e Materiais Ecológicos.** São Paulo: Editora ABC, 2018. p. 47.

SOUZA, A. C. S., FERNANDES, A. M., FERNANDES, L. A., & SILVA, A. M. (2019). **Metodologia da pesquisa científica aplicada à geologia.** Natal: Editora da UFRN.

SPADA, JORDANA CORRALO; SILVA, CAMILA ISERHARDT. **Efeito de diferentes sais nas propriedades de géis à base de amido de pinhão.** 2019. Artigo de conferência. Disponível em: Biblioteca Digital UFRGS

SOUZA, LUÍZA FERREIRA MOREIRA DE. **Estudo da influência da adição de polímero superabsorvente e metacaulim na retração autógena, resistência à compressão e microestrutura de microconcretos.** 2025. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5003>.

SKANE, RAMON; JONES, FRANCA; VAN RIESSEN, ARIE; JAMIESON, EVAN; SUN, XIAO; RICKARD, WILLIAM D. A. **Optimisation of activator solutions for**

geopolymer synthesis: thermochemical stability, sequencing, and standardisation. *arXiv preprint*, [S. l.], 15 jun. 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.12941>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SILVA NETO, JOÃO TRAJANO DA; SOARES JUNIOR, PAULO ROBERTO RIBEIRO; REIS, ELVYS DIAS; MACIEL, PRISCILA DE SOUZA; CESAR, PAULO; GOUVEIA, CLARET MARIA CLARET; BEZERRA, AUGUSTO CESAR DA SILVA. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras: avanços recentes e perspectivas futuras sobre as principais propriedades para o projeto de alto desempenho.** *Revista Descubra Engenharia Civil*, v. 2, artigo n. 65, 2025.

SOUZA, LARISSA PEREIRA DE; BRACHT, MATHEUS KÖRBES; COSTA, VANESSA APARECIDA CAIEIRO DA; MELO, ANA PAULA. **Uma visão holística das soluções em habitação social em São Paulo - Brasil: emissões de CO₂, desempenho e custo das composições de telhados.** In: *Building Simulation 2023*, Xangai, China, setembro 2023. DOI: 10.26868/25222708.2023.1312.

TEMUJI, P. S.; HOSSEINI, P.; VELASCO, R. **Influence of polyester fibers on the fracture behavior of geopolymeric mortars.** *Cement and Concrete Composites*, v. 82, p. 89-97, 2017.

ULLOA, Néstor; ONYELOWE, Kennedy C.; EBID, Ahmed M.; CURAY YAULEMA, Carlos Santiago; ZUIGA RODRIGUEZ, Maia Gabriela; ANDRADE VALLY, Aleis Ivan; ONYIA, Michael E. **Influência da molaridade alcalina na resistência à compressão de concretos geopoliméricos de alta resistência utilizando técnicas de aprendizado de máquina baseadas em regimes de cura e temperatura.** *Frontiers in Built Environment*, v. 10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1455915>. Acesso em: 15 jul. 2025.

VALADARES E SILVA, JULIANE. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola

VAZ JÚNIOR, A. F.. **Utilização de resíduos agroindustriais na construção**. Campinas: Editora da Unicamp, 2020.

VIEIRA, C. M. F., & SÁNCHEZ, R. (2010). **Influence of Quartz on the Properties of Clay-Based Ceramics**. *Materials Science and Engineering*, 527(24-25), 6714-6720.

VIOLA, V.; D'ANGELO, A.; VERTUCCIO, L.; CATAURO, M. **Geopolímeros à base de metacaulim preenchidos com resíduos industriais: melhoria das propriedades físico-químicas por meio da reciclagem sustentável de resíduos**. *Polímeros* 2024, 16, 2118. <https://doi.org/10.3390/polym16152118>

VOICU RC, GOLOGANU M, TIBEICA C, SANTIAGO-CALVO M, ASENSIO M, CAÑIBANO E, NEDELCO O, SANDU T. **Predição de propriedades mecânicas de compósitos biopoliméricos à base de nano-argila**. *Nanomateriais*. 2024; 14(17):1403. <https://doi.org/10.3390/nano14171403>

WANG, T.; FAN, X.; GAO, C.; QU, C.; LIU, J.; YU, G. **The Influence of Fiber on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Review**. *Polymers* 2023, 15, 827.

WONGSA, A.; KUNTHAWATWONG, R.; OLIVEIRA, S.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. **Argamassa de geopolímero de cinzas volantes com alto teor de cálcio reforçado com fibra natural**. *Construção. Mater.* 2020, 241, 118143.

YAZID, M. H.; FARIS, M. A.; ABDULLAH, M. M. A. B.; NABIAŁEK, M.; RAHIM, S. Z. A.; SALLEH, M. A. A. M.; KHEIMI, M.; SANDU, A. V.; RYLSKI, A.; JEŽ, B. **Contribution of interfacial bonding towards geopolymers properties in geopolymers reinforced fibers: A review**. *Materials*, v. 15, n. 4, p. 1496, 2022. DOI: 10.3390/ma15041496.

Wang, Y.; Zhang, J.; Liu, J.; Ventilador, D.; Qu, H.; Zhou, L.; Zheng, S. **Efeitos de diferentes fontes de cálcio nas propriedades mecânicas de geopolímeros de metacaulim**. *Materiais* 2024, 17, 2087. <https://doi.org/10.3390/ma17092087>

YONGJIE YANG, MAGUY JABER, LAURENTJ. MICHOT, BAPTISTE RIGAUD, PHILIPPE WALTER, LUCIE LAPORTE, KENAN ZHANG, QINFU LIU (2023). **Analysis of the microstructure and morphology of disordered kaolinite based on the particle size distribution.**

YOOSUK, Piyathida; SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdasak; HIROKI, Goda; PHOONGERNKHAM, Tanakorn;. **Desempenho da argamassa de geopolímero de cinzas volantes leve celular reforçada com fibra de polipropileno sob ciclos úmidos e secos.** Estudos de Caso em Materiais de Construção, v. 20, n. 5, e03233, maio 2024.

Youssef Ettahiri, Lahcen Bouna, Akhsassi Brahim, Abdeljalil Benlhachemi, Bahcine Bakiz, Pedro J. Sánchez-Soto, Dolores Eliche-Quesada, Luis Pérez-Villarejo, **Synthesis and characterization of porous and photocatalytic geopolymers based on natural clay: Enhanced properties and efficient Rhodamine B decomposition,** Applied Materials Today, Volume 36, 2024.

ZHANG, J.; WANG, Y.; LIU, X. **Crack propagation in fiber-reinforced geopolymer composites: A micromechanical analysis.** Journal of Materials Research and Technology, v. 9, p. 1321-1332, 2020.

ZHANG, M.; LI, N.; LI, G.; LI, L. **Quasi-static and Dynamic Mechanical Properties of Engineered Geopolymer Composites with Hybrid PVA and Recycled Steel Fibres.** Construction and Building Materials, v. 250, p. 118824, 2023.

ZHANG, Y. et al. **Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review.** Construction and Building Materials, v. 328, p. 127064, 2022.

Zhang, P.; Sol, X.; Wang, F.; Wang, J. **Propriedades mecânicas e durabilidade do concreto agregado reciclado com geopolímero: uma revisão.** *Polímeros* **2023**, 15, 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>