



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
PRÓ - REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

THAMILY UCHOA VIEIRA

**GEOPOLÍMERO PRODUZIDO COM DOIS DIFERENTES RESÍDUOS: LODO DE
ETA COMO PRECURSOR E AREIA DE VIDRO COMO AGREGADO**

MACAPÁ

2025

THAMILY UCHOA VIEIRA

**GEPOLÍMERO PRODUZIDO COM DOIS DIFERENTES RESÍDUOS: LODO DE
ETA COMO PRECURSOR E AREIA DE VIDRO COMO AGREGADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciências Ambientais, da Universidade Federal do Amapá, para obtenção do título de bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador(a): Profa. Dra. Gêssica Zila Batista dos Santos

MACAPÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP
Elaborado por Cristina Fernandes – CRB-2 / 1569

V658g Vieira, Thamilly Uchôa.

Geopolímero produzido com dois diferentes resíduos: lodo de ETA como precursor e areia de vidro como agregado / Thamilly Uchôa Vieira. - Macapá, 2025.

1 recurso eletrônico.

34 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Ciências Ambientais, Macapá, 2025.

Orientadora: Gessica Zila Batista dos Santos.

Coorientador: .

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Material cerâmico. 2. Sustentabilidade. 3. Construção civil. I. Santos, Gessica Zila Batista dos, orientadora. II. Universidade Federal do Amapá. III. Título.

CDD 23. ed. – 363.7

VIEIRA, Thamilly Uchôa. **Geopolímero produzido com dois diferentes resíduos: lodo de ETA como precursor e areia de vidro como agregado.** Orientadora: Gessica Zila Batista dos Santos. 2025. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Ciências Ambientais. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2025.

THAMILY UCHÔA VIEIRA

GEOPOLÍMERO PRODUZIDO COM DOIS DIFERENTES RESÍDUOS: LODO DE ETA COMO PRECURSOR E AREIA DE VIDRO COMO AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Bacharelado em Ciências
Ambientais, da Universidade Federal do
Amapá, para obtenção do título de bacharel
em Ciências Ambientais.

Data de aprovação: 25/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **GESSICA ZILA BATISTA DOS SANTOS**
Data: 15/10/2025 13:55:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Gessica Zila Batista dos Santos (UNIFAP)
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **KARINA CARDOSO VALVERDE**
Data: 15/10/2025 11:12:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karina Cardoso Valverde (UNIFAP)
Avaliador 1

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO JOSE DE OLIVEIRA**
Data: 15/10/2025 11:33:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo José de Oliveira (UNIFAP)
Avaliador 2

DEDICATÓRIA

Dedico

Primeiramente a Deus, por me sustentar em cada passo desta caminhada longa e desafiadora, por me dar forças nos momentos de cansaço e fé nos dias de incerteza.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio constante e por nunca deixarem de acreditar em mim.

À minha orientadora, pela oportunidade, pela confiança depositada em meu trabalho e por ter acreditado no potencial desta pesquisa desde o início.

E a todas as pessoas que, de alguma forma, estiveram ao meu lado durante essa jornada. A presença, o incentivo e as palavras de apoio fizeram toda a diferença.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me guiado até aqui. Por me dar forças nos momentos difíceis, por me sustentar quando pensei em desistir e por iluminar meu caminho com sabedoria e esperança.

Ao curso que, por ironia do destino, entrou na minha vida sem ser planejado, mas que acabou me mostrando novas possibilidades, me ensinando muito mais do que conteúdos acadêmicos, e me fazendo descobrir um propósito.

À minha orientadora Gêssica Santos, pela oportunidade incrível de desenvolver essa pesquisa. Por confiar no meu potencial, por acreditar no meu trabalho mesmo quando nem eu mesma acreditava. Obrigada pela paciência, incentivo e por caminhar comigo nesse processo que, apesar de desafiador, foi extremamente enriquecedor.

Aos meus pais, pelos conselhos, orações e apoio nos momentos em que precisei.

À minha família em geral e colegas, que, de diferentes formas, me apoiaram, torceram e acreditaram em mim.

À Lídia Meire e aos Laboratórios de Mineração e Construção do IFAP pela parceria;

À Adriana Maciel e ao Laboratório de Pesquisa em Fármacos da UNIFAP por fornecer o equipamento Microscópio eletrônico de varredura - MEV para a pesquisa;

A cada um de vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento.

GEPOLÍMERO PRODUZIDO COM DOIS DIFERENTES RESÍDUOS: LODO DE ETA COMO PRECURSOR E AREIA DE VIDRO COMO AGREGADO

Autora: Thamilly Uchôa Vieira

Orientadora: Gêssica Zila Batista dos Santos

Curso de Bacharelado em Ciências Ambientais

Macapá, 25 de abril de 2025

RESUMO

Visando mitigar impactos ambientais, neste trabalho se propôs como alternativa de gerenciamento para o lodo gerado na Estação de Tratamento de Água (ETA) de Macapá, Amapá, Brasil, a produção de geopolímeros, um tipo material cerâmico que pode ser desenvolvido à temperatura ambiente, por meio de ativação alcalina. Na produção de geopolímeros é possível utilizar uma variedade de resíduos como matéria-prima, desde que sejam compostos de alumínio (Al), silício (Si) e/ou potássio (K), por exemplo. Neste trabalho, além de utilizar o lodo de ETA como matéria-prima principal, buscou-se verificar se seria tecnicamente viável utilizar a areia proveniente de vidro moído como agregado, substituindo deste modo ao agregado de origem natural - a areia de rio. Neste sentido, foram produzidos dois diferentes geopolímeros, ambos utilizando o lodo de ETA como precursor, mas com dois diferentes agregados: a areia de rio e a areia de vidro moído. O processamento dos materiais envolveu as fases de secagem, moagem, peneiramento e calcinação. Em seguida, foram moldados corpos de prova de geopolímeros, os quais foram avaliados quanto à resistência à compressão e microestrutura. Os resultados comprovam que é tecnicamente viável produzir geopolímeros utilizando lodo de ETA como precursor e areia de vidro como agregado, pois quando submetido ao ensaio de resistência mecânica, este material apresentou, aos 28 dias, uma resistência de média 16 MPa, sendo adequado para diversos usos pela indústria da construção. Além disso, sua microestrutura se mostrou coesa e homogênea. Neste contexto, constatou-se que é possível produzir novos materiais cerâmicos utilizando lodo de ETA como precursor e areia de vidro moído como agregado. Esta é, portanto, uma alternativa sustentável para o gerenciamento de resíduos, promovendo a conservação de recursos naturais e reduzindo o impacto ambiental na construção civil.

Palavras-chave: Material cerâmico; Sustentabilidade; Construção civil.

ABSTRACT

Aiming to mitigate environmental impacts, this study proposed the production of geopolymers, a type of ceramic material that can be developed at room temperature through alkaline activation, as an alternative management solution for the sludge generated at the Water Treatment Plant (WTP) in Macapá, Amapá, Brazil. In the production of geopolymers, it is possible to use a variety of waste materials as raw materials, provided they are composed of aluminum (Al), silicon (Si), and/or potassium (K), for example. In this work, in addition to using WTP sludge as the main raw material, we sought to verify whether it would be technically feasible to use sand from ground glass as an aggregate, thus replacing the natural aggregate - river sand. In this sense, two different geopolymers were produced, both using WTP sludge as a precursor, but with two different aggregates: river sand and ground glass sand. The processing of the materials involved the stages of drying, grinding, sieving, and calcination. Geopolymer test specimens were then molded and evaluated for compressive strength and microstructure. The results prove that it is technically feasible to produce geopolymers using WTP sludge as a precursor and glass sand as an aggregate, since when subjected to mechanical strength testing, this material presented an average strength of 16 MPa after 28 days, making it suitable for various uses in the construction industry. In addition, its microstructure proved to be cohesive and homogeneous. In this context, it was found that it is possible to produce new ceramic materials using ETA sludge as a precursor and ground glass sand as an aggregate. This is, therefore, a sustainable alternative for waste management, promoting the conservation of natural resources and reducing the environmental impact of civil construction.

Keywords: Ceramic material; Sustainability; Civil construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo	14
Figura 2 - Lodo de ETA: a) Processo de secagem; b) Moído e macerado posteriormente.....	16
Figura 3 - Lodo de ETA: a) processo de peneiramento; b) resíduo peneirado	16
Figura 4 - Lodo de ETA: a) antes de ser calcinado; b) depois de ser calcinado	17
Figura 5 - a) Processo de maceração; b) Peneiramento	17
Figura 6 - a) Areia de vidro antes; b) Depois de peneirado	18
Figura 7 - a) Areia convencional antes; b) Depois de peneirada	18
Figura 8 - Esquema de mistura	19
Figura 9 - a) Materiais para solução alcalina; b) Solução sendo preparada.....	19
Figura 10 - Materiais prontos para mistura.....	20
Figura 11 - a) Mistura de todos os componentes; b) Moldagem dos corpos de prova	21
Figura 12 - a) Prensa manual utilizada para os ensaios mecânicos.....	22
Figura 13 - a) Corpos de prova desmoldados; b) Material sendo submetido ao ensaio mecânico.	22
Figura 14 - a) Fragmento da amostra com areia de vidro; b) Fragmento da amostra com areia.....	23
Figura 15 - Microscópio eletrônico de varredura	23
Figura 16 - Resultados de resistência à compressão axial	25
Figura 17 - Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero produzido com areia de vidro.....	26
Figura 18 - Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero com areia convencional.	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
2.1 GERAL.....	10
2.2 ESPECÍFICOS	10
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE	11
3.2 GEOPOLÍMEROS	12
3.3 PRECURSORES E AGREGADOS DOS GEOPOLÍMEROS	12
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1 ÁREA DE ESTUDO	14
4.2 MATERIAIS	14
4.3 MÉTODOS.....	15
4.4 PREPARAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS	18
4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS E DOS CORPOS DE PROVA	21
4.5.1 Técnica de caracterização das matérias primas.....	21
4.5.2 Técnicas de caracterização dos corpos de prova.....	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	24
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS	24
6 CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem se adaptado ao emprego de insumos mais sustentáveis, incorporando resíduos sólidos em suas produções. Nesse contexto, existe um tipo de material cerâmico possível de ser desenvolvido à base de diversos resíduos - os geopolímeros. Além disso, em contraste com as cerâmicas convencionais, geopolímeros são suscetíveis a serem produzidos em temperatura ambiente, mediante processos de ativação alcalina, geralmente à base de potássio (K) ou sódio (Na). Dentre suas diversas aplicações, geopolímeros podem substituir aglomerantes convencionalmente usados na indústria da construção, como o cimento Portland.

Além disso, estudos demonstram a viabilidade da substituição da areia de rio, amplamente usada como agregado em argamassas e concretos, por areia de vidro, evidenciando altos benefícios no aumento da resistência mecânica em argamassas (Penacho *et al.*, 2014). Geopolímeros, argamassas sustentáveis permitem incorporar resíduos sólidos e destacam-se pela significativa redução na emissão de CO₂ em comparação ao cimento Portland convencional (Garcez *et al.*, 2024).

Ademais, a utilização do vidro moído em misturas com cimento Portland explora suas propriedades pozolânicas. De acordo com Grillo *et al.* (2021), as propriedades pozolânicas estão relacionadas às reações entre materiais ricos em sílica amorfa e o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, que contribuem para a resistência mecânica e a durabilidade das matrizes cimentícias. Essa interação ajuda a reduzir os custos de descarte e preservar aterros sanitários e os recursos naturais (Harrison *et al.*, 2020).

A geração de resíduos varia conforme os hábitos e atividades locais. No Amapá, destacam-se resíduos como sementes de açaí, lodo gerado em estações de tratamento de água e embalagens de vidro, os quais podem ser aproveitados na formulação de concretos e argamassas, promovendo eficiência e a sustentabilidade (Garcez *et al.*, 2024; Marvila *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

Dentro da construção civil e dos princípios da economia circular, resíduos como o vidro pós-consumo, após moagem, podem substituir agregados naturais, conforme apontado por Gholampour *et al.* (2019). Já o lodo proveniente do processo de tratamento de água pode ser incluído na formulação de argamassas e geopolímeros, atuando como precursor na matriz cimentícia (Buselatto *et al.*, 2019; Laurindo *et al.*, 2020; Santos, 2016).

A adição do lodo oriundo de Estações de Tratamento de Água (ETA) e da areia de vidro na formulação de geopolímeros representa uma solução ambientalmente sustentável,

considerando que esses materiais cimentícios alternativos podem ser sintetizados a partir de resíduos sólidos com significativa presença de silício (Si) e alumínio (Al), características presentes tanto no lodo de ETA quanto na areia de vidro.

Dessa forma, este estudo se justifica pela necessidade de explorar soluções inovadoras para o manejo do resíduo de ETA, e dos resíduos de embalagem de vidro, promovendo a economia circular e minimizando os impactos ambientais no estado do Amapá.

Assim buscou-se responder à seguinte questão: o uso lodo de ETA como precursor e a areia de vidro como agregado como componentes na produção de geopolímeros é tecnicamente viável? A hipótese central desta pesquisa é que o uso de lodo de ETA como precursor e a areia de vidro como agregado em geopolímero representa uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a destinação destes resíduos, contribuindo para a conservação de recursos naturais.

Diante disso, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a utilização de lodo de ETA como precursor e a areia de vidro como agregado na produção de geopolímeros para aplicações na construção civil, considerando suas propriedades químicas, mecânicas e microestruturais.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a utilização de lodo de ETA como precursor e a areia de vidro como agregado na produção de geopolímeros para aplicações na construção civil, considerando suas propriedades químicas, mecânicas e microestruturais.

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar a composição química dos resíduos e dos outros componentes utilizados por meio de Fluorescência de Raio X (FRX);
- Avaliar o desempenho mecânico dos geopolímeros por meio de ensaios de resistência à compressão;
- Analisar a microestrutura dos geopolímeros com o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), identificando a morfologia das partículas e as interações entre elas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONSTRUÇÃO CIVIL E SUSTENTABILIDADE

A intensificação da urbanização e do crescimento econômico, associada ao crescimento da população, está diretamente relacionada ao aumento no volume de resíduos sólidos gerados globalmente. Huang *et al.* (2025), afirmam que, com a urbanização e a industrialização avançando de forma acelerada, torna-se urgente a busca por materiais de construção que sejam sustentáveis, em resposta às preocupações ambientais que crescem cada vez mais.

Segundo Pacios *et al.* (2024), a fim de mitigar seus impactos ambientais, o setor cimenteiro tem priorizado o uso de energias limpas e o aproveitamento de materiais alternativos, diminuindo o uso de insumos naturais. Portanto, a incorporação de materiais cimentícios complementares surge como uma solução viável para substituir parcialmente o cimento convencional.

Embora os materiais cimentícios sejam fundamentais na construção civil, especialmente na composição de elementos estruturais e no avanço das cidades e da infraestrutura, sua produção está associada a elevados níveis de emissão de CO₂, o que torna a indústria do cimento uma das mais poluentes do mundo (Benhelal *et al.*, 2013; Farooq *et al.*, 2021).

A busca por soluções que minimizem os danos ambientais causados pela produção do cimento Portland tem levado pesquisadores a explorar métodos produtivos alternativos e o uso de matérias-primas com menor impacto ambiental. Entre essas alternativas, os geopolímeros têm se mostrado altamente promissores, em razão das suas características técnicas e versatilidade de aplicação (Nguyen *et al.*, 2025; Singh *et al.*, 2015).

Tang *et al.* (2020) afirmam que investir no aproveitamento de materiais residuais sólidos em compósitos geopoliméricos constitui em uma estratégia eficaz para desenvolver materiais de construção mais sustentáveis.

Nesse contexto, considerando que a taxa de reciclagem de vidro no Brasil atingiu apenas 25,8% em 2022 (Abividro, 2022) e que, somente no primeiro trimestre de 2024, o estado do Amapá gerou 1,16 toneladas de resíduo de vidro (Vitrum, 2024), torna-se urgente o desenvolvimento de alternativas que conciliem o reaproveitamento desses resíduos com o desempenho técnico exigido pelo setor da construção civil.

Além disso, resíduos como o lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), que também são descartados em grande volume e podem causar impactos ambientais, apresentam potencial para aplicação em matrizes geopoliméricas, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos sólidos urbanos.

3.2 GEOPOLÍMEROS

Criado na década de 1970 por Joseph Davidovits, o conceito de geopolímero refere-se a materiais desenvolvidos a partir da reação de uma solução alcalina com fontes ricas em aluminossilicatos (Davidovits, 1991). Embora sejam materiais inorgânicos, os geopolímeros compartilham características com os polímeros tradicionais, como a capacidade de transformação e endurecimento rápidos por meio de processos de policondensação, mesmo em temperaturas relativamente baixas (Davidovits, 1991). Sua estrutura mineral confere elevada resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade diante de condições ambientais, características que vêm despertando interesse crescente em aplicações sustentáveis (Davidovits, 1991).

Classificados como materiais cimentícios inorgânicos de nova geração, os geopolímeros têm ganhado destaque na construção civil por aliarem desempenho técnico elevado e benefícios ambientais. Em comparação ao tradicional cimento Portland, destacam-se por suportarem temperaturas elevadas, consumirem menos energia e gerarem menos emissões durante sua produção (Madirisha *et al.*, 2024; Poblocki *et al.*, 2024).

Keppert *et al.* (2018) afirmam em sua pesquisa que os geopolímeros são polímeros inorgânicos formados por unidades de silício (Si) e alumínio (Al) conectadas em meio alcalino, a partir de precursores de aluminossilicato. Essa estrutura os diferencia dos polímeros convencionais, geralmente compostos por cadeias de carbono, conferindo aos geopolímeros características específicas e vantajosas para aplicações no setor construtivo (Santos, 2016).

Dada sua proposta voltada à sustentabilidade, os geopolímeros ainda apresentam a vantagem de incorporar resíduos sólidos como parte da sua composição, atuando como precursores e/ou agregados, o que reforça seu caráter ambientalmente responsável. Essa característica está em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei n.º 12.305/2010, que prioriza a reciclagem em detrimento da disposição final, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte impróprio de materiais não biodegradáveis (Brasil, 2010).

3.3 PRECURSORES E AGREGADOS DOS GEOPOLÍMEROS

Geopolímeros são obtidos a partir de reações entre materiais ricos em silício e alumínio e soluções alcalinas, como hidróxidos ou silicatos de sódio e potássio, que atuam como ativadores químicos, ativando quimicamente os precursores, originando um ligante inorgânico por meio da geopolimerização (Al-Saudi; Géber, 2024).

A crescente demanda por componentes construtivos reforça a importância de explorar novos precursores, o que torna fundamental a busca por diferentes fontes de matéria-prima. Nesse contexto, a avaliação de materiais disponíveis em nível regional ou local se apresenta como uma estratégia relevante, tanto para reduzir custos logísticos quanto para promover a sustentabilidade do processo produtivo (Turan; Oltulu, 2025). O uso de resíduos sólidos industriais ou urbanos como fonte desses elementos favorece a redução de impactos ambientais, além de contribuir para a sustentabilidade do processo.

Diversos resíduos urbanos e subprodutos industriais têm sido explorados como precursores na produção de geopolímeros, entre eles o lodo de estação de tratamento, cinzas volantes e cinza de casca de arroz, todos ricos em compostos de silício e alumínio. Além disso, materiais reciclados como pó de tijolo, cerâmica triturada, resíduos de vidro e outras fontes minerais também se aplicam para serem incorporados como agregados, contribuindo com suas propriedades químicas para o desempenho final do material (Bijalwan *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2025; Mohseni *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019; Subhani *et al.*, 2024; Uysal *et al.*, 2022).

Os agregados, componentes dos geopolímeros, podem ser classificados em graúdas ou miúdas e podem ter origem natural, como a areia, ou podem ser obtidas de resíduos e subprodutos industriais, sua variação no tamanho das partículas depende da fonte e do processamento do material (Abdolpour *et al.*, 2021; Yuan *et al.*, 2021)

Yang *et al.* (2025) afirmam que ao empregar resíduos como insumos, os geopolímeros reduzem o descarte em aterros sanitários e ampliam a reutilização de materiais, promovendo ganhos ambientais e econômicos.

A reação de geopolymerização ocorre entre precursores ricos em aluminossilicatos e soluções ativadoras alcalinas, geralmente compostas por hidróxidos ou silicatos de sódio ou potássio (Roviello *et al.*, 2025). A escolha adequada dos componentes é crucial, pois a compatibilidade química influencia diretamente o desempenho do material (Hassan *et al.*, 2019).

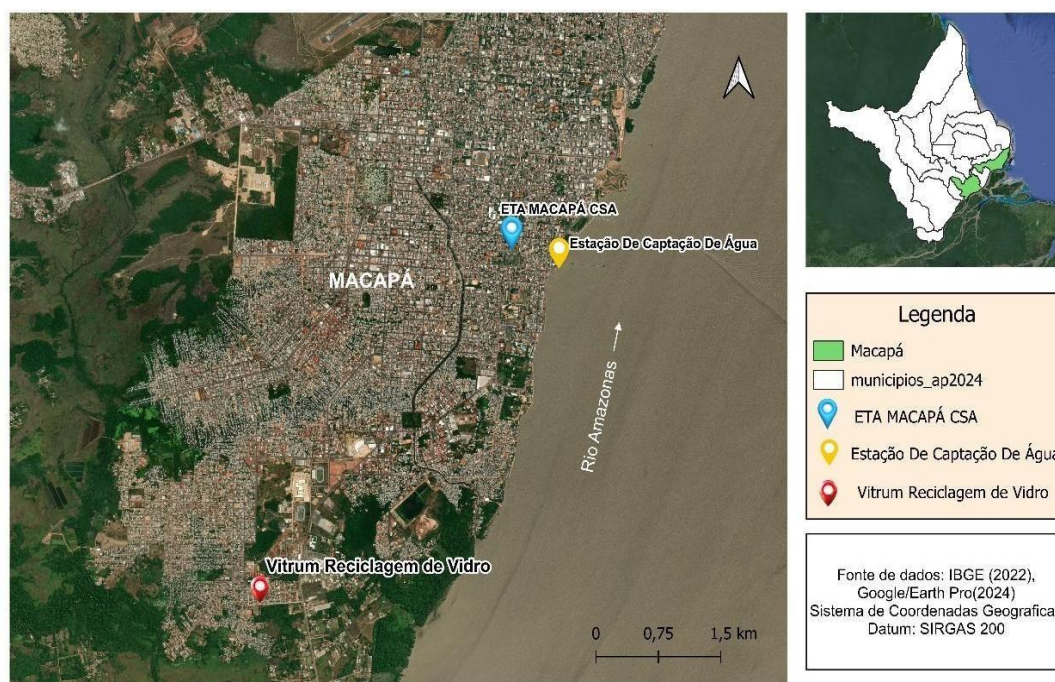
Segundo Hassan *et al.* (2019), a dissolução dos componentes do precursor em meio alcalino leva à formação de um gel inicialmente rico em alumínio, que, com a progressiva solubilização do silício, se transforma em uma estrutura mais estável. De acordo com Hassan *et al.* (2019) esse processo resulta na consolidação de uma matriz sólida, semelhante à hidratação do cimento Portland.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada no estado do Amapá, especificamente do município de Macapá (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autora (2025)

Os resíduos utilizados foram coletados em dois pontos distintos, conforme demonstrado no mapa. A Estação de Tratamento de Água (ETA), localizada na área central, recebe abastecimento da estação de captação de água e é responsável pela produção do lodo, e por fornecer o resíduo utilizado neste estudo. O segundo ponto é a Vitrum, localizada na zona sul da cidade, responsável por fornecer a areia de vidro empregada no processo.

4.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados, incluindo os materiais precursores e os agregados, foram caracterizados conforme listado abaixo:

- Lodo: Precursor do geopolímero. Resíduo coletado na Estação de Tratamento de Água (ETA) de Macapá.
- Areia de vidro: Agregado do geopolímero. Foi adquirido na empresa Vitrum do

município de Macapá, que realiza a coleta de resíduos de vidro para utilizá-los na produção da areia de vidro.

- Cimento Portland: Foi usado o cimento portland (Mizu) como fonte adicional de cálcio. Foi priorizado o uso de cimento de escória de alto forno, que também é um resíduo.
- Areia: obtida em comércios de materiais de construção localizados em Macapá. O uso de areia convencional como agregado foi utilizada para comparação da areia de vidro;
- Hidróxido de potássio (KOH): Foi usado o KOH (AurosQuímica) na forma sólida na composição da mistura alcalina, necessária para dissolver os componentes secos e proporcionar a reação de geopolimerização do material;
- Microsílica: Utilizou-se a microsílica industrial (Elkem) como fonte adicional de sílica na composição da mistura alcalina.
- Água destilada: Usou-se água destilada para a dissolução dos componentes secos, na composição da mistura alcalina, uma solução de silicato de potássio.

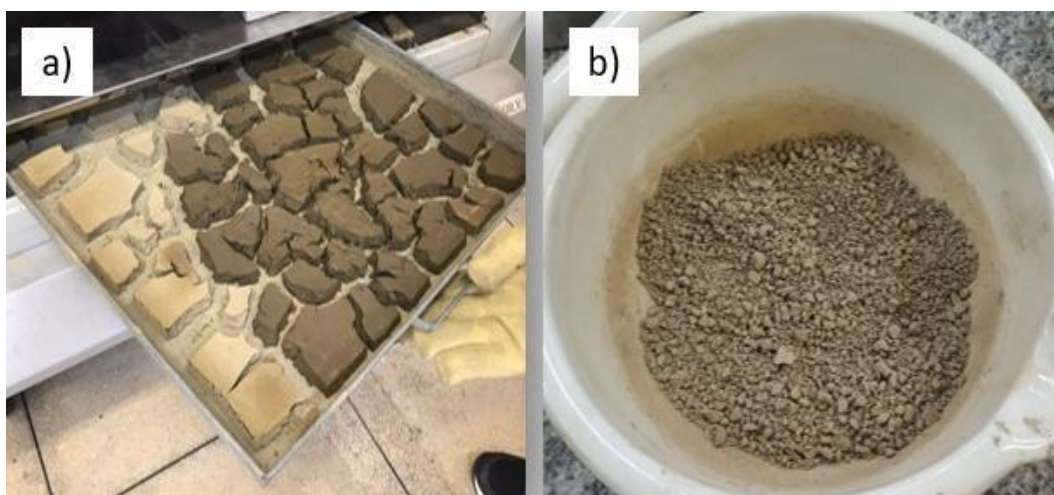
4.3 MÉTODOS

Os métodos descritos a seguir, assim como a escolha dos materiais previamente mencionados, foram baseados na pesquisa de Santos (2016). No entanto, adaptações foram realizadas para atender aos objetivos e às particularidades do presente trabalho.

Para serem usados como matéria-prima cimentícia, os resíduos passaram por alguns procedimentos. A preparação do lodo de ETA envolveu a secagem, a moagem, o peneiramento e a calcinação, enquanto o resíduo de vidro e a areia convencional foram submetidos somente às etapas de moagem e peneiramento da seguinte forma:

O lodo de ETA foi submetido à secagem em estufa a 110 °C, durante 8 horas, em forno do tipo estufa (Lucadema) com o objetivo de remover a umidade dos resíduos. Em seguida, foi realizada a moagem para fragmentação das partículas, utilizando um moinho do tipo martelo (Metaltex). Posteriormente, o material passou por um processo de maceração em almofariz (Chiarotti) com auxílio de pistilo (Figura 2).

Figura 2 - Lodo de ETA: a) Processo de secagem; b) Moído e macerado posteriormente



Fonte: Autora (2025)

O peneiramento foi realizado com uma peneira granulométrica (Bronzinox) ASTM 100 mesh/Tyler, com o intuito de uniformizar o material e remover a parte grosseira, possibilitando uma calcinação homogênea (Figura 3).

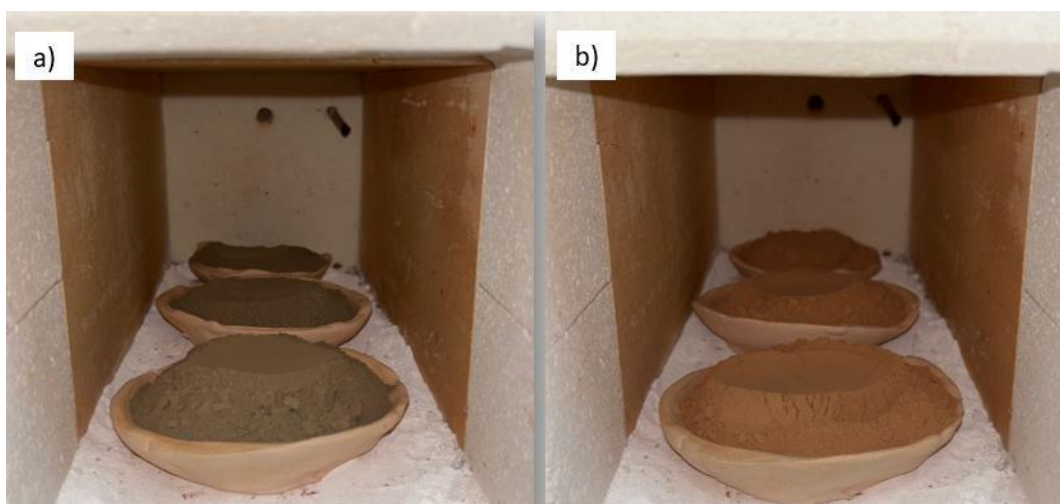
Figura 3 - Lodo de ETA: a) Processo de peneiramento; b) Resíduo peneirado



Fonte: Autora (2025)

A calcinação foi conduzida em forno do tipo mufla (Quimis), modelo Q318S24, a 750 °C, durante 6 horas, visando eliminar impurezas e aumentar a reatividade dos materiais (Figura 4).

Figura 4 - Lodo de ETA: a) Antes de ser calcinado; b) Depois de ser calcinado



Fonte: Autora (2025)

A areia de vidro e a areia convencional foram submetidas apenas aos processos de maceração em almofariz (Chiarotti) com auxílio de pistilo. Posteriormente, submetidas ao peneiramento, realizado com uma peneira granulométrica (Bronzinox) ASTM 100 mesh/Tyler, com o intuito de uniformizar o material e remover a parte grosseira (Figura 5).

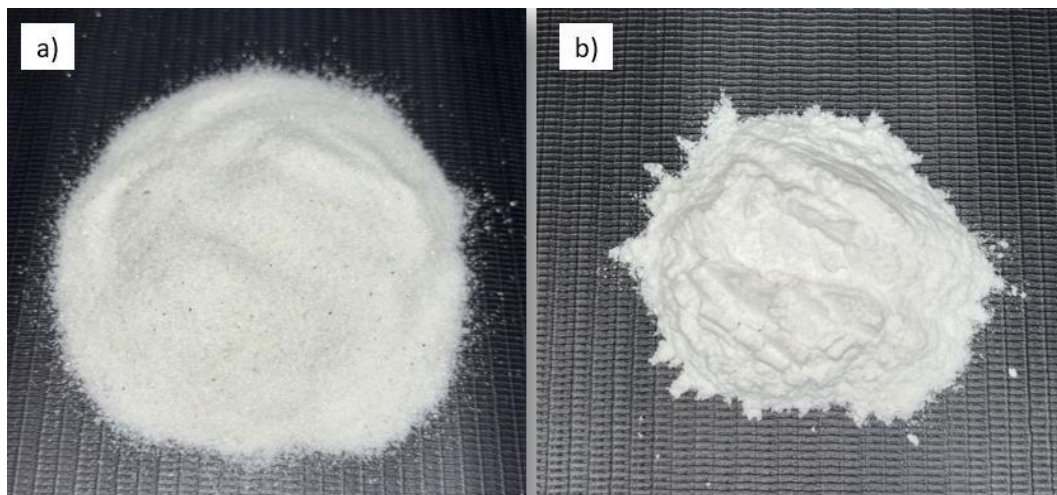
Figura 5 - a) Processo de maceração; b) Peneiramento



Fonte: Autora (2025)

A Figura 6 ilustra o aspecto do vidro antes e após o peneiramento, evidenciando a redução granulométrica obtida.

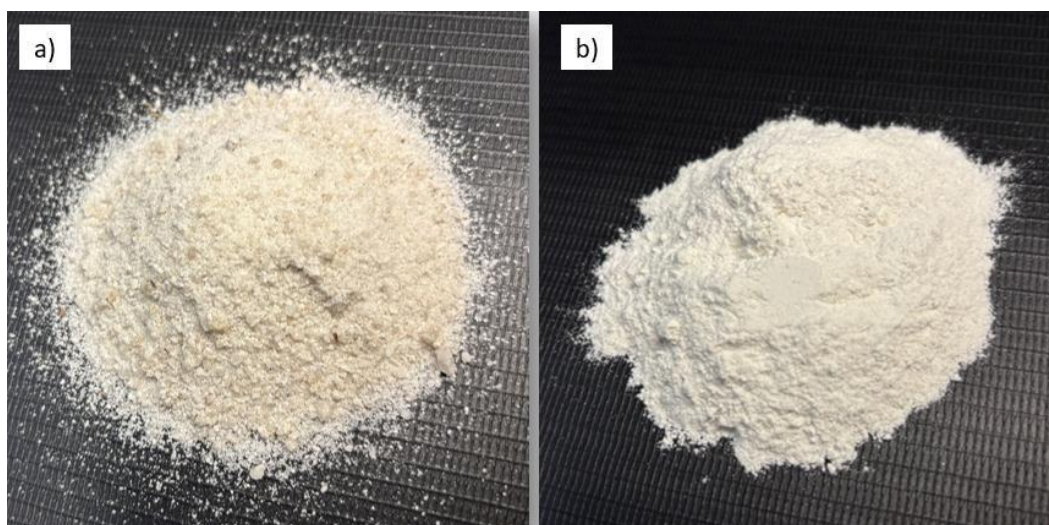
Figura 6 - a) Areia de vidro antes; b) Depois de peneirado



Fonte: Autora (2025)

A (Figura 7) apresenta a comparação visual da areia convencional antes e depois de ser peneirada, destacando a padronização granulométrica alcançada após o processamento.

Figura 7 - a) Areia convencional antes; b) Depois de peneirada

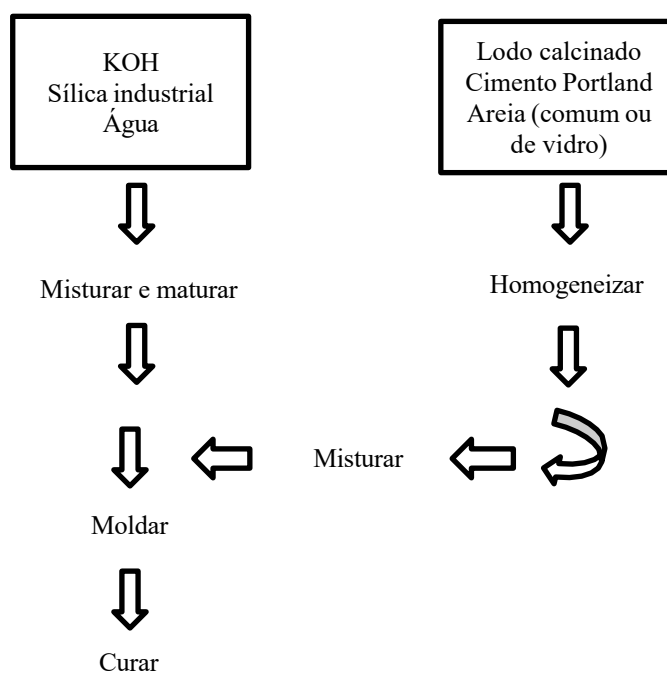


Fonte: Autora (2025)

4.4 PREPARAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

A preparação dos geopolímeros foi baseada em um processo adaptado de Palomo e Glasser (1992) e Pinto (2006), conforme a Figura 8.

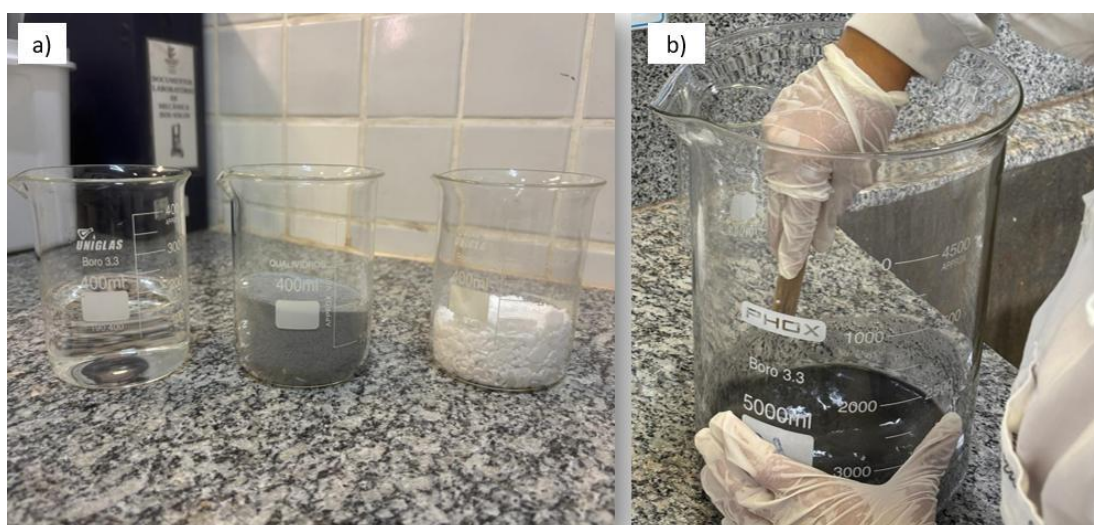
Figura 8 - Esquema de mistura



Fonte: Adaptado de Palomo e Glasser (1992) e Pinto (2006)

Seguindo o procedimento descrito acima, para produzir os geopolímeros foi necessário, primeiramente, preparar, com 24 horas de antecedência, uma solução alcalina composta por água destilada, sílica industrial e KOH (Figura 9).

Figura 9 - a) Materiais para solução alcalina; b) Solução sendo preparada



Fonte: Autora (2025)

Um dia após o processamento da mistura alcalina, procedeu-se a mistura de todos os componentes secos: a areia, de vidro ou comum, o lodo de ETA e o cimento (Figura 10).

Figura 10 - Materiais prontos para mistura



Fonte: Autora (2025)

Os percentuais de cada componente empregado na preparação dos geopolímeros constam na Tabela 1.

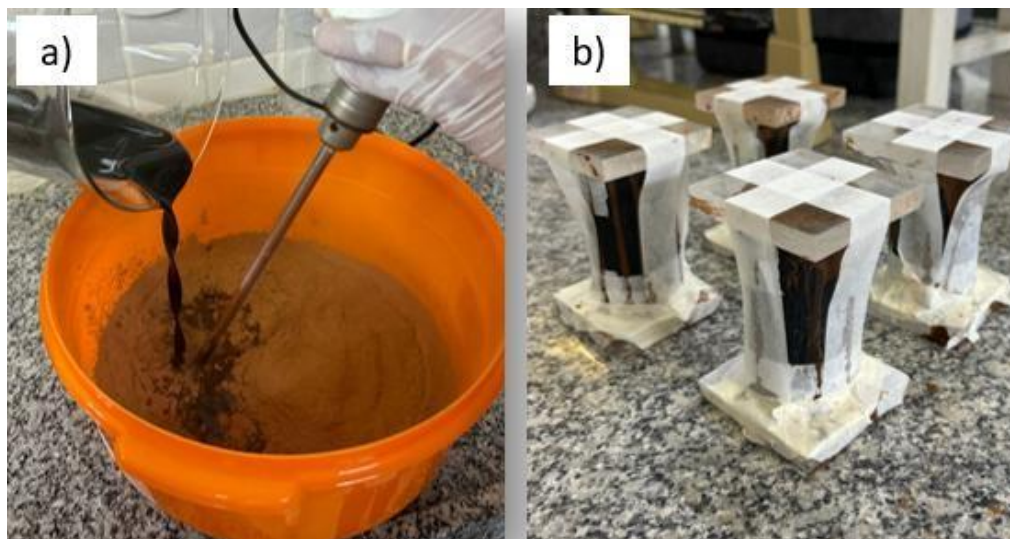
Tabela 1 - Materiais utilizados na produção dos geopolímeros

Precursor		Agregado	Ativador		
Lodo	CP Mizu	Areia	KOH	Água	Sílica
38%	8%	10%	14%	17%	13%

Fonte: Autora (2025)

Todos os componentes dos geopolímeros foram misturados utilizando um agitador mecânico (Fisatom) modelo FIS715C, durante 6 minutos, visando à completa homogeneização. Após a completa mistura dos materiais secos com a solução alcalina, preparada 24 horas antes da moldagem, foram moldados ao todo 16 corpos de prova cilíndricos, de acordo com a norma pertinente, sendo 8 com agregado de areia convencional e 8 com agregado de areia de vidro, os quais foram utilizados para avaliar a resistência mecânica dos materiais (Figura 11).

Figura 11 - a) Mistura de todos os componentes; b) Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora (2025)

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS E DOS CORPOS DE PROVA

4.5.1 Técnica de caracterização das matérias primas

- **Fluorescência de Raios X - FRX**

Para determinar a composição química dos materiais empregados, como o lodo, o vidro moído, a sílica industrial e o cimento portland, foi empregada a técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). As análises foram feitas em amostras previamente peneiradas em peneira granulométrica (Bronzinox) ASTM 200 mesh/Tyler, a fim de garantir maior homogeneidade.

Os ensaios foram conduzidos em um espectrômetro modelo EDX-720, pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul – IFMS, campus Corumbá. Essa técnica permitiu identificar e quantificar os principais óxidos presentes nas amostras, fornecendo subsídios importantes para a compreensão da reatividade dos materiais na formação da matriz geopolimérica.

4.5.2 Técnicas de caracterização dos corpos de prova

- **Resistência à compressão axial**

A resistência mecânica dos corpos de prova foi avaliada por meio de ensaios de compressão axial, realizados aos 7 e 28 dias de cura. Os corpos de prova, foram submetidos aos testes utilizando uma prensa manual (Solotest) referência 1504230, série 7017 (Figura 12).

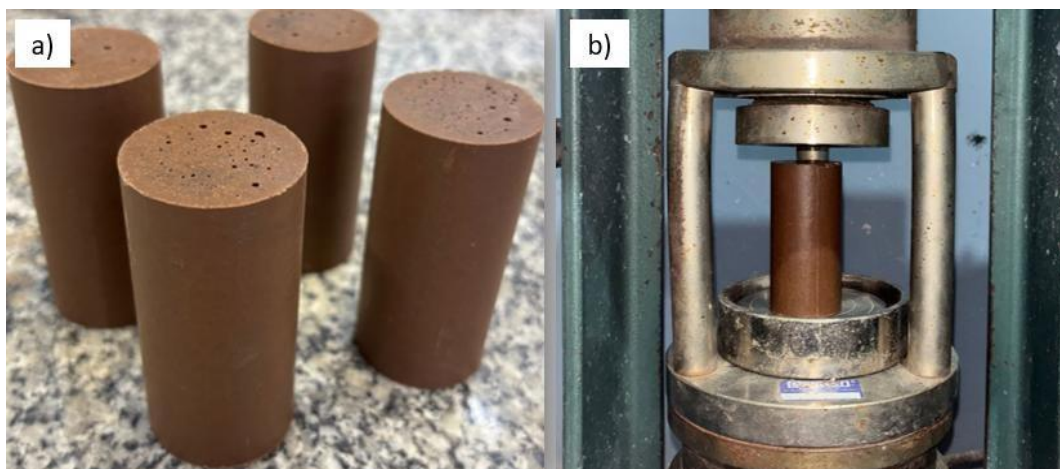
Figura 12 - Prensa manual utilizada para os ensaios mecânicos



Fonte: Autora (2025)

O procedimento permitiu medir a carga máxima suportada pelas amostras até o ponto de ruptura (Figura 13), sendo esse valor utilizado para calcular a resistência à compressão em MPa. Esse ensaio foi fundamental para analisar o desempenho mecânico dos geopolímeros desenvolvidos, possibilitando comparar a evolução da resistência ao longo do tempo e a influência das composições empregadas na formulação do material.

Figura 13 - a) Corpos de prova desmoldados; b) Material sendo submetido ao ensaio mecânico

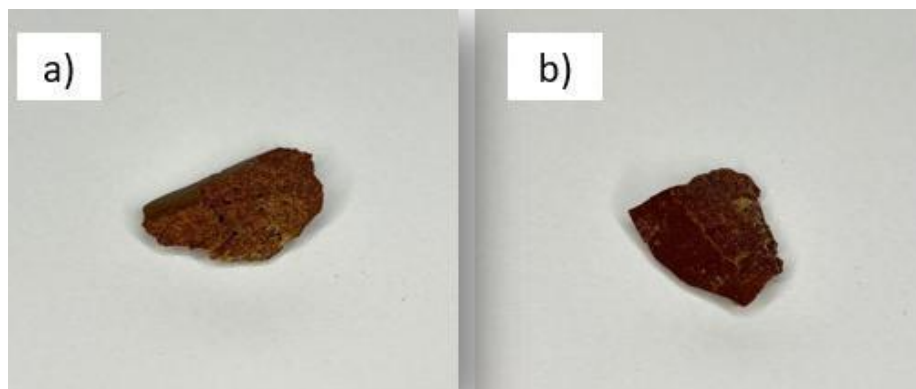


Fonte: Autora (2025)

- **Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV**

Para a caracterização microestrutural dos corpos de prova, foi utilizada a técnica do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises foram realizadas com amostras selecionadas dos geopolímeros, previamente secas e fraturadas, para expor a superfície interna do material (Figura 14).

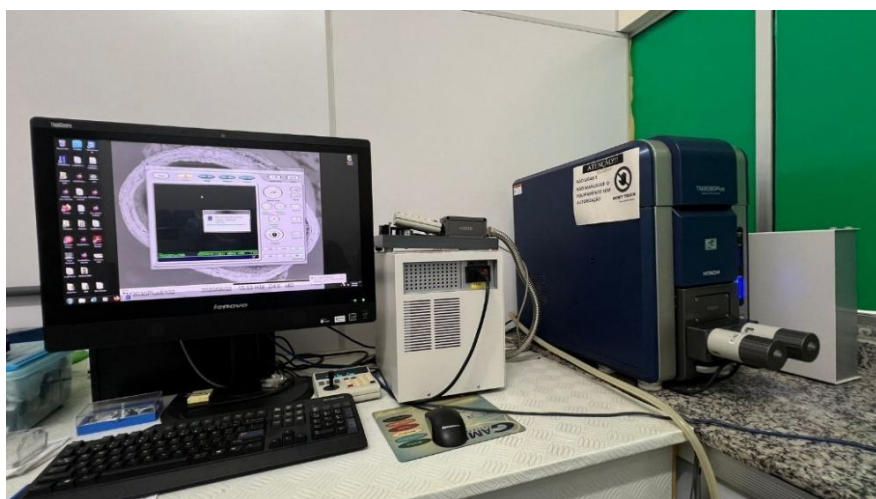
Figura 14 - a) Fragmento da amostra com areia de vidro; b) Fragmento da amostra com areia



Fonte: Autora (2025)

A análise foi conduzida em um microscópio eletrônico de varredura (Hitachi TM3030Plus tabletop microscope), pertencente ao Laboratório de Fármacos, do Curso de Farmácia da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP, campus Macapá (Figura 15).

Figura 15 – Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autora (2025)

Essa técnica permitiu observar, com alta resolução, a morfologia superficial, a distribuição e a compactação das partículas, além de identificar regiões porosas e eventuais discontinuidades na matriz geopolimérica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Na Tabela 2 são sintetizados os resultados das análises químicas dos resíduos utilizados.

Tabela 2 – Composição química dos materiais e resíduos utilizados por FRX

Óxidos (peso %)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	ZrO ₂	Outros	Total %
Cimento Portland	22,99	6,86	5,91	0,74	4,07	0,00	58,11	0,84	0,18	0,11	0,19	100,00
Sílica Industrial	86,32	4,70	0,88	0,12	1,81	0,89	4,79	0,40	0,00	0,02	0,07	100,00
Lodo Calcinado	50,67	26,13	13,25	3,60	1,36	1,33	1,52	1,50	0,19	0,12	0,33	100,00
Areia de vidro	68,81	2,86	1,16	0,60	2,95	0,80	21,99	0,20	0,00	0,00	0,63	100,00

Fonte: autora (2025)

O cimento Portland, utilizado como fonte adicional de cálcio na composição das misturas, apresentou teor significativo de óxido de cálcio (CaO), com 58,11%, conforme descrito na Tabela 2. Já a sílica industrial foi empregada como fonte complementar de sílica, sendo composta majoritariamente por dióxido de silício (SiO₂), com concentração de 86,32%.

A incorporação desses materiais contribuiu para o equilíbrio da composição alcalina das misturas geopoliméricas, favorecendo a reação de geopolimerização e potencializando as propriedades mecânicas do material.

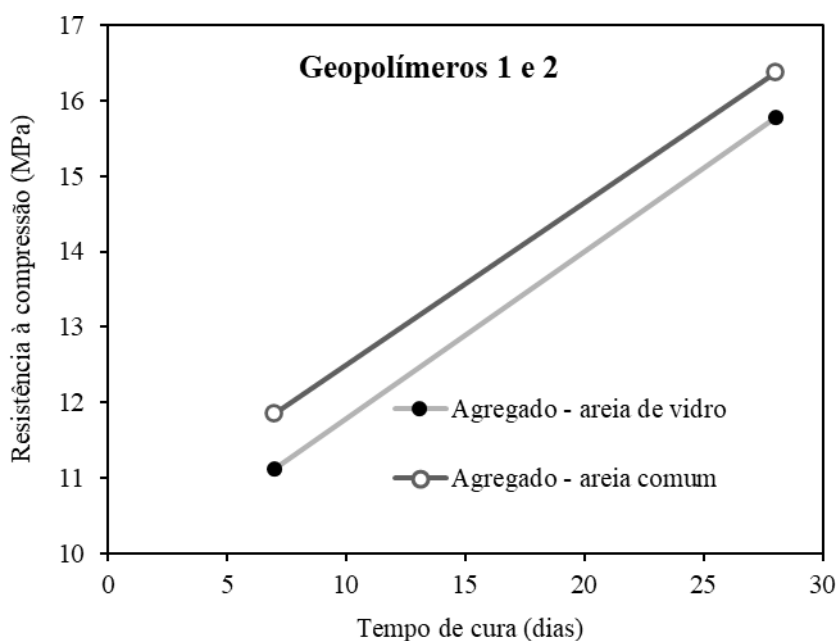
O lodo se mostrou composto, principalmente, por sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), em conformidade com os dados apresentados por Santos (2016), que destacam esses elementos como fundamentais na formação de geopolímeros.

Já a areia de vidro apresentou altos teores de sílica e de óxido de cálcio (CaO), composição compatível com a de vidros sodo-cálcicos, como indicado por Rodier e Savastano Jr. (2018). Grillo *et al.*, (2021) complementam que esses óxidos têm papel estabilizador na estrutura do vidro, contribuindo para propriedades desejáveis nos sistemas geopoliméricos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

Na Figura 16 constam os resultados de resistência à compressão dos materiais produzidos.

Figura 16 - Resultados de resistência à compressão axial



Fonte: Autora (2025)

Neste ensaio, os resultados são expressos pelo cálculo da média de 4 corpos de prova. Os corpos de prova dos geopolímeros com areia comum apresentaram, em média, resistência mínima de 11,85 MPa, aos 7 dias de cura, e máxima de 16,37 MPa, aos 28 dias de cura. Os geopolímeros com areia de vidro exibiram resistências médias de 11,12 MPa, aos 7 dias de cura, e máxima de 15,77 MPa, aos 28 dias de cura.

Os resultados mostraram que, já nas idades iniciais, as argamassas alcançaram resistência à compressão suficiente para cumprir às exigências das normas brasileiras para diferentes elementos construtivos, como afirma Geraldo *et al.*, (2017). Especificamente, a NBR 7170 estabelece um valor mínimo de 1,5 MPa para tijolos cerâmicos, a NBR 8491 exige pelo menos 2,0 MPa para tijolos de solo-cimento, e a NBR 6136 determina que blocos de concreto devem apresentar resistência mínima de 3,0 MPa. Dessa forma, a substituição parcial da areia por vidro reciclado mostra-se tecnicamente viável, além de representar uma solução ambientalmente vantajosa para o reaproveitamento de resíduos sólidos.

Assim como reportado por Ferone *et al.* (2019), este estudo confirmou o rápido desenvolvimento de resistência nos geopolímeros, com bons resultados já aos 7 dias e desempenho adequado aos 28 dias para componentes não estruturais, reforçando o potencial uso de resíduos como precursores. Os achados também reforçam as conclusões de Nimwinya *et al.* (2016) em relação ao uso eficiente de lodo calcinado como precursor geopolimérico

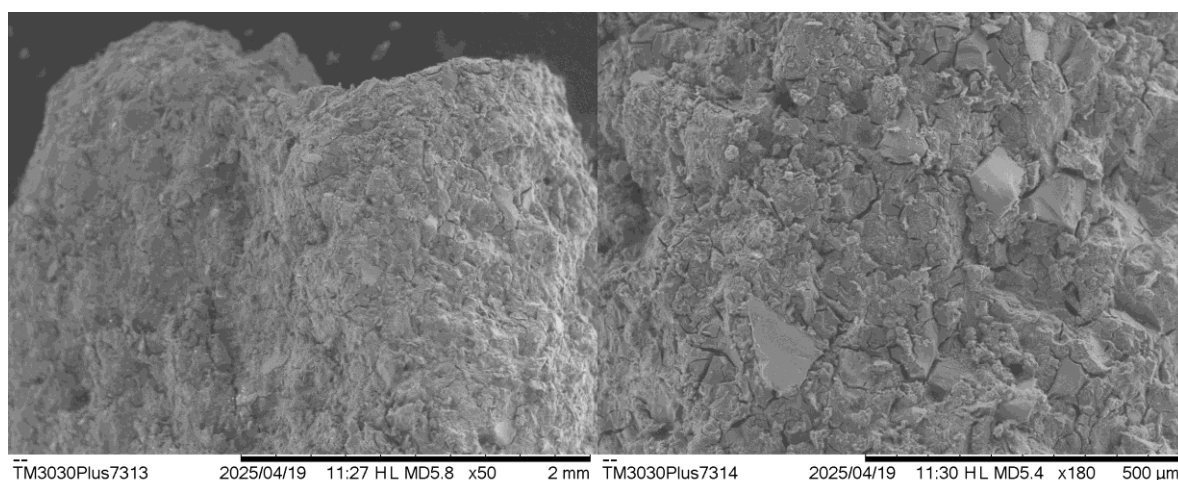
Assim como demonstrado por Rodier e Savastano Jr. (2018), este estudo confirmou que o uso de pó de vidro contribui para o aumento gradual da resistência conforme o avanço do tempo de cura. Além disso, mesmo com substituições parciais da areia por vidro, conforme Tan e Du (2013), não foram observadas perdas significativas de resistência, desde que os teores se mantivessem abaixo de 25%.

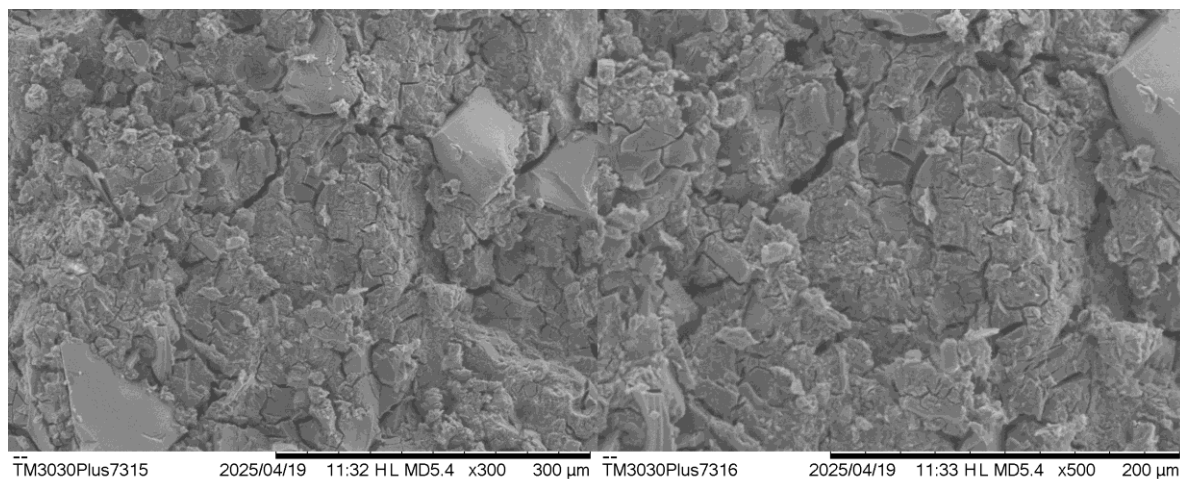
O estudo de López *et al.* (2005) aponta para a importância do controle da proporção e granulometria do vidro residual na mistura, demonstrando que substituições de areia por vidro moído entre 10% e 20% aumentam significativamente a resistência, com o melhor desempenho em 20% atribuído ao preenchimento eficiente dos vazios.

A análise de Grillo *et al.* (2021) reforça esse comportamento, destacando que partículas mais finas favorecem reações pozolânicas, caracterizadas pela interação entre a sílica amorfa presente nos resíduos e os compostos alcalinos do sistema, resultando na formação de compostos responsáveis pela ligação e endurecimento da matriz que aprimoram as propriedades mecânicas do material. Esses aspectos também foram observados nos ensaios realizados neste trabalho, confirmando a influência da granulometria e da proporção do vidro na eficiência dos geopolímeros produzidos.

Quanto à microestrutura, observou-se uma boa adesão da pasta geopolimérica aos agregados em ambos os casos. Em imagens obtidas por meio de MEV, fragmentos de ambos os geopolímeros foram observados com aumento de 50 a 500 vezes. Na Figura 17 constam as imagens magnificadas do geopolímero produzido com areia de vidro moído, enquanto na Figura 18 constam as imagens referentes ao geopolímero produzido com areia convencional.

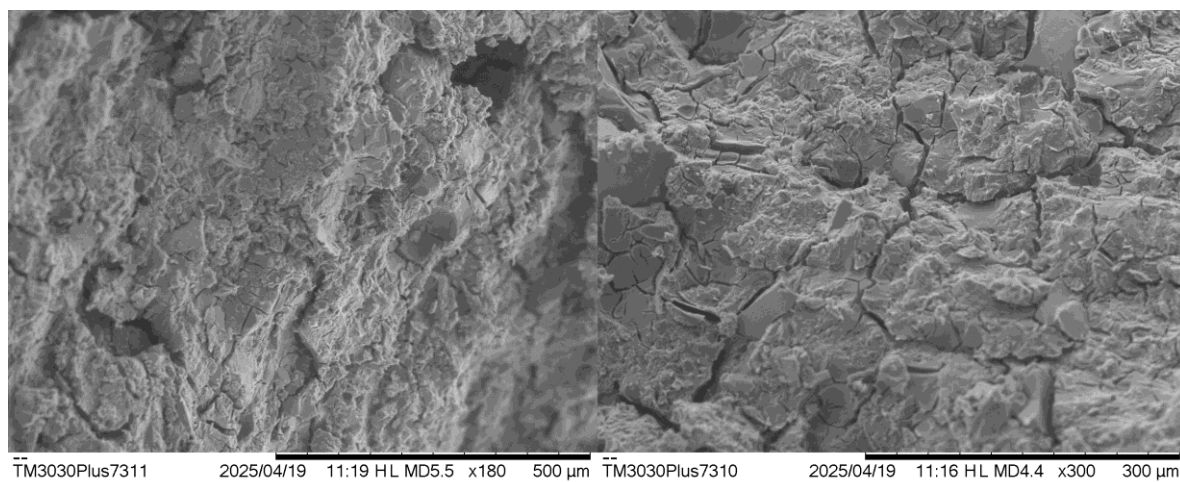
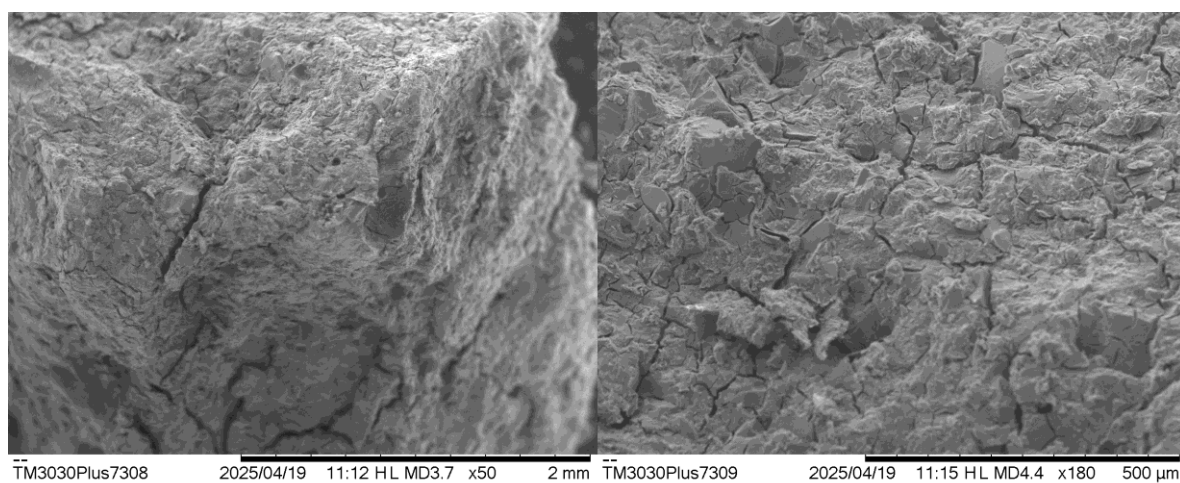
Figura 17 - Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero produzido com areia de vidro





Fonte: Autora (2025)

Figura 18 - Imagens de MEV da superfície fraturada do geopolímero produzido com areia convencional



Fonte: Autora (2025)

Os resultados obtidos estão alinhados a pesquisas anteriores que indicam o potencial do vidro reciclado na formação do gel geopolimérico, desde que sejam respeitadas proporções adequadas e condições alcalinas controladas. Harouachi *et al.* (2025) observaram que a adição de 7,5% a 10% em peso de vidro reciclado favoreceu a formação do gel em meios moderadamente alcalinos, enquanto concentrações alcalinas mais elevadas resultaram na formação de fases cristalinas indesejadas.

Além disso, a literatura destaca que uma microestrutura geopolimérica densa e coesa é essencial para garantir elevado desempenho mecânico. Dinh *et al.* (2024) ressaltam que a presença equilibrada de cálcio pode favorecer o processo de geopolimerização, mas seu excesso acelera as reações, podendo gerar microfissuras e endurecimento precoce, comprometendo a durabilidade do material. Assim, o equilíbrio entre os componentes da mistura é essencial para garantir uma boa performance dos geopolímeros.

Portanto, a utilização de vidro reciclado e lodo de ETA na formulação de geopolímeros representa uma solução inovadora com múltiplos benefícios. Além da melhora do desempenho técnico do material, a abordagem adotada promove a sustentabilidade ao reduzir significativamente o descarte de resíduos, minimiza a pegada de carbono da construção civil, preserva recursos naturais e estimula a economia circular. Essa estratégia reforça o potencial dos geopolímeros como alternativas mais ecológicas e eficientes aos materiais convencionais, contribuindo para o avanço de práticas construtivas ambientalmente responsáveis.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que é tecnicamente viável produzir geopolímeros utilizando lodo de ETA como precursor e areia de vidro como agregado, pois quando submetido ao ensaio de resistência mecânica, este material apresentou, aos 28 dias, uma resistência de média 16 MPa, sendo adequado para diversos usos pela indústria da construção. Além disso, sua microestrutura se mostrou coesa e homogênea. A viabilidade técnica foi confirmada por meio de análises químicas e microestruturais. A Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) demonstrou que os materiais utilizados apresentam composições químicas favoráveis à formação da matriz geopolimérica. O lodo de ETA contém sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), componentes fundamentais na geopolimerização. A sílica industrial e o cimento Portland contribuíram para o equilíbrio químico da mistura, com altos teores de dióxido de silício e óxido de cálcio, respectivamente. Já a areia de vidro moído, composta majoritariamente por sílica e CaO , apresentou características compatíveis com sua aplicação como agregado. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou uma microestrutura densa, com boa compactação e distribuição uniforme das partículas, além de baixa presença de poros e falhas estruturais, o que indica a formação de uma matriz bem consolidada. Essa uniformidade estrutural está diretamente relacionada ao bom desempenho mecânico observado. Neste contexto, constatou-se que é possível produzir novos materiais cerâmicos utilizando lodo de ETA como precursor e areia de vidro moído como agregado. Esta é, portanto, uma alternativa sustentável para o gerenciamento de resíduos, promovendo a conservação de recursos naturais e reduzindo o impacto ambiental na construção civil e no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABDOLPOUR, H.; NIEWIADOMSKI, P.; SADOWSKI, Ł. Recycling of steel fibres and spent equilibrium catalyst in ultra-high performance concrete: Literature review, research gaps, and future development. **Construction and Building Materials**, v. 309, p. 125147, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125147>

ABIVIDRO. **Associação Brasileira das Indústrias de vidro**. [2022]. Disponível em: <https://abividro.org.br/>. Acesso em: 20 set. 2024.

AL-SAUDI, S. K. M.; GÉBER, R. Production of lightweight geopolymer concrete with foam glass aggregate derived from cathode-ray glass waste, **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03888, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03888>.

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry, **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142–161, jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.

BIJALWAN, A.; MISHRA, A. K.; SONOWAL, B. Strength, durability, and toxicity characteristics of water treatment sludge based geopolymers for subgrade application, **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138162, 4 set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138162>.

BRASIL. **Lei Nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.

BUSELATTO, D. M.; WENZEL, M. C.; ROCHA, G. H. DA.; WEBBER, J.; SILVA, S. R. DA.; ANDRADE, J. J. DE O. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 1, p. e-12270, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0645>.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633–1656, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

DINH, H. L.; LIU, J.; DOH, J. H.; ONG, D. E. L. Influence of Si/Al molar ratio and ca content on the performance of fly ash-based geopolymer incorporating waste glass and GGBFS, **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134741, 12 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134741>.

FAROOQ, F.; JIN, X.; JAVED, M. F.; AKBAR, A.; IZHAR SHAH, M. I.; ASLAM, F.; ALYOUSEF, R. Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review, **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124762, 1 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>.

FERONE, C.; CAPASSO, I.; BONATI, A.; ROVIELLO, G.; MONTAGNARO, F.; SANTORO, L.; TURCO, R.; CIOFFI, R. Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production, **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 1–9, 20 ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.299>.

GARCEZ, L. R.; LIMA, M. S.; RIBAS, L. F.; BALESTRA, C. E. T.; MONTEIRO, N. B. R.; FILHO, J. A. M.; GIL, M. A. R. Characteristics of the açai seed (*Euterpe precatoria* Martius) after thermal processing and its potential in soil-cement brick, **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02816, 1 jul. 2024.. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02816>.

GERALDO, R. H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production, **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 146–155, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>.

GHOLAMPOUR, A.; HO, V. D.; OZBAKKALOGLU, T. Ambient-cured geopolymer mortars prepared with waste-based sands: Mechanical and durability-related properties and microstructure, **Composites Part B: Engineering**, v. 160, p. 519–534, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.057>.

GRILLO, F.; MATOSKI, A.; ALBERTI, M. E. Caracterização de geopolímeros elaborados com resíduos de vidro e lodo de anodização / Characterization of geopolymers made with glass residues and anodizing sludge. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 60707–60725, 19 jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-446>.

HAROUACHI, H. E.; AHOUDI, D.; MOUKANNAA, S.; AADDOUZ, M.; ELGETTAFI, M.; MANSORI, M.; LOUTOU, M. Effect of glass waste and sodium hydroxide concentration on fly ash-pyrophyllite based geopolymer composites: Microstructural investigations and performance optimization, **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04392, jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04392>.

HARRISON, E.; BERENJIAN, A.; SEIFAN, M. Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials, **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 4, p. 100064, 1 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100064>.

HASSAN, A.; ARIF, M.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 704–728, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>

HUANG, M.; QIU, Z.; BAO, S.; ZHANG, Y.; ZHOU, Z.; YANG, S.; KE, X. Green low-carbon approach for the preparation of solid waste-based geopolymer: One-part geopolymer vs. two-part geopolymer, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 3, p. 116270, jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116270>.

HU, H.; LIU, Y.; CHEN, L.; ZHANG, F. Simultaneous enhancement of mechanical robustness and self-sensing performance in fly ash-based geopolymer nanocomposites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 194, p. 108894, 1 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108894>.

KEPPERT, M.; VEJMELOVÁ, E.; BEZDIČKA, P.; DOLEŽELOVÁ, M.; ČÁCHOVÁ, M.; SCHEINHERROVÁ, L.; POKORNÝ, J.; VYŠVAŘIL, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; ČERNÝ, R.; CLAY, C. Ceramic powders as geopolymer precursors: Consideration of amorphous portion and CaO content, **Applied Clay Science**, v. 161, p. 82–89, 1 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.019>.

LAURINDO, S. S.; ANTUNES, E. G. P.; SAVI, A. E.; SPECK, J. A.; PIVA, J. H. Estudo da adição do lodo de ETA - Estação de tratamento de água em argamassas de revestimento. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 4, p. 19–28, 7 ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.19-28>.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P. DE.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 318–324, dez. 2005, DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000400003>.

MADIRISHA, M. M.; DADA, O. R.; IKOTUN, B. D. Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction, **Materials Today Sustainability**, v. 27, p. 100842, 1 maio, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100842>.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; COSTA, J. M.; XAVIER, G. C.; CARMO, D. F.; MONTEIRO, S. N. Durability of coating mortars containing açai fibers, **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e-00406, 16 jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00406>.

MOHSENI, E.; KAZEMI, M. J.; KOUSHKBAGHI, M.; ZEHTAB, B.; BEHFOROUZ, B. Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina, **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 532–540, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.067>.

NGUYEN, H. A. T.; PHAM, D. H.; AHN, Y.; OO, B. L.; LIM, B. T. H. Machine learning and sustainable geopolymer materials: A systematic review, **Materials Today Sustainability**, v. 30, p. 101095, jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101095>.

NIMWINYA, E.; ARJHARN, W.; HORPIBULSUK, S.; NGERNKHAM, T. P.; POOWANCUM, A. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer, **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 128–134, 15 abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>.

PACIOS, A.; TEJADO, E.; MARTÍN, A.; FERNÁNDEZ, A.; PASTOR, J. Y. High-temperature performance of clay-enhanced alkali-activated binders: A sustainable alternative to Portland cement, **Construction and Building Materials**, v. 453, p. 138860, nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138860>.

PALOMO, A.; GLASSER, F. P. Chemically-bonded Cementitious Materials Based on Metakaolin. **Journal Br. Ceram. Trans.**, v. 91, p. 107-112, 1992.

PENACHO, P.; BRITO, J.; VEIGA, M. R. Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate, **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 47–59, jul. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.007>.

PINTO, A.T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2006.

POBŁOCKI, K.; PAWLAK, M.; DRZEŹDŹON, J.; GAWDZIK, B.; JACEWICZ, D. Clean production of geopolymers as an opportunity for sustainable development of the construction industry, **Science of The Total Environment**, v. 928, p. 172579, 1 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172579>.

RODIER, L.; SAVASTANO, H. Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials, **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 333–341, 20 maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.269>.

ROVIELLO, G.; OCCHICONE, A.; DE GREGORIO, E.; RICCIOTTI, L.; CIOFFI, R.; FERONE, C.; TARALLO, O. Geopolymer-based composite and hybrid materials: The synergistic interaction between components, **Sustainable Materials and Technologies**, v. 44, p. e01404, 21 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01404>

SANTOS, G. Z. B. **Argamassa geopolimérica à base de lodo de estação de tratamento de água calcinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5532>. Acesso em: 20 set. 2024.

SANTOS, G. Z. B.; FILHO, J. A. M.; PINHEIRO, M.; MANZATO, L. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context, **Journal of Environmental Management**, v. 249, p. 109328, nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S.K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments, **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 78–90, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.

SUBHANI, M.; ALI, S.; ALLAN, R.; GRACE, A.; RAHMAN, M. Physical and mechanical properties of self-compacting geopolymer concrete with waste glass as partial replacement of fine aggregate, **Construction and Building Materials**, v. 437, p. 136956, 1 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136956>.

TAN, K. H.; DU, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties, **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 109–117, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>.

TANG, Z.; LI, W.; TAM, V. W.Y.; XUE, C. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials, **Resources, Conservation & Recycling: X**, v. 6, p. 100036, 1 maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100036>.

TURAN, E.; OLTULU, M. Towards sustainable geopolymers: Utilization of diverse calcined clays as alternative precursors. **Construction and Building Materials**, v. 484, p. 141785, jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141785>.

UYSAL, M.; AYGÖRMEZ, Y.; CANPOLAT, O.; COSGUN, T.; KURANLI, O. F. Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, v. 361, p. 129718, dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129718>.

VITRUM. **Coleta de vidro**. Macapá, 09 abr. 2024. Instagram: @vitrum.ap. Disponível em: <https://www.instagram.com/p/C5ipJPsrICv/?igsh=b2xiMWJxOG9rNjJ3>. Acesso em 01 out. 2024.

YANG, D.; WANG, P.; CHEN, W.; LIU, L.; HUANG, Y.; XIANG, X.; WANG, G.; WU, J. Effects of red mud, desert sand, and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and microstructure of fly ash-based geopolymer, **Construction and Building Materials**, v. 468, p. 140471, 20 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140471>.

YUAN, Q.; LIU, Z.; ZHENG, K.; MA, C. Chapter 3 - Portland cement concrete. **Civil Engineering Materials**, p. 59–204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00003-9>.

ZHANG, B.; HE, B.; POON, C. S. Optimizing the use of recycled glass materials in alkali activated cement (AAC) based mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120228, 10 maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120228>.